

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,**  
**MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

**DESENVOLVIMENTO DE TÉCNICAS NUCLEARES E**  
**CORRELATAS PARA ESTUDOS EM HIDROLOGIA**  
**URBANA - APLICAÇÕES NA BACIA HIDROGRÁFICA DA**  
**PAMPULHA E NO RIO DAS VELHAS, MG**

**Jefferson Vianna Bandeira**

**Belo Horizonte**

**2004**



**DESENVOLVIMENTO DE TÉCNICAS NUCLEARES E CORRELATAS  
PARA ESTUDOS EM HIDROLOGIA URBANA - APLICAÇÕES NA BACIA  
HIDROGRÁFICA DA PAMPULHA E NO RIO DAS VELHAS, MG**

**Jefferson Vianna Bandeira**



**Jefferson Vianna Bandeira**

**DESENVOLVIMENTO DE TÉCNICAS NUCLEARES E CORRELATAS  
PARA ESTUDOS EM HIDROLOGIA URBANA - APLICAÇÕES NA BACIA  
HIDROGRÁFICA DA PAMPULHA E NO RIO DAS VELHAS, MG**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Hidráulica e Recursos Hídricos

Linha de pesquisa: Hidrologia Urbana

Orientador: Prof. Dr. Márcio Benedito Baptista

Belo Horizonte  
Escola de Engenharia da UFMG

2004

B214d      Bandeira, Jefferson Vianna  
2004            Desenvolvimento de técnicas nucleares e correlatas para estudos em hidrologia urbana – Aplicações na bacia hidrográfica da Pampulha e no Rio das Velhas, MG/ Jefferson Vianna Bandeira.– 2004.  
                  276p. : il.

**Orientador: Márcio Benedito Baptista.**

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos. Inclui bibliografia.

1. Pampulha, Lagoa da (MG) – Teses 2. Traçadores – Teses 3. Sedimentos em suspensão – Modelos matemáticos – Teses 4. Impacto ambiental – Teses 5. Sedimentos (Geologia) – Contaminação – Teses 6. Dragagem – Teses I. Baptista, Márcio Benedito II. Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental III. Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos IV. Título.

CDU: 556



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Av. Contorno 842 – 7º andar 30110-060 Belo Horizonte – BRASIL

Tel: 55 (31) 3238-1882 Fax: 55 (31) 3238-1882 posgrad@desa.ufmg.br


www.smarh.eng.ufmg.br

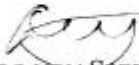
## FOLHA DE APROVAÇÃO


Desenvolvimento de Técnicas Nucleares e Correlatas para Estudos em Hidrologia Urbana Aplicações na Bacia Hidrográfica da Pampulha e no Rio das Velhas, MG

### JEFFERSON VIANNA BANDEIRA

Tese defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

  
Prof. MÁRCIO BENEDITO BAPTISTA

  
Prof. EDUARDO VON SPERLING

  
Prof. JOÃO BATISTA DIAS DE PAIVA

  
Profª MÔNICA FERREIRA DO AMARAL PORTO

  
Prof. NILO DE OLIVEIRA NASCIMENTO

  
PESQ. RUBENS MARTINS MOREIRA

Belo Horizonte, 28 de maio de 2004.





*À Eliana, Marina, Marcelo e Laura, minha família,  
razão maior da minha existência.*

*Aos meus pais, Jurandyr e Amélia que,  
de outra dimensão, da vida participam.*

*Ao Prof. Victor Freire Motta quem, com a sua brilhante  
experiência e sabedoria, me iniciou nas práticas da  
Hidráulica e da Sedimentologia.*

*Ao Dr. José Francisco Zumpano quem, com a sua competência  
em tratamento de malária, em 1994, possibilitou  
a conclusão desse trabalho, em 2004.*



*A busca do conhecimento e da paz interior, no fluir da vida,  
é como o fluir das águas e dos sedimentos em direção ao mar.  
Se interrompidos, deve-se usar de esforço e inteligência  
para que sejam retomados.*

*De quem sempre me inspira...*

*Não basta saber, é preciso também aplicar.*

*Não basta querer, é preciso agir.*

*Goethe*



## AGRADECIMENTOS

Um trabalho com a amplitude do aqui apresentado, não poderia ser realizado sem a dedicada colaboração de muitas pessoas e diversas entidades, públicas e privadas, pois abrangeu a maior parte da Bacia Hidrográfica da Pampulha e parte da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas, com amostragens variadas em mais de trinta locais, em época de seca e chuva, gerando centenas de análises laboratoriais, desenvolvimento de técnicas nucleares em laboratório, as quais foram aplicadas em experimentos de campo, em época de seca, no estudo da dinâmica de sedimento fino e água, ambos marcados com traçadores, e o tratamento e a interpretação de uma grande massa de dados gerada.

Um agradecimento inicial para o CDTN/CNEN, empregador do autor, pelo apoio institucional para a realização dessa empreitada, tendo adotado o trabalho aqui apresentado como um de seus projetos e dando todo o suporte material e humano possíveis, apesar das notórias dificuldades humanas e materiais que as instituições de pesquisa e universidades governamentais brasileiras têm atravessado, sobretudo na última década. Através da pesquisa e desenvolvimento, ao longo desses últimos anos, da nova aplicação do  $^{99m}\text{Tc}$  (radioisótopo amplamente utilizado em Medicina Nuclear) ao estudo da dinâmica de sedimentos finos em suspensão, aqui apresentada de uma forma abrangente, o CDTN/CNEN procurou oferecer à sociedade uma ferramenta extremamente poderosa e versátil, para ajudar na busca da compreensão e avaliação quantitativa de processos ambientais, de forma a contribuir para o desenvolvimento sustentável. Muitos setores prestaram colaboração ao presente trabalho:

1) O Serviço de Meio Ambiente e Técnicas Nucleares (TR1), onde o autor é lotado, colaborou em todas as fases do trabalho, entre as quais se destacam: instalação e operação de pluviógrafo no aterro sanitário de Perobas, em Contagem; construção de amostradores, coleta e manipulação de amostras; desenvolvimento da técnica de marcação de sedimento fino com  $^{99m}\text{Tc}$ ; execução de experimentos de campo nos cursos d'água a jusante com sedimento e água simultaneamente marcados, incluindo modelagem matemática dos resultados, o que possibilitou a avaliação de impactos ambientais do despejo de dragagem; medições de parâmetros físico-químicos da água e interpretação de resultados; atividades computacionais georreferenciadas efetuadas pelo Laboratório de Geoprocessamento do TR1 que resultaram em dados e mapas aqui contidos e discussões técnicas com o autor, resultando em ganhos para o trabalho. Participaram diretamente de uma ou mais destas atividades: Alberto A. Barreto, Andréa M. Barbalho,

Antônio F. Neto, Carlos A. C. Filho, Cláudio C. Camargos, Dângelle M. Oliveira (bolsista), Duarte A. Costa, Elenísio S. Fonseca, Felipe P. Lima (bolsista), George Uemura, Geraldo G. Pinto, Jair A. Marques, João P. B. Garofilo (bolsista), Lécio H. Salim, Lucas M. Dias (bolsista), Marcos M. Drumond, Maurício V. Carvalho, Namir S. Vieira, Nayron C. Lemos, Otávio E. A. Branco, Paulo C. H. Rodrigues, Pedro E. Aun, Rubens M. Moreira e Vera L. Mendes. Um agradecimento especial: ao Rubens, co-orientador deste trabalho, pelas inúmeras e coerentes sugestões para o seu desenvolvimento; ao Lécio, pela participação dedicada em muitas fases deste trabalho e na revisão metódica da redação do mesmo, incluindo também o desenvolvimento e a operação de programa computacional para a modelagem matemática da dinâmica da água e do sedimento em suspensão; aos colegas já aposentados, Pedro e Vera, que voltaram, com entusiasmo, ao Laboratório de Sedimentologia durante a segunda parte do desenvolvimento da marcação de sedimento fino com  $^{99m}\text{Tc}$ , pois sem a sua dedicada colaboração, teria sido difícil chegar aos resultados obtidos; aos colegas do Laboratório de Geoprocessamento: Alberto, João e Paulo, pela dedicação constante nos sempre trabalhosos dados, mapas e figuras georreferenciados, deste trabalho; ao Geraldo, pelos trabalhos pioneiros conjuntos com  $^{99m}\text{Tc}$  no Uruguai e, depois, no Rio Paraopeba; ao Nayron, por ter sempre colaborado na dura tarefa de coleta de amostras, muitas vezes em situações difíceis e pouco salubres; ao Felipe, pela dedicada ajuda ao longo de grande parte do trabalho, incluindo as medições de parâmetros físico-químicos e ao Dângelle, em especial, pelo mesmo motivo e pelo objetivo e eficiente tratamento dessas medições e redação de suas conclusões, e pela colaboração no tratamento: dos resultados da análise multivariada, dos experimentos de campo com traçadores e na análise compreensiva dos critérios ambientais para solos e sedimentos.

2) Do Serviço de Química e Radioquímica (TR2), colaboraram: Adilson C. Assis, Francisco S. C. Neto, Geraldo V. Andrade, Helena E. L. Palmieri, Liliam V. Leonel, Maria G. M. Linhares, Marta M. Avelar, Milton B. Franco, Nelson N. A. Filho, Oliene R. Fagundes, Raquel M. Mingote, Renata V. Cecílio (bolsista), Robson C. Oliveira; Rose M. M. Pinheiro e Sebastião P. Pimenta;

3) Do Serviço de Reator e Irradiações (TR3), houve a colaboração de: Ângela M. Amaral, Cláudia V. S. Sabino, Maria A. B. C. Menezes, Geraldo F. Kastner, Ricardo P. Carvalho (bolsista) e Zildete Rocha. Um agradecimento especial: à Cláudia, pela colaboração experiente no desenvolvimento, no Laboratório de Radioquímica, da primeira parte da marcação de sedimento fino com  $^{99m}\text{Tc}$  e também pela sugestão e colaboração decisiva no uso da análise

multivariada, utilizada para a interpretação dos resultados dos teores de metais nos sedimentos e na água; à Maria Ângela, pelo apoio na análise multivariada.

4) Da Divisão de Segurança Nuclear e Radiológica (SN), colaboraram: Antônio C. Rocha, Michel L. S. Martins, Murillo S. Junior e Tetsuaki Wakabayashi;

5) Do Serviço de Infra-estrutura (GA2) colaboraram: Augusto F. Lúcio, Geraldo M. Braga e Ladislau M. Ferreira;

6) Do Serviço de Tecnologia da Informação (GA3) colaboraram: Josidele C. R. Andrade; Lenira L. S. P. Ferreira, Nívia A. Lima e Virgínia L. Rodrigues, na obtenção de inúmeras referências bibliográficas e na formatação da listagem das mesmas, neste trabalho.

7) Do Serviço de Recursos Humanos (RH), colaborou: Getúlio A. Ramos Jr., na supervisão da edição computacional deste trabalho.

À Escola de Engenharia da UFMG, através do Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, onde o autor realizou o curso que resultou no presente trabalho, o qual foi orientado de uma forma competente, dedicada, metódica e objetiva pelo Prof. Márcio B. Baptista, a quem este autor é profundamente reconhecido. Um agradecimento aos professores Bruno R. Versiani, Celso O. Loureiro, Eduardo von Sperling e Nilo O. Nascimento, pelas frutíferas discussões técnicas em temas deste trabalho.

À Prefeitura Municipal de Belo Horizonte, através de seus órgãos: PRODABEL, pelo fornecimento de informações e mapas georreferenciados; SLU, pela permissão e colaboração efetiva no trabalho realizado no Aterro Sanitário de Belo Horizonte através de: Alessandra F. G. Oliveira, Cícero A. A. Catapreta, Heuder P. Batista, Leonardo C. Matos, Luiz C. M. Oliveira e pelo acesso às informações técnicas solicitadas; SUDECAP, pelo financiamento de parte das análises de metais em sedimentos e na água, aqui apresentadas, pela disponibilidade de ampla bibliografia sobre estudos realizados na Bacia Hidrográfica da Pampulha, incluindo também informações georreferenciadas.

À Prefeitura Municipal de Contagem, pela colaboração e apoio nos trabalhos efetuados na área do Aterro Sanitário de Perobas, através de: Cleber T. Araújo, Geraldo E. Teodoro, Herman M. Cathalat Filho e Leiviton R. C. Oliveira, incluindo a permissão para instalação de pluviógrafo e

sua operação por Dirlene M. Oliveira, o fornecimento de informações georreferenciadas do aterro e da sub-bacia do Ribeirão Sarandí, na área do município.

À AIEA pelo apoio constante ao desenvolvimento e aplicação de técnicas nucleares em Hidrologia e Sedimentologia no CDTN/CNEN, através de Antônio Plata B., Edmundo Garcia-Agudo e Luis Araguás A. incluindo, para o presente trabalho, o desenvolvimento do uso do  $^{99m}\text{Tc}$  em Sedimentologia, através do Contrato de Pesquisa: IAEA RC 10891, e possibilitando a colaboração ao mesmo através da participação, nos trabalhos de campo, de Edwin S. Sarasti S. (Equador) e de Jorge Borroto P. (Cuba). Um agradecimento muito especial ao Edmundo quem, desde Viena, via internet e, às vezes, por telefone, esteve sempre presente e teve um papel destacado nos debates técnicos no CDTN, durante o desenvolvimento da marcação de sedimento fino com  $^{99m}\text{Tc}$ .

Ao Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas, na pessoa do Sr. João I. Neiva, pelo acesso à informações georreferenciadas da bacia.

Ao CETEC, através de Édison P. Garcia, pela colaboração na revisão de dados de concentração de sedimentos em suspensão na Bacia Hidrográfica da Pampulha.

À COPASA-MG, por informações sobre parte do cadastro da rede de esgotos de Belo Horizonte.

À CPRM pela colaboração prestada por Décio A. C. Beato na identificação de poços na região a montante da Represa da Pampulha, e pela autorização para utilizar, no atual trabalho, figuras mapas e fotos de suas publicações.

À ECOGRAF e ECOAR, laboratórios de Medicina Nuclear, de Belo Horizonte, pelo fornecimento gratuito do radioisótopo  $^{99m}\text{Tc}$ , para ensaios laboratoriais e de geradores de tecnécio, de segunda semana, para trabalhos de campo. Um especial agradecimento à Ivana S. Nascimento, Médica Nuclear, pela sempre pronta colaboração neste sentido, e também pelo fornecimento de bibliografia pertinente e discussões comparativas com o autor, entre o uso de técnicas nucleares em Medicina Nuclear e em Meio Ambiente. Aos funcionários Antônio E. Cota e Dayvison L. M. Costa pela colaboração na eluição e fornecimento do  $^{99m}\text{Tc}$ .



À Engesolo Engenharia Ltda., pelas informações prestadas sobre parte da rede de drenagem pluvial do Município de Contagem.

À FAPEMIG pelo apoio a este trabalho, através do Projeto de Pesquisa: CRA - 852/98.

À Golder Associates Brasil Ltda., que colaborou, através de Mário C. Pinheiro e Aloysio P. M. Saliba, no fornecimento de informações georreferenciadas da Bacia Hidrográfica da Pampulha.

Ao IPEN, pelo fornecimento gratuito de gerador de tecnécio usado nos experimentos de campo no Rio das Velhas e no Ribeirão da Onça, em 2001.

À INFRAERO, pela permissão e colaboração nos trabalhos de campo efetuados dentro da área do Aeroporto da Pampulha.

À CBTU, pela permissão e colaboração nos trabalhos de campo efetuados dentro da área da Estação de Metrô São Gabriel.

À CECRISA (Grupo Klabin) pela permissão para efetuar trabalhos de campo no Ribeirão da Onça, em área de sua propriedade.

À PMMG pelo apoio prestado, através do seu Destacamento de Capitão Eduardo, junto à Foz do Ribeirão da Onça, aos trabalhos de campo ali realizados.

Ao Sr. Marcos Carneiro, de Santa Luzia, pela permissão para efetuar trabalhos no Rio das Velhas, em área de sua propriedade.

À Mannie Levin, da África do Sul, consultor da AIEA, pela profícua e acertada sugestão de se verificar os teores de  $^3\text{H}$  no chorume dos aterros existentes na Bacia Hidrográfica da Pampulha, como um possível traçador, disponível no ambiente, para se estudar a migração do chorume no sistema hídrico.

À Maria G. Braz, de Belo Horizonte, Engenheira Civil, pelo apoio prestado aos estudos sedimentológicos apresentados neste trabalho.

À Wilson F. Jardim, Coordenador do Laboratório de Química Ambiental – Instituto de Química, UNICAMP, Campinas, SP e à Marcos R. L. Nascimento, Pesquisador da

CNEN/DILAB (Divisão do Laboratório de Poços de Caldas, MG), pelos esclarecimentos relativos a critérios ambientais de sedimentos.

À comunidade de Belo Horizonte, em especial a da região da Pampulha, que apoia uma retirada efetiva, e não retórica, dos sedimentos que assoreiam e estão matando a Lagoa da Pampulha.

Finalmente, a todos aqueles que, de uma forma direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho o qual representa, até o presente, a síntese das atividades profissionais do autor.

## RESUMO

Este trabalho enfoca o desenvolvimento e a aplicação de técnicas nucleares e correlatas em estudos de Hidrologia Urbana. Sua principal motivação foi o estudo e viabilização de uma solução ambiental perene para o desassoreamento da Represa da Pampulha, em Belo Horizonte, Brasil, a qual está em processo acelerado de diminuição de volume líquido e de espelho d'água podendo perder, em um futuro próximo, duas de suas funções principais para as quais foi construída: amortecimento de cheias e região de lazer, com o seu espelho d'água indissolúvelmente associado às edificações de Niemeyer, formando o Complexo Arquitetônico que é o marco da moderna arquitetura brasileira. Inicialmente, foi realizado um estudo pioneiro no Brasil para avaliar o papel do  $^3\text{H}$ , presente no chorume dos aterros sanitários de Belo Horizonte e Contagem, como traçador da contaminação das águas subterrâneas em piezômetros dos aterros e em poços de regiões vizinhas. O  $^3\text{H}$ , juntamente com os teores de metais presentes na água, e medições de eletroresistividade do solo, mostrou ser de grande valia para estes estudos, se prestando também como traçador da dinâmica da água superficial no Ribeirão Ressaca. Foi efetuada a coleta e a análise de metais nas matrizes: água, sedimento de fundo e em suspensão, em toda a bacia hidrográfica e no Rio das Velhas, seguida de estudos empregando-se a análise multivariada para identificar, sobretudo a montante da represa, as origens dos metais nos sedimentos a serem dragados. Desenvolveu-se a marcação pioneira do sedimento fino com  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , amplamente usado em Medicina Nuclear. Através de experimentos de campo com injeções instantâneas e simultâneas de sedimento e água marcados, respectivamente, com  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  e Rodamina WT, estudou-se, em ocasião de seca, a capacidade de hidrotransporte em um trecho de 25km, desde o Ribeirão Pampulha até o Rio das Velhas, a jusante de Santa Luzia. Aos dados obtidos foi aplicado e calibrado um modelo matemático recente e, através de convolução, simulou-se o despejo de dragagem, calculando-se o impacto ambiental físico: aumento de concentração e possibilidade de sedimentação em função do material despejado. Avaliou-se a possibilidade de dessorção, através de medições dos parâmetros físico-químicos da água, dos metais já adsorvidos no sedimento a ser dragado. Concluiu-se que não há impedimento para o despejo de material fino nos cursos d'água a jusante. É feita uma abordagem compreensiva dos critérios de qualidade ambiental para solos e sedimentos e sugerem-se melhorias, em função dos estudos aqui realizados, à Proposta de Resolução do CONAMA, de 2003, para avaliação do material a ser dragado em águas jurisdicionais brasileiras e o licenciamento ambiental de sua disposição final.



## ABSTRACT

This work deals with the development and application of nuclear and correlate techniques in Urban Hydrology studies. Its main motivation was the study and viability of an environmental and perennial solution to dredge the fine sediment that accretes the Pampulha reservoir, in Belo Horizonte, Brazil, which is in an accelerated process of decrease of its liquid volume and water surface. With this tendency, the reservoir could lose, in a near future, two of the main purposes for which it was built: flood damping and leisure region, with its water surface indubitably attached to the Niemeyer buildings, forming the Architectonic Complex which is the landmark of the modern Brazilian Architecture. Initially, a pioneer study in Brazil was made to evaluate the performance of the  $^3\text{H}$ , present in the leaching of the landfills of Belo Horizonte and Contagem cities, as a tracer for the contamination of the groundwater in piezometers of the landfills and in wells of the neighbouring regions. The  $^3\text{H}$ , together with the content of metals present in water and the measurement of the soil electrical resistivity, proved to be valuable for these studies and also as a tracer for hydrodynamic studies of the superficial water in the Ressaca creek. Sampling and analyses of metals were performed in the matrix: water, bottom and suspended sediment, in all the hydrographic basin and in Velhas river. They were followed by studies, employing the multivariate analysis, designed to identify, mainly in the region upstream the reservoir, the origin of the metals present in the fine sediment to be dredged. The pioneer labelling of fine sediment with  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , broadly used in Nuclear Medicine, was performed. Field experiments, with simultaneous and instantaneous injections of sediment and water, labelled, respectively, with  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  and Rhodamine WT, were performed, in dry season, to measure the hydrotransport capability in a stretch of 25km, since Pampulha creek until Velhas river, inclusively. A recent mathematical model was applied and calibrated to the data obtained and, through convolution, the sediment dumping using the LDD system was simulated, calculating also, the physical environmental impacts: increase of sediment concentration and the possibility of deposition. Through the measurement of physical-chemical parameters of the water, the possibility of desorption of the metals adsorbed in the sediment to be dredged, was evaluated. It was concluded that there is no impediment for the dumping of the dredged fine sediment in the watercourses downstream. A comprehensive analysis of soil and sediment environmental criteria was performed and improvements were suggested to the Resolution Proposal of CONAMA, from 2003, for the evaluation of the material to be dredged in Brazilian jurisdictional waters and the environmental licensing of its final disposal.



# SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS .....	i
RESUMO .....	vii
ABSTRACT.....	ix
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS .....	xv
LISTA DE FIGURAS .....	xix
LISTA DE TABELAS .....	xxv
O AGLOMERADO URBANO: UM SER VIVO .....	xxix
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS .....	13
2.1 Objetivos: geral e específicos.....	13
2.2 Discussão sobre os objetivos específicos.....	13
2.2.1 Avaliação da contaminação ambiental devido ao chorume produzido nos aterros sanitários .....	13
2.2.2 Avaliação da distribuição de metais nos sedimentos em suspensão, de fundo, e na água da Bacia Hidrográfica da Pampulha, desde as cabeceiras até o Rio das Velhas.....	14
2.2.3 Avaliação do impacto ambiental do possível despejo, nos cursos d'água a jusante, de sedimento fino dragado na Represa da Pampulha. ....	16
3 CONTEXTO DO ESTUDO .....	19
3.1 A Bacia Hidrográfica da Pampulha.....	19
3.2 A Represa da Pampulha e seus problemas sedimentológicos.....	20
3.2.1 A degradação da Represa da Pampulha .....	20
3.2.2 Os trabalhos de dragagem efetuados até o presente.....	22
3.2.3 Providências para a restauração da Represa da Pampulha.....	24
3.2.4 Considerações sobre a dragagem de reservatórios com a transposição de sedimentos para os cursos d'água a jusante e suas vantagens ambientais.....	28
3.3 Critérios de qualidade ambiental para solos e sedimentos.....	30
3.3.1 Colocação do problema.....	30
3.3.2 Alguns critérios para solos adotados na literatura internacional e para solos e sedimentos adotados na literatura nacional.....	34
3.3.2.1 Critério alemão .....	34
3.3.2.2 Critério holandês .....	35
3.3.2.3 Critério norte-americano .....	37
3.3.2.4 Critério brasileiro para solos .....	37
3.3.2.5 Critério brasileiro para sedimentos - QUALISED .....	40
3.3.2.6 Proposta de Resolução do CONAMA .....	42
3.4 O uso de traçadores radioativos na marcação de sedimentos finos em apoio à dragagem em geral - considerações prévias para a sua utilização na Represa Pampulha.....	46
3.5 Marcação de sedimento fino com traçador radioativo de meia vida curta.....	55
3.5.1 Propriedades do <sup>99m</sup> Tc e sua utilização em Medicina Nuclear .....	56

3.5.2	Antecedentes que conduziram ao desenvolvimento do processo de marcação de sedimentos finos com $^{99m}\text{Tc}$ .....	58
3.6	O uso do teor de trítio ( $^3\text{H}$ ) como um indicador da contaminação das águas por lixiviação - considerações prévias para a sua utilização no estudo dos aterros sanitários existentes nas cabeceiras dos ribeirões Ressaca e Sarandí.....	61
4	UTILIZAÇÃO DO TEOR DE TRÍTIO ( $^3\text{H}$ ) COMO UM INDICADOR DA CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS POR LIXIVIAÇÃO DOS ATERROS SANITÁRIOS EXISTENTES NAS CABECEIRAS DOS RIBEIRÕES RESSACA E SARANDÍ.....	65
4.1	Preliminares.....	65
4.2	Contextualização.....	67
4.3	Desenvolvimento do trabalho.....	70
4.3.1	Resultados para água superficial - Campanhas de 1999 e 2000.....	70
4.3.2	Resultados para água subterrânea e superficial - Campanha de 2002.....	74
5	ESTUDO DO CONTEÚDO DE METAIS E OUTROS ELEMENTOS QUÍMICOS NOS SEDIMENTOS E NA ÁGUA.....	85
5.1	Introdução.....	85
5.2	Metodologia.....	88
5.2.1	Coletas e preparação das amostras.....	88
5.2.2	Técnicas de análise.....	93
5.2.2.1	Espectrometria de Absorção Atômica.....	93
5.2.2.2	Ativação Neutrônica.....	95
5.3	Resultados obtidos.....	95
5.4	Análise e discussão dos resultados.....	105
5.4.1	Análise multivariada.....	105
5.4.1.1	Introdução.....	105
5.4.1.2	Considerações preliminares sobre os dados e a respeito da metodologia de sua utilização ambiental.....	109
5.4.1.3	Resultados relativos à avaliação geral (água, sedimento de fundo e suspensão).....	112
5.4.1.4	Avaliação das amostras do Tipo 1 (água).....	112
5.4.1.5	Avaliação das amostras do Tipo 2 (sedimento de fundo: SDFU).....	116
5.4.1.6	Avaliação das amostras do Tipo 3 (sedimento em suspensão: SDSU).....	124
5.4.1.7	Resumo das estações onde ocorrem picos.....	132
5.4.2	Regiões de origem dos metais a montante da Represa da Pampulha.....	135
5.4.3	Comparação de teores de metais em sedimentos de fundo e em suspensão da Bacia Hidrográfica da Pampulha—com os de solos e de sedimentos de reservatórios brasileiros.....	138
5.4.4	Comparação: sedimento de fundo, em suspensão e na água da Bacia Hidrográfica da Pampulha com valores de CONAMA (2003) e de CETESB (2001).....	141
5.4.4.1	Represa da Pampulha.....	141
5.4.4.2	Jusante da represa.....	142
5.4.5	Comparação entre teores de metais dos sedimentos de fundo da Represa da Pampulha e de algumas represas paulistas; comparação com níveis de referência geológico geral e com valores de CONAMA (2003) e de CETESB (2001).....	142



5.4.6	Considerações sobre os critérios ambientais para solos e sedimentos e seu aprimoramento - Estabelecimento de uma metodologia para avaliação do impacto ambiental da dragagem da Represa da Pampulha.....	143
6	DESENVOLVIMENTO DO $^{99m}\text{Tc}$ COMO TRAÇADOR PARA SEDIMENTO FINO EM SUSPENSÃO .....	147
6.1	Introdução.....	147
6.2	Metodologia .....	151
6.3	Resultados .....	152
6.3.1	Estudos de fixação do $^{99m}\text{Tc}$ ao sedimento fino da Represa da Pampulha .....	152
6.3.1.1	Química do tecnécio .....	152
6.3.1.2	Estudos em laboratório .....	153
6.3.1.2.1	Redução do pertecniato.....	153
6.3.1.2.2	Influência do pH .....	155
6.3.1.2.3	Concentração do sedimento .....	155
6.3.1.2.4	Tempo de contato .....	156
6.3.1.2.5	Dessorção do $^{99m}\text{Tc}$ .....	156
6.3.2	Estudo da influência da marcação no comportamento hidrodinâmico do sedimento fino em suspensão.....	157
6.3.2.1	Introdução.....	157
6.3.2.2	Considerações sobre os sedimentos finos .....	157
6.3.2.3	Estudos em laboratório .....	159
6.3.2.4	Resultados e discussão .....	161
6.4	Conclusões dos estudos de marcação do sedimento fino com $^{99m}\text{Tc}$ .....	169
7	TRABALHOS DE CAMPO MARCANDO ÁGUA E SEDIMENTO .....	173
7.1	Introdução.....	173
7.2	Descrição dos experimentos e resultados obtidos.....	173
7.2.1	Primeiro experimento (Ribeirões Pampulha e Onça) - 27/09/2000.....	173
7.2.2	Segundo experimento (Ribeirão da Onça) - 03/10/2000 .....	177
7.2.3	Terceiro experimento (Rio das Velhas) - 26/06/2001.....	179
7.2.4	Quarto experimento (Ribeirão da Onça) - 03/07/2001 .....	181
8	AJUSTE DE MODELO MATEMÁTICO AOS RESULTADOS OBTIDOS COM OS ESTUDOS DE CAMPO SOBRE A DINÂMICA DA ÁGUA E DO SEDIMENTO EM SUSPENSÃO .....	183
8.1	Considerações iniciais.....	183
8.2	O Modelo de dispersão empregado.....	185
8.2.1	Comentários sobre modelos de dispersão .....	185
8.2.2	O modelo de Singh & Beck .....	187
8.2.2.1	Metodologia .....	187
8.2.2.2	Propagação da concentração .....	188
8.3	Aplicação e calibração do modelo de Singh & Beck com os dados de campo.....	190
8.3.1	Preparação dos dados.....	190
8.3.2	Aplicação e calibração .....	194
8.3.3	Resultados das simulações.....	195
8.3.3.1	Experimento nos ribeirões Pampulha e Onça (27/09/2000).....	195
8.3.3.2	Experimentos no Ribeirão da Onça (03/10/2000 e 03/07/2001).....	199
8.3.3.3	Experimento no Rio das Velhas (26/06/2001) .....	203
8.3.3.4	Comentários gerais sobre os resultados .....	204

9	SIMULAÇÃO DO DESPEJO DE DRAGAGEM DA REPRESA DA PAMPULHA NOS CURSOS D'ÁGUA A JUSANTE E AVALIAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS DELE DECORRENTES .....	205
9.1	Considerações iniciais .....	205
9.2	Simulação do despejo de dragagem (DLD).....	206
9.2.1	Resultados considerando advecção, dispersão e diluição .....	207
9.2.1.1	Estudo paramétrico das concentrações resultantes do despejo de dragagem .....	214
9.2.2	Resultados considerando advecção, dispersão, diluição e decantação.....	218
9.2.2.1	Considerações sobre a detecção, em rios, de sedimento em suspensão marcado com <sup>99m</sup> Tc e aspectos das detecções efetuadas neste trabalho .....	218
9.2.2.2	Sistemática de cálculos adotada.....	221
9.2.2.3	Resultados obtidos .....	225
9.2.3	Considerações sobre os impactos físicos do despejo de dragagem.....	228
9.3	Parâmetros físico-químicos como ferramenta de estudo.....	229
9.3.1	Análise dos parâmetros físico-químicos medidos e sua influência na adsorção de <sup>99m</sup> Tc e metais em sedimentos finos.....	230
10	CONCLUSÕES, RECOMENDAÇÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	237
10.1	Conclusões.....	237
10.1.1	O trítio presente no chorume de aterros sanitários como traçador em estudos ambientais.....	237
10.1.2	Estudo da distribuição de metais na água, nos sedimentos de fundo e em suspensão, na Bacia Hidrográfica da Pampulha e no Rio das Velhas.....	238
10.1.3	Desenvolvimento da marcação de sedimento fino com <sup>99m</sup> Tc.....	243
10.1.4	Estudo da capacidade de hidrotransporte de cursos d'água a jusante da Represa da Pampulha e no Rio das Velhas .....	244
10.1.5	Avaliação de impactos ambientais do despejo de sedimento fino em cursos d'água e da possibilidade de dessorção de metais nele presentes.....	246
10.1.6	Metodologia empregada, resultados alcançados, sua consideração em função de critérios de qualidade ambiental para solos e para aperfeiçoar a Proposta de Resolução sobre a disposição final do material dragado (CONAMA, 2003) .....	247
10.2	Recomendações .....	248
10.3	Considerações finais.....	250
11	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	253
	ANEXO 1 - Coordenadas UTM (Datum SAD 69) dos pontos de medição.....	269
	ANEXO 2 - Saídas do programa SYSTAT® (sedimento de fundo e em suspensão).....	273

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

AIEA = Agência Internacional de Energia Atômica.

ANA = Agência Nacional de Águas

ANP = *Administración Nacional de Puertos*, Uruguai.

Bq = Becquerel - unidade de medida de radioatividade. 1Bq = 1cps.

AAN = Análise por Ativação Neutrônica.

ACP = Análise de Componentes Principais (método estatístico multivariado).

ASP = Aterro Sanitário de Perobas (Município de Contagem, MG).

CBTU = Companhia Brasileira de Trens Urbanos.

CDTN = Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear.

CEASA = Central de Abastecimento (situada no Município de Contagem).

CETEC = Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais.

CETESB = Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental, SP.

Ci = Curie - unidade de medida de radioatividade. 1 Ci =  $3,7 \times 10^{10}$  cps (ou Bq).

CNEN = Comissão Nacional de Energia Nuclear.

CONAMA = Conselho Nacional do Meio Ambiente.

COPASA-MG = Companhia de Saneamento de Minas Gerais.

CPRM = Serviço Geológico do Brasil.

CQS = Critério de Qualidade de Sedimentos.

DINATEN = *Dirección Nacional de Tecnología Nuclear*, Uruguai.

$D_L$  ou  $D$  = Coeficiente de dispersão longitudinal = coeficiente de dispersão ( $m^2/s$ ).

DLD = Dragagem de Longa Distância.

dps ou cps = desintegração ou contagem por segundo.

EAA = Método analítico de Espectrometria de Absorção Atômica.

ECOAR = Laboratório de Medicina Nuclear (Belo Horizonte).

ECOGRAF = Laboratório de Medicina Nuclear (Belo Horizonte).

ERH/UFMG = Departamento de Engenharia Hidráulica e Recurso Hídricos da Escola de Engenharia da UFMG.

EPA = "*Environmental Protection Agency*". Agência de Proteção Ambiental, EUA.

FAPEMIG = Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais.

ICP/AES = Método analítico de Espectrometria de Emissão Atômica por Plasma Indutivamente Acoplado.

IEPHA = Instituto Estadual do Patrimônio Histórico e Artístico, MG.

INFRAERO = Empresa Brasileira de Infra-estrutura Aeroportuária.

IPEN = Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares.

IPR = Instituto de Pesquisas Radioativas (atual CDTN/CNEN).

PBH = Prefeitura Municipal de Belo Horizonte.

PCH = Pequena Central Hidrelétrica.

MMS = *Minerals Management Service*. Órgão do *U.S. Department of Interior*.

PMMG = Polícia Militar de Minas Gerais.

PRODABEL = Empresa de Informática e Informação do Município de Belo Horizonte.

PROJETO GEF-São Francisco = Projeto de Gerenciamento Integrado das Atividades Desenvolvidas em Terra na Bacia do Rio São Francisco, sendo uma parceria entre o Fundo para o Meio Ambiente Mundial "*Global Environmental Fund*" (GEF) e o Governo Federal.

PROPAM = Programa de Recuperação e Desenvolvimento Ambiental da Bacia da Pampulha.

PROSAM = Programa de Saneamento Ambiental da Região Metropolitana.

QUALISED = Grupo de estudos para a qualidade de sedimentos formado pela UFSCAR, UNICAMP e CETESB.

SLU = Superintendência de Limpeza Urbana (órgão da PBH).

SUDECAP = Superintendência de Desenvolvimento da Capital (órgão da PBH).

$T_{1/2}$  = meia-vida radioativa (tempo necessário para desintegrarem metade dos átomos radioativos de uma amostra).

UFMG = Universidade Federal de Minas Gerais.

UNICAMP = Universidade Estadual de Campinas, SP.

UFSCAR = Universidade Federal de São Carlos, SP.

WOU = *Western Oregon University*.

$^{198}\text{Au}$  = radioisótopo do  $^{197}\text{Au}$  ( $T_{1/2} = 2,7$  dias, emissor de radiação  $\gamma$  de 410keV).

$^{82}\text{Br}$  = bromo, radioisótopo do  $^{81}\text{Br}$  ( $T_{1/2} = 36$  horas e emissor de radiação  $\gamma$ , com energias variando entre 0,55 e 1,48MeV)

$^3\text{H}$  = Trítio, radioisótopo do  $^1\text{H}$ , ( $T_{1/2} = 12,3$  anos, emissor  $\beta$  de 18keV).

$^{46}\text{Sc}$  = escândio, radioisótopo do  $^{45}\text{Sc}$  ( $T_{1/2} = 84$  dias e emissor de radiação  $\gamma$ , com energias de 0,89 e 1,12MeV)

$^{99\text{m}}\text{Tc}$  = Tecnécio 99m - meta-estável, radionuclídeo resultante do decaimento do  $^{99}\text{Mo}$  ( $T_{1/2} = 6,02$  horas,  $\gamma = 140\text{keV}$ ).

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Bacia Hidrográfica da Pampulha, a montante da represa e mapa de situação. Fonte: CPRM (2001) .....	1
Figura 1.2 - Foto aérea da Represa da Pampulha, 1964, escala original 1:60.000. Em destaque áreas assoreadas. Fonte: CPRM (2001).....	2
Figura 1.3 - Montagem a partir de fotos aéreas da represa, 1981, escala original 1:30.000. Fonte: CPRM (2001).....	2
Figura 1.4 - Recorte de imagem de satélite (Ikonos II), Represa da Pampulha, 2000, (resolução 1m). Fonte: CPRM (2001).....	2
Figura 1.5 - Variação do volume de reservação da Represa da Pampulha. Adaptado de CPRM (2001). Nota: Para 1957 e 1989 o volume se refere à cota 801,3m e para os demais anos: 801,1m. Fonte de levantamentos: SUDECAP (1985) e SALIM <i>et</i> <i>al.</i> (2000).....	3
Figura 1.6 - Região de estudos na Bacia Hidrográfica da Pampulha e Rio das Velhas .....	10
Figura 3.1 - Gerador de tecnécio ( $^{99m}\text{Tc}$ ). Adaptado de CNEN/IPEN, [s.d.] .....	57
Figura 3.2 - $^{99}\text{Mo}$ e $^{99m}\text{Tc}$ em equilíbrio secular, ilustram o princípio do gerador de radioisótopo. Adaptado de SANDLER <i>et al.</i> (1996).....	58
Figura 4.1 - Chuva acumulada mensal. Estação pluviométrica do aterro sanitário de Perobas (ASP) - Contagem, MG.....	68
Figura 4.2 - Teores de trítio na água superficial do Ribeirão Ressaca.....	73
Figura 4.3 - Estações de coleta de água em 2002, para análise simultânea dos teores de $^3\text{H}$ e de alguns metais (Aterro Sanitário da SLU, Belo Horizonte).....	75
Figura 4.4 - Estações de coleta de água em 2002, para análise simultânea dos teores de $^3\text{H}$ e de alguns metais e pluviômetro (Aterro Sanitário de Perobas - ASP, Contagem.....	75
Figura 4.5 - Estações de coleta de água em 2002, para análise simultânea dos teores de $^3\text{H}$ e de alguns metais (poços e cisternas ao longo dos ribeirões Sarandí e Ressaca).....	76
Figura 4.6 - Valores condutividade elétrica do solo e localização de alguns poços na região do Aterro Sanitário da SLU, em Belo Horizonte. Adaptado de CPRM (2001).....	83
Figura 5.1 - Represa da Pampulha com pontos de amostragem de sedimentos de fundo .....	90
Figura 5.2 - Amostradores Rock Island (o da esquerda em aço inox) .....	90
Figura 5.3 - Trado motorizado .....	91
Figura 5.4 - Bombona plástica de 20L e outros amostradores de água - Estação S2.....	92
Figura 5.5 - Variação do fator F1 com a coleta, região e pontos das regiões (água).....	114
Figura 5.6 - Teores de Zn, Cr e Ni na água.....	114
Figura 5.7 - Teores de Cu na água.....	115
Figura 5.8 - Teores de Mn na água.....	116
Figura 5.9 - Teores de Al na água.....	116
Figura 5.10 - Teores de Pb na água.....	116
Figura 5.11 - Variação do fator F1 com a coleta, região e pontos das regiões (sed. fundo).....	117

Figura 5.12 - Teores de Co no sedimento de fundo.....	118
Figura 5.13 - Teores de Pb no sedimento de fundo .....	118
Figura 5.14 - Teores de K no sedimento de fundo.....	119
Figura 5.15 - Teores de Na no sedimento de fundo.....	119
Figura 5.16 - Variação do fator F2 com a coleta, região e pontos das regiões (sed. fundo).....	120
Figura 5.17 - Teores de Cu no sedimento de fundo.....	121
Figura 5.18 - Teores de Zn no sedimento de fundo.....	121
Figura 5.19 - Teores de Hg no sedimento de fundo.....	121
Figura 5.20 - Variação do fator F3 com a coleta, região e pontos das regiões (sed. fundo).....	123
Figura 5.21 - Teores de Ni no sedimento de fundo.....	124
Figura 5.22 - Teores de Cr no sedimento de fundo.....	124
Figura 5.23 - Teores de Ti no sedimento de fundo.....	124
Figura 5.24 - Variação do fator F1 com a coleta, região e pontos das regiões (sed. susp.) .....	125
Figura 5.25 - Teores de Co no sedimento em suspensão.....	126
Figura 5.26 - Teores de Ba no sedimento em suspensão.....	126
Figura 5.27 - Teores de Fe no sedimento em suspensão.....	126
Figura 5.28 - Teores de Mn no sedimento em suspensão.....	126
Figura 5.29 - Variação do fator F2 com a coleta, região e pontos das regiões (sed. susp.) .....	127
Figura 5.30 - Teores de Cu no sedimento em suspensão.....	128
Figura 5.31 - Teores de Ni no Sedimento em suspensão.....	128
Figura 5.32 - Teores de Pb no sedimento em suspensão .....	128
Figura 5.33 - Teores de Zn no sedimento em suspensão.....	128
Figura 5.34 - Teores de Cr no Sedimento em suspensão.....	128
Figura 5.35 - Variação do fator F3 com a coleta, região e pontos das regiões (sed. susp.) .....	130
Figura 5.36 - Teores de Cd no sedimento em suspensão.....	131
Figura 5.37 - Teores de Ti no sedimento em suspensão.....	131
Figura 5.38 - Teores de Ta no sedimento em suspensão .....	131
Figura 5.39 - Teores de K no sedimento em suspensão.....	131
Figura 5.40 - Teores de V no sedimento em suspensão.....	131
Figura 5.41 - Áreas de contribuição do escoamento superficial às estações de monitoramento, baseadas apenas no relevo topográfico.....	136
Figura 6.1 - Efeito da natureza do agente redutor na adsorção do <sup>99m</sup> Tc no sedimento fino .....	154
Figura 6.2 - Variação da adsorção do <sup>99m</sup> Tc em 100 mg de sedimento com a massa de SnCl <sub>2</sub> .....	154
Figura 6.3 - Efeito do pH na adsorção do <sup>99m</sup> Tc pelo sedimento fino.....	155
Figura 6.4 - Influência da concentração na adsorção do <sup>99m</sup> Tc pelo sedimento fino.....	155
Figura 6.5 - Influência do tempo de contato na adsorção do <sup>99m</sup> Tc pelo sedimento fino .....	156
Figura 6.6 - Dessorção do <sup>99m</sup> Tc para várias concentrações de sedimento fino em suspensão .....	156
Figura 6.7 - Pipeta de Andreasen (1), proveta (2) .....	157
Figura 6.8 - Sedimentação do sedimento natural em água destilada .....	162



Figura 6.9 - Sedimentação de sedimento marcado com $^{99m}\text{Tc}$ , em água destilada .....	163
Figura 6.10 - Sedimentação de sedimento marcado com $^{99m}\text{Tc}$ , em água destilada .....	163
Figura 6.11 - Sedimento marcado com $^{99m}\text{Tc}$ (Relação entre massa e atividade).....	164
Figura 6.12 - Sedimentação de sedimento marcado com $^{99m}\text{Tc}$ e com adição de defloculante ( $\text{NaPO}_3$ ) <sub>n</sub> , em água destilada (curva de massa).....	165
Figura 6.13 - Sedimentação de sedimento marcado com $^{99m}\text{Tc}$ e com adição de defloculante ( $\text{NaPO}_3$ ) <sub>n</sub> em água destilada (curva de atividade).....	165
Figura 6.14 - Comparação do comportamento deposicional dos experimentos com sedimento fino, marcado e não marcado, da Represa da Pampulha (Pipeta de Andreasen).....	166
Figura 6.15 - Sedimentação do sedimento marcado e não flocculado, em água destilada (Testes S - Tabela 6.2) (curva de massa).....	167
Figura 6.16 - Sedimentação de sedimento marcado e não flocculado, em água destilada (Testes S - Tabela 6-2) (curva de atividade).....	168
Figura 6.17 - Eficiência média de adsorção em função da massa do agente redutor (Testes S - Tabela 6.2).....	168
Figura 7.1 - Injeção e detecções no Ribeirão Pampulha (PI-1, 27/09/2000).....	174
Figura 7.2 - Curvas de passagem da água e sedimento marcados, nos ribeirões Pampulha e Onça, em 27/09/2000, a partir de injeção simultânea de traçadores em PI-1.....	175
Figura 7.3 - Injeções e detecções no Ribeirão da Onça (PI-2, 03/10/2000 e 03/07/2001).....	178
Figura 7.4 - Curvas de passagem da água e sedimento marcados, no Ribeirão da Onça, em 03/10/2000, a partir de injeção simultânea de traçadores em PI-2 .....	179
Figura 7.5 - Injeção e detecções no Rio das Velhas (PI-3, 26/06/2001).....	180
Figura 7.6 - Curvas de passagem da água e sedimento marcados, no Rio das Velhas, em 26/06/2001, a partir de injeção simultânea de traçadores em PI-3 .....	181
Figura 7.7 - Curvas de passagem da água e sedimento marcados, no Ribeirão da Onça, em 03/07/2001, a partir de injeção simultânea de traçadores em PI-2 .....	182
Figura 8.1 - Curvas de passagem da água e sedimento marcados, nos ribeirões Pampulha e Onça, em 27/09/2000, considerando extrapolações para a aplicação do modelo .....	192
Figura 8.2 - Curvas de passagem da água e sedimento marcados, no Ribeirão da Onça, em 03/10/2000, considerando extrapolações para a aplicação do modelo .....	192
Figura 8.3 - Curvas de passagem da água e sedimento marcados, no Rio das Velhas em 26/06/2001. Não foi necessário efetuar extrapolações para a aplicação do modelo	193
Figura 8.4 - Curvas de passagem da água e sedimento marcados, no Ribeirão da Onça, em 03/07/2001, considerando extrapolações para a aplicação do modelo .....	193
Figura 8.5 - Curvas de passagem (real e modelada) da água (Rodamina WT) e sedimento marcado ( $^{99m}\text{Tc}$ ), nos ribeirões Pampulha e Onça, em 27/09/2000.....	197
Figura 8.6 - Curvas de passagem (real e modelada) da água (Rodamina WT) e sedimento marcado ( $^{99m}\text{Tc}$ ), no Ribeirão da Onça, em 03/10/2000.....	201

Figura 8.7 - Curvas de passagem (real e modelada) da água (Rodamina WT) e sedimento marcado ( $^{99m}\text{Tc}$ ), no Ribeirão da Onça, em 03/07/2001.....	202
Figura 8.8- Curvas de passagem (real e modelada) da água (Rodamina WT) e sedimento marcado ( $^{99m}\text{Tc}$ ), no Rio das Velhas, em 26/06/2001.....	203
Figura 9.1 - Mapa de situação: Estações de interesse ao atual estudo, no Rio das Velhas .....	208
Figura 9.2 - Variação temporal dos perfis de concentração em estações a jusante da Represa da Pampulha, em função de despejo contínuo de dragagem (9 horas) em D1 .....	211
Figura 9.3 - Variação temporal dos perfis de concentração em estações a jusante da Represa da Pampulha, em função de três ciclos de despejo de dragagem (9 horas) em D1 .....	211
Figura 9.4 - Atenuação da concentração de sedimentos em suspensão com a diluição, para despejo de dragagem no sistema de DLD, em três locais a jusante da Represa da Pampulha .....	212
Figura 9.5 - Concentrações de Rodamina WT através de uma seção a 10,9km a jusante do ponto de injeção - Rio Waikato (Nova Zelândia). Adaptado de RUTHERFORD (1994) .....	219
Figura 9.6 - Atenuação da concentração de sedimentos em suspensão com a diluição e a decantação, para despejo de dragagem em D1, D3 e Foz do Ribeirão da Onça.....	226
Figura 9.7 - Diagrama Eh x pH para o Tc. Adaptado de Lieser <i>et al.</i> (1987).....	231
Figura 9.8 - Condutividade elétrica na água dos ribeirões Sarandí e Ressaca .....	234

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Trabalhos de dragagem efetuados até o presente (remanejamento do sedimento dentro da represa) Fonte: SUDECAP (1985, 1988, 1989,1996, 2000) e DT ENGENHARIA (1997a, 1997b).....	4
Tabela 3.1 - Valores orientadores para metais em solos de vários países .....	41
Tabela 4.1 - Resultados do teor de trítio nas águas superficiais no fim do período de seca (Nov. 1999). Método analítico: Cintilador líquido com leitura direta .....	71
Tabela 4.2 - Resultados do teor de trítio nas águas superficiais no fim do período de chuvas (Abril/2000). Método analítico: Cintilador líquido com leitura direta .....	72
Tabela 4.3 - Resultados parciais do teor de trítio (3H ) nas águas superficiais. Método analítico: Cintilador líquido com enriquecimento eletrolítico .....	73
Tabela 4.4 - Teores de <sup>3</sup> H em água subterrânea e superficial e chorume (sub-bacias dos ribeirões Ressaca e Sarandí): Métodos analíticos: Cintilador líquido com leitura direta <sup>(2)</sup> e com enriquecimento eletrolítico <sup>(3)</sup> .....	78
Tabela 4.5 - Teores de metais em água subterrânea, superficial e chorume (dos aterros sanitários de Belo Horizonte e Contagem).....	79
Tabela 4.6 - Algumas características dos poços 205, 199, 185 e 158 ao longo do Ribeirão Ressaca. Medições efetuadas em 2000 e 2001. Fonte: CPRM (2001).....	82
Tabela 5.1 - Teores de Elementos - Ribeirão Sarandí (Região 1). Coletas: 1999 e 2000.....	97
Tabela 5.2 - Teores de Elementos - Ribeirão Ressaca (Região 2). Coletas: 1999 e 2000.....	99
Tabela 5.3 - Teores de Elementos - Represa da Pampulha (Região 3) e Ribeirão Mergulhão (Região 6). Coletas: 1998, 1999, 2000 e 2001.....	101
Tabela 5.4 - Teores de Elementos - Ribeirões Pampulha e Onça (Região 4) e Rio das Velhas (Região 5). Coletas: 1999 e 2000 .....	103
Tabela 5.5 - Equivalência de nomenclaturas de amostras nas várias regiões .....	108
Tabela 5.6 - Componentes principais e elementos correspondentes na avaliação geral.....	112
Tabela 5.7 - Variáveis e probabilidades obtidas através de ANOVA para análise de metais em água.....	113
Tabela 5.8 - Variáveis e probabilidades obtidas através de ANOVA para análise de metais no sedimento de fundo .....	117
Tabela 5.9 - Teores de Cu e Zn no sedimento de fundo das estações E4 e E6.....	122
Tabela 5.10 - Variáveis e probabilidades: análise de metais no sedimento em suspensão.....	125
Tabela 5.11 - Picos de elementos presentes na água na Bacia Hidrográfica da Pampulha.....	132
Tabela 5.12 - Picos de elementos presentes no sedimento de fundo da Bacia Hidrográfica da Pampulha.....	133
Tabela 5.13 - Picos de elementos presentes no sedimento em suspensão na Bacia Hidrográfica da Pampulha.....	134
Tabela 5.14 - Comparação entre os teores de elementos presentes no sedimento de fundo da Represa da Pampulha e no sedimento em suspensão a jusante da mesma .....	134

Tabela 5.15 - Comparação entre teores de metais em sedimentos de algumas represas paulistas, níveis de referência geológico geral, valores para sedimentos dragados propostos pelo CONAMA, valores orientadores da CETESB para solos e teores de metais encontrados em sedimentos da Bacia da Pampulha. ....	139
Tabela 6.1 - Potencial normal de oxi-redução para Mn e Tc.....	152
Tabela 6.2 - Estudo das quantidades mínimas de SnCl <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O e HCl utilizadas para reduzir o Tc(VII) a Tc(IV) e marcar 5g de sedimento fino, sem que ocorra floculação.....	161
Tabela 7.1 - Experimentos de campo com marcação conjunta: sedimento fino com <sup>99m</sup> Tc e água com Rodamina WT.....	174
Tabela 8.1 - Valores de velocidade de advecção e de coeficientes de dispersão obtidos com o ajuste do modelo de Singh & Beck aos dados de campo .....	196
Tabela 9.1- Dados de vazão líquida utilizados para o cálculo de diluição.....	209
Tabela 9.2- Distâncias, velocidades e coeficientes de dispersão entre as seções estudadas.....	210
Tabela 9.3- Atenuação de concentrações considerando diluição, para lançamentos em D1, D3 e na Foz do Ribeirão da Onça.....	212
Tabela 9.4- Atenuação de concentrações para lançamentos em D1, D3 e na Foz do Ribeirão da Onça. Dados de diluição nos campos próximo e afastado.....	215
Tabela 9.5- Lançamentos em D1, D3 e na Foz do Ribeirão da Onça. Valores finais de concentração resultante do despejo de dragagem .....	215
Tabela 9.6 - Valores de concentrações naturais em época de seca .....	216
Tabela 9.7 - Resumo dos resultados médios mensais de fluxo de sedimentos em suspensão (Q <sub>ss</sub> ) das estações do Rio das Velhas (t/dia). Fonte: LIMA & SANTOS (2002).....	217
Tabela 9.8 - Contagens integradas nas seções, nos diversos experimentos.....	222
Tabela 9.9 - Dados de vazão líquida do Ribeirão da Onça utilizados no cálculo de decantação de sedimentos.....	223
Tabela 9.10 - Porcentagem do sedimento em suspensão que passa na seção de jusante ( <i>F<sub>pj</sub></i> ) e que decanta entre montante e jusante ( <i>F<sub>dmj</sub></i> ): trechos no Rio das Velhas .....	224
Tabela 9.11 - Porcentagem do sedimento em suspensão que passa na seção de jusante ( <i>F<sub>pj</sub></i> ) e que decanta entre montante e jusante ( <i>F<sub>dmj</sub></i> ).....	224
Tabela 9.12 - Porcentagem do sedimento em suspensão que passa na seção de jusante ( <i>F<sub>pj</sub></i> ) e que decanta entre montante e jusante ( <i>F<sub>dmj</sub></i> ).....	225
Tabela 9.13 - Atenuação de concentrações para lançamentos em D1, D3 e na Foz do Ribeirão da Onça, considerando diluição e decantação .....	226
Tabela 9.14 - Parâmetros físico-químicos para pontos de amostragem georreferenciados da sub-bacia da Pampulha (Ver Figura 1.6 e Anexo 1) .....	232

## O AGLOMERADO URBANO: UM SER VIVO

Todo aglomerado urbano pode, de certa forma, ser comparado a um organismo vivo. Este nasce, se desenvolve sofrendo transformações próprias a cada gênero e espécie, passa por várias etapas e acaba seu ciclo com a morte. A duração do ciclo natural de vida dos organismos vivos depende de cada espécie, excepcionalmente ultrapassando a uma centena de anos. Aquele também nasce, se desenvolve e sofre as suas transformações ditadas por várias circunstâncias e fatores. Costuma, porém, sobreviver, por muitas e muitas gerações, se comparado o seu ciclo de vida ao dos organismos vivos em geral e, inclusive, ao da raça humana, em particular, a única neste planeta que possui a habilidade de construir o aglomerado urbano, como o entendemos.

Muitos aglomerados urbanos terminam desabitados, seja pelo quase completo aniquilamento das civilizações que os construíram, como no caso de Machu Pichu, cidade Inca do Peru, e cidades Astecas e Maias da América Central, ou destruídos por agentes naturais, como: Alexandria, Pompéia, Lisboa, Kobe, Ancara e, mais recentemente, Bam, no Irã, e uma vila no Marrocos, devido a erupções vulcânicas e/ou terremotos. Outros têm sido destruídos, total ou parcialmente, por ação antrópica, como: Roma, no tempo de Nero e, mais recentemente, Londres, Volgogrado (antiga Stalingrado), Dresden, Berlim, Hiroshima, Nagasaki, Beirute, Hanói, Cabul, Jenin e Bagdá, dentre outros.

Muitas cidades, totalmente destruídas, são reconstruídas, o que não é possível de ocorrer com os seres vivos. Porém, tanto as cidades quanto os seres vivos são passíveis de sofrerem correções de partes dos seus órgãos, em caso de mau funcionamento dos mesmos.

O que provoca o mau funcionamento de um determinado órgão de um ser humano ou de um aglomerado urbano? No caso do ser humano a causa pode ter origem genética ou em decorrência de maus hábitos (alimentares e de comportamento, entre outros). Já no caso do aglomerado urbano, este só pode advir de maus hábitos, decorrentes da falta de planejamento e atuação preventiva no gerenciamento do ambiente urbano.

Assim como um ser humano doente pode e deve sofrer uma intervenção corretiva, o mesmo ocorre com a cidade doente. Porém, o difícil é o ser humano quando nos cuidados de si mesmo, ou os vários seres humanos, quando no cuidado do aglomerado urbano (seu ambiente de vida),

tirarem as lições do comportamento que gerou a doença e utilizá-las para o aperfeiçoamento de seu comportamento futuro, na tentativa de evitar a repetição dos erros ou na prevenção de novos. É uma questão de desenvolvimento cultural e social do ser humano e da coletividade que ele compõe.

Belo Horizonte é uma cidade que foi projetada no início da última década do século XIX, logo após a Proclamação da República, para ser a nova capital da Província de Minas Gerais, em substituição a Ouro Preto. A sua construção ocorreu entre 1894 e 1897, incluindo a região ocupada pelo antigo Arraial do Curral Del Rey. Foi oficialmente inaugurada em 12 de dezembro de 1897.

O seu desenvolvimento urbano inicial ocorreu dentro do perímetro para a qual foi projetada, compreendido pela Avenida do Contorno, conforme pode ser visto na página 31 de FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO (1997), na Planta Geral da "Cidade de Minas", nome como foi inaugurada a nova capital. A área fora do perímetro desta avenida, na concepção original da equipe projetista, chefiada pelo Eng. Aarão Reis, estava sobretudo destinada à existência de pequenas propriedades rurais (chácaras) para a produção de hortaliças e frutas, para o abastecimento dos habitantes da nova capital. O autor deste trabalho se lembra de algumas casas ainda existentes nas décadas de 50 e 60, no Bairro da Serra, que foram sedes de chácaras, a quase totalidade das mesmas atualmente já demolidas, para dar lugar a edifícios. É o "ser vivo", aglomerado urbano, se modificando incessantemente.

É interessante iniciar-se um trabalho científico e técnico com esta visão pois, a Ciência e a Técnica nada mais são do que ferramentas que nós, seres humanos, utilizamos para o nosso aperfeiçoamento e, conseqüentemente, para o do ambiente onde a maioria de nós vive: o urbano.

Dessa forma, antes de abordar as várias proposições do presente trabalho, procurou-se avaliar, de uma forma sistêmica, os seus locais de atuação: a Bacia Hidrográfica da Pampulha e o Rio das Velhas, sobretudo a jusante da foz do Ribeirão da Onça, começando pelo papel representado por eles para as comunidades que os habitam. Em seguida, quais seriam as possibilidades físicas e materiais para contribuir, com o desassoreamento efetivo, e não retórico, da Represa da Pampulha e com a avaliação do impacto ambiental do despejo de material fino dragado, nos cursos d'água a jusante. Esta é, no longo prazo, a única possibilidade

viável de se manter viva a represa, cumprindo duas das finalidades importantes para as quais foi construída: amortecimento de cheias e área de lazer.

Note-se que uma externalidade da implantação de barramentos nos cursos d'água, como no caso da Represa da Pampulha, é a retenção de grande parte da carga de sedimentos (arenosos e silto-argilosos - vetores importantes no transporte de nutrientes e matéria orgânica) no reservatório, impedindo o seu curso natural até o mar. Isto trás conseqüências danosas para os trechos a jusante, mesmo em rios regularizados pois o escoamento, com determinada capacidade de transportar sedimentos vai supri-la, provocando erosões e causando alterações no talvegue e na geometria das margens. No longo prazo (décadas), esta influência é sentida, na região da embocadura, de duas formas: 1) a diminuição do aporte de nutrientes e matéria orgânica que acabam fazendo falta nos ecossistemas de jusante produz, por exemplo, uma queda drástica na taxa de piscosidade no estuário e no mar adjacente; 2) a diminuição do aporte de sedimentos arenosos de origem continental, rompe o equilíbrio dinâmico da embocadura causando graves erosões, como no Povoado de Cabeço, na embocadura do Rio São Francisco (PROJETO GEF - São Francisco, 2002), após os barramentos que se iniciaram com a Hidrelétrica de Paulo Afonso, na década de 40 do século passado.

Tendo o autor enorme apreço pela "Lagoa da Pampulha", como é carinhosamente conhecida a represa, freqüentando o seu entorno desde a sua infância; tendo depois ali praticado o remo, na década de 60, quando estudante de graduação em Engenharia Mecânica na Universidade de Minas Gerais (UMG - atual UFMG), remando até a Enseada do Jardim Zoológico, a mais a esquerda (Figura 1.2) e tornando-se, mais tarde, servidor do IPR/UFMG/CNEN, atual CDTN/CNEN, onde passou a trabalhar com pesquisa e aplicação de técnicas nucleares em Sedimentologia e Hidrologia, nada mais natural do que utilizar o seu campo de atuação para ajudar a solucionar o terrível sofrimento que este órgão do corpo ambiental vivo está a padecer: o acentuado assoreamento, desde a década de 70 (figuras 1.3 e 1.4).

Assim, desde os contatos iniciais com a comunidade técnica que cuida do problema do assoreamento da Represa da Pampulha, o que ocorreu no seminário havido no Colégio Santa Marcelina, em Belo Horizonte, em 15 e 16 de dezembro de 1995, o autor foi montando o arcabouço de sua colaboração, que espera continuar prestando à coletividade e que se encontra sintetizada, até agora, no presente trabalho, pouco mais de 8 anos passados dos primeiros contatos.





# 1 INTRODUÇÃO

A região da Pampulha, na concepção original de Belo Horizonte, era destinada a atividade rural. Assim, de 1897 até a década de 30 esta foi a sua ocupação predominante, quando teve início a primeira modificação de monta, com o início da construção da barragem e Represa da Pampulha, em 1936. A inauguração se deu em 1938. A barragem rompeu em 1954 e foi novamente reconstruída, tendo sido reinaugurada em 31 de janeiro de 1958.

Com a evolução desordenada da urbanização da região, a montante da represa (Figura 1.1), houve aumento da produção de sedimentos e o conseqüente assoreamento do reservatório (figuras 1.2 a 1.4), o qual se acentuou a partir da década de 70 (BAPTISTA *et al.* 1995), (OLIVEIRA, 1996), (OLIVEIRA & BAPTISTA, 1997), estando atualmente na faixa de 400.000m<sup>3</sup>/ano, somente na porção da represa compreendida entre a Ilha dos Amores e a barragem, conforme comparação dos dois últimos levantamentos batimétricos efetuados nesta região (FIORAVANTE *et al.* 1995), (SALIM *et al.* 2000).

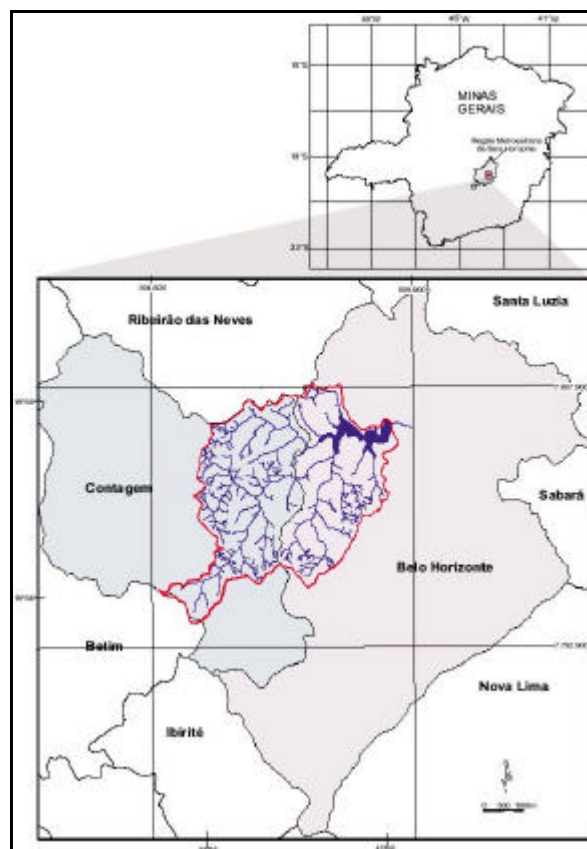


Figura 1.1 - Bacia Hidrográfica da Pampulha, a montante da represa e mapa de situação.  
Fonte: CPRM (2001)



Figura 1.2 - Foto aérea da Represa da Pampulha, 1964, escala original 1:60.000. Em destaque áreas assoreadas. Fonte: CPRM (2001)

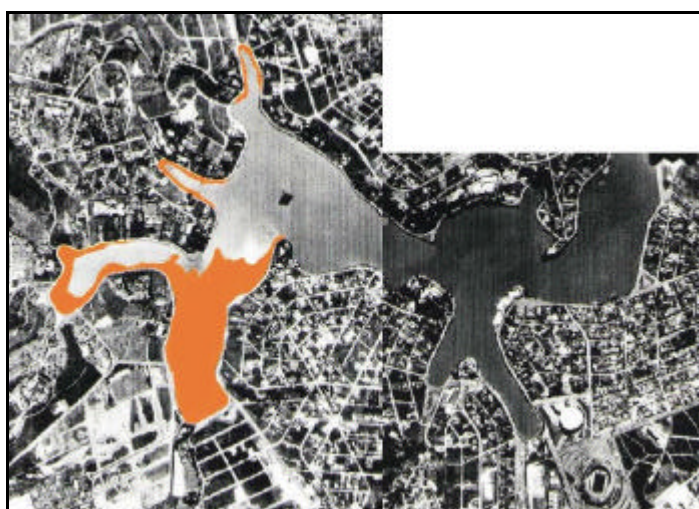


Figura 1.3 - Montagem a partir de fotos aéreas da represa, 1981, escala original 1:30.000. Fonte: CPRM (2001)



Figura 1.4 - Recorte de imagem de satélite (Ikonos II), Represa da Pampulha, 2000, (resolução 1m). Fonte: CPRM (2001)

Em conseqüência, a represa já perdeu cerca de 10.000.000m<sup>3</sup> de seu volume inicial (Figura 1.5) e cerca de 100ha de seu espelho d'água inicial que eram, respectivamente, de 18.100.000m<sup>3</sup> e 300ha em 1958, sendo a sua cota máxima de enchimento igual a 801,14m acima do nível médio do mar. O assoreamento da região mencionada se deve praticamente (quase 100%) à contribuição de sedimentos silto-argilosos, conforme BANDEIRA *et al.* (2002b), uma vez que o material de granulometria mais graúda (areia e silte grosso) se decanta, sobretudo na região dos canais que circundam a ilha formada pelo despejo de dragagem, como já estudado em SUDECAP (1988) e BAPTISTA & PINHEIRO (1992). Segundo OLIVEIRA (1996) e DT ENGENHARIA (1997a), os sedimentos finos representam cerca de 70% do total do material sedimentado em toda a represa.

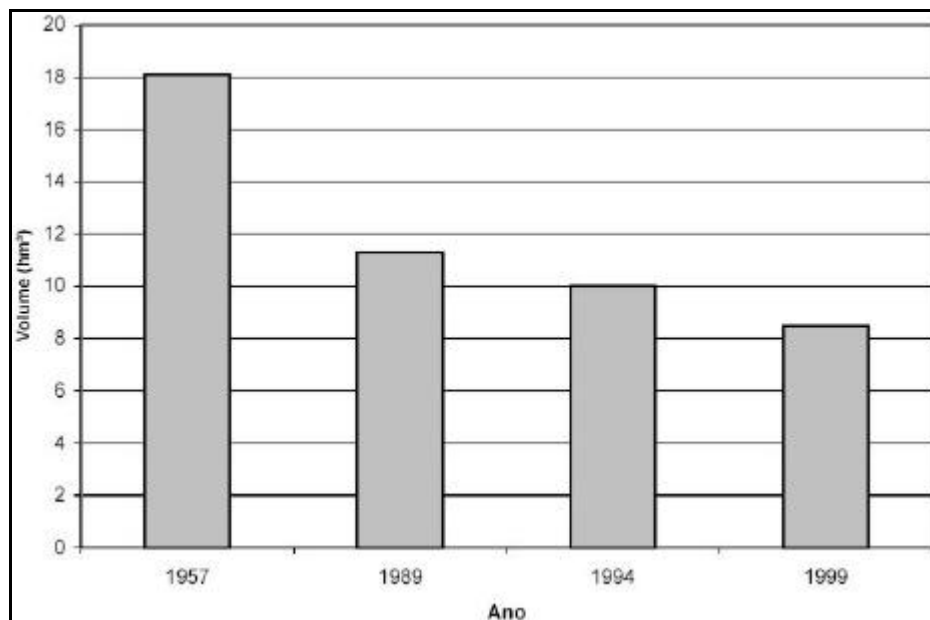


Figura 1.5 - Variação do volume de reservação da Represa da Pampulha. Adaptado de CPRM (2001). Nota: Para 1957 e 1989 o volume se refere à cota 801,3m e para os demais anos: 801,1m. Fonte de levantamentos: SUDECAP (1985) e SALIM *et al.* (2000)

O assoreamento e a poluição das águas da bacia hidrográfica por esgoto sanitário e despejos industriais, são "doenças" que precisam ser tratadas. Desde a década de 70 a coletividade discute formas e procedimentos para minimizar o aporte de sedimentos à represa, o seu desassoreamento através de dragagem e os problemas de poluição, em geral, da Bacia Hidrográfica da Pampulha.

Para definir formas e procedimentos de atuação, no intuito de resolver problemas coletivos de qualquer natureza, idealmente é necessário, em um primeiro momento, um intenso intercâmbio

de idéias para se levantar as possibilidades de solução e fazer uma avaliação comparativa entre o custo e o benefício das alternativas consideradas. Uma vez escolhido o modo de atuação, deve-se partir para o levantamento de recursos e dos dados necessários para alicerçar a resolução do problema em tela. Parte destes dados pode estar já disponível (dados pretéritos) mas, via de regra, torna-se necessário efetuar campanhas de coletas para bem subsidiar e dimensionar as intervenções requeridas no sistema. Os dados, se bem colhidos e analisados, produzem informações fundamentais para avaliar, previamente, o impacto ambiental dessas intervenções, o que dá subsídios para a autorização de sua implementação pelos órgãos ambientais.

Estes procedimentos apresentam uma certa analogia com a avaliação médica que é efetuada em um paciente. O médico clínico e os especialistas, quando o caso o exige, fazem a avaliação inicial (quadro clínico) que envolve conversas com o indivíduo sobre sua vida e hábitos progressos, assim como indagam sobre a incidência de certas doenças em seus familiares (fatores genéticos) e reavaliam exames laboratoriais anteriores (dados pretéritos). A partir daí podem recomendar nova coleta de dados (exames laboratoriais), equivalentes à coleta de dados de campo em estudos ambientais. De posse desse conjunto de informações é que se dá a intervenção, no sentido de curar a doença ou minorar os sofrimentos dela decorrentes.

Desde 1979 dragam-se, de tempos em tempos, os sedimentos que chegam à Represa da Pampulha. Esta dragagem, totalizando até 1996 um volume de  $4,6 \times 10^6 \text{ m}^3$  (Tabela 1.1), tem consistido apenas no remanejamento do sedimento dentro da própria represa, o que resultou em um grande depósito, o qual está sendo atualmente transformado em parque, porém com o sacrifício de 100ha do espelho d'água original.

Tabela 1.1 - Trabalhos de dragagem efetuados até o presente  
(remanejamento do sedimento dentro da represa)

Fonte: SUDECAP (1985, 1988, 1989, 1996, 2000) e DT ENGENHARIA (1997a, 1997b)

Período	Volume remanejado ( $\text{m}^3$ )	Tipo de equipamento
1979-1981	$1,2 \times 10^6$	draga de arraste ("drag-line")
1989-1991	$3,0 \times 10^6$	draga de sucção e recalque
1996	$0,4 \times 10^6$	draga de sucção e recalque
<b>Total</b>	<b><math>4,6 \times 10^6</math></b>	

A sobrevivência da Represa da Pampulha com seu valor cultural e de lazer e com a sua importante função de amortecimento de cheias, não poderá ser esperada no futuro, se persistirem apenas intervenções fazendo o remanejamento de sedimentos no interior da mesma.

Uma alternativa que poderia ajudar a resolver o problema do assoreamento, seria a transposição, para jusante, dos sedimentos finos que aportam à represa. Uma concepção para esta alternativa (CHAMPS, 1992) utilizaria uma draga de sucção e recalque, sendo o material dragado transportado pela tubulação de recalque para jusante da barragem (Dragagem de Longa Distância - DLD) e despejado, no Ribeirão da Onça e no Rio das Velhas, em locais com capacidade de promover o hidrotransporte do material diminuindo, assim, o impacto ambiental de sua sedimentação. Na implementação atual desta alternativa, a qual está em execução pela Prefeitura de Belo Horizonte, inicialmente parte do material fino será despejado em terra, em locais onde este sedimento representará um benefício econômico: as áreas contíguas ao Aeroporto da Pampulha, atualmente sendo preparadas para promover a expansão de hangares e pátios de estacionamento de aeronaves.

A viabilização da alternativa de despejo nos cursos d'água a jusante deve, na opinião deste autor, levar em conta não só o impacto da possível sedimentação do material, como apontado em CHAMPS (1992), mas também o aumento da concentração de sedimentos finos em suspensão decorrente do despejo e a sua atenuação posterior, função da advecção, dispersão e diluição da pluma em seu trajeto para jusante, e considerar também o transporte de metais adsorvidos no sedimento fino e na matéria orgânica dragados. A comparação deste aumento e atenuação posterior da concentração decorrente do despejo de dragagem, com os valores naturais das concentrações de sedimentos em suspensão existentes na Bacia do Rio das Velhas, é parte do estudo de impacto ambiental visando viabilizar esta alternativa de despejo de dragagem, o qual deve contemplar também aspectos químicos e biológicos, não abordados no presente trabalho.

Entretanto, foram avaliados, com base nos resultados das medições de parâmetros físico-químicos efetuadas na Bacia Hidrográfica da Pampulha durante os trabalhos (Capítulo 9), aspectos relativos à possibilidade dos metais já adsorvidos no sedimento fino, a ser dragado na Represa da Pampulha, sofrerem o processo de dessorção, passando para a fase líquida, ao serem

remanejados durante o processo de dragagem e despejados, posteriormente, nos cursos d'água a jusante.

A alternativa de despejo com DLD possibilitará, no futuro, local para a disposição dos sedimentos finos que assoreiam e continuarão assoreando a Represa da Pampulha, uma vez esgotadas as capacidades das áreas em terra que estão sendo preparadas junto ao Aeroporto da Pampulha e, eventualmente, de outras que possam vir a ser preparadas.

A obtenção e o gerenciamento de áreas para bota-fora de dragagem em terra, em regiões densamente urbanizadas, como Belo Horizonte, torna-se cada dia mais difícil e dispendioso, face à escassez de áreas livres, ao custo de desapropriação e também às invasões, tão comuns em todos os centros urbanos brasileiros.

Uma vez contextualizado o problema do assoreamento da Represa da Pampulha e a opção da dragagem dos sedimentos finos através da DLD, com as avaliações ambientais que devem ser consideradas para o despejo de sedimentos finos nos cursos d'água a jusante, cabe agora situar, em uma visão mais ampla, compatível com este capítulo introdutório, a elaboração do presente trabalho.

O fio condutor desta tese é o interesse na pesquisa e desenvolvimento de novas técnicas nucleares e também na difusão de outras, já estabelecidas, porém ainda não utilizadas no Brasil, para aplicações ambientais em Hidrologia Urbana.

Estas técnicas são de grande utilidade pois, a partir de injeções instantâneas ou contínuas de traçadores, propiciam respostas quantitativas a certas questões que se colocam nos campos da Hidrologia e da Sedimentologia Dinâmica, difíceis de serem obtidas por outros meios.

Aplicações relativas ao estudo da dinâmica de sedimentos finos em suspensão, são geralmente efetuadas através da marcação dos mesmos com ouro  $^{198}\text{Au}$ , elemento radioativo de meia-vida  $T_{1/2} = 2,7$  dias, emissor de radiação  $\gamma$  com energia de 410keV, que necessita ser irradiado em reator nuclear para cada utilização, e estão voltadas ao estudo do comportamento do despejo de dragagem de portos e canais e avaliação do seu impacto ambiental, sobretudo em ambiente marinho (CAILLOT *et al.* 1978), (AUN & BANDEIRA, 1984), (AUN *et al.* 1991), (AUN & BANDEIRA, 1995).

Assim, pretende-se, com o presente trabalho, colaborar no desenvolvimento da aplicação das técnicas nucleares, trazendo benefícios para o campo da Hidrologia, através de pesquisas para utilização em Sedimentologia de um novo radioisótopo, o tecnécio  $^{99m}\text{Tc}$  (meta-estável) ( $T_{1/2} = 6,02$  horas,  $\gamma = 140\text{keV}$ ), já amplamente utilizado em Medicina Nuclear, para marcar o sedimento fino, possibilitando estudos quantitativos *in situ*, do seu transporte em suspensão. Entre as vantagens do  $^{99m}\text{Tc}$  sobre o  $^{198}\text{Au}$ , destacam-se:

- obtenção do primeiro, através de gerador portátil de tecnécio, podendo ser utilizado por mais de uma semana (Item 3.5.1);
- maior facilidade de manuseio e marcação;
- energia da radiação  $\gamma$  mais baixa, requerendo blindagens mais leves;
- melhor aceitação pública, pois é normalmente injetado em seres humanos por via endovenosa.

Trabalhos foram realizados, como a pesquisa para a marcação do sedimento fino com  $^{99m}\text{Tc}$  (BANDEIRA *et al.* 1999a, 1999b), (BANDEIRA, 2001), (BANDEIRA *et al.* 2002a). Esta última referência, originada em trabalhos de laboratório que são parte integrante da presente tese foi traduzida e, juntamente com a primeira parte da pesquisa, anterior ao projeto da tese, contida em BANDEIRA *et al.* (1999a, 1999b), constituem o Capítulo 6. Foi efetuada também a caracterização dos sedimentos finos a serem dragados na Represa da Pampulha e seus teores em metais (BANDEIRA *et al.* 2002b).

A Medicina Nuclear tem possibilitado diagnósticos e tratamentos muito mais precisos e eficientes, e auxiliado bastante na compreensão do funcionamento do organismo humano. Do mesmo modo, este novo desenvolvimento para o uso, em Sedimentologia Dinâmica, do  $^{99m}\text{Tc}$ , traçador radioativo ambientalmente amigável, dada a baixa energia da radiação  $\gamma$  emitida e sua meia vida curta, põe à disposição da comunidade científica uma poderosa ferramenta para a compreensão futura da influência da turbulência, zonas mortas, atrito, e outras características geométricas do escoamento hidráulico, no transporte e deposição de sedimentos finos em rios, estuários e costa aberta.

Pode-se estabelecer, então, um paralelo entre a Engenharia Nuclear Ambiental (expressão aqui cunhada), que faz uso das técnicas nucleares no meio ambiente (um dos objetivos do presente trabalho é a promoção deste uso) e a Medicina Nuclear, que as utiliza no domínio humano.

Dos comentários anteriores depreende-se que os traçadores são ferramentas extremamente úteis na busca de respostas para o comportamento dos sistemas hidráulicos, hidrológicos e sedimentológicos. Porém, na sua utilização, como de resto, em outra áreas de aplicação, como em Medicina, Agricultura e Indústria, deve-se saber precisamente o que se quer responder, conhecer as características do sistema e os alcances e as limitações dos traçadores empregados para bem programar, executar e analisar os experimentos.

Pretende-se que esta tese seja o ponto de partida na utilização da experiência adquirida com estudos de despejo de dragagem em ambiente marinho, em estudos de dragagem de reservatórios com transposição de sedimentos, sobretudo os finos, facilmente hidrotransportáveis para jusante. Isto fica facilitado devido à nova utilização, em Sedimentologia, do  $^{99m}\text{Tc}$ , como será visto no Capítulo 6.

Este assunto, ainda pouco estudado e praticado, se reveste da mais alta importância tendo em vista manter operativas, no longo prazo, as pequenas centrais hidroelétricas (PCH), que estão sendo atualmente construídas em larga escala em nosso país e possuindo, na maioria dos casos, reservatórios de pequenas dimensões e, por isso mesmo, muito mais vulneráveis, em termos de vida útil, ao assoreamento, do que as centrais dotadas de grandes reservatórios.

Outra relevante aplicação para os estudos aqui desenvolvidos é, através da viabilização ambiental de dragagens com transposição de sedimentos para jusante, procurar diminuir o impacto ambiental que as barragens provocam com a retenção dos sedimentos finos, vetores importantes no transporte de nutrientes e matéria orgânica, que acabam fazendo falta nos ecossistemas de jusante como, por exemplo, no estuário do Rio São Francisco onde houve, no longo prazo, uma queda drástica na taxa de piscosidade, após os grandes barramentos que se iniciaram com a Hidrelétrica de Paulo Afonso, na década de 40 do século passado. Além disso, a retenção de sedimentos provoca o rompimento do equilíbrio sedimentológico dinâmico nos cursos d'água a jusante. A diminuição da parcela de sedimentos, sobretudo os grossos (areia), juntamente com as alterações do regime de vazões líquidas, em consequência da operação

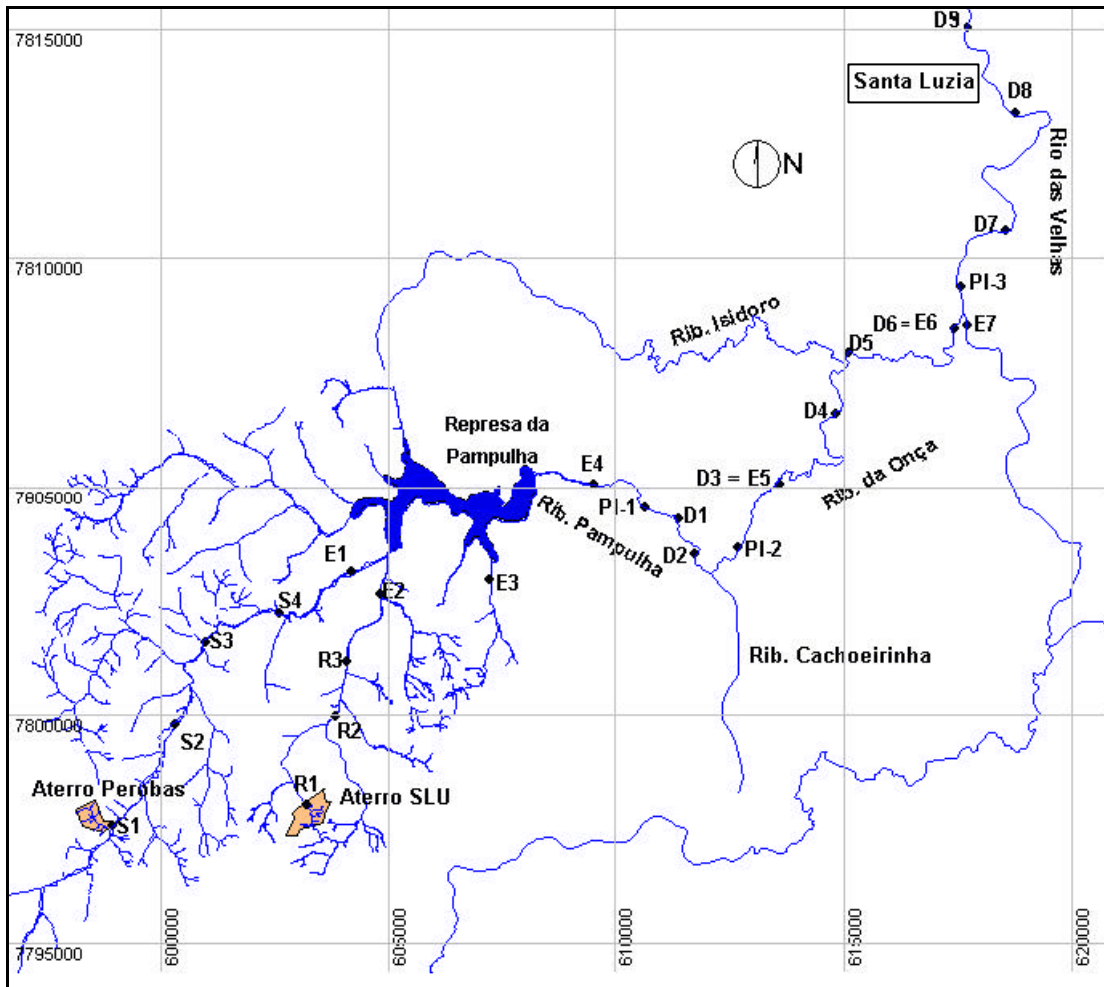


controlada dos reservatórios, pode produzir modificações acentuadas no traçado do talvegue, resultando em erosão nas margens. O rompimento desse equilíbrio também se faz sentir no estuário, na linha de costa e na região da barra, com a diminuição da contribuição de sedimentos de origem continental. Isto pode ter conseqüências, por vezes, desastrosas, como a destruição, por erosão, do Povoado de Cabeço, no Estado de Sergipe, junto à embocadura do Rio São Francisco (PROJETO GEF - São Francisco, 2002).

No presente trabalho é também abordada a utilização de trítio ( $^3\text{H}$ ), radioisótopo do hidrogênio ( $T_{1/2} = 12,3$  anos, emissor de radiação  $\beta = 18\text{keV}$ ), presente em quantidades superiores às ambientais no chorume de aterros sanitários, como traçador do mesmo em estudos de poluição de água superficial e subterrânea, tendo em vista a existência de aterros sanitários nas cabeceiras da Bacia Hidrográfica da Pampulha, nas sub-bacias dos ribeirões Sarandí e Ressaca. Esta utilização do  $^3\text{H}$ , iniciada em outros países por volta de 1995 (ROBINSON & GRONOW; 1995), (VERHAGEN *et al.* 1998), (LEVIN & VERHAGEN, 1999), (VERHAGEN *et al.* 1999), quanto ao conhecimento deste autor, ainda não foi realizada no Brasil, anteriormente ao presente trabalho. Foram assim avaliados os teores de  $^3\text{H}$ , acima dos ambientais, na água superficial e subterrânea, sobretudo nas regiões dos aterros sanitários existentes e em seus entornos (Capítulo 4).

Foi realizada a coleta de amostras e a análise dos teores de metais na água, sedimento de fundo e em suspensão, em 14 estações ao longo dos principais cursos d'água da Bacia da Pampulha (Figura 1.6) e no interior da represa (Figura 5.1), com o triplo objetivo de:

- proporcionar subsídios para o estabelecimento de metodologia para o estudo das regiões fonte de metais e outros poluentes, a montante da represa (Capítulo 5), a contaminar os sedimentos finos a serem dragados da mesma, possibilitando aos órgãos ambientais atuar para reduzir contaminações futuras;
- caracterizar o grau de contaminação atual dos sedimentos a serem dragados;
- determinar o estado atual dos cursos d'água a jusante da represa no que respeita aos teores de metais na água e nos sedimentos, anteriormente a qualquer despejo de sedimento dragado da represa, para a avaliação do impacto ambiental desse despejo.



- 1) **Estações E1 a E7:** medições hidrossedimentométricas e coleta de água e sedimentos para análise de metais e trítio.
- 2) **Estações R1 a R3 e S1 a S4:** coleta de água e sedimentos para análise de metais e trítio.
- 3) **Estações PI-1 a PI-3:** pontos de injeção instantânea e simultânea de traçadores.
- 4) **Estações D1 a D9:** monitoramento euleriano da passagem das plumas de traçadores.
- 5) **Ribeirão Sarandí:** estações S1, S2, S3, S4 e E1; **Ribeirão Ressaca:** estações R1, R2, R3 e E2.
- 6) **Majoria das estações** medições de parâmetros físico-químicos da água.

Figura 1.6 - Região de estudos na Bacia Hidrográfica da Pampulha e Rio das Velhas

Aos resultados foram aplicadas técnicas estatísticas de análise multivariada para melhor caracterizar a distribuição dos metais predominantes, nas várias regiões em que se subdividiu a bacia hidrográfica (Capítulo 5). Para esta aplicação foi necessário alterar a nomenclatura das estações de coleta, de caracteres alfanuméricos para apenas numéricos (Tabela 5.5).

Foi efetuado o estudo do comportamento do material dragado, caso venha a ser despejado nos cursos d'água a jusante. Para tanto, realizaram-se experimentos de campo com marcação simultânea: sedimento fino com  $^{99m}\text{Tc}$  e água com traçador fluorescente (Rodamina WT).

Quatro injeções instantâneas, seguidas de detecções subseqüentes foram efetuadas, cobrindo um trecho com extensão aproximada de 25km, desde o Ribeirão Pampulha, na região vizinha à pista do Aeroporto da Pampulha até o Rio das Velhas, a jusante da Cidade de Santa Luzia (Figura 1.6). Os experimentos foram sempre efetuados em época de seca (maio a setembro), quando é mais crítico, devido às baixas vazões, o transporte de sedimentos em suspensão.

No Ribeirão Pampulha foi realizado um ensaio, em 27/09/2000, com injeção em PI-1 (Figura 1.6) e detecções nas estações D1, D2, D3 e D4. No Ribeirão da Onça, foram realizadas duas injeções em PI-2, com detecções em: D3, D4, D5 e D6, em 03/10/2000 e 03/07/2001. No Rio das Velhas foi efetuada uma injeção em PI-3, e detecções em D7, D8 e D9, em 26/06/2001. Os resultados dos estudos encontram-se no Capítulo 7.

No Capítulo 8 pode ser vista a descrição e calibração do modelo matemático (SINGH & BECK, 2003) para o cálculo da dispersão longitudinal, empregado para os dados obtidos com a medição da dinâmica simultânea do sedimento em suspensão e da água que o conduziu nos três trechos estudados: Ribeirão Pampulha + Onça, Ribeirão da Onça e Rio das Velhas.

Encontra-se, no Capítulo 9, o estudo da convolução a partir de uma injeção pontual instantânea para a situação de injeção pontual contínua, simulando o despejo de dragagem no sistema de DLD, em três locais dos ribeirões Pampulha e Onça: D1, D3 e Foz do Onça (Figura 1.6). Com estes resultados foi possível avaliar o impacto ambiental do despejo, considerando o aumento das concentrações e a possibilidade de desorção de metais contidos nos sedimentos finos dragados, respectivamente, através de comparações do aumento de teores de sedimento em suspensão decorrentes desse despejo, com os valores naturais das concentrações reportados em CETEC (1999), LIMA *et al.* (2001) e LIMA & SANTOS (2002) e pela medição de parâmetros físico-químicos da água. Foi estudada também a possibilidade de sedimentação ou não do material injetado, através da análise dos resultados dos experimentos com sedimento marcado com  $^{99m}\text{Tc}$ , baseando-se na quantificação da atividade que passou em cada estação de medidas, e sua comparação com a atividade da estação anterior.

Finalmente, no Capítulo 10 encontram-se as conclusões e recomendações bem como as perspectivas geradas pelo presente trabalho.



## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 *Objetivos: geral e específicos***

O objetivo geral do presente trabalho é desenvolver e aplicar metodologias, com o uso de técnicas nucleares e correlatas, em estudos de Hidrologia Urbana. Como subproduto espera-se poder contribuir na solução de diversos problemas ambientais existentes na Bacia Hidrográfica da Pampulha, para que seus habitantes, e os que por ela transitam, possam desfrutar de uma melhor qualidade de vida. Uma primeira contribuição já foi efetuada com a aplicação das metodologias aqui desenvolvidas, em estudos de campo (Capítulo 4 e seguintes).

Constituem os objetivos específicos do trabalho, as possibilidades de solução propostas para cada um dos problemas descritos resumidamente nos itens a seguir, considerando a sua ocorrência, no sentido de montante para jusante da bacia, que é como se pretende tratá-los nos capítulos subseqüentes. Os objetivos específicos a serem abordados, são:

- estudo da contaminação devido ao chorume produzido em aterros sanitários e sua possibilidade de avaliação através da determinação dos teores de trítio nele contidos;
- determinação da distribuição de metais nos sedimentos em suspensão, de fundo e na água da Bacia Hidrográfica da Pampulha, desde as cabeceiras até o Rio das Velhas, a contribuição na identificação de suas origens a montante da represa e o seu papel como poluidor do sedimento fino a ser nela dragado;
- avaliação do impacto ambiental do despejo de dragagem dos sedimentos finos da Represa da Pampulha, nos cursos d'água a jusante.

### **2.2 *Discussão sobre os objetivos específicos***

#### **2.2.1 *Avaliação da contaminação ambiental devido ao chorume produzido nos aterros sanitários***

O chorume, produzido por lixiviação em aterros sanitários, é um poluente em potencial do solo e das águas subterrâneas e superficiais pelos metais e outras substâncias que pode conter.

Determinando-se, por exemplo, os teores de metais no chorume, assim como a sua concentração em  $^3\text{H}$ , a qual pode ser muito acima das existentes nas águas de chuva, (ROBINSON & GRONOW; 1995), (VERHAGEN *et al.* 1998), (LEVIN & VERHAGEN, 1999), (VERHAGEN *et al.* 1999) e estes mesmos parâmetros na água superficial e subterrânea na região do aterro e ambientes vizinhos, poder-se-á avaliar o impacto ambiental devido ao chorume. Os metais têm a tendência de sofrerem o processo de adsorção ao transitarem no solo, sobretudo devido à matéria orgânica que este contém, e também quando em contato com sedimentos silto-argilosos. Já o  $^3\text{H}$ , como parte da molécula da água, é um traçador que não é adsorvido pelo solo. Desta forma, abre-se uma possibilidade interessante de estudo do comportamento dinâmico do chorume no solo. Este vai sendo empobrecido em seus teores de metais à medida que transita, ao mesmo tempo em que tem a sua origem identificada pelo teor de trítio, superior ao da água de chuva. Neste caso o trítio funciona, sobretudo, como um indicador da direção do fluxo. Além disto, podem ser inferidas as taxas de misturamento do chorume e da água subterrânea. Estas determinações podem ser de muita utilidade na calibração de modelos matemáticos de escoamentos subterrâneos empregados no estudo da contaminação de aquíferos pelo chorume de aterros sanitários.

No caso do chorume contendo altos teores de trítio se escoar, em parte, na água superficial de canalizações de drenagem urbana, poderá ser uma ferramenta útil em estudos quantitativos de contribuições da rede de drenagem pluvial para as vazões ao longo da canalização considerada. Leva-se em conta, para estes estudos, a variação decrescente dos teores de  $^3\text{H}$  para jusante do ponto de entrada do chorume, a qual é produzida pela diluição das contribuições líquidas ao longo do curso d'água, as quais contém baixos teores de trítio em relação àqueles encontrados no chorume.

### **2.2.2 Avaliação da distribuição de metais nos sedimentos em suspensão, de fundo, e na água da Bacia Hidrográfica da Pampulha, desde as cabeceiras até o Rio das Velhas.**

No trabalho de monitoramento hidrossedimentométrico realizado na Bacia Hidrográfica da Pampulha (ABRH *et al.* 1996), (CETEC, 1998/99), (HDC, 1998/99), (SUDECAP, 1999), constaram medições de vazão líquida e concentração de sedimentos em suspensão em sete estações (E1 a E7 - Figura 1.6) da bacia hidrográfica abrangendo, desde o limite de remanso da

represa até a embocadura do Ribeirão da Onça e a região, no Rio das Velhas, logo a montante desta. Estas medições se estenderam entre novembro de 1998 e dezembro de 1999 e permitiram calcular a descarga sólida em suspensão ao longo de um ano, abrangendo época de seca e chuva, nesta bacia hidrográfica urbana.

Ainda neste monitoramento, uma das tarefas a cargo do CDTN/CNEN foi a de determinar os teores de metais nos sedimentos de fundo, em suspensão e na água, nestas mesmas estações. Coletas foram efetuadas em duas ocasiões: fim do período de seca (outubro/1999) e fim do período de chuvas (abril/2000). Além disto, visando uma melhor identificação das principais áreas fonte de metais na parte da bacia hidrográfica a montante da represa e, com isto, possibilitar aos órgãos ambientais um melhor controle sobre a poluição ambiental por metais, inclusive visando a diminuir, no futuro os teores de metais nos sedimentos finos a serem dragados na represa, as coletas de água e sedimentos foram estendidas, por iniciativa deste autor, para mais sete estações: R1, R2 e R3, no Ribeirão Ressaca, e S1, S2, S3 e S4, no Ribeirão Sarandí (Figura 1.6).

Foram também determinados os teores de metais nos sedimentos da superfície do fundo da Represa da Pampulha, em sete locais ao longo do talvegue do antigo trecho do Ribeirão Pampulha, entre a Ilha dos Amores e a barragem, bem como em quatro amostras compostas a cada 0,5 m, entre a superfície e 3 metros de profundidade, retiradas por trado motorizado, ao longo da ilha formada pelo remanejamento, no interior da represa, do material ali dragado (Figura 5.1).

Os teores em metais para as coletas efetuadas em 1999 e 2000 foram determinados nos laboratórios do CDTN/CNEN, através dos processos de Espectrometria de Absorção Atômica (EAA) (água e sedimentos) e Análise por Ativação Neutrônica (AAN) (sedimentos).

Colheram-se ainda, em 2002, algumas amostras de chorume e de água superficial e subterrânea em piezômetros de controle situados nas áreas dos aterros sanitários de Belo Horizonte e de Contagem, mas também em poços a jusante dos mesmos, ao longo dos ribeirões Ressaca e Sarandí, para a determinação dos teores de  $^3\text{H}$ , sendo também determinados os teores de metais, para aqueles que já tinham apresentado maiores teores nas amostras de água superficial colhidas em 1999 e 2000. A determinação dos teores de metais para as amostras de água e chorume

colhidas em 2002 foi efetuada pelo método analítico de Espectrometria de Emissão Atômica por Plasma Indutivamente Acoplado (ICP/AES), por ser este mais sensível que o método de EAA.

Este conhecimento sistêmico da distribuição de metais, em toda a extensão dos principais cursos d'água da bacia possibilitou, no presente trabalho, através de um estudo com a aplicação de técnicas de análise multivariada, a determinação de regiões fonte de metais, na água e nos sedimentos.

Além disso, na parte da bacia hidrográfica à montante da Represa da Pampulha, com as informações sobre as ocorrências de metais na água e nos sedimentos nas várias estações ao longo dos ribeirões Sarandí e Ressaca e fazendo-se a sobreposição da topografia e das redes de drenagem pluvial e sanitária, associadas à localização de indústrias e ramos de atividade potencialmente geradores de metais, poder-se-á mapear, em detalhe, as regiões fonte de determinados metais, a contaminar o sedimento a ser dragado. Isto possibilitará aos órgãos ambientais um maior controle deste tipo de poluente na bacia hidrográfica. Este detalhamento não foi contemplado no presente trabalho, dado o enorme volume de trabalho computacional e de geoprocessamento que ele demanda, além de exigir uma compatibilização de informações georreferenciadas existentes em diversos órgãos públicos e privados e nas municipalidades que dividem a Bacia Hidrográfica da Pampulha, como será abordado no Capítulo 5. Esta mesma metodologia poderá ser aplicada para outros poluentes, a serem medidos no futuro, e também à região a jusante da represa.

Outro importante aspecto deste conhecimento será na avaliação do impacto ambiental que um possível despejo de sedimento fino dragado na Represa da Pampulha, poderá ocasionar nos cursos d'água a jusante. Este é o objetivo específico resumido no próximo item.

### **2.2.3 Avaliação do impacto ambiental do possível despejo, nos cursos d'água a jusante, de sedimento fino dragado na Represa da Pampulha.**

Não se vislumbra uma solução duradoura para a existência da Represa da Pampulha sem equacionar o problema de onde despejar os cerca de 387.000 m<sup>3</sup>/ano de material fino que assoreiam este corpo d'água, tão caro aos habitantes de Belo Horizonte.



Como abordado no Capítulo 1, o despejo continuado de sedimento fino em terra, nesta região urbana densamente habitada é muito difícil, face às dificuldades e aos custos inerentes à obtenção, conservação e gerenciamento de áreas urbanas para serem utilizadas como locais de futuro despejo de material dragado, ou mesmo para aterros sanitários. Assim, uma solução natural seria o despejo do sedimento fino nos cursos d'água a jusante, desde que o impacto ambiental de tal alternativa seja aceitável, e que os demais aspectos de tal solução apresentem vantagens quando comparados com o despejo em terra, uma vez que se parte da premissa que o objetivo de se manter existente a Represa da Pampulha, é algo inquestionável.

Para a avaliação do impacto ambiental desse despejo foram levados em conta, no presente trabalho, os seguintes aspectos:

- capacidade de hidrotransporte dos cursos d'água, o que vai informar se existirá ou não sedimentação do material fino neles despejado;
- aumento da concentração de sedimentos finos em suspensão decorrente do despejo e a sua atenuação posterior, função da advecção, dispersão, diluição e sedimentação da pluma em seu trajeto para jusante, associado ao transporte de metais adsorvidos no sedimento fino e na matéria orgânica, dragados na Represa da Pampulha.



### 3 CONTEXTO DO ESTUDO

#### 3.1 A Bacia Hidrográfica da Pampulha

A Bacia Hidrográfica da Pampulha é parte da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas, a qual, por sua vez, se insere na do Rio São Francisco. Sua superfície, a montante da represa da Pampulha, é de 97,6km<sup>2</sup> sendo que, 43,0km<sup>2</sup> (44,1%) se situa no Município de Belo Horizonte e 54,6km<sup>2</sup> (55,9%) no Município de Contagem. Considerando a região da bacia a jusante da represa, a superfície é de 118,7km<sup>2</sup>, perfazendo um total de 216,3km<sup>2</sup>.

O Ribeirão Pampulha, em cuja região foi construída a Represa da Pampulha é formado pelos ribeirões Sarandí (que nasce e corta grande parte do município de Contagem) e Ressaca, que tem origem e fim no município de Belo Horizonte. Após receber o Ribeirão Cachoeirinha, a jusante da barragem da Pampulha, o Ribeirão Pampulha passa a ser chamado de Ribeirão da Onça, nome que conserva até a sua desembocadura no Rio das Velhas, recebendo antes, diversos afluentes menores como o Gorduras, pela margem direita e o Ribeirão Isidoro, pela margem esquerda, este de porte maior que o Gorduras, drenando toda a região de Venda Nova (Figura 1.6).

A geologia em que se insere a bacia hidrográfica da Pampulha é constituída de rochas do Complexo Belo Horizonte, composto principalmente por gnaisses geralmente alterados, com um manto de intemperismo perfazendo espessura da ordem de 100m em certas regiões da bacia (SILVA *et al.* 1995). A quase totalidade da bacia possui características urbanas, com os cursos d'água canalizados em grande extensão. Assim, grande parte da sub-bacia do Ribeirão Sarandí, que até há bem pouco tempo possuía características rurais, se encontra atualmente em acelerado processo de urbanização devido à conclusão da avenida sanitária ao longo deste curso d'água, em fins de 1999.

As características dos cursos d'água principais a montante da represa da Pampulha, são:

- Ribeirão Sarandí: Área da bacia: 41,1km<sup>2</sup>; Comprimento = 16756m; declividade média = 0,61%;

- Ribeirão Ressaca: Área da bacia: 20,4km<sup>2</sup>; Comprimento = 9611m; declividade média = 1,63%.

Deve ser ressaltada a existência de uma grande queda d'água no Ribeirão da Onça, a cerca de 3km de seu início, com cerca de 30m de altura, a jusante da represa (Figura 7.3e).

### **3.2 A Represa da Pampulha e seus problemas sedimentológicos**

A represa, ou Lagoa da Pampulha, como é mais conhecida em Belo Horizonte tinha, quando de sua inauguração, os seguintes objetivos principais: a) abastecimento de água para a população; b) controle de cheias; c) lazer.

O Complexo Arquitetônico da Pampulha, que inclui o espelho d'água da represa e o seu entorno, teve o seu tombamento efetuado em 1984 pelo Instituto Estadual do Patrimônio Histórico e Artístico (IEPHA), através do Decreto 23.649, de 26 de junho de 1984, do Governador Tancredo Neves.

#### **3.2.1 A degradação da Represa da Pampulha**

Com o incremento da ocupação desordenada da bacia hidrográfica a montante da represa que, como anteriormente mencionado, se acentuou no início dos anos 70, esta vem sofrendo de processo de assoreamento (figuras 1.3 a 1.5) e poluição de suas águas e sedimentos. Isto tem trazido inúmeros transtornos à população, como: a proliferação de insetos na região, o impedimento da utilização adequada da represa como área de lazer, a ocorrência de enchentes e a perda da identidade do complexo da lagoa através da descaracterização do seu espelho d'água que, juntamente com as edificações projetadas por Oscar Niemeyer e circundadas por jardins de Roberto Burle Marx e, na Igreja da Pampulha, a ornamentação de Cândido Portinari, as esculturas de Alfredo Ceschiatti e os mosaicos de Paulo Werneck, constitui o Complexo Arquitetônico da Pampulha, parte muito importante do patrimônio cultural, artístico e arquitetônico de Belo Horizonte e do Brasil.

Devido à intensa poluição, a captação de água para abastecimento foi descontinuada na década de 80.

Segundo BAPTISTA *et al.* (1995), devido à urbanização rápida e desordenada, a taxa de erosão natural na bacia, calculada em 75.000m<sup>3</sup>/ano, saltou para 380.000m<sup>3</sup>/ano em 1989, com uma projeção de cerca de 600.000m<sup>3</sup>/ano para o ano 2000. Os resultados contidos em OLIVEIRA e BAPTISTA (1997), mostram que o aporte anual de sedimentos à represa varia também conforme a intensidade e frequência dos eventos chuvosos.

O aumento da taxa de erosão se refletiu no rápido assoreamento da represa, sobretudo na região de entrada de seus principais tributários, ribeirões Sarandí e Ressaca (figuras 1.2 a 1.4). Ressalte-se o comentário extraído de BAPTISTA *et al.* (1995): *"Neste cenário de evolução as perspectivas são sombrias, tornando perfeitamente factível prever, para cerca de 20 anos, o mesmo fim dos lagos Santa Lúcia e Acaba Mundo para a Lagoa da Pampulha"*. De OLIVEIRA & BAPTISTA (1997), extrai-se: *"...prevê-se o assoreamento completo do reservatório em 2012, na hipótese de um cenário médio de aporte de sedimentos"* (cerca de 500.000 m<sup>3</sup>/ano - nota do autor).

O volume de água remanescente fornecido pelo levantamento ecobatimétrico da Lagoa da Pampulha (FIORAVANTE NETO *et al.* 1995), efetuado em setembro de 1994, era de 10.016.433m<sup>3</sup> entre a Ilha dos Amores e a barragem da Avenida Antônio Carlos (trecho ainda navegável do reservatório por um barco que cala apenas 0,5m, utilizado nos levantamentos batimétricos). A mais recente batimetria, realizada pela CNEN/CDTN em setembro de 1999 (SALIM *et al.* 2000), mostra que este volume atrás referido foi reduzido para 8.480.000m<sup>3</sup> (Figura 1.5). Por sugestão de PBH & CMM (1994) foram dragados, em 1996, entre a Ilha dos Amores e a região da barragem, cerca de 400.000m<sup>3</sup> de sedimentos finos. Este volume foi depositado na região situada entre três as ilhas artificiais formadas por despejos de dragagem anteriores, no interior da represa, transformando-as em apenas uma.

Considerando esta dragagem de cerca de 400.000m<sup>3</sup> entre a Ilha dos Amores e a barragem, e os volumes do reservatório, para a mesma região, indicados pelas duas batimetrias mais recentes (FIORAVANTE NETO *et al.* 1995), (SALIM *et al.* 2000), houve, entre 1994 e 1999, um assoreamento médio nesta região de 387.000m<sup>3</sup>/ano. Este é devido, praticamente, à contribuição de sedimentos finos (BANDEIRA *et al.* 2002b), uma vez que o material de granulometria mais gráuda (areia e silte grosso) se decanta, sobretudo na região dos canais que circundam a ilha formada pelo despejo de dragagem, como já estudado em SUDECAP (1988) e BAPTISTA &

PINHEIRO (1992). BAPTISTA *et al.* (1995) sugerem que esta areia poderia ser dragada mecanicamente, sendo utilizada como matéria prima na construção civil.

Levando-se em conta que o volume de água original do reservatório era de 18.100.000m<sup>3</sup>, constata-se que, até 1999, já houve uma perda de 53,15% desse volume. O espelho d'água encontra-se reduzido a apenas 200ha (ou 66,7% do seu valor original).

### 3.2.2 Os trabalhos de dragagem efetuados até o presente

Conforme mostrado na (Tabela 1.1) dragaram-se, entre 1979 e 1996, cerca de 4,6x10<sup>6</sup>m<sup>3</sup> de sedimentos que chegaram à Represa da Pampulha. Esta dragagem, até o presente, tem consistido apenas no remanejamento do sedimento dentro da própria represa, dando origem à formação de três ilhas (BAPTISTA *et al.* 1995). Segundo estes autores, esta opção foi escolhida em função dos altos custos do transporte do material dragado.

Após a dragagem do período 1989-1991 (Tabela 1.1) foram realizados estudos (PBH & CMM, 1994), em que foi sugerida a contenção e remoção de sedimentos e lixo a montante da represa, associada a um novo remanejamento de sedimentos no interior da mesma. Com base neste estudo, segundo OLIVEIRA & BAPTISTA (1997): *"A UGP - Unidade de Gerenciamento do Programa Pampulha, criada pela Prefeitura de Belo Horizonte em 1995, propôs a adoção de operações de dragagem para o desassoreamento da lagoa com a retirada de 40.000 m<sup>3</sup>/mês, durante 10 meses. Esse valor baseou-se em estudos de VIGNOLI (1992) que apresenta um aporte anual de sedimentos de 380.000 m<sup>3</sup>/ano"*.

Esta última intervenção de 0,4x10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>, efetuada em 1996 teve, com o despejo do material dragado nos espaços existentes entre as três ilhas, a finalidade principal de transformá-las em apenas uma, na qual está sendo atualmente construído um parque, porém sacrificando 100ha, ou seja: um terço do espelho d'água original da represa.

Segundo OLIVEIRA (1996) e DT ENGENHARIA (1997a), cerca de 70 % do total do material de assoreamento, é constituído de sedimento fino. Qual a destinação a ser dada a ele?

De acordo com BAPTISTA *et al.* (1995) a alternativa de retenção de parte dos sedimentos a montante da represa, através da implantação de estruturas adequadas, já foi estudada

(SUDECAP; 1989). Este estudo previa a alternativa de implantação de nove barragens de sedimentação ao longo dos cursos d'água mais produtivos em sedimentos. A alternativa foi descartada em razão da inexistência de áreas para a implantação das barragens, devido à ocupação urbana dos fundos de vales. Assim, para as barragens serem implantadas teria que haver desapropriações de imóveis, deslocamento de contingentes consideráveis de população, além do fato da eficiência das barragens de assoreamento ser limitada, em face do seu próprio assoreamento, exigindo manutenção constante.

E o sedimento de assoreamento das nove barragens, como seria transportado e onde seria depositado? As dimensões das represas formadas atrás destas barragens de sedimentação, certamente menores que a da Pampulha, fariam com que elas possuíssem menor capacidade de retenção do que esta, estimada em 94,8% (CHAMPS, 1991) e assim, sobretudo o sedimento fino, que demora mais a sedimentar, terminaria chegando à Represa da Pampulha.

Com a adoção destas medidas estruturais acima apontadas, haveria uma multiplicação de áreas problema com respeito aos sedimentos, ainda sem uma destinação final para os mesmos, o que acarretaria apenas o deslocamento do problema no espaço e no tempo, com prejuízos ambientais e financeiros para toda a comunidade, como conclui BAPTISTA *et al.* (1995).

A adoção de medidas não estruturais, porém rigorosas, de planejamento, regulamentação, controle e fiscalização do uso e ocupação do solo urbano, como preconizada em BAPTISTA *et al.* (1995) para o caso do assoreamento, poderia evitar que os danos decorrentes, principalmente do descaso e da forma de ação predatória de alguns segmentos, fossem suportados pela sociedade como um todo. Se bem implementadas elas poderiam reduzir a produção de sedimentos, mas não eliminá-la totalmente, uma vez que toda bacia hidrográfica, seja ela com características predominantemente urbanas, de floresta ou rurais, possui uma produção natural de sedimentos.

Todavia, em nossa sociedade, as medidas não estruturais são de difícil implementação e de eficácia duvidosa, em face da cultura vigente e dos graves problemas sociais que fazem com que usos indevidos do solo e invasões de áreas urbanas sejam uma prática comum. Uma vez mal utilizadas ou invadidas, as áreas urbanas raramente retornam à sua antiga destinação.

Assim, em nosso meio, a educação ambiental é imperiosa, para todas as faixas etárias e estratos sociais. Muitas vezes são os indivíduos e grupos mais abastados e influentes que, possuindo o efetivo poder econômico e político de transformar o ambiente, seja pela execução de obras e/ou pela edição ou alteração de leis e, visando, sobretudo os seus próprios interesses, mal utilizam o espaço urbano sob o ponto de vista da sociedade como um todo. A educação ambiental deve estar ainda aliada a um eficiente planejamento urbano, circundado por efetivas intervenções preventivas e corretivas e também pela justiça social, pois sem esta, a eficácia de quaisquer planejamentos e intervenções visando atacar os problemas urbanos em geral, e os causados pelos sedimentos, em particular, diminui drasticamente.

Das ações anteriormente apontadas, aquelas que podem apresentar uma resposta efetiva para minimizar, mas não resolver o problema do assoreamento atual da Represa da Pampulha, somente o fazem em médio ou longo prazo. Porém, a "paciente" encontra-se, do ponto de vista do assoreamento, no CTI (guardadas as devidas proporções temporais entre o meio ambiente e um ser vivo). É necessário um "tratamento de choque" para tirá-la desse "coma" ou ela acabará "morrendo"!

### **3.2.3 Providências para a restauração da Represa da Pampulha**

Se for desejo da coletividade recuperar o local para duas finalidades importantes para as quais foi construído: a) região de lazer; b) elemento de amortecimento de cheias na bacia hidrográfica, é necessário o saneamento das águas afluentes e a dragagem com a retirada efetiva dos sedimentos do interior da represa.

Com a retirada progressiva dos sedimentos, é aumentada a capacidade do reservatório para laminação ou amortecimento das cheias. Note-se que a tendência futura na bacia hidrográfica é a de ocorrência de cheias maiores, considerando a mesma precipitação pluviométrica, em função do aumento da impermeabilização de sua superfície, pela ocupação urbana como a que se intensifica atualmente na sub-bacia do Ribeirão Sarandí, como mencionado anteriormente. Assim, sob este aspecto, é muito importante a dragagem da região assoreada da represa, com a retirada efetiva do material de seu interior, o que não foi feito até o presente, bem como a instalação de dispositivos de detenção temporária da água de chuva na região da bacia a



montante, que se traduz por práticas de ocupação acarretando a baixa impermeabilização do solo e a construção de caixas de detenção, por exemplo, conforme CRUZ *et al.* (1998).

O desassoreamento da Represa da Pampulha tem, como alternativa mais viável, sob o ponto de vista técnico e econômico, a remoção dos sedimentos ali depositados, através da utilização de draga de sucção e recalque, e a adução deste material, através de tubulação, para áreas de botafora a jusante da represa (DT ENGENHARIA, 1997a, 1997b). Esta alternativa, que se constitui na Dragagem de Longa Distância (DLD), foi primeiramente considerada para utilização na Represa da Pampulha por CHAMPS (1992), sendo que este autor propôs o despejo do material dragado no Ribeirão da Onça e no Rio das Velhas, em locais com capacidade de promover o hidrotransporte do material diminuindo, assim, o impacto ambiental de sua sedimentação.

Esta solução, segundo o autor deste trabalho, poderia tomar partido do grande desnível (cerca de 125m num percurso de cerca de 17,8km), existente entre o espelho d'água da represa e a confluência com o Rio das Velhas, pensando em se utilizar o princípio do sifão para promover o transporte da mistura de sedimento fino e água no interior da tubulação. Porém, ter-se-ia que garantir a estanqueidade dos dutos quanto à entrada de ar, o que é difícil de se conseguir e manter na prática operacional de dragagem. Caso contrário o sifão não funcionaria.

Assim, para esta adução, dependendo da distância e dos níveis ocupados pela tubulação, além das bombas das dragas, pode ser necessária a instalação de outras intermediárias ("*boosters*") para evitar que a perda de carga ao longo das extensas tubulações de recalque provoque a diminuição da pressão abaixo de um valor operacional do sistema, geralmente de 1,0atm (DE HEER, 1986b).

Relativamente à opção do emprego da DLD, reproduz-se de DT ENGENHARIA (1997b), um trecho que trata do transporte do material fino dragado até a sua disposição final:

*".....PROCESSOS DE TRANSPORTE ATÉ A DISPOSIÇÃO FINAL.*

*Existe a possibilidade de despejar parte do material com granulometria mais fina, no caso de siltes e argilas, correspondente à produção de assoreamento natural da bacia no leito do ribeirão da Onça. Estudos preliminares (apresentados em VIGNOLI (1996) - nota do autor) verificaram que as condições encontradas neste ribeirão são favoráveis ao transporte de*

*sedimentos com granulometria até 0,083mm sem provocar efeitos de deposição e assoreamento na calha fluvial.*

*Técnica e economicamente a utilização dessa possibilidade torna-se bastante atraente para ser implantada em conjunto com o Novo Sistema, permitindo uma simplificação na sua operação e proporcionando um aumento de sua vida útil.*

*Entretanto, falta ser aprofundada a questão sobre os impactos provocados por esse processo no sistema do Rio das Velhas. Dependendo das condições a serem obtidas caso seja feito esse estudo é que poderemos considerar ou não essa alternativa."*

Como se vê, esta possibilidade de despejo, caso aprovada ambientalmente, poderá simplificar em muito e baratear a DLD pelo fato de permitir a diminuição do comprimento da tubulação de recalque, despejando-se o material dragado na seção a partir da qual, o hidrotransporte do material estiver garantido, possibilitando a eliminação de possíveis "boosters" que seriam necessários para transportar o material mais além. Somado a este fator, diminui-se ou evita-se a sempre custosa disposição de sedimentos finos em terra, com desapropriações, preparação das áreas de deposição e o investimento em novas áreas, as quais nem sempre são disponíveis e baratas em ambientes urbanos, uma vez que as em uso tenham sua capacidade de despejo saturada. Em centros urbanos é comum a invasão de áreas reservadas e, Belo Horizonte não foge à regra.

As autoridades municipais resolveram adotar, depois do último remanejamento interno de sedimentos de 1996, uma alternativa nesta linha. Porém, o procedimento previsto para ter início em 2002, com base em estudos desenvolvidos por DT ENGENHARIA (1997a, 1997b), consistiria de uma separação inicial de lixo, sendo o sedimento remanescente bombeado através de draga de sucção e recalque e despejado em terra, num primeiro local preparado para recebê-lo, junto ao ribeirão do Engenho Nogueira, na área interna do Aeroporto da Pampulha. O despejo neste local, além de ser próximo à barragem, evitando longas linhas de recalque, traria o benefício econômico de agregar novas áreas para a expansão das instalações do aeroporto, como a construção de novos hangares e a ampliação do pátio para o estacionamento de aeronaves.

Este local, somado a um segundo ainda a ser preparado junto ao Ribeirão Pampulha, também na área interna do aeroporto, perfazem uma capacidade de receber cerca de  $2 \times 10^6 \text{ m}^3$  de sedimento, conforme SUDECAP (1996), suficiente para transpor o equivalente à cerca de cinco anos de aporte de sedimentos finos à Represa da Pampulha. Note-se, porém, que o material a ser transposto para estas áreas de despejo já se encontra depositado no interior da represa. Porém, informações verbais recebidas posteriormente por este autor dão conta de que a capacidade efetiva das áreas sendo preparadas junto ao Aeroporto da Pampulha para recebimento da primeira parte do material dragado pelo processo de DLD será da ordem de  $4 \times 10^6 \text{ m}^3$ , o dobro da capacidade inicialmente prevista, isto porque uma parte das habitações, contíguas à margem esquerda do Ribeirão Pampulha, seria transferida para outro local, permitindo maior espaço para disposição do material dragado.

O remanejamento de sedimento efetuado no interior da represa, em 1996, promoveu o desassoreamento parcial dos canais laterais às ilhas formadas, e o da região em torno da Ilha dos Amores, tendo sido o material utilizado para transformar as três ilhas, originárias de dragagens anteriores, em apenas uma, conforme já mencionado. Mais de sete anos se passaram desde esta última intervenção e, já quando do último levantamento batimétrico da represa, em setembro de 1999 (SALIM et al. 2000), do qual o autor deste trabalho participou, observava-se o assoreamento das regiões dragadas em 1996, tendo já desaparecido o espelho d'água no entorno da Ilha dos Amores, outra vez tomado pelo sedimento e pela vegetação.

Existem outros locais em terra, a jusante do aeroporto da Pampulha, no município de Belo Horizonte, já estudados pelas autoridades municipais (SUDECAP, 1996) para servirem como local de despejo para o material dragado na represa. Pelas estimativas, estas áreas seriam capazes de receber juntas, pelo menos cerca de  $16 \times 10^6 \text{ m}^3$ , capacidade suficiente para atender ao despejo de dragagem de manutenção por cerca de 40 anos, mantendo-se o afluxo atual de sedimentos finos à represa. Entretanto, teria que haver desapropriações e se investir na preparação dos terrenos (construção de diques de contenção, impermeabilização, etc.), sendo que algumas destas áreas já foram, desde esta época, ocupadas por invasões. Assim, uma solução que poderia resolver o problema de modo permanente, diminuindo custos, seria a possibilidade de despejo do material fino dragado diretamente nos cursos d'água a jusante (Ribeirão da Onça e/ou Rio das Velhas), em locais com capacidade de promover o

hidrotransporte do material, minimizando o impacto da sedimentação, como proposto em CHAMPS (1992).

A viabilização desta alternativa de despejo nos cursos d'água a jusante deve, na opinião deste autor, levar em consideração não apenas o impacto da possível sedimentação do material como apontado em CHAMPS (1992), mas também:

- recolocação em movimento de grandes quantidades de sedimentos em suspensão com a sua carga de metais associada, acarretando o aumento da concentração no local de despejo dos mesmos, sendo este aumento atenuado para jusante com o hidrotransporte, devido principalmente aos fenômenos de diluição, dispersão, e decantação;
- aumento do transporte de metais nestes cursos d'água, devido aos teores desses mesmos metais presentes no material dragado;
- incremento, na Bacia do Rio das Velhas e na do Rio São Francisco, como um todo, da concentração de sedimentos em suspensão devido ao despejo de dragagem considerado.

Estes impactos ambientais da DLD serão avaliados a partir do Capítulo 5, como uma contribuição do presente trabalho objetivando viabilizar ambientalmente esta alternativa de descarte do material dragado na Represa da Pampulha a qual, na opinião deste autor, é a única viável em longo prazo, considerando os aspectos de custo e benefício para manter existente este equipamento urbano, tão caro a Minas Gerais e ao Brasil.

### **3.2.4 Considerações sobre a dragagem de reservatórios com a transposição de sedimentos para os cursos d'água a jusante e suas vantagens ambientais**

A dragagem com transposição de sedimentos para os cursos d'água a jusante, se adotada como uma prática em reservatórios, poderá minimizar o impacto ambiental de barramentos, resultado da diminuição de sedimentos finos e grossos a jusante dos mesmos, como já comentado no Capítulo 1 (último parágrafo da página 8), para o caso do Rio São Francisco (PROJETO GEF - São Francisco, 2002).

Infelizmente a areia, ao contrário dos sedimentos finos, não é tão facilmente hidrotransportável e se sedimenta, preferencialmente, logo na entrada dos reservatórios, dificultando a sua

reinscrição nos cursos d'água a jusante das barragens. Além disso, as barragens alteram as vazões naturais dos rios, podendo resultar em diminuição da capacidade global de transporte de sedimentos, sobretudo os arenosos, pelo escoamento.

Assim, a transposição de areia para jusante e o seu efetivo hidrotransporte, mais difícil que o dos sedimentos finos, requer estudos conjugados que atendam, em uma solução de compromisso, a operação de geração das hidrelétricas e barragens construídas para outros fins, como para irrigação e regularização de navegação, assim como os interesses ambientais e aqueles das comunidades situadas nas margens dos rios submetidas à erosão e também aos relativos à região da embocadura. Mas este é um assunto que está a merecer consideração e aprofundamento de estudos nos foros de discussão dos usos múltiplos dos cursos d'água.

Entretanto, espera-se que os estudos apresentados a seguir, em relação aos sedimentos finos, contribuam para que, no futuro, torne-se mais factível, em termos práticos e ambientais, a não interrupção de boa parte da carga desses sedimentos, através de dragagem com transposição, utilizando, por exemplo, o processo de DLD e dragas hidráulicas de sucção e recalque.

Desse modo, poder-se-á minorar o impacto ambiental que as represas provocam nos cursos d'água, como o da diminuição da taxa de piscosidade já abordada no baixo São Francisco, com o benefício simultâneo de desassoreá-las em grande parte, como será o caso da Represa da Pampulha, e estender a vida útil ou mesmo perenizar represas construídas para diversos fins, incluindo as PCH's, como já abordado.

Nas barragens, as comportas de fundo, quando existentes e funcionando, o que não é sempre o caso, possuem um efeito de auto-limpeza de sedimentos em uma área geralmente muito restrita, função da geometria do sistema e de sua carga hidráulica. Dragas hidráulicas de sucção e recalque utilizando o sistema de DLD poderão operar, não só na região contígua à barragem, como também em áreas mais afastadas, conforme o caso, onde haja depósito de sedimentos finos, o que é facilmente delimitado por amostragens e análises granulométricas.

Dessa forma o ser humano, que para obter energia e outras utilizações para os cursos d'água, altera suas características naturais (e.g. barrando o curso natural dos sedimentos em direção ao

mar), poderá agora se redimir, do mesmo modo que os projetistas de barragens procuraram diminuir os efeitos destas sobre a piracema, dotando as mesmas de escadas para peixes.

Mesmo com a presença das barragens, os rios devem continuar, para a harmonia ambiental, sendo uma via de mão dupla. Os peixes devem poder subir o rio, assim como os sedimentos devem poder descê-lo, pelo menos os finos, em um futuro não muito distante e os grossos, pelo menos em parte, quem sabe, em um horizonte mais amplo. É uma questão de harmonizar o benefício econômico (e.g. desassoreamento de barragens) e ambiental (e.g. diminuição de erosão nas margens e diminuição do impacto ambiental na região do estuário e embocadura) com os custos da implementação efetiva dessa via de mão dupla.

A consideração das dragagens de reservatórios sucessivos, com a transposição de sedimentos para os cursos d'água a jusante, deve ser encarada como uma "escada de sedimentos".

Tanto os peixes quanto os sedimentos têm a sua importância ambiental. Eles estão ligados em rede (CAPRA, 2002). Afinal de contas, os peixes e outros componentes da fauna e flora do baixo São Francisco e de todos os outros estuários, dependem também do sedimento que vem de montante.

### **3.3 Critérios de qualidade ambiental para solos e sedimentos**

#### **3.3.1 Colocação do problema**

Ao se iniciar este item cabe um comentário sobre os termos: solo e sedimento. Segundo FERREIRA (1999):

- *"solo. S. m. 1. Porção da superfície terrestre onde se anda, se constrói, etc.; terra; chão. 2. O solo (1) considerado quanto às suas qualidades geográficas e produtivas. 3. Parte superficial, não consolidada, do manto do intemperismo, a qual encerra matéria orgânica e vida bacteriana, e possibilita o desenvolvimento das plantas. 4. Material da crosta terrestre, não consolidado, que ordinariamente se distingue das rochas, de cuja decomposição em geral provém, por serem suas partículas desagregáveis pela simples agitação dentro da água."*

- *"solo aluvial. Geol. O resultante do transporte de materiais desagregados pelas águas correntes e pelos ventos".*
- *"sedimento. S. m. 1. Substância depositada, pela ação da gravidade, na água ou ao ar. 2. Camada que as águas, ao retirarem-se, deixam depositada".*

Como se observa, o conceito de solo remete a situações estáticas ou quase estáticas (e.g. os estudos da disciplina de Mecânica dos Solos) e o de solo aluvial e de sedimento a situações mais dinâmicas. Assim, consideram-se as rochas da crosta terrestre como a matriz original dos solos e estes, por sua vez, a dos sedimentos.

Existem no Brasil critérios e valores orientadores para solos (CETESB, 2001) e os Critérios de Qualidade de Sedimentos (CQS) como vem sendo desenvolvidos pelo grupo de estudos QUALISED (2003) uma colaboração multi-institucional da UFSCAR (Universidade Federal de São Carlos, SP), UNICAMP (Universidade Estadual de Campinas, SP) e a CETESB (Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental) do Estado de São Paulo. Encontra-se também em discussão, no Ministério do Meio Ambiente, através do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente), uma Proposta de Resolução, objeto do Processo nº 02000.001361/2002-79, que: *"Dispõe sobre diretrizes gerais e critérios técnicos mínimos à avaliação do material a ser dragado em águas jurisdicionais brasileiras, visando o gerenciamento de sua disposição final para subsidiar o processo de licenciamento ambiental"* (CONAMA, 2003).

O estabelecimento de padrões internacionais que expressem a qualidade dos solos é uma tarefa extremamente difícil, se comparada à água superficial e ao ar, devido à sua natureza complexa e variável, sendo o solo, geralmente, um bem econômico de propriedade privada. Conforme CETESB (2001), muitos são os fatores responsáveis pelas diferentes abordagens em diferentes países. Entre estes se destacam: o sistema legal e administrativo; as responsabilidades; as regras de propriedade do solo; os históricos industriais; os aspectos culturais e sociais, que definem as atitudes em relação aos bens a proteger; a forma de uso e ocupação do solo, incluindo as pressões de reutilização; os aspectos econômicos e a disponibilidade de recursos e tecnologias.

Na página 17 de CETESB (2001) pode ser lido o seguinte:

*"No gerenciamento da qualidade de solos e das águas subterrâneas, tanto em caráter preventivo quanto corretivo, as seguintes questões devem ser respondidas:*

- *O que é solo "limpo"?*
- *O que é uma área suspeita de contaminação?*
- *A área está contaminada?*
- *A área requer uma intervenção?*
- *A intervenção é urgente?*
- *Quando deve começar a intervenção?*
- *Qual o objetivo da intervenção?*

*Um solo pode ser considerado "limpo" quando a concentração de um elemento ou substância de interesse ambiental é menor ou igual ao valor de ocorrência natural. Esta concentração foi denominada como valor de referência de qualidade e estes números não serão fixados como padrões em legislação."*

As considerações contidas em CETESB (2001) referem-se a metais presentes em solos estáticos, constituintes da litosfera: as suas influências e conseqüências nas comunidades bentônicas, a sua biodisponibilidade, toxicidade, sua possível atuação como fonte de contaminação da água subterrânea, etc. Já o Projeto QUALISED está voltado para o estudo da partição de espécies químicas entre o sedimento, a coluna d'água e a biota, além da toxicidade desses sedimentos aos seres humanos e ecossistemas, tendo como pano de fundo as represas do Rio Tietê, enquanto que a Proposta de Resolução CONAMA (2003) sugere valores em dois níveis (com base na legislação canadense), para teores de: metais, pesticidas organoclorados, bifenilas policloradas totais (PCB) e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAHs) em sedimentos, para a classificação do material dragado.

No caso do presente estudo, avaliam-se os aspectos físicos (e consideram-se somente os teores de metais) do impacto ambiental devido à dragagem dos sedimentos finos de assoreamento da



Represa da Pampulha e seu possível despejo nos cursos d'água a jusante. Em outras palavras: estuda-se o comportamento hidrodinâmico e o conseqüente impacto ambiental do sedimento fino despejado nos cursos d'água a jusante da represa, e a possibilidade dos mesmos continuarem ou não ligados ao sedimento. Para tanto, são considerados os seguintes aspectos:

- granulometria do sedimento a ser dragado;
- teores em metais do sedimento a ser dragado;
- teores em metais do sedimento de fundo, em suspensão e na água dos cursos d'água a jusante, anteriormente ao possível despejo;
- estudo da capacidade de retenção dos metais aos sedimentos despejados, em função dos parâmetros físico-químicos das águas superficiais dos cursos d'água a jusante;
- medição *in situ* da capacidade de hidrotransporte dos cursos d'água a jusante, para os sedimentos despejados, obtida com experimentos de marcação simultânea, com o emprego de traçadores, da água e do sedimento em suspensão por ela transportado;
- avaliação da dispersão, advecção, diluição e possível sedimentação do material fino despejado e da concentração resultante em suspensão, no sistema receptor, através da análise dos resultados dos experimentos, acima referidos, e de utilização de modelagem matemática do transporte;
- comparação do incremento da concentração oriunda do despejo do material dragado, com a concentração em suspensão natural do sistema, ou seja: sem o despejo considerado, como apresentada em CETEC (1999), LIMA *et al.* (2001) e LIMA & SANTOS (2002).

Como pode ser visto no item a seguir, os critérios de qualidade de solos e de sedimentos existentes ainda não contemplam todos os aspectos acima apontados, quanto à avaliação do impacto ambiental de um possível despejo de material dragado de represas, nos cursos d'água a jusante das mesmas, como no caso da Represa da Pampulha.

### **3.3.2 Alguns critérios para solos adotados na literatura internacional e para solos e sedimentos adotados na literatura nacional**

Devido às variações geológicas e litológicas entre as diversas regiões do globo, a adoção de critérios gerais de qualidade de solos e sedimentos não é possível. Assim, a adoção de critérios regionais tem sido uma tendência.

Em países onde o assunto se encontra em estágio mais avançado de discussão, não tem sido aconselhável a adoção, na forma de lei, de valores de qualidade de solos. O que tem sido feito é a produção de listas com valores norteadores de:

- referência - simboliza as condições de um solo limpo;
- alerta - presume alterações na qualidade original do solo (quando excedido requer monitoramento da área em questão);
- intervenção - indica a possibilidade de danos à saúde dos seres humanos e ao ecossistema quando ultrapassado, exigindo ações mitigadoras e isolamento da área.

Descrevem-se brevemente, nos itens seguintes, dentre os vários critérios de qualidade de solos desenvolvidos até agora em diferentes países, os mais destacados. Esta descrição tem como base a referência CETESB (2001).

#### 3.3.2.1 Critério alemão

A versão preliminar da Lei Federal Alemã de Proteção do Solo foi promulgada em 1999, em caráter nacional, contemplando estratégias de prevenção e também de controle de áreas contaminadas. Nessa Lei, foram estabelecidos valores de investigação para o arsênio, chumbo, cádmio, cromo, níquel, mercúrio e algumas substâncias orgânicas.

A Legislação Federal Alemã de Proteção do Solo baseia-se em três tipos de valores orientadores para solos:

- valor de precaução (*precautionary*), quando ultrapassado, é um indicativo de alteração na qualidade do solo, considerando-se também fatores geogênicos (este valor também estabelece cargas poluidoras permissíveis para a prevenção ou redução da poluição);

- ação (*action*), quando excedido, esse valor indica, a possibilidade de existir perigo ou contaminação, considerando os usos do solo, e exige medidas de controle;
- gatilho (*trigger*), aquele que ao ser excedido requer uma investigação caso a caso, fazendo o levantamento dos usos mais relevantes do solo e identificando se existe perigo ou contaminação no local.

Os valores acima foram obtidos a partir do cálculo da exposição estimada, em decorrência do contato direto com o solo, para crianças em parques infantis, áreas residenciais e parques públicos e para adultos também no cenário industrial/comercial. Foram também derivados valores orientadores para vias indiretas de exposição separadamente, ou seja, solo - planta (horta, agricultura e pastagem). As concentrações naturais dos metais no solo foram calculadas com base em análises de cerca de 16.000 amostras de solos, sendo que essas concentrações foram utilizadas para verificar a coerência dos valores orientadores calculados, segundo BACHMANN (2000), citado em CETESB (2001).

#### 3.3.2.2 Critério holandês

A Holanda foi o primeiro país a estabelecer um programa nacional para avaliação de contaminação e estabelecimento de níveis de intervenção, considerando a multi-funcionalidade do solo (funções de agricultura, ecologia, transporte, suprimento de água potável, etc.). Este país formulou, em 1983, uma lista com valores orientadores para a avaliação e remediação de locais contaminados, sendo esta conhecida como: "Lista Holandesa" ou "Lista ABC". Esta foi atualizada em 1994, com base em conhecimentos científicos, incluindo a modelagem de avaliação de risco e considerando-se a variação da porcentagem de matéria orgânica e argila no solo. Foi publicada, neste mesmo ano, pelo Ministério da Habitação, Planejamento e Meio Ambiente da Holanda - VROM, em atendimento à Lei de Proteção do Solo (VROM,1994, citado em CETESB 2001). Estes valores denominados STI ("*Streefwaarde*" - referência, "*Toetsingswaarde*" - alerta e "*Interventiewaarde*" - intervenção), estabelecem três níveis de qualidade para os solos e as águas subterrâneas:

- valor de referência - S, indica o nível de qualidade para "solo limpo" e atende ao conceito de multifuncionalidade;

- valor de alerta - é a média entre os valores S e I e indica alterações nas propriedades funcionais do solo sendo que, quando excedido, pode requerer investigações detalhadas e também monitoramento;
- valor de intervenção - I, é o valor limite acima do qual existe risco à saúde humana e ao ambiente (se este valor for excedido, em média, em um volume de 25m<sup>3</sup> de solo/sedimento ou em 100m<sup>3</sup> de água subterrânea, existe uma séria contaminação e a remediação é necessária).

Os valores de referência foram obtidos a partir de relações empíricas relacionadas ao conteúdo de argila e matéria orgânica do solo. Já os valores de intervenção são oriundos de análises de risco que levam em conta aspectos toxicológicos e ecotoxicológicos das diversas espécies químicas presentes no solo. Para a avaliação de risco o Instituto Nacional de Saúde Humana e Meio Ambiente da Holanda (RIVM) desenvolveu um modelo matemático (C-Soil) com o qual pode-se calcular, a partir de uma concentração inicial existente no solo, as concentrações do contaminante nos outros compartimentos do solo (solução do solo e ar do solo). Para avaliar a concentração do contaminante na água subterrânea, como existem processos de atenuação e diluição, utiliza-se um fator que correlaciona a concentração na solução do solo com a concentração no aquífero. Este fator foi assumido como sendo 10, ou seja, a concentração no aquífero é 10 vezes menor que a concentração na solução do solo, calculada pelo modelo C-Soil.

Qual seria este fator de correlação da concentração na solução de solo (ou sedimento) com a concentração na água superficial, no caso da ressuspensão do sedimento na água superficial, em consequência do processo de dragagem com transposição? É um tema novo que agora se apresenta e que poderá ser debatido futuramente pela comunidade científica embasada, por exemplo, em resultados de experimentos da dinâmica de sedimentos em suspensão, efetuados com o emprego de traçadores, e também nos resultados das medições de parâmetros físico-químicos da água superficial, similares aos realizados durante este trabalho (capítulos 7, 8 e 9). Estes estudos poderão ser mais aprofundados com novos trabalhos específicos de campo e laboratório, que estão sugeridos na parte de conclusões e recomendações (Capítulo 10).

### 3.3.2.3 Critério norte-americano

A Agência de Proteção Ambiental (EPA) dos EUA lançou, em 1996, uma lista para solos contendo 110 substâncias com valores genéricos ("*Soil Screen Level*" - SSL), obtidos a partir de modelos padronizados baseados no risco máximo aceitável de exposição humana. Esses valores são ferramentas importantes no auxílio à identificação inicial de áreas contaminadas que devem ser priorizadas pela atuação dos órgãos ambientais, assim como na alocação de investimentos, uma vez que evitam investigações desnecessárias.

Como no caso da metodologia adotada na Holanda, também a metodologia do SSL da EPA ao estimar a carga de poluentes aceitável no solo para que as águas subterrâneas não sejam afetadas, emprega fatores de diluição/atenuação ("*Dilution Attenuation Factors*" - DAF), considerando que os contaminantes presentes na solução do solo estão sujeitos a processos físicos, químicos e biológicos que tendem a diminuir a concentração que chega nas águas subterrâneas. Dessa forma, supondo que o padrão de qualidade de um certo contaminante na água subterrânea seja 0,05mg/L, e o DAF = 10, então a concentração aceitável no solo será 0,5mg/L. Porém, apenas o processo físico de diluição é levado em consideração no DAF, já que não se tem, até o presente momento, uma total compreensão dos processos biogeoquímicos para a maioria dos contaminantes. Em locais onde o nível do aquífero freático é muito profundo, a EPA sugere o uso de modelos mais sofisticados de transporte de massa.

Será que poderemos vir a ter, no caso da dragagem com transposição, além da compreensão dos processos físicos, que estamos procurando colaborar para esclarecer no presente trabalho, uma compreensão que abranja também os processos biogeoquímicos?

### 3.3.2.4 Critério brasileiro para solos

No Brasil, ainda há muito que se fazer em termos de qualidade do solo, sendo que só existem trabalhos publicados sobre o assunto para o Estado de São Paulo (CETESB, 2001). Esta referência se constitui em um relatório, fruto de um trabalho de cinco anos, que estabelece valores orientadores (valores de Referência, Alerta e Intervenção) válidos para um período de quatro anos. Após este prazo eles serão submetidos a uma revisão. Esses valores foram obtidos tendo como principal base metodológica, a legislação holandesa, além de incorporar alguns critérios franceses, canadenses, norte-americanos e alemães, como, por exemplo, a adoção de

diferentes cenários de uso e ocupação do solo, o conceito de valor de alerta com base no valor de precaução (legislação alemã) e a adoção, para a elaboração dos valores de intervenção, somente de dados de toxicologia humana (legislações da Alemanha e dos Estados Unidos) e não também de ecotoxicológicos, como no Canadá, Holanda e Inglaterra.

No estabelecimento de valores orientadores para solos e águas subterrâneas do Estado de São Paulo, perseguem-se os seguintes objetivos (CETESB, 2001):

- *"Conhecer as concentrações naturais dos elementos legislados, principalmente os metais, para avaliação da qualidade de solos e águas subterrâneas;*
- *Subsidiar uma política de prevenção que define ações para redução da quantidade de poluentes aplicados em futuras destinações finais no solo; e*
- *Subsidiar uma política de gerenciamento de áreas contaminadas, a fim de controlar os riscos à saúde humana e ambiental."*

Ainda, segundo CETESB (2001): *"... a melhor alternativa para o Estado de São Paulo, é a adoção de uma estratégia combinada, utilizando-se uma lista de valores orientadores genéricos para o monitoramento da qualidade do solo e água subterrânea e para diagnóstico e apoio à decisão quanto às ações de controle das áreas suspeitas de contaminação e avaliação de risco caso-a-caso onde se fizer necessária, em etapas posteriores."*

Os níveis de valores de orientação para o Estado de São Paulo são os seguintes:

- valor de referência de qualidade (R) - indica o nível de qualidade para um solo considerado limpo ou a qualidade natural das águas subterrâneas, e atende também, como o da Holanda, ao conceito de multifuncionalidade do solo;
- valor de alerta (A) - indica uma possível alteração da qualidade natural dos solos, com caráter preventivo e, quando excedido, requer monitoramento, identificação das fontes de poluição e seu controle;
- valor de intervenção (I) - indica o limite de contaminação acima do qual existe risco potencial de efeito deletério sobre a saúde humana, implicando uma ação imediata na área, que inclui uma investigação detalhada e até mesmo medidas emergenciais, como: restrição do acesso de pessoas e suspensão do consumo de água subterrânea da área.

Os valores de referência (R) foram obtidos a partir de análises estatísticas descritivas e multivariadas dos parâmetros: 1- dados analíticos de metais que podem apresentar riscos à saúde humana e os encontrados com mais frequência em casos de contaminação de solo: alumínio, antimônio, arsênio, bário, cádmio, chumbo, cobalto, cobre, cromo, ferro, manganês, mercúrio, molibdênio, níquel, prata, selênio, vanádio e zinco; 2- os seguintes parâmetros do solo, que podem ser teoricamente relacionados com as concentrações naturais de metais no solo: matéria orgânica, granulometria, pH, resíduo volátil, capacidade de troca catiônica (CTC), óxidos de ferro, manganês e alumínio; determinados em amostras dos principais tipos de solos do Estado de São Paulo, coletadas em áreas sem influências antropogênicas.<sup>(\*)</sup>

Os valores de alerta (A) foram estabelecidos como sendo a menor concentração que causa alguma fitotoxicidade, publicada na literatura nacional, considerando-se também as concentrações máximas permitidas para aplicação de lodo em solos agrícolas, publicadas na literatura internacional.

Os valores de intervenção (I) são provenientes de análises de risco, baseadas em cenários hipotéticos (área agrícola, área residencial e área industrial), que definem o comportamento humano (quantidade ingerida de solo, água e vegetais, quantidade de ar inalada, tempo de permanência no local, etc.).

O referido Relatório da CETESB também estabelece valores orientadores para substâncias orgânicas ausentes naturalmente no solo e para água subterrânea, os quais não serão abordados no presente trabalho.

Na Tabela 3.1, adaptada de CETESB (2001), são apresentados os valores orientadores para metais em solos dos seguintes países: Brasil (Estado de São Paulo - elaborado por CETESB); Holanda, EUA, Alemanha, Canadá, Inglaterra e França.

---

<sup>(\*)</sup> No caso da Bacia Hidrográfica da Pampulha, objeto do presente estudo, tal determinação de valores de referência para solos pode ser difícil, devido à abrangência da influência antropogênica em praticamente toda a bacia.

### 3.3.2.5 Critério brasileiro para sedimentos - QUALISED

Os Critérios de Qualidade de Sedimentos (CQS) que estão sendo desenvolvidos dentro do projeto QUALISED (2003) para alguns reservatórios e rios paulistas, são voltados para a partição de espécies químicas entre o sedimento, a coluna d'água e a biota, além da toxicidade desses sedimentos aos seres humanos e ecossistemas.

Na página do Projeto QUALISED (2003), na Internet, pode ser lido:

*"O conjunto de CQS a ser estabelecido pelo Projeto QualiSed, além de definir a qualidade dos sedimentos, auxiliarão:*

*(a) na definição de padrões para os sedimentos com vistas a manter os corpos d'água nas suas respectivas classes complementando a legislação vigente através da inclusão dos sedimentos como fonte ou sumidouro de contaminantes;*

*(b) na adoção de ações corretivas de manejo definindo tipos de tratamento e/ou destino do sedimento no caso de dragagem; (é o caso do presente estudo - nota do autor)*

*(c) na avaliação mais segura da qualidade das águas a serem utilizadas para abastecimento público definindo a escolha do tratamento a ser utilizado para garantir a remoção dos contaminantes;*

*(d) na orientação da escolha de formas de remediação e/ou ações para melhoria da qualidade de águas altamente contaminadas por atividades antrópicas;*

*(e) no fornecimento de subsídios para ações de prevenção e controle das fontes de contaminação, com o intuito de evitar que os sedimentos se tornem uma fonte perene de contaminantes nos ecossistemas aquáticos."*



Tabela 3.1 - Valores orientadores para metais em solos de vários países

Sustância (mg.Kg <sup>-1</sup> )	Estado de São Paulo					Holanda (1)	EUA SSL Ingestão de Solo		Alemanha Valores Gatilho (ingestão direta do solo)				Canadá Federal			Inglaterra		França		
	Valores de Ref. de Qual.	Alerta	Valores de intervenção				Resid.	Indust.	Parq. Infant.	Resid.	Parque	Indus.	Agricult./ Resid.	Resid.	Indust.	A	B	C	D	E
			Agric/ APM	Resid.	Indust.															
Antimônio	< 0,5	2,0	5,0	10	25	-	31	820	-	-	-	-	20	20	40	-	-	-	-	-
Arsênio*	3,5	15	25	50	100	55	0,4	3,5	25	50	125	140	20	30	50	10	40	40	100	200
Bário	75	150	300	400	700	625	5500	140000	-	-	-	-	750	500	2000	-	-	200	400	1000
Cádmio*	< 0,5	3	10	15	40	12	78	2000	10	20	50	60	3	5	20	3	15	4	10	20
Chumbo*	17	100	200	350	1200	530	400	-	200	400	1000	2000	375	500	1000	500	2000	200	500	1000
Cobalto	13	25	40	80	100	240	-	-	-	-	-	-	40	50	300	-	-	30	60	150
Cobre*	35	60	100	500	700	190	-	-	-	-	-	-	150	100	500	-	50	200	500	1000
Cromo*	40	75	300	700	1000	380	390	-	200	400	1000	1000	750	250	500	600	1000	300	750	1500
Mercúrio*	0,05	0,5	2,5	5	25	10	-	-	10	20	50	80	0,8	2	10	1,0	2,0	2	5	10
Molibidênio	< 25	30	50	100	120	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	20	40
Níquel*	13	30	50	200	300	210	1600	41000	70	140	350	900	150	100	500	20	20	100	250	500
Prata*	0,25	2	25	50	100	-	390	10000	-	-	-	-	-	25	50	-	-	20	50	100
Selênio	0,25	5	-	-	-	-	390	10000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Vanádio	275	-	-	-	-	-	550	14000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zinco*	60	300	500	1000	1500	720	23000	610000	-	-	-	-	600	500	1500	130	130	600	1500	3000

**São Paulo** : (\*) - com base no risco à criança : cenário Agrícola/APMax; (—) não estabelecido ; **Holanda** - (1) : Multifuncionalidade; **Inglaterra** : A - Jardins Domésticos, Loteamentos / B - Parques, Campos para Jogos . **Fonte** : VISSER (1994) e BUONICORE (1995) citados em CETESB (2001).

Segundo autores do QUALISED (2003), o principal problema de deterioração da qualidade da água e dos sedimentos, nos reservatórios estudados, está relacionado com nutrientes e não com contaminantes inorgânicos (metais) e/ou compostos orgânicos xenobióticos.

Um dos parâmetros empregados para a construção dos CQS, que permite prever se um sedimento é tóxico ou não, devido ao seu conteúdo de metais, é aquele que utiliza como variáveis os Sulfetos Volatilizáveis por Acidificação (SVA) e os Metais Simultaneamente Extraídos aos sulfetos volatilizáveis por acidificação (MSE) (MOZETO, 2001). Geralmente, os sulfetos formam compostos pouco solúveis quando combinados com a maioria dos metais (ordem de solubilidade:  $\text{Ag}_2\text{S} > \text{Cu}_2\text{S} > \text{PbS} > \text{CdS} > \text{ZnS} > \text{Ni}_3\text{S}_2$ ), dessa forma podem exercer ação controladora da quantidade de metais disponíveis na forma iônica, na fase aquosa. Quando o resultado do somatório da diferença entre  $\Sigma[\text{MSE} - \text{SVA}]$  é  $< 0$ , isso indica que a concentração da mistura de metais presentes nos sedimentos é aceitável para a proteção dos organismos nos testes de toxicidade aguda e crônica, uma vez que há um controle da fase sulfídrica sobre esses metais e quando o resultado da diferença  $\Sigma[\text{MSE} - \text{SVA}]$  é  $> 0$ , os sedimentos não necessariamente, apresentam toxicidade, podendo haver um controle por outra fase que não o sulfeto, como por exemplo, o Carbono Orgânico Total (COT).

Um relatório resultante do I *Workshop* realizado em 2001 (QUALISED, 2003), pela equipe do já referido projeto, apresenta valores de referência ou de "background" para metais em sedimentos de fundo, lacustres e fluviais, da Bacia do Rio Tietê, em São Paulo (NASCIMENTO & MOZETO, 2001). Estes valores de referência foram obtidos a partir de amostras de testemunho longo, com base na geocronologia, empregando datação com  $^{210}\text{Pb}$ , correspondentes ao período pré-industrial e amostras coletadas em grotas, lagoas e nascentes de rios tributários, presumivelmente ainda não poluídos e próximos dos locais de amostragem. Neste mesmo relatório, podem ser encontrados teores de metais para amostras de sedimento de fundo superficial (profundidade de 0 a 2cm) de represas paulistas.

#### 3.3.2.6 Proposta de Resolução do CONAMA

A Proposta de Resolução, objeto do Processo nº 02000.001361/2002-79, aprovada na 3ª Reunião da Câmara Técnica de Controle Ambiental em 28 de agosto de 2003, e na 3ª Reunião da Câmara Técnica de Assuntos Jurídicos, em 04 de setembro de 2003: "*Dispõe sobre diretrizes*

*gerais e critérios técnicos mínimos à avaliação do material a ser dragado em águas jurisdicionais brasileiras, visando o gerenciamento de sua disposição final para subsidiar o processo de licenciamento ambiental."* CONAMA (2003).

Esta Proposta de Resolução, composta de doze artigos e de um anexo, é fruto de um Grupo de Trabalho do CONAMA que teve a sua primeira reunião em 20 de setembro de 2002 e foi encerrado com a décima reunião realizada em 29 de julho de 2003. Assim, ela foi elaborada concomitantemente ao presente trabalho e enfoca alguns aspectos que atendem à dragagem com transposição dos sedimentos que assoreiam a Represa da Pampulha. Porém, vários dos resultados dos estudos aqui desenvolvidos (Capítulo 7 em diante), dado o seu potencial de informações físicas sobre a disposição de sedimentos nos ecossistemas aquáticos mas, crê-se que devido às suas características inovadoras, não foram ainda levados em conta na Proposta de Resolução citada. Entretanto, as inovações tecnológicas e metodológicas aqui apresentadas poderão dar subsídios em uma revisão futura da mesma, como previsto em seu Art. 9º: "*Esta Resolução será revisada em até cinco anos, objetivando o estabelecimento de valores orientadores nacionais para a classificação do material a ser dragado*".

São resumidos, a seguir, os principais tópicos de interesse ao presente trabalho.

No primeiro artigo da Proposta são definidos, claramente, os seus objetivos:

*"Art. 1º - Estabelecer as diretrizes gerais e procedimentos mínimos necessários à avaliação do material a ser dragado para o gerenciamento de sua disposição em águas jurisdicionais brasileiras.*

*Parágrafo único. Para efeito de classificação do material a ser dragado para disposição em terra, o mesmo deverá ser comparado aos valores orientadores estabelecidos para solos; caso o material a ser dragado não atenda a esses valores, ou enquanto não estabelecidos pelo CONAMA, deverão ser selecionadas alternativas autorizadas pelo órgão ambiental competente."*

No Artigo 2º são adotadas as seguintes definições de interesse:

"....."

*I - Material dragado: material retirado ou deslocado do leito dos corpos d'água decorrente da atividade de dragagem, desde que esse material não constitua bem mineral;*

.....

*III - Disposição final do material dragado: local onde serão colocados os materiais resultantes das atividades de dragagem, onde possam permanecer por tempo indeterminado, em seu estado natural ou transformado em material adequado a essa permanência, de forma a não prejudicar a segurança da navegação, não causar danos ao meio ambiente ou à saúde humana.*

..... "

As águas jurisdicionais brasileiras, conforme ainda o Artigo 2º, compreendem as águas interiores e as águas marítimas. As águas do ecossistema abrangido pelo presente estudo (Represa da Pampulha e cursos d'água a jusante) se enquadram em:

*"IV - Águas jurisdicionais brasileiras:*

*I - Águas interiores:*

.....

*d) as dos rios e de suas desembocaduras;*

*e) as dos lagos, das lagoas e dos canais;*

..... "

O Artigo 3º trata da classificação do material a ser dragado considerando, para tanto, dois níveis para critérios de qualidade:

*"I - NÍVEL 1: limiar abaixo do qual espera-se baixa probabilidade de efeitos adversos à biota.*

*II - NÍVEL 2: limiar acima do qual espera-se um provável efeito adverso à biota.*

*§ 1º Os presentes critérios fundamentam-se na comparação dos resultados da caracterização do material a ser dragado, com os valores orientadores previstos na TABELA III do anexo desta Resolução, a fim de orientar o gerenciamento da disposição do material dragado no procedimento de licenciamento ambiental."*

A Proposta de Resolução em apreço não considera, adequadamente, os aspectos físicos da dinâmica do sedimento despejado em meio líquido. Apenas menciona em seu Art. 7º - Inciso II: "*o material cuja concentração de qualquer dos poluentes exceda o NÍVEL 2 somente poderá ser disposto mediante previa comprovação técnico-científica e monitoramento do processo e da área de disposição, de modo que a biota desta área não sofra efeitos adversos superiores àqueles esperados para o NÍVEL 1, não sendo aceitas técnicas que considerem, como princípio de disposição, a diluição ou a difusão dos sedimentos do material dragado*" (grifos do autor).

Colocado desta maneira genérica (parte grifada), sem considerar o comportamento resultante do sedimento, fruto da ação antrópica somado às características de transporte naturais do meio aquático, este impedimento poderá inviabilizar, no futuro, quaisquer atividades de dragagem que considerem o despejo de sedimento, com concentração de poluentes acima do NÍVEL 2, em meio aquático. Ressalte-se que, para todos os tipos de despejo em meio líquido sempre há, em maior ou menor grau, difusão molecular e a conseqüente diluição, que depende também da: advecção, dispersão, decantação e ressuspensão.

A magnitude de cada um desses fenômenos e a preponderância de uns sobre os outros, conforme o caso, vai depender do tipo de corpo receptor (lago, rio, estuário ou mar aberto), das condições em que o despejo seja feito (tipo de equipamento, composição e densidade do material, concentrações iniciais, volumes e/ou vazões de descarga), características físicas e hidrodinâmicas do corpo receptor (dimensões físicas, velocidades de correntes, grau de turbulência no campo próximo e no campo afastado do despejo, grau de estratificação, etc.). A capacidade de hidrotransporte associada às dimensões físicas do meio receptor é que irá efetivamente determinar a magnitude da área afetada pelo despejo.

Traçadores marcando sedimento e água, em estudos experimentais, como os realizados no presente trabalho, são peças fundamentais na avaliação da área a ser afetada por despejo de

dragagem. Dessa forma, o texto do Art. 2º, em seu inciso III - *Disposição final do material dragado*, acima transcrito, poderá ser mais bem compreendido, caso a caso.

É importante ressaltar que o transporte de sedimentos em suspensão é um fenômeno natural e os vários barramentos construídos pelo homem o impedem, em muitos casos, com conseqüências danosas em longo prazo, como as que se observam atualmente, por exemplo, na foz do Rio São Francisco. Estes pontos precisam ser esclarecidos e o presente trabalho pretende ser uma colaboração, neste sentido, para o despejo de dragagem de sedimentos finos em rios.

Ressalte-se que as normas e publicações que tratam do descarte de efluentes líquidos e gasosos no meio ambiente levam em consideração a diluição que o corpo receptor naturalmente proporciona, como, por exemplo, no caso de efluentes líquidos a Resolução CONAMA Nº 20 (CONAMA, 1986) e, no caso de efluentes gasosos: U.S. EPA (1986); LIU *et al.* (1997); Deliberação Normativa COPAM nº 1/81 (COPAM, 1981); Deliberação Normativa COPAM nº 11/86 (COPAM, 1986); Resolução CONAMA nº 005/89 (CONAMA, 1989); Deliberação Normativa COPAM nº 49/01 (COPAM, 2001); nas quais são estabelecidos Padrões de Qualidade do Ar e sugeridos limites máximos de emissão que dependem, por sua vez, da capacidade difusora e diluidora do meio ambiente. Até os critérios de qualidade de solos antes abordados: holandês (Item 3.3.2.2) e norte-americano (Item 3.3.2.3) consideram o efeito da diluição na avaliação da concentração de contaminantes na água subterrânea. Abordagem semelhante deve ser adotada para o despejo de sedimento fino de dragagem no meio aquático.

### **3.4 O uso de traçadores radioativos na marcação de sedimentos finos em apoio à dragagem em geral - considerações prévias para a sua utilização na Represa Pampulha**

As considerações do presente item são baseadas, dentre outras, nas referências bibliográficas: (DE KONING, 1981), DE HEER (1986a, 1986b, 1986c), (BANDEIRA, 1986), (DT ENGENHARIA, 1997a, 1997b) que tratam de dragagem e de seus equipamentos, em geral, e também em STIGTER *et al.* (1989), uma publicação relativa a diretrizes sobre controle de sedimentação em reservatórios, resultado de um grupo de trabalho do Comitê Internacional de Sedimentação em Reservatórios. Elas se fundam também na experiência adquirida pelo autor, através da sua participação em estudos de apoio a trabalhos de dragagem de sedimentos finos,

efetuados nas décadas de 70 e 80, com o emprego de traçadores radioativos marcando sedimentos finos, em vários portos brasileiros e, na década de 90, no Uruguai.

Estes estudos de apoio, traduzidos em relatórios técnicos para clientes estatais federais e estaduais, e empresas privadas, constaram, sobretudo da marcação com  $^{198}\text{Au}$ , de sedimentos finos na cisterna de dragas autotransportadoras (TSHD – "*Trailing Suction Hopper Dredger*"), em batelões ("*Barges*") que são enchidos a partir de dragas de alcatruzes (BD - "*Bucket Dredger*") e no jato de saída de dragas hidráulicas de sucção e recalque (HD - "*Hydraulic Dredger*"). Estas últimas são semelhantes à que se utilizará na DLD a ser implementada na Represa da Pampulha, conforme DT ENGENHARIA (1997a, 1997b).

Estes relatórios técnicos são um rico material, com dados reais medidos na natureza, para estudos da dinâmica de sedimentos finos em mar aberto, oriundos de despejos de dragagem. Porém, como muitos são de propriedade dos clientes, os seus resultados não tiveram uma ampla divulgação através de publicações nos meios científicos e acadêmicos. Apenas algumas publicações foram efetuadas, e alguns relatórios de missão de projetos de cooperação técnica foram escritos documentando os trabalhos, tais como: CAILLOT *et al.* (1978), AUN & BANDEIRA (1984), AUN *et al.* (1991), AUN & MENDES (1992), AUN & BANDEIRA (1995), BANDEIRA & PINTO (1997), PINTO *et al.* (1998).

A marcação dos sedimentos finos permite acompanhar a evolução da sua movimentação em suspensão (advecção e dispersão), por até cerca de 2 a 3 horas após o despejo, e estudar também a sua taxa real de sedimentação, o que é feito através de embarcações posicionadas e dotadas de cintilômetros (detetores de radiação  $\gamma$ ) colocados em uma ou várias profundidades. São efetuadas detecções lagrangeanas, com o barco navegando sobre toda a nuvem formada, em direções longitudinais e transversais ao seu movimento preferencial sendo suas trajetórias posicionadas por equipamentos, como: GPS, teodolitos, sextantes, etc. Obtém-se, assim, a velocidade de advecção e os coeficientes de dispersão longitudinal ( $D_L$ ), transversal ( $D_T$ ) e a taxa de decantação ( $SR$  "*Sedimentation Rate*") (CAILLOT, 1973), (TOLA, 1981), (TOLA *et al.* 1987). Ainda como estudos relativos à dinâmica de sedimentos finos, no que respeita o seu comportamento, ensaios de marcação e trabalhos de laboratório e campo, mencionam-se: MIGNIOT (1968), BOUGAULT (1970) e WILSON-JR (1987).

Os estudos só são executados após um conhecimento prévio dos agentes hidrodinâmicos atuantes em cada área de estudo (correntes, ondas, marés e ventos), o que envolve uma avaliação de dados pretéritos, à época dos estudos que tiveram a participação deste autor, quase sempre não disponíveis em detalhamento suficiente ao bom planejamento dos estudos, o que requeria campanhas para levantamentos de dados anteriormente aos mesmos e também medições durante o seu transcurso.

Dependendo do tipo e da capacidade da draga (produzindo maior ou menor *momentum* vertical descendente ao efetuar o despejo), do seu estado de movimentação (parada ou em movimento) e também da profundidade local e das condições hidrodinâmicas reinantes no momento do despejo, pode haver maior ou menor deposição do sedimento marcado no fundo, nas vizinhanças do local de despejo. Isto é monitorado imediatamente após a detecção da movimentação do sedimento em suspensão, colocando-se o cintilômetro em um trenó, o qual, rebocado pela embarcação, desliza sob a superfície do fundo.

Estudos da dinâmica de sedimentos com o emprego de radioisótopos marcando os mesmos, podem ser efetuados por um período de tempo teórico de até 10 vezes a meia vida ( $T_{1/2}$ ) do radioisótopo utilizado, considerando um único lançamento. Este período será tanto menor quanto maior for a dispersão do material marcado. No caso do  $^{198}\text{Au}$ , empregado em diversos trabalhos (CAILLOT *et al.* 1978), (AUN & BANDEIRA, 1984), (AUN *et al.* 1991), (AUN & BANDEIRA 1995), tendo  $T_{1/2} = 2,7$  dias, teoricamente é possível acompanhar o sedimento fino marcado por cerca de 27 dias.

Na prática, porém, com o emprego do  $^{198}\text{Au}$ , é possível seguir a evolução do comportamento do material fino depositado por até cerca de uma semana após o despejo, o que depende também da quantidade de sedimento marcado depositado, da sua área de deposição inicial e das condições hidrodinâmicas reinantes junto ao fundo.

Por outro lado, o acompanhamento do sedimento em suspensão, como já mencionado, é da ordem de 2 a 3 horas isto porque, em mar aberto e baías, a dispersão tridimensional é facilitada pela falta de fronteiras nas proximidades dos locais de lançamento. A fronteira mais próxima é geralmente o fundo e, por vezes, este se encontra bem abaixo da quilha das dragas.



Às vezes, o sedimento chega ao fundo logo abaixo do ponto de lançamento, devido à forte influência do *momentum* vertical descendente, sobretudo aquele produzido por dragas de alta capacidade, como as autotransportadoras (TSHD), por exemplo, as dragas Boa Vista e Guanabara, com capacidade de 3.000 a 4.000m<sup>3</sup>, então pertencentes à antiga Companhia Brasileira de Dragagem (CBD), empresa ligada ao Governo Federal, extinta na década de 90. Hoje em dia, existem dragas autotransportadoras com capacidade total em cisterna de até 10.000m<sup>3</sup>.

Porém, para os estudos da dinâmica de sedimentos em suspensão, como os realizados nos ribeirões Pampulha e Onça, e no Rio das Velhas e abordados no presente trabalho, as condições de fronteiras, de descarga de sedimento dragado e de escoamentos são bastante distintas daquelas encontradas em despejo de dragagem de sedimentos finos, dragados em regiões portuárias e costeiras. Os corpos d'água são estreitos e pouco profundos, priorizando a dispersão longitudinal e conduzindo para detecções eulerianas (detetor fixo e nuvem marcada transitando pelo mesmo), relativamente mais fáceis de serem executadas, e terem seus resultados analisados, do que as correspondentes detecções lagrangeanas em mar aberto.

Para a real efetivação de procedimentos ambientalmente corretos e econômicos de dragagem de sedimentos finos, em regiões portuárias ou em reservatórios, como aqueles que permanentemente assoreiam a Represa da Pampulha, e sua disposição nos cursos d'água à jusante, ou mesmo em terra, vários aspectos precisam ser levados em conta. Dentre eles, pode-se destacar:

- a) Definição das quantidades a serem dragadas, tanto para a dragagem de estabelecimento ou implantação ("*capital dredging*") quanto para a de manutenção, e prazos de execução da dragagem de estabelecimento;
- b) Tipos, porcentagens e granulometria dos materiais a serem dragados;
- c) Teor de contaminação, em metais, dos sedimentos finos e da matéria orgânica associada a serem dragados;
- d) Estado dos cursos d'água no que diz respeito à concentração de sedimentos finos em suspensão e ao seu grau de contaminação por metais, tanto no sedimento quanto na água, anteriormente a qualquer despejo;

e) Avaliação da capacidade de hidrotransporte dos cursos d'água para os sedimentos finos ali descartados.

Cabe primeiramente um comentário mais detalhado sobre o tópico *a* acima, que é genérico para todos os tipos de dragagem, sendo os demais tópicos (*b* a *e*) comentados, mais brevemente, em seqüência, especificamente para o caso da dragagem da Represa da Pampulha.

*a) Definição das quantidades a serem dragadas, tanto para a dragagem de estabelecimento ou implantação ("capital dredging") quanto para a de manutenção, e prazos de execução da dragagem de estabelecimento*

A definição das quantidades a serem dragadas, seus prazos de execução, bem como o conhecimento dos tipos, porcentagens e granulometria dos materiais a serem dragados são de fundamental importância para a correta escolha e o dimensionamento dos equipamentos de dragagem e das áreas de bota-fora (DE HEER, 1986a, 1986b, 1986c).

A dragagem de estabelecimento ou implantação é aquela que se efetua para se conformar o corpo d'água à geometria que se deseja manter inalterada com a posterior dragagem de manutenção. Para se manter um corpo d'água com suas características geométricas inalteradas, a partir de um momento definido, é necessário efetuar a sua dragagem de manutenção, ou seja: retirar para fora do mesmo, em um determinado intervalo de tempo (geralmente se trabalha com período anual), exatamente a quantidade de sedimentos e de outros materiais que o assoreiam nesse mesmo intervalo de tempo. Trata-se de um balanço de massa.

No caso da dragagem da Represa da Pampulha e levando em consideração duas de suas importantes funções:

- seu papel de amortecimento de cheias, nesta bacia hidrográfica urbana densamente ocupada, sobretudo a jusante da barragem;
- a importância do Complexo Arquitetônico da Pampulha no cenário cultural nacional e internacional;

a definição do volume da dragagem de estabelecimento bem como o seu prazo de execução, depende das autoridades municipais responsáveis. Relativamente ao volume de dragagem de manutenção, que é o dado principal deste item a ser considerado para a viabilização do despejo

de dragagem nos cursos d'água a jusante, os dois últimos levantamentos batimétricos efetuados, já mencionados anteriormente (FIORAVANTE NETO *et al.* 1994), (SALIM *et al.* 2000), permitiram avaliá-lo em cerca de 387.000 m<sup>3</sup>/ano, apenas na região da represa compreendida entre a Ilha dos Amores e a barragem (Figura 1.2).

Podem-se fazer, simultaneamente, os dois tipos de dragagem (de estabelecimento e de manutenção) se os volumes anualmente dragados forem superiores, durante um certo período inicial, ao volume de dragagem de manutenção. Pode-se, inclusive, trabalhar com o sistema de sobredragagem que consiste, uma vez efetuada a dragagem de estabelecimento, dragar-se mais que o volume anual de dragagem de manutenção, espaçando-se assim as operações de dragagem, com a utilização de uma draga de maior capacidade.

Este sistema com sobredragagem é, muitas vezes, utilizado para a manutenção de profundidades em áreas portuárias e canais de acesso a portos, em locais onde não é economicamente viável manter-se, permanentemente, os equipamentos de dragagem ou em áreas remotas, onde o custo do deslocamento dos equipamentos de dragagem é parcela considerável do investimento, ou ainda em casos onde a economia de escala exija o emprego de equipamento com maior capacidade (DE HEER, 1986c). Ele pode também ser empregado, com vantagem econômica, na dragagem de represas.

Portanto, o equipamento de dragagem (draga de sucção e recalque, no caso da Pampulha) deve ser dimensionado para atender da forma mais eficiente e, conseqüentemente, com economia, às dragagens de estabelecimento e de manutenção.

Em tese, dependendo do tipo de material dragado, este pode ter um valor econômico bem definido, considerando-se uma distância e modo de transporte, econômica e ambientalmente viáveis, para os locais de utilização. No caso de dragagem da areia que chega aos reservatórios, esta pode ser utilizada na construção civil (BAPTISTA *et al.* 1995). Muitos países já desenvolveram terras agricultáveis de valor em regiões baixas, com a utilização seletiva dos sedimentos arenosos e silto-argilosos dragados de reservatórios; os chineses já criaram também terras agrícolas na região externa aos diques longitudinais de proteção contra inundações, existentes em cursos d'água, sendo que estas terras criadas também servem como bermas de proteção para estes diques, conforme comentado em STIGTER *et al.* (1989).

No caso de sedimento fino, como silte e argila, deve-se tomar ainda a precaução de que a sua utilização agrícola ou mesmo a sua disposição em terra para a recuperação de áreas (caso do Aeroporto da Pampulha), ou nos cursos d'água a jusante, fique condicionada a um índice de contaminação, que não inviabilize esse emprego ou manuseio (Item 3.3).

A disposição de sedimento fino contaminado em terra pode requerer a impermeabilização do solo para se evitar a contaminação do lençol freático, enquanto que a disposição desse mesmo material nos cursos d'água a jusante fica condicionada à determinação das características de hidrotransporte dos mesmos (capacidades de advecção, diluição, dispersão e possibilidade de sedimentação), bem como à avaliação da capacidade do curso d'água, de suportar os impactos provocados pelo despejo: aumento da concentração de sedimento fino e matéria orgânica em suspensão com os metais a eles associados, além dos aspectos químicos e biológicos do impacto ambiental.

Deve-se avaliar também se as características físico-químicas das águas receptoras serão redutoras o suficiente para que os metais, presentes nos sedimentos e na matéria orgânica nelas despejados, não passem para a fase líquida, num processo de desorção. Esta também é uma exigência para o  $^{99m}\text{Tc}$  (LIESER & BAUSCHER, 1987), radioisótopo utilizado para marcar o sedimento fino a ser dragado da Represa da Pampulha (Capítulo 6) e estudar o seu comportamento nos cursos d'água a jusante (Capítulo 7).

Desta forma, as áreas de bota-fora devem contemplar, de preferência e simultaneamente, características tanto ambientais quanto econômicas. Muitas vezes, entretanto, não é possível conciliar, o tempo todo, o despejo do material dragado com uma contrapartida econômica.

No caso do despejo na área do Aeroporto da Pampulha, por exemplo, o interesse econômico se restringirá à disposição de  $2 \times 10^6 \text{m}^3$  (SUDECAP, 1996) ampliada para  $4 \times 10^6 \text{m}^3$ , como já observado, o que pode não ser suficiente nem para acomodar o montante da dragagem de estabelecimento da Represa da Pampulha. Outras áreas já levantadas para despejo em terra (SUDECAP, 1996) e ainda disponíveis (não invadidas), ao que consta a este autor, ainda não possuem uma avaliação atual de seus custos de desapropriação e preparação, e nem estão sendo trabalhadas para despejo futuro, uma vez esgotada a capacidade de armazenamento das áreas contíguas à pista do Aeroporto da Pampulha.

Destes comentários depreende-se que a obtenção, conservação e o gerenciamento de áreas urbanas para serem utilizadas como locais de futuro despejo de material dragado, ou mesmo para aterros sanitários, não é um problema simples de ser resolvido. Veja-se, por exemplo, o caso da dragagem da Represa da Pampulha aqui tratado e, num futuro não muito remoto, a obtenção de área para a construção de um novo aterro sanitário para Belo Horizonte, pois o atual, com mais de 25 anos de utilização, encontra-se com sua capacidade quase esgotada, apesar da utilização de técnicas visando o adensamento e a conseqüente diminuição de volume do material ali depositado. Uma área considerada para o novo aterro, no Bairro de Capitão Eduardo, região vizinha ao Município de Santa Luzia, foi tirada de cogitação, face à reação negativa da população que habita as suas proximidades.

Uma outra utilização para o material fino dragado, pelo menos parte dele, e para grande parte do material depositado em aterros sanitários, seria a sua conversão (através de processo térmico com temperaturas acima de 1.100°C), em agregados de baixo peso para utilização na indústria da construção. Esta possibilidade é comercialmente disponível, por exemplo, através do processo TREFOIL desenvolvido por RTAL INTERNATIONAL PLC (2002) e poderia agregar valor econômico ao material dragado.

Assim, o presente trabalho procura colaborar no aspecto de viabilizar ambientalmente a alternativa do despejo de material fino de dragagem nos cursos d'água, com a sua remoção natural por hidrotransporte. Este procedimento não deve, entretanto, ser focalizado como o único a ser utilizado. Ele poderá ser adotado, sob a ótica do custo x benefício, em conjunto, por exemplo, com a conversão em agregados de baixo peso para produção de concreto, de parte do material fino dragado, como acima apontado. Entretanto, na opinião do autor, em todas as comparações de alternativas, o aspecto ambiental deve ter um peso destacado.

#### *b) Tipos, porcentagens e granulometria dos materiais a serem dragados*

O sedimento fino (silto-argiloso), considerado para a dragagem com transposição, representa cerca de 70% do total de assoreamento na represa (OLIVEIRA, 1996), (DT ENGENHARIA, 1997a). Porém, entre a Ilha dos Amores e a barragem, onde o assoreamento é da ordem de 387.000 m<sup>3</sup>/ano, como já apontado, ele representa praticamente 100% do material da superfície do fundo, uma vez que a maior parte do sedimento arenoso se deposita antes da Ilha dos Amores. Esta constatação encontra-se em BANDEIRA *et al.* (2002b).

*c) Teor de contaminação, em metais, dos sedimentos finos e da matéria orgânica associada a serem dragados*

Esta é uma exigência recente das autoridades ambientais, como pode ser visto, por exemplo, em AUSILI *et al.* (1998) e na Proposta de Resolução do CONAMA (CONAMA, 2003). Os teores em metais dos sedimentos finos e da matéria orgânica associada, nas mesmas regiões da Represa da Pampulha onde se efetuou a coleta e análise granulométrica (item *b* acima) foram determinados nos laboratórios do CDTN/CNEN, através dos processos de Espectrometria de Absorção Atômica (EAA) e Análise por Ativação Neutrônica (AAN), e são apresentados em BANDEIRA *et al.* (2002b) e na Tabela 5.3, no Capítulo 5. Além desses locais, foram determinados os teores em metais de quatro amostras compostas, a cada 0,5m (Tabela 5.3 - amostras ASFPI), entre a superfície e 3m de profundidade (Figura 5.1), retiradas por trado motorizado (Figura 5.3), ao longo da ilha formada pelo remanejamento, no interior da represa, do material ali dragado.

*d) Estado dos cursos d'água no que diz respeito à descarga de sedimentos finos em suspensão e ao seu grau de contaminação por metais, tanto no sedimento quanto na água, anteriormente a qualquer despejo*

O monitoramento hidrossedimentométrico planejado em 1996 (ABRH *et al.* 1996) e realizado entre novembro de 1998 e dezembro de 1999 (CETEC, 1998/99), (HDC, 1998/99), (SUDECAP, 1999), possibilitou o conhecimento das concentrações de sedimentos em suspensão, em ocasiões simultâneas à medições de vazões líquidas, em sete estações (E1 a E7 - Figura 1.6) da bacia hidrográfica. As estações foram posicionadas de modo a abranger, desde o limite de remanso da represa até a desembocadura do Ribeirão da Onça no Rio das Velhas, e a região deste logo a montante da desembocadura. Estas medições permitiram calcular a descarga sólida em suspensão ao longo de um ano, abrangendo época de seca e chuva, nesta bacia hidrográfica urbana.

Aliados a esta informação, para o presente trabalho, foram determinados os teores de metais nos sedimentos em suspensão, de fundo e na água, nestas mesmas estações, através de coletas efetuadas em duas ocasiões: fim do período de seca (outubro/1999) e fim do período de chuvas (abril/2000).

Assim, foram disponibilizados dados para uma avaliação quantitativa do transporte de metais no sistema, anteriormente a quaisquer despejos de material dragado. Além disto, visando uma melhor definição das regiões fonte de metais na parte da bacia hidrográfica, a montante da Represa da Pampulha e, com isto, possibilitar aos órgãos ambientais um melhor controle sobre a poluição ambiental por metais nos sedimentos que vierem futuramente a assorear a represa, as coletas de água e sedimentos foram estendidas para mais sete estações: R1, R2 e R3, no Ribeirão Ressaca, e S1, S2, S3 e S4, no Ribeirão Sarandí (Figura 1.6).

Este conhecimento sistêmico da distribuição de metais, em toda a extensão dos principais cursos d'água da bacia possibilitou também, aplicando-se técnicas de análise multivariada, a realização de um estudo para a determinação das principais regiões da bacia, especialmente a montante da represa, que contribuem com metais para a água e os sedimentos (Capítulo 5).

Estas informações, associadas a mapas georeferenciados da topografia, mas também aos de drenagem pluvial e esgotamento sanitário, bem como ao cadastro de localização de indústrias e locais com atividades produtoras de metais, serão muito importantes para os órgãos ambientais no controle da poluição, por metais e outros poluentes, dos sedimentos e da água da Bacia Hidrográfica da Pampulha.

*e) Avaliação da capacidade de hidrotransporte dos cursos d'água para os sedimentos finos ali descartados*

Esta avaliação, para ser realizada de forma quantitativa e acurada, é praticamente impossível se não se utilizam traçadores radioativos marcando os sedimentos finos, em medições diretas no campo. Elas devem ser feitas, preferencialmente, em ocasião de seca, quando são menores as vazões líquidas nos cursos d'água e, assim, mais críticas as condições de transporte do material de dragagem ali despejado.

### **3.5 Marcação de sedimento fino com traçador radioativo de meia vida curta**

O único traçador que representa o sedimento fino, de forma adequada à sua detecção *in situ*, é este mesmo sedimento ao qual se agrega uma substância radioativa através do processo químico de adsorção (BOUGAULT, 1970). O sedimento fino é geralmente eletronegativo e, se colocado

em presença de cátions ou de colóides eletropositivos, ocorre o processo de adsorção (a fixação do radioisótopo ao sedimento). Se estes cátions ou colóides forem de elementos radioativos com meia-vida e energia da radiação a ser emitida adequados, ter-se-á um traçador do sedimento fino. Duas condições devem ser satisfeitas:

- que o material adsorvido pelo sedimento fino não se desprenda do mesmo, enquanto durar a detecção;
- que o comportamento hidrodinâmico do sedimento marcado e não marcado seja o mesmo.

Para estudos da dinâmica de sedimentos finos em suspensão, a sua marcação é normalmente efetuada com ouro, em sua forma de isótopo radioativo  $^{198}\text{Au}$  (BOUGAULT, 1970). Entretanto, este traçador é obtido apenas por irradiação direta em reator nuclear de seu isótopo estável  $^{197}\text{Au}$ , sendo necessária uma irradiação para cada experimento. Além disso, devido à energia da radiação a ser emitida (410keV), ele necessita de blindagem de chumbo relativamente pesada, e a manipulação química, no campo, das lâminas de ouro já irradiadas (dissolução a quente por ataque ácido), antes da marcação, exige bastante cuidado para ser adequadamente realizada. Estes aspectos limitam, em muito, a aplicação deste traçador exigindo, por vezes, o transporte aéreo do material irradiado para aplicação em locais mais afastados dos reatores nucleares que o produzem.

Assim, tendo em vista a aplicação no estudo sedimentológico de despejo de sedimento fino dragado na Represa da Pampulha foi desenvolvido, em caráter pioneiro em âmbito mundial, o processo completo de marcação com tecnécio 99 meta-estável ( $^{99m}\text{Tc}$ ): fixação e estudo do comportamento hidrodinâmico do sedimento marcado e não marcado, utilizando o sedimento fino que assoreia a Represa da Pampulha (BANDEIRA *et al.* 1999a, 1999b), (BANDEIRA, 2001), (BANDEIRA *et al.* 2002a). Uma experiência piloto inicial havia sido realizada no Uruguai, em novembro de 1997, durante um estudo sedimentológico realizado na Baía de Montevideu (BANDEIRA & PINTO, 1997).

### 3.5.1 Propriedades do $^{99m}\text{Tc}$ e sua utilização em Medicina Nuclear

O  $^{99m}\text{Tc}$  é um traçador radioativo de meia vida curta, emissor de radiação  $\gamma$  de baixa energia ( $T_{1/2}$  6,02 horas;  $\gamma = 140\text{keV}$ ), sendo oriundo do  $^{99}\text{Mo}$  (molibdênio) -  $^{99}\text{Mo} \rightarrow ^{99m}\text{Tc} \rightarrow ^{99}\text{Tc}$  -



( $T_{1/2} = 66$  horas;  $\beta = 1,2\text{MeV}$ ;  $\gamma = 0,74; 0,18\dots\text{MeV}$ ), através de uma transição meta-estável (RADIOLOGICAL HEALTH HANDBOOK, 1960), (SANDLER, M.P. *et al.* 1996). O  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  decai, por sua vez, para o  $^{99}\text{Tc}$ , emissor de radiação  $\beta$ , que tem pouco poder de penetração ( $T_{1/2} = 2.1 \times 10^5$  anos;  $\beta = 290\text{keV}$ ).

Assim, são fornecidos geradores de tecnécio, conhecidos como "milk generator" ou "vaca radioativa" (Figura 3.1), aos laboratórios de Medicina Nuclear. Estes geradores, devido à maior meia vida do  $^{99}\text{Mo}$ , podem ser utilizados por até duas semanas na extração do  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , pelo simples processo de eluição, quando o  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  é totalmente extraído da placa contendo o  $^{99}\text{Mo}$  e o  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ . Esta eluição consiste em se fazer passar, pela placa mencionada, um volume de 6mL de solução parenteral de NaCl (9mg/mL), o qual é recolhido em um frasco inicialmente com vácuo. É este eletrólito contendo o radioisótopo, que é injetado na veia dos pacientes. O aspecto da sua portabilidade, também para aplicações sedimentológicas, é uma enorme vantagem em relação à utilização do  $^{198}\text{Au}$ , que necessita ser irradiado para cada experimento e, também, este aspecto torna acessível a técnica em países não dotados de reatores nucleares ou que não sejam próximos aos que os possuem.



Figura 3.1 - Gerador de tecnécio ( $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ). Adaptado de CNEN/IPEN, [s.d.]

Após cada eluição o gerador continua a produzir o  $^{99m}\text{Tc}$  pela transição meta estável e, em 24 horas, devido ao fator de crescimento do  $^{99m}\text{Tc}$ , e tendo em conta o decaimento radioativo do  $^{99}\text{Mo}$ , já se pode extrair uma atividade de cerca de 88,5% daquela extraída anteriormente (Figura 3.2). Desta forma, os geradores são utilizados facilmente pelos laboratórios de Medicina Nuclear, não sendo necessária uma irradiação específica de material em reator nuclear para cada exame.

Possuindo todas estas características vantajosas em relação aos traçadores radioativos até então utilizados na marcação de sedimentos finos, por que não utilizar também o  $^{99m}\text{Tc}$  para trabalhos de campo em estudos ambientais na área de Sedimentologia?

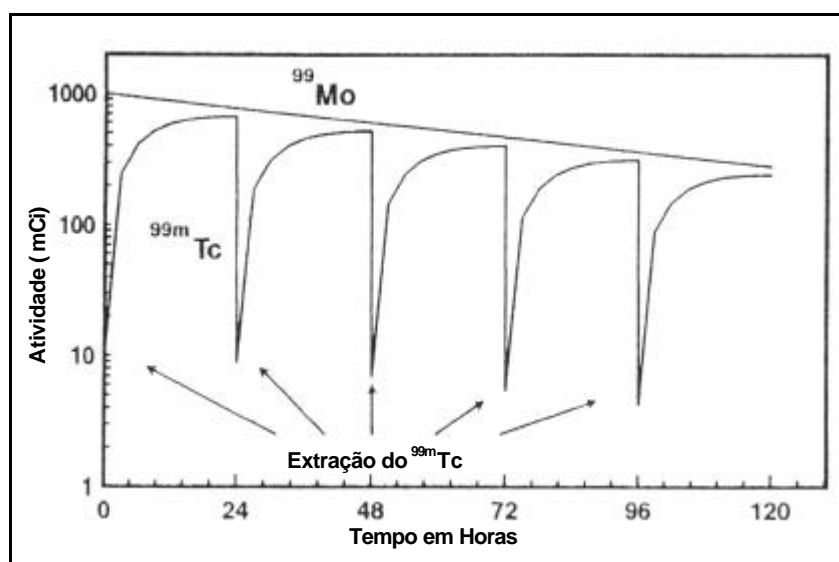


Figura 3.2 -  $^{99}\text{Mo}$  e  $^{99m}\text{Tc}$  em equilíbrio secular, ilustram o princípio do gerador de radioisótopo. Adaptado de SANDLER *et al.* (1996)

### 3.5.2 Antecedentes que conduziram ao desenvolvimento do processo de marcação de sedimentos finos com $^{99m}\text{Tc}$

Quando do último trabalho, que contou com a participação deste autor, relativo a estudos de marcação de sedimentos finos com radioisótopo de meia vida curta, em estudos de dinâmica desses sedimentos em suspensão, efetuado no Uruguai, (BANDEIRA & PINTO, 1997), (PINTO *et al.* 1998), foram realizados dois tipos de estudos:

- ao largo da Baía de Montevideu, já no Rio da Prata, para estudo do comportamento de despejo de dragagem, em junho de 1996;

- no interior da Baía de Montevideu, em novembro de 1997, para avaliar a dinâmica de sedimentos finos naturais em suspensão (não oriundos de despejo de dragagem), que poderiam estar contaminados com metais, sobretudo o cromo, oriundo de curtumes existentes ao longo das bacias dos Arroios Pantanoso e Miguelete, que deságuam na Baía de Montevideu (esses estudos poderiam ser utilizados para a calibração de modelos matemáticos da dinâmica dos sedimentos em suspensão que transitam pela Baía de Montevideu, trabalho de interesse do IMFIA - *Instituto de Mecánica de Fluidos y Ingeniería Ambiental* - da UDLAR - *Universidad de la Republica*).

Para o estudo do comportamento do despejo de dragagem no Rio da Prata foram realizados experimentos com o emprego de  $^{198}\text{Au}$  marcando a carga de sedimentos finos da Draga 7, da *Administración Nacional de Puertos* (ANP), que é uma draga do tipo auto-transportadora, possuindo  $2.690\text{m}^3$  de capacidade na cisterna.

No estudo do comportamento do sedimento fino natural presente em suspensão, na Baía de Montevideu estava prevista a marcação do sedimento também com  $^{198}\text{Au}$ . Devido à impossibilidade de receber este radioisótopo em tempo hábil para realizar os trabalhos (o  $^{198}\text{Au}$  era previsto para ser fornecido pelo Brasil, pois no Uruguai não existe reator nuclear) foi empregado, em experimento inédito na marcação do sedimento fino, o  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ .

A idéia original de tentar substituir a marcação com  $^{198}\text{Au}$ , pela marcação com  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , foi da Química Farmacêutica Beatriz Souto Ameigenda, funcionária da DINATEN (*Dirección Nacional de Tecnología Nuclear*) do Uruguai, tendo em conta dois fatores: 1) a disponibilidade no Uruguai do  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  proveniente regularmente da Argentina, todas as segundas feiras, para aplicações médicas; 2) o caráter didático do estudo sendo desenvolvido no âmbito do projeto de Cooperação Técnica URU/8/009, patrocinado pela AIEA (BANDEIRA & PINTO, 1997), no qual este autor e o Eng. Geraldo Godinho Pinto, ambos do CDTN, atuavam como consultores na missão em pauta.

Provas expeditas de marcação foram então realizadas, com sedimento fino da superfície do fundo da Baía de Montevideu, de um local sem presença de óleo, sendo peneirado a úmido para se obter um diâmetro  $\phi < 38\mu\text{m}$ . Foram realizados ensaios utilizando dois redutores distintos: a)  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  (tiosulfato de sódio) misturado com  $\text{NH}_4\text{OH}$ , para se obter um  $\text{pH} > 9$ ; b)

$\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (cloreto de estanho). Os rendimentos obtidos para a fixação do  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  ao sedimento, foram: a)  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  misturado com  $\text{NH}_4\text{OH}$ : 54,0%; b)  $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ : 77,4%.

Então, a redução do  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  com o  $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  foi a escolhida para o estudo pioneiro de hidrodinâmica de sedimento fino em suspensão, utilizando este radioisótopo como marcador.

A atividade disponível de  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  no momento da injeção era de somente 45mCi. A injeção do sedimento marcado foi sub-superficial, no sentido horizontal, através de um tubo plástico dotado de flutuadores e possuindo um lastro próximo à sua extremidade livre, de forma a se ter a extremidade livre imersa, porém o mais próximo da superfície. Dessa forma procurou-se eliminar o *momentum* vertical descendente inicial, de forma que o traçador já representasse o sedimento natural em uma região, o mais próximo possível do seu lançamento, ou seja: o campo próximo ("*near field*"), onde a ação da descarga em meio hídrico, sendo sempre governada pela ação do jato, fosse a menor possível. O cintilômetro foi posicionado a 1m abaixo da superfície, na embarcação de detecção. Procedimento semelhante, para a injeção, foi adotado nos trabalhos efetuados, posteriormente, no Rio Paraopeba (BANDEIRA *et al.* 1999b) e nos estudos realizados na Bacia Hidrográfica da Pampulha, e que são apresentados no Capítulo 7.

Mesmo com a baixa atividade injetada foi possível acompanhar a evolução do traçador por cerca de trinta cruzamentos transversais da nuvem formada. As contagens obtidas durante a detecção, para os picos maiores, foram da ordem de 450 a 500cp10s (contagens por 10 segundos), enquanto que a radiação de fundo ("*background*") era da ordem de 15 a 25cp10s, com uma razão contagem/ruído da ordem de 25. Se a atividade inicial do  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  tivesse sido de 1200mCi, atividade normalmente disponível todas as segundas feiras às 10h00 da manhã em Montevideú, e a injeção feita nesta mesma hora, as contagens obtidas nos picos poderiam ter sido de cerca de 13000cp10s, representando cerca de 650 vezes o *background*.

Assim, dada a sensibilidade do cintilômetro, e o fato dele trabalhar, em estudos ambientais, imerso na água, em uma "Geometria 4δ" (o meio a ser medido envolve totalmente o detetor), o que faz uma enorme diferença em termos de eficiência de contagem, ao contrário das aplicações em Medicina Nuclear, onde o detetor fica externo ao paciente, pequenas atividades de  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , como as utilizadas no experimento pioneiro, são suficientes para se obter informações de valor sobre o sistema em estudo.

No estudo efetuado no Uruguai, como já dito, foi utilizada uma atividade de apenas 45mCi. A título de comparação, um único paciente humano, quando é examinado em exames cintilográficos com o uso do  $^{99m}\text{Tc}$  pode receber, por via endovenosa, em um único dia, atividade de até 40mCi. Nos estudos realizados no Rio Paraopeba (BANDEIRA *et al.* 1999b) e nos efetuados para o presente trabalho (Capítulo 7) as concentrações da atividade (Bq/mL de água) foram da ordem de  $10^{-7}$  das concentrações para aplicações médicas (Bq/mL de sangue), o que faz com que mereça ser repensado o preconceito existente em alguns países de não se utilizar traçadores radioativos, expressamente adicionados, em estudos ambientais.

Um dos trechos extraídos de BANDEIRA & PINTO (1997) diz: "*Así se abre una grande posibilidad de empleo del  $^{99m}\text{Tc}$  en estudios sedimentológicos en la Bahía de Montevideo y otros sitios, con la condición de que se tenga una buena fijación del trazador en el limo. Por lo tanto, estudios de fijación deben ser desarrollados en laboratorio*".

Este autor sugeriu que a Química Farmacêutica Beatriz Souto Ameigenda, anteriormente citada, desenvolvesse estes estudos na DINATEN, em Montevideu mas, motivos de força maior impediram o seu trabalho. Assim, integrando um Grupo de Trabalho dentro do Projeto de Pesquisas Coordenado da Agência Internacional de Energia Atômica: "*Coordinated Research Project (CRP): The use of tracers and stable isotopes in surface water pollution studies*", este autor foi convidado para coordenar e efetuar, no CDTN, os estudos anteriormente citados, o que ocorreu através do Contrato de Pesquisa: IAEA RC 10891, firmado em 1999 entre a Agência e o CDTN. Foi ele que deu origem aos trabalhos: BANDEIRA *et al.* (1999a, 1999b), BANDEIRA (2001) e BANDEIRA *et al.* (2002a).

### **3.6 O uso do teor de trítio ( $^3\text{H}$ ) como um indicador da contaminação das águas por lixiviação - considerações prévias para a sua utilização no estudo dos aterros sanitários existentes nas cabeceiras dos ribeirões Ressaca e Sarandí**

Um dos grandes problemas dos aterros sanitários é a possibilidade da poluição do solo e das águas superficiais e subterrâneas pelos metais e outras substâncias contidas no chorume, o qual é produzido, nos mesmos, por lixiviação. Assim, dispondo-se de um traçador para o chorume, pode-se avaliar esta contaminação.

O trítio ( $^3\text{H}$ ) é o radioisótopo do hidrogênio, com  $T_{1/2} = 12,3$  anos, sendo emissor de radiação  $\alpha$  de baixa energia (18keV). O trítio ambiental é um traçador muito valioso para a água e é amplamente usado em estudos hidrológicos (IAEA, 1983), (ARAGUÁS-ARAGUÁS, 1995), (PLATA-BEDMAR, 1972), (PLATA-BEDMAR, 1999). Concentrações acima dos valores que normalmente ocorrem nas águas de chuva, de até 5TU (unidades de trítio - ver Item 4.1), podem ser um indicativo da contaminação de águas superficiais e, sobretudo, do lençol freático, oriunda da lixiviação de aterros sanitários.

ROBINSON & GRONOW (1995) foram dos primeiros a identificar teores de trítio em águas nas vizinhanças de aterros sanitários, muito superiores aos da água de chuva. Por esta mesma época foram também identificadas ocorrências em aterros sanitários da África do Sul, conforme VERHAGEN *et al.* (1999), que comentam que em um dos locais foram encontrados teores da ordem de  $10^5\text{TU}$  se aproximando, portanto, do limite permitido para a água potável. Além disso, mencionam que, presentemente, a faixa dos teores naturais na água de chuva na África do Sul é da ordem de 5TU (como também no Brasil), cerca de uma ordem de grandeza menor que os valores contemporâneos na Europa Ocidental, com uso industrial e lançamento de trítio no meio ambiente muito mais acentuado. Isto torna muito sensível o uso do trítio como traçador para o chorume, nos ambientes do hemisfério sul.

A origem dos altos teores de trítio está sendo ainda pesquisada. Várias hipóteses têm sido aventadas e convergem para a deposição, em aterros sanitários, de materiais que contenham restos de produtos que utilizam  $^3\text{H}$ , como: mostradores luminescentes de relógios que podem conter até 280MBq de trítio (VERHAGEN *et al.* 1999), bem como fontes de luz gasosas contendo trítio em atividades de até 1TBq (ROBINSON & GRONOW, 1995). Nestes equipamentos, a radiação  $\alpha$  do trítio é utilizada como fonte de energia no material fosforescente dos sinais luminosos. Tais equipamentos possuem uma vida útil de 10 a 12 anos, quando a sua luminosidade pode ser reduzida a menos da metade sendo, então, descartados em aterros. Qualquer dano ao objeto poderá resultar na liberação do trítio, o qual facilmente se agrega à umidade no aterro. Outras fontes de trítio podem ser: dejetos de produtos hospitalares (e.g.  $^3\text{H}$  complexado em moléculas orgânicas para exames médicos); placas luminescentes de interruptores elétricos; etc.

VERHAGEN *et al.* (1998) caminharam no sentido da utilização destes altos teores e sua distribuição como um traçador ambiental geral. LEVIN & VERHAGEN (1999) já concentram o seu emprego no estudo do fluxo de água subterrânea, através das altas contagens de trítio observadas em piezômetros instalados em aterros sanitários. VERHAGEN *et al.* (1999) explicita o seu uso, tanto como traçador em águas superficiais quanto para água subterrânea.

Assim, aproveitando as coletas efetuadas para a determinação dos teores de metais em água superficial em 1999 e 2000, nas campanhas efetuadas na Bacia Hidrográfica da Pampulha, foram também colhidas amostras para a determinação dos teores de  $^3\text{H}$ . Posteriormente, em 2002, colheram-se algumas amostras de chorume e de água superficial e subterrânea, estas em piezômetros de controle situados nas áreas dos aterros, mas também em poços a jusante dos aterros sanitários de Belo Horizonte e Contagem, ao longo dos ribeirões Ressaca e Sarandí. Nestas amostras foram determinados os teores de  $^3\text{H}$  bem como os dos metais que já tinham apresentado maiores teores nas amostras de água superficial, colhidas em 1999 e 2000. Valores de  $^3\text{H}$  bem acima do limite encontrado na água de chuva foram obtidos em algumas das amostras de chorume e em piezômetros do aterro da SLU, e de água superficial, no Ribeirão Ressaca, em Belo Horizonte, e no chorume do Aterro Sanitário de Perobas, em Contagem. No Capítulo 4 são apresentados os resultados relativos a este estudo.

Abre-se assim, um campo para estudos semelhantes aos em desenvolvimento em outros países, já mencionados anteriormente, os quais poderão ser realizados na Bacia Hidrográfica da Pampulha, em um futuro próximo, considerando os teores de trítio encontrados nas regiões dos aterros sanitários da SLU e no de Perobas, especialmente no primeiro.

Esta mesma metodologia para o estudo do comportamento e propagação do chorume nas águas superficial e subterrânea, utilizando-se os teores de trítio naturalmente existentes, lixiviados de aterros, poderá ser aplicada aos inúmeros locais onde existem aterros sanitários, em nosso país.





## 4 UTILIZAÇÃO DO TEOR DE TRÍTIU ( $^3\text{H}$ ) COMO UM INDICADOR DA CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS POR LIXIVIAÇÃO DOS ATERROS SANITÁRIOS EXISTENTES NAS CABECEIRAS DOS RIBEIRÕES RESSACA E SARANDÍ

### 4.1 Preliminares

O trítio ( $^3\text{H}$  ou T) é um isótopo radioativo do hidrogênio ( $^1\text{H}$ ). É formado naturalmente na alta atmosfera (origem cosmogênica), através da interação de nêutrons, produzidos por raios cósmicos de alta energia, sobretudo com os átomos de nitrogênio, conforme a reação:



Ele é rapidamente oxidado pelo oxigênio da estratosfera, formando moléculas de água tritiada ( $^3\text{H}^1\text{HO}$ ), e termina entrando no ciclo hidrológico através da precipitação (PLATA-BEDMAR, 1972), (IAEA, 1983), (CLARK & FRITZ, 1997), (ARAGUÁS-ARAGUÁS, 1995), (PLATA-BEDMAR, 1999), (MOOK, 2000). Sua meia vida é  $T_{1/2} = 12,3$  anos, e ele decai por emissão de radiação  $\beta$ , de baixa energia ( $E_{\beta\text{máx.}} = 18\text{keV}$ ), formando átomos estáveis de hélio:



As concentrações ambientais de trítio nas águas naturais são expressas como uma razão isotópica em termos de unidade de trítio (TU). Estritamente falando, esta não é uma "unidade" mas uma razão, podendo ser referida mais rigorosamente como razão de trítio (TR). Assim, 1TU corresponde à razão isotópica de:  $(^3\text{H}/^1\text{H}) = 10^{-18}$ . As concentrações podem ser dadas também, como atividade específica, em Bq/L. Assim, um litro de água com uma concentração de 1TU produz 0,118Bq.

Fazendo parte da molécula de água o trítio é um traçador ideal para a mesma, pois, uma molécula de água tritiada, se comporta exatamente como qualquer outra, com a diferença de que pode ser monitorada no meio ambiente. Assim, ele é usado amplamente em estudos

hidrológicos (PLATA-BEDMAR, 1972), (IAEA, 1983), (CLARK & FRITZ, 1997), (ARAGUÁS-ARAGUÁS, 1995), (PLATA-BEDMAR, 1999), (MOOK, 2000).

Existe também o trítio de origem antropogênica, resultante das explosões termonucleares na atmosfera, ocorridas com bastante intensidade entre 1952 e 1962, devido a testes efetuados, sobretudo pelos Estados Unidos e União Soviética. Estes testes foram interrompidos em 1963, por um tratado entre estes dois países. Testes na atmosfera, porém de menor intensidade, efetuados por franceses e chineses, prosseguiram até 1980. Há que acrescentar também o trítio oriundo dos acidentes graves em centrais nucleares, como Three Miles Island e Chernobyl.

Estes testes e acidentes injetaram pulsos periódicos de  $^3\text{H}$  na atmosfera, ocasionando aumentos de concentração acima da ambiental, de cerca de três ordens de grandeza no hemisfério norte, chegando até a duas ordens de grandeza no hemisfério sul, pois a maioria das ações antrópicas produtoras de trítio ocorreu no hemisfério norte. Outro fator contribuindo para isto é a menor razão entre a área ocupada pelos continentes e oceanos no hemisfério sul, minimizando o efeito continental das distribuições de concentrações de  $^3\text{H}$ , que apontam para maiores concentrações em locais mais afastados dos oceanos (IAEA, 1983).

Por volta de 1990, a maior parte do trítio de origem antropogênica já havia sido removida da atmosfera e os níveis de trítio na precipitação global se encontram agora próximos dos níveis cosmogênicos (CLARK & FRITZ, 1997). Entretanto, as assinaturas de trítio na água subterrânea, decorrentes da ação antropogênica, foram bastante utilizadas entre as décadas de 50 e 90 como uma clara evidência da recarga de aquíferos.

O conhecimento da concentração de  $^3\text{H}$  na precipitação é um pré-requisito para se estimar a função de entrada desse radioisótopo em uma dada área, para a interpretação das suas concentrações na água superficial e subterrânea. Informações sobre a distribuição das concentrações de trítio e de outros isótopos (oxigênio-18 e deutério) nas precipitações, baseadas em dados registrados, desde 1961, em cerca de 550 estações meteorológicas em 93 países, podem ser obtidas em: **<http://isohis.iaea.org>**.

A concentração ambiental atual de  $^3\text{H}$  na água de chuva no hemisfério sul é, no máximo, de 5TU, dependendo da localização geográfica do local em consideração. Na Bacia Hidrográfica

da Pampulha, com base em amostragens realizadas na Estação Meteorológica do CDTN, entre 1999 e 2002, época das coletas realizadas para o presente trabalho, o maior valor obtido foi de 2,8TU, conforme PEIXOTO & JACOMINO (2001, 2003).

A faixa usual de medições do trítio ambiental em aplicações hidrogeológicas se estende por 4 a 5 meias vidas, ou seja: cerca de 60 anos, e ele pode ser utilizado como um indicador para o estudo da recarga de poços. Água de poços com valores muito baixos ou nulos, em relação aos valores de trítio das precipitações da região, indicam uma baixa recarga, o contrário ocorrendo para água de poços com concentração de trítio semelhante às das precipitações. Por outro lado, a injeção de água tritiada em um local específico tem sido utilizada para a determinação simultânea da taxa de infiltração da água de chuva no solo e da evapo-transpiração (PLATA-BEDMAR, 1972), (DRUMOND, 2004).

Como já mencionado no Item 3.7, estudos recentes mostram que a jusante de alguns aterros sanitários e de determinadas indústrias, em amostras de água colhidas de poços ou mesmo em escoamentos à superfície livre, são encontradas atividades de mais de 2000TU, podendo chegar até a  $10^5$ TU (ROBINSON & GRONOW; 1995), (VERHAGEN et al. 1998), (LEVIN & VERHAGEN, 1999) (VERHAGEN et al. 1999).

Finalizando este item, é importante enfatizar que nem o trítio cosmogênico, nem o antropogênico são considerados como risco à saúde do público em geral. ROBINSON & GRONOW (1995), com base em valor sugerido pelo "National Radiological Protection Board" da Inglaterra, para a exposição ao trítio por membros do público, calcularam uma concentração mínima de 17.000Bq/L ou 142.000TU na água potável, para efeitos deletérios. CLARK & FRITZ (1997) mencionam que os padrões canadenses para água potável impõem um limite de 7.000Bq/L ou cerca de 60.000TU. Estes são valores várias ordens de grandeza superiores aos níveis prováveis de exposição.

## **4.2 Contextualização**

No âmbito do monitoramento hidrossedimentométrico realizado, considerando a extensão de amostragens proposta por este autor para os ribeirões Sarandí e Ressaca, foram efetuadas coletas de amostras de água superficial em 14 estações abrangendo praticamente toda a Bacia

Hidrográfica da Pampulha e o Rio das Velhas (Figura 1.6). A bacia hidrográfica possui dois aterros sanitários, em atividade, localizados em suas cabeceiras: um com mais de 25 anos, o Aterro da Superintendência de Limpeza Urbana (SLU) da Prefeitura, na sub-bacia do Ribeirão Ressaca, no Município de Belo Horizonte; outro com cerca de cinco anos de funcionamento, o Aterro Sanitário de Perobas (ASP), na sub-bacia do Ribeirão Sarandí, no Município de Contagem (Figura 1.6), além de um antigo aterro, já desativado, junto ao Córrego Bitácula, um dos formadores do Ribeirão Sarandí (Figura 4.5).

Assim, resolveu-se verificar o que se passa em relação aos teores de  $^3\text{H}$ , nas águas superficiais da Bacia Hidrográfica da Pampulha. Determinou-se o teor de  $^3\text{H}$  nas amostras já colhidas no fim do período de seca, em outubro/novembro de 1999 e naquelas colhidas no fim do período de chuvas, em março/abril de 2000.

Estas foram boas épocas para as determinações, tendo em vista a seca intensa que ocorreu entre abril e novembro de 1999 e as chuvas intensas que ocorreram na bacia hidrográfica, a partir de novembro daquele ano, como mostram, por exemplo, os registros obtidos na estação pluviométrica (Figura 4.1) que o CDTN instalou no ASP (Figura 4.4), especialmente para os estudos de metais, mas que foi útil também nos estudos do teor de trítio nas águas superficiais.

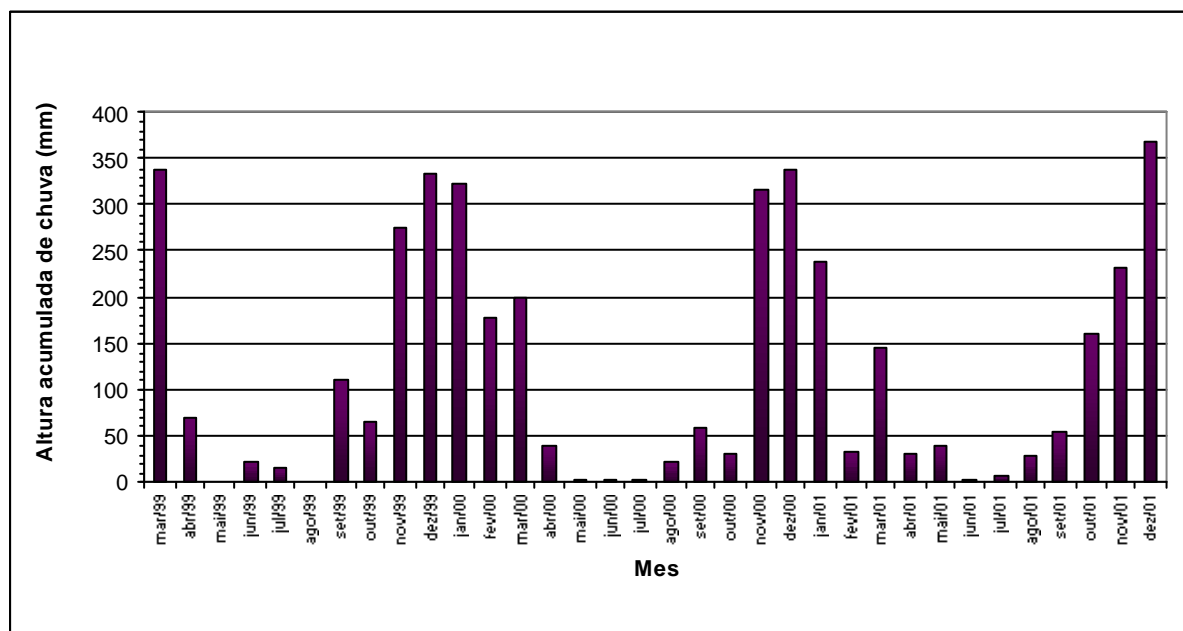


Figura 4.1 - Chuva acumulada mensal. Estação pluviométrica do aterro sanitário de Perobas (ASP) - Contagem, MG

O objetivo original foi avaliar os teores de  $^3\text{H}$  nas águas superficiais, como uma primeira contribuição à utilização deste traçador como meio de controle nas vizinhanças de aterros sanitários. Dependendo de se encontrar teores de  $^3\text{H}$  acima dos ambientais, nas águas superficiais, seria feita uma avaliação preliminar da potencialidade do  $^3\text{H}$  como indicador da contaminação do lençol freático por chorume de aterros, através da monitoração dos teores de  $^3\text{H}$  no chorume dos aterros e em águas subterrâneas nas suas imediações. As demais pesquisas possíveis: a origem do  $^3\text{H}$  nos materiais despejados nos aterros, estudos de impermeabilização de aterros, etc., deveriam ser temas de futuros estudos, fora do contexto do presente trabalho.

Dessa forma, em função dos teores de  $^3\text{H}$  encontrados na água superficial (tabelas 4.1 a 4.3) e tendo como base um amplo estudo das características hidrogeológicas da Bacia Hidrográfica da Pampulha, a montante da represa (CPRM, 2001), resolveu-se avançar um pouco mais na determinação dos teores de  $^3\text{H}$  no chorume e no lençol freático. Assim, colheram-se, em 2002, amostras de chorume nos dois aterros sanitários em questão, em piezômetros e poços de controle na área desses aterros, bem como em poços e cisternas catalogados em CPRM (2001), nas regiões junto aos ribeirões Sarandí e Ressaca, desde os aterros até as imediações da Represa da Pampulha (figuras 4.3, 4.4 e 4.5). Ainda a montante do ASP, na sub-bacia do Sarandí, foram colhidas amostras: de água superficial na região do antigo aterro de Contagem (Córrego Bitácula), e em alguns poços da região, juntos aos formadores do Ribeirão Sarandí (Figura 4.5). Estas amostras foram analisadas quanto aos seus teores de  $^3\text{H}$  e de alguns metais e os resultados são apresentados no Item 4.3.2, respectivamente, nas tabelas 4.4 e 4.5.

Entretanto, esta campanha de coleta e determinação dos teores de  $^3\text{H}$  no chorume e na água subterrânea constituem, como acima apontado, apenas uma avaliação preliminar da potencialidade dessa técnica e, de forma alguma pretende ser um estudo acabado do estado de contaminação das águas subterrâneas por lixiviados de aterros sanitários, nas bacias dos ribeirões Sarandí e Ressaca.

Todas as amostras colhidas foram analisadas no Laboratório de Trítio do CDTN, por Contagem Direta (LTCD). Este é um laboratório para determinação de teores elevados, acima dos normalmente encontrados na água de chuva.

Com a concentração de trítio superior aos valores ambientais, o que de fato ocorreu, como será visto mais adiante, tanto em amostras de água superficial, na saída do Aterro Sanitário de Belo Horizonte, quanto em amostras colhidas em poços no interior desse aterro, como em amostras de chorume, também desse aterro e do de Perobas, em Contagem, abre-se uma ampla área de estudos aos órgãos ambientais municipais e estaduais, na verificação do teor de  $^3\text{H}$  nas águas subterrâneas da bacia hidrográfica, o que permitirá estudos hidrogeológicos diversos e também medidas de controle ambiental. A gama de estudos que daí advém é enorme, e as universidades e centros de pesquisas poderão atuar neste tema de uma forma bastante proveitosa, tanto para eles como para a sociedade, como um todo.

Este trabalho com o uso de altos teores de  $^3\text{H}$  contido no chorume de aterros sanitários está sendo desenvolvido em várias regiões do mundo, mas num estágio ainda não conclusivo. Ele é de certa forma original, tendo em vista que é a sua primeira aplicação na Bacia Hidrográfica da Pampulha e, desconhecem-se estudos deste tipo desenvolvidos em outras bacias hidrográficas urbanas brasileiras.

### **4.3 Desenvolvimento do trabalho**

Coleta de água superficial em estação de seca e de chuva, coleta de chorume em aterros sanitários e de água subterrânea em poços, em suas imediações. O volume de coleta é da ordem de 1 litro, não sendo necessário preservar a amostra por adição de compostos químicos. Os procedimentos de análise são os normais para a determinação do teor de  $^3\text{H}$  em laboratório, a qual é feita pelo processo de cintilação líquida.

#### **4.3.1 Resultados para água superficial - Campanhas de 1999 e 2000**

Apresentam-se a seguir, nas tabelas 4.1 e 4.2, os resultados dos teores de trítio na água superficial, em toda a Bacia Hidrográfica da Pampulha. Os resultados da Tabela 4.1 são relativos à campanha efetuada no final da estação seca (novembro/1999) e os da Tabela 4.2 referem-se à campanha efetuada no final da estação de chuvas (abril/2000). Os resultados de ambas as tabelas foram obtidos utilizando-se o método analítico com cintilador líquido com leitura direta. Neste, o limite de detecção (LD) foi de 3Bq/L, ou 25TU, acima, portanto, dos

teores naturais de  $^3\text{H}$  da água de chuva (2,8TU) na Bacia Hidrográfica da Pampulha (PEIXOTO & JACOMINO, 2001, 2003).

Tabela 4.1 - Resultados do teor de trítio nas águas superficiais no fim do período de seca (Nov. 1999). Método analítico: Cintilador líquido com leitura direta

Amostra	Data da coleta	TU (unid. trítio) ( $R \pm \text{I.A.}$ ) <sup>(1)</sup>	Local específico (vide Figura 1.5)
S1	05/11/99	< LD	Ribeirão Sarandí
S2	05/11/99	< LD	Ribeirão Sarandí
S3	05/11/99	< LD	Ribeirão Sarandí
S4	05/11/99	< LD	Ribeirão Sarandí
E1	05/11/99	< LD	Ribeirão Sarandí
R1	08/11/99	< LD	Ribeirão Ressaca
R2	08/11/99	< LD	Ribeirão Ressaca
R3	08/11/99	< LD	Ribeirão Ressaca
E2	08/11/99	< LD	Ribeirão Ressaca
E3	10/11/99	< LD	Ribeirão Mergulhão
E4	04/11/99	< LD	Ribeirão Pampulha
E5	04/11/99	< LD	Ribeirão do Onça
E6	04/11/99	< LD	Ribeirão do Onça
E7	04/11/99	< LD	Rio das Velhas

(1) R é o resultado e I.A. é a Incerteza Aleatória, conforme conceituação da norma DIN 1319 - parte 3, considerando um coeficiente de confiança 1 -  $\alpha$  = 95%. Limite de detecção (LD) com leitura direta = 25TU.

As coordenadas UTM das 14 estações de amostragem da Tabela 4.1 encontram-se na lista completa de pontos de medição, no Anexo 1, e são as mesmas: S1, R2, E1, etc., para a coleta de água e sedimentos.

O método analítico de leitura direta tem o seu limite de detecção muito alto (25TU, no caso dos resultados das tabelas 4.1 e 4.2), em relação aos níveis de trítio normalmente encontrados na água de chuva. Porém, é um método mais expedito de análise, requerendo somente destilação da amostra e, em alguns casos, filtragem com carvão ativado. Ele é usado, geralmente, em estudos ambientais, quando são efetuados lançamentos de trítio em altas concentrações como, por exemplo, no estudo da capacidade de infiltração de solos (PLATA-BEDMAR, 1972), (DRUMOND, 2004). Por isso, foi o empregado numa primeira aproximação, para as águas

superficiais de toda a Bacia Hidrográfica da Pampulha e, em especial, para a região do aterro da SLU, nas cabeceiras do Ribeirão Ressaca.

Tabela 4.2 - Resultados do teor de trítio nas águas superficiais no fim do período de chuvas (Abril/2000). Método analítico: Cintilador líquido com leitura direta

Amostra	Data da coleta	TU (unid. trítio) ( $R \pm I.A.$ ) <sup>(1)</sup>	Local específico (vide Figura 1.5)
S1	11/04/00	< LD	Ribeirão Sarandí
S2	11/04/00	< LD	Ribeirão Sarandí
S3	11/04/00	< LD	Ribeirão Sarandí
S4	11/04/00	< LD	Ribeirão Sarandí
E1	11/04/00	< LD	Ribeirão Sarandí
R1	12/04/00	33,3 ± 16,7	Ribeirão Ressaca
R2	12/04/00	< LD	Ribeirão Ressaca
R3	12/04/00	< LD	Ribeirão Ressaca
E2	12/04/00	< LD	Ribeirão Ressaca
E3	12/04/00	< LD	Ribeirão Mergulhão
E4	13/04/00	< LD	Ribeirão Pampulha
E5	13/04/00	< LD	Ribeirão do Onça
E6	13/04/00	< LD	Ribeirão do Onça
E7	13/04/00	< LD	Rio das Velhas

(1) Vide nota da Tabela 4.1.

Tendo como base o resultado apresentado nas Tabela 4.2 (campanha no final do período de chuvas), onde se observa na amostra R1 (saída do Aterro Sanitário de Belo Horizonte - Figura 4.3), um teor de  $^3\text{H} = 33,3\text{TU}$ , resolveu-se efetuar a determinação dos teores de  $^3\text{H}$  pelo método analítico de cintilação líquida com enriquecimento eletrolítico, nesta amostra e nas outras do Ribeirão Ressaca, para as duas campanhas e também na amostra da Estação E4, situada logo a jusante da Represa da Pampulha (Figura 1.6), da campanha de abril/2000. Esta última amostra pode representar, portanto, a situação da região a jusante da represa, uma vez que neste trecho da bacia não existem aterros sanitários. O objetivo dessas análises mais elaboradas, onde o limite de detecção (LD) foi de 0,1Bq/L, ou 0,83TU, 30 vezes mais acurado que o método por contagem direta, utilizado antes, foi pesquisar a influência do Aterro da SLU no teor de trítio das águas do Ribeirão Ressaca. Os resultados são apresentados na Tabela 4.3 e na Figura 4.2.



As análises de  $^3\text{H}$ , com enriquecimento eletrolítico, foram também efetuadas no CDTN, em seu novo e moderno laboratório de trítio que realiza contagens em ambiente de ultrabaixa radiação de fundo, o que possibilita também a realização de estudos hidrológicos ambientais com o uso de  $^3\text{H}$ , oriundo da água de chuva.

Tabela 4.3 - Resultados parciais do teor de trítio ( $^3\text{H}$ ) nas águas superficiais. Método analítico: Cintilador líquido com enriquecimento eletrolítico

Amostra	Data da coleta	TU (unid. trítio) ( $R \pm I.A.$ ) <sup>(1)</sup>	Local (vide Figura 1.5)
R1	08/11/99	$23,50 \pm 0,33$	Ribeirão Ressaca, na saída do aterro da SLU-BH.
R2	08/11/99	$4,70 \pm 0,20$	Ribeirão Ressaca
R3	08/11/99	$2,00 \pm 0,17$	Ribeirão Ressaca
E2	08/11/99	$3,30 \pm 0,40$	Ribeirão Ressaca
R1	12/04/00	$68,17 \pm 0,50$	Ribeirão Ressaca, na saída do aterro da SLU-BH
R2	12/04/00	$7,40 \pm 0,40$	Ribeirão Ressaca
R3	12/04/00	$3,92 \pm 0,17$	Ribeirão Ressaca
E2	12/04/00	$3,58 \pm 0,17$	Ribeirão Ressaca
E4	13/04/00	$2,33 \pm 0,17$	Ribeirão Pampulha, logo a jusante da represa.

(1) Vide nota da Tabela 4.1. Limite de detecção (LD) com enriquecimento eletrolítico = 0,83TU.

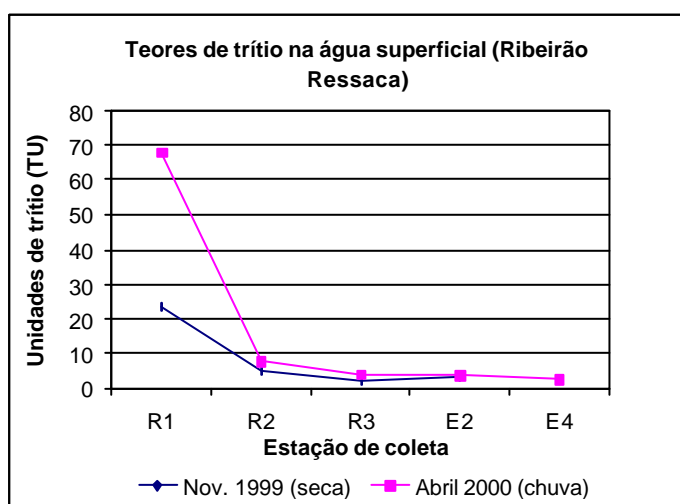


Figura 4.2 - Teores de trítio na água superficial do Ribeirão Ressaca

Observem-se os altos teores de  $^3\text{H}$  (acima dos níveis ambientais na água de chuva), na Estação R1, logo na saída do Aterro da SLU, e a sua posterior atenuação nas estações de jusante: R2, R3 e E2, em cada uma das coletas efetuadas. Esta atenuação se deve, provavelmente, à diluição produzida pela contribuição ao Ribeirão Ressaca, de água não oriunda do aterro e, portanto, com menores teores de trítio. Em E4, no Ribeirão Pampulha, logo à jusante da represa, o teor se apresenta em níveis ambientais. Pode também ser vista, na Figura 4.2, a influência do período de chuva no maior carreamento de chorume para as águas superficiais.

Esta variação ambiental decrescente dos teores de  $^3\text{H}$  na água superficial ao longo do Ribeirão Ressaca, o qual é totalmente canalizado, poderá ser uma ferramenta útil em futuros estudos quantitativos de contribuições da rede de drenagem pluvial às vazões ao longo desse curso d'água, bem como essa metodologia poderá ser aplicada a outras situações semelhantes.

Varição semelhante foi também observada nos valores de condutividade elétrica, medidos nas mesmas amostras de água do Ribeirão Ressaca, e também nas amostras de água do Ribeirão Sarandí (Tabela 9.14 e Figura 9.8).

#### **4.3.2 Resultados para água subterrânea e superficial - Campanha de 2002**

Como mencionado no Item 4.2, em função dos resultados de  $^3\text{H}$  na água superficial acima dos valores de *background*, na região do Aterro Sanitário de Belo Horizonte e na água superficial do Ribeirão Ressaca colheram-se, em 2002, para análise de  $^3\text{H}$  e de alguns metais, amostras de chorume nos aterros sanitários de Belo Horizonte (Figura 4.3) e Contagem (Figura 4.4), em piezômetros e poços de controle na área desses aterros, como também em poços e cisternas catalogados por números, em CPRM (2001), junto aos ribeirões Sarandí e Ressaca, desde os aterros até próximo à Represa da Pampulha (Figura 4.5).

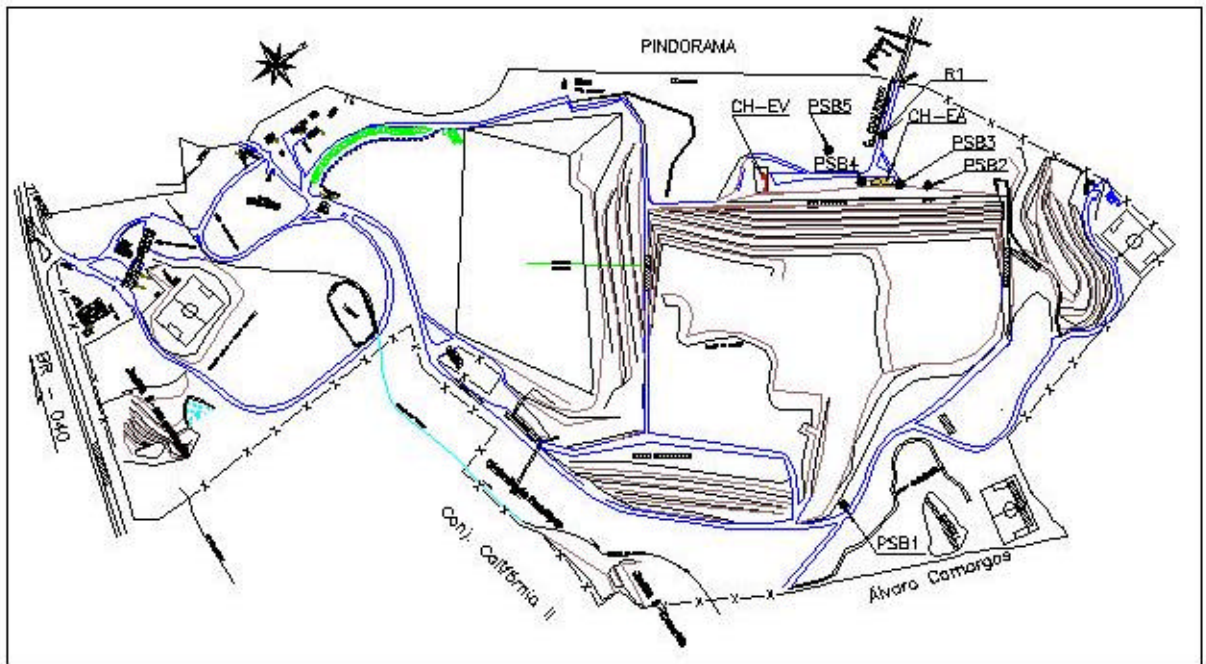


Figura 4.3 - Estações de coleta de água em 2002, para análise simultânea dos teores de  $^3\text{H}$  e de alguns metais (Aterro Sanitário da SLU, Belo Horizonte)

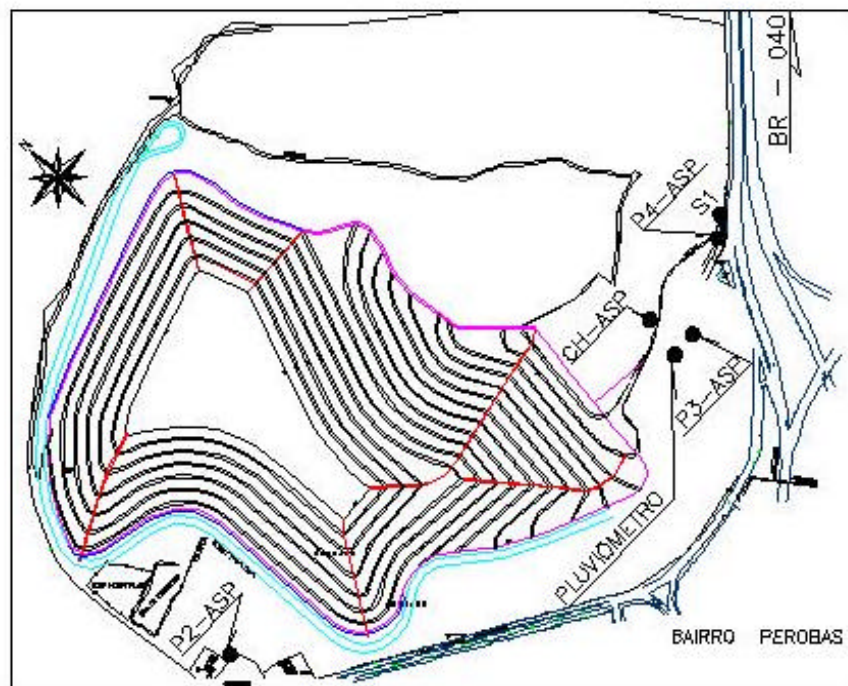


Figura 4.4 - Estações de coleta de água em 2002, para análise simultânea dos teores de  $^3\text{H}$  e de alguns metais e pluviômetro (Aterro Sanitário de Perobas - ASP, Contagem)

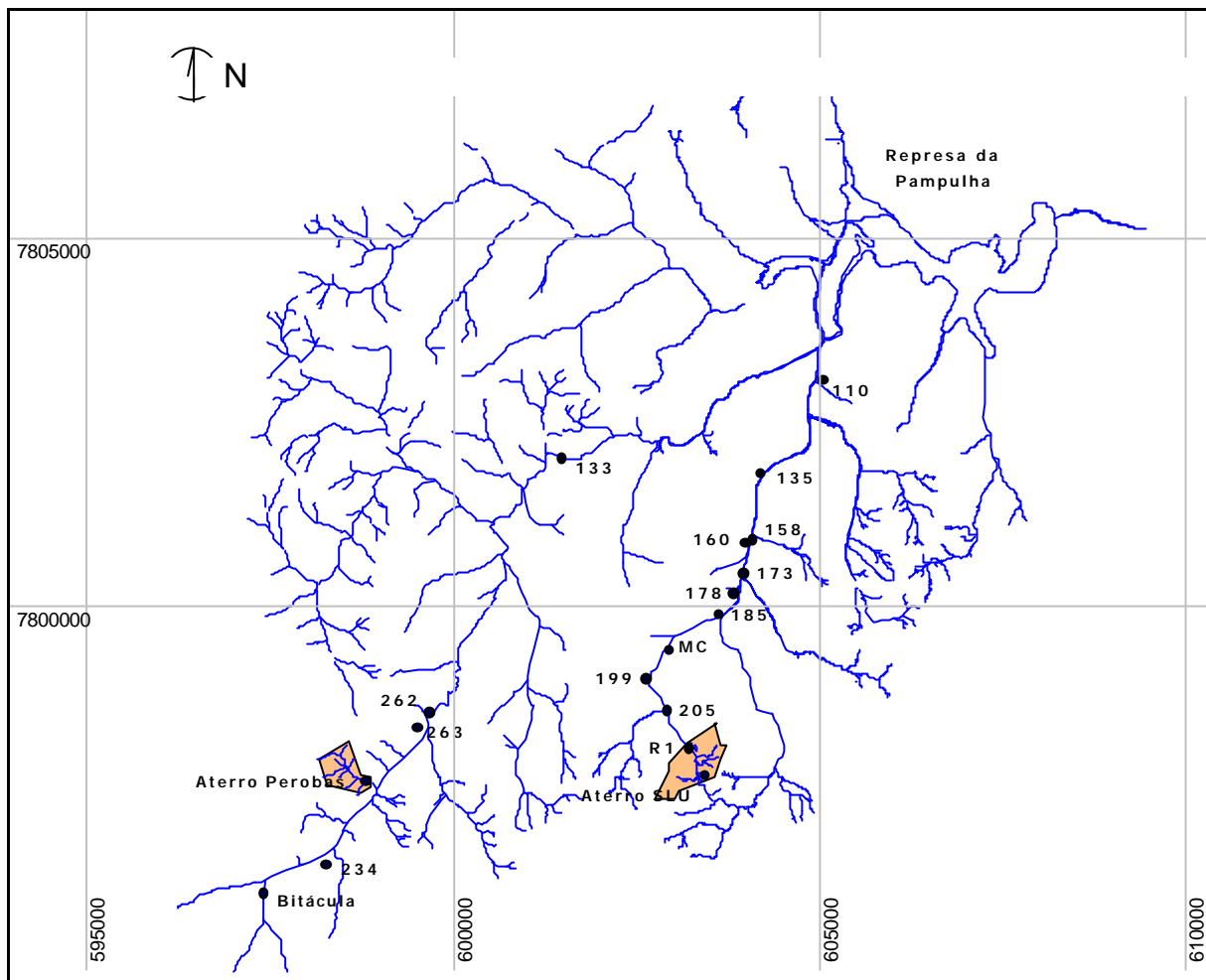


Figura 4.5 - Estações de coleta de água em 2002, para análise simultânea dos teores de  $^3\text{H}$  e de alguns metais (poços e cisternas ao longo dos ribeirões Sarandí e Ressaca)

Para efeito de comparação com valores elevados de  $^3\text{H}$  na Estação R1 do Ribeirão Ressaca, já determinados nas campanhas anteriores (1999 e 2000 - Tabela 4.3), foram também colhidas duas amostras de água superficial nesta mesma estação.

Ainda a montante do Aterro Sanitário de Perobas, foram colhidas amostras de água superficial na região do antigo aterro de Contagem (Córrego Bitácula) e em alguns poços da região, juntos aos formadores do Sarandí (Figura 4.5).

Todas as amostras foram analisadas, em um primeiro momento, quanto aos seus teores de  $^3\text{H}$ , pelo Método de Cintilação Líquida com Contagem Direta, com limite de detecção de 12TU. Para aquelas que apresentaram teores bem acima do natural da água de chuva, como as de chorume dos dois aterros e de alguns poços na região do Aterro da SLU e da Estação R1, no

Ribeirão Ressaca, a análise não foi refeita. Para todas as outras foi realizada uma nova análise pelo método com enriquecimento eletrolítico, com limite de detecção de 0,5TU, sendo os resultados conjuntos apresentados na Tabela 4.4.

Como era intenção comparar os resultados do conteúdo de  $^3\text{H}$  das amostras com teores de metais, as amostras foram também analisadas quanto aos teores de alguns metais, pela Técnica Analítica de Espectrometria de Emissão Atômica por Plasma Indutivamente Acoplado (ICP/AES). O critério de escolha dos metais para esta análise baseou-se nos resultados já obtidos, para a ocorrência de metais em água superficial, nas campanhas de 1999 e 2000, determinados com o emprego da técnica de Espectrometria de Absorção Atômica (EAA), bem como nos estudos de análise multivariada, apresentados no Capítulo 5, que mostraram a ocorrência conjunta na água, em locais preferenciais ao longo dos ribeirões Sarandí e Ressaca, de metais de origem, sobretudo antrópica, nesta bacia hidrográfica, como: Zn, Cr, Ni e Cu. A escolha da técnica de ICP/AES para as presentes análises deveu-se ao fato de que esta é mais sensível que a técnica de EAA. Os resultados são apresentados na Tabela 4.5, sendo que os limites ali mostrados são os de quantificação, 3,3 vezes maiores que os de detecção, que aparecem nos resultados das tabelas 5.1 a 5.4. O Limite de Detecção é definido como três vezes o desvio padrão das leituras do branco e, o Limite de Quantificação, como dez vezes esse mesmo desvio (DULSKI, 1996). Por definição, pode-se observar que o Limite de Quantificação é um valor mais conservativo, proporcionando uma garantia maior nos resultados reportados.

Tabela 4.4 - Teores de  $^3\text{H}$  em água subterrânea e superficial e chorume (sub-bacias dos ribeirões Ressaca e Sarandi): Métodos analíticos: Cintilador líquido com leitura direta <sup>(2)</sup> e com enriquecimento eletrolítico <sup>(3)</sup>

Amostra	Data da coleta	TU (unid. trítio) (R $\pm$ I.A.) <sup>(1)</sup>	Local específico (vide Figura 4.3)
CH - EV	15/05/02	141 $\pm$ 8 <sup>(2)</sup>	Aterro Sanitário-BR 040
CH - EV	06/06/02	111 $\pm$ 9 <sup>(2)</sup>	Aterro Sanitário-BR 040
CH - EA	15/05/02	137 $\pm$ 7 <sup>(2)</sup>	Aterro Sanitário-BR 040
PSB-1	15/05/02	2,6 $\pm$ 0,3 <sup>(3)</sup>	Aterro Sanitário-BR 040
PSB-2	15/05/02	2,8 $\pm$ 0,3 <sup>(3)</sup>	Aterro Sanitário-BR 040
PSB-3	15/05/02	3,7 $\pm$ 0,4 <sup>(3)</sup>	Aterro Sanitário-BR 040
PSB-4	15/05/02	22 $\pm$ 6 <sup>(2)</sup>	Aterro Sanitário-BR 040
PSB-5	15/05/02	219 $\pm$ 11 <sup>(2)</sup>	Aterro Sanitário-BR 040
R1	15/05/02	46 $\pm$ 6 <sup>(2)</sup>	Aterro Sanitário-BR 040
R1	06/06/02	84 $\pm$ 8 <sup>(2)</sup>	Aterro Sanitário-BR 040
205	23/05/02	2,3 $\pm$ 0,2 <sup>(3)</sup>	Ribeirão Ressaca
199	23/05/02	1,8 $\pm$ 0,2 <sup>(3)</sup>	Ribeirão Ressaca
MC <sup>(5)</sup>	23/05/02	1,7 $\pm$ 0,2 <sup>(3)</sup>	Ribeirão Ressaca
185	23/05/02	2,3 $\pm$ 0,2 <sup>(3)</sup>	Ribeirão Ressaca
178	23/05/02	1,4 $\pm$ 0,3 <sup>(3)</sup>	Ribeirão Ressaca
173	23/05/02	1,6 $\pm$ 0,2 <sup>(3)</sup>	Ribeirão Ressaca
160	23/05/02	0,6 $\pm$ 0,1 <sup>(3)</sup>	Ribeirão Ressaca
158	23/05/02	1,7 $\pm$ 0,2 <sup>(3)</sup>	Ribeirão Ressaca
135	23/05/02	0,4 $\pm$ 0,3 <sup>(3)(4)</sup>	Ribeirão Ressaca
110	06/06/02	1,6 $\pm$ 0,2 <sup>(3)</sup>	Ribeirão Ressaca
Bitácula	06/06/02	2,8 $\pm$ 0,2 <sup>(3)</sup>	Córrego Bitácula-Contagem
234	23/05/02	2,3 $\pm$ 0,2 <sup>(3)</sup>	Ribeirão Sarandi
263	23/05/02	1,9 $\pm$ 0,2 <sup>(3)</sup>	Ribeirão Sarandi
262	23/05/02	1,1 $\pm$ 0,2 <sup>(3)</sup>	Ribeirão Sarandi
133	06/06/02	1,0 $\pm$ 0,2 <sup>(3)</sup>	Ribeirão Sarandi
CH-ASP	06/06/02	56 $\pm$ 7 <sup>(2)</sup>	Aterro Sanitário Perobas
P2 ASP	08/05/02	2,0 $\pm$ 0,2 <sup>(3)</sup>	Aterro Sanitário Perobas
P3 ASP	08/05/02	1,9 $\pm$ 0,3 <sup>(3)</sup>	Aterro Sanitário Perobas
P4 ASP	08/05/02	2,6 $\pm$ 0,3 <sup>(3)</sup>	Aterro Sanitário Perobas

(1) As incertezas são calculadas para um nível de confiança de 95%, conforme ABNT-INMETRO-SBM: Guia para expressão da incerteza de medição, 1998. (2) e (3) Limites de detecção (LD): leitura direta (2) = 12TU; enriquecimento eletrolítico (3) = 0,5TU; (4) Resultados abaixo do LD, inclusive negativos, estão reportados conforme recomendação do "Regulatory Guide 4.14-US Regulatory Commission" para análises ambientais, como os resultados desta Tabela; (5) A amostra MC integra a água dos poços: 189, 190, 192, 195 e 196, como denominados em CPRM (2001).

Tabela 4.5 - Teores de metais em água subterrânea, superficial e chorume (dos aterros sanitários de Belo Horizonte e Contagem)

Poço / ponto	Al mg/L	Co mg/L	Cr mg/L	Cu mg/L	Mn mg/L	Ni mg/L	Pb mg/L	Zn mg/L
<b>Valores-CETESB (2001)</b>	<b>0,2<sup>(2)</sup></b>	<b>0,03<sup>(4)</sup></b>	<b>0,05<sup>(1)</sup></b>	<b>2,0<sup>(1)</sup></b>	<b>0,1<sup>(2)</sup></b>	<b>0,05<sup>(3)</sup></b>	<b>0,01<sup>(1)</sup></b>	<b>5,0<sup>(2)</sup></b>
<b>COPAM nº 10/86<sup>(8)</sup></b>	-	-	-	<b>0,5</b>	<b>1,0</b>	<b>1,0</b>	<b>0,1</b>	<b>5,0</b>
<b>COPAM nº 10/86<sup>(9)</sup></b>	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	-	<b>0,02</b>	<b>0,1</b>	<b>0,025</b>	<b>0,03</b>	<b>0,1</b>
<b>Bacia do Rib. Ressaca</b>								
<b>CH-EV - 06/06/02<sup>(5)</sup></b>	0,60 ± 0,01	0,11 ± 0,01	0,12 ± 0,01	< 0,02	0,14 ± 0,01	0,15 ± 0,01	< 0,05	0,23 ± 0,01
<b>CH-EA - 06/06/02<sup>(5)</sup></b>	0,98 ± 0,01	0,12 ± 0,01	0,11 ± 0,01	< 0,02	0,25 ± 0,01	0,14 ± 0,01	< 0,05	0,42 ± 0,01
<b>PSB1 - 06/06/02</b>	0,14 ± 0,02	< 0,03	< 0,03	< 0,02	<b>1,7 ± 0,1</b>	0,05 ± 0,01	< 0,05	0,07 ± 0,01
<b>PSB2 - 06/06/02</b>	< 0,10	< 0,03	< 0,03	< 0,02	<b>0,23 ± 0,01</b>	< 0,04	< 0,05	< 0,05
<b>PSB3 - 06/06/02</b>	< 0,10	<b>0,04 ± 0,01</b>	< 0,03	< 0,02	<b>0,81 ± 0,01</b>	< 0,04	< 0,05	0,08 ± 0,01
<b>PSB4 - 06/06/02</b>	<b>0,69 ± 0,01</b>	<b>0,04 ± 0,01</b>	< 0,03	< 0,02	<b>0,30 ± 0,01</b>	< 0,04	< 0,05	0,11 ± 0,01
<b>PSB5 - 06/06/02</b>	< 0,10	<b>0,04 ± 0,01</b>	< 0,03	< 0,02	<b>1,7 ± 0,1</b>	<b>0,06 ± 0,01</b>	< 0,05	0,08 ± 0,01
<b>R1 - 06/06/02<sup>(6)</sup></b>	<b>0,15 ± 0,01</b>	0,07 ± 0,01	< 0,03	< 0,02	<b>1,4 ± 0,1</b>	<b>0,07 ± 0,01</b>	< 0,05	<b>0,17 ± 0,01</b>
<b>205 - 23/05/02</b>	< 0,10	< 0,03	< 0,03	< 0,02	<b>0,33 ± 0,01</b>	< 0,04	< 0,05	< 0,05
<b>199 - 23/05/02</b>	0,13 ± 0,01	<b>0,04 ± 0,01</b>	< 0,03	< 0,02	<b>0,15 ± 0,01</b>	0,05 ± 0,01	< 0,05	0,08 ± 0,01
<b>MC - 23/05/02<sup>(7)</sup></b>	< 0,10	< 0,03	< 0,03	< 0,02	0,011 ± 0,001	< 0,04	< 0,05	< 0,05
<b>185 - 06/06/02</b>	0,20 ± 0,01	<b>0,05 ± 0,01</b>	< 0,03	< 0,02	<b>0,71 ± 0,01</b>	<b>0,06 ± 0,01</b>	< 0,05	0,12 ± 0,01
<b>178 - 23/05/02</b>	< 0,10	< 0,03	< 0,03	< 0,02	< 0,005	< 0,04	< 0,05	< 0,05
<b>173 - 23/05/02</b>	< 0,10	< 0,03	< 0,03	0,04 ± 0,01	0,064 ± 0,001	< 0,04	< 0,05	0,27 ± 0,02
<b>160 - 23/05/02</b>	< 0,10	< 0,03	< 0,03	0,04 ± 0,01	< 0,005	< 0,04	< 0,05	0,07 ± 0,01
<b>158 - 23/05/02</b>	< 0,10	<b>0,07 ± 0,01</b>	< 0,03	< 0,02	<b>0,12 ± 0,01</b>	< 0,04	< 0,05	< 0,05
<b>135 - 23/05/02</b>	< 0,10	< 0,03	< 0,03	< 0,02	< 0,005	< 0,04	< 0,05	< 0,05
<b>110 - 06/06/02</b>	< 0,10	< 0,03	< 0,03	< 0,02	< 0,005	< 0,04	< 0,05	< 0,05
<b>Bacia do Rib. Sarandi</b>								
<b>Córr. Bitác.- 06/06/02<sup>(6)</sup></b>	<b>0,23 ± 0,01</b>	< 0,03	< 0,03	< 0,02	<b>0,16 ± 0,01</b>	< 0,04	< 0,05	<b>0,28 ± 0,02</b>
<b>234 - 23/05/02</b>	< 0,10	< 0,03	< 0,03	< 0,02	0,023 ± 0,001	< 0,04	< 0,05	< 0,05
<b>263 - 23/05/02</b>	< 0,10	< 0,03	< 0,03	< 0,02	< 0,005	< 0,04	< 0,05	< 0,05
<b>262 - 23/05/02</b>	< 0,10	< 0,03	< 0,03	< 0,02	< 0,005	< 0,04	< 0,05	< 0,05
<b>133 - 06/06/02</b>	< 0,10	< 0,03	< 0,03	< 0,02	< 0,005	< 0,04	< 0,05	0,20 ± 0,02
<b>CH-ASP - 06/06/02<sup>(5)</sup></b>	0,39 ± 0,01	0,11 ± 0,01	0,13 ± 0,01	< 0,02	0,13 ± 0,01	0,15 ± 0,01	< 0,05	0,36 ± 0,01
<b>P2-ASP - 06/06/02</b>	< 0,10	< 0,03	< 0,03	< 0,02	0,073 ± 0,001	< 0,04	< 0,05	0,07 ± 0,01
<b>P3-ASP - 06/06/02</b>	< 0,10	< 0,03	< 0,03	< 0,02	<b>0,53 ± 0,01</b>	< 0,04	< 0,05	0,13 ± 0,01
<b>P4-ASP - 06/06/02</b>	< 0,10	< 0,03	< 0,03	< 0,02	<b>0,26 ± 0,01</b>	< 0,04	< 0,05	< 0,05

(1) - Padrão de Potabilidade da Portaria 1.469 de 29/12/00 do Ministério da Saúde para substâncias que apresentam riscos à saúde;

(2) - Padrão de Potabilidade da Portaria 1.469 de 29/12/00 do Ministério da Saúde para aceitação de consumo (critério organoléptico);

(3) - Comunidade Econômica Européia;

(4) - Com base no valor de intervenção para solos no Cenário Agrícola/Área de Proteção Máxima (APMax); (Adaptado de CETESB, 2001);

(5) - Chorume;

(6) - Água superficial;

(7) - A amostra MC integra a água dos poços: 189, 190, 192, 195 e 196, como denominados em CPRM (2001);

(8) - Deliberação Normativa COPAM nº 10 de 16 de Dezembro de 1986: limites máximos permitidos para lançamento de efluentes em cursos d'água de classe 2 (para comparação com chorume);

(9) - Deliberação Normativa COPAM nº 10 de 16 de Dezembro de 1986: limites máximos permitidos para cursos d'água de classe 2 (para comparação com águas superficiais);

- Valores acima dos limites legais por comparações: água subter. X CETESB; chorume e água sup. X COPAM).

Quanto aos teores de  $^3\text{H}$  (Tabela 4.4) podem ser destacados os seguintes aspectos:

- Os teores de  $^3\text{H}$  em todas as amostras de chorume: CH-EV e CH-EA, respectivamente, das estações Vermelha e Amarela do Aterro Sanitário de Belo Horizonte (Figura 4.3) e CH-ASP, do Aterro Sanitário de Perobas, em Contagem (Figura 4.4), estão muito acima dos teores naturais desse radioisótopo na água de chuva;
- As águas subterrâneas dos poços PSB-4 e PSB-5, na área do aterro de Belo Horizonte apresentam teores de  $^3\text{H}$  superiores aos da água de chuva. É digno de nota o teor encontrado na água do Poço PSB-5 ( $219 \pm 11\text{TU}$ ). Este poço, assim como o PSB-4 ( $22 \pm 6\text{TU}$ ), encontram-se bem próximos e a jusante das estações de chorume (Figura 4.3). Para os poços a montante e/ou mais afastados dessas estações: PSB-1, PSB-2 e PSB-3, os teores medidos são da mesma ordem de grandeza que os da água de chuva para os dois primeiros e ligeiramente superior para o último (Tabela 4.4 e Figura 4.3);
- As duas amostras R1, de água superficial do Ribeirão Ressaca, logo na saída do aterro da SLU, colhidas em 15/05/02 e 06/06/02 (Tabela 4.4) continuaram apresentando teores de trítio bem mais elevados que os da água de chuva, como os das amostras colhidas em 1999 e 2000 (Tabela 4.3), confirmando assim a presença de chorume na água superficial desse ribeirão, no período de 1999 a 2002;
- Para todas as amostras colhidas em poços e cisternas situados em locais ao longo do Ribeirão Ressaca, o mais próximo possível deste curso d'água (amostras 205, 199, MC, 185, 178, 173, 160, 158, 135 e 110 - Tabela 4.4 e Figura 4.5) os teores de  $^3\text{H}$  foram menores que os da água de chuva;
- As constatações anteriores permitem concluir que, devido aos teores de  $^3\text{H}$ , é inequívoca a presença de chorume na água subterrânea dos poços PSB-4 e PSB-5 do aterro da SLU, assim como na água superficial da Estação R1, do Ribeirão Ressaca, não se podendo afirmar, baseado apenas nos teores de  $^3\text{H}$ , que o chorume esteja presente na água subterrânea dos poços e cisternas amostradas ao longo do Ribeirão Ressaca; outras considerações tendo em conta também os teores de metais presentes na amostras de água (Tabela 4.5), serão feitas mais adiante, ainda no presente item;
- Relativamente aos resultados da sub-bacia do Ribeirão Sarandí, além daquele já comentado para o teor de trítio no chorume (CH-ASP) do Aterro Sanitário de Perobas, pode-se



constatar que para os poços de controle do aterro: P2-ASP, P3-ASP e P4-ASP (Figura 4.4), para a água superficial do Córrego Bitácula e para a água de poços: 234; 263; 262 e 133, ao longo do Ribeirão Sarandí (Figura 4.5), os teores de  $^3\text{H}$  são iguais ou menores que os da água de chuva (2,8TU) (PEIXOTO & JACOMINO, 2001, 2003).

Com relação aos teores de metais (Tabela 4.5), os valores encontrados para águas subterrâneas foram comparados com limites de potabilidade (CETESB, 2001) e os teores encontrados em águas superficiais e chorumes foram comparados com os padrões descritos na Deliberação Normativa COPAM nº10/86, para a qualidade das águas e lançamento de efluentes em cursos d'água. As amostras de chorume colhidas nos aterros sanitários de Belo Horizonte e Contagem apresentaram-se, pelo menos em relação aos metais considerados na Tabela 4.5, e que possuem padrões na supra citada Deliberação Normativa, dentro dos limites para lançamento de efluentes em corpos d'água de Classe 2. Já as amostras de água superficial e subterrânea apresentaram alguns valores fora dos padrões estipulados pela legislação, principalmente em relação aos elementos Co e Mn, sendo bastante expressiva a incidência de valores desse último, acima dos limites estipulados. Para o Pb, a técnica analítica utilizada (ICP/AES) não permitiu o alcance dos limites estabelecidos pela legislação para potabilidade e qualidade da água.

Para a água subterrânea nas regiões dos aterros, a ocorrência de teores de metais é geralmente maior nos poços mais próximos e a jusante das estações de chorume. Para o Aterro Sanitário de Belo Horizonte, há uma boa correlação entre os teores de trítio (Tabela 4.4), de metais (Tabela 4.5) e a posição dos poços em relação às pilhas de disposição de lixo e estações de chorume (Figura 4.3). Assim, os poços mais a jusante (PSB4 e PSB5) apresentam maiores teores de trítio e maior ocorrência de metais acima dos padrões estipulados. Observe-se que a amostra PSB-5, com alto teor de  $^3\text{H}$  (219TU) apresentou também alto teor de Mn (1,7mg/L). Isto indica a existência de um fluxo preferencial e recente de chorume para a região desse poço. Já para a água dos poços do Aterro de Contagem (ASP), mais novo que o anteriormente citado, esta correlação somente se nota para os teores de Mn nos poços mais próximos e a jusante das pilhas de disposição de lixo (P3-ASP e P4-ASP) (Tabela 4.5 e Figura 4.4), uma vez que os teores de  $^3\text{H}$  para estes poços são inferiores aos da água de chuva (2,8TU) (Tabela 4.4).

Vale a pena ressaltar que a água subterrânea fora da região do aterro sanitário, na bacia do Ribeirão Sarandí, não apresentou teores de metais acima dos padrões para potabilidade

estipulados (Tabela 4.5). Entretanto, na bacia do Ribeirão Ressaca, foram encontrados valores acima desses limites, sobretudo em relação ao Mn, para os poços de números: 205, 199, 185 e 158 (Tabela 4.5), fora da região do aterro. A Tabela 4.6 reúne alguns dados interessantes sobre estes poços, obtidos em CPRM (2001).

Tabela 4.6 - Algumas características dos poços 205, 199, 185 e 158 ao longo do Ribeirão Ressaca. Medições efetuadas em 2000 e 2001. Fonte: CPRM (2001)

Poço	Tipo	Profundidade (m)	Nível estático (m)	Perfil litológico	pH	Condutividade $\mu$ S/cm
205	Poço escavado	4,0	2,50	0-4 solo residual	7,35	577
199	Poço escavado	6,0	2,50	0-6 solo residual	6,27	491
185	Poço escavado	4,0	2,46	0-4 solo residual	3,60	383
158	Poço tubular	---	---	---	5,78	241

Segundo CPRM (2001), a condutividade elétrica é bom indicativo de anomalias de qualidade da água, quando se observa que pontos com elevadas contaminações foram os que apresentaram as maiores condutividades (Figura 12.3 e Tabela 12.4 daquela referência). Conforme as conclusões contidas em CPRM (2001), as águas subterrâneas naturais da Bacia Hidrográfica da Pampulha, na região a montante da Represa da Pampulha são do tipo bicarbonatadas cálcicas-sódicas, neutras (pH médio de 7,0) e pouco mineralizadas (condutividade elétrica média de 122  $\mu$ S/cm). Já as águas contaminadas podem ser bicarbonatadas cálcicas e/ou sódicas e até cloretadas sódicas, ácidas a levemente ácidas (pH médio de 6,5) e mais mineralizadas (condutividade elétrica média de 231  $\mu$ S/cm), sendo os contaminantes mais comuns os nitrogênios orgânico e amoniacal, nitratos, ferro, manganês e coliformes. Geralmente, a maior solubilidade de íons metálicos ocorre em águas ácidas. Os metais ocorrem de forma pontual e estão relacionados com fontes de elevada carga contaminante: atividades industriais, disposição de resíduos sólidos, armazenamento de combustíveis, oficinas mecânicas e lixiviação de aterros de resíduos.

Os dados das tabelas 4.5 e 4.6 acima, para as águas contaminadas em poços ao longo do Ribeirão Ressaca, confirmam estas conclusões. Os poços 205 (posto de combustível) e 199 (atividade industrial) são os mais próximos dos limites do aterro e são poços rasos. O poço 185, bem a jusante do aterro (Figura 4.5) também é raso, tendo sido informado a este autor que o local serviu, no passado, para despejo de lixo. Observe-se o alto teor de Mn (0,71mg/L) e teores

acima do limite para Co e Ni. na água desse poço (Tabela 4.5). O teor de  $^3\text{H}$  determinado para esta amostra (2,3TU) (Tabela 4.4) é inferior ao da água de chuva, o que pode ser devido ao decaimento radioativo do trítio contido no chorume desse despejo passado. Junto ao poço 158, que apresenta valores de Co e Mn superiores aos limites estipulados (Tabela 4.5), funciona um posto de combustível.

Na literatura (CPRM, 2001) existem estudos de prospeção geofísica nas regiões dos aterros sanitários de Belo Horizonte, de Perobas e do aterro não controlado já desativado na região do Córrego Bitácula, ambos no município de Contagem. Estes estudos indicam uma alta condutividade elétrica no solo dessas regiões (baixa eletroresistividade). Para o aterro de Belo Horizonte ela se localiza principalmente na região de jusante do mesmo, em direção ao Ribeirão Ressaca. Esta pode ser devida ao acúmulo de espécies iônicas no subsolo, entre elas, metais, o que é resultante da movimentação de líquidos percolados das células de deposição. Isto pode ser certificado pelos altos valores de trítio encontrados na água dos poços de jusante, PSB4 e PSB5, principalmente este último (Tabela 4.4 e (Figura 4.6), indicando a presença de chorume naqueles pontos, o que também se confirma pelos teores de Co, Mn e Ni (Tabela 4.5), acima dos padrões estipulados.

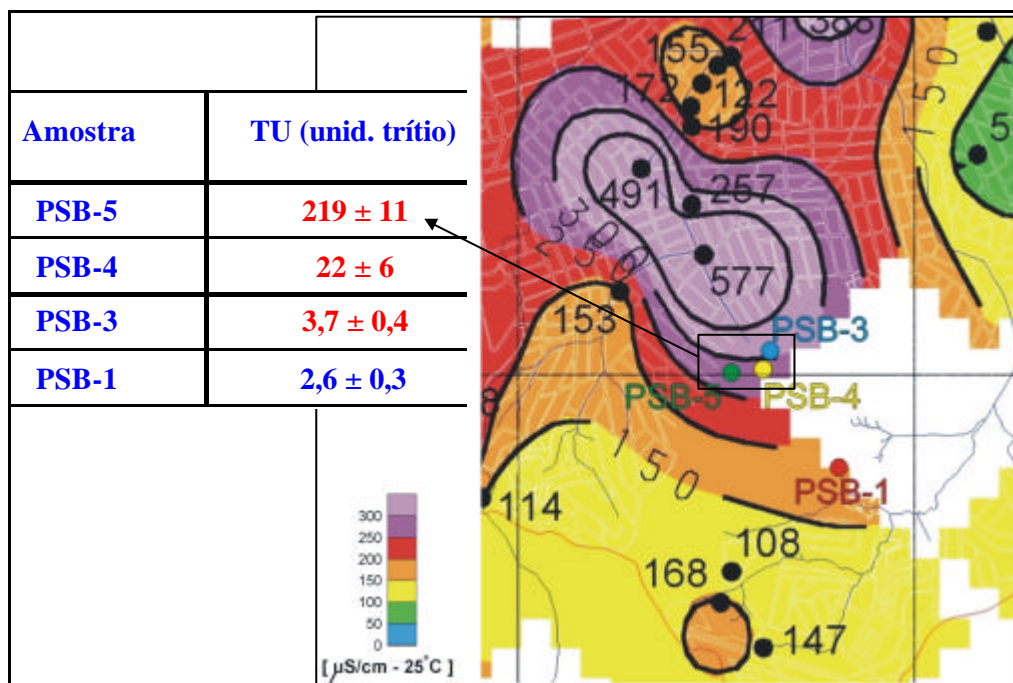


Figura 4.6 - Valores condutividade elétrica do solo e localização de alguns poços na região do Aterro Sanitário da SLU, em Belo Horizonte. Adaptado de CPRM (2001)

Preferencialmente, no futuro, em estudos nas regiões de aterros sanitários, não em escala de demonstração de metodologia, como os aqui apresentados, mas de comparação, em água superficial e/ou subterrânea, entre teores de  $^3\text{H}$  e de metais, para a avaliação da progressão de plumas de chorume no meio ambiente, as análises de metais na água devem ser efetuadas com limites de detecção mais baixos, compatíveis com os limites legais, por exemplo, como de CETESB (2001) apresentados na Tabela 4.5 e as análises de  $^3\text{H}$ , conforme o caso, deverão ser realizadas com enriquecimento eletrolítico.

Assim, o  $^3\text{H}$  presente no chorume de aterros sanitários, apontado no presente trabalho, associado a estudos geofísicos de condutividade do solo, sondagens mecânicas e amostragem química das águas, já recomendados em CPRM (2001), apresenta-se como uma poderosa ferramenta para previsão do andamento de uma suposta pluma de contaminação subterrânea, como apontado em CPRM (2001), para os aterros de Belo Horizonte e Contagem. Isto porque a água tritiada contida no chorume segue seu curso normal no subsolo, enquanto os metais vão sendo retidos pelos colóides e argilas presentes no subsolo até sua saturação pois, segundo SOUSA (1998), o solo do aterro sanitário de Belo Horizonte apresenta grande capacidade de adsorção de metais, pelo menos nas concentrações que ali são encontradas. Da mesma forma estudos semelhantes poderão ser feitos em outros aterros, por todo o Brasil.

## 5 ESTUDO DO CONTEÚDO DE METAIS E OUTROS ELEMENTOS QUÍMICOS NOS SEDIMENTOS E NA ÁGUA

### 5.1 Introdução

Os estudos do conteúdo, sobretudo de metais, mas também de outros elementos químicos (ametais) como o As, Cl e I em sedimentos fluviais, lacustres (material de assoreamento da represa) e na água da Bacia Hidrográfica da Pampulha, em 13 estações e uma no Rio das Velhas (Figura 1.6), foram feitos com vistas à

- avaliação, quanto a esses metais, do impacto ambiental decorrente do despejo, nos cursos d'água a jusante, de material fino (silte e argila) dragado na represa;
- estudo mais pormenorizado da contribuição em metais das diversas regiões a montante da represa, que são responsáveis diretas pelos teores destes metais nos sedimentos de assoreamento a serem dragados da mesma.

Não existem ainda estudos detalhados do conteúdo de metais nos sedimentos e na água abrangendo toda a Bacia Hidrográfica da Pampulha, de uma forma coordenada. Informações obtidas pelo autor junto à Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM), indicam que são feitas coletas periódicas apenas de água, em uma estação no Ribeirão da Onça, logo a montante de sua confluência com o Rio das Velhas desde 1977 (coletas semestrais) e, a partir de 1994, coletas bimestrais, sendo realizadas as determinações da sua contaminação por tóxicos e avaliado o índice da qualidade da água. A respeito da determinação do teor de metais em sedimentos, informações obtidas junto ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Escola de Engenharia da UFMG dão conta de que foram feitas determinações em algumas amostras de sedimentos da represa da Pampulha em 1994, pela Companhia Mineira de Metais (CMM), atendendo à solicitação da Prefeitura Municipal de Belo Horizonte (PBH, 1994). Os estudos normalmente desenvolvidos pelo Instituto de Ciências Biológicas (ICB/UFMG), na Bacia Hidrográfica da Pampulha, concentram-se, sobretudo na fauna e flora aquáticas da represa (PINTO COELHO & GRECO, 1998) (PINTO COELHO, 2001).

O estudo aqui apresentado, relativamente aos metais, é uma versão ampliada do que foi desenvolvido concomitantemente ao monitoramento hidrossedimentométrico da Bacia

Hidrográfica da Pampulha (ABRH *et al.* 1996), realizado sob a coordenação da SUDECAP por diversas instituições, e é resultado também do projeto de pesquisa CRA-852/98 financiado, em parte, pela FAPEMIG (CNEN/CDTN & ERH/UFMG, 1998).

A determinação das condições ambientais relativamente aos teores de metais contidos nos sedimentos e na água, em toda a Bacia Hidrográfica da Pampulha até a sua entrada no Rio das Velhas, associada às medições diretas de descarga sólida e líquida e, simultaneamente, este mesmo conhecimento no Rio das Velhas, logo a montante da foz do Ribeirão da Onça, permitiu avaliar a magnitude atual dos dois sistemas nestes aspectos e determinar, com o recurso ao emprego de experimentos utilizando traçadores, a influência que um possível despejo futuro de sedimentos finos, dragados no interior da Represa da Pampulha, possa vir a ter nos cursos d'água a jusante da represa, e após chegar ao Rio das Velhas.

Este trabalho poderá também ser ponto de partida para diversas pesquisas, tais como: análise de risco relativamente à contaminação de lençol freático devido à utilização de sedimentos contendo metais em aterros; podendo indicar também a necessidade de estudos para a impermeabilização das áreas selecionadas para despejo, com vistas a se evitar a contaminação do lençol freático.

Na medida em que estes estudos demonstrarem que o impacto ambiental com respeito aos metais e ametais não seja significativo, a dragagem dos sedimentos com o seu transporte para jusante, através de tubulação localizada nas calhas dos cursos d'água, para áreas de bota-fora em terra, a jusante da represa (utilização em aterros comuns ou sanitários), ou parte do mesmo sendo reintegrada aos cursos d'água a jusante, não terá restrições ambientais neste aspecto, contribuindo para sua implementação, o que ajudará a resolver o crucial problema do atual assoreamento da Represa da Pampulha.

Além disso, o mapeamento das contribuições dos metais estudados das diversas regiões da bacia hidrográfica, a montante da represa, possibilitará aos órgãos ambientais municipais de Belo Horizonte e Contagem (região a montante da represa), assim como à Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM), ter um ponto de partida para o estabelecimento de uma metodologia para maior controle dos despejos desses poluentes no sistema. Este controle poderá

ser feito através da aplicação de técnicas de geoprocessamento, utilizando o sistema de informações geográficas (SIG.).

No caso da dragagem de longa distância (DLD), o sedimento a ser inicialmente dragado já se encontra com os teores de metais e ametais, como indicado mais adiante, na Tabela 5.3. Assim, para um bom gerenciamento ambiental desta dragagem, deve-se contemplar a redução futura das fontes de metais da região a montante da represa, as quais são contribuintes para os sedimentos finos e a matéria orgânica depositados no fundo da represa, os quais se cogita dragar e despejar a jusante. Dessa forma, dragagens posteriores poderão ser feitas em sedimentos com menores teores de metais que os atuais. Para tanto, as informações levantadas no presente trabalho sobre os teores atuais de metais e ametais na água e nos sedimentos e, em especial, nos sedimentos em suspensão a montante da represa, e suas regiões de entrada no sistema (áreas fonte), através da identificação dos picos de ocorrência, serão de muita utilidade aos órgãos ambientais.

No presente trabalho, apesar de se terem obtido informações da distribuição de metais, tanto a montante quanto a jusante da Represa da Pampulha, os estudos das áreas de contribuição (áreas fonte) serão dirigidos somente para a região a montante. Porém, da mesma forma, esta avaliação poderá ser feita, em outro estudo, para a região a jusante da represa.

No caso do despejo, nos cursos d'água a jusante, de parte do material fino dragado, o conhecimento prévio de suas concentrações em sedimentos finos em suspensão e de seus teores em metais, anteriormente ao despejo (branco), será um ponto fundamental na avaliação do impacto ambiental do referido despejo.

Julga-se bastante oportuno ter-se iniciado estas pesquisas, a montante, em 1999, pelos motivos expostos a seguir.

Têm-se duas situações distintas e, por assim dizer, até extremas, com relação às sub-bacias dos ribeirões Ressaca e Sarandí. A bacia do Ribeirão Ressaca, no município de Belo Horizonte, já está totalmente tomada pela ocupação urbana e o aterro sanitário existente em suas cabeceiras já está praticamente no seu limite de utilização. Por outro lado, a bacia do Ribeirão Sarandí, tendo sua maior área no município de Contagem, tem grandes áreas ainda desocupadas, mas isto não

deve demorar muito a se modificar, pois a avenida sanitária ao longo do Sarandí ficou pronta, até Belo Horizonte, apenas no final de 1999 e já se nota uma intensificação das construções na região que, até há pouco tempo, tinha ocupação predominantemente rural. Além disso, também nas cabeceiras do Sarandí, foi construído, há cerca de quatro anos, o Aterro Sanitário de Perobas que, ao contrário daquele existente nas cabeceiras do Ribeirão Ressaca, em Belo Horizonte, ainda poderá ser utilizado por muitos anos. As estações R1 e S1 (Figura 1.6) estão localizadas, respectivamente, nas saídas dos aterros sanitários de Belo Horizonte e de Contagem.

Assim, um estudo coordenado, ao longo do tempo, pelos órgãos ambientais tendo, de um lado, os teores de metais e outros indicadores da qualidade da água e dos sedimentos e, de outro, a qualidade e a variação da ocupação da bacia hidrográfica, através de técnicas de geoprocessamento, permitirá gerenciá-la adequadamente sob o ponto de vista ambiental.

O estudo dos teores de metais nos sedimentos e na água, abrangendo toda a bacia hidrográfica, é uma contribuição inicial no sentido de se estudar o papel destes poluentes no meio ambiente. Porém, através dele, pretende-se obter, com o presente trabalho, uma primeira idéia do papel desempenhado pela Represa da Pampulha na retenção de metais ao longo do sistema. Espera-se também definir melhor os metais predominantes, originários das várias regiões das sub-bacias contribuintes da Represa da Pampulha (Sarandí e Ressaca), através de estudos estatísticos, empregando-se técnicas de análise multivariada.

Assim, este é um estudo pioneiro e original na Bacia Hidrográfica da Pampulha relativamente a metais sob o ponto de vista, tanto de sua abrangência nos aspectos da distribuição das estações de amostragem, quanto dos objetivos que ele pretende atingir, listados no início deste item.

## **5.2 Metodologia**

### **5.2.1 Coletas e preparação das amostras**

Já se sabe que o índice pluviométrico influi bastante no teor de metais em água e sedimentos, sendo que este decresce com o aumento da pluviosidade, segundo estudos anteriores realizados no Rio das Velhas (VEADO, 1997). Assim, para o presente trabalho, efetuou-se a coleta de



sedimentos de fundo, em suspensão e água, em duas situações distintas do ciclo hidrológico: período de seca (abril a outubro) e período de chuvas (novembro a março). As coletas no final do período de seca foram efetuadas em outubro e no início de novembro de 1999, antes da chuva e, as do período de chuvas, no seu final (abril 2000).

Optou-se pelas coletas no final dos respectivos períodos de seca e chuva com o intuito de possibilitar uma maior integração das influências dessas duas estações no conteúdo de metais na água e nos sedimentos. Isto foi bastante interessante, tendo em vista a alta precipitação pluviométrica que ocorreu na estação de chuvas de 1999/2000 (Figura 4.1), como pode ser visto para a estação pluviográfica operada pelo CDTN, no Aterro Sanitário de Perobas (Figura 4.4), em Contagem.

O monitoramento hidrossedimentométrico referido anteriormente (ABRH *et al.* 1996), (CETEC, 1999) (HDC, 1999), (SUDECAP, 1999), constou de medições de níveis d'água, coleta de sedimento de fundo e determinação de sua distribuição granulométrica, coleta de sedimento em suspensão com determinação de sua concentração e granulometria de amostras integradas em cada seção, determinação de vazão líquida e sólida em suspensão, ao longo de um ano hidrológico nas estações E1 a E7 (Figura 1.6), tendo sido encerrado em dezembro de 1999.

As coletas de amostras de sedimento de fundo, em suspensão e de água para determinação dos teores de metais foram feitas nas 14 estações (Figura 1.6). No interior da represa foram realizadas duas coletas de sedimentos da superfície do fundo em sete locais, entre a Ilha dos Amores e a região da barragem, sendo a segunda delas em posições determinadas a GPS, situadas precisamente no antigo talvegue do Ribeirão Pampulha, conforme carta batimétrica apresentada em SALIM *et al.* (2000). Foram também efetuadas amostragens de sedimento, integradas a cada 0,5m entre a superfície e 3m de profundidade, em 4 verticais, na região de bota-fora atual de dragagem, situada dentro da represa (Figura 5.1).

As amostras de sedimento de fundo, nas 14 estações e nos sete locais no interior da represa (entre a Ilha dos Amores e a barragem), foram colhidas com um amostrador do tipo "Rock Island" (CARVALHO, 1994), sendo o empregado nos estudos especialmente construído em aço inox, com o intuito de se evitar o ataque químico em suas paredes, pelo ambiente altamente

contaminado da Bacia Hidrográfica da Pampulha. Além disso, ele possui a forma cônica e paredes finas, ao contrário dos amostradores cilíndricos normalmente utilizados (Figura 5.2), para facilitar a coleta de finas camadas de sedimento de fundo existentes, por vezes, no piso de concreto das canalizações de drenagem urbana.

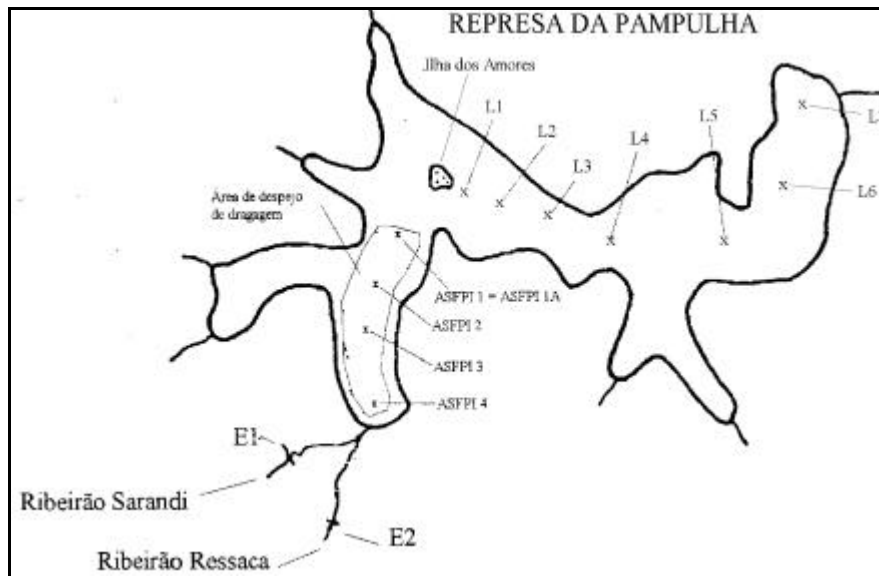


Figura 5.1 - Represa da Pampulha com pontos de amostragem de sedimentos de fundo



Figura 5.2 - Amostradores Rock Island (o da esquerda em aço inox)

Em cada estação, por questões logísticas (acesso a toda seção) e de quantidade final de amostras, foi colhida apenas uma amostra de sedimento de fundo. Assim, os resultados de teores de metais em sedimento de fundo, em cada estação, não representam uma distribuição média de teores ao longo da seção dos cursos d'água. De toda forma, o interesse maior desse trabalho é nos teores de metais nos sedimentos em suspensão, que são mais homogêneos que os

sedimentos de fundo na seção considerada, e foram obtidos por um processo de amostragem integrado, como visto adiante.

Para as coletas integradas na região de bota-fora atual de dragagem, situada dentro da represa, foi utilizado um trado acionado por motor a gasolina (Figura 5.3). Tão logo as amostras de sedimento de fundo eram colhidas, as mesmas eram transferidas para sacos plásticos.



Figura 5.3 - Trado motorizado

As amostras de água e sedimento em suspensão foram colhidas em recipientes de polietileno de alta densidade molecular, especialmente fabricados, a fim de se minimizar a possível adsorção dos metais nas paredes dos mesmos (EATON *et al.* 1995), (KEITH, 1988). As amostras de água tiveram o volume de 2L. Uma vez colhidas foram resfriadas e levadas ao laboratório onde foram filtradas (filtro tarja preta) e depois acidificadas com ácido nítrico, para sua preservação (EATON *et al.* 1995), (KEITH, 1988).

Para a coleta de sedimento em suspensão foram utilizados frascos (bombonas) de 20L (Figura 5.4). Em geral, foram colhidos 100 ou mais litros de água, pois era intenção de se obter, pelo menos, 15g de material em suspensão (concentração mínima de 150mg/L) para as análises por um dos métodos empregados: Espectrometria de Absorção Atômica (EAA). Uma vez recolhidas, as amostras foram levadas para o laboratório e deixadas em processo de decantação em ambiente refrigerado. Após a decantação, que durava vários dias, os recipientes foram sifonados cuidadosamente e os volumes restantes de cada ponto de coleta foram reunidos na primeira bombona de cada coleta, para nova decantação e sifonagem. O material restante desta nova sifonagem foi transferido para um frasco de plástico de alta densidade molecular, com

volume de 1L, e deixado em repouso para uma última sifonagem. Após esta, a parte superior do frasco foi recortada e o sedimento, ainda úmido, foi levado para secar em estufa, em temperatura inferior a 40°C, pois em temperaturas superiores o mercúrio (Hg), um dos metais pesquisados, se volatiliza.



Figura 5.4 - Bombona plástica de 20L e outros amostradores de água - Estação S2

Assim, todo o material em suspensão (silte, argila e matéria orgânica) foi obtido para a determinação do teor de metais. Não se eliminou a matéria orgânica, como normalmente se faz para a determinação da concentração de sedimento em suspensão, pois ela é um importante vetor no transporte de metais em meio hídrico. Também, para o estudo da marcação de sedimento fino com  $^{99m}\text{Tc}$ , a ser abordada no próximo capítulo, a matéria orgânica não foi eliminada, pois um dos objetivos principais do presente trabalho é o estudo do impacto, quanto a metais, do sedimento (englobando matéria orgânica) dragado na represa e despejado nos cursos d'água a jusante.

As amostras de sedimento de fundo, nos locais onde esses estavam presentes (nem todas as estações possuíam) foram de massa superior a 1,5kg. Os sedimentos de fundo (areia em sua maioria) foram secos abaixo de 40°C, pelos mesmos motivos apontados para o sedimento em suspensão, e peneirados no sentido de se obter, ao menos, 15g de material com granulometria inferior a 200mesh (74 $\mu$ m), que é o limite superior de tamanho utilizado para determinação de metais pelo método de EAA.

Após a secagem o material foi peneirado até se obter mais de 15g de material com diâmetro inferior a 200mesh, quando o processo foi interrompido. Caso esta massa não fosse conseguida, a fração obtida era separada, constituindo a amostra mais fina, e fazia-se a análise granulométrica da amostra mais grossa restante, no intervalo definido pelas peneiras de aberturas: 25, 45, 60, 80, 100, 140 e 200mesh. As frações de diâmetro inferior foram moídas até que a soma das massas alcançasse pelo menos 15g. Este material moído constituía a sub-amostra moída, onde o Hg não foi determinado visto que, durante o processo de moagem a temperatura do recipiente alcançava valores superiores a 40<sup>0</sup>C, o que inviabilizava a determinação deste metal, pelos motivos apontados anteriormente.

Assim, no caso de moagem, a amostra de sedimento de fundo foi constituída de duas frações, analisadas separadamente, como pode ser visto nos resultados apresentados nas tabelas 5.1 a 5.4. Como se utilizou um moinho metálico, em alguns casos suspeitou-se de contaminação, pelo moinho, nas sub-amostras moídas. Assim, os resultados dos teores de metais nas sub-amostras moídas não foram considerados para a análise multivariada, da distribuição de metais na água, nos sedimentos de fundo e em suspensão nos principais cursos d'água da Bacia Hidrográfica da Pampulha, e nos sedimentos de fundo da represa.

## **5.2.2 Técnicas de análise**

As amostras foram analisadas, inicialmente, pela técnica de Espectrometria de Absorção Atômica, quanto ao teor de, pelo menos, quinze elementos: As, Ba, Cd, Cr, Co, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb, Se, Sn, Ti, V, Zn, e o Al. Em análises prévias do material verificou-se a presença deste último elemento em altos teores. Isto motivou também a sua determinação para que posteriormente a sua origem fosse pesquisada. Todas as determinações foram realizadas nos laboratórios do CDTN, utilizando também as facilidades de seu reator nuclear de pesquisas para determinações pela técnica de Análise Ativação Neutrônica (AAN), o que estendeu a determinação a até 32 elementos por amostra (tabelas 5.1 a 5.4).

### 5.2.2.1 Espectrometria de Absorção Atômica

A análise de metais por Espectrometria de Absorção Atômica (EAA), tanto na água quanto nos sedimentos se constitui, em linhas gerais, do estudo da absorção da energia radiante nas regiões

do visível e ultravioleta, por átomos gasosos e neutros no estado fundamental, conforme L'VOV (1970).

A interação da radiação eletromagnética com a matéria constitui a base dos métodos óticos utilizados em Química. Portanto, o princípio básico da técnica baseia-se na propriedade dos átomos de absorver energia, representada por fótons de comprimentos de onda bem determinados. Assim, é feita a dissolução da amostra e, a seguir, a sua vaporização. Este vapor, submetido a uma excitação térmica, apresenta uma população atômica em estado fundamental maior que a de átomos excitados, pois as fontes de excitação não atingem uma temperatura capaz de provocar uma grande excitação, conforme GONÇALVES (1983). Para cada elemento a ser analisado, utiliza-se uma lâmpada especial que emite radiação luminosa correspondente ao elemento que se quer analisar. Esta radiação incide no gás formado pela amostra vaporizada.

Quando o feixe radiante de intensidade  $I_0$ , de uma dada frequência, passa através de um percurso óptico  $b$ , o feixe emergente terá uma intensidade  $I$  nesta frequência. Admitindo-se que todos os átomos existentes no meio atômico absorvente estejam na forma neutra e no estado fundamental, tem-se a Equação 5.1, onde  $K_1$  é o coeficiente de absorção à frequência dada. Estabelecendo uma relação com a concentração  $c$  do elemento no meio absorvente, a qual é proporcional ao número de átomos presentes na amostra, desde que se mantenham fixas a frequência, a pressão, a temperatura e a espessura do meio absorvente, tem-se:

$$I = I_0 e^{-K_1 b} = I_0 e^{-K_2 c} \quad (5.1)$$

A determinação de cada elemento exige a vaporização de uma parcela da amostra, geralmente cerca de 1g. Daí, no caso de sedimentos em suspensão, terem sido necessárias cerca de 15g, o que, por vezes, exigiu a coleta de mais de 100L de água, como antes comentado.

A técnica de EAA é muito versátil e vem se desenvolvendo bastante, pois tem disponibilidade de lâmpadas para elementos muito diferentes, permitindo que sejam determinados, hoje em dia, cerca de 65 elementos. Além disso, é uma técnica sensível, determinando vários elementos em concentrações na faixa de ppm (mg/L) a ppb ( $\mu\text{g/L}$ ).

### 5.2.2.2 Ativação Neutrônica

A técnica de Análise por Ativação Neutrônica (AAN) permite a determinação da composição química elementar por meio da indução de radioatividade artificial em uma amostra, que é colocada dentro de um reator nuclear para ser submetida à irradiação com nêutrons, e posterior medida da radioatividade. Esta é realizada com contadores de radiação gama que discriminam as energias das radiações emitidas pelos diferentes elementos tornados radioativos. Cada elemento emite uma radiação ou um conjunto de radiações de energias que lhe são características, permitindo assim identificá-lo. A área do pico (número de contagens) no espectro de energia permite quantificar o teor do elemento na amostra.

Dadas as características da AAN, apenas uma irradiação proporciona a determinação dos teores de muitos metais, alguns dos quais não são determinados pela técnica de EAA. Cerca de 70% dos elementos químicos naturais tem propriedades nucleares adequadas para análises por ativação neutrônica. Essa é a técnica mais apropriada para a análise de sedimentos, por não necessitar da dissolução da amostra, ser multi-elementar, de grande sensibilidade, e requerer somente pequenas quantidades de amostras por análise (em alguns casos somente poucas miligramas). Outra característica interessante dessa técnica é que, uma vez irradiada a amostra, os seus componentes estão nuclearmente marcados, não havendo possibilidade de posterior contaminação, segundo LIESER (1997) citado em MENEZES (2002). No presente trabalho adotou-se o critério de se considerar os resultados fornecidos pelo processo de EAA para os 16 elementos anteriormente listados e os de AAN, para os demais (tabelas 5.1 a 5.4). Entretanto, os valores obtidos por AAN e EAA foram, em geral, bastante semelhantes.

### **5.3 Resultados obtidos**

Nas tabelas 5.1 a 5.4, são mostrados os resultados dos teores de elementos nos três tipos de amostras: água = 1; sedimento de fundo = 2 e sedimento em suspensão = 3, para as duas campanhas de coleta: seca = 1 e chuva = 2. Os resultados indicados como: < N, são aqueles abaixo do limite de detecção (N) e os em branco não foram determinados. Eles são ordenados, preferencialmente, por região de coleta (1 a 6), considerando as duas campanhas.

As regiões em que se dividiu a Bacia Hidrográfica da Pampulha (Figura 1.6), para efeito de análise da distribuição de metais, são:

- Região 1: Ribeirão Sarandí (estações de coleta: S1, S2, S3, S4 e E1);
- Região 2: Ribeirão Ressaca (estações de coleta: R1, R2, R3 e E2);
- Região 3: Represa da Pampulha (estações de coleta: L1 a L7 e ASFPI1 a ASFPI4);
- Região 4: Ribeirões Pampulha e Onça (estações de coleta: E4, E5 e E6);
- Região 5: Rio das Velhas (estação de coleta E7);
- Região 6: Ribeirão Mergulhão (estação de coleta E3).

Para as tabelas 5.1 a 5.4, é válida a seguinte legenda:

- |  |
|--|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Valores / elementos em <b>vermelho</b> - análises realizadas por Espectrometria de Absorção Atômica</li> <li>2) Valores / elementos em <b>azul</b> - análises realizadas por Ativação Neutrônica</li> <li>3) Elementos em <b>vermelho</b> e <b>azul</b> - análises realizadas por Espectrometria de Absorção Atômica e Ativação Neutrônica</li> <li>4) Para amostras de água (tipo 1) ppm = mg/L</li> <li>5) Para amostras de sedimento de fundo ou em suspensão (tipo 2 e 3) ppm = mg/kg</li> <li>6) Os resultados das análises realizadas pela técnica de Ativação Neutrônica apresentam erro na ordem de 10%</li> </ol> |
|--|



Tabela 5.1 - Teores de Elementos - Ribeirão Sarandí (Região 1). Coletas: 1999 e 2000

Amostra	Coleta	Região	Tipo	Ag ppm	Al ppm	As Ppm	Au ppm	Ba ppm	Cd ppm	Ce ppm	Cl ppm	Co ppm	Cr Ppm	Cs ppm	Cu ppm	Dy ppm	Fe ppm	Ga ppm
E1A-11/04/00	2	1	1	-	0,19±0,02	-	-	-	< 0,004	-	-	< 0,01	0,06±0,01	-	< 0,01	-	-	-
S1A-11/04/00	2	1	1	-	< 0,1	-	-	-	< 0,004	-	-	< 0,01	< 0,01	-	< 0,01	-	-	-
S2A-11/04/00	2	1	1	-	0,29±0,03	-	-	-	< 0,004	-	-	< 0,01	1,1±0,1	-	0,25±0,03	-	-	-
S3A-11/04/00	2	1	1	-	0,16±0,02	-	-	-	< 0,004	-	-	< 0,01	0,08±0,01	-	0,011±0,001	-	-	-
S4A-11/04/00	2	1	1	-	0,15±0,02	-	-	-	< 0,004	-	-	< 0,01	0,09±0,01	-	< 0,01	-	-	-
E1A-18/10/99	1	1	1	-	0,17±0,02	-	-	-	< 0,004	-	-	< 0,01	0,02±0,01	-	< 0,01	-	-	-
S1A-18/10/99	1	1	1	-	< 0,1	-	-	-	< 0,004	-	-	< 0,01	< 0,01	-	< 0,01	-	-	-
S2A-18/10/99	1	1	1	-	0,33±0,03	-	-	-	< 0,004	-	-	< 0,01	0,13±0,01	-	0,25±0,03	-	-	-
S3A-18/10/99	1	1	1	-	0,18±0,02	-	-	-	< 0,004	-	-	< 0,01	0,03±0,01	-	0,024±0,002	-	-	-
S4A-18/10/99	1	1	1	-	0,14±0,01	-	-	-	< 0,004	-	-	< 0,01	0,02±0,01	-	< 0,01	-	-	-
E1F-18/10/99	1	1	2	-	-	-	-	-	< 3,5	-	-	-	890±90	-	120±10	-	-	-
E1F-18/10/99 (moída)	1	1	2	< 5	32000	< 2	< 0,1	< 200	1,1±1	< 20	< 500	1600	490	< 1	56±6	-	22000	< 10
S1F-18/10/99	1	1	2	< 5	11000	10	< 0,1	240	< 1	170	< 500	1,2	< 5	< 1	59±6	-	320000	< 10
S4F-18/10/99	1	1	2	-	-	-	-	-	3±0,3	-	-	-	690±70	-	300±30	-	-	-
S4F-18/10/99 (moída)	1	1	2	< 5	18000	2,4	< 0,1	330	< 1	< 20	< 500	1200	640	< 1	88±9	-	28000	< 10
E1F-11/04/00	2	1	2	-	-	-	-	-	1,1±0,1	-	-	-	140±10	-	60±6	-	-	-
S1F-11/04/00	2	1	2	-	-	-	-	-	< 1	-	-	-	36±4	-	940±90	-	-	-
S2F-11/04/00	2	1	2	-	-	-	-	-	< 1	-	-	-	120±10	-	180±20	-	-	-
S2F-11/04/00 (moída)	2	1	2	-	-	-	-	-	< 1	-	-	-	250±30	-	30±3	-	-	-
S3F-11/04/00	2	1	2	-	-	-	-	-	< 1	-	-	-	180±20	-	94±9	-	-	-
S4F-11/04/00 (moída)	2	1	2	-	-	-	-	-	< 1	-	-	-	160±20	-	40±4	-	-	-
E1S-05/11/99	1	1	3	< 5	93000	2,9	0,13	310	< 3,5	< 20	< 500	5,3	250	2,6	92±9	-	33000	< 10
S1S-05/11/99	1	1	3	< 5	17000	< 2	< 0,1	370	1±0,1	100	< 500	1,6	6,4	< 1	2,5±0,3	-	300000	48
S2S-05/11/99	1	1	3	< 5	24000	< 2	< 0,1	340	8,2±0,8	< 20	530	8,5	380	2,3	54±5	-	48000	860
S3S-05/11/99	1	1	3	< 5	86000	< 2	0,1	390	6±0,6	< 20	530	6,4	380	2,2	75±8	-	36000	< 10
S4S-05/11/99	1	1	3	6	110000	2,8	0,13	210	3,2±0,3	< 20	< 500	6,4	300	3,1	64±6	-	31000	< 10
E1S-11/04/00	2	1	3	< 5	79000	10	0,51	510	3,0±3	52	640	11	1730	2,8	290±30	-	51000	< 10
S1S-11/04/00	2	1	3	< 5	41000	11	< 0,1	200	< 2	88	< 500	2,9	14	< 5	5±0,5	-	25000	63
S2S-11/04/00	2	1	3	< 5	84000	4,4	0,1	350	2,4±0,2	54	680	6,5	1150	2,1	43±4	-	49000	< 10
S3S-11/04/00	2	1	3	18	77000	9,1	0,11	420	3,8±0,4	69	710	9,6	2800	2,9	650	-	43000	38
S4S-11/04/00	2	1	3	14	84000	8,9	0,53	430	3,1±0,3	45	< 500	11	1870	3,1	290±30	-	50000	< 10

Tabela 5.1 - Teores de Elementos - Ribeirão Sarandí (Região 1). Coletas: 1999 e 2000 (continuação)

Amostra	Coleta	Região	Tipo	Hg ppm	I ppm	K ppm	La ppm	Mn ppm	Na ppm	Ni ppm	Pb ppm	Rb ppm	Sb ppm	Sc ppm	Sn ppm	Ta ppm	Ti ppm	V e V ppm	W ppm	Zn ppm
E1A-11/04/00	2	1	1	< 5E-5	-	-	-	0,29±0,03	-	-	< 0,04	-	-	-	< 0,2	-	< 0,1	< 0,04	-	0,23±0,02
S1A-11/04/00	2	1	1	< 5E-5	-	-	-	0,61±0,06	-	< 0,01	< 0,04	-	-	-	< 0,2	-	< 0,1	< 0,04	-	0,011±0,001
S2A-11/04/00	2	1	1	< 5E-5	-	-	-	0,27±0,03	-	0,14±0,01	< 0,04	-	-	-	< 0,2	-	< 0,1	< 0,04	-	1,6±0,2
S3A-11/04/00	2	1	1	< 5E-5	-	-	-	0,25±0,03	-	< 0,01	< 0,04	-	-	-	< 0,2	-	< 0,1	< 0,04	-	0,26±0,3
S4A-11/04/00	2	1	1	< 5E-5	-	-	-	0,28±0,03	-	< 0,01	< 0,04	-	-	-	< 0,2	-	< 0,1	< 0,04	-	0,28±0,3
E1A-18/10/99	1	1	1	< 0,5	-	-	-	0,23±0,02	-	0,012±0,001	< 0,02	-	-	-	< 0,4	-	< 0,1	< 0,04	-	0,2±0,02
S1A-18/10/99	1	1	1	< 0,5	-	-	-	0,61±0,06	-	< 0,01	0,02±0,01	-	-	-	< 0,4	-	< 0,1	< 0,04	-	0,010±0,001
S2A-18/10/99	1	1	1	< 0,5	-	-	-	0,34±0,03	-	0,054±0,005	0,032±0,01	-	-	-	< 0,4	-	< 0,1	< 0,04	-	2,4±0,2
S3A-18/10/99	1	1	1	< 0,5	-	-	-	0,25±0,03	-	0,024±0,002	0,022±0,002	-	-	-	< 0,4	-	< 0,1	< 0,04	-	0,76±0,08
S4A-18/10/99	1	1	1	< 0,5	-	-	-	0,22±0,02	-	0,012±0,001	0,023±0,002	-	-	-	< 0,4	-	< 0,1	< 0,04	-	0,26±0,03
E1F-18/10/99	1	1	2	AI	-	-	-	830±80	-	75±8	57±6	-	-	-	< 50	-	5100±500	45±7	-	2500±300
E1F-18/10/99 (moída)	1	1	2	-	< 5	7400	15	450	1800	44±7	21±2	<20	<1	2,7	< 50	250	1600	17	7800	860
S1F-18/10/99	1	1	2	0,03±0,01	7	910	18	250	200	7,7±1,1	< 25	<20	<1	1	< 50	<0,5	370±4	6	< 5	29
S4F-18/10/99	1	1	2	AI	-	-	-	1200±100	-	68±10	94±9	-	-	-	160±20	-	3800±400	30±3	-	2300±200
S4F-18/10/99 (moída)	1	1	2	-	< 5	8600	26	500	1400	31±7	28±3	<20	<1	2	< 50	200	4600	20	5700	270
E1F-11/04/00	2	1	2	AI	-	-	-	450±50	-	27±3	90±9	-	-	-	< 125	-	6900±700	41±4	-	510±50
S1F-11/04/00	2	1	2	AI	-	-	-	310±30	-	120±10	30±3	-	-	-	< 125	-	6900±700	34±3	-	490±50
S2F-11/04/00	2	1	2	AI	-	-	-	480±50	-	28±3	78±8	-	-	-	< 125	-	6500±700	38±4	-	890±90
S2F-11/04/00 (moída)	2	1	2	-	-	-	-	580±60	-	28±3	59±6	-	-	-	< 125	-	11000±1000	38±4	-	330±30
S3F-11/04/00	2	1	2	AI	-	-	-	450±50	-	42±4	71±7	-	-	-	< 125	-	5800±600	63±6	-	920±90
S4F-11/04/00 (moída)	2	1	2	-	-	-	-	250±30	-	17±2	29±3	-	-	-	< 125	-	4200±400	< 25	-	200±20
E1S-05/11/99	1	1	3	0,59±0,15	< 5	9700	39	290	2000	35±4	64±6	66	<1	4,8	< 50	0,7	2400	39	< 5	2200
S1S-05/11/99	1	1	3	< 0,03	130	< 500	19	890	440	6,7±1,0	< 25	68	<1	1,3	< 50	<0,5	500±50	< 5	< 5	18±2
S2S-05/11/99	1	1	3	0,76±0,14	< 5	9100	39	1500	590	34±5	150±20	59	3,9	4,2	< 50	<0,5	2400±200	13	< 5	4300
S3S-05/11/99	1	1	3	0,68±0,15	< 5	< 500	37	610	1500	32±5	100±10	51	2,3	4,2	< 50	<0,5	1300	21	< 5	3700
S4S-05/11/99	1	1	3	AI	< 5	10000	46	340	2500	31±5	59±6	79	1,2	5,5	< 50	0,6	2500	30	< 5	2700
E1S-11/04/00	2	1	3	0,77±0,02	< 5	< 500	38	510	1700	150±20	160±20	48	1,5	6,4	< 50	<0,5	2600	44	< 5	5600
S1S-11/04/00	2	1	3	0,18±0,02	120	< 500	51	740	680	11±1	19±2	<20	<1	2,9	< 50	<0,5	1400	16	< 5	29±3
S2S-11/04/00	2	1	3	0,82±0,12	< 5	< 500	35	980	2100	14±1	110±10	49	1,5	5,6	70±7	<0,5	2300	41	< 5	13000
S3S-11/04/00	2	1	3	0,53±0,03	< 5	6600	34	450	1400	170±20	210±20	37	2,2	5,1	58±6	<0,5	1700	42	< 5	6200
S4S-11/04/00	2	1	3	1,1±0,1	< 5	810	36	550	1500	140±10	160±20	42	1,9	6,3	< 50	<0,5	3200	46	< 5	5800

Tabela 5.2 - Teores de Elementos - Ribeirão Ressaca (Região 2). Coletas: 1999 e 2000

Amostra	Coleta	Região	Tipo	Ag ppm	Al ppm	As ppm	Au ppm	Ba ppm	Cd ppm	Ce ppm	Cl ppm	Co ppm	Cr ppm	Cs ppm	Cu ppm	Dy ppm	Fe ppm	Ga ppm
E2A-12/04/00	2	2	1	-	0,14±0,01	-	-	-	< 0,004	-	-	< 0,01	< 0,01	-	< 0,01	-	-	-
R1A-12/04/00	2	2	1	-	5,8±0,6	-	-	-	< 0,004	-	-	0,042±0,002	0,015±0,002	-	< 0,01	-	-	-
R2A-12/04/00	2	2	1	-	0,18±0,02	-	-	-	< 0,004	-	-	< 0,01	< 0,01	-	< 0,01	-	-	-
R3A-12/04/00	2	2	1	-	0,19±0,02	-	-	-	< 0,004	-	-	< 0,01	< 0,01	-	< 0,01	-	-	-
E2A-18/10/99	1	2	1	-	0,14±0,01	-	-	-	< 0,004	-	-	< 0,01	< 0,01	-	< 0,01	-	-	-
R1A-18/10/99	1	2	1	-	0,47±0,05	-	-	-	< 0,004	-	-	0,042±0,004	0,016±0,002	-	0,032±0,003	-	-	-
R2A-18/10/99	1	2	1	-	0,14±0,01	-	-	-	< 0,004	-	-	< 0,01	< 0,01	-	0,020±0,002	-	-	-
R3A-18/10/99	1	2	1	-	0,15±0,02	-	-	-	< 0,004	-	-	< 0,01	< 0,01	-	< 0,01	-	-	-
E2F-18/10/99	1	2	2	-	-	-	-	-	< 3,5	-	-	-	66±7	-	370±40	-	-	-
E2F-18/10/99 (moída)	1	2	2	< 5	52000	< 2	< 0,1	810	< 1	< 20	< 500	1100	23	< 1	150±20	-	< 20000	< 10
R1F-18/10/99	1	2	2	< 5	120000	< 2	< 0,1	590	< 3,5	< 20	650	8,5	40	1,2	34±3	-	37000	< 10
R1F-18/10/99 (moída)	1	2	2	< 5	30000	< 2	< 0,1	310	-	< 20	< 500	6,2	92	1,5	< 500	-	160000	< 10
R2F-18/10/99	1	2	2	-	-	-	-	-	< 3,5	-	-	-	66±7	-	810±80	-	-	-
R2F-18/10/99 (moída)	1	2	2	-	-	-	-	-	< 1	-	-	-	60±6	-	68±7	-	-	-
R3F-18/10/99	1	2	2	-	-	-	-	-	< 3,5	-	-	-	140±10	-	16000±2000	-	-	-
R3F-18/10/99 (moída)	1	2	2	< 5	39000	5,8	< 0,1	500	< 1	< 20	< 500	970	24	< 1	330±30	-	< 20000	< 10
E2F-12/04/00	2	2	2	-	-	-	-	-	1,1±0,1	-	-	-	70±7	-	1100±100	-	-	-
R1F-12/04/00	2	2	2	-	-	-	-	-	< 1	-	-	-	36±4	-	150±20	-	-	-
R2F-12/04/00	2	2	2	-	-	-	-	-	< 1	-	-	-	81±8	-	71±7	-	-	-
R2F-12/04/00 (moída)	2	2	2	-	-	-	-	-	< 1	-	-	-	81±8	-	30±3	-	-	-
R3F-12/04/00	2	2	2	-	-	-	-	-	1,2±0,1	-	-	-	90±9	-	4100±400	-	-	-
E2S-08/11/99	1	2	3	< 5	140000	< 2	< 0,1	340	< 3,5	< 20	< 500	9,7	35	2,7	34±3	-	40000	< 10
R1S-08/11/99	1	2	3	< 5	160000	2	< 0,1	430	< 3,5	< 20	500	9	26	2,7	15±2	-	35000	< 10
R2S-08/11/99	1	2	3	< 5	150000	31	< 0,1	430	< 3,5	70	< 500	8,9	27	2,7	23±2	-	34000	33
R3S-08/11/99	1	2	3	< 5	140000	6	< 0,1	360	1,9±0,2	120	< 500	8,8	44	1,9	37±4	-	39000	30
E2S-12/04/00	2	2	3	< 5	99000	13	0,13	510	< 2	29	1100	16	63	2,6	89±9	-	39000	25
R2S-12/04/00	2	2	3	< 5	98000	14	0,18	400	2,1±0,2	66	1300	15	45	2,6	110±10	-	41000	< 10
R3S-12/04/00	2	2	3	< 5	91000	14	0,27	330	< 2	84	1300	13	46	1,7	93±9	-	32000	< 10

Tabela 5.2 - Teores de Elementos - Ribeirão Ressaca (Região 2). Coletas: 1999 e 2000 (continuação)

Amostra	Coleta	Região	Tipo	Hg ppm	I ppm	K ppm	La ppm	Mn ppm	Na ppm	Ni ppm	Pb ppm	Rb ppm	Sb ppm	Sc ppm	Sn ppm	Ta ppm	Ti ppm	V e V ppm	W ppm	Zn ppm
E2A-12/04/00	2	2	1	< 5E-5	-	-	-	0,23±0,02	-	< 0,01	< 0,04	-	-	-	< 0,2	-	< 0,1	< 0,04	-	< 0,01
R1A-12/04/00	2	2	1	< 5E-5	-	-	-	0,25±0,03	-	0,052±0,005	< 0,04	-	-	-	< 0,2	-	< 0,1	< 0,04	-	0,041±0,004
R2A-12/04/00	2	2	1	< 5E-5	-	-	-	0,19±0,02	-	< 0,01	< 0,04	-	-	-	< 0,2	-	< 0,1	< 0,04	-	0,019±0,002
R3A-12/04/00	2	2	1	< 5E-5	-	-	-	0,22±0,02	-	< 0,01	< 0,04	-	-	-	< 0,2	-	< 0,1	< 0,04	-	0,017±0,002
E2A-18/10/99	1	2	1	< 5E-4	-	-	-	0,21±0,02	-	< 0,01	< 0,02	-	-	-	< 0,4	-	< 0,1	< 0,04	-	0,025±0,003
R1A-18/10/99	1	2	1	< 5E-4	-	-	-	0,59±0,06	-	0,056±0,006	0,049±0,005	-	-	-	< 0,4	-	< 0,1	< 0,04	-	0,064±0,006
R2A-18/10/99	1	2	1	< 5E-4	-	-	-	0,15±0,02	-	< 0,01	0,025±0,003	-	-	-	< 0,4	-	< 0,1	< 0,04	-	0,018±0,002
R3A-18/10/99	1	2	1	< 5E-4	-	-	-	0,18±0,02	-	< 0,01	0,026±0,003	-	-	-	< 0,4	-	< 0,1	< 0,04	-	0,054±0,006
E2F-18/10/99	1	2	2	AI	-	-	-	370±40	-	45±5	50±5	-	-	-	< 50	-	4800±500	42±6	-	170±20
E2F-18/10/99 (moída)	1	2	2	-	< 5	28000	17	120	8500	23±2	34±3	71	< 1	2,3	< 50	190	1100	21	5400	58±6
R1F-18/10/99	1	2	2	0,04	< 5	1600	45	310	4000	28±3	34±3	76	< 1	8,3	< 50	0,5	5000	50	100	69
R1F-18/10/99 (moída)	1	2	2	-	< 5	13000	320	1300	3400	-	-	< 20	< 1	4,5	-	1,1	23000	69	25	71
R2F-18/10/99	1	2	2	AI	-	-	-	700±70	-	38±4	67±7	-	-	-	100±10	-	8600±900	51±8	-	200±20
R2F-18/10/99 (moída)	1	2	2	-	-	-	-	1300±100	-	21±3	100±10	-	-	-	< 50	-	21000±2000	72±10	-	88±9
R3F-18/10/99	1	2	2	AI	-	-	-	700±70	-	60±6	100±10	-	-	-	430±40	-	8700±900	65±10	-	7100±700
R3F-18/10/99 (moída)	1	2	2	-	< 5	18000	15	140	4600	22±3	32±3	48	< 1	2	< 50	150	1800	20	4400	210
E2F-12/04/00	2	2	2	-	-	-	-	560±60	-	22±2	47±5	-	-	-	< 125	-	8400±800	56±6	-	260±30
R1F-12/04/00	2	2	2	AI	-	-	-	220±20	-	20±2	36±4	-	-	-	< 125	-	7300±700	46±5	-	140±10
R2F-12/04/00	2	2	2	AI	-	-	-	710±70	-	29±3	55±6	-	-	-	< 125	-	12000±1000	70±7	-	150±20
R2F-12/04/00 (moída)	2	2	2	-	-	-	-	680±70	-	26±3	50±5	-	-	-	< 125	-	14000±1000	60±6	-	100±10
R3F-12/04/00	2	2	2	AI	-	-	-	710±70	-	35±4	60±6	-	-	-	< 125	-	11000±1000	60±6	-	1800±200
E2S-08/11/99	1	2	3	0,25±0,03	< 5	15000	54	350	1000	28±3	54±5	84	< 1	9,4	< 50	0,5	4500	55	< 5	220
R1S-08/11/99	1	2	3	0,59±0,03	< 5	12000	60	190	1000	24±2	37±4	93	< 1	8,3	< 50	< 0,5	3800	44	12	84
R2S-08/11/99	1	2	3	0,10±0,03	< 5	14000	51	170	1200	28±3	45±5	78	< 1	8,3	< 50	0,5	4200	65	< 5	140
R3S-08/11/99	1	2	3	0,19±0,03	< 5	13000	52	350	1300	30±5	50±5	75	< 1	9	< 50	< 0,5	3800	75	< 5	220
E2S-12/04/00	2	2	3	0,87±0,02	< 5	9800	49	410	2900	43±4	68±7	55	1,8	9,6	< 50	0,6	4100	82	< 5	390
R2S-12/04/00	2	2	3	1,3±0,3	< 5	< 500	50	330	2700	34±3	75±8	43	1,4	9,4	< 50	< 0,5	3500	7	< 5	320
R3S-12/04/00	2	2	3	1,1±0,1	< 5	< 500	50	290	3100	43±4	81±8	53	< 1	7,1	< 50	< 0,5	2700	54	< 5	450

Tabela 5.3 - Teores de Elementos - Represa da Pampulha (Região 3) e Ribeirão Mergulhão (Região 6). Coletas: 1998, 1999, 2000 e 2001

Amostra	Coleta	Região	Tipo	Ag ppm	Al ppm	As ppm	Au ppm	Ba ppm	Cd ppm	Ce ppm	Cl ppm	Co ppm	Cr ppm	Cs ppm	Cu ppm	Dy ppm	Fe ppm	Ga ppm
E3A-12/04/00	2	6	1	-	< 0,1	-	-	-	< 0,004	-	-	< 0,01	< 0,01	-	< 0,01	-	-	-
E3A-19/10/99	1	6	1	-	0,31±0,03	-	-	-	< 0,004	-	-	< 0,01	< 0,01	-	< 0,01	-	-	-
L6-21/09/99	1	3	2	< 5	22000	14	< 0,1	< 200	< 2,5	110	< 500	9,5	52	2,8	100±10	-	45000	46
L7-21/09/99	1	3	2	< 5	170000	< 2	< 0,1	< 200	< 2,5	140	< 500	10	80	2,8	130±10	-	43000	41
ASFPI 1-16/10/98	1	3	2	-	170000±30000	-	-	-	< 4	-	-	< 200	55±6	-	25±3	-	-	-
ASFPI 2-16/10/98	1	3	2	-	100000±10000	-	-	-	< 4	-	-	< 200	40±4	-	14±2	-	-	-
ASFPI 3-16/10/98	1	3	2	-	45000±7000	-	-	-	< 4	-	-	< 200	25±3	-	6,0±0,6	-	-	-
ASFPI 4-16/10/98	1	3	2	-	160000±20000	-	-	-	< 4	-	-	< 200	54±5	-	21±2	-	-	-
ASFPI 1A-16/10/98	1	3	2	-	170000±30000	-	-	-	< 4	-	-	< 200	60±6	-	25±3	-	-	-
L 1-13/11/98	1	3	2	-	150000±20000	-	-	-	< 4	-	-	< 200	160±20	-	55±6	-	-	-
L 2-13/11/98	1	3	2	-	160000±20000	-	-	-	< 4	-	-	< 200	110±10	-	45±5	-	-	-
L 3-13/11/98	1	3	2	-	160000±20000	-	-	-	< 4	-	-	< 200	53±5	-	25±3	-	-	-
L 4-13/11/98	1	3	2	-	150000±20000	-	-	-	< 4	-	-	< 200	58±6	-	27±3	-	-	-
L 5-13/11/98	1	3	2	-	180000±30000	-	-	-	< 4	-	-	< 200	78±8	-	31±3	-	-	-
L1-19/12/01	1	3	2	-	173000	-	-	410	-	-	-	9	87	2,8	290±30	6,1	45000	50
L2-19/12/01	1	3	2	-	141000	-	-	380	-	-	-	9	180	4,2	280±30	4,2	46000	41
L3-19/12/01	1	3	2	-	139000	-	-	440	-	-	-	7	98	3,8	280±30	3,5	49000	38
L4-19/12/01	1	3	2	-	147000	-	-	440	-	-	-	7	110	4,4	260±30	5,3	48000	43
L5-19/12/01	1	3	2	-	148000	-	-	440	-	-	-	8	110	4,2	300±30	4,5	51000	46
L6-19/12/01	1	3	2	-	148000	-	-	380	-	-	-	8	100	4	320±30	4,9	51000	47
L7-19/12/01	1	3	2	-	147000	-	-	390	-	-	-	8	100	4,7	360±50	5,4	51000	45

Tabela 5.3 - Teores de Elementos - Represa da Pampulha (Região 3) e Ribeirão Mergulhão (Região 6). Coletas: 1998, 1999, 2000 e 2001 (cont.)

Amostra	Coleta	Região	Tipo	Hg ppm	I ppm	K ppm	La ppm	Mn ppm	Na ppm	Ni ppm	Pb ppm	Rb ppm	Sb ppm	Sc ppm	Sn ppm	Ta ppm	Ti ppm	V e V ppm	W ppm	Zn ppm
E3A-12/04/00	2	6	1	< 5E-5	-	-	-	0,16±0,02	-	< 0,01	< 0,04	-	-	-	< 0,2	-	< 0,1	< 0,04	-	< 0,01
E3A-19/10/99	1	6	1	< 0,5	-	-	-	0,059±0,006	-	< 0,01	< 0,02	-	-	-	< 0,4	-	< 0,1	< 0,04	-	0,011±0,001
L6-21/09/99	1	3	2	0,12±0,01	< 5	6300	66	74	550	56±8	50±5	38	<1	12	< 50	0,8	800	11	< 5	260
L7-21/09/99	1	3	2	0,22±0,01	< 5	59000	89	280	410	52±8	51±5	48	<1	11,3	< 50	0,5	4500	81	< 5	260
ASFPI 1-16/10/98	1	3	2	0,062±0,006	-	-	-	220±20	-	< 100	53±10	-	-	-	< 200	-	5600±800	68±7	-	130±10
ASFPI 2-16/10/98	1	3	2	0,048±0,005	-	-	-	180±20	-	< 100	37±7	-	-	-	< 200	-	4200±600	43±4	-	60±6
ASFPI 3-16/10/98	1	3	2	0,027±0,007	-	-	-	130±10	-	< 100	28±6	-	-	-	< 200	-	2400±400	< 30	-	30±3
ASFPI 4-16/10/98	1	3	2	0,062±0,006	-	-	-	200±20	-	< 100	49±10	-	-	-	< 200	-	5500±800	71±7	-	100±10
ASFPI 1A-16/10/98	1	3	2	0,076±0,008	-	-	-	220±20	-	< 100	51±10	-	-	-	< 200	-	5700±900	66±7	-	130±13
L 1-13/11/98	1	3	2	0,23±0,02	-	-	-	340±30	-	< 100	66±10	-	-	-	< 200	-	5100±800	82±8	-	490±50
L 2-13/11/98	1	3	2	0,17±0,02	-	-	-	300±30	-	< 100	65±10	-	-	-	< 200	-	5100±800	89±9	-	330±30
L 3-13/11/98	1	3	2	0,080±0,008	-	-	-	240±20	-	< 100	57±10	-	-	-	< 200	-	4800±700	65±7	-	150±20
L 4-13/11/98	1	3	2	0,10±0,01	-	-	-	220±20	-	< 100	57±10	-	-	-	< 200	-	4900±700	72±7	-	180±20
L 5-13/11/98	1	3	2	0,076±0,008	-	-	-	160±20	-	< 100	57±10	-	-	-	< 200	-	6200±900	94±9	-	200±20
L1-19/12/01	1	3	2	< 0,005	-	13000	63	380	980	-	-	90	-	11	-	0,9	4500	58	-	340±30
L2-19/12/01	1	3	2	< 0,005	-	12400	64	290	510	-	-	88	-	10	-	1	3200	65	-	750±80
L3-19/12/01	1	3	2	< 0,005	-	13000	63	320	1300	-	-	88	-	11	-	0,7	4000	66	-	290±30
L4-19/12/01	1	3	2	< 0,005	-	14000	66	270	1100	-	-	110	-	12	-	0,8	3600	61	-	300±30
L5-19/12/01	1	3	2	< 0,005	-	10000	79	300	640	-	-	88	-	11	-	0,9	3700	77	-	350±40
L6-19/12/01	1	3	2	< 0,005	-	8300	86	280	520	-	-	70	-	11	-	1	3600	68	-	310±30
L7-19/12/01	1	3	2	< 0,005	-	7400	81	330	510	-	-	70	-	11	-	1	3700	76	-	350±40

Tabela 5.4 - Teores de Elementos - Ribeirões Pampulha e Onça (Região 4) e Rio das Velhas (Região 5). Coletas: 1999 e 2000

Amostra	Coleta	Região	Tipo	Ag ppm	Al ppm	As ppm	Au ppm	Ba ppm	Cd ppm	Ce ppm	Cl ppm	Co ppm	Cr Ppm	Cs ppm	Cu ppm	Dy ppm	Fe ppm	Ga ppm
E4A-13/04/00	2	4	1	-	< 0,1	-	-	-	< 0,004	-	-	< 0,01	< 0,01	-	< 0,01	-	-	-
E5A-13/04/00	2	4	1	-	< 0,1	-	-	-	< 0,004	-	-	< 0,01	< 0,01	-	< 0,01	-	-	-
E6A-14/04/00	2	4	1	-	< 0,1	-	-	-	< 0,004	-	-	< 0,01	< 0,01	-	< 0,01	-	-	-
E7A-14/04/00	2	5	1	-	< 0,1	-	-	-	< 0,004	-	-	< 0,01	< 0,01	-	< 0,01	-	-	-
E4A-19/10/99	1	4	1	-	< 0,1	-	-	-	< 0,004	-	-	< 0,01	< 0,01	-	< 0,01	-	-	-
E5A-19/10/99	1	4	1	-	0,17±0,02	-	-	-	< 0,004	-	-	< 0,01	< 0,01	-	< 0,01	-	-	-
E6A-19/10/99	1	4	1	-	0,69±0,07	-	-	-	< 0,004	-	-	< 0,01	< 0,01	-	< 0,01	-	-	-
E7A-19/10/99	1	5	1	-	0,46±0,05	-	-	-	< 0,004	-	-	< 0,01	< 0,01	-	< 0,01	-	-	-
E4F-13/04/00	2	4	2	-	-	-	-	-	< 1	-	-	-	48±5	-	590±60	-	-	-
E6F-14/04/00	2	4	2	-	-	-	-	-	3,2±0,3	-	-	-	110±10	-	8000±800	-	-	-
E6F-14/04/00 (moída)	2	4	2	-	-	-	-	-	1,1±0,1	-	-	-	48±5	-	190±20	-	-	-
E4F-19/10/99	1	4	2	< 5	110000	2,2	0,15	640	< 2,5	80	< 500	8	65	1,5	45±5	-	30000	20
E6F-19/10/99	1	4	2	< 5	76000	5,6	< 0,1	500	4,5±0,5	83	< 500	11	110	< 5	48000	-	35000	< 10
E6F-19/10/99 (moída)	1	4	2	< 5	26000	< 2	< 0,1	< 200	< 2,5	86	< 500	3400	55	< 5	860	-	31000	< 10
E4S-04/11/99	1	4	3	-	-	-	-	-	< 3,5	-	-	-	60±6	-	160±20	-	-	-
E5S-04/11/99	1	4	3	12	62000	< 2	0,47	360	< 3,5	< 20	560	5,8	42	1,5	160±20	-	22000	< 10
E6S-04/11/99	1	4	3	< 5	73000	10	0,41	390	< 3,5	< 20	850	8,7	65	1,7	140±10	-	34000	16
E4S-13/04/00	2	4	3	AI	95000	18	0,21	< 200	< 2	69	< 500	AI	70±7	AI	100±10	-	AI	26
E5S-13/04/00	2	4	3	< 5	59000	98	0,38	380	2,1±2	57	1100	6,9	49	1,2	200±20	-	26000	10
E6S-14/04/00	2	4	3	< 5	140000	6,1	< 0,1	680	< 2	150	< 500	15	67	4,4	41±4	-	52000	36
E7F-14/04/00	2	5	2	-	-	-	-	-	< 1	-	-	-	160±20	-	590±60	-	-	-
E7F-19/10/99	1	5	2	< 5	64000	63	< 0,1	260	< 2,5	67	< 500	14	180	3,7	110±10	-	75000	< 10
E7S-04/11/99	1	5	3	-	-	-	-	-	< 3,5	-	-	-	370±40	-	120±10	-	-	-
E7S-14/04/00	2	5	3	< 5	87000	65	< 0,1	750	< 2	130	< 500	34	320	4,8	55±6	-	120000	12

Tabela 5.4 - Teores de Elementos - Ribeirões Pampulha e Onça (Região 4) e Rio das Velhas (Região 5). Coletas: 1999 e 2000 (continuação)

Amostra	Coleta	Região	Tipo	Hg ppm	I ppm	K ppm	La ppm	Mn ppm	Na ppm	Ni ppm	Pb ppm	Rb ppm	Sb ppm	Sc ppm	Sn Ppm	Ta ppm	Ti ppm	V e V ppm	W ppm	Zn ppm
E4A-13/04/00	2	4	1	< 5E-5	-	-	-	0,017±0,002	-	< 0,01	< 0,04	-	-	-	< 0,2	-	< 0,1	< 0,04	-	< 0,01
E5A-13/04/00	2	4	1	< 5E-5	-	-	-	0,10±0,01	-	< 0,01	< 0,04	-	-	-	< 0,2	-	< 0,1	< 0,04	-	0,019±0,002
E6A-14/04/00	2	4	1	< 5E-5	-	-	-	0,028±0,003	-	< 0,01	< 0,04	-	-	-	< 0,2	-	< 0,1	< 0,04	-	< 0,01
E7A-14/04/00	2	5	1	< 5E-5	-	-	-	0,37±0,04	-	< 0,01	< 0,04	-	-	-	< 0,2	-	< 0,1	< 0,04	-	< 0,01
E4A-19/10/99	1	4	1	< 0,5	-	-	-	0,023±0,002	-	< 0,01	< 0,02	-	-	-	< 0,4	-	< 0,1	< 0,04	-	< 0,01
E5A-19/10/99	1	4	1	< 0,5	-	-	-	0,087±0,009	-	< 0,01	< 0,02	-	-	-	< 0,4	-	< 0,1	< 0,04	-	< 0,01
E6A-19/10/99	1	4	1	< 0,5	-	-	-	0,092±0,009	-	< 0,01	< 0,02	-	-	-	< 0,4	-	< 0,1	< 0,04	-	< 0,01
E7A-19/10/99	1	5	1	< 0,5	-	-	-	0,067±0,007	-	< 0,01	< 0,02	-	-	-	< 0,4	-	< 0,1	< 0,04	-	< 0,01
E4F-13/04/00	2	4	2	AI	-	-	-	160±20	-	25±3	44±4	-	-	-	< 125	-	5200±500	38±4	-	420±40
E6F-14/04/00	2	4	2	AI	-	-	-	300±30	-	37±4	55±6	-	-	-	< 125	-	4200±400	47±5	-	3700±400
E6F-14/04/00 (moída)	2	4	2	-	-	-	-	1100±100	-	22±2	61±6	-	-	-	< 125	-	19000±2000	65±7	-	180±20
E4F-19/10/99	1	4	2	0,34±0,01	< 5	20000	46	280	3800	41±6	48±5	65	< 1	9	< 50	< 0,5	4500	54	25	160
E6F-19/10/99	1	4	2	< 0,03	< 5	230000	68	290	6100	130±19	74±7	61	< 1	7,3	560±60	< 0,5	3700	51±5	43	23000
E6F-19/10/99 (moída)	1	4	2	-	< 5	13400	97	380	3100	61±9	38±4	< 20	< 1	3,2	62±6	490	5800	30	13000	580
E4S-04/11/99	1	4	3	AI	-	-	-	1500±200	-	53±5	53±5	-	-	-	< 50	-	2300±200	30±5	-	780±80
E5S-04/11/99	1	4	3	2,7±0,3	< 5	7200	31	340	2400	34±3	110±10	42	2,1	4,5	< 50	43	3300	19	< 5	530
E6S-04/11/99	1	4	3	-	< 5	7900	54	350	2300	51±5	75±8	42	1,5	< 1	< 50	0,5	2700	42	< 5	580
E4S-13/04/00	2	4	3	AI	39	7700	43	1500	1500	53±5	87±9	AI	AI	AI	< 50	AI	3700±400	44	< 5	720±70
E5S-13/04/00	2	4	3	1,1±0,1	< 5	6700	37	290	2200	36±4	120±10	37	2,1	4,7	58±6	< 0,5	2500	28	< 5	760
E6S-14/04/00	2	4	3	0,31±0,03	< 5	15000	110	310	2000	38±4	70±7	100	< 1	14	< 50	1	3900	70	< 5	250
E7F-14/04/00	2	5	2	AI	-	-	-	930±90	-	51±5	39±4	-	-	-	< 125	-	4000±400	58±6	-	420±40
E7F-19/10/99	1	5	2	0,13±0,01	< 5	13000	30	710	1800	100±15	34±3	22	3,3	12	< 50	0,7	5400	91	14	260
E7S-04/11/99	1	5	3	AI	-	-	-	3400±300	-	110±10	66±7	-	-	-	< 50	-	4200±400	110±15	-	650±70
E7S-14/04/00	2	5	3	0,28±0,03	< 5	4900	< 15	3000	640	100±10	47±5	73	5,8	26	< 50	1	2500	980	< 5	200



## **5.4 Análise e discussão dos resultados**

O estudo dos teores de metais nos sedimentos e na água, abrangendo toda a bacia hidrográfica, em uma abordagem sistêmica, é uma contribuição inicial no sentido de se estudar o papel destes poluentes no meio ambiente e, em especial, o seu papel como poluente do sedimento fino a ser dragado da Represa da Pampulha.

Como se observa nas tabelas 5.1 a 5.4, temos um total de 105 amostras analisadas, correspondendo a 14 estações de coleta nos cursos d'água e mais 11 no interior da Represa da Pampulha. Estas amostras foram colhidas em 2 campanhas: período de seca e período de chuva, e correspondem a três tipos de ambientes: água, sedimento de fundo e sedimento em suspensão, como já detalhado no Item 5.2. Nas amostras de sedimentos, considerando em conjunto os dois procedimentos de análise: EAA e AAN foram determinados os teores de até 32 elementos por amostra. É uma grande quantidade de informação para se tentar analisar e tirar conclusões objetivas e úteis, através de técnicas de análise univariada. Nestas, estuda-se a variação de uma grandeza em relação à outra. Por exemplo: o estabelecimento de uma curva chave em uma estação linimétrica.

A análise multivariada se presta melhor a este tipo de dados pertencentes a um mesmo corpo: a bacia hidrográfica. Portanto, é de se esperar alguma relação entre os mesmos, de modo semelhante ao obtido em AUSILI *et al.* (1998), que trata de sedimentos poluídos no porto de Livorno, Itália, considerado um corpo ou uma unidade a receber influências múltiplas do ambiente; no estabelecimento de critérios de qualidade para solos (CETESB, 2001); na avaliação das propriedades de solos (SENA *et al.* 2000); como é comum, em estudos de Quimiometria (MENEZES, 2002) e também em estudos hidrológicos relativos à estrutura da evapotranspiração (ANDRADE *et al.* 2003).

### **5.4.1 Análise multivariada**

#### **5.4.1.1 Introdução**

Métodos de estatística multivariada, já foram desenvolvidos e adaptados a vários campos da ciência, como: Biologia, Economia, Medicina, Arqueologia, Psicologia e também em Quimiometria. Assim, para estudos quimiométricos em galvanoplastias (MENEZES, 2002),

como se possuem diversas informações, no caso: as variáveis (teores de metais na unha, cabelo, sangue, urina, etc.) constituindo as observações sobre um mesmo indivíduo (o trabalhador de uma galvanoplastia) e outros aspectos da situação do indivíduo (classes: tipo de atividade na galvanoplastia, tempo na atividade, fumante ou não fumante, coleta de amostras de urina na sexta-feira ou na segunda-feira, etc.), podendo influir na distribuição dos teores de metais nas diversas matrizes do mesmo (unha, cabelo, urina, etc.), é natural que exista uma dependência entre todos estes parâmetros. Trata-se, portanto, de uma observação multidimensional. O tratamento deste tipo de dados, para sua melhor interpretação, requer o uso de técnicas multivariadas.

De modo análogo, foi aplicado este tipo de análise para o estudo da distribuição de metais para "*o indivíduo: Bacia Hidrográfica da Pampulha*", nas suas várias matrizes (água, sedimento de fundo, sedimento em suspensão), em duas coletas distintas (final de época de seca e de chuva), nas diversas regiões de "*seu corpo*" (Região 1: Ribeirão Ressaca; Região 2: Ribeirão Sarandí; Região 3: Represa da Pampulha; Região 4: trecho a jusante da represa - ribeirões Pampulha e Onça; Região 5: Rio das Velhas logo a montante da desembocadura do Ribeirão da Onça; Região 6: Ribeirão Mergulhão).

Assim, os métodos multivariados constituem-se em modelos estatísticos que consideram a correlação entre muitas variáveis analisadas ao mesmo tempo. Entre os diversos métodos, o mais comum é a Análise de Componentes Principais (ACP), que é um método descritivo e exploratório, adequado quando se deseja explorar, interpretar e reduzir os dados, gerar hipóteses a partir dos dados coletados e testar essas hipóteses. Ele é um método exploratório, como mencionado em SENA *et al.* (2000), pois... "*ajuda na elaboração de hipóteses gerais a partir dos dados coletados, contrastando com estudos direcionados nos quais hipóteses prévias são testadas. Ela é capaz de separar a informação importante da redundante*". Objetiva-se, principalmente, a redução de dados sem perda de informação, a partir de combinações lineares das variáveis originais. Dessa forma, descreve-se a maioria das variações e correlações das variáveis originais através de um pequeno número de variáveis derivadas ou componentes principais. A dimensão do espaço de medidas é, assim, reduzida. Muitas vezes, esta redução simplifica a interpretação dos dados experimentais e permite a extração de relevantes informações.

Na técnica da ACP, um conjunto de dados de  $n$  informações sobre  $x$  variáveis é substituído por  $n$  observações sobre  $k$  combinações lineares das variáveis, sendo  $k < x$ . Estas  $k$  combinações lineares são denominadas componentes principais e devem conter tanta informação quanto a representação original. Para tanto, as novas variáveis - componentes principais (CPs) - que passam a ser analisadas, são aquelas de maior variância, sendo capazes de explicar uma parte significativa da variância total contida nos dados. O primeiro componente principal CP1 é a combinação linear de todas as variáveis orientadas na direção de máxima variação dos dados. O segundo (CP2), representa a direção da máxima variação restante, com a restrição de que tem que ser perpendicular ao primeiro componente principal. Os CPs subsequentes descrevem, progressiva e decrescentemente, as variações remanescentes dos dados, mantendo a restrição de serem perpendiculares ao primeiro componente principal. Com este arranjo, desprezando-se os componentes principais de menor importância, o método permite representar os dados usando os componentes principais mais significativos. Por ser um método de análise exploratório e poder ser representado em uma forma vetorial, a ACP permite uma rotação de vetores no espaço quando se deseja realçar alguma característica ou mesmo interpretar algum fator (MENEZES, 2002).

Juntamente com a ACP, aplicou-se, no presente estudo, a ANOVA (sigla de *Analysis of Variance - Model*) que analisa as variâncias de mais de dois grupos. A aplicação desses dois procedimentos foi suficiente para alcançar os objetivos propostos no Item 5.1. Esses métodos estão incorporados ao Programa Computacional SYSTAT® (1997), o qual foi empregado para os estudos de análise multivariada, utilizando-se os dados dos teores de elementos obtidos na água, sedimento de fundo e sedimento em suspensão, mostrados nas tabelas 5.1 a 5.4.

Um aspecto importante a ser considerado na aplicação de métodos de análise de variâncias: ANOVA e outros, é que se deve estabelecer um limite para o valor da probabilidade  $p$  para a aceitação de uma determinada hipótese (e.g.  $p = 5\%$  no presente trabalho). Assim, sendo a hipótese  $H_0: \mu_A = \mu_B$ , deseja-se saber se a média de um grupo A é igual à média do grupo B, ao se aplicar o teste de variância. Se  $p < 5\%$ , isto implica na rejeição da hipótese formulada, ou seja:  $\mu_A \neq \mu_B$ , resultando na diferença dos grupos. Dessa forma, quanto menor o valor de  $p$ , menor a probabilidade de se aceitar a hipótese  $H_0$ . Com essa ferramenta, de grande utilidade, podem-se estudar as semelhanças ou diferenças entre os grupos ou matrizes formados com os resultados dos teores de metais.

No caso do estudo da distribuição dos teores de metais na Bacia Hidrográfica da Pampulha, os dados foram dispostos em forma das tabelas 5.1 a 5.4, em que as  $n$  linhas são as amostras de água e sedimentos e as  $x$  colunas são as variáveis, no caso: a época de coleta (seca = 1; chuva = 2); a região de coleta (1 a 6); o tipo de amostra (água = 1; sedimento de fundo = 2; sedimento em suspensão = 3) e os teores de elementos (até 32 por amostra). Para a análise multivariada, a tabela passa a ser analisada como uma matriz, ou seja: sendo uma matriz, podem ser aplicadas transformações e combinações das variáveis para reduzir distorções, para normalizar as distribuições dos dados ou realçar os objetivos de caracterização, conforme GEORGESCU *et al.* (1994) citado em MENEZES (2002).

Para a análise de resultados, a fim de poder aplicar o Programa SYSTAT® (1997), as estações de cada região tiveram que ser codificadas por números. Assim, o primeiro dígito de cada amostra indica a sua região de origem e o segundo dígito indica a sua posição (e.g. S1, que é a primeira estação da Região 1 - Ribeirão Sarandí - foi codificada como Estação 11; R3, que é a terceira estação da Região 2 - Ribeirão Ressaca - tomou o número 23; E5, que é a segunda estação da região 4 - ribeirões Pampulha e Onça - ficou denominada como Estação 42). Para a Represa da Pampulha (Região 3), as estações L1 a L7 foram denominadas como 31 a 37. As estações correspondentes aos perfis de amostragem na região de botafora interna à represa (Figura 5.1) tiveram a seguinte correspondência numérica: ASPI4 = 381; ASPI3 = 382; ASPI2 = 383 e ASPI1 = 385. A Tabela 5.5 mostra a equivalência das duas nomenclaturas.

Tabela 5.5 - Equivalência de nomenclaturas de amostras nas várias regiões

Região 1: Ribeirão Sarandí		Região 3: Rep. Pampulha		Região 4: Ribeirões. Pampulha e Onça	
Alfanumérica	Numérica	Alfanumérica	Numérica	Alfanumérica	Numérica
S1	11	ASPI4	381	E4	41
S2	12	ASPI3	382	E5	42
S3	13	ASPI2	383	E6	43
S4	14	ASPI1	385	Região 5: Rio das Velhas	
E1	15	L1	31	Alfanumérica	Numérica
Região 2: Ribeirão Ressaca		L2	32	E7	51
Alfanumérica	Numérica	L3	33	Região 6: Rib. Mergulhão	
R1	21	L4	34	Alfanumérica	Numérica
R2	22	L5	35	E3	61
R3	23	L6	36		
E2	24	L7	37		

#### 5.4.1.2 Considerações preliminares sobre os dados e a respeito da metodologia de sua utilização ambiental

Avaliaram-se, em primeiro lugar, a distribuição global dos metais nas três matrizes (água, sedimento de fundo e sedimento em suspensão) e seus teores na bacia hidrográfica como um todo: aqueles predominantes por regiões e a variação média de seus teores por tipo de amostra e época de coleta. Estes estudos, efetuados com a aplicação da ANOVA aos dados de metais (tabelas 5.1 a 5.4), indicaram que a melhor forma de tratá-los era por tipo de amostra.

O estudo abrangeu toda a bacia hidrográfica, mas foi mais detalhado na região a montante da Represa da Pampulha, de onde provém os metais a contaminar os sedimentos finos que nela se depositam, e que necessitam ser dragados. Foi por isto que este autor, antes do início da atuação do CDTN na determinação de metais na água e nos sedimentos da Bacia Hidrográfica da Pampulha, no âmbito do Programa de Monitoramento Hidrossedimentométrico, em que varias instituições participaram (ABRH *et al.* 1996), optou por estender as estações de coleta até às cabeceiras dos ribeirões Sarandí (estações S1 a S4) e Ressaca (estações R1 a R3), antes restritas às estações E1, no Ribeirão Sarandí e E2, na Ribeirão Ressaca (Figura 1.6).

Para este estudo, na região a montante da represa, foram determinadas as regiões topográficas da bacia hidrográfica delimitadas pelas estações de coleta de metais, nas margens direita e esquerda dos ribeirões Sarandí e Ressaca (Figura 5.41 - Item 5.4.2). Se esta fosse uma bacia hidrográfica puramente rural, as regiões assim delimitadas seriam suficientes para se estudar a contribuição espacial à variação dos teores de metais na água e nos sedimentos, determinados nas sucessivas estações. Entretanto, sendo uma bacia urbana, com ocupação bastante densa e a presença de várias atividades industriais, faz-se necessária a consideração de um cadastro atualizado dessas fontes (SUDECAP, 2000), assim como considerar-se também a sobreposição à topografia, da rede de drenagem pluvial e a de esgotamento sanitário, também atualizadas, para uma identificação precisa e avaliação completa das regiões fonte, devido à ação antrópica, de determinados metais, presentes na água e nos sedimentos.

A informação atualizada das redes de drenagem pluvial e de esgotamento sanitário exige um acompanhamento cuidadoso pelos órgãos responsáveis pela sua operação, as municipalidades e empresas concessionárias, como a COPASA-MG, não só por acréscimos de informações de projetos executados, como por inspeções de campo para se verificar a real configuração das

obras (*as built*). O ambiente urbano, analogamente a um ser vivo, muda constantemente, e precisa ser monitorado como este, através de exames periódicos, para se evitar e/ou remediar problemas de saúde urbana.

No Capítulo 9 de SUDECAP (2000): *'Poluição dos Meios Receptores'*, é feita uma análise criteriosa dos elementos que envolvem a poluição dos sistemas hídricos das bacias dos ribeirões Arrudas e Onça, em Belo Horizonte e Contagem, porém sem o refinamento da localização de ocorrências em sub-regiões, como as estações e os resultados aqui apresentados possibilitam. Seria interessante uma abordagem, nesse sentido, em futuros trabalhos de monitoramento. Nestes, as estações de monitoramento poderão até ser mais estrategicamente posicionadas do que as aqui operadas (no presente trabalho o critério de posicionamento das estações foi a divisão espacial equitativa do percurso dos ribeirões Sarandí e Ressaca, a partir dos aterros sanitários em operação, e aspectos de acesso para monitoramento), tendo em conta as fontes pontuais de poluição industrial e a poluição resultante do desenvolvimento urbano, a qual está relacionada com as seguintes fontes (SUDECAP, 2000):

- cargas de esgotamento sanitário doméstico e industrial;
- cargas resultantes da drenagem urbana, considerada difusa devido à sua distribuição espacial nas cidades;
- cargas resultantes de depósitos de resíduos sólidos.

A origem dessas cargas se relaciona com o desenvolvimento das cidades, com as ações sobre os resíduos sólidos, sendo que elas chegam aos cursos d'água em função da geometria das redes de drenagem pluvial e de esgotamento sanitário.

Tentou-se avançar nestas atividades com a colaboração das prefeituras de Belo Horizonte e de Contagem, como também da COPASA-MG e de empresas privadas que trabalham em aspectos de drenagem pluvial e de esgotamento sanitário nestes dois municípios. Foram obtidos e consistidos pelo Laboratório de Geoprocessamento do CDTN/CNEN, dados topográficos nas escalas 1:5000 e 1:10000, respectivamente, para os municípios de Belo Horizonte e Contagem.

Foram também consultados dados georeferenciados da drenagem pluvial e do esgotamento sanitário para a sub-bacia do Ribeirão Ressaca e dados de drenagem pluvial, em meio

analógico, para a sub-bacia do Sarandí, e o cadastro das indústrias potencialmente poluidoras (SUDECAP, 2000).

Estas informações, em suas versões atualizadas, poderão ser superpostas, também de forma georeferenciada, após um trabalho de compatibilização, possibilitando identificar a contribuição efetiva das várias regiões dessas sub-bacias aos teores de metais obtidos nas estações de coleta, a montante da represa, operadas no presente trabalho (Figura 1.6). Entretanto, tal atividade foge ao escopo aqui proposto, dado o grande volume de informações e trabalho computacional a ser processado, e depende de uma harmonização de base de dados e procedimentos georeferenciados (SUDECAP, 2000), o que somente poderá ser alcançado, de forma efetiva, com a integração das equipes técnicas das municipalidades de Belo Horizonte e Contagem.

Porém, o presente trabalho, avançando em aspectos técnicos da questão, procura alertar para a importância ambiental de tais estudos que poderão resultar, caso implementados, em uma diminuição nos teores de metais e outros poluentes associados ao sedimento fino a ser dragado, no futuro, na Represa da Pampulha. Assim, para o atual trabalho, as considerações das áreas fonte de metais, a montante da represa, foram realizadas baseadas apenas nos aspectos topográficos da bacia (Item 5.4.2).

Uma fonte natural de metais pode ser a própria composição litológica da bacia hidrográfica. Porém, a determinação desta contribuição, em qualidade e quantidade, só poderá ser avaliada a partir de estudos geológicos de detalhe das rochas componentes das áreas em estudo, assunto que extrapola este trabalho. Além disso, para complicar esta questão, sendo toda a região sujeita à ocupação urbana, um componente não desprezível para os sedimentos são os restos de construção civil que, no Brasil, atingem percentuais elevados do material empregado. Certamente, muito desse material é de origem externa à bacia hidrográfica.

Espera-se que a metodologia aqui apresentada, no tocante à distribuição de metais na água e nos sedimentos da Bacia Hidrográfica da Pampulha, não só na região a montante da represa, possa ser aperfeiçoada e implementada pelos órgãos ambientais e outros atores, de forma a possibilitar um melhor controle desses poluentes no sistema. Tal colocação é também válida para outros poluentes, além dos metais, que podem estar presentes nos sedimentos, como considerado na

Tabela 3 do anexo da Proposta de Resolução do CONAMA para disposição final de sedimentos dragados (CONAMA, 2003), já abordada no Capítulo 3.

#### 5.4.1.3 Resultados relativos à avaliação geral (água, sedimento de fundo e suspensão)

Na avaliação geral dos dados, consideraram-se os resultados de concentrações para todos os 32 elementos (Ag, Al, As, Au, Ba, Cd, Ce, Cl, Co, Cr, Cs, Cu, Dy, Fe, Ga, Hg, I, K, La, Mn, Na, Ni, Pb, Rb, Sb, Sn, Sc, Ta, Ti, V, W e Zn) obtidos pelas técnicas de análise: EAA e AAN. A redução dos dados pelo método de ACP destaca sete componentes principais (CPs) que explicam 85,20% dos resultados. A análise dos três primeiros componentes explica 68,61% dos resultados. A análise da variância desses 3 CPs indica que o tipo de amostra é o que mais diferencia os CPs; em seguida, aparece a região.

Tabela 5.6 - Componentes principais e elementos correspondentes na avaliação geral

Componente Principal	Elementos correspondentes
CP1	Co, Fe, La, Na, Rb, Sc
CP2	Cr, Cu, Mn, Pb, Zn
CP3	Au, Dy, Sb

Como o tipo de amostra é o que mais diferencia os CPs foram realizadas, e são mostradas a seguir, análises para cada tipo de amostra. Para fins práticos, as saídas do programa SYSTAT<sup>®</sup> (1997) (componentes principais) serão mostradas somente na avaliação das amostras do tipo água, sendo que as saídas para as outras análises (sedimentos de fundo e em suspensão) encontram-se no Anexo 2.

#### 5.4.1.4 Avaliação das amostras do Tipo 1 (água)

Nesta avaliação, consideraram-se 28 amostras nas duas coletas (seca e chuva) e 7 metais (Al, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb e Zn), devido ao fato de apenas estes apresentarem teores acima do limite de detecção em 25% (ou mais) do total de amostras.

A redução dos dados mostra que apenas um CP é suficiente para a análise dos mesmos e que este CP explica 54,89% dos resultados encontrados. O CP1 é caracterizado, sobretudo, conforme a saída do programa abaixo, pela contribuição positiva do Zn > Cr > Ni, onde esta



notação indica que o Zn contribui mais positivamente (0,877) que o Cr (0,849) e esse, mais que o Ni (0,818).

Saída do Programa Systat® (1997)

Component loadings	
	<i>CPI</i>
Al	0.610
Cr	<b>0.849</b>
Cu	0.755
Mn	0.636
Ni	<b>0.818</b>
Pb	0.579
Zn	<b>0.877</b>
Variance Explained by Components: 3.842	
Percent of Total Variance Explained: 54.887	

A análise da variância considerando coleta, região e pontos das regiões, em relação ao fator 1 (F1), é dada na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 - Variáveis e probabilidades obtidas através de ANOVA para análise de metais em água

Variável	$p(F1)$
Coleta	0,251
Região	0,000
Pontos das regiões	0,000
% dos resultados	54,89

F1 independe da coleta (Figura 5.5a) e depende das regiões a montante e jusante da represa (Figura 5.5b) e dos pontos ou estações dessas regiões (Figura 5.5c).

Considerando-se a variação do F1 por região (Figura 5.5b), observa-se uma nítida distinção do seu valor para as regiões 1 e 2, a montante da represa, em relação às regiões 4 e 5, a jusante da mesma. Isto indicaria a atuação da represa como um elemento modificador deste comportamento, mostrando que a montante da represa poder-se-ia ter mais  $Zn > Cr > Ni$ , o contrário ocorrendo para a água a jusante da mesma e também na região 6 (Ribeirão

Mergulhão), como pode ser visto na Figura 5.6. Além disso, a distribuição dos valores de F1, sobretudo nas regiões 1 (Sarandí) e 2 (Ressaca) (Figura 5.5c) é análoga à distribuição dos teores dos principais metais do CP (Zn, Cr e Ni - Figura 5.6 e tabelas 5.1 a 5.4).

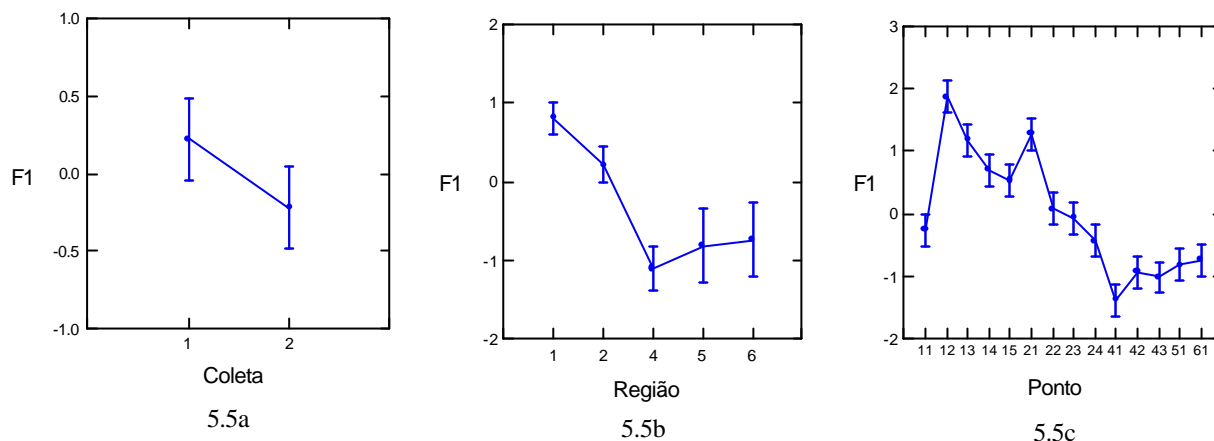


Figura 5.5 - Variação do fator F1 com a coleta, região e pontos das regiões (água)

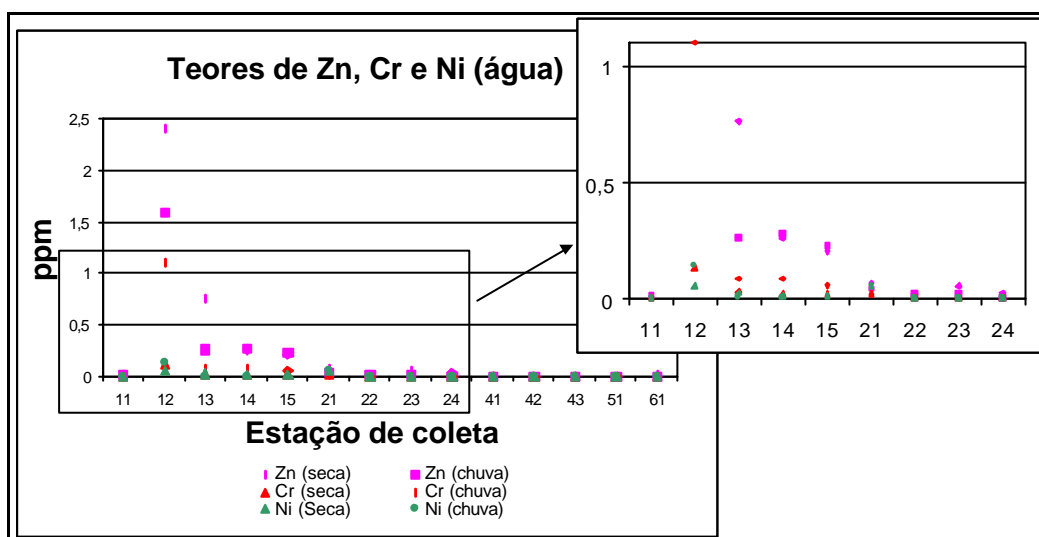


Figura 5.6 - Teores de Zn, Cr e Ni na água

Ainda na Figura 5.6 observa-se que os teores de Zn, Cr e Ni são bem maiores na Região 1 (Ribeirão Sarandí), onde existem muitas indústrias (galvanoplastias, indústrias mecânicas, etc). Ademais, nota-se um maior teor desses metais (região de pico) na Estação de Coleta S2 (12 na Figura 5.6) que fica logo a jusante da região da CEASA, decrescendo mais para jusante, em direção à Represa da Pampulha. Este comportamento é também observado para o Cu, que contribui menos que os outros elementos na variação de F1 (0,755, conforme a Saída do

Programa Systat<sup>®</sup> já mostrada) o qual apresenta teores geralmente menores que o Ni, à exceção da região de pico (12) (Figura 5.7 e Tabela 5.1).

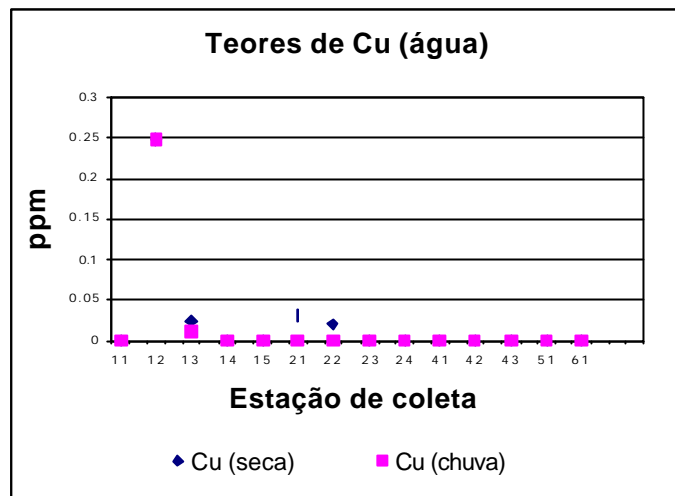


Figura 5.7 - Teores de Cu na água

Ao se observar a distribuição e variação dos elementos na água ao longo da Bacia da Pampulha, percebe-se que os elementos Zn, Cr, Ni e Cu são provenientes, sobretudo, de ações antrópicas, especialmente na Região 1 (Sarandí). Já o Mn e o Al (figuras 5.8 e 5.9) são oriundos da litologia e de ações antrópicas, pois se apresentam bem distribuídos ao longo da bacia hidrográfica e em concentrações baixas e pouco variáveis. Os valores de Mn e Al são muito baixos (décimo de ppm ou menos), principalmente o Mn que é muito facilmente encontrado na água. O Valor Máximo Permitido (VMP) do Mn em água potável é 0,1mg/L e do Al é 0,2mg/L, de acordo com a Portaria 1469, do Ministério da Saúde, de 29 de dezembro de 2000, publicada em 2 de janeiro de 2001.

Relativamente ao Pb, o sétimo metal considerado, os seus teores são inferiores a 0,05mg/L para todas as estações nas duas campanhas de coleta (Figura 5.10). O valor permitido de Pb em água potável é 0,01mg/L e este é 10 vezes menor que o VMP, logo, como esta água não é potável, o teor encontrado não é significativo. Nas análises das amostras da campanha de seca (outubro/2000), o limite de detecção alcançado foi de 0,02mg/L, enquanto que para as análises das coletas efetuadas no fim da estação de chuva (abril/2000), o limite alcançado foi de 0,04mg/L. Isto pode ter se refletido nos valores da estação de chuva como observado na Figura 5.10, onde os teores são sempre inferiores ao limite de detecção e, portanto, inferiores aos valores da época de seca.

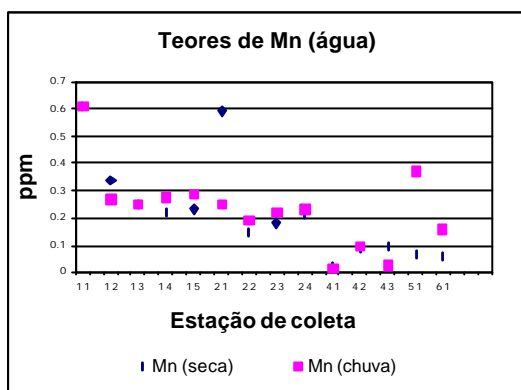


Figura 5.8 - Teores de Mn na água

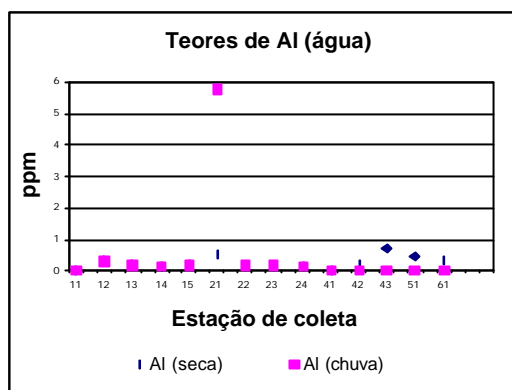


Figura 5.9 - Teores de Al na água

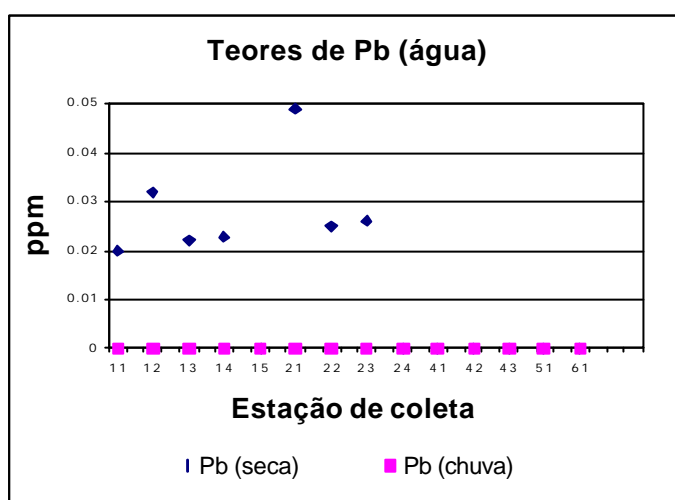


Figura 5.10 - Teores de Pb na água

#### 5.4.1.5 Avaliação das amostras do Tipo 2 (sedimento de fundo: SDFU)

Nesta avaliação foram considerados, 20 elementos (Al, Ba, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Ga, Hg, K, La, Mn, Na, Ni, Pb, Rb, Sc, Ti, V e Zn), dos 32 iniciais, em 39 amostras. Os elementos eliminados o foram pelo fato de apresentarem menos que 25% de resultados (como no caso da água) acima do limite de detecção.

A redução dos dados mostra que 4 CPs são suficientes para a análise dos mesmos (Anexo 2), explicando 85,51% da variabilidade dos resultados encontrados. Os 3 primeiros CPs explicam 79,67% e serão considerados a seguir.

Tabela 5.8 - Variáveis e probabilidades obtidas através de ANOVA para análise de metais no sedimento de fundo

Variável	$p(F1)$	$p(F2)$	$p(F3)$
Coleta	0,001	0,028	0,263
Região	0,049	0,015	0,008
Pontos das regiões	0,769	0,087	0,177
% dos resultados	52,47	18,69	8,51

O CP1 é caracterizado pela contribuição positiva do  $La > Co > Fe > K > Na > Rb > Sc$  e negativa do Pb (Anexo 2) e depende da coleta ( $p = 0,001$ ) e da região ( $p = 0,049$ ).

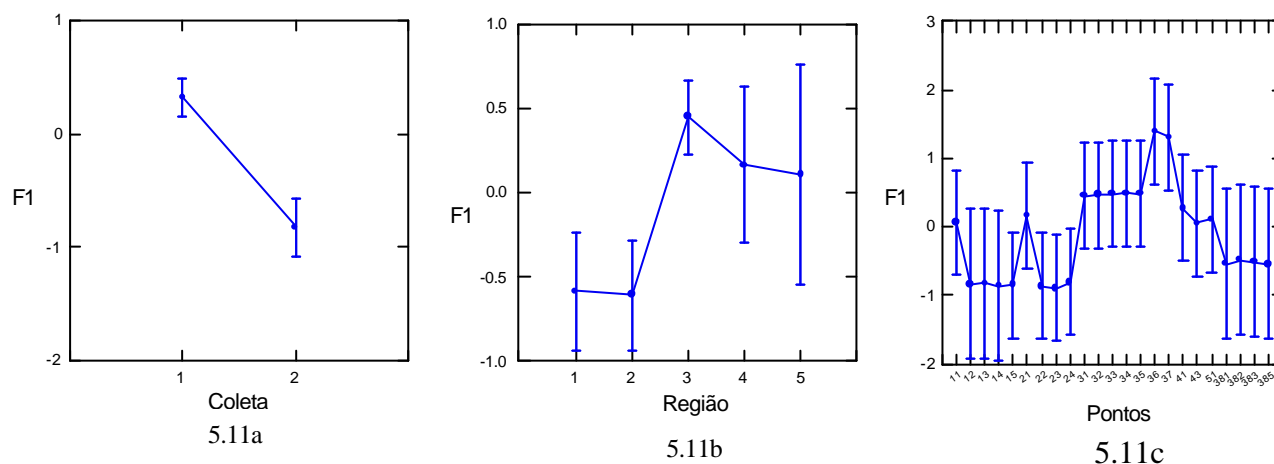


Figura 5.11 - Variação do fator F1 com a coleta, região e pontos das regiões (sed. fundo)

Considerando-se a variação de F1 x coleta (Figura 5.11a) observa-se, na coleta de época de seca (1), um maior teor dos elementos que contribuem positivamente para CP1 ( $La > Co > Fe > K > Na > Rb > Sc$ ) e menor teor do Pb, que contribui negativamente e, o contrário, em época de chuva (2). Porém, as coletas de sedimento de fundo são pontuais e não representam uma distribuição média de sedimentos ao longo da seção dos cursos d'água, como já abordado no Item 5.2.1.

Os sedimentos da superfície do fundo, mesmo os finos dos primeiros 10cm, amostrados pelo equipamento Rock Island (Figura 5.2), que são considerados para a determinação de teores de metais, podem não representar a ação hidrodinâmica ocorrida na época da amostragem, ao contrário da água e dos sedimentos em suspensão que representam as ações hidrodinâmicas

atuais da época da coleta. A dinâmica do sedimento de fundo é bem mais lenta do que a dinâmica da água e do sedimento em suspensão, por ela transportado. Com base nestas considerações, o sedimento dos 10cm superficiais pode integrar regime de seca e de chuva. Assim, todas as amostras de sedimento de fundo colhidas na Represa da Pampulha foram consideradas como em época de seca, para fins de análise multivariada. Dessa forma, conclui-se que não há uma justificativa plausível para avaliar a diferença entre os teores de metais no sedimento de fundo, nas duas épocas de coleta.

Considerando agora a variação de F1 x região (Figura 5.11b), observa-se uma nítida distinção do seu valor para as regiões 1 e 2, a montante da represa, em relação às regiões 4 e 5, a jusante da mesma. Isto poderia indicar que a represa atua como um elemento modificador deste comportamento, mostrando que a montante da mesma poder-se-ia pensar, inicialmente, em menores teores dos elementos, no sedimento de fundo, que contribuem positivamente para CP1, o contrário ocorrendo no sedimento de fundo a jusante da mesma. O inverso ocorreria para o Pb (contribuição negativa). Na realidade, o que ocorreu foi uma precariedade de resultados a montante da represa, para os elementos que contribuem positivamente para CP1, em relação aos resultados da represa e a jusante da mesma (tabelas 5.1 a 5.4), como retratado pela Figura 5.12, no caso do Co que, de resto, traduz comportamento semelhante ao dos demais elementos que contribuem positivamente para CP1.

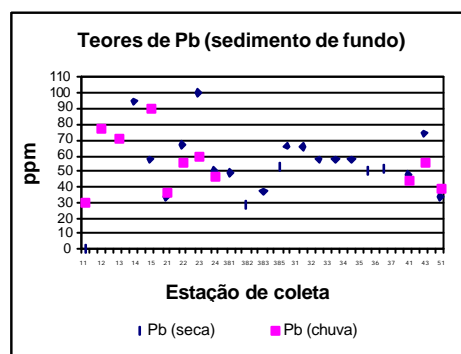
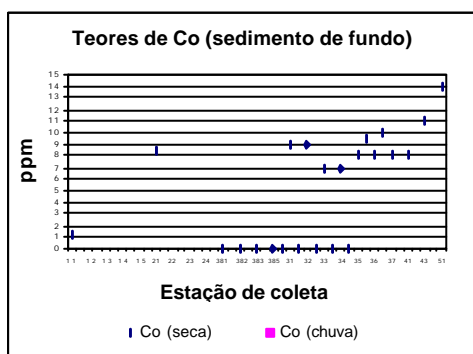


Figura 5.12 - Teores de Co no sedimento de fundo

Figura 5.13 – Teores de Pb no sedimento de fundo

Os valores dos teores de Pb tendem a decrescer de montante da represa para jusante da mesma (Figura 5.13), contribuindo para que F1 a montante seja menor que F1 na represa e a jusante dela (Figura 5.11b). Além disso, esse decréscimo de Pb de montante para jusante da represa ressalta o papel dessa como decantador natural de metais transportados pelos sedimentos. Isso

se confirma com a mesma tendência apresentada pelo Pb no sedimento em suspensão ao longo da bacia hidrográfica (Figura 5.32), o que será visto mais adiante.

Considerando a variação de F1 x pontos (Figura 5.11c), apesar desse componente não depender dos pontos, considerando todas as regiões, observa-se um nítido crescimento de F1 para as duas últimas estações no interior da represa (36 e 37), o que se traduz efetivamente por uma variação semelhante nos teores dos principais metais que comandam CP1 ( $La > Co > Fe$ ), nestas estações. O Pb (contribuição negativa) apresenta teores mais uniformes entre as estações 31 e 37. Assim, a sua influência fica minimizada. Observações semelhantes já foram feitas em BANDEIRA *et al.* (2002b).

Considerando as estações E4 (41) e E6 (43), a jusante da represa, observa-se, para o sedimento de fundo, em ambas, um notável incremento dos teores de K ( $20000 \rightarrow 230000$ ppm) e Na ( $3800 \rightarrow 6100$ ppm) entre E4 (logo a jusante da represa) e E6 (Ribeirão da Onça próximo à sua foz) (Tabela 5.4 e figuras 5.14 e 5.15). Tem-se, entre essas duas estações, a importante entrada do Ribeirão Isidoro (Figura 1.6), que drena toda a região de Venda Nova. Aumentos menos acentuados dos teores foram observados para os demais metais importantes de CP1, à exceção dos teores de Rb e Sc, que baixaram um pouco entre E4 e E6 (Tabela 5.4).

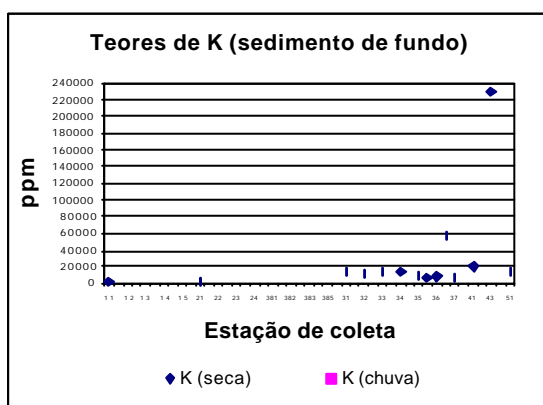


Figura 5.14 - Teores de K no sedimento de fundo

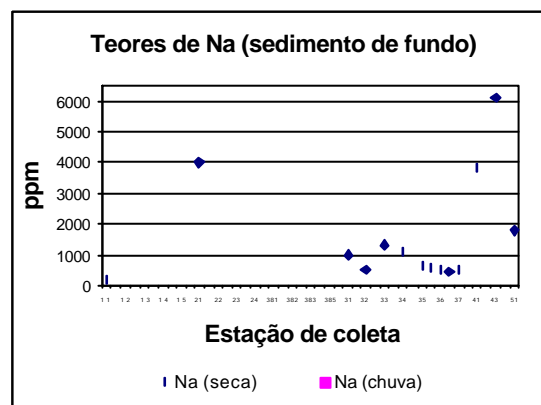


Figura 5.15 - Teores de Na no sedimento de fundo

Essa constatação, aqui apresentada, poderá ser pesquisada no futuro, sobretudo quanto às fontes de K (laticínios, fertilizantes, etc.) - elemento que acelera a eutrofização - e dos outros metais. Como será visto adiante, observa-se aumento semelhante para os teores de K no sedimento em suspensão entre E5 e E6 ( $7200 \rightarrow 7900$ ppm, na coleta de seca -  $6700 \rightarrow 15000$ ppm, na coleta

de chuva) (Tabela 5.4 e Figura 5.39). Em um estudo futuro deve-se também pesquisar os teores de K na água, o que não foi feito presentemente.

O CP2 é caracterizado, sobretudo, pela contribuição positiva do  $\text{Cu} > \text{Zn}$  e negativa do Hg (Anexo 2). Ele depende da coleta ( $p = 0,028$ ) e da região ( $p = 0,015$ ), não dependendo dos pontos das regiões ( $p = 0,087$ ).

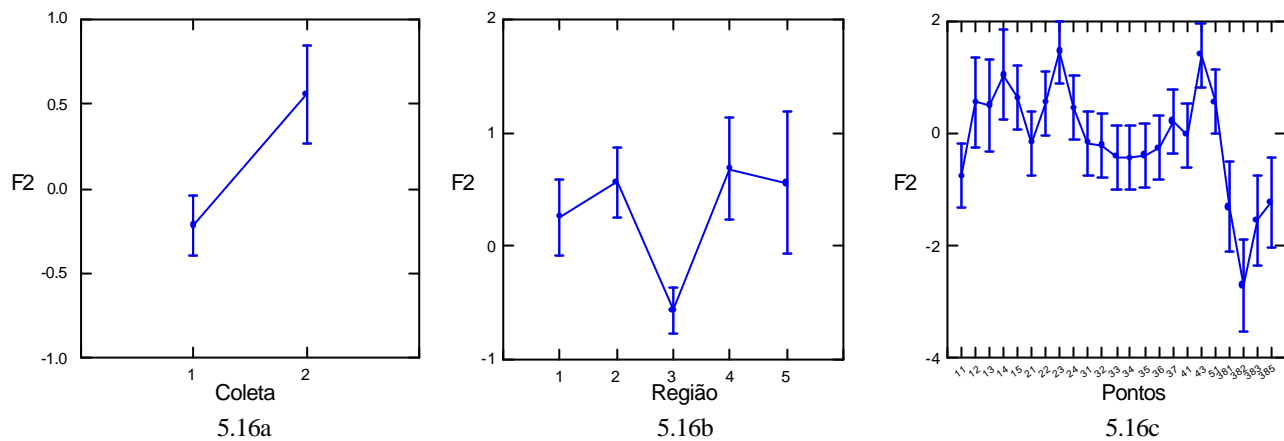


Figura 5.16 - Variação do fator F2 com a coleta, região e pontos das regiões (sed. fundo)

Considerando-se a variação do F2 x coleta (Figura 5.16a), a interpretação da dependência dos elementos do CP2 com a coleta fica prejudicada pelas mesmas razões apontadas acima, para F1 x coleta.

Considerando agora a variação do F2 x região (Figura 5.16b), observa-se uma nítida distinção do seu valor para as regiões 1 e 2 e as regiões 4 e 5, respectivamente a montante e a jusante da represa, em relação à Região 3, a própria represa. Isto se traduz por teores relativamente maiores, no sedimento de fundo a montante e jusante da represa, de Cu e Zn (que contribuem positivamente para CP2) (figuras 5.17 e 5.18) e teores relativamente maiores de Hg (que contribui negativamente para CP2), no interior da represa. O menor valor de F2 na região 3 (represa) pode ser também explicado pela virtual ausência de análise de Hg nas amostras a montante da represa (Figura 5.19), deixando de contribuir negativamente para F2 a montante.

Outro ponto é que o sedimento de fundo depositado na represa, na região amostrada, entre a Ilha dos Amores e a barragem é, principalmente, sedimento fino que ali chegou transitando em suspensão oriundo, principalmente, dos ribeirões Sarandí e Ressaca. Os teores, sobretudo para o



Cu, no sedimento em suspensão a montante da represa, são sempre menores que os encontrados no sedimento de fundo, também a montante (tabelas 5.1 e 5.2). Além disso, o comportamento semelhante das distribuições de concentrações de Cu e Zn a montante e jusante da represa, mostrando picos para as duas coletas (seca e chuva) nas estações 23 (Ribeirão Ressaca) e 43 (Ribeirão da Onça) (figuras 5.17 e 5.18), pode indicar associação antrópica dos dois elementos, na disposição espacial dos sedimentos de fundo que os contém.

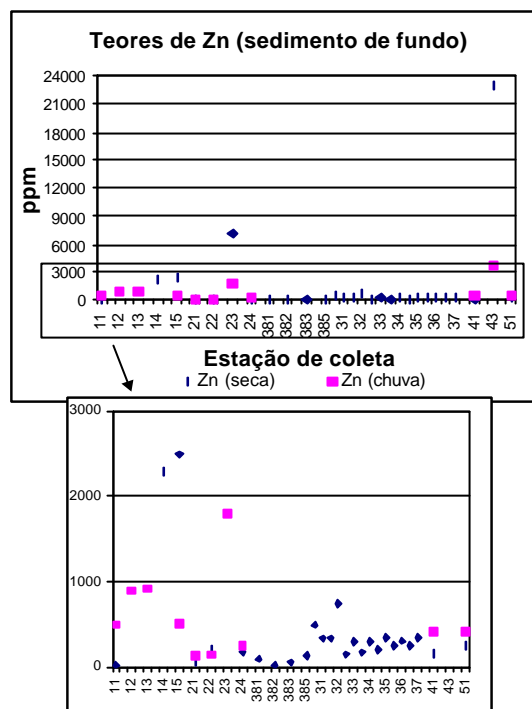
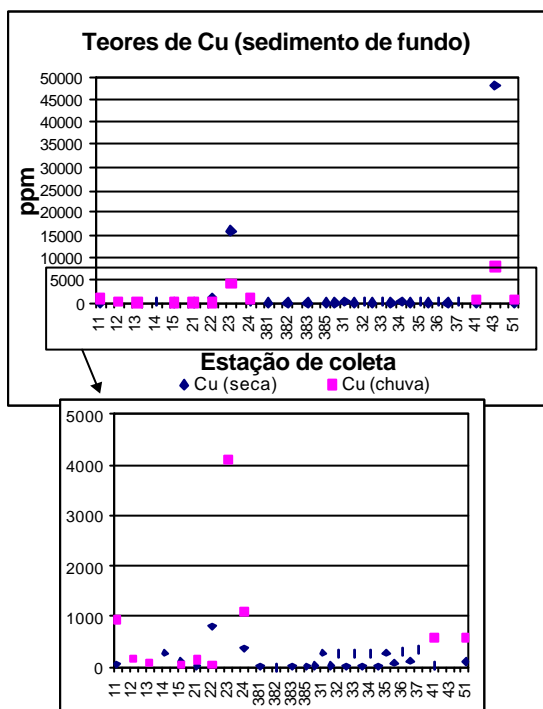


Figura 5.17 - Teores de Cu no sedimento de fundo

Figura 5.18 - Teores de Zn no sedimento de fundo

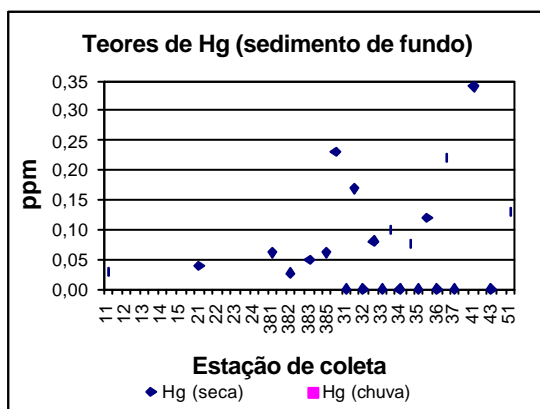


Figura 5.19 - Teores de Hg no sedimento de fundo

Note-se também que, em geral, as concentrações de Hg (máximo de 0,35ppm) são muito menores que as dos metais Cu (máximo 48000ppm) e Zn (máximo 23000ppm) (figuras 5.17 a 5.19 e Tabela 5.3).

Uma conclusão importante que já se pode extrair desses resultados, é que os teores médios de Cu, Hg e Zn nos sedimentos finos de fundo, a serem dragados na represa, são menores ou no máximo iguais aos teores desses mesmos metais nos sedimentos de fundo dos cursos d'água a jusante, que poderão vir a ser o receptáculo dos sedimentos dragados. Avaliação similar dos metais principais de CP1 e CP3 permite a mesma conclusão.

Será feita no Item 5.4.1.6 (sedimento em suspensão: SDSU), a mesma avaliação para os teores de metais nos sedimentos de fundo da represa, com os teores de metais nos sedimentos em suspensão à jusante da mesma.

Apesar de, pelo critério adotado ( $p < 0.05$ ) para dependência dos fatores com determinadas situações (coleta, região ou pontos da região), o F2 x pontos ( $p = 0,087$ ) não depender dos pontos da região, outra observação interessante a ser feita sobre o comportamento dos teores desses metais ao longo da bacia hidrográfica, é:

- Quanto ao andamento da distribuição de teores de Cu, Hg e Zn no interior da represa observa-se (como para os elementos de CP1 - à exceção do Pb) um comportamento geral de diminuição dos teores a partir da Estação 31, passando por um mínimo na Estação 33 (trecho de menor seção perpendicular ao antigo talvegue na represa) crescendo, a partir daí até a Estação 37, próxima á tulipa da barragem, conforme já observado em BANDEIRA *et al.* (2002b).

Tanto o Cu quanto o Zn sofrem um expressivo aumento de concentração no sedimento de fundo entre E4 (41), logo a jusante da represa e E6 (43) Ribeirão da Onça próximo à foz, conforme as figuras 5.17, 5.18 e a Tabela 5.9.

Tabela 5.9 - Teores de Cu e Zn no sedimento de fundo das estações E4 e E6

Estação de coleta	Cu seca (ppm)	Cu chuva (ppm)	Zn seca (ppm)	Zn chuva (ppm)
E4 (41 nas figuras)	45	590	160	420
E6 (43 nas figuras)	48000	8000	23000	3700

Observa-se que tanto os teores de Cu quanto de Zn para o sedimento de fundo na Estação E6 decrescem da época de seca para a de chuva. Com o já ressaltado antes, as amostras de fundo, pontuais, não são tão representativas como as de água e sedimento em suspensão, em relação às épocas de coleta, não permitindo também, o número reduzido de amostras, uma análise conclusiva.

O CP3, caracterizado pela contribuição positiva do Cr > Ti e negativa do Ni, é independente da coleta ( $p = 0,263$ ) e dos pontos da região ( $p = 0,177$ ) e dependente da região ( $p = 0,008$ ).

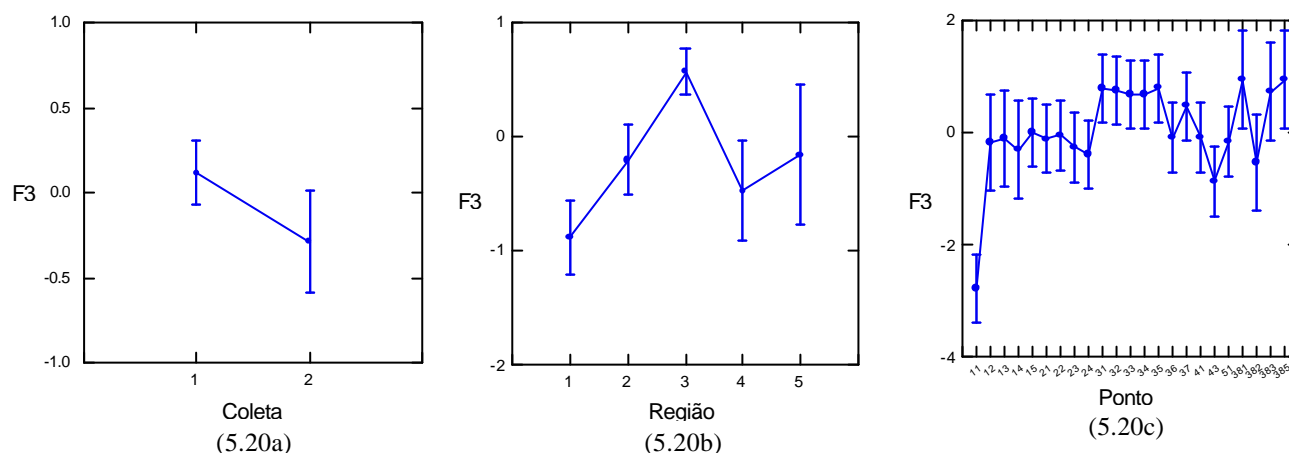


Figura 5.20 - Variação do fator F3 com a coleta, região e pontos das regiões (sed. fundo)

Ao se considerar a variação do F3 x coleta (Figura 5.20a), a interpretação da dependência dos elementos do CP3 com a coleta fica prejudicada pelas mesmas razões apontadas antes, para F1 x coleta.

Considerando a variação de F3 x região (Figura 5.20b), observa-se maior valor de F3 na Região 3 (represa) em relação a montante e jusante. Isto pode ter sido devido a que, nas análises efetuadas com os sedimentos colhidos no fundo da represa em 1998 (Tabela 5.3), o limite de detecção laboratorial para o Ni foi alto (> 100ppm). Para as amostras colhidas, a partir de 1999, o limite de detecção foi melhorado, permitindo quantificações abaixo de 100ppm para as amostras de sedimento de fundo colhidas a montante e jusante da represa (Figura 5.21 e tabelas 5.1, 5.2, e 5.4).

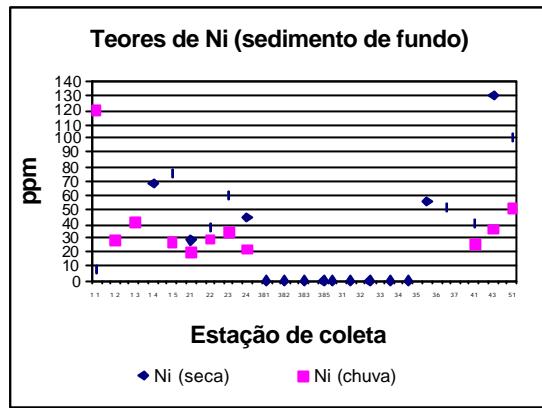


Figura 5.21 - Teores de Ni no sedimento de fundo

Os metais que contribuem positivamente para F3 ( $Cr > Ti$ ) apresentam teores relativamente maiores para os sedimentos de fundo a montante da represa (figuras 5.22 e 5.23).

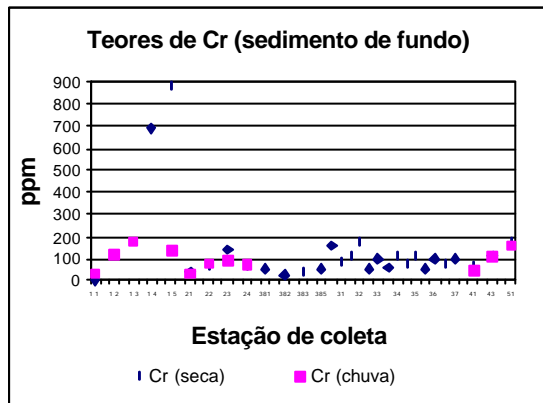


Figura 5.22 - Teores de Cr no sedimento de fundo

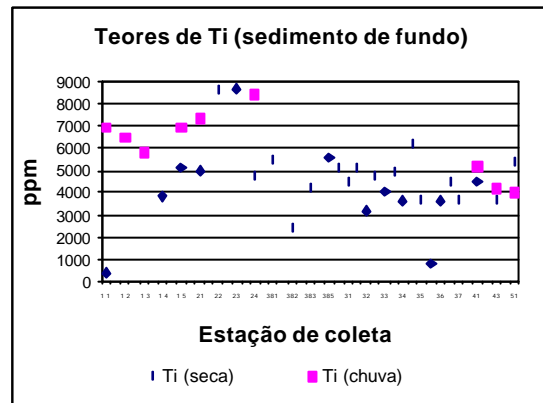


Figura 5.23 - Teores de Ti no sedimento de fundo

#### 5.4.1.6 Avaliação das amostras do Tipo 3 (sedimento em suspensão: SDSU)

Nesta avaliação foram considerados 27 elementos (Al, As, Au, Ba, Cd, Ce, Cl, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Ga, Hg, K, La, Mn, Na, Ni, Pb, Rb, Sb, Sc, Ta, Ti, V e Zn) em 25 amostras. Os elementos eliminados o foram por apresentarem menos que 25% de resultados acima do limite de detecção ou analisados.

A redução dos dados mostra que 6 CPs são suficientes para a análise dos dados, explicando 84,87% dos resultados encontrados. Os 3 primeiros CPs explicam 66,28% dos resultados (Anexo2).

Tabela 5.10 - Variáveis e probabilidades: análise de metais no sedimento em suspensão

Variável	$p(F1)$	$p(F2)$	$p(F3)$
Coleta	0,238	0,286	0,540
Região	0,054	0,632	0,004
Pontos das regiões	0,028	0,006	0,257
% dos resultados	33,63	20,44	12,21

O CP1 é caracterizado pela contribuição positiva do  $Co > Ba > Fe$  e negativa do Mn, não dependendo da coleta ( $p = 0,238$ ) e da região ( $p = 0,054$ ), mas dependendo dos pontos das regiões ( $p = 0,028$ ).

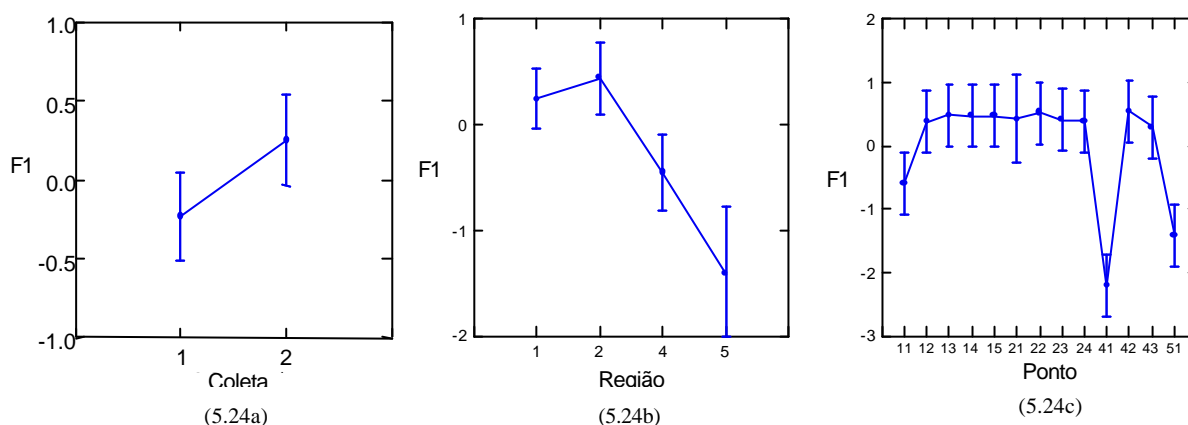


Figura 5.24 - Variação do fator F1 com a coleta, região e pontos das regiões (sed. susp.)

Considerando-se a variação de F1 x coleta (Figura 5.24a), onde não há dependência do F1 com a coleta, observa-se uma leve tendência de valores maiores dos teores dos quatro metais mais importantes de CP1 na coleta em época de chuva (2), o que pode ser observado nas figuras 5.25 a 5.28.

Considerando a variação do F1 x região (Figura 5.24b), no limite de dependência ( $p < 0,05$ ), observa-se uma distinção do seu valor para as regiões 1 e 2, a montante da represa, em relação às regiões 4 e 5, a jusante da mesma. Entretanto, os teores dos metais mais importantes de CP1 (Co, Ba, Fe e Mn) apresentam valores relativamente estáveis a montante e jusante da represa (figuras 5.25 a 5.28), à exceção do Mn que apresenta valores maiores na Região 1 (Sub-bacia do

Ribeirão Sarandí) e na Estação 41 (Ribeirão Pampulha), e o Ba, que apresenta valores relativamente maiores para a coleta de chuva, na Estação 43 (Ribeirão da Onça).

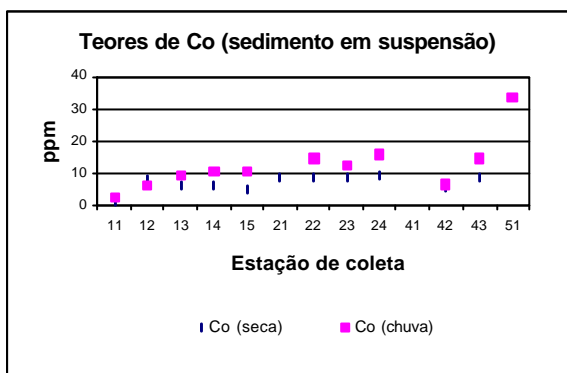


Figura 5.25 - Teores de Co no sedimento em suspensão

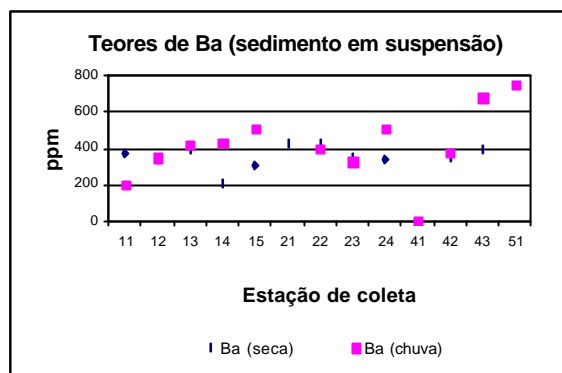


Figura 5.26 - Teores de Ba no sedimento em suspensão

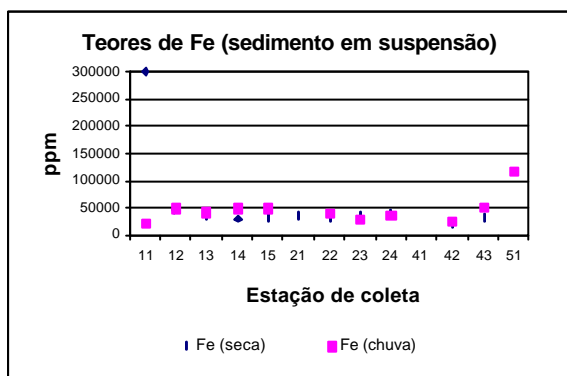


Figura 5.27 - Teores de Fe no sedimento em suspensão

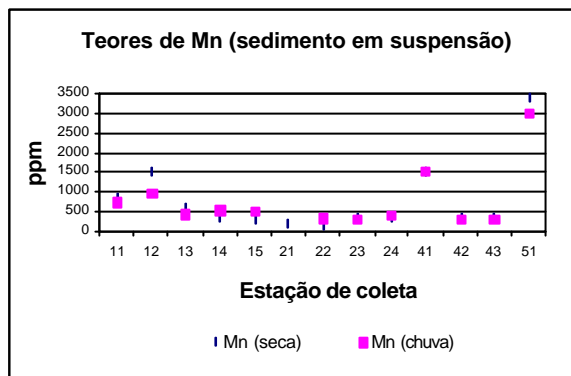


Figura 5.28 - Teores de Mn no sedimento em suspensão

Quanto à variação de F1 x pontos (Figura 5.24c), observa-se um decréscimo acentuado de F1 para as estações de coleta 41 e 51, o que é explicado, na Estação 41, pela ausência quase completa de resultados para Co, Ba e Fe (figuras 5.25 a 5.27), devido à insuficiência da amostra (E4S-13/04/00) e também à não determinação desses elementos para a amostra (E4S-04/11/99) (Tabela 5.4), aliado ao pico de Mn nesta estação (Figura 5.28). O decréscimo para a Estação 5.1 (Rio das Velhas logo a montante do Ribeirão da Onça) se deve ao pico acentuado de Mn (contribuição negativa a CP1), nas duas coletas efetuadas (Figura 5.28).

O CP2 é caracterizado, sobretudo, pela contribuição positiva do  $Cu > Ni > Pb > Zn > Cr$ , sendo independente da coleta ( $p = 0,286$ ) e da região ( $p = 0,632$ ) e dependente dos pontos da região ( $p = 0,006$ ).

Considerando-se a variação de F2 x coleta (Figura 5.29a), observa-se uma tendência marcada de valores maiores dos teores dos cinco metais mais importantes de CP2, em coleta em época de chuva (2), o que pode ser observado nas figuras 5.30 a 5.34.

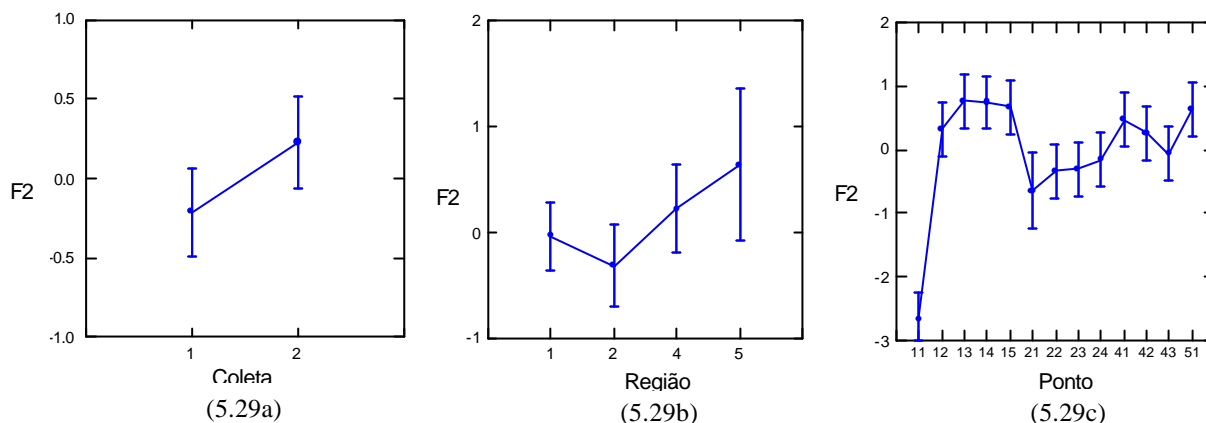


Figura 5.29 - Variação do fator F2 com a coleta, região e pontos das regiões (sed. susp.)

Estes metais são, geralmente, devidos à ação antrópica. Uma possível explicação para a ocorrência de maiores teores desses elementos em época de chuva é o seu carreamento pelo escoamento superficial resultante da precipitação. Além disso, uma observação importante é que na sub-bacia do Sarandí (Região 1) nota-se que os picos, em época de chuva, ocorrem para os metais Cu, Ni, Pb e Cr na Estação 13 e para o Zn, na Estação 12. Para o Cu e o Ni, não há um pico definido na época de seca na Região 1, porém, para o Pb e o Zn, o pico é na Estação 12. O Cr apresenta, em época de seca, valores idênticos de pico (380ppm) nas estações 12 e 13 (Figura 5.34 e Tabela 5.1).

Em relação aos teores desses metais na sub-bacia do Ribeirão Ressaca (Região 2), observa-se valores bem menores que na sub-bacia do Sarandí, sobretudo para a época de chuva. Além disso, nota-se, na Região 2, um crescimento suave dos teores entre as estações 21 a 24, sobretudo em época de seca, para o Cu, Ni e Pb (figuras 5.30 a 5.32 e Tabela 5.2).

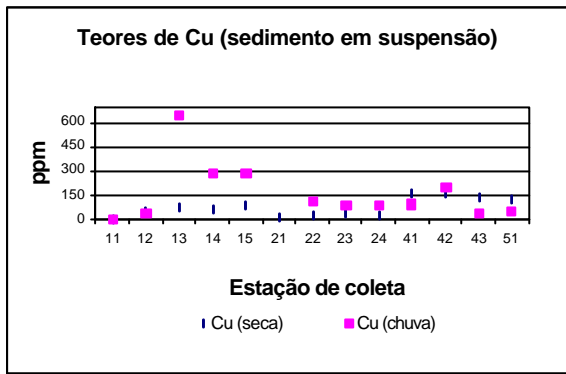


Figura 5.30 - Teores de Cu no sedimento em suspensão

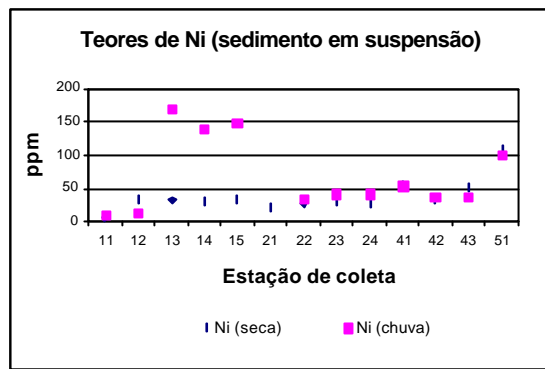


Figura 5.31 - Teores de Ni no Sedimento em suspensão

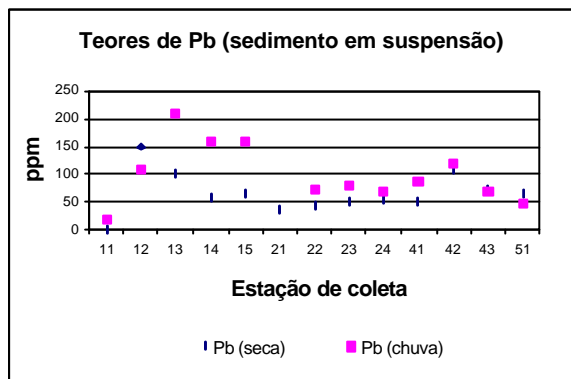


Figura 5.32 - Teores de Pb no sedimento em suspensão

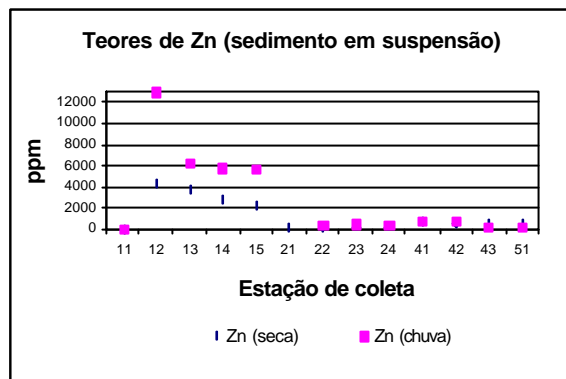


Figura 5.33 - Teores de Zn no sedimento em suspensão

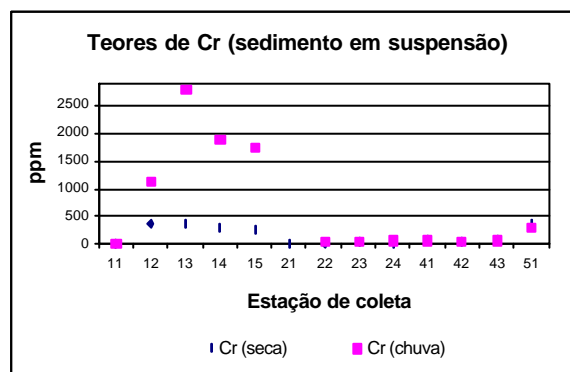


Figura 5.34 - Teores de Cr no Sedimento em suspensão

Em relação às regiões 4 (ribeirões Pampulha e Onça) e 5 (Rio das Velhas), comparadas com a Região 2 (Ressaca) observa-se, em geral, o seguinte, considerando cada um dos metais em avaliação:

- Cu (Figura 5.30 e tabelas 5.2 e 5.4): Os teores na Região 4 são maiores que na Região 2 e, na Região 5, são semelhantes aos da Estação 43;



- Ni (Figura 5.31 e tabelas 5.2 e 5.4): Os teores na Região 4 são semelhantes aos da Região 2 e, na Região 5, são maiores que na Região 4;
- Pb (Figura 5.32 e tabelas 5.2 e 5.4): Os teores das regiões 4 e 5 são semelhantes aos da Região 2, à exceção da Estação 42 onde é maior nas duas épocas de coleta; trabalhos futuros poderão revelar o motivo desse maior valor de Pb para a Estação 42 (E5 – Figura 1.6), a qual se situa no início do Ribeirão da Onça, formado pelos ribeirões Pampulha e Cachoeirinha;
- Zn (Figura 5.33 e tabelas 5.2 e 5.4): Os teores da Região 4 são maiores que os da Região 2 e, na Região 5, são semelhantes aos da Região 4;
- Cr (Figura 5.34 e tabelas 5.2 e 5.4): Os teores da Região 4 são relativamente maiores que os da Região 2, à exceção da Estação 42 (início do Ribeirão da Onça) onde são semelhantes e, na Região 5 (Rio das Velhas), são bem maiores que na Região 4.

Considerando agora a variação, do F2 x região (Figura 5.29b), o menor valor de F2 para a Região 2 se deve ao fato dos teores dos cinco elementos considerados serem, em geral, menores que nas outras regiões (tabelas 5.1, 5.2 e 5.4), assim como por todos contribuírem positivamente para CP2.

Considerando a variação de F2 x pontos (Figura 5.29c), o que fez o valor de F2 ser pequeno na Estação 11 foram os baixos teores dos metais em avaliação para este ponto. Note-se que esta estação é diferente das demais. Encontra-se na saída do Aterro Sanitário de Contagem, constituindo-se de um escoamento acessado por uma manilha vertical com cerca de 1m de diâmetro e 2m de extensão.

Cabe ainda um comentário mais geral sobre o componente principal CP2 e as constatações acima apresentadas. A análise multivariada de metais nos sedimentos em suspensão em toda a Bacia Hidrográfica da Pampulha e no Rio das Velhas, logo a montante da desembocadura dessa bacia, apontou como elementos principais, em CP2, cinco metais ( $Cu > Ni > Pb > Zn > Cr$ ), de origem eminentemente antropogênica. A variação de seus teores ao longo das estações das diversas regiões, e de uma região para outra, permite chegar a conclusões importantes, que podem servir de subsídio às autoridades ambientais no trabalho de procurar minimizar o aporte desses metais aos cursos d'água:

- a sub-bacia do Ribeirão Sarandí apresenta-se como a de maiores teores desses metais, o que se acentua na coleta em época de chuva;
- dentro dessa sub-bacia, os pontos de maiores entradas são: Estação 12 (S2), logo a jusante da CEASA, e Estação 13 (S3), na altura do parque linear da avenida sanitária construída ao longo do Ribeirão Sarandí (Figura 1.6);
- a sub-bacia do Ribeirão Ressaca contribui bem menos com estes metais do que a do Ribeirão Sarandí (figuras 5.30 a 5.34);
- os cursos d'água a jusante da represa (Pampulha e Onça) apresentam teores desses metais nos sedimentos em suspensão maiores do que para o Ribeirão Ressaca graças, sobretudo, aos teores da Estação 42, e relativamente menores do que para o Ribeirão Sarandí;
- o Rio das Velhas, logo a montante do Ribeirão da Onça, apresenta maiores teores que esse, em sua desembocadura, para Cr e Ni sendo que, para os demais metais, os teores são relativamente iguais ou até menores.

O CP3 é caracterizado pela contribuição positiva do Cd e negativa do Ti > Ta > K > V; independe da coleta ( $p = 0,540$ ), depende da região ( $p = 0,004$ ) e independe dos pontos da região ( $p = 0.257$ ).

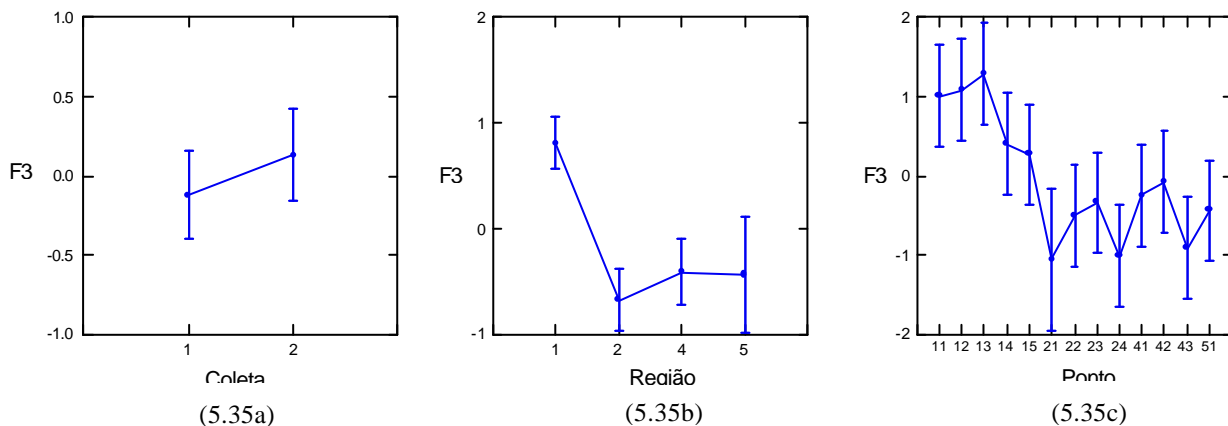


Figura 5.35 - Variação do fator F3 com a coleta, região e pontos das regiões (sed. susp.)

Considerando a variação de F3 x coleta (Figura 5.35a), não se observa uma tendência de valores maiores dos teores de Cd, Ti, Ta, K e V em coleta em época de seca (1) ou chuva (2) (figuras 5.36 a 5.40).

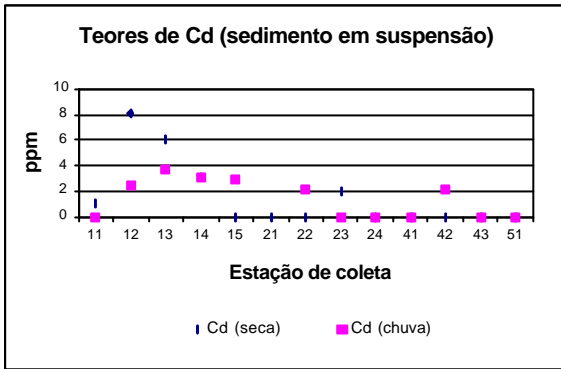


Figura 5.36 - Teores de Cd no sedimento em suspensão

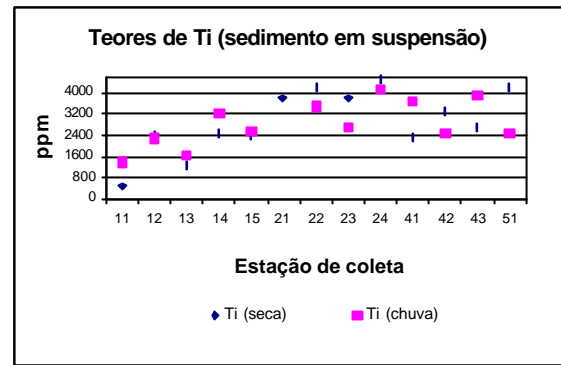


Figura 5.37 - Teores de Ti no sedimento em suspensão

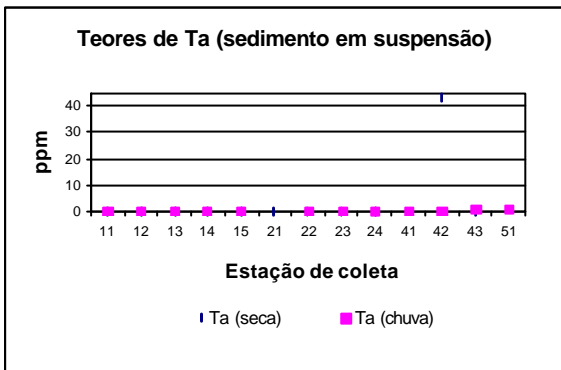


Figura 5.38 - Teores de Ta no sedimento em suspensão

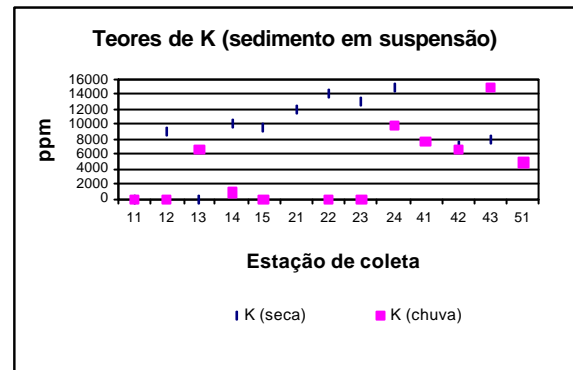


Figura 5.39 - Teores de K no sedimento em suspensão

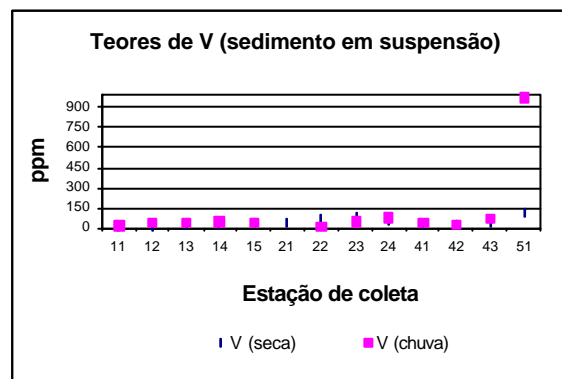


Figura 5.40 - Teores de V no sedimento em suspensão

Para a variação de F3 x região (Figura 5.35b), observa-se um valor elevado de F3 para a Região 1, o que é devido aos valores relativamente maiores de Cd (contribuição positiva) e menores de  $Ti > Ta > K > V$  (contribuição negativa) para esta região.

Relativamente à variação de F3 x pontos, apesar de a ANOVA não indicar dependência com os pontos das regiões (Figura 5.35c), mas considerando a Região 1, ao se observar as figuras 5.36 a 5.40, nota-se uma diminuição dos teores de Cd (contribuição positiva) a partir da Estação 12 e um aumento geral dos teores dos metais que dão contribuição negativa à CP3, a partir da Estação 13 (Tabela 5.1), o que resultou na subida de F3 até a Estação 13 e um decréscimo significativo de F3 entre as estações 13 e 14. Explica-se a queda abrupta do valor de F3 entre a Estação 15 (final do Sarandí) e a Estação 21, saída do Aterro Sanitário de Belo Horizonte, pela queda de teor de Cd (contribuição positiva) e pelo aumento dos teores de Ti e K (contribuição negativa) entre estas estações.

É digna de nota a ocorrência de elevados teores de Ti no sedimento em suspensão, em toda a Bacia Hidrográfica da Pampulha e também no Rio das Velhas, sendo que esta ocorrência é mais acentuada na sub-bacia do Ribeirão Ressaca e nas regiões a jusante da represa (Figura 5.37). Esta constatação merece ser esclarecida em um estudo futuro.

#### 5.4.1.7 Resumo das estações onde ocorrem picos

Analisando-se os picos para os principais metais (Tabela 5.11) que apresentaram resultados na matriz água (Al, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn) podem-se destacar, como mais críticas, as estações 21 e 12, sendo que os três elementos com teores mais altos, são: Al (5,8ppm; Estação 21), Zn (2,4ppm; Estação 12) e Cr (1,1ppm; Estação 12).

Tabela 5.11 - Picos de elementos presentes na água na Bacia Hidrográfica da Pampulha

Elemento	1º pico		2º pico	
	Estação	Teor (ppm)	Estação	Teor (ppm)
Al	21	5,8	43	0,69
Cr	12	1,1	14	0,086
Cu	12	0,25	21	0,032
Mn	11	0,61	21	0,59
Ni	12	0,14	21	0,056
Pb	21	0,049	12	0,032
Zn	12	2,4	13	0,76

Na matriz sedimento de fundo as três estações mais críticas quanto à quantidade de picos (Tabela 5.12), são: 43, 23 e 51, respectivamente. Os três elementos com teores mais altos são: Fe (320000ppm; Estação 11), K (230000ppm; Estação 43) e Cu (48000ppm; Estação 43).

Tabela 5.12 - Picos de elementos presentes no sedimento de fundo da Bacia Hidrográfica da Pampulha

Elemento	1º pico		2º pico	
	Estação	Teor (ppm)	Estação	Teor (ppm)
Co	51	14	43	11
Fe	11	320000	51	75000
K	43	230000	37	59000
La	37	89	36	86
Na	43	6100	21	4000
Pb	23	100	14	94
Rb	34	110	31	90
Sc	34, 36, 51	12	37	11,3
Cu	43	48000	23	16000
Hg	41	0,34	31	0,23
Zn	43	23000	23	7100
Cr	15	890	14	690
Ni	43	130	11	120
Ti	23	8700	22	8600

Na matriz sedimento em suspensão, as três estações mais críticas, quanto à quantidade de picos (Tabela 5.13), são: 51, 13 e 24. Os três elementos que apresentam teores mais altos são: Fe (300000ppm; Estação 11), K (15000ppm; estações 24 e 43) e Zn (13000ppm; Estação 12).

As considerações sobre a variação de teores de metais nos sedimentos e na água, na região a montante da represa, que apresenta particular interesse no presente trabalho, serão abordadas no Item 5.4.2.

Na Tabela 5.14 os números em negrito indicam que, baseando-se apenas no valor do teor de metal do pico, os sedimentos de fundo da Represa da Pampulha apresentam valores de picos maiores, para alguns elementos, do que os correspondentes para os sedimentos em suspensão nos cursos d'água a jusante. Entretanto, isto não implica, *a priori*, na inviabilidade do despejo de material dragado nesses cursos d'água. Outras considerações a influenciar o impacto

ambiental de tal intervenção devem também ser levadas em conta, como: critérios de qualidade de sedimentos; a capacidade de hidrotransporte e dispersora dos cursos d'água; a permanência ou não do metal fixado ao sedimento dragado em seu novo ambiente hídrico a jusante; as quais serão abordadas, de forma conjunta, no Capítulo 9.

Tabela 5.13 - Picos de elementos presentes no sedimento em suspensão na Bacia Hidrográfica da Pampulha

Elemento	1º pico		2º pico	
	Estação	Teor (ppm)	Estação	Teor (ppm)
Ba	51	750	43	680
Co	51	34	24	16
Fe	11	300000	51	120000
Mn	51	3400	12 e 41	1500
Cr	13	2800	14	1870
Cu	13	350	14 e 15	290
Ni	13	170	15	150
Pb	13	210	14 e 15	160
Zn	12	13000	13	6200
Cd	12	8,2	13	6,0
K	24 e 43	15000	22	14000
Ta	42	43	43 e 51	1
Ti	24	4500	22 e 51	4200
V	51	980	24	82

Tabela 5.14 - Comparação entre os teores de elementos presentes no sedimento de fundo da Represa da Pampulha e no sedimento em suspensão a jusante da mesma

Elemento	Sedimento de fundo	Sedimento em suspensão	
	Pico represa (ppm)	Pico Região 4 (ppm)	Pico Região 5 (ppm)
Co	10	15	34
Cr	180	<b>70</b>	370
Cu	360	<b>200</b>	<b>120</b>
Fe	51000	52000	120000
K	59000	<b>15000</b>	<b>4900</b>
Ni	56	<b>53</b>	110
Pb	66	120	66
Ti	6200	<b>3900</b>	<b>4200</b>
Zn	490	780	650

#### **5.4.2 Regiões de origem dos metais a montante da Represa da Pampulha**

Tendo em conta a ocorrência e distribuição de metais presentes na água e nos sedimentos, resultante das amostragens nas cinco estações do Ribeirão Sarandí (S1, S2, S3, S4 e E1) e nas quatro do Ribeirão Ressaca (R1, R2, R3 e E2), os resultados dos estudos empregando a análise multivariada e considerando somente o relevo topográfico, pelas razões anteriormente apontadas, passa-se a avaliar as regiões de origem dos metais, a montante da represa, que contribuem para os teores de metais dos sedimentos finos que assoreiam a mesma e que devem ser dragados, para que esta possa continuar a existir, cumprindo suas importantes funções de amortecimento de cheias e como região de lazer.

Como referido no Item 5.4.1.2, em se tratando de uma bacia hidrográfica eminentemente urbana, a determinação precisa das regiões fonte, nas margens direita e esquerda dos dois principais ribeirões mencionados, a contribuir com metais para a água e os sedimentos amostrados nas estações estabelecidas no presente trabalho, ou outras quaisquer que venham a ser operadas em estudos futuros, somente poderá ser realizada, de modo preciso, com a sobreposição do relevo topográfico, dos mapas atualizados de drenagem pluvial e de esgotamento sanitário. Deve-se levar também em consideração um cadastro atualizado de fontes pontuais de poluição industrial, tal como apontado nas tabelas 14 e 15 e mostrado na Figura 45 de SUDECAP (2000), para 32 empreendimentos industriais localizados nos municípios de Belo Horizonte e Contagem, a contribuir com poluentes para as bacias dos ribeirões Arrudas e Onça. Estes empreendimentos, classificados como de Classe A, eram responsáveis por cerca de 96% da carga total de metais, conforme ESSE (1996) citada em SUDECAP (2000), e demandavam intervenção imediata por parte dos órgãos de controle ambiental.

Dados topográficos da Bacia Hidrográfica da Pampulha, a montante da represa, foram obtidos na PRODABEL, para o município de Belo Horizonte, e junto à Prefeitura de Contagem, para a parte da bacia correspondente a este município. Eles foram consistidos pelo Laboratório de Geoprocessamento do CDTN/CNEN, tendo sido feita também uma delimitação das áreas de contribuição do escoamento superficial, pelas margens direita e esquerda, aos ribeirões Sarandí e Ressaca, entre as diversas estações operadas, o que é indicado pela cores na Figura 5.41. Cada região colorida foi delimitada pela união das sub-bacias dos cursos d'água (a montante de cada estação de medidas), definidas pelo algoritmo utilizado (IDRISI, 2000), incluindo aquela à qual

a referida estação de medidas pertence. Dessa forma, essa última sub-bacia, onde se localiza a estação, pode gerar uma área adicional a jusante da estação. Nessa figura são também mostradas as localizações das indústrias de Classe A (SUDECAP, 2000), referidas anteriormente, e que se situam nas sub-bacias dos ribeirões Sarandí e Ressaca.

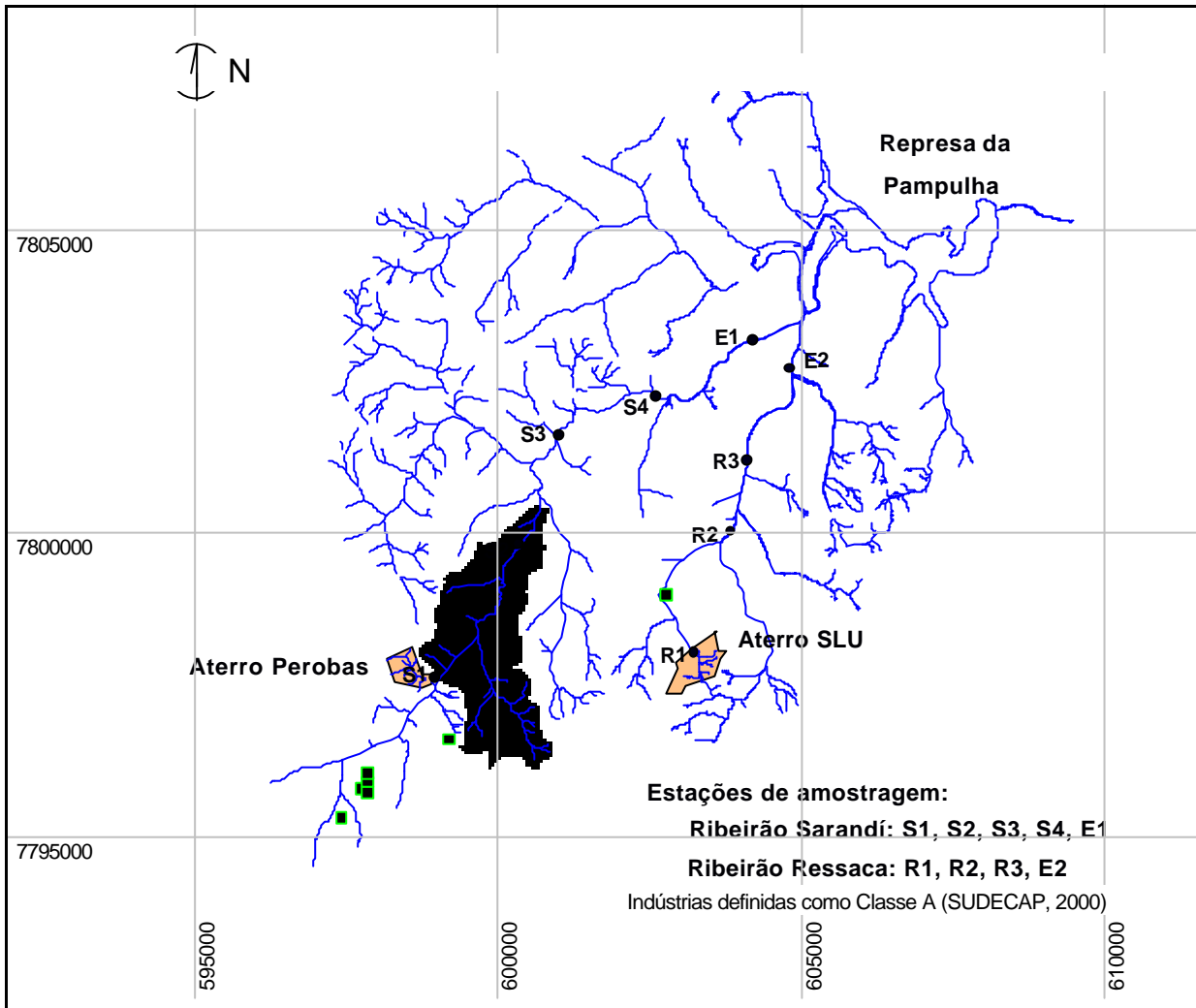


Figura 5.41 - Áreas de contribuição do escoamento superficial às estações de monitoramento, baseadas apenas no relevo topográfico.

A avaliação, a seguir, da distribuição de metais, será feita levando em consideração a sua ocorrência na água e no sedimento em suspensão, pelo fato de que a amostragem desses dois vetores de transporte de poluentes representa melhor o fluxo que passa em cada estação, ao contrário da amostragem de sedimento de fundo, feita em apenas um ponto de cada seção.



Como já comentado no Item 5.4.1.4, os principais metais presentes na água, foram: Al, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb e Zn. Entre estes:  $Zn > Cr > Ni > Cu$  são os que mais se destacam na caracterização do único Componente Principal (CP1) resultante da redução de dados fornecida pela Análise Multivariada.

No Item 5.4.1.6 foi mostrado que para o sedimento em suspensão, um dos três componentes principais obtidos pela redução dos dados, o CP2, apresenta, como mais destacados, os metais:  $Cu > Ni > Pb > Zn > Cr$ .

É interessante observar a coincidência da presença agrupada, nos componentes principais, dos metais Cr, Cu, Ni e Zn, e seu destaque na caracterização dos mesmos, tanto para a água quanto para o sedimento em suspensão. Com relação a estes metais, de origem eminentemente antrópica na Bacia Hidrográfica da Pampulha, dada a presença de várias indústrias, galvanoplastias, etc., é interessante ressaltar o seguinte:

- a sub-bacia do Ribeirão Sarandí apresenta-se como a de maiores teores desses metais na água (figuras 5.6 e 5.7) e no sedimento em suspensão (figuras 5.30 a 5.34), considerando toda a bacia hidrográfica da Pampulha e comparando-se com a sub-bacia do Ribeirão Ressaca, em particular, o que se acentuou, em geral, na coleta em época de chuva;
- ainda dentro da sub-bacia do Sarandí, conforme pode ser visto nas figuras antes referidas, os pontos de maiores entradas (picos) são: Estação 12 (S2), logo a jusante da CEASA, e Estação 13 (S3), na altura do parque linear da avenida sanitária construída ao longo do Ribeirão Sarandí (Figura 1.6);
- no Ribeirão Ressaca, ao contrário do Sarandí, não aconteceram picos acentuados em uma determinada estação de medidas; nota-se inclusive um crescimento progressivo nos teores metais, sobretudo no sedimento em suspensão, da Estação 21 (R1) para a Estação 24 (E2), mais caracterizado para a estação de seca e para o Cu, Ni e Pb, conforme as figuras 5.30 a 5.32 e a Tabela 5.2;
- a constatação do tópico anterior reflete a diferença de ocupação nas duas sub-bacias: 1) Sarandí, com indústrias de maior porte e concentradas a montante da Estação 12 (S2), como mostrado na Figura 5.41 para as indústrias Classe A (SUDECAP, 2000) e uma ocupação urbana descontinuada a jusante, que começou a se adensar mais a partir de 1999, com o

término da construção da avenida sanitária ao longo do Ribeirão Sarandí; 2) Ressaca, totalmente situada no município de Belo Horizonte, com indústrias de menor porte, porém praticamente toda tomada pela ocupação urbana e, portanto, com poluição por metais mais difusa que a anterior.

Considerando as observações anteriores e a Figura 5.41, pode-se afirmar que a principal região a montante da Represa da Pampulha a contribuir com metais para o sedimento em suspensão que a assoreia, é a parte alta da sub-bacia do Sarandí antes da Estação 12 (S2) (Figura 1.6), onde se concentram indústrias classificadas de Classe A, que já demandavam intervenção imediata por parte dos órgãos de controle ambiental (ESSE, 1996) citado em SUDECAP (2000).

#### **5.4.3 Comparação de teores de metais em sedimentos de fundo e em suspensão da Bacia Hidrográfica da Pampulha-com os de solos e de sedimentos de reservatórios brasileiros**

Na Tabela 5.15 são mostrados os valores de teores de metais de:

- sedimentos da superfície do fundo (0-2cm) de cinco represas do Estado de São Paulo;
- níveis de referência geológico geral;
- valores estabelecidos para sedimentos a serem dragados: segundo a Proposta de Resolução CONAMA (2003) e orientadores para solos, conforme CETESB (2001);
- sedimentos da superfície do fundo (0-12cm) da Represa da Pampulha (L) e de perfis (ASFPI);
- sedimentos de fundo, em suspensão e na água de cursos d'água a jusante dessa represa.

Em seguida é feita uma comparação de valores.

Tabela 5.15 - Comparação entre teores de metais em sedimentos de algumas represas paulistas, níveis de referência geológico geral, valores para sedimentos dragados propostos pelo CONAMA, valores orientadores da CETESB para solos e teores de metais encontrados em sedimentos da Bacia da Pampulha.

	Ag	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Sb	V	Zn
	Ppm	ppm	ppm	ppm	Ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
<b>Represa Billings</b> <sup>(a)</sup>	-	14	-	2,2	18	134	235	-	80	102	-	-	402
<b>Represa Rasgão</b> <sup>(a)</sup>	-	8	-	2,3	20	179	257	-	99	129	-	-	1215
<b>Represa Bariri</b> <sup>(a)</sup>	-	10	-	0,05	23	76	93	-	68	37	-	-	126
<b>Represa Barra Bonita</b> <sup>(a)</sup>	-	7	-	0,99	16	55	74	-	73	26	-	-	104
<b>Represa Promissão</b> <sup>(a)</sup>	-	20 ?	-	0,48	23	106	60	-	62	37	-	-	76
<b>Ref 1 - Turekian &amp; Wedepohl</b> <sup>(a)</sup>	-	13	-	0,3	19	90	45	0,4	68	20	-	-	95
<b>Ref 2 - Taylor</b> <sup>(a)</sup>	-	1,8	-	0,2	25	100	55	0,08	75	12	-	-	70
<b>CONAMA - nível 1</b>	-	5,9	-	0,6	-	37,3	35,7	0,17	18	35	-	-	123
<b>CONAMA - nível 2</b>	-	17	-	3,5	-	90	197	0,486	35,9	91,3	-	-	315
<b>Ref - CETESB</b>	0,25	3,5	75	< 0,5	13	40	35	0,05	13	17	< 0,5	275	60
<b>Alerta - CETESB</b>	2	15	150	3	25	75	60	0,5	30	100	2	-	300
<b>Interv. - CETESB/agric.</b>	25	25	300	10	40	300	100	2,5	50	200	5	-	500
<b>Interv. - CETESB/res.</b>	50	50	400	15	80	700	500	5	200	350	10	-	1000
<b>Interv. - CETESB/ind.</b>	100	100	700	40	100	1000	700	25	300	1200	25	-	1500
<b>Represa da Pampulha</b>													
L1 - 13/11/98 <sup>(b)</sup>	-	-	-	< 4	< 200	160	55	0,23	< 100	66	-	82	490
L1 - 19/12/01 <sup>(b)</sup>	-	-	410	-	9	87	290	< 0,005	-	-	-	58	340
L2 - 13/11/98 <sup>(b)</sup>	-	-	-	< 4	< 200	110	45	0,17	< 100	65	-	89	330
L2 - 19/12/01 <sup>(b)</sup>	-	-	380	-	9	180	280	< 0,005	-	-	-	65	750
L3 - 13/11/98 <sup>(b)</sup>	-	-	-	< 4	< 200	53	25	0,08	< 100	57	-	65	150
L3 - 19/12/01 <sup>(b)</sup>	-	-	440	-	7	98	280	< 0,005	-	-	-	66	290
L4 - 13/11/98 <sup>(b)</sup>	-	-	-	< 4	< 200	58	27	0,1	< 100	57	-	72	180
L4 - 19/12/01 <sup>(b)</sup>	-	-	440	-	7	110	260	< 0,005	-	-	-	61	300
L5 - 13/11/98 <sup>(b)</sup>	-	-	-	< 4	< 200	78	31	0,076	< 100	57	-	94	200
L5 - 19/12/01 <sup>(b)</sup>	-	-	440	-	8	110	300	< 0,005	-	-	-	77	350
L6 - 21/09/99 <sup>(b)</sup>	< 5	14	< 200	< 2,5	9,5	52	100	0,12	56	50	<1	11	260
L6 - 19/12/01 <sup>(b)</sup>	-	-	380	-	8	100	320	< 0,005	-	-	-	68	310
L7 - 21/09/99 <sup>(b)</sup>	< 5	< 2	< 200	0	10	80	130	0,22	52	51	<1	81	260
L7 - 19/12/01 <sup>(b)</sup>	-	-	390	-	8	100	360	< 0,005	-	-	-	76	350
ASFPI 1 - 16/10/98 <sup>(c)</sup>	-	-	-	< 4	< 200	55	25	0,062	< 100	53	-	68	130
ASFPI 2 - 16/10/98 <sup>(c)</sup>	-	-	-	< 4	< 200	40	14	0,048	< 100	37	-	43	60
ASFPI 3 - 16/10/98 <sup>(c)</sup>	-	-	-	< 4	< 200	25	6	0,027	< 100	28	-	< 30	30
ASFPI 4 - 16/10/98 <sup>(c)</sup>	-	-	-	< 4	< 200	54	21	0,062	< 100	49	-	71	100

Tabela 5.15 - Comparação entre teores de metais em sedimentos de algumas represas paulistas, níveis de referência geológico geral, valores para sedimentos dragados propostos pelo CONAMA, valores orientadores da CETESB para solos e teores de metais encontrados em sedimentos da Bacia da Pampulha (continuação).

	Ag	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Sb	V	Zn
	Ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
<b>Cursos d'água a jusante da Represa da Pampulha (valores de background)</b>													
<b>Ribeirão Pampulha</b>													
E4F - 19/10/99 <sup>(d)</sup>	< 5	2,2	640	< 2,5	8	65	45	0,34	41	48	< 1	54	160
E4F - 13/04/00 <sup>(d)</sup>	-	-	-	< 1	-	48	590	-	25	44	-	38	420
E4S - 04/11/99 <sup>(e)</sup>	-	-	-	< 3,5	-	60	160	-	53	53	-	30	780
E4S - 13/04/00 <sup>(e)</sup>	-	18	< 200	< 2	-	70	100	-	53	87	-	44	720
E4A - 19/10/99 <sup>(f)</sup>	-	-	-	< 0,004	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,5	< 0,01	< 0,02	-	< 0,04	< 0,01
E4A - 13/04/00 <sup>(f)</sup>	-	-	-	< 0,004	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 5E-5	< 0,01	< 0,04	-	< 0,04	< 0,01
<b>Ribeirão da Onça</b>													
E6F - 19/10/99 <sup>(d)</sup>	< 5	5,6	500	4,5	11	110	48000	< 0,03	130	74	< 1	51	23000
E6F - 14/04/00 <sup>(d)</sup>	-	-	-	3,2	-	110	8000	-	37	55	-	47	3700
E5S - 04/11/99 <sup>(e)</sup>	12	< 2	360	< 3,5	5,8	42	160	2,7	34	110	2,1	19	530
E5S - 13/04/00 <sup>(e)</sup>	< 5	98	380	2,1	6,9	49	200	1,1	36	120	2,1	28	760
E6S - 04/11/99 <sup>(e)</sup>	< 5	10	390	< 3,5	8,7	65	140	-	51	75	1,5	42	580
E6S - 14/04/00 <sup>(e)</sup>	< 5	6,1	680	< 2	15	67	41	0,31	38	70	< 1	70	250
E5A - 19/10/99 <sup>(f)</sup>	-	-	-	< 0,004	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,5	< 0,01	< 0,02	-	< 0,04	< 0,01
E5A - 13/04/00 <sup>(f)</sup>	-	-	-	< 0,004	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 5E-5	< 0,01	< 0,04	-	< 0,04	0,019
E6A - 19/10/99 <sup>(f)</sup>	-	-	-	< 0,004	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,5	< 0,01	< 0,02	-	< 0,04	< 0,01
E6A - 14/04/00 <sup>(f)</sup>	-	-	-	< 0,004	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 5E-5	< 0,01	< 0,04	-	< 0,04	< 0,01
<b>Rio das Velhas</b>													
E7F - 19/10/99 <sup>(d)</sup>	< 5	63	260	< 2,5	14	180	110	0,13	100	34	3,3	91	260
E7F - 14/04/00 <sup>(d)</sup>	-	-	-	< 1	-	160	590	-	51	39	-	58	420
E7S - 04/11/99 <sup>(e)</sup>	-	-	-	< 3,5	-	370	120	-	110	66	-	110	650
E7S - 14/04/00 <sup>(e)</sup>	< 5	65	750	< 2	34	320	55	0,28	100	47	5,8	980	200
E7A - 19/10/99 <sup>(f)</sup>	-	-	-	< 0,004	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,5	< 0,01	< 0,02	-	< 0,04	< 0,01
E7A - 14/04/00 <sup>(f)</sup>	-	-	-	< 0,004	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 5E-5	< 0,01	< 0,04	-	< 0,04	< 0,01

(a) NASCIMENTO & MOZETO (2001); (b) Amostras de sedimento da superfície do fundo da Represa da Pampulha; (c) Amostras de sedimento da ilha formada por despejo de dragagem no interior da Represa da Pampulha integradas, desde 0,5m da superfície, de 0,5 em 0,5m, até 3,0m de profundidade; (d) Amostras de sedimento de fundo a jusante da Represa da Pampulha; (e) Amostras de sedimento em suspensão a jusante da Represa da Pampulha; (f) Amostras de água superficial a jusante da Represa da Pampulha.

#### **5.4.4 Comparação: sedimento de fundo, em suspensão e na água da Bacia Hidrográfica da Pampulha com valores de CONAMA (2003) e de CETESB (2001)**

Para a comparação e classificação como elementos críticos, foram considerados os teores de metais - Nível 2 (limiar acima do qual espera-se efeito adverso à biota) da Proposta de Resolução do CONAMA (2003) e/ou os teores do valor de intervenção de CETESB (2001) para solos no Cenário Agrícola/Área de Proteção Máxima (APMax), que é o menor teor de intervenção dos três: Agrícola, Residencial e Industrial, considerados.

Nas comparações a seguir efetuadas, deve-se ter em conta a compatibilidade de valores. Os teores de metais determinados nos sedimentos de fundo, no presente trabalho, são referentes somente à fração fina ( $\phi < 74\mu\text{m}$ ) de amostras de sedimento, fracionadas por peneiramento e não a fração total, como preconizado no anexo da Proposta de Resolução do CONAMA (2003) (Item 2 - Análises Laboratoriais do material a ser dragado; 2ª Etapa - Caracterização Química). Os sedimentos em suspensão foram obtidos por amostragem da água e posterior decantação, conforme explicado no Item 5.2.1. Como é sabido, a maior parte dos metais, nutrientes e compostos orgânicos presentes nos sedimentos encontram-se fixados na fração mais fina devido às suas características físico-químicas e à maior superfície específica dos grãos, conforme a Figura 6 de BANDEIRA *et al.* (2002b) e FÖRSTNER & SCHOER (1984). Sendo assim, os teores aqui determinados deverão apresentar valores mais elevados que aqueles encontrados em amostras não fracionadas. Portanto, este fato deve ser considerado ao se estabelecer comparações entre esses teores.

##### 5.4.4.1 Represa da Pampulha

- Elementos críticos em sedimentos: Ba, Cr, Cu, Zn e provavelmente o Ni, devido ao limite alto para a análise das amostras colhidas em 1998.
- Regiões críticas: pontos "L" de 2001, sobretudo para Ba, Cr e Cu.

Entretanto, da lista de metais considerados como críticos pelas normas da CETESB (2001), conjuntamente com a Proposta de Resolução do CONAMA (2003) (Tabela 5.15), o sedimento da Represa da Pampulha não apresenta problemas quanto aos seguintes metais (Cd, Co, Hg, Pb e V). Para Ag, As e Sb, das dezoito amostras colhidas no interior da represa, apenas duas

tiveram estes elementos determinados e estes resultados foram sempre abaixo dos valores críticos.

#### 5.4.4.2 Jusante da represa

- Para os sedimentos de fundo os elementos críticos, são: As (Velhas), Ba (Onça), Cr (Onça e Velhas), Cu, Ni e Zn (Pampulha, Onça e Velhas).
- Para os sedimentos em suspensão os elementos críticos, são: As, Cu, Ni e Zn (Pampulha, Onça e Velhas), Ba (Onça e Velhas), Cr (Velhas), Pb (Onça).
- Regiões críticas: Onça e Velhas (o ponto E6, no Ribeirão da Onça, é o que apresenta maiores teores, sobretudo em Cu e Zn, para o sedimento de fundo).

Apesar dos sedimentos de fundo e em suspensão apresentarem alto grau de contaminação por metais, os teores destes metais na água estão dentro dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 20/86 para águas de Classe 3, como são classificadas por FEAM (2003), as águas do Ribeirão da Onça em sua foz e a do Rio das Velhas, entre a foz do Onça e a Estação BV137 (Figura 9.1), na Ponte Raul Soares. Isto está de acordo com os valores dos parâmetros físico-químicos medidos na água da bacia hidrográfica (Capítulo 9), que mostram ser ela um meio bastante redutor. Além disso, apesar de não ter sido medido, o teor em matéria orgânica nos cursos d'água é bastante alto devido ao despejo, nestes, do esgoto não tratado da região metropolitana de Belo Horizonte, o que facilita a adsorção dos metais.

#### **5.4.5 Comparação entre teores de metais dos sedimentos de fundo da Represa da Pampulha e de algumas represas paulistas; comparação com níveis de referência geológico geral e com valores de CONAMA (2003) e de CETESB (2001)**

Em relação às represas dos Estado de São Paulo, a Represa da Pampulha encontra-se:

- mais contaminada em Cr, Cu, Pb e Zn do que as represas Bariri, Barra Bonita e Promissão;
- menos contaminada em Pb do que as represas Billings e Rasgão.

Em relação aos níveis de referência geológico geral (Ref.1 e Ref.2 - Tabela 5.15) verifica-se o seguinte para as cinco represas paulistas e para a Represa da Pampulha:

- elementos críticos em todas elas: Cu, Pb, e Zn;
- principais elementos críticos apenas em determinadas represas: As (Represa Promissão); Cd e Cr (Billings e Rasgão); Ni (Billings, Rasgão e provavelmente também Pampulha, devido ao limite alto para a análise das amostras colhidas em 1998).

Em relação aos valores de CONAMA (2003) e de CETESB (2001), as represas apresentam:

- elemento crítico em todas elas: Ni (provavelmente também na Pampulha, devido ao limite alto para a análise das amostras colhidas em 1998);
- elementos críticos apenas em determinadas represas: As (Represa Promissão); Cr, Cu e Zn (Represas: Billings, Rasgão e Pampulha); Pb (Represas: Billings e Rasgão).

#### **5.4.6 Considerações sobre os critérios ambientais para solos e sedimentos e seu aprimoramento - Estabelecimento de uma metodologia para avaliação do impacto ambiental da dragagem da Represa da Pampulha**

Tendo em vista o que foi abordado até aqui, passa-se a considerar como os atuais critérios para solos e sedimentos podem ser utilizados como ferramentas para auxiliar no estabelecimento de uma avaliação racional do impacto ambiental, quanto a teores totais de metais, do despejo, nos cursos d'água a jusante, do sedimento fino a ser dragado na Represa da Pampulha.

A comparação dos teores de metais, do sedimento da Represa da Pampulha, com os valores orientadores nos diversos critérios, já estabelecidos, para a qualidade de solos, descritos no Capítulo 3, requer um certo grau de bom senso, pois, estes refletem a realidade de sedimentos/solos relativamente estáticos e, aqueles, de sedimentos dinâmicos (quando recolocados em suspensão) nos quais ocorre um rearranjo no equilíbrio entre as diversas espécies químicas envolvidas. Essa comparação exige, entre outras, a consideração dos seguintes fatores:

- capacidade de hidrotransporte dos cursos d'água, para sedimentos finos recolocados em suspensão (advecção, dispersão, diluição e decantação), o que foi medido, *in situ*, no presente trabalho, com a utilização de traçadores. Esse aspecto, que não é objeto de consideração nos critérios de qualidade de solos (estáticos) citados, nem foi considerado, até o presente, nos trabalhos desenvolvidos em QUALISED (2003) e em CONAMA (2003)

para sedimentos, deve ser realisticamente levado em conta, pela grande influência que exerce na dispersão dos sedimentos e, conseqüentemente, dos poluentes a eles associados);

- efeito, no presente caso, para o ecossistema em estudo, da grande capacidade de dispersão e diluição dos sedimentos a serem despejados, face ao aumento progressivo das vazões líquidas médias à jusante da represa: foz do Ribeirão da Onça -  $4,2\text{m}^3/\text{s}$  (HDC, 1999), (SUDECAP, 1999); vazões líquidas médias de longo termo (VMLT) como mostrado em LIMA *et al.* (2001) e LIMA & SANTOS (2002) para o Rio das Velhas: logo a montante da foz do Ribeirão da Onça -  $30\text{m}^3/\text{s}$ ; foz do Rio das Velhas -  $300\text{m}^3/\text{s}$ ; Rio São Francisco logo a montante do Rio das Velhas -  $860\text{m}^3/\text{s}$  e Rio São Francisco logo a montante do limite de remanso da Represa de Sobradinho -  $2600\text{m}^3/\text{s}$ . Observa-se, assim, um grande potencial de diluição e de restabelecimento de equilíbrio do ecossistema, o que leva a uma redução das possibilidades de impactos na biota. Como exposto no Capítulo 3, os critérios holandeses e norte-americanos para solos incorporam fatores de atenuação natural pela diluição dos contaminantes ("*Dilution Atenuation Factor*" - DAF, no caso norte-americano e valores de teores que não podem ser excedidos, em média, em um volume de  $25\text{m}^3$  de solo/sedimento ou em  $100\text{m}^3$  de água subterrânea, no caso holandês, para a situação de intervenção). A poluição em água subterrânea é, geralmente, muito mais crítica que em água superficial, devido à menor taxa de mobilidade daquela e à maior dificuldade para os trabalhos de remediação;
- valores de referência (*background*) dos cursos d'água a jusante - o levantamento de valores de referência para metais nos cursos d'água a jusante da barragem é de grande importância, pois, com eles pode-se fazer um monitoramento do impacto causado pela dragagem, através da comparação entre os teores de *background*, no sedimento a ser dragado na represa e nos sedimentos (de fundo e em suspensão) e na água superficial a jusante, antes, durante ou após a dragagem. Existe uma certa analogia entre este *background* e aquele para solos contaminados e não contaminados, como em CETESB (2001) e NASCIMENTO & MOZETO (2001, 2002);
- compatibilidade de valores, como mencionado no segundo parágrafo do Item 5.4.4;
- parâmetros físico-químicos (OD, temperatura, pH, condutividade e Eh) das águas dos cursos d'água a jusante da represa - estes parâmetros exercem grande influência na toxicidade dos metais no ambiente aquático, uma vez que influenciam diretamente na forma química destes



metais. Os impactos ambientais nocivos dos metais nos ecossistemas são mais fortes quando estes estão presentes na forma livre (espécies iônicas) solubilizados na água, uma vez que a sua disponibilidade para reagir com diversos compostos orgânicos e inorgânicos dos organismos vivos é maior, podendo haver a bioacumulação e biomagnificação nesses seres;

- no caso de dragagem de reservatórios, com transposição dos sedimentos para os cursos d'água a jusante, um aspecto importante a ser levado em consideração, além da capacidade dispersora do ecossistema em estudo, é a existência de represas a jusante (sua distância da represa sendo dragada, suas condições ambientais atuais, suas finalidades operacionais com os conseqüentes volumes de reservação necessários, etc.). No presente caso, a Represa de Sobradinho, a primeira à jusante da Represa da Pampulha, na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, encontra-se a cerca de 1400km desta e é usada, sobretudo, para a geração de energia elétrica, tendo um reservatório com superfície de cerca de 4000km<sup>2</sup> (10km de largura, em média, por cerca de 400km de comprimento);

Relativamente ao tópico anterior, um aspecto a ser ainda abordado mais detalhadamente no presente trabalho, é o da manutenção da descarga sedimentar, pelo menos de sedimentos finos, junto com os quais se encontra, sobretudo, a matéria orgânica e nutrientes, do mesmo modo que a coletividade se preocupa com a manutenção da descarga líquida, quando se constróem reservatórios. Se a água é vital para as atividades de irrigação, consumo, recarga do lençol freático e outras, o sedimento fino, com a matéria orgânica e os nutrientes associados, é também vital para a manutenção da biota aquática. Assim, nos estudos ambientais deve-se considerar, em bacias hidrográficas onde existam reservatórios, a manutenção do fluxo sedimentar para jusante, pelo menos de sedimentos finos que são, naturalmente, mais facilmente hidrotransportáveis.

As informações geradas pelo presente trabalho auxiliarão nos seguintes aspectos:

- estabelecimento de uma base de dados com valores de teores de metais e outros elementos para toda a Bacia Hidrográfica da Pampulha, bem como o levantamento de pontos críticos de contaminação, através de estudos georeferenciados (já abordados no item 5.4.2), sobretudo na região a montante da represa, colaborando assim no sentido de que os futuros sedimentos finos que venham a assorear e sejam dragados no interior mesma, contenham menores teores de metais e outros poluentes. Eles poderão, então, ser classificados como

sedimentos mais limpos, conforme o Artigo 3º da Proposta de Resolução do CONAMA (CONAMA, 2003) e a Tabela III (Níveis de Classificação do Material a ser Dragado) do anexo a esta Proposta de Resolução. Isto facilitará o licenciamento ambiental para a disposição do sedimento dragado da Represa da Pampulha;

- estabelecimento de metodologias que permitam prever, de modo prático e quantitativo, através do emprego, simultâneo ou não, de traçadores ambientalmente amigáveis (e.g.  $^{99m}\text{Tc}$  marcando o sedimento fino e Rodamina WT marcando a água), a dispersão, diluição e sedimentação de poluentes adsorvidos em sedimentos finos em cursos d'água, bem como promover o entendimento da capacidade de regeneração do corpo d'água ao receber uma certa carga de sedimentos finos, contribuindo para uma consideração mais adequada dos aspectos físicos da dinâmica do sedimento despejado em meio líquido, e um possível futuro aperfeiçoamento da redação do Art. 7º - Inciso II, da Proposta de Resolução (CONAMA, 2003), já discutida no Capítulo 3. Isto, juntamente com o estudo da capacidade de retenção dos metais nos sedimentos mobilizados pela dragagem, avaliada pela medição dos parâmetros físico-químicos das águas superficiais no corpo receptor e com a comparação dos teores de metais nos sedimentos a serem descarregados e nos já existentes no sedimento de fundo, no sedimento em suspensão e na água superficial a jusante, certamente contribuirá na realista e criteriosa avaliação do impacto ambiental do despejo de dragagem, em cada caso. Estes estudos podem ser incluídos na normatização, a cargo do IBAMA, do monitoramento das áreas de dragagem e de disposição, como preconizado no Artigo 10º da Proposta de Resolução (CONAMA, 2003).

## 6 DESENVOLVIMENTO DO $^{99m}\text{Tc}$ COMO TRAÇADOR PARA SEDIMENTO FINO EM SUSPENSÃO

### 6.1 Introdução

Os trabalhos realizados no Uruguai (Item 3.5.2) constituíram a centelha que disparou o processo de marcação do sedimento fino com  $^{99m}\text{Tc}$ , cujo desenvolvimento efetivo foi realizado no quadro da presente tese.

Os objetivos gerais do desenvolvimento em questão, foram:

- estender o uso do  $^{99m}\text{Tc}$ , já amplamente utilizado como traçador para diagnósticos em Medicina Nuclear, como traçador para diagnósticos ambientais em estudos sedimentológicos relacionados com o comportamento de sedimentos finos em suspensão em meio líquido;
- permitir que países que não possuam reatores nucleares mas que recebam o  $^{99m}\text{Tc}$  para aplicações médicas possam fazer uso do mesmo em Sedimentologia, tendo em conta as possibilidades oferecidas por este traçador, com relação à sua meia vida e energia da radiação a emitir;
- possibilitar, com o emprego de um traçador radioativo de fácil obtenção e manipulação, com flexibilidade de aplicação e boa aceitação pública, como o  $^{99m}\text{Tc}$ , o incremento dos experimentos sedimentológicos com a utilização dos traçadores radioativos expressamente adicionados, nos estudos da dinâmica de sedimentos finos em suspensão, os quais têm sido reduzidos, devido às dificuldades de obtenção e manipulação em trabalhos de campo, de outros traçadores radioativos até agora utilizados, como:  $^{198}\text{Au}$ ,  $^{46}\text{Sc}$  e  $^{51}\text{Cr}$ , que necessitam de irradiação a cada vez que são utilizados, o que não ocorre com o  $^{99m}\text{Tc}$ .

O objetivo específico do desenvolvimento da marcação de sedimento fino com  $^{99m}\text{Tc}$  foi o estudo *in situ* da dinâmica de sedimentos finos em suspensão, a jusante da barragem da Pampulha, para a avaliação dos impactos ambientais de um possível despejo de material dragado da represa, nos cursos d'água. Tanto é que o material fino escolhido para a marcação e ensaios de decantação (BANDEIRA *et al.* 1999a) (BANDEIRA *et al.* 1999b) (BANDEIRA, 2001) (BANDEIRA *et al.* 2002a) (BANDEIRA *et al.* 2002b), foi o sedimento de fundo da

represa. Esta pesquisa, pioneira a nível mundial, acrescenta um novo traçador radioativo de meia vida curta (< 3dias) para utilização em estudos de dinâmica de sedimentos finos em suspensão, fato que não ocorria desde a década de 70 (BOUGAULT, 1970), (CAILLOT, 1973), (CAILLOT *et al.* 1978).

No ambiente aquático, metais e muitos compostos orgânicos estão normalmente associados aos sedimentos finos (silte e argila). O destino desses contaminantes é, então, associado ao comportamento dinâmico dos sedimentos finos em suspensão e aos sedimentos finos de fundo. O estudo do comportamento dos sedimentos em suspensão é uma atividade a ser incluída em muitos estudos ambientais. De especial interesse é o estudo das descargas individuais de contaminantes associados ao sedimento em suspensão, a dispersão de curto prazo de material contaminado dragado em portos e reservatórios, quando despejados em corpos d'água, e o comportamento do sedimento natural em suspensão em rios, reservatórios, baías e estuários.

O acompanhamento por algumas horas do sedimento contaminado em suspensão introduzido no meio aquático por descargas individuais ou contínuas pode possibilitar, em alguns casos, a determinação quantitativa *in situ* da advecção, dispersão, diluição e taxa de sedimentação (AUN & BANDEIRA, 1995). Estes parâmetros são importantes para responder questões específicas, como o comportamento da descarga, em cursos d'água a jusante, de material dragado na Represa da Pampulha e também para a calibração e validação de modelos hidrodinâmicos os quais consideram, simultaneamente, as fases sólida e líquida.

Assim, para uma avaliação do possível impacto ambiental, decorrente do despejo nos cursos d'água a jusante, de material fino (silte e argila), dragado na represa, é importante efetuar medições prévias, *in situ*, do transporte de sedimento em suspensão que seria oriundo deste despejo e do escoamento líquido que o conduz. Havendo a disponibilidade de um traçador para a água e outro para o sedimento fino em suspensão, sendo simultaneamente utilizados, tais medições poderão ser efetuadas em trechos selecionados dos cursos d'água da bacia, obtendo-se assim informações valiosas sobre a vazão líquida durante o processo, a advecção, dispersão, diluição e a tendência deposicional dos sedimentos em suspensão ali despejados, o que dará subsídios para o licenciamento ou não deste tipo de descarte (CHAMPS, 1992), (DT ENGENHARIA, 1997b).

Para marcar a água, a Rodamina WT (traçador fluorescente) é largamente aplicada. Ela não é adsorvida pelos materiais sólidos presentes no sistema (SUIJLEN & BUYSE, 1994).

No caso de sedimentos finos, os traçadores radioativos são os únicos que se prestam para a sua marcação, pois não alteram as suas propriedades físico-químicas, são facilmente detectáveis e produzem marcação mássica, o que possibilita a obtenção de resultados quantitativos nos experimentos. Alguns deles, tais como:  $^{198}\text{Au}$  ( $T_{1/2}$  2,7d,  $\gamma = 410\text{keV}$ );  $^{46}\text{Sc}$  ( $T_{1/2}$  83,2d,  $\gamma = 890/1120\text{keV}$ ) e  $^{51}\text{Cr}$  ( $T_{1/2}$  27,7d,  $\gamma = 320\text{keV}$ ) têm sido empregados para estudar a dinâmica dos sedimentos em suspensão. A técnica de marcação consiste na fixação do traçador, em uma forma química apropriada, ao sedimento (BOUGAULT, 1970). A utilização desses traçadores, ao contrário do  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , requer irradiações específicas em reatores nucleares, o que limita o seu amplo uso em regiões longínquas, sobretudo para o  $^{198}\text{Au}$  que possui meia vida relativamente curta, além deles exigirem blindagens mais pesadas, devido à maior energia da radiação  $\gamma$  emitida por estes radioisótopos.

O  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , como já abordado anteriormente, tem-se mostrado promissor para utilização em Sedimentologia Dinâmica, pela sua meia vida adequada a estes estudos e à baixa energia da radiação  $\gamma$  emitida (140keV), o que facilita o seu manuseio, com blindagens mais leves, sua facilidade de obtenção, flexibilidade de utilização e baixo preço (um gerador, produzido no Brasil e com atividade inicial de 1Ci custa cerca de US\$ 350,00).

Nos estudos efetuados no presente trabalho obteve-se o traçador grátis, utilizando-se geradores de segunda semana, emprestados por laboratórios de Medicina Nuclear. Toda semana os laboratórios recebem um novo gerador. Aquele da semana anterior, com atividade residual de 16,77% da atividade inicial, tendo em conta a meia vida do  $^{99}\text{Mo}$ , é somente utilizado se o laboratório tem que fazer muitos exames. Caso contrário, o material decai e o gerador é devolvido para ser renovado. Além disso, há o importante fator da aceitação pública para esta nova aplicação no meio ambiente pois, este mesmo traçador é injetado por via endovenosa em seres humanos, em exames de Medicina Nuclear.

O  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , já tem sido usado como traçador de água em estudos hidrológicos de curta duração (GARCIA-AGUDO, 1997), (BORROTO *et al.* 1999), (AIREY *et al.* 2003), (BORROTO, 2004), na forma não reduzida de pertecniato ( $\text{TcO}_4^-$ ). Uma limitação ao seu uso em estudos

hidrológicos é que pouca informação sobre seu comportamento em meio hídrico é disponível. É sabido que em condições anaeróbias acentuadas, o Tc(VII) pode ser reduzido a Tc(IV), o que pode limitar o seu uso como um traçador conservativo para estudos hidrológicos em rios altamente poluídos e descargas com estas características. É precisamente a sua forma reduzida que interessa para a marcação de sedimento fino (BANDEIRA *et al.* 1999a, 1999b), pois que o sedimento fino é eletronegativo (MIGNIOT, 1968).

A utilização deste novo traçador em Sedimentologia, marcando sedimentos finos, com todas as facilidades já mencionadas anteriormente, é um grande trunfo na mão dos pesquisadores, pois será uma ferramenta para estudar, a nível quantitativo e *in situ*, questões como:

- advecção, dispersão, diluição e taxa de sedimentação de descargas de sólidos em suspensão em corpos d'água, testando diretamente a capacidade de hidrotransporte, para sedimentos finos em suspensão, de condutos e canalizações de drenagem urbana. Na bacia da Pampulha os sedimentos finos são a maioria, constituindo cerca de 70% do material de assoreamento da Represa da Pampulha (OLIVEIRA, 1996), (DT ENGENHARIA, 1997b). Além disto, tem-se um modo de seguir, no tempo e no espaço, este veículo que transporta a quase totalidade dos metais em sistemas hídricos (FÖRSTNER & SCHOER, 1984);
- estudo da eficiência hidráulica de determinados trechos do sistema de drenagem urbana quanto ao transporte de sedimentos finos. Assim, para uma determinada atividade injetada, e fazendo-se a sua detecção em pelo menos duas seções *A* (a montante) e *B* (a jusante), através das contagens integradas (áreas debaixo das curvas de passagem nas duas seções), pode-se quantificar se houve deposição entre as seções. Se a contagem integrada em *B* for menor que em *A*, significa que parte do sedimento marcado ficou retida no intervalo compreendido entre as duas seções (Capítulo 9). Assim, poderemos calcular o assoreamento que se produz e o funcionamento daquele trecho para as condições hidráulicas, hidrodinâmicas e sedimentológicas existentes durante o experimento. Fazendo experimentos para distintas condições hidráulicas, hidrodinâmicas e sedimentológicas, poderemos ter um conhecimento aprofundado do sistema e tirar ensinamentos para corrigir falhas e/ou subsidiar melhores projetos de sistemas de drenagem urbana no futuro;
- a utilização de traçadores em experimentos marcando, simultaneamente, o sedimento fino com  $^{99m}\text{Tc}$ , e a água que o transporta com Rodamina WT. Isto se reveste da mais alta

importância para Belo Horizonte, tendo em vista os cruciais problemas do desassoreamento da Represa da Pampulha, os problemas em toda a malha hídrica da bacia, com enchentes catastróficas ocorrendo a cada período chuvoso.

A obtenção de um traçador como o  $^{99m}\text{Tc}$  para sedimentos finos em suspensão terá também ampla repercussão nos mais variados estudos ambientais onde o comportamento desses sedimentos é importante:

- avaliação do impacto ambiental do despejo de dragagem de sedimentos finos altamente contaminados, dragados em portos, estuários e canais de acesso;
- estudo do comportamento de sedimentos finos ao adentrar em reservatórios;
- estudo da dispersão, advecção, diluição e taxa de sedimentação de descargas industriais de natureza sólida, passíveis de serem marcadas com o  $^{99m}\text{Tc}$ . Aí está um grande filão para pesquisas e desenvolvimentos acadêmicos de importante aplicação, nas áreas de Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

## **6.2 Metodologia**

A metodologia para a validação do uso do  $^{99m}\text{Tc}$  como traçador de sedimentos finos em suspensão foi dividida em duas partes, mostradas a seguir.

1- Execução de testes de laboratório para se estudar a fixação do radioisótopo ao sedimento com diâmetro  $\phi < 63\mu\text{m}$ , através de redução química com  $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , sendo realizados testes para se estudar:

- a variação da fixação do traçador com o tipo e a massa de redutor;
- a influência do pH na fixação;
- a influência da concentração;
- a influência do tempo de contato na marcação;
- a fixação em função da turbulência do meio hídrico.

Os resultados dessa pesquisa foram publicados em BANDEIRA *et al.* (1999a, 1999b) e serão também mostrados no item 6.3.1.

2- Estudo da influência da marcação no comportamento hidrodinâmico do sedimento fino em suspensão, através da comparação da sedimentação do sedimento marcado e não marcado. Foi efetuado no laboratório de Sedimentologia do CDTN, em provetas de 1L, utilizando a técnica da pipeta de Andreasen (BOUGAULT, 1970), (CAILLOT *et al.* 1978). Os resultados desse estudo foram publicados em BANDEIRA (2001) e BANDEIRA *et al.* (2002a), sendo também apresentados no item 6.3.2, pois foram também desenvolvidos para a presente tese.

## 6.3 Resultados

### 6.3.1 Estudos de fixação do $^{99m}\text{Tc}$ ao sedimento fino da Represa da Pampulha

#### 6.3.1.1 Química do tecnécio

O  $^{99m}\text{Tc}$  é eluído do  $^{99}\text{Mo}$  em geradores comerciais como pertecniato ( $\text{TcO}_4^-$ ). Suas propriedades químicas são muito mais relacionadas ao rênio do que ao manganês. Seus estados de oxidação mais estáveis são: Tc(VII) e Tc(IV). O íon pertecniato é um agente de oxidação fraco (SCHWOCHAU, 1983). Na Tabela 6.1 são apresentados os potenciais normais de oxirredução para algumas espécies químicas do Tc e Mn (BARD *et al.* 1985).

Tabela 6.1 - Potencial normal de oxirredução para Mn e Tc

Semi-reação	X = Tecnécio	X = Manganês
$\text{XO}_4^-(\text{aq}) + 4\text{H}^+ + 3\text{e}^- = \text{XO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	0,738V	1,695V
$\text{XO}_4^-(\text{aq}) + 2\text{H}^+ + \text{e}^- = \text{XO}_3 + \text{H}_2\text{O}$	0,700V	0,564V
$\text{XO}_3 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{XO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	0,757V	2,26V

O potencial real para a redução do pertecniato, em condições normais de trabalho, onde sua concentração é muito menor (i.e.,  $10^{-8}$  to  $10^{-10}\text{M}$ ), é próximo a 0V. Em consequência, redutores mais fortes são necessários para transformar Tc(VII) em Tc(IV).



Os dois agentes redutores preferidos para a redução do Tc(VII) são Sn(II) e Zn(Hg) (VINE & WAHL, 1982). A redução do Tc(VII) com Sn(II) é produzida de acordo com as seguintes equações (SEKINE *et al.* 1993):



Em solução aquosa, um composto coloidal é formado após a redução.



Provavelmente, esse composto coloidal é a espécie química a qual é adsorvida no sedimento fino, após a redução do pertecniato.

### 6.3.1.2 Estudos em laboratório

Para os estudos foi feita uma composição com os sedimentos colhidos em 1999 nas estações L1 a L5 (Figura 5.1), entre a Ilha dos Amores e o Iate Tênis Clube. O sedimento foi peneirado a úmido e secado ao ar. A fração com diâmetro  $\phi < 63\mu\text{m}$ , foi usada em todos os experimentos.

#### 6.3.1.2.1 Redução do pertecniato

Três diferentes agentes redutores foram testados em laboratório:

- cloreto estanoso -  $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ;
- cloridrato de hidroxilamina -  $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ ,
- tiosulfato de sódio -  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ .

Zn(Hg), um possível agente redutor recomendado em VINE & WAHL (1982), não foi usado devido à possibilidade de adsorção das espécies reduzidas de Tc na amálgama, o que poderia causar a diminuição do rendimento do processo.

Três séries de bequeres, contendo 100mg de sedimento em 30mL de água, foram preparados. Cada série consistiu de quatro amostras, nas quais diferentes quantidades de agente redutor (5, 10, 15 e 20mg) foram adicionados. Elas foram agitadas durante cinco minutos e depois filtradas. A atividade residual na solução foi comparada com o padrão. Os resultados são mostrados na

(Figura 6.1). Pode ser observado que somente o Sn(II), entre os redutores testados, foi capaz de reduzir o pertecniato.

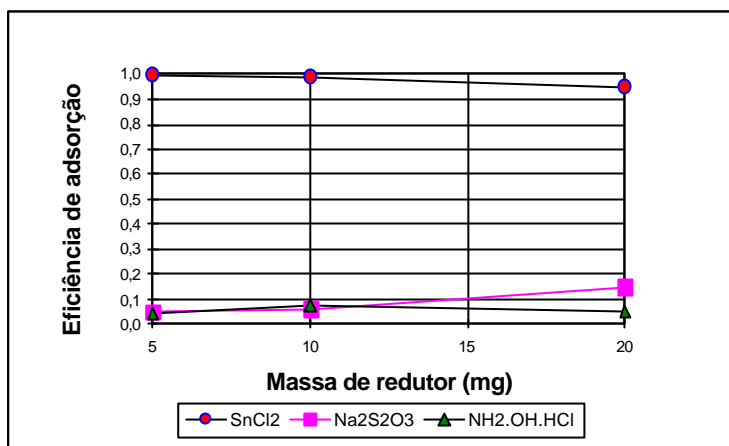


Figura 6.1 - Efeito da natureza do agente redutor na adsorção do <sup>99m</sup>Tc no sedimento fino

Devido à concentração extremamente baixa do Tc na solução de marcação, baixas concentrações do agente redutor são necessárias para reduzir o pertecniato. Entretanto, deve-se tomar cuidado na marcação em estudos de campo, quando se utiliza água do local, devido à eventual presença de oxidantes, especialmente em água que pode estar poluída com rejeitos industriais. Aumentando-se a concentração do agente redutor há uma diminuição na eficiência da adsorção, possivelmente devido à competição dos cátions de Sn(II) com as espécies reduzidas de Tc pelos pontos ativos no sedimento (Figura 6.2).

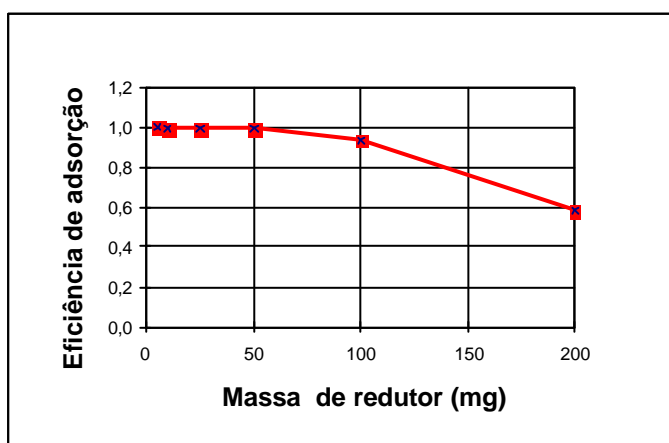


Figura 6.2 - Variação da adsorção do <sup>99m</sup>Tc em 100 mg de sedimento com a massa de SnCl<sub>2</sub>

### 6.3.1.2.2 Influência do pH

O abaixamento do pH acarreta uma redução na adsorção do traçador. Isto pode ser explicado por mudanças na estrutura química do composto de Tc (IV) ou pela competição dos ions de  $H^+$  com as espécies reduzidas de Tc pelos locais ativos no sedimento. Com  $pH = 0$ , quase não se observa adsorção. Para aplicações práticas, o pH da solução de marcação deve ser superior a 5, que é a faixa encontrada na maioria dos ambientes aquáticos naturais (Figura 6.3).

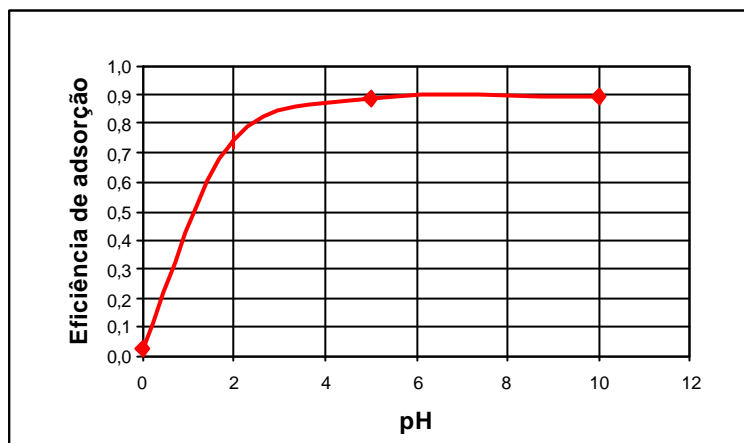


Figura 6.3 - Efeito do pH na adsorção do  $^{99m}Tc$  pelo sedimento fino

### 6.3.1.2.3 Concentração do sedimento

O aumento da concentração de sedimento durante o processo de marcação acarreta um aumento na eficiência de adsorção. Os maiores valores foram obtidos com concentrações maiores que 15g/L (Figura 6.4).

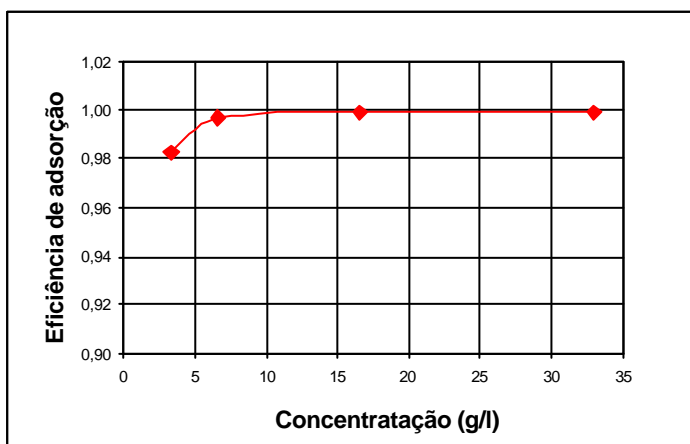


Figura 6.4 - Influência da concentração na adsorção do  $^{99m}Tc$  pelo sedimento fino

#### 6.3.1.2.4 Tempo de contato

A adsorção das espécies reduzidas de  $^{99m}\text{Tc}$  não é instantânea, mas bastante rápida. Nos testes conduzidos em laboratório, foi obtida eficiência de marcação superior a 95%, agitando-se o sedimento em presença da solução de Tc (IV) por, no mínimo, 5 minutos (Figura 6.5).

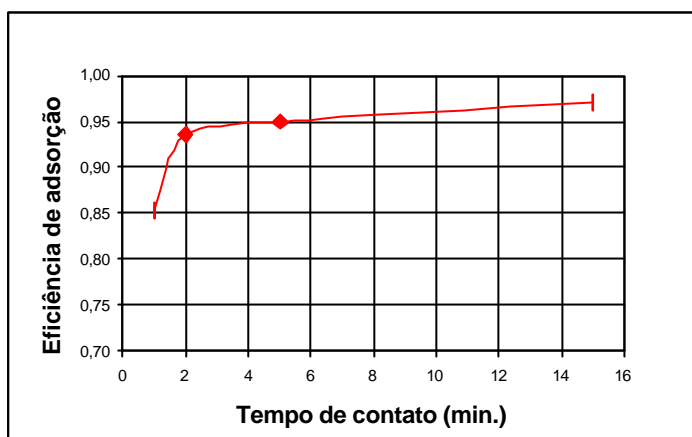


Figura 6.5 - Influência do tempo de contato na adsorção do  $^{99m}\text{Tc}$  pelo sedimento fino

#### 6.3.1.2.5 Dessorção do $^{99m}\text{Tc}$

Após a marcação, o sedimento foi centrifugado por 5 minutos; a fase aquosa foi separada e a atividade residual de  $^{99m}\text{Tc}$ , na solução, foi medida. A atividade no sedimento foi calculada por diferença. O sedimento marcado foi ressuspensionado em 500mL de água do rio e agitado por duas horas. O aumento de atividade na água, em função do tempo, foi medido. O teste foi efetuado para três concentrações diferentes de sedimento em suspensão (50, 200 e 1000mg/L), na faixa normalmente encontrada em cursos d'água naturais. A perda foi menor que 10% (Figura 6.6).

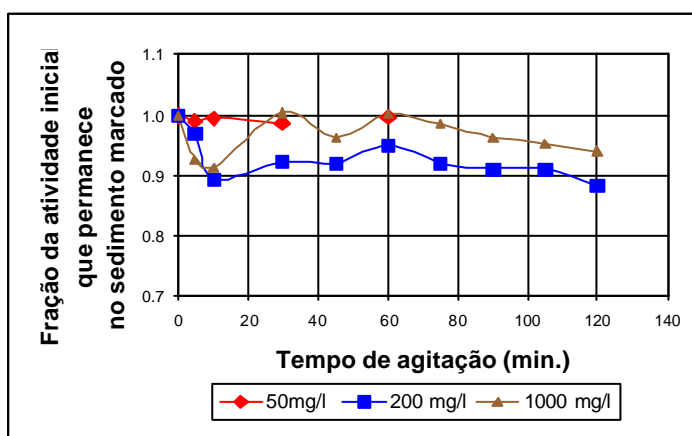


Figura 6.6 - Dessorção do  $^{99m}\text{Tc}$  para várias concentrações de sedimento fino em suspensão

## 6.3.2 Estudo da influência da marcação no comportamento hidrodinâmico do sedimento fino em suspensão

### 6.3.2.1 Introdução

Após os estudos de fixação do  $^{99m}\text{Tc}$  ao sedimento fino e tendo sido mostrado que o tecnécio não se solta do mesmo durante o seu emprego nos trabalhos de campo, a validade da utilização do traçador assim formado (o sedimento marcado), representando o sedimento natural em estudos de campo, exige um igual comportamento hidrodinâmico ao desse sedimento natural.

Dessa forma, foram realizados em laboratório estudos comparativos dos dois tipos de sedimento, adotando-se como comparação a sedimentação de ambos em água parada, realizando testes através da técnica da Pipeta de Andreasen (Figura 6.7). A marcação sem floculação, a qual produz o mesmo comportamento de sedimentação para o sedimento marcado e não marcado, foi somente alcançada empregando-se pequenas quantidades de  $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  dissolvido proporcionalmente em pequenos volumes de HCl (0.3%), para a redução do  $^{99m}\text{TcO}_4^-$  eluído de um gerador de  $^{99m}\text{Tc}$ .

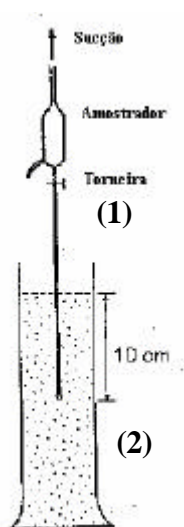


Figura 6.7 - Pipeta de Andreasen (1), proveta (2)

### 6.3.2.2 Considerações sobre os sedimentos finos

Segundo a escala Wentworth para a classificação de sedimentos (U.S. Army - C.E.R.C., 1975), sedimentos finos ou pelíticos, geralmente denominados lama, são aqueles cujo diâmetro é

menor que  $62,5\mu\text{m}$ . Eles são compostos por frações de silte ( $3,9\mu\text{m} < \phi < 62,5\mu\text{m}$ ), argila ( $0,2\mu\text{m} < \phi < 3,9\mu\text{m}$ ) e colóide ( $\phi < 0,2\mu\text{m}$ ).

Em geral, estes sedimentos contém componentes minerais e orgânicos, os primeiros sendo presentes em maiores proporções. Uma lama particular é caracterizada por seus diferentes componentes e também por sua distribuição granulométrica ou por sua curva de sedimentação. O estado coloidal é caracterizado pelo equilíbrio entre as partículas carregadas em suspensão e os íons em solução. Se a concentração iônica no ambiente muda, ou se as partículas de sedimento adsorvem alguns materiais, o equilíbrio da suspensão pode ser perdido ou mudado, produzindo floculação ou defloculação (BOUGAULT, 1970). Estas propriedades coloidais da lama são responsáveis pela sua sensibilidade a agentes externos e algumas propriedades físicas da suspensão podem ser modificadas, tal como sua velocidade de sedimentação, em função do teor de sal do ambiente.

Para estudar a dinâmica dos sedimentos finos em suspensão, não é fácil encontrar outros traçadores que se comparam com os radiotraçadores. A técnica de marcação consiste em garantir a adsorção, pelo sedimento, do traçador em uma forma química apropriada, quando dois aspectos devem ser levados em consideração (BOUGAULT, 1970):

- o tratamento químico deve ser o mais suave e simples possível;
- a semelhança do comportamento do sedimento marcado e do natural deve ser garantida.

O estudo da fixação da lama com  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  e a influência de vários parâmetros neste processo, já foi apresentado no item 6.3.1. A semelhança do comportamento dos dois tipos de sedimento (marcado e não marcado) deve ser comparada através dos testes de sedimentação utilizando a técnica da Pipeta de Andreasen, que permite medir a sua velocidade de sedimentação, em água parada, relacionando a porcentagem de massa acumulada em função da velocidade de queda das partículas, ou de seu diâmetro.

Segundo MIGNIOT (1968), aplicando a Lei de Stokes, esta velocidade de queda pode ser caracterizada por um diâmetro equivalente de uma esfera de mesma massa específica, que tenha a mesma velocidade de queda do sedimento natural em água destilada a  $20^{\circ}\text{C}$  (viscosidade cinemática:  $\nu = 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ ). Como primeira aproximação, o diâmetro equivalente de uma

partícula fina com massa específica na faixa de  $2,5 \times 10^3$  a  $2,6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  pode ser considerado como:

$$d = W^{1/2} \quad (6.3)$$

onde:

$d$  = diâmetro de Stokes ( $\mu\text{m}$ );

$W$  = velocidade de queda do sedimento natural ( $\mu\text{m/s}$ ).

### 6.3.2.3 Estudos em laboratório

O mesmo tipo de material colhido na Represa da Pampulha, utilizado para os estudos de fixação do  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  (item 6.3.1), foi utilizado nos estudos comparativos do comportamento hidrodinâmico do sedimento marcado e não marcado. O material foi também peneirado a úmido e deixado secar em temperatura ambiente. A fração com diâmetro  $\phi < 62,5 \mu\text{m}$  foi usada em todos os experimentos, os quais foram realizados em temperatura ambiente, nas dependências do Laboratório de Sedimentologia, pertencente ao Serviço de Meio Ambiente e Técnicas Nucleares, do CDTN.

Os testes de sedimentação foram realizados usando uma proveta de 1L e pipetas de Andreasen (Figura 6.7), e suspensões com concentração inicial fixa de sedimento ( $C_0 = 5\text{g/L}$ ). Segundo MIGNIOT (1968) e BOUGAULT (1970), a sedimentação da suspensão não é entravada para concentrações iguais ou menores que essa.

O estudo comparativo começou com uma primeira série de testes de sedimentação do sedimento natural em água destilada, utilizando duas provetas de 1L de capacidade, de modo a verificar a reprodutibilidade dos resultados.

A segunda série de testes de sedimentação, também utilizando duas provetas, foi realizada com o sedimento marcado com  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , na presença de 0,5mL de HCl (10%) e 50mg de  $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Uma atividade de  $4,07 \times 10^8 \text{ Bq}$  foi empregada para a marcação de 5g de sedimento. 50mL dessa solução foi então colocada diretamente dentro de um erlenmáier já contendo o sedimento fino em 960mL de água destilada. A solução foi então agitada por 5min de modo a garantir a adsorção, como indicado na Figura 6.5 e em BANDEIRA *et al.* (1999a, 1999b). Antes de

transferir a solução para a proveta, foi retirada uma alíquota de 10mL. Esta amostra, correspondendo à concentração inicial  $C_0$ , foi usada para calcular a massa relativa de cada amostragem subsequente. O rendimento da adsorção para esta segunda série de testes de sedimentação foi alto, mas ocorreu uma notável floculação.

Desse modo, duas novas séries de testes foram efetuadas, tentando suprimir a floculação e ainda assim assegurar um alto rendimento da marcação. Dois procedimentos distintos para alcançar este duplo objetivo foram então considerados, constituindo a terceira e quarta série de testes de sedimentação:

- uso de um defloculante (terceira série de testes);
- a diminuição da concentração de HCl (quarta série de testes).

O defloculante usado foi o hexametáfosfato de sódio ( $\text{NaPO}_3$ )<sub>n</sub>, em 0,6g/L, como já empregado para a marcação de sedimento fino com  $^{198}\text{Au}$  (CAILLOT *et al.* 1978) e a concentração de HCl usado para dissolver o  $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  foi reduzida de 10% para 2%, enquanto se mantinham as mesmas proporções que na marcação anterior. Não ocorreu floculação, mas o rendimento da marcação foi bastante baixo.

Numa tentativa de se obter um alto rendimento de adsorção sem que ocorresse a floculação, o defloculante foi suprimido e somente  $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  e HCl foram usados. Anteriormente a essa quarta série de testes, alguns testes de dissolução do  $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  foram realizados, usando quantidades relativamente pequenas desse redutor e HCl em concentrações ainda menores que 2% (utilizada na terceira série de testes), como mostrado na Tabela 6.2.

Inspeções visuais de testes de sedimentação, com duração superior a 300h, foram efetuadas para se ter uma primeira comparação entre o comportamento da sedimentação do sedimento natural, com cada um dos sedimentos misturados com diferentes proporções de HCl das soluções escolhidas: S1, S2, S3, S4 e S6 (Tabela 6.2), necessárias para dissolver quantidades definidas de  $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . O comportamento do sedimento natural foi visualmente o mesmo que o do sedimento misturado com as diferentes quantidades de HCl.



Tabela 6.2 - Estudo das quantidades mínimas de  $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  e HCl utilizadas para reduzir o Tc(VII) a Tc(IV) e marcar 5g de sedimento fino, sem que ocorra floculação

Teste	Massa de $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (mg)	Volume do frasco (mL)	Concentração de $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (mg/mL)	Quantidade de HCl	Concentração de HCl (%)
S1	1000	100	10	3mL a 10%	0,30
S2	1000	50	20	3mL a 10%	0,60
S3	500	100	5	1mL a 10%	0,10
S4	500	100	5	8mL a 1%	0,08
S5	100	100	1	0,5mL a 10%	0,05
S6	100	100	1	3mL a 1%	0,03

Após estes testes de inspeção visual, quatro provetas foram preparadas. Em duas delas, o seguinte procedimento foi obedecido: 2,5mL da solução S<sub>1</sub> (Tabela 6.2) de  $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (25mg), dissolvida em HCl (0,30%), foram usadas para reduzir o  $\text{TcO}_4^-$ , com atividade de  $2,96 \times 10^8$  Bq. Todo o radioisótopo, assim reduzido, foi transferido para um erlenmáier contendo 700mL de água destilada. Em seguida, 5g de sedimento fino foram lavados de um béquer para o erlenmáier, até completar 1010mL. O conteúdo do erlenmáier foi agitado por mais de 5 minutos. para garantir a adsorção, como anteriormente indicado. Uma amostra de 10mL, representando a concentração inicial, foi coletada antes de transferir o conteúdo do erlenmáier para a proveta de decantação utilizada em conjunto com a Pipeta de Andreasen (Figura 6.7).

Nas outras duas provetas, a mesma atividade do  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  foi utilizada, mas o traçador foi, entretanto, reduzido pelas soluções S<sub>6</sub> e S<sub>3</sub> (Tabela 6.2) correspondendo a 2,5 e 12,5mg de  $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  dissolvidos, respectivamente, em HCl (0,03%) e HCl (0,10%). Todos os testes de sedimentação foram então realizados da mesma forma que para o sedimento natural, pois que o objetivo era comparar o comportamento do sedimento marcado e não marcado.

#### 6.3.2.4 Resultados e discussão

Os resultados dos primeiros testes de sedimentação com sedimento natural, em água destilada, podem ser observados na Figura 6.8. Eles mostram uma reprodutibilidade muito boa e o coeficiente de correlação para a distribuição logarítmica foi próximo da unidade.

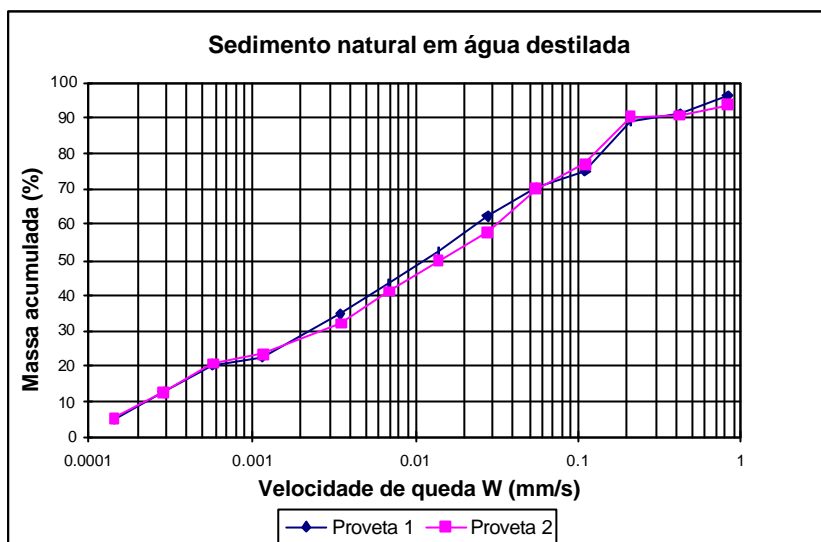


Figura 6.8 - Sedimentação do sedimento natural em água destilada

$$M = 11,077\ln(W) + 100,9. R^2 = 0,9929 \text{ (linha de tendência - proveta 1)}$$

$$M = 10,971\ln(W) + 99,628. R^2 = 0,9856 \text{ (linha de tendência - proveta 2)}$$

As curvas de massa acumulada em função da velocidade de queda, obtidas na segunda série de testes de sedimentação, encontram-se na Figura 6.9. Como se observa, a reprodutibilidade também foi boa, mas as suspensões mostraram uma floculação intensa (não observada nos testes com o sedimento natural - Figura 6.8). Este comportamento se manifestou por uma queda abrupta na curva de massa acumulada, durante os primeiros 15min. do experimento, significando que 90% do sedimento em suspensão, originalmente acima do nível de tomada da Pipeta de Andreasen (10cm abaixo da superfície da água - Figura 6.7), já havia sedimentado abaixo deste nível. Isto se deve ao excesso de HCl (10%) que foi necessário para dissolver o  $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , causando um abaixamento do pH da solução e provocando, conseqüentemente, a floculação. A introdução direta da solução de Tc(IV) sobre o sedimento no interior do erlenmáier pode também ter sido, em parte, responsável pela floculação.

A curva de atividade acumulada obtida para o mesmo experimento, e mostrada na Figura 6.10, apresenta o mesmo formato que a curva de massa acumulada, o que confirma o alto rendimento de adsorção do  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  neste ensaio. Além disso, colocando num mesmo gráfico a porcentagem de massa em relação à porcentagem de atividade e calculando a linha de tendência para o mesmo experimento (Figura 6.11), observa-se que a atividade é proporcional à massa, para diferentes diâmetros do sedimento, e uniforme para toda a faixa de diâmetros.

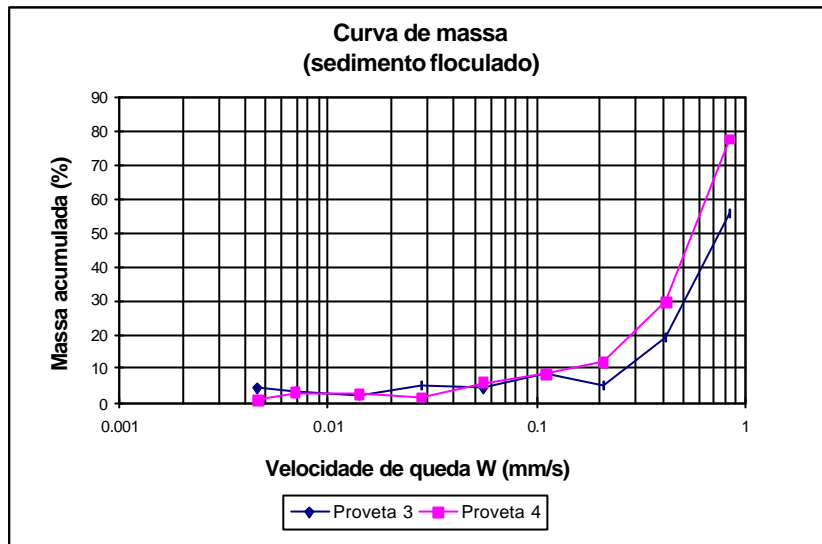


Figura 6.9 - Sedimentação de sedimento marcado com  $^{99m}\text{Tc}$ , em água destilada

As contagens radioativas foram registradas por um cintilômetro Minekin (Austrália), dotado de um cristal de cintilação de iodeto de sódio ativado com tálio [NaI (Tl)], com dimensões de 1"x1". As incertezas estimadas em todos os experimentos foram sempre inferiores a 1%.

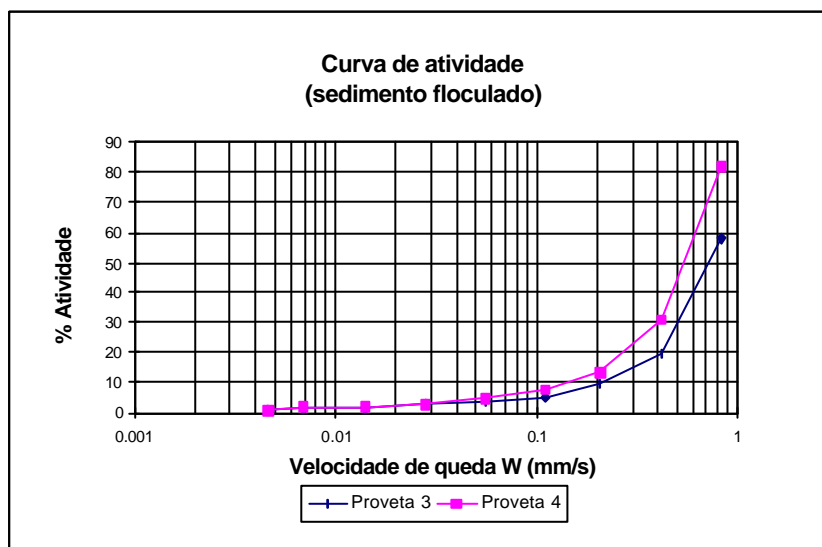


Figura 6.10 - Sedimentação de sedimento marcado com  $^{99m}\text{Tc}$ , em água destilada

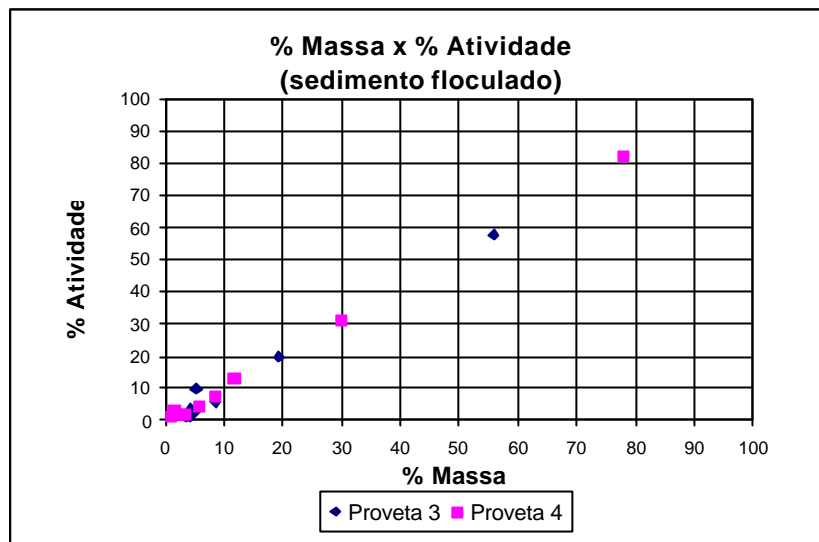


Figura 6.11 - Sedimento marcado com  $^{99m}\text{Tc}$   
(Relação entre massa e atividade)

A = 1,066M - 1,3142. R2 = 0,9843 (linha de tendência - Proveta 3)  
A = 1,061M - 0,4348. R2 = 0,9985 (linha de tendência - Proveta 4)

Se for de interesse a marcação de sedimento fino com traçador para uso em ambiente salino (estuário, baía ou mar aberto), onde a flocculação já se inicia para teores de sal de poucas ppm, a ocorrência da flocculação, durante o processo de marcação, não se constitui em problema. Os resultados da segunda série de testes de sedimentação seriam suficientes. Entretanto, para aplicação do sedimento marcado em ambientes aquáticos onde a flocculação não é esperada *a priori* (rios, entradas de reservatórios, etc.), é de fundamental importância marcar o sedimento sem que haja flocculação inicial. De outra forma, o sedimento natural não será bem representado. Esta é a razão pela qual se realizou a terceira série de testes, com os resultados mostrados nas figuras 6.12 e 6.13.

Como pode ser observado na Figura 6.12, devido à adição de defloculante, não ocorreu flocculação. Entretanto, o rendimento da marcação foi baixo, com valores menores que 10% de  $^{99m}\text{Tc}$  sendo adsorvido no sedimento (Proveta 6 - Figura 6.13). É interessante observar que para os sedimentos mais finos, com velocidade de queda menor que  $7 \times 10^{-3} \text{ mm/s} = 7 \mu\text{m/s}$ , ou diâmetro equivalente de Stokes menor que  $d = 2,6 \mu\text{m}$ , há um aumento relativo na proporção de traçador adsorvido (provetas 5 e 6 - Figura 6.13), provavelmente em consequência da maior superfície específica (superfície/massa) do sedimento. Muitos pesquisadores, incluindo

FÖRSTNER & SCHOER (1984), notaram a tendência de aumento na adsorção de cátions com a diminuição do diâmetro, tanto para metais quanto para radionuclídeos.

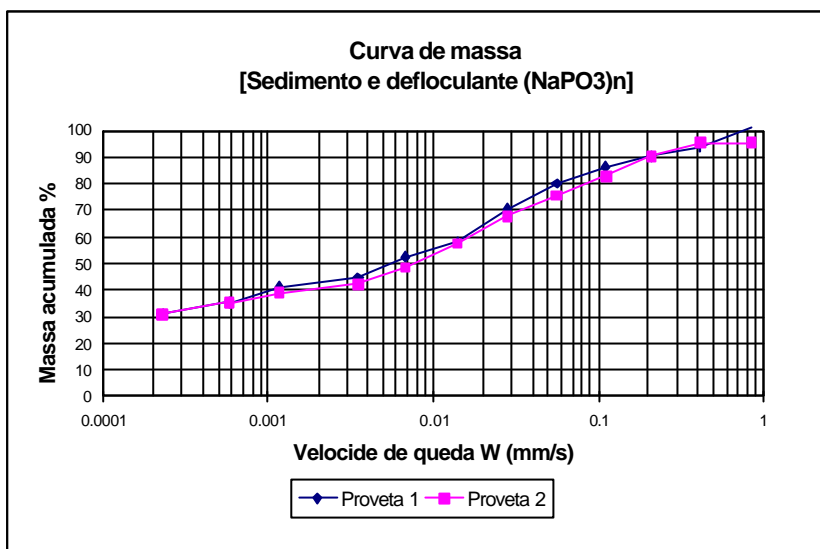


Figura 6.12 - Sedimentação de sedimento marcado com  $^{99m}\text{Tc}$  e com adição de defloculante  $(\text{NaPO}_3)_n$ , em água destilada (curva de massa)

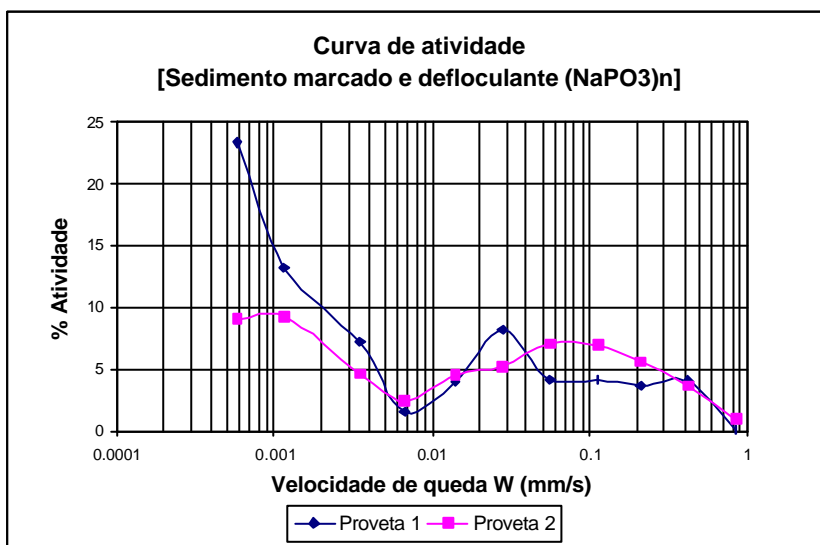


Figura 6.13 - Sedimentação de sedimento marcado com  $^{99m}\text{Tc}$  e com adição de defloculante  $(\text{NaPO}_3)_n$  em água destilada (curva de atividade)

De forma a comparar todos os testes de sedimentação realizados, seus resultados foram reunidos na Figura 6.14, onde foi considerada a média dos resultados dos testes efetuados com as duas provetas, para cada uma das três séries de experimentos realizados. Pode ser observado que no teste no qual foi utilizado defloculante, a taxa de sedimentação do

sedimento marcado foi menor que a do sedimento natural. A grande diferença de sedimentação para o sedimento natural e o sedimento marcado e floculado, também pode ser observada.

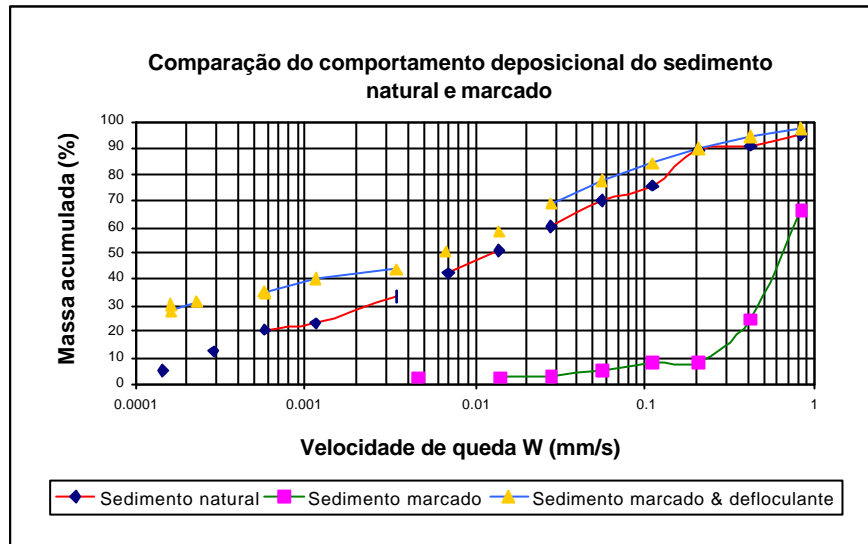


Figura 6.14 - Comparação do comportamento deposicional dos experimentos com sedimento fino, marcado e não marcado, da Represa da Pampulha (Pipeta de Andreasen)

A quarta série de testes de sedimentação com sedimento marcado a qual, como já referido, foi precedida por testes visuais de sedimentação de sedimento natural misturado com HCl em baixas molaridades (Tabela 6.2), é mostrada na Figura 6.15. Comparando os gráficos e os valores das linhas de tendência com aqueles do sedimento natural (Figura 6.8), conclui-se que o comportamento da sedimentação do sedimento marcado em água parada é praticamente igual ao da sedimentação do sedimento natural.

A pequena quantidade de agente redutor ( $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) e, portanto, a baixa molaridade de HCl necessário para dissolver o redutor utilizado para reduzir o Tc(VII), associada com a diluição inicial da solução de Tc(IV), o qual foi misturado com a água dentro da proveta de sedimentação antes da adição de sedimento, evitaram a floculação do sedimento durante o processo de marcação, garantindo a sua injeção nos experimentos de campo sem uma floculação inicial.

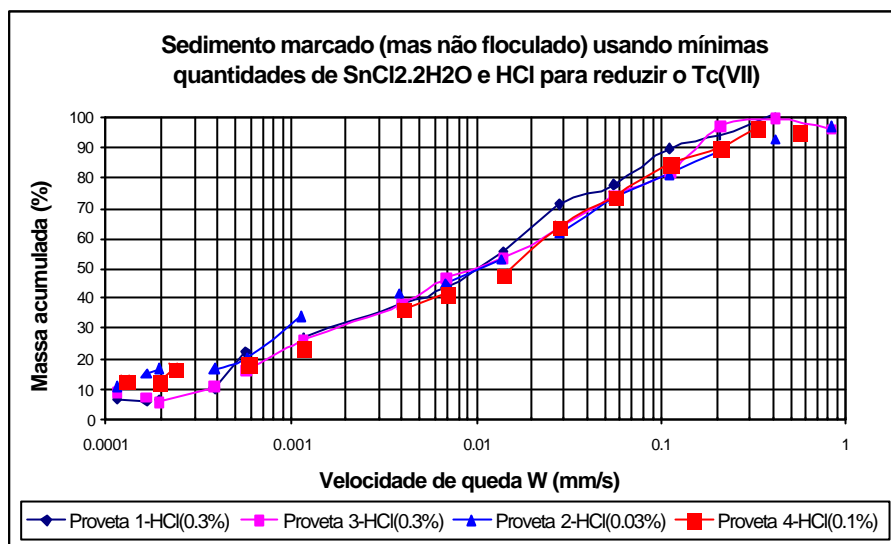


Figura 6.15 - Sedimentação do sedimento marcado e não floculado, em água destilada (Testes S - Tabela 6.2) (curva de massa)

Teste	Linha de tendência	Coef. correlação ( $R^2$ )
Proveta 7 - S1	$M = 12,285\text{Ln}(W) + 111,52$	0,9890
Proveta 8 - S1	$M = 11,570\text{Ln}(W) + 105,90$	0,9832
Proveta 9 - S6	$M = 10,175\text{Ln}(W) + 100,41$	0,9888
Proveta 10 - S3	$M = 10,986\text{Ln}(W) + 103,42$	0,9714

O último ponto da pesquisa foi o rendimento da adsorção, ou marcação. A Figura 6.16 mostra, para cada experimento, a atividade presente no sedimento relativamente à atividade total para cada amostra, em função da velocidade de queda ou o diâmetro de Stokes. A Figura 6.17 apresenta o rendimento médio de adsorção em cada experimento, em função da massa utilizada do agente redutor. Interessantes informações podem ser obtidas de ambas as figuras:

- para cada ensaio (Figura 6.16) o rendimento de adsorção é praticamente constante em toda a faixa estudada;
- levando em consideração as pequenas quantidades de agente redutor e em condições de não floculação, o rendimento médio de adsorção aumenta com a massa usada do agente redutor (Figura 6.17).

A segunda observação pode ser explicada como se segue: pequenas quantidades de  $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  não são suficientes para reduzir todo o  $\text{Tc(VII)}$  presente, e parte dele se mantém como  $\text{TcO}_4^-$ , o qual permanece na fase líquida. No outro extremo, quando existe agente redutor em excesso, o aumento de sua concentração induzirá a uma diminuição no rendimento de adsorção (Figura

6.2), possivelmente devido à competição entre os cátions de Sn(II) e o tecnécio reduzido, pelos locais de adsorção (BANDEIRA *et al.* 1999a, 1999b).

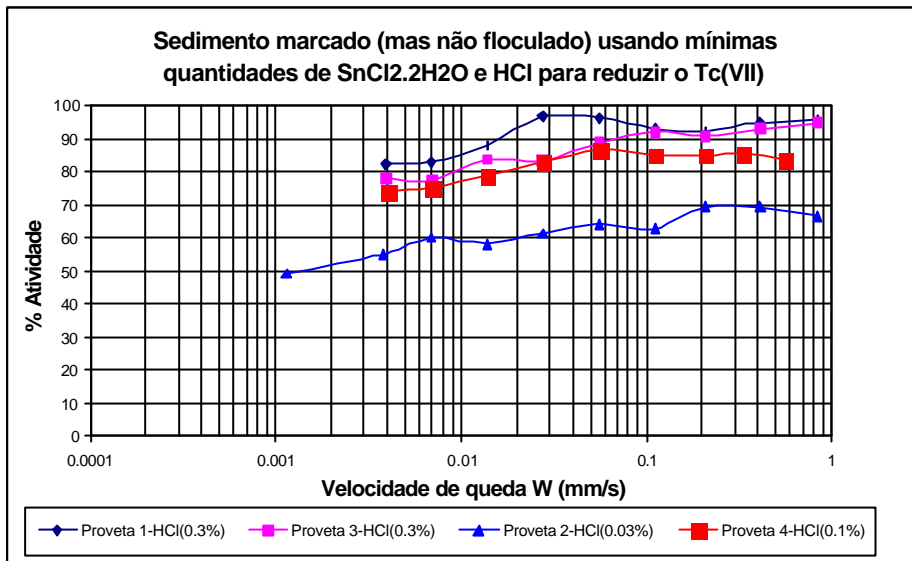


Figura 6.16 - Sedimentação de sedimento marcado e não floculado, em água destilada (Testes S - Tabela 6-2) (curva de atividade)

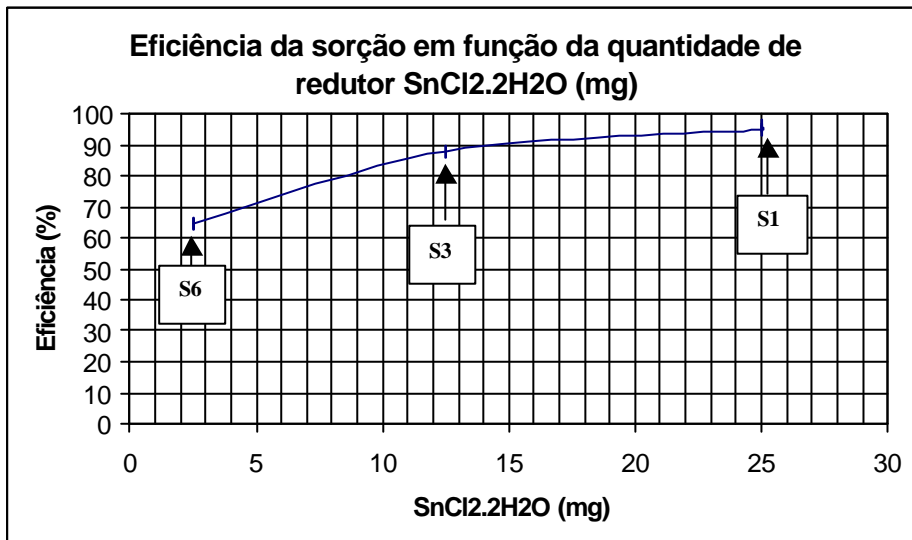


Figura 6.17 - Eficiência média de adsorção em função da massa do agente redutor (Testes S - Tabela 6.2)

Os resultados obtidos na quarta série de testes de sedimentação representam, até o presente, uma otimização do processo de marcação, sem floculação, do sedimento fino com <sup>99m</sup>Tc.



#### **6.4 Conclusões dos estudos de marcação do sedimento fino com $^{99m}\text{Tc}$**

Três diferentes aspectos precisam ser considerados quando se avaliam os resultados deste estudo:

- a técnica de marcação;
- o uso do  $^{99m}\text{Tc}$  como um novo traçador em Sedimentologia e
- a aceitação pública do uso deste traçador radioativo no meio ambiente.

A técnica de marcação proposta neste trabalho é muito apropriada para as condições de campo. A redução do pertecniato ( $\text{TcO}_4^-$ ) e a adsorção do Tc no sedimento fino é um processo rápido. A ligação ao sedimento é forte e o traçador permanece firmemente agregado ao sedimento por, no mínimo, duas horas após ser introduzido na água do rio. Esse intervalo de tempo é mais do que suficiente para a maioria dos estudos de dispersão de sedimento em suspensão. Não é necessário equipamento especial para a marcação. Além disso, os estudos comparativos do comportamento hidrodinâmico do sedimento marcado e não marcado mostraram uma identidade entre ambos.

O uso de um gerador de Tc facilita o trabalho de campo em áreas remotas onde a disponibilidade de outros traçadores de meia vida curta, como o  $^{198}\text{Au}$ , é um problema. Um gerador pode ser usado para um experimento diário durante uma semana. Em 24 horas após a eluição total do Tc, cerca de 90% do valor de equilíbrio é alcançado. Iniciando, por exemplo, com um gerador de 1Ci na segunda-feira e fazendo-se uma eluição a cada manhã, quase 340mCi de  $^{99m}\text{Tc}$  serão ainda disponíveis na sexta-feira. Nos trabalhos de campo já comentados no Capítulo 3, as atividades usadas foram inferiores a este valor: 45mCi no trabalho pioneiro no Uruguai (BANDEIRA & PINTO, 1997) (PINTO *et al.* 1998); 246mCi no experimento efetuado no Rio Paraopeba (BANDEIRA *et al.* 1999b) e 320mCi no experimento efetuado no Ribeirão da Onça, em 03/10/2000, a ser apresentado no Capítulo 7, e os resultados foram satisfatórios.

O  $^{99m}\text{Tc}$  é largamente usado em Medicina Nuclear, com propósitos de diagnósticos, onde o traçador é injetado por via endovenosa, ficando restrito ao corpo humano, mas sendo depois normalmente eliminado no meio ambiente. Esta é uma característica positiva para a aceitação pública desse traçador radioativo, também em estudos ambientais.

Segundo informações dadas a este autor pela Dra. Ivana Sena Nascimento, que trabalha em Belo Horizonte com o uso do  $^{99m}\text{Tc}$  em Medicina Nuclear, atividades máximas de 40mCi são injetadas em pacientes, em exames de Cintilografia Miocárdica. Esta atividade é para o exame, segundo o protocolo de um dia, sendo a dosagem assim distribuída: 10mCi em estado de repouso e 30mCi, cerca de 3 horas depois, em situação de esforço do paciente. Já para os exames de cintilografia óssea, renal, cerebral e da tireóide, são utilizados cerca de 15mCi de  $^{99m}\text{Tc}$  enquanto que, na cintilografia hepática, são utilizados 6mCi.

O "paciente ambiental", o curso d'água sendo examinado, é muitas vezes mais volumoso que apenas um paciente humano, sendo que este também elimina, nos cursos d'água ou nas redes de esgoto, o  $^{99m}\text{Tc}$  que lhe é injetado na veia, o mesmo usado nos estudos ambientais aqui tratados.

Nos estudos preliminares realizados no Rio Paraopeba (BANDEIRA *et al.* 1999b) e nos efetuados para o presente trabalho (Capítulo 7) as concentrações da atividade (Bq/mL de água) foram da ordem de  $10^{-7}$  das concentrações para aplicações médicas (Bq/mL de sangue). A razão da concentração utilizada em estudos ambientais ser muito menor que para as aplicações médicas se deve ao simples fato de que o  $^{99m}\text{Tc}$ , injetado nos seres humanos, é monitorado por um detetor externo ao corpo enquanto que, para as detecções realizadas no meio ambiente, o detetor fica totalmente imerso na água, trabalhando em uma "Geometria  $4\pi$ ", o que faz uma enorme diferença em termos de eficiência de contagem.

O  $^{99m}\text{Tc}$  é um traçador muito versátil para estudos ambientais. Em sua forma não reduzida, de pertecniato ( $\text{TcO}_4^-$ ), é um traçador para a água, tendo sido utilizado com sucesso em estudos da dinâmica da água (GARCIA-AGUDO, 1997), (BORROTO *et al.* 1999), (AIREY *et al.* 2003), (BORROTO, 2004). Reduzido a  $\text{TcO}(\text{OH})_2 + 2\text{H}^+$  pode ser adsorvido no sedimento fino, como mostrado no item 6.3.1.1 deste trabalho, e empregado em estudos de Sedimentologia Dinâmica.

Os dois aspectos anteriormente abordados: menor atividade proporcional em estudos ambientais e mesma destinação final do traçador injetado o qual, de resto, sai do corpo humano, ou que também ao final de algumas horas de estudo no meio ambiente já sofreu decaimento acentuado ( $T_{1/2}$  6,02h) e bastante dispersão e diluição são as provas cabais de que o  $^{99m}\text{Tc}$  pode ser utilizado em estudos ambientais com uma boa relação: benefício x custo ambiental.

Com base nas considerações anteriores e pelo pouco conhecimento da sociedade em relação ao real efeito e potencialidade dessa ferramenta em estudos ambientais, a sua divulgação merece ser feita pelas comunidades científicas e autoridades ambientais de vários países, assim como deve ser reavaliado o preconceito de se combater a utilização de substâncias radioativas expressamente adicionadas como traçadores em estudos ambientais. O corpo ambiental é tão importante quanto o corpo humano no qual essa técnica é largamente utilizada, com grandes benefícios.



## **7 TRABALHOS DE CAMPO MARCANDO ÁGUA E SEDIMENTO**

### **7.1 Introdução**

A metodologia de marcação de sedimento fino com  $^{99m}\text{Tc}$  (Capítulo 6) foi desenvolvida empregando-se, para tanto, o sedimento depositado na Represa da Pampulha e passível de ser dragado. Assim, o passo seguinte do presente trabalho foi a realização de experimentos de campo com a utilização da técnica desenvolvida, objetivando a mensuração do impacto ambiental do possível despejo de sedimento fino dragado na represa, nos cursos d'água a jusante, considerando o aumento da concentração do sedimento em suspensão em função desse despejo, a tendência deposicional e a possibilidade de dessorção dos metais adsorvidos no sedimento dragado. O estudo de outros possíveis impactos ambientais desse despejo foge ao escopo do presente trabalho.

Como o agente responsável pelo transporte de sedimentos em suspensão é o escoamento líquido, resolveu-se fazer também a marcação da água, o que foi realizado com a utilização de Rodamina WT ( $\text{C}_{13}\text{H}_{10}\text{O}$ ) (SUIJLEN & BUYSE, 1994) um bom traçador para estudos do comportamento hidrodinâmico da água, pelo fato de não ser adsorvido no sedimento em suspensão, ao material sólido e à vegetação presentes no leito do curso d'água ou nas margens. Além disso, a Rodamina WT é altamente solúvel, facilmente detectável e muito pouco degradável. A concentração utilizada foi de 20% em peso.

Empregando-se simultaneamente os dois traçadores foram realizados quatro experimentos, utilizando-se sempre um volume total de 42 litros de água e sedimento. A Tabela 7.1 resume as características principais dos experimentos efetuados.

### **7.2 Descrição dos experimentos e resultados obtidos**

#### **7.2.1 Primeiro experimento (Ribeirões Pampulha e Onça) - 27/09/2000**

O primeiro trabalho foi realizado em 27/09/2000. O material foi injetado às 11h35 na seção PI-1 (Ponto de Injeção N<sup>o</sup> 1), no Ribeirão Pampulha, na área do Aeroporto da Pampulha e acompanhado através de detecções efetuadas nas estações D1, D2, D3 e D4, sendo as duas

primeiras no Ribeirão Pampulha e as duas últimas já no Ribeirão da Onça (Figura 1.6). A Figura 7.1 mostra aspectos da injeção e detecção efetuadas.

Tabela 7.1 - Experimentos de campo com marcação conjunta: sedimento fino com  $^{99m}\text{Tc}$  e água com Rodamina WT

Data	Ponto de injeção <sup>(a)</sup>	Curso d'água (ribeirões)	Estações de detecção <sup>(a)</sup>	Ativid. inicial aproximada de $^{99m}\text{Tc}$ (mCi)	Concentração inicial de sed. (g/L)	Volume de Rodamina WT (L)
27/09/2000	PI-1	Pampulha e Onça	D1, D2, D3 e D4	360	41,9	2
03/10/2000	PI-2	Onça	D3, D4, D5 e D6	330	72,4	2
26/06/2001	PI-3	Rio das Velhas	D7, D8 e D9	1360	47,1	6
03/07/2001	PI-2	Onça	D3, D4, D5 e D6	527	54,4	4

(a) ver Figura 1.6

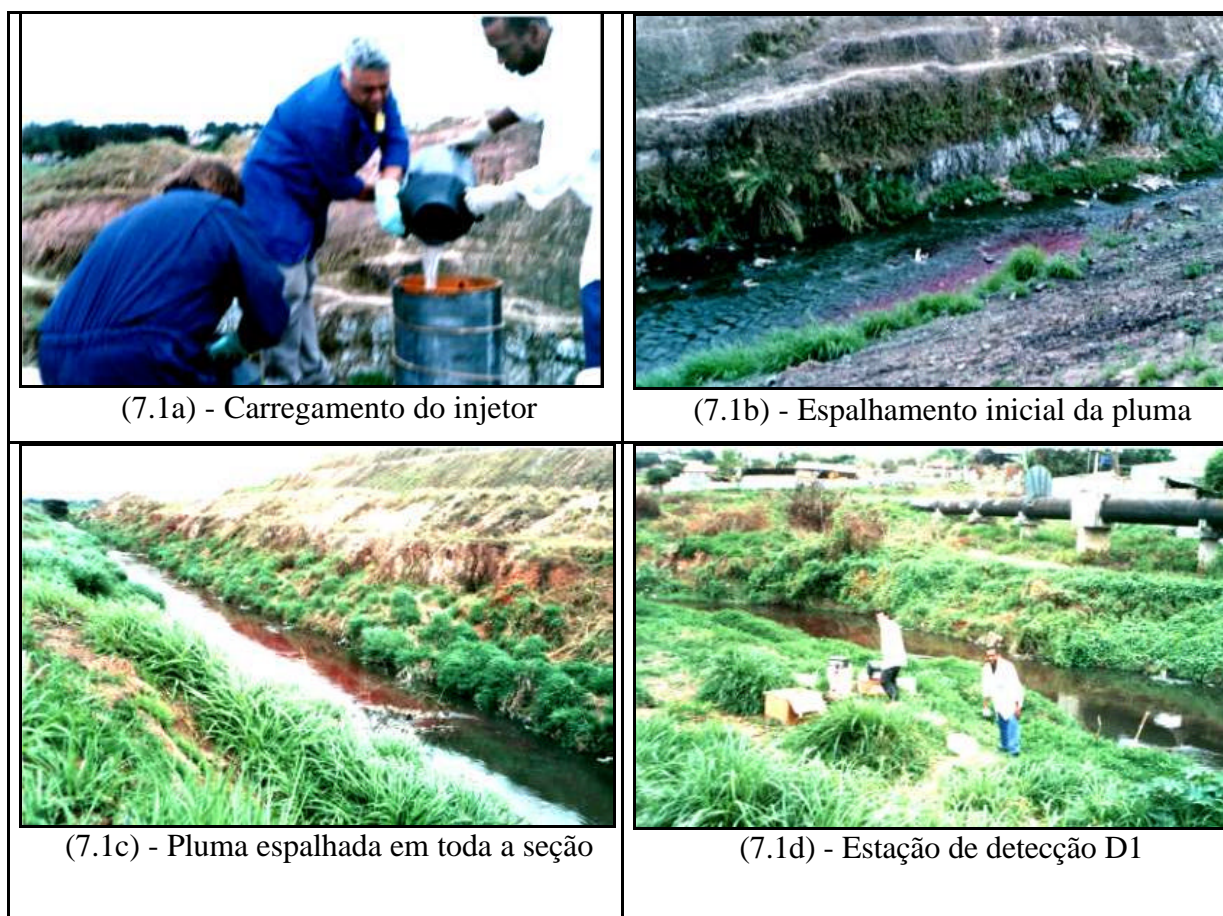


Figura 7.1 - Injeção e detecções no Ribeirão Pampulha (PI-1, 27/09/2000)

A Figura 7.2 apresenta as curvas de passagem, da água marcada com Rodamina WT e do sedimento fino marcado com  $^{99m}\text{Tc}$ . O registro da curva de passagem da água foi obtido através da coleta de amostras, utilizando-se amostradores automáticos computadorizados ISCO, que amostram em intervalos de tempo pré-selecionados, seguido da determinação do teor de Rodamina WT em laboratório, empregando-se um fluorímetro Turner com sensibilidade de detecção da ordem de ppb. A detecção do sedimento marcado com  $^{99m}\text{Tc}$  foi realizada de modo contínuo, *in situ*, com o emprego de cintiladores portáteis IPP-4 ou Minekin. Priorizou-se a coleta de amostras e a detecção da radiação em pontos centrais das seções, o que nem sempre foi possível, em virtude da dificuldade de acesso (D1: margem direita – Figura 7.1d; D2 e D4: centro; D3: margem esquerda). Para possibilitar a comparação entre as curvas de passagem do sedimento e da água, as ordenadas representam atividades ou concentrações normalizadas, obtidas dividindo-se cada uma das ordenadas originais pela área debaixo da curva. As ordenadas originais, são: a) para a água, a fluorescência da amostra (ppb) depois de reduzido o ruído de fundo; b) para o sedimento, a contagem radioativa (cps), após a redução do ruído de fundo e a correção do decaimento radioativo.

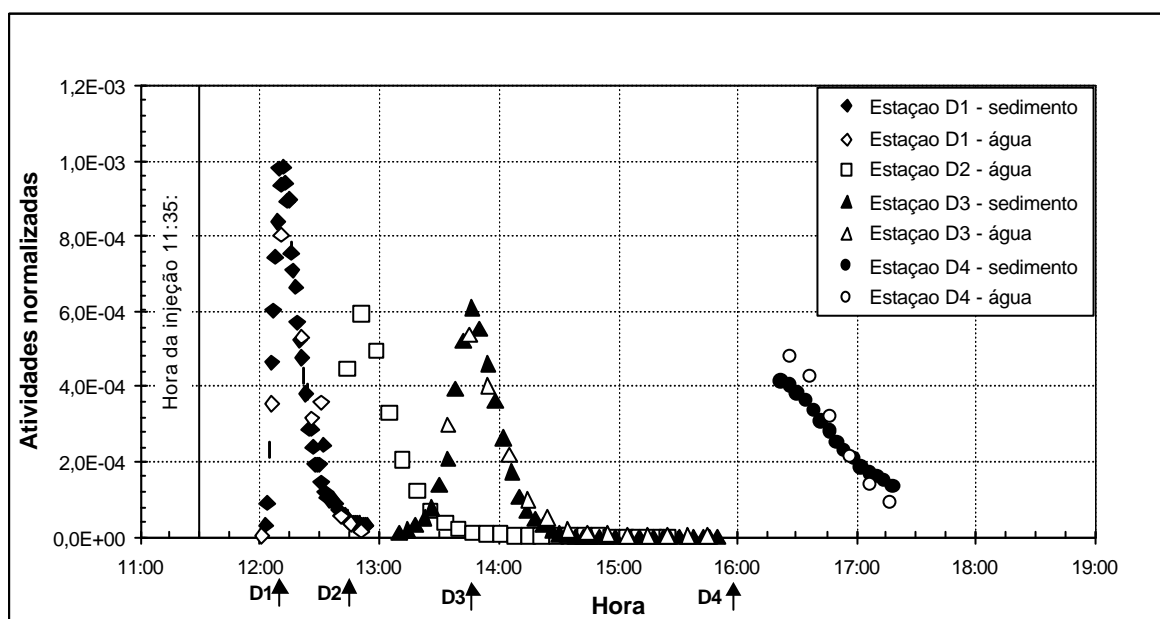


Figura 7.2 - Curvas de passagem da água e sedimento marcados, nos ribeirões Pampulha e Onça, em 27/09/2000, a partir de injeção simultânea de traçadores em PI-1

Nesta fase de apresentação resultados, as curvas de passagem são mostradas sem nenhuma extrapolação, ou seja: como foram registradas, com todas as limitações logísticas e operacionais normais aos trabalhos de campo. Observe-se assim, que nem todas as curvas de passagem da

Figura 7.2 estão completas. Na Estação D2 houve problema com o cintilômetro e não foi registrada a curva de passagem da pluma de sedimento marcado. Também o registro da subida da passagem da água ficou um pouco prejudicado, em seu início, devido à demora em operar o amostrador ISCO. O mesmo ocorreu no início dos registros da passagem de água e sedimento na Estação D3. Na Estação D4, só se conseguiu registrar a passagem da cauda das duas plumas. Note-se, porém, nessa última estação, a tendência da cauda da curva do sedimento em suspensão demorar mais a passar do que a da água. Essa tendência foi também observada nos outros três experimentos, sobretudo para as últimas estações de detecção de cada um deles (figuras 7.4, 7.6 e 7.7), sugerindo o interessante aspecto de uma maior dispersão longitudinal da pluma de sedimentos em suspensão, assunto comentado mais adiante.

Ressalte-se que para os trabalhos de modelagem da dinâmica da água e do sedimento, a serem vistos no Capítulo 8, foram consideradas extrapolações de algumas curvas de passagem, tanto para o seu início quanto para a sua cauda. A extrapolação do início da curva foi somente necessária para as estações D2 e D3 acima comentadas, no caso do experimento de 27/09/00. Como a subida das curvas de passagem é mais abrupta e, portanto, bem definida, essa extrapolação não coloca problemas de modificação substancial na área debaixo da curva. Para a extrapolação das caudas das curvas, mesmo sendo a sua tendência exponencial, as extrapolações foram feitas somente quando se possuíam pelo menos um terço do tempo de descida efetiva da curva (considerando a extrapolação), com registro dos pontos.

A injeção instantânea de Rodamina WT possibilita, além da obtenção da curva de passagem que dá informações sobre a dispersão e advecção da pluma formada, se calcular a vazão líquida na estação de coleta, através da expressão (PLATA-BEDMAR, 1972), (FRITZ & FONTES, 1988), (PLATA-BEDMAR, 1999):

$$Q = \frac{M}{\int C dt} \quad (7.1)$$

onde:

$Q$  = vazão líquida (m<sup>3</sup>/s);

$M$  = massa de Rodamina WT injetada;

$C$  = concentração de Rodamina WT na água.



A expressão no denominador da Equação 7.1 representa a área debaixo da curva de passagem, sem normalização.

### **7.2.2 Segundo experimento (Ribeirão da Onça) - 03/10/2000**

O segundo experimento ocorreu em 03/10/2000, com a injeção dos traçadores efetuada às 11h00 em PI-2, no início do Ribeirão da Onça e o material sendo detectado em D3, D5 e D6: margem esquerda e D4: centro (Figura 1.6). Como o quarto experimento (03/07/2001) foi aí também efetuado, com detecções nas mesmas estações, é feita uma apresentação conjunta, na Figura 7.3, de aspectos comuns aos dois lançamentos. A Figura 7.4, porém, apresenta as curvas de passagem para o experimento de 03/10/2000.

Em relação às curvas de passagem de 03/10/2000, pode-se observar um aspecto extremamente interessante, qual seja: o comportamento da curva para o sedimento marcado na Estação D5. Note-se que a mesma apresenta um comportamento ascensional mais demorado, conforme a seqüência em azul (Figura 7.4), ao contrário das curvas do sedimento para as outras estações. Na detecção realizada neste dia o cintilômetro e o amostrador de água foram posicionados na margem direita, logo a jusante de uma região em curva com volume morto considerável (Figura 7.3g), fato que pode ter causado retenção temporária do sedimento marcado por um efeito centrífugo, pois a sua massa específica quando submerso, de cerca de  $1600\text{kg/m}^3$ , é 60% maior que a da água ( $1000\text{kg/m}^3$ ). Mesmo que a densidade real do sedimento fino em suspensão seja menor que 1,6, devido à presença de água em seu interior (o sedimento fino, ao contrário da areia, apresenta formas coloidais), ela certamente é maior que a da água (no Capítulo 9 é feito um estudo paramétrico desse aspecto), o que deve influenciar na trajetória do sedimento ao sofrer ações centrífugas, pela não linearidade das linhas de fluxo em trechos curvos dos canais.

Assim, no outro experimento em 03/07/2001, no mesmo trecho da Estação D5, a qual apresenta características bem turbulentas, os equipamentos foram posicionados na outra margem dessa seção, logo antes da curva, como indicado na Figura 7.3g. Nesse caso, as curvas de passagem do sedimento e da água tiveram um andamento semelhante (Figura 7.7). O efeito da retenção de sedimento é certamente uma contribuição para o aumento da dispersão longitudinal do mesmo, observada na estação seguinte (D6) nos dois experimentos realizados (figuras 7.4 e 7.7).



(7.3a) - PI-2. Misturamento do  $^{99m}\text{Tc}$  já reduzido ao sedimento.



(7.3b) - Espalhamento inicial da pluma em 03/10/00.



(7.3c) - Espalhamento inicial da pluma em 03/07/01.



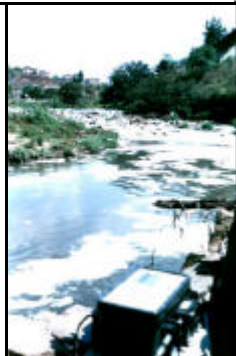
(7.3d) - Estação D3. Vista para montante, com toda a seção já tomada pelos traçadores.



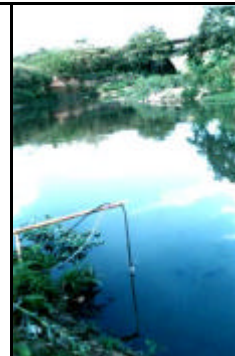
(7.3e) - Cachoeira entre as estações D3 e D4.



(7.3f) - Estação D4 e amostrador de água.



(7.3g) - Estação D5 na margem esquerda, em 03/10/00. Em 03/07/01, foi na margem direita, logo a montante da ponta vegetada.



(7.3h) - Estação D6, a montante da Ponte Ferroviária de Capitão Eduardo, ao fundo.

Figura 7.3 - Injeções e detecções no Ribeirão da Onça (PI-2, 03/10/2000 e 03/07/2001)

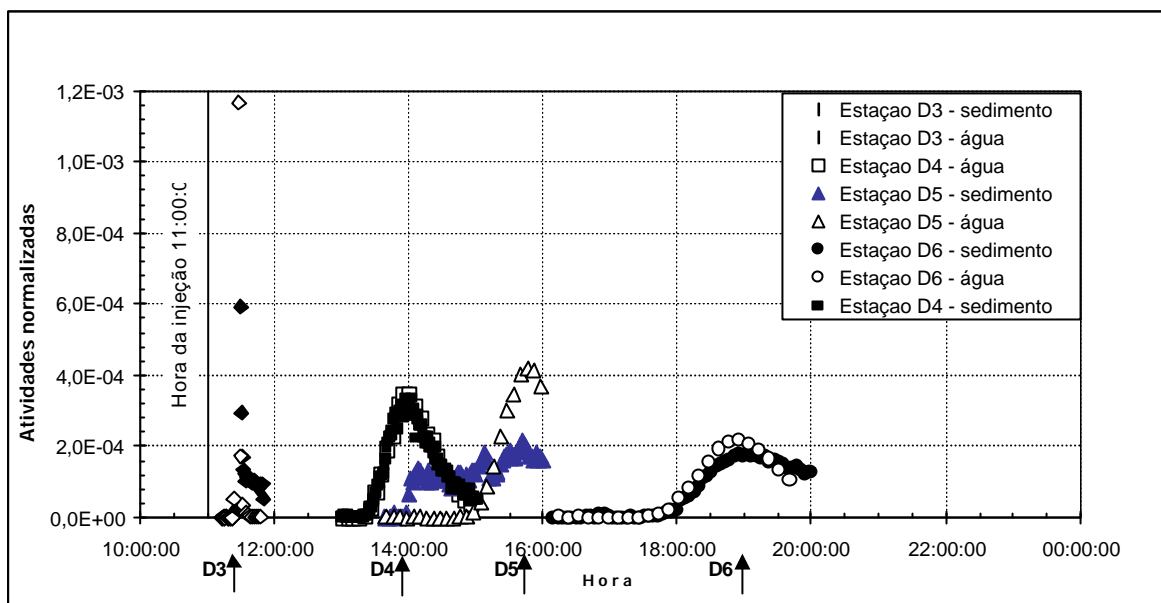


Figura 7.4 - Curvas de passagem da água e sedimento marcados, no Ribeirão da Onça, em 03/10/2000, a partir de injeção simultânea de traçadores em PI-2

### 7.2.3 Terceiro experimento (Rio das Velhas) - 26/06/2001

A terceira injeção foi realizada no Rio das Velhas, em 26/06/2001, com o lançamento em PI-3 e as detecções realizadas nas estações D7: margem esquerda (Figura 7.5e), D8 (Figura 7.5f) e D9: margem direita, sendo esta última estação à jusante da Cidade de Santa Luzia (Figura 1.6). Na Figura 7.5 são mostrados aspectos da injeção e detecções.

A Figura 7.6 apresenta as curvas de passagem para o experimento em questão. Observe-se o comportamento muito semelhante da água e do sedimento em suspensão nas duas primeiras estações de detecção (D7 e D8). Já em D9, começa-se a notar, na cauda da curva do sedimento em suspensão, uma tendência de maior espalhamento longitudinal.

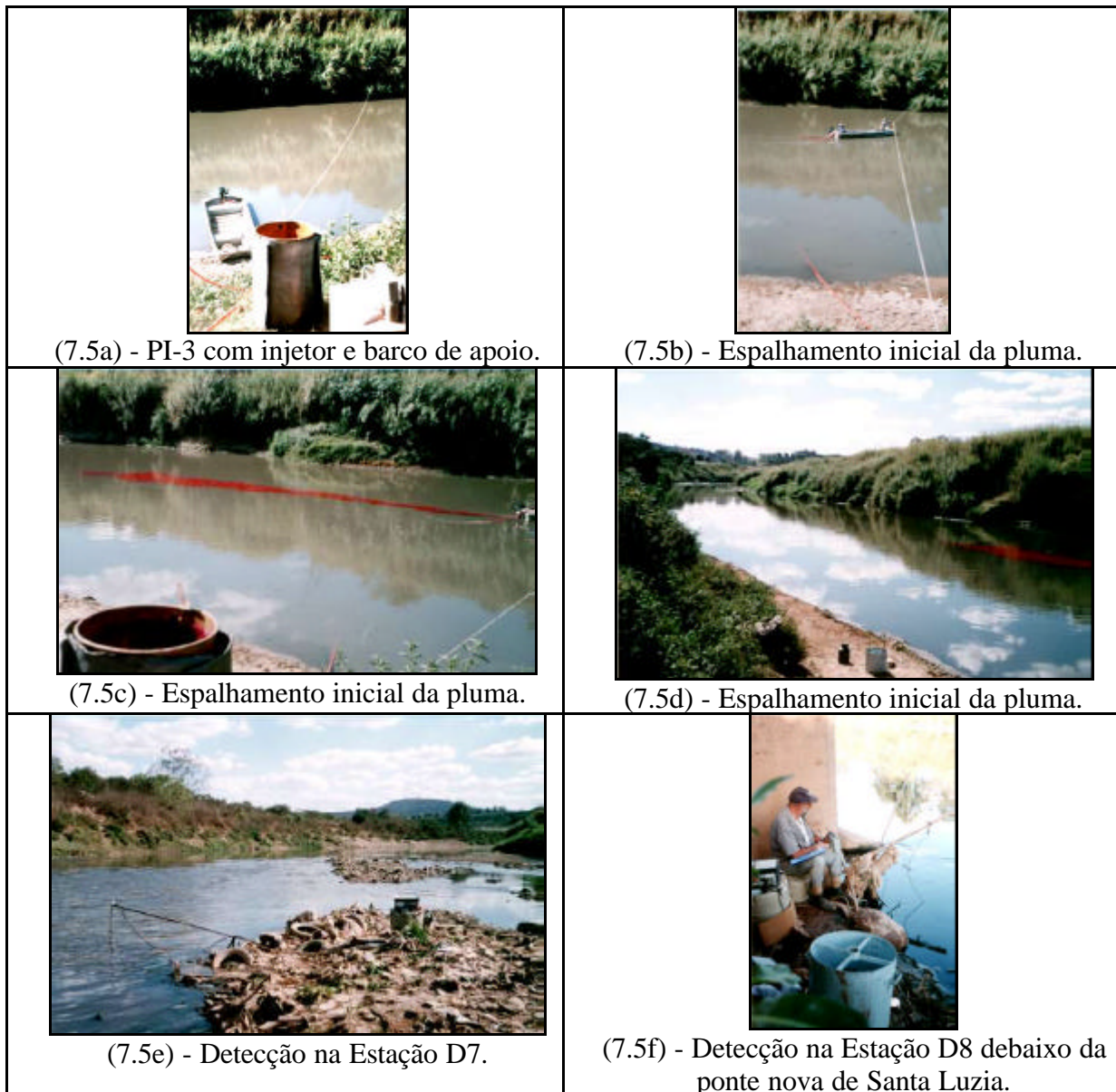


Figura 7.5 - Injeção e detecções no Rio da Velhas (PI-3, 26/06/2001)

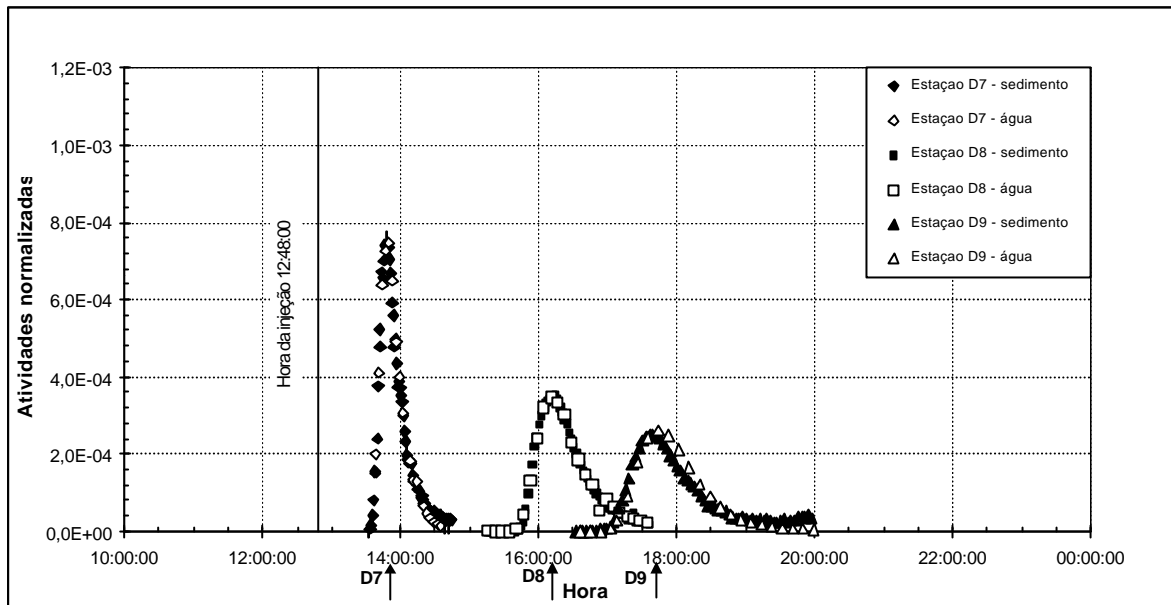


Figura 7.6 - Curvas de passagem da água e sedimento marcados, no Rio das Velhas, em 26/06/2001, a partir de injeção simultânea de traçadores em PI-3

#### 7.2.4 Quarto experimento (Ribeirão da Onça) - 03/07/2001

O quarto experimento foi realizado em 03/07/2001, no mesmo local do segundo, ou seja: o Ribeirão da Onça (figuras 1.6 e 7.3).

Optou-se por repetir o experimento neste trecho para se ter uma comparação de resultados, sobretudo para esclarecer o ocorrido com a detecção do sedimento marcado na Estação D5, em 03/10/2000.

No experimento de (03/10/2000) a detecção da curva de passagem do sedimento marcado em D5 teve um comportamento ascensional continuado, em comparação com a detecção da Rodamina WT (traçador da água) que apresentou o perfil habitual da curva em forma de sino, com o ramo descendente mais suave (Figura 7.4). Suspeitava-se que o comportamento atípico da curva do sedimento marcado fosse devido ao fato da Estação D5 ter sido posicionada em um trecho em curva, logo a jusante de uma zona morta, e na mesma margem (esquerda). Observe-se que não é muito fácil o acesso e facilidade para instalação de estações no Ribeirão da Onça.

Posicionando-se a Estação D5, no experimento de 03/07/2001, na margem direita e logo antes da zona morta da margem esquerda referida anteriormente, as duas curvas de passagem (sedimento e água) apresentaram o perfil habitual, em forma de sino (Figura 7.7), confirmando

a influência da zona morta existente na margem esquerda sobre o comportamento ascensional mais demorado da curva de passagem do sedimento, obtida com a detecção efetuada em D5, no dia 03/10/2000 (Figura 7.4).

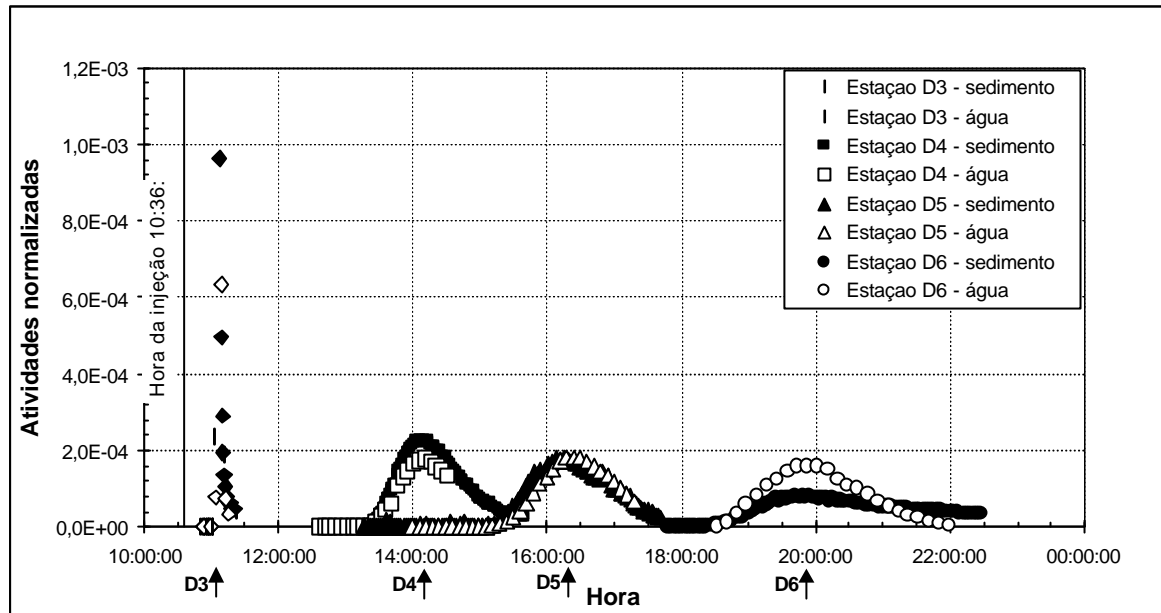


Figura 7.7 - Curvas de passagem da água e sedimento marcados, no Ribeirão da Onça, em 03/07/2001, a partir de injeção simultânea de traçadores em PI-2

Esse aspecto, mensurado pela primeira vez, quanto ao conhecimento desse autor, pode ser de grande valia em futuros estudos quantitativos de Sedimentologia Dinâmica, empregando-se a marcação conjunta da água e do sedimento. Pode-se até pensar em efetuar experimentos dessa natureza em laboratório, em condições controladas e com volumes mortos em relação à geometria do escoamento adequadamente construídos, de forma a se explorar, em profundidade, a diferença entre o escoamento da água e do sedimento em suspensão que ela transporta.

Esse assunto não é ainda muito conhecido, em termos quantitativos, devido à ausência de ferramentas adequadas para seu estudo. Espera-se, porém, com as metodologias desenvolvidas no presente trabalho, especialmente com a marcação do sedimento fino com  $^{99m}\text{Tc}$  (mostrada no Capítulo 6), traçador ambientalmente amigável e de fácil obtenção e manuseio, contribuir para um melhor conhecimento do tema.

## 8 AJUSTE DE MODELO MATEMÁTICO AOS RESULTADOS OBTIDOS COM OS ESTUDOS DE CAMPO SOBRE A DINÂMICA DA ÁGUA E DO SEDIMENTO EM SUSPENSÃO

### 8.1 *Considerações iniciais*

Os traçadores e modelos matemáticos são ferramentas complementares quando se estudam sistemas ambientais complexos. Dados de traçadores são baseados em observações diretas, mas são limitados ao componente marcado do sistema e a um domínio restrito no espaço e no tempo. Os modelos matemáticos podem, teoricamente, efetuar simulações de novas situações importantes do sistema, mas são limitados pelas suposições subjacentes. Separadamente essas ferramentas possuem as suas limitações, mas unidas, ocorre a sinergia e elas se constituem em um poderoso método para estudos de ambientes complexos (AIREY *et al.* 2002).

Os traçadores são adequados para a estimativa de coeficientes de dispersão em escoamentos, a partir de injeções instantâneas, da forma como foi mostrado no Capítulo 7: registros de perfis temporais em locais suficientemente afastados do ponto de injeção, de forma a se ter uma distribuição uniforme da concentração ao longo da seção. Até o presente, traçadores radioativos, como:  $^{82}\text{Br}$  ( $T_{1/2} = 36\text{h}$  e emissor de radiação  $\gamma$ , com energias variando entre 0,55 e 1,48MeV) (MOREIRA *et al.* 1980), (CARVALHO, 1983), (MOREIRA *et al.* 1991), o trítio, na forma de água tritiada (HTO), e o  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  (BORROTO *et al.* 1999), (AIREY *et al.* 2002), (BORROTO, 2004) e fluorescentes, como a Rodamina WT ("*Water Tracer*"), são empregados para este fim, medindo-se apenas o coeficiente de dispersão da fase líquida. A novidade no atual trabalho é o estudo conjunto da dispersão e advecção da fase sólida (os sedimentos em suspensão) e do agente hidrodinâmico que o transporta (a água), em escoamentos unidirecionais.

Tendo realizado os estudos de campo descritos no capítulo anterior, com injeções simultâneas de sedimento fino marcado com  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  (capítulos 6 e 7) e água marcada com Rodamina WT (Capítulo7), as quais podem ser consideradas instantâneas (1 a 3 minutos) em relação à duração total dos experimentos (6 a 9 horas), o próximo passo foi buscar, na literatura, um modelo matemático que pudesse ser ajustado aos dados registrados, após a sua depuração.

Este modelo deveria possibilitar o cálculo de parâmetros do transporte das duas fases (líquida e sólida), permitindo avaliar, posteriormente, nos cursos d'água a jusante da Represa da Pampulha, a capacidade de hidrot transporte e o impacto resultante do despejo continuado do sedimento fino dragado no interior da mesma, empregando-se o processo de DLD já comentado no item 3.2.3 (Capítulo 3). A utilização das informações do sistema, obtidas pela injeção instantânea, para um despejo continuado de dragagem, seria feita através de convolução, empregando o modelo adotado e os parâmetros calculados.

Dois parâmetros importantes a serem determinados para a aplicação de modelos matemáticos de transporte de substâncias em meio líquido ou gasoso, são: a velocidade de advecção ( $v$ ) da pluma e o seu coeficiente de dispersão ( $D$ ).

Em estudos da dinâmica de sedimentos em suspensão, como os realizados nos ribeirões Pampulha e Onça, e no Rio das Velhas, as condições de fronteiras, de descarga de sedimento dragado e de escoamento são bastante distintas daquelas encontradas em despejo de dragagem de sedimentos finos, em regiões portuárias e costeiras. Sendo os corpos d'água estreitos e pouco profundos, a dispersão longitudinal é priorizada, o que conduz a detecções eulerianas (detetor fixo e nuvem marcada transitando pelo mesmo). Essas são, geralmente, de mais fácil execução e análise resultados, do que as correspondentes detecções lagrangeanas em regiões costeiras.

Como os estudos ambientais em escoamentos à superfície livre lidam com a dispersão de solutos, a determinação do coeficiente de dispersão em um rio ou canal é também uma das primeiras providências quando se investiga e se busca a solução de problemas, tais como: previsão da temperatura da água em função de descargas térmicas de estações de resfriamento; poluição devido ao despejo acidental de produtos danosos ao meio ambiente (óleos, pesticidas e outros compostos químicos); taxa de aeração de escoamentos; avaliação da capacidade de assimilação dos cursos d'água, etc.



## 8.2 O Modelo de dispersão empregado

### 8.2.1 Comentários sobre modelos de dispersão

Para a determinação dos coeficientes de dispersão longitudinal e velocidades de advecção do sedimento em suspensão e da água que o transportou, a partir dos perfis simultaneamente observados de concentração (contagens de  $^{99m}\text{Tc}$  e Rodamina WT), em seções a jusante do ponto de injeção instantânea desses traçadores, foi empregado um recente modelo matemático de dispersão longitudinal (SINGH & BECK, 2003), o qual utiliza a solução analítica completa da equação unidimensional de advecção e dispersão. A utilização dessa solução é a grande vantagem do método aqui empregado.

Outros métodos existentes na literatura, como o método da propagação ("*routing*") (FISCHER, 1968), usa a aproximação de que, durante a passagem da nuvem de traçador na estação de detecção, esta não sofre dispersão, ou seja: a advecção domina a dispersão e a nuvem pode ser considerada imutável ou "congelada" ("*frozen cloud approximation*"). O método requer também a integração numérica da integral de convolução. Esses dois aspectos contribuem com erros na estimativa do coeficiente de dispersão. Outros métodos comentados em RUTHERFORD (1994) utilizam aproximações gráficas ou ajustes por mínimos quadrados junto com a aproximação da nuvem congelada, como THACKSTON *et al.* (1967) e também CHATWIN (1971) citado em SINGH & BECK (2003). Ainda há métodos que empregam a solução da equação unidimensional de advecção e dispersão, com otimização ou tentativa e erro para se estimar o coeficiente de dispersão. Porém, usam uma solução truncada da mesma.

Em seções de condutos fechados ou abertos, suficientemente afastadas para jusante do local de lançamento instantâneo de um traçador, a fim de garantir um equilíbrio entre o cisalhamento transversal de velocidades (que promove a dispersão longitudinal) e a difusão transversal (que contrabalança esta dispersão) (RUTHERFORD, 1994), o transporte e misturamento longitudinal de um soluto, ou de um traçador que o representa, é governado pela seguinte equação unidimensional (THACKSTON *et al.* 1967), (RUTHERFORD, 1994), (SINGH & BECK, 2003):

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - v \frac{\partial c}{\partial x} \quad (8.1)$$

onde:

$c$  = concentração média do traçador na seção de medições;

$D$  ou  $D_L$  = coeficiente de dispersão longitudinal ( $\text{m}^2/\text{s}$ );

$v$  = velocidade média do escoamento na seção considerada ( $\text{m/s}$ )

$x$  = distância medida ao longo do canal a partir da seção de injeção ( $\text{m}$ );

$t$  = tempo ( $\text{s}$ ).

A Equação 8.1 não consegue modelar a variação da concentração do traçador dentro da seção de medidas sendo esta, então, considerada uniforme. São incluídos no coeficiente de dispersão os efeitos combinados da difusão molecular, misturamento turbulento e misturamento causado por cisalhamento transversal e vertical, função dos gradientes de velocidade nas fronteiras dos canais (ao longo da largura e profundidade do escoamento). Assim, o valor de  $D$  depende das propriedades hidráulicas do escoamento, as quais determinam o misturamento turbulento e o cisalhamento, devido aos gradientes de velocidade. Retardos ou armazenamentos em zonas mortas podem afetar também o coeficiente de dispersão.

Considerando  $v$  e  $D$  constantes, assim como iguais as massas específicas da água e do componente sendo transportado (soluto ou traçador), uma solução da Equação 8.1, para uma injeção instantânea e pontual, é:

$$c(x, t) = \frac{M}{A\sqrt{4Dt}} \exp\left(-\frac{(x - vt)^2}{4Dt}\right) \quad (8.2)$$

onde:

$M$  = massa do traçador injetada em  $x = 0$  e  $t = 0$ ;

$D$  ou  $D_L$  = coeficiente de dispersão longitudinal ( $\text{m}^2/\text{s}$ );

$v$  = velocidade média do escoamento na seção considerada ( $\text{m/s}$ )

$x$  = distância medida ao longo do canal a partir da seção de injeção ( $\text{m}$ );

$t$  = tempo ( $\text{s}$ ).

Historicamente, a Equação 8.2 é anterior à Equação 8.1, sendo conhecida como solução de Taylor (RUTHERFORD, 1994), pois foi TAYLOR (1954) quem primeiro a obteve, quando estudava a dispersão em escoamento turbulento em tubulações (SINGH & BECK, 2003).

## 8.2.2 O modelo de Singh & Beck

### 8.2.2.1 Metodologia

Outra solução de 8.1, satisfazendo a condição inicial  $c(x,0) = 0$  e as condições de contorno:

$$c(0,t) = c_0 \quad (8.1a)$$

$$\partial c(\infty,t)/\partial x = 0 \text{ para } t > 0 \quad (8.1b)$$

obtida por OGATA (1958) e BEAR (1972), citados em SINGH & BECK (2003), é:

$$\frac{c}{c_0} = \frac{1}{2} \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{x-vt}{2\sqrt{Dt}} \right) + \exp \left( \frac{vx}{D} \right) \operatorname{erfc} \left( \frac{x+vt}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \quad (8.3)$$

onde:  $\operatorname{erfc}(\cdot)$  = função erro complementar, sendo expressa por:

$$\operatorname{erfc}(y) = 1 - \operatorname{erf}(y) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^y \exp(-z^2) dz \quad (8.4)$$

A Equação 8.3 satisfaz as condições de contorno (8.1a) e (8.1b), levando em consideração que:  $\operatorname{erf}(0) = 0$ ;  $\operatorname{erf}(\infty) = 1$ ;  $\operatorname{erf}(-y) = -\operatorname{erf}(y)$  (SINGH & BECK, 2003).

Sendo  $vx/D > 100$ , o segundo termo da Equação 8.3 pode ser desprezado, em comparação com o primeiro termo, segundo OGATA & BANKS (1961), citado em SINGH & BECK (2003). Dessa forma, obtém-se uma solução truncada para a Equação 8.3:

$$\frac{c}{c_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{x-vt}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (8.5)$$

A Equação 8.5 corresponde à Equação 8.2 para grandes valores de  $vx/D$  e para uma injeção pontual e instantânea (SINGH & BECK, 2003) como é o caso dos experimentos realizados (Capítulo 7).

### 8.2.2.2 Propagação da concentração

Para a aplicação do modelo de SINGH & BECK (2003) é necessário que as medições de perfis temporais de concentração tenham sido realizadas em, pelo menos, duas estações a jusante do ponto de injeção. Sendo  $X$  a distância entre essas duas estações, SINGH & BECK (2003) consideram que o perfil temporal de concentração na estação de montante possa ser decomposto em uma série de pulsos de concentração de duração infinitesimal. O perfil de concentração na estação de jusante é, então, a soma das respostas dos pulsos de concentração medidos na estação de montante.

A Equação 8.1 é linear, o que significa que soluções tais como as das equações 8.2 ou 8.3 possam ser adicionadas para serem aplicadas a problemas complexos. Este é o princípio da superposição (RUTHERFORD, 1994). Talvez este aspecto tenha inspirado SINGH & BECK (2003) a abordar, dessa maneira tão inovadora, e com base em medições de campo, o problema da propagação da concentração.

Assim, a variação temporal da concentração na seção de jusante  $c(X,t)$ , devido à entrada, também variando no tempo, da concentração na estação de montante  $c_m(t)$ , pode ser representada pela equação de convolução:

$$c(X, t) = \int_0^t c_m(\boldsymbol{t}) J(X, t - \boldsymbol{t}) d\boldsymbol{t} \quad (8.6)$$

onde:

$c_m(\boldsymbol{t})$  = concentração na estação de montante no tempo  $\boldsymbol{t}$ ;

$J(X, \boldsymbol{t})$  = resposta na estação de jusante devido a um pulso unitário instantâneo de concentração a montante.

Se o tempo de passagem da pluma for discretizado em um número de intervalos de tempo uniformes, de duração  $\Delta t$ , a Equação 8.6 pode ser apresentada na seguinte forma, conforme MOREL-SEYTOUX (1975), mencionado em SINGH & BECK (2003):

$$c(X, n\Delta t) = \sum_{g=1}^n \bar{c}_m(\mathbf{g}\Delta t) \mathbf{d}\{(n-g+1)\Delta t\} \quad (8.7)$$

onde:

$\bar{c}_m(\mathbf{g}\Delta t)$  = concentração média a montante, durante o intervalo de tempo  $\mathbf{g}\Delta t$  ;

$\mathbf{d}(\cdot)$  = pulso discreto de resposta a jusante (kernel), sendo expresso como:  
 $\mathbf{d}(m) = U(m) - U(m-1)$ .

Os índices  $m$ ,  $n$  e  $\mathbf{g}$  indicam intervalos de tempo. A resposta discreta no final do  $m$ -ésimo intervalo de tempo  $U(m)$  é obtida da Equação 8.3 para  $c_0 = 1$  e  $x = X$ , como:

$$U(m) = \frac{1}{2} \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{X - vm\Delta t}{2\sqrt{Dm\Delta t}} \right) + \exp \left( \frac{vX}{D} \right) \operatorname{erfc} \left( \frac{X + vm\Delta t}{2\sqrt{Dm\Delta t}} \right) \right] \quad (8.8)$$

O modelo de SINGH & BECK (2003) usa a solução analítica completa da equação de advecção e dispersão (a Equação 8.8 representa esta solução). Assim, ele se torna livre de erros da aproximação de nuvem congelada ("*frozen cloud approximation*"), utilizada em muitos outros modelos, como antes comentado. Além disso, ele se aplica para quaisquer valores de  $vx/D$ .

Sendo conhecidos os parâmetros  $v$  e  $D$ , a variação temporal da concentração na estação de jusante devido à correspondente variação da concentração temporal na estação de montante pode ser calculada através da Equação 8.7. Este procedimento pode ser repetido para se calcular a propagação da concentração para jusante, usando-se trechos adicionais.

O modelo de SINGH & BECK (2003), foi aplicado e calibrado para os dados obtidos nos trabalhos de campo, em ocasião de seca, como já mencionado. Após a calibração do modelo, apresentada no Item 8.3, foi realizada a sua convolução, passando-se de uma injeção instantânea dos experimentos de campo para uma situação de injeção contínua, com concentração constante, para períodos de 9 horas de duração, que é o tempo efetivo de operação normal de dragagem de sucção e recalque no período diurno, considerado no presente estudo, simulando assim o despejo de dragagem no sistema de DLD, e permitindo calcular a propagação para jusante, da concentração de sedimentos em suspensão, devido a esse despejo. Este assunto será

tratado no Capítulo 9, juntamente com a avaliação de aspectos do impacto ambiental resultante do despejo.

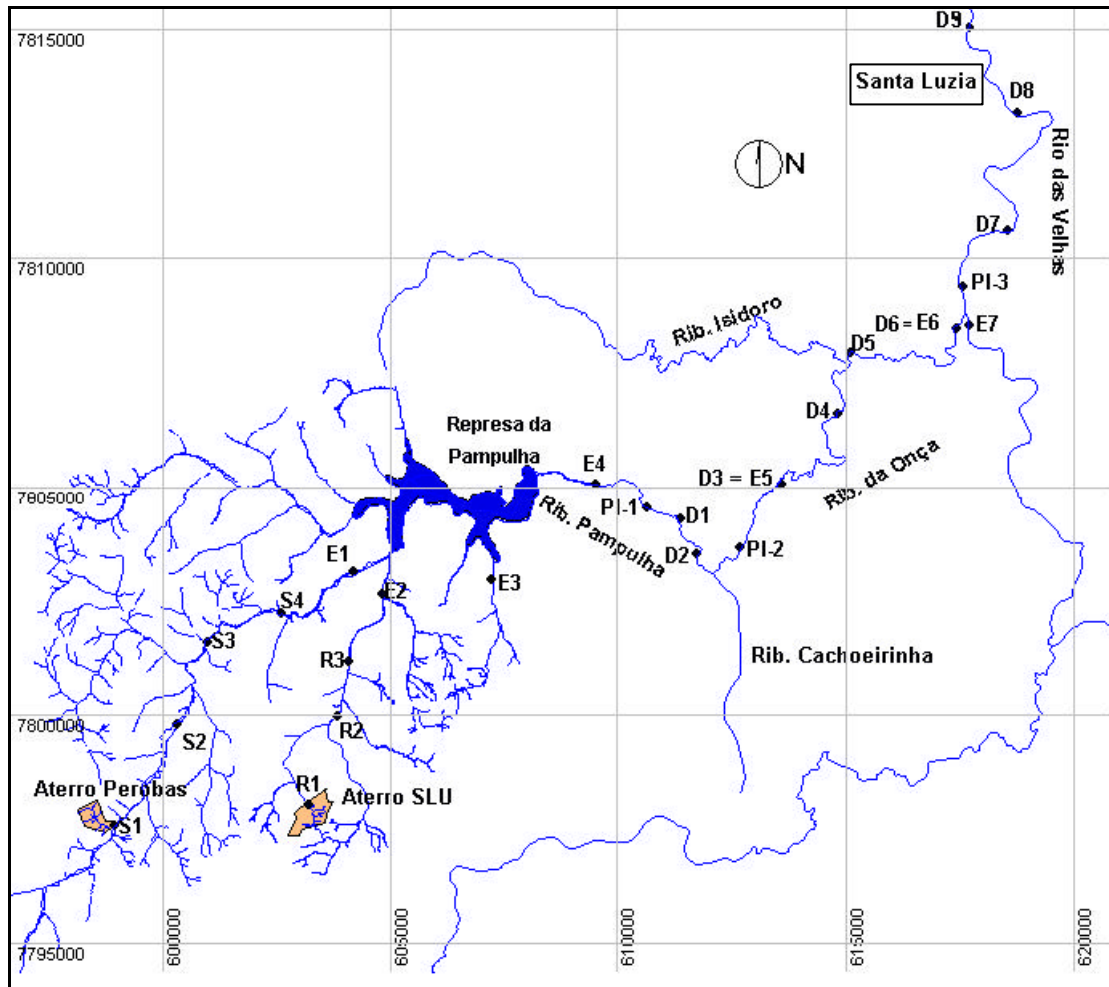
### **8.3 Aplicação e calibração do modelo de Singh & Beck com os dados de campo**

#### **8.3.1 Preparação dos dados**

Os dados obtidos nos experimentos de campo realizados em 2000 e 2001, já comentados no Capítulo 7, foram preparados para serem utilizados na aplicação do modelo de SINGH & BECK (2003). Algumas curvas de passagem de concentração fluorimétrica (para água) e de contagem do  $^{99m}\text{Tc}$  (para o sedimento em suspensão) apresentadas nas figuras 7.2, 7.4 e 7.7, correspondentes aos experimentos efetuados, foram extrapoladas, conforme as ponderações já comentadas no antepenúltimo parágrafo do Item 7.2.1. O experimento realizado em 26/06/2001, no Rio das Velhas, não necessitou de extrapolação, pois as curvas de passagem das plumas foram integralmente registradas.

Dessa forma, o modelo de SINGH & BECK (2003) foi aplicado separadamente para a propagação da água e do sedimento em suspensão para as curvas que aparecem, a seguir, nas figuras 8.1 a 8.4. Para a aplicação, todas as curvas foram discretizadas, em intervalos de tempo constantes, de 1 minuto.

Os pontos de injeção (PI) e as estações de detecção dos quatro experimentos estão assinalados na Tabela 7.1 e são também mostrados na Figura 1.6, novamente apresentada a seguir.



- 1) **Estações E1 a E7:** medições hidrossedimentométricas e coleta de água e sedimentos para análise de metais e trítio.
- 2) **Estações R1 a R3 e S1 a S4:** coleta de água e sedimentos para análise de metais e trítio.
- 3) **Estações PI-1 a PI-3:** pontos de injeção instantânea de traçadores.
- 4) **Estações D1 a D9:** monitoramento euleriano da passagem das plumas de traçadores.
- 5) **Ribeirão Sarandí:** estações S1, S2, S3, S4 e E1; **Ribeirão Ressaca:** estações R1, R2, R3 e E2.
- 6) **Maioria das estações** medições de parâmetros físico-químicos da água.

Figura 1.6 - Região de estudos na Bacia Hidrográfica da Pampulha e Rio das Velhas

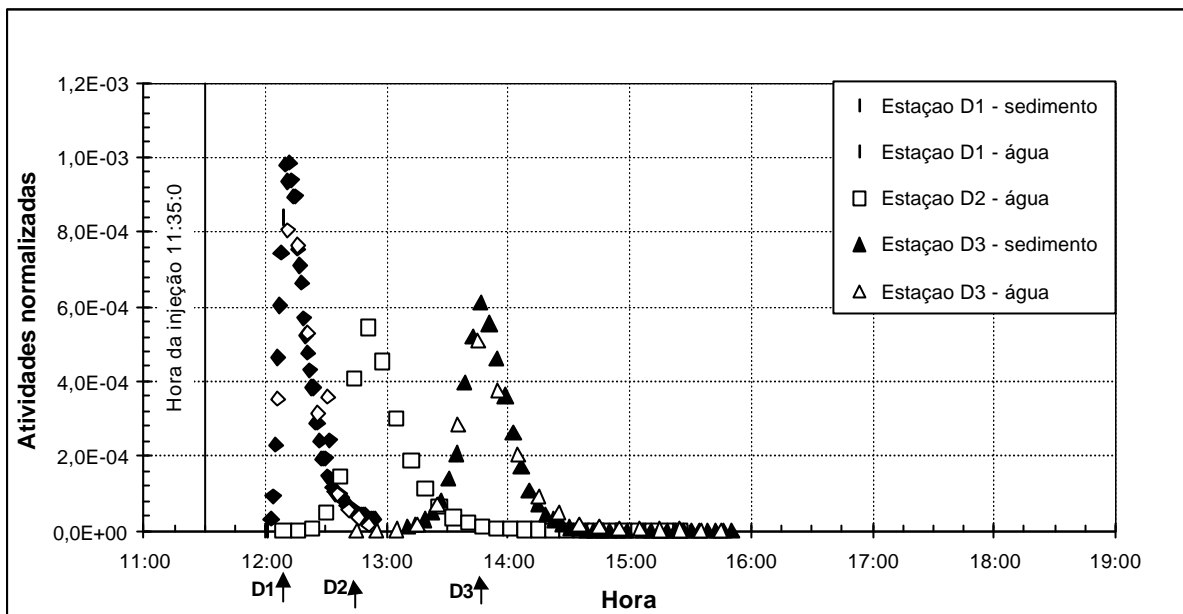


Figura 8.1 - Curvas de passagem da água e sedimento marcados, nos ribeirões Pampulha e Onça, em 27/09/2000, considerando extrapolações para a aplicação do modelo

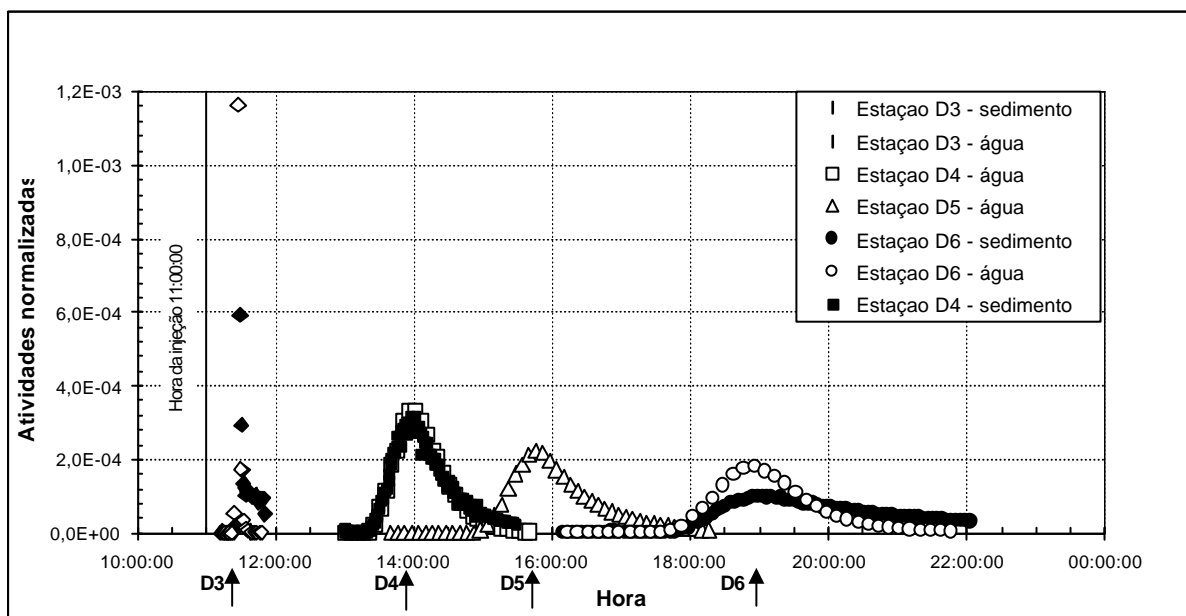


Figura 8.2 - Curvas de passagem da água e sedimento marcados, no Ribeirão da Onça, em 03/10/2000, considerando extrapolações para a aplicação do modelo



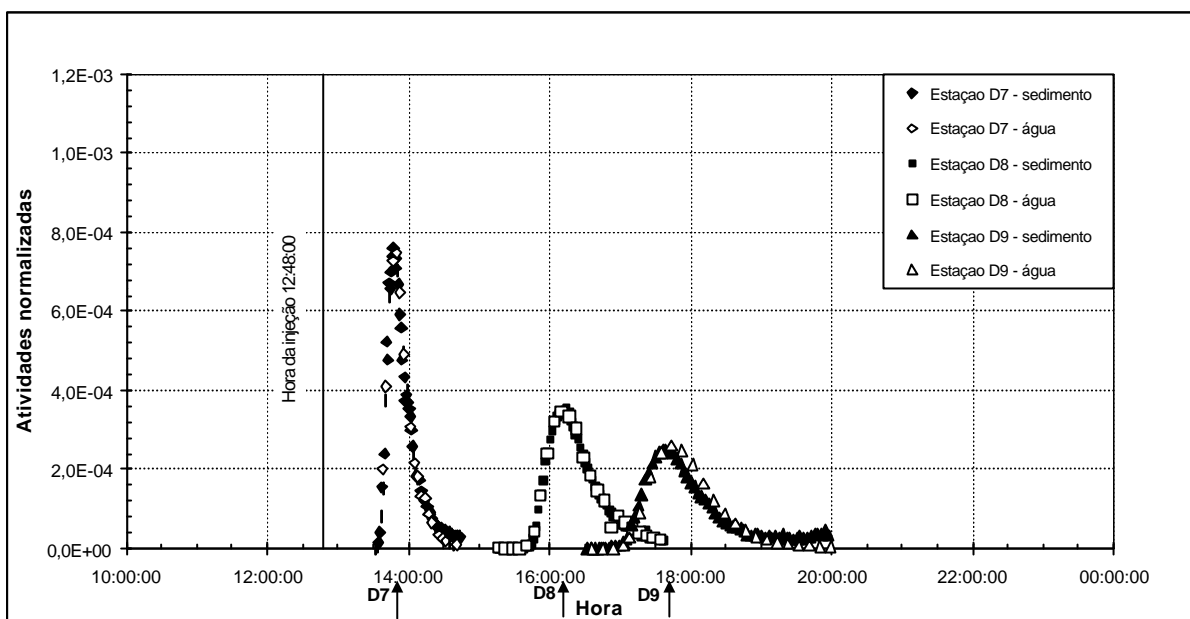


Figura 8.3 - Curvas de passagem da água e sedimento marcados, no Rio das Velhas em 26/06/2001. Não foi necessário efetuar extrapolações para a aplicação do modelo

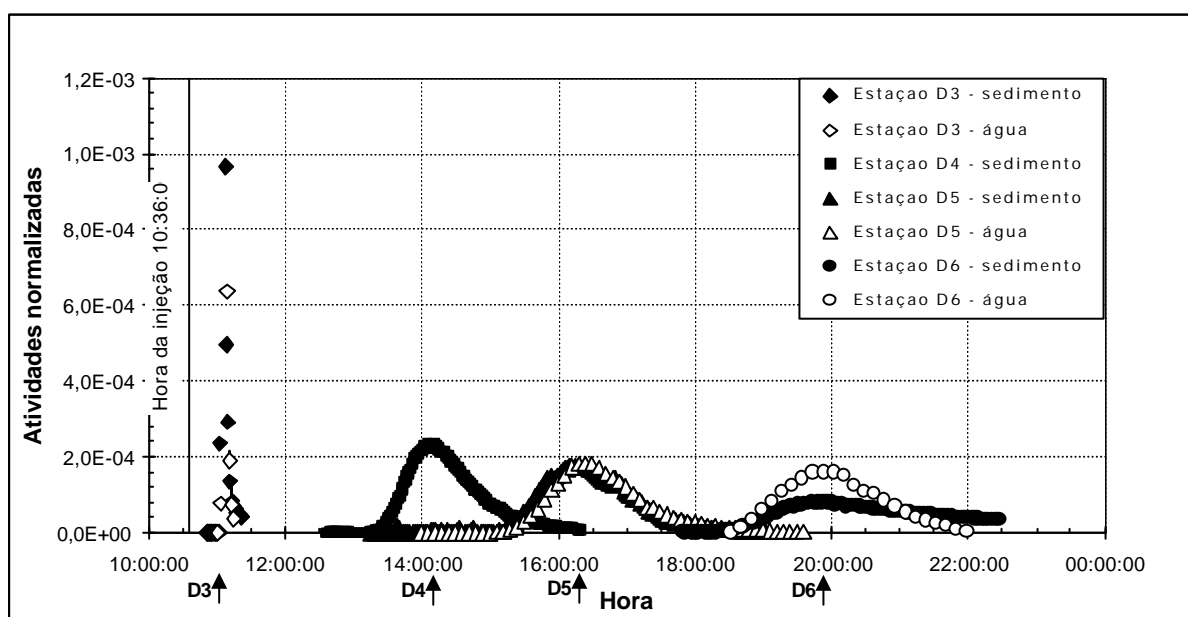


Figura 8.4 - Curvas de passagem da água e sedimento marcados, no Ribeirão da Onça, em 03/07/2001, considerando extrapolações para a aplicação do modelo

As curvas apresentadas são normalizadas, ou seja: as suas ordenadas são as concentrações das curvas originais divididas pela área debaixo de cada curva. Assim, foi possível comparar o comportamento das duas fases medidas (água e sedimento em suspensão). Dessa maneira as respostas não incluem a diluição, apenas a advecção e a dispersão. A diluição será considerada no estudo do impacto ambiental (Capítulo 9), onde a concentração na seção de jusante é

multiplicada pela razão entre as vazões na seção de montante e de jusante, as quais foram obtidas com a marcação de água com Rodamina WT, empregando-se a Equação 7.1.

### 8.3.2 Aplicação e calibração

Para a aplicação do modelo de SINGH & BECK (2003) foi desenvolvido um programa de computador em Linguagem Fortran (SALIM, 2003).

A calibração do modelo, para a pluma de água marcada com Rodamina WT e de sedimento em suspensão marcado com  $^{99m}\text{Tc}$ , foi realizada entrando-se com pares de valores de velocidade de advecção ( $v$ ) e do coeficiente de dispersão ( $D$ ) a fim de se obter o melhor casamento entre as curvas calculadas e as reais tendo como base, a guiar as tentativas, a posição e altura do pico.

O valor de velocidade para a rodada inicial foi tomado como sendo o do centróide das plumas entre as estações consideradas, tanto para a água quanto para o sedimento em suspensão. O valor do coeficiente de dispersão para a rodada inicial foi obtido, em cada caso, através de cálculos empregando-se fórmulas da literatura que permitem a sua estimativa em função de parâmetros do escoamento, como: profundidade ( $H$ ); vazão ( $Q$ ); velocidade ( $v$ ); largura do canal ( $W$ ); raio hidráulico ( $R$ ); gradiente hidráulico ( $I$ ) ou a declividade do fundo ( $S$ ); velocidade de cisalhamento ( $u^* = \sqrt{gHI}$ ), onde  $g$  é a aceleração da gravidade.

Em SINGH & BECK (2003) são apresentadas seis formulações para a previsão do coeficiente de dispersão sendo que, durante os trabalhos de calibração do modelo, uma das formulações que geralmente deu valores iniciais próximos da altura do pico medido foi a de LIU (1977), citado em SINGH & BECK (2003), cuja expressão, é:

$$D = 0,18 \frac{(u^*)^{0,5} Q^2}{v^{1,5} R^3} \quad (8.9)$$

No presente trabalho priorizou-se ajustar o instante de ocorrência do pico e a sua magnitude, pois, em muitos trabalhos de Engenharia, o valor da concentração do pico é o aspecto mais importante, na maior parte do tempo, como assinalado em THACKSTON *et al.* (1967). No caso do despejo de dragagem aqui abordado, um dos aspectos do impacto ambiental avaliado no Capítulo 9 é a comparação do aumento da concentração devido ao despejo, em vários pontos

dos cursos d'água a jusante, com as concentrações naturais existentes em época de seca (ocasião mais crítica para este impacto). Neste aspecto, o valor que mais importa é o máximo da concentração atingido, em cada local, em função do despejo.

Assim, o primeiro passo foi ajustar o instante de ocorrência do pico da curva calculada ao da curva medida. Nesta situação, o termo exponencial na Equação 8.2 é igual a zero, ou muito próximo desse valor, para o tempo de passagem do pico, e a concentração é inversamente proporcional à raiz quadrada do coeficiente de dispersão. Então, conforme sugerido por THACKSTON *et al.* (1967), o coeficiente de dispersão que produz um melhor ajuste da altura do pico calculado ao medido, é obtido multiplicando-se o valor do coeficiente de dispersão anterior pela quadrado da razão da altura do pico de concentração calculado pela altura do pico de concentração medido. Em síntese: a dispersão é inversamente proporcional ao quadrado da altura do pico.

Para a otimização do ajuste, em geral, foram feitas cerca de quatro a cinco tentativas. Os resultados dos ajustes estão sintetizados na Tabela 8.1 e as curvas reais e modeladas se encontram, a seguir, nas figuras 8.5 a 8.8.

### **8.3.3 Resultados das simulações**

#### 8.3.3.1 Experimento nos ribeirões Pampulha e Onça (27/09/2000)

Tendo sido efetuado o lançamento dos traçadores em PI-1, junto à pista do Aeroporto da Pampulha (figuras 1.6, 7.1a e 7.1b) e detecções na Estação D1 (Figura 7.1d), ainda na área do aeroporto, em D2, já na área canalizada da Av. Cristiano Machado, ambas no Ribeirão Pampulha, e na Estação D3, no Ribeirão da Onça (Figura 7.3d), logo antes da cachoeira (Figura 7.3e), foi possível analisar os resultados das curvas de passagem (Figura 8.1) sendo os resultados da aplicação e calibração do modelo de SINGH & BECK (2003) apresentados na Tabela 8.1 e Figura 8.5.

Tabela 8.1 - Valores de velocidade de advecção e de coeficientes de dispersão obtidos com o ajuste do modelo de Singh & Beck aos dados de campo

<b>Ribeirões Pampulha e Onça 27/09/2000</b>	<b>Trecho D1-D2</b>	<b>Trecho D1-D3</b>	<b>Trecho D2-D3</b>		
Água (Rodamina WT)	$v = 0,441\text{m/s}$ $D = 9,2\text{m}^2/\text{s}$	$v = 0,741\text{m/s}$ $D = 15,1\text{m}^2/\text{s}$	$v = 0,936\text{m/s}$ $D = 5,5\text{m}^2/\text{s}$		
Sedimento fino ( $^{99\text{m}}\text{Tc}$ )		$v = 0,714\text{ m/s}$ $D = 8,8\text{m}^2/\text{s}$			
<b>Ribeirão da Onça 03/10/2000</b>					
<b>Trecho D3-D4</b>				<b>Trecho D4-D6</b>	
Água (Rodamina WT)	$v = 0,379\text{m/s}$ $D = 11,2\text{m}^2/\text{s}$			$v = 0,344\text{m/s}$ $D = 10,2\text{m}^2/\text{s}$	
Sedimento fino ( $^{99\text{m}}\text{Tc}$ )	$v = 0,386\text{m/s}$ $D = 11,9\text{m}^2/\text{s}$			$v = 0,326\text{m/s}$ $D = 54,0\text{m}^2/\text{s}$	
<b>Rio das Velhas 26/06/2001</b>					
<b>Trecho D7-D8</b>	<b>Trecho D8-D9</b>				
Água (Rodamina WT)	$v = 0,550\text{m/s}$ $D = 16,2\text{m}^2/\text{s}$	$v = 0,480\text{m/s}$ $D = 14,6\text{ m}^2/\text{s}$			
Sedimento fino ( $^{99\text{m}}\text{Tc}$ )	$v = 0,541\text{m/s}$ $D = 13,9\text{m}^2/\text{s}$	$v = 0,525\text{m/s}$ $D = 24,8\text{m}^2/\text{s}$			
<b>Ribeirão da Onça 03/07/2001</b>					
<b>Trecho D3-D4</b>	<b>Trecho D3-D5</b>	<b>Trecho D4-D5</b>	<b>Trecho D4-D6</b>	<b>Trecho D5-D6</b>	
Água (Rodamina WT)		$v = 0,282\text{m/s}$ $D = 9,4\text{m}^2/\text{s}$			$v = 0,327\text{m/s}$ $D = 7,2\text{m}^2/\text{s}$
Sedimento fino ( $^{99\text{m}}\text{Tc}$ )	$v = 0,314\text{m/s}$ $D = 12,8\text{m}^2/\text{s}$	$v = 0,290\text{m/s}$ $D = 11,4\text{m}^2/\text{s}$	$v = 0,264\text{m/s}$ $D = 7,3\text{m}^2/\text{s}$	$v = 0,300\text{m/s}$ $D = 21,5\text{m}^2/\text{s}$	$v = 0,320\text{m/s}$ $D = 30,6\text{m}^2/\text{s}$

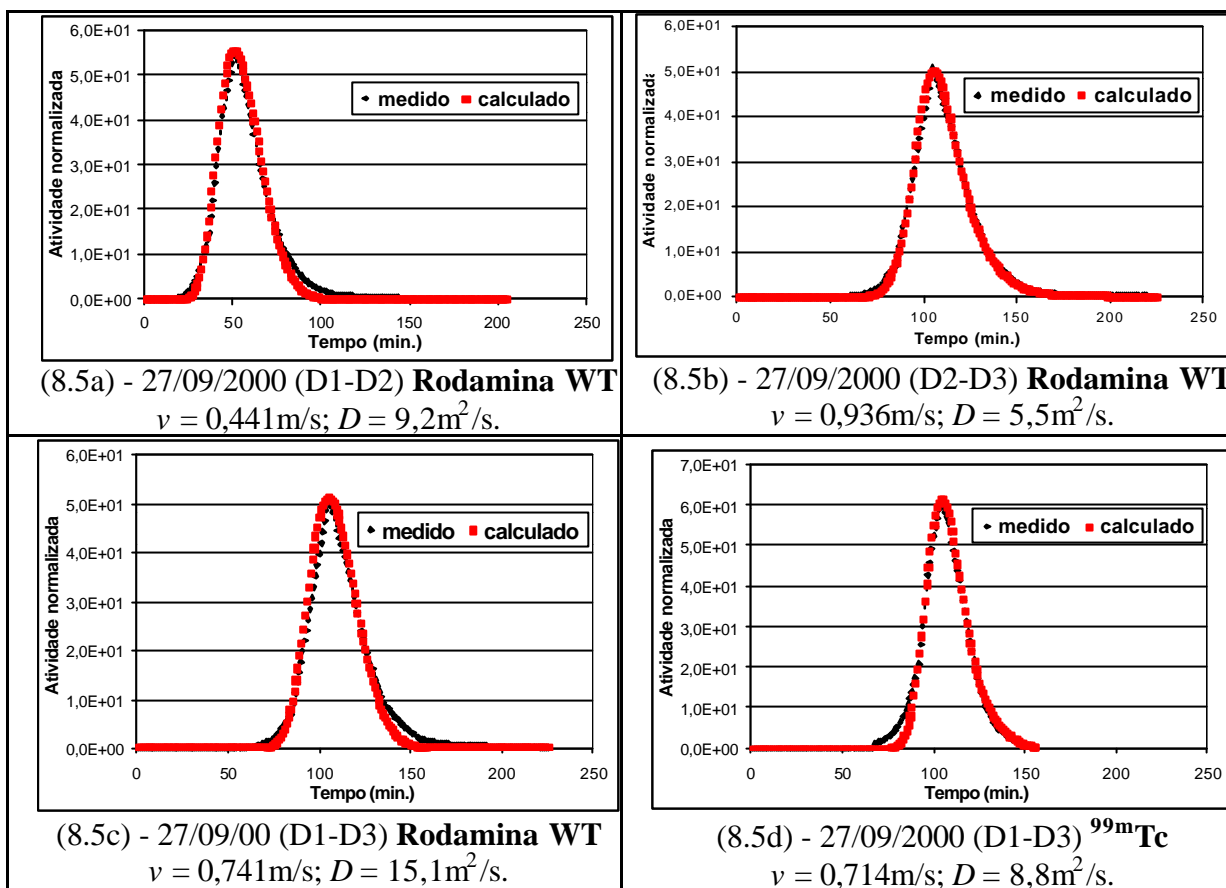


Figura 8.5 - Curvas de passagem (real e modelada) da água (Rodamina WT) e sedimento marcado ( $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ), nos ribeirões Pampulha e Onça, em 27/09/2000

Observa-se um bom ajuste dos valores modelados aos registrados no campo. No trecho D1-D2 (Figura 8.5a), a pluma de Rodamina WT se deslocou com velocidade inferior à metade daquela apresentada no trecho D2-D3 (Figura 8.5b) tendo porém, no trecho de menor velocidade, apresentado um coeficiente de dispersão de quase o dobro. Dentre vários fatores que podem ter contribuído para isso, um aspecto a ser comentado é que o trecho D1-D2 é constituído de uma parte em canal natural (com geometria, vegetação e outros obstáculos a promover maior resistência ao escoamento - Figura 7.1d), antes do Ribeirão Pampulha entrar na Av. Cristiano Machado, onde passa a ser canalizado e onde foi estabelecida a Estação D2. Por outro lado, o trecho D2-D3 é totalmente canalizado, certamente com menor resistência ao escoamento que o trecho anterior e recebendo a contribuição do Ribeirão Cachoeirinha e passando a se constituir no Ribeirão da Onça (Figura 1.6) teve, neste dia, a sua vazão aumentada de 2,18 para 3,10 $\text{m}^3/\text{s}$  (Tabela 9.1), conduzindo à maior velocidade neste trecho. Estes dois aspectos favoreceram, um domínio da advecção sobre a dispersão, similar ao raciocínio utilizado na aproximação de "nuvem congelada" ("*frozen cloud approximation*"), comentada anteriormente neste capítulo.

No trecho D1-D2, de maior dispersão, nota-se uma ligeira sub-avaliação, pelo modelo, das concentrações na parte final do ramo descendente, na Figura 8.5a. Esta tendência se torna muito mais acentuada, sobretudo com os valores medidos e calculados para a pluma de sedimento em suspensão, nos trechos D4-D6 e D5-D6 dos experimentos comentados no item 8.3.3.2, no Ribeirão da Onça, em 03/10/2000 e 03/07/2001.

Mesmo o modelo de SINGH & BECK (2003) usando para o cálculo da propagação da concentração, a solução exata da equação unidimensional de advecção e dispersão e os valores registrados em duas seções, como mostrado, faz uso das equações 8.1 e 8.3. Esta última é uma forma mais completa (sem truncamento) da Equação 8.2, a conhecida solução de Taylor, a qual prediz que a distribuição de concentração com a distância em um dado tempo segue o perfil gaussiano (em forma de sino) (RUTHERFORD, 1994).

Poucos perfis observados na natureza são gaussianos. Eles são normalmente assimétricos, com a parte ascendente íngreme em relação à descendente (cauda), mais alongada. Três aspectos a influenciar esse comportamento, são:

- normalmente, por razões práticas, são registrados perfis temporais (concentração em função do tempo, em um local fixo). A Equação 8.2 (e também a 8.3) fornece perfis espaciais gaussianos, mas apresenta perfis temporais assimétricos. Essa assimetria é decorrente de que, durante o tempo de passagem da pluma pela estação de registro, ocorre também a dispersão longitudinal. Desse modo a assimetria em perfis temporais de traçadores não é, em si mesma, evidência de inadequações na Equação 8.2 (RUTHERFORD, 1994). Para contornar estes aspectos são feitas transformações para se passar de perfis temporais para perfis espaciais e aproximações do tipo "nuvem congelada";
- a assimetria que ocorre no perfil de concentrações na zona advectiva, cujo comprimento vai desde o ponto de injeção até um ponto em que o traçador tenha se misturado em toda a seção, demora muito a desaparecer para jusante;
- a presença de zonas mortas em canais naturais estende consideravelmente o comprimento da zona advectiva.

Este último aspecto já foi notado para a detecção de sedimento em suspensão na seção D5, com influência na D6, no Ribeirão da Onça, nos experimentos ali realizados em 03/10/2000 e 03/07/2001 (figuras 7.4, 7.7, 8.6 e 8.7).

A possibilidade de se estudar, como aqui feito, o comportamento conjunto da água e do sedimento em suspensão, tendo este último maior massa específica que aquela, e levando em consideração o que foi abordado nos parágrafos anteriores, abre uma enorme perspectiva de pesquisas aplicadas de campo e laboratório, que poderá resultar em um avanço no entendimento do complexo fenômeno do transporte e dispersão de matéria em escoamentos unidirecionais (caso de rios com profundidades relativamente baixas) e multidirecionais (caso de estuários e mar aberto).

No dia 27/09/2000, o detetor de radiação utilizado em D2 apresentou problemas e não foi possível avaliar o comportamento da pluma de sedimento em suspensão, separadamente, nos trechos D1-D2 e D2-D3.

A aplicação do modelo ao trecho D1-D3, para as plumas de água e sedimento em suspensão marcados (figuras 8.5c e 8.5d) mostra interessantes aspectos. O primeiro deles é que o ajuste do modelo às duas fases (água e sedimento) foi bom, mesmo não sendo iguais as massas específicas da água e do componente transportado (no caso o sedimento), hipótese adotada no desenvolvimento dos modelos de dispersão longitudinal aqui comentados. A velocidade de propagação das duas plumas é praticamente a mesma ( $\sim 0,7\text{m/s}$ ), e também as formas das curvas de passagem sendo maior, neste trecho, o coeficiente de dispersão para a fase aquosa.

Para a fase aquosa, a sub-avaliação, pelo modelo, das concentrações na parte final do ramo descendente da curva na Figura 8.5c está presente, como era de se esperar, pois esta é apenas a composição dos dois trechos: D1-D2 (Figura 8.5a) e D2-D3 (Figura 8.5b); na aplicação do modelo, a concentração na parte final de um trecho é a concentração de entrada do trecho seguinte.

#### 8.3.3.2 Experimentos no Ribeirão da Onça (03/10/2000 e 03/07/2001)

Os experimentos no Ribeirão da Onça efetuados em 03/10/2000 e 03/07/2001, ambos em ocasião de seca e tendo apresentado resultados semelhantes, são aqui comentados em conjunto.

Com o lançamento dos traçadores em PI-2, no Ribeirão da Onça, na altura da Estação do Metrô São Gabriel (figuras 1.6, 7.3a, 7.3b e 7.3c) e detecções nas estações D3, D4, D5 e D6, respectivamente mostradas nas figuras 7.3d, 7.3f, 7.3g e 7.3h, foram registrados e posteriormente analisados os resultados das curvas de passagem (figura 8.2 e 8.4). Os resultados da aplicação e calibração do modelo utilizado são mostrados na Tabela 8.1 e figuras 8.6 e 8.7.

No caso da água se observam valores de  $D$  bastante uniformes ao longo dos trechos estudados, sobretudo em 03/10/2000 ( $10,2 < D < 11,2\text{m}^2/\text{s}$ ). Em uma primeira observação nota-se que para todos os ramos descendentes o modelo de SINGH & BECK (2003) subestima as concentrações medidas de Rodamina WT (traçador da água) e  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  (traçador do sedimento em suspensão), por razões já mencionadas no item anterior. Esta discrepância é maior no caso do sedimento em suspensão, o qual deve sofrer maior influência de meandramentos e zonas mortas que a água, devido à sua maior massa específica, como já comentado no Capítulo 7, para a Estação D5.

Observe-se que o ramo descendente das curvas de detecção do sedimento em suspensão após a passagem pela Estação D5 são muito mais alongados, contribuindo para os altos valores dos coeficientes de dispersão calculados para o trecho D4-D6 em 03/10/2000 ( $D = 54,0\text{m}^2/\text{s}$  - Figura 8.6f) e, em 03/07/2001, nos trechos D4-D6 ( $D = 21,5\text{m}^2/\text{s}$  - Figura 8.7e) e D5-D6 ( $D = 30,6\text{m}^2/\text{s}$  - Figura 8.7g), pois os coeficientes de dispersão são estimados com base no segundo momento da distribuição, o qual confere mais peso às caudas (THACKSTON *et al.* 1967).



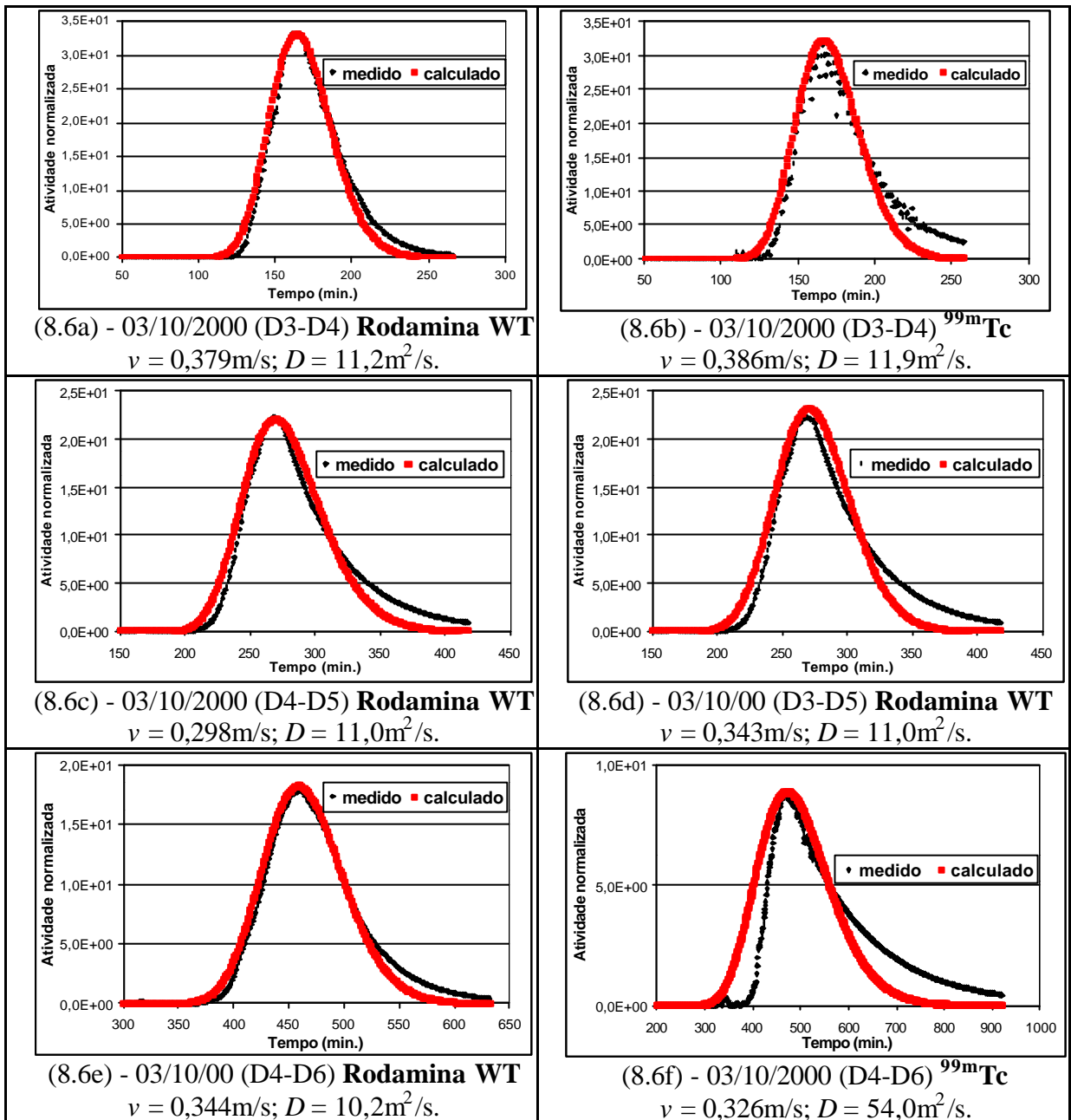


Figura 8.6 - Curvas de passagem (real e modelada) da água (Rodamina WT) e sedimento marcado ( $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ), no Ribeirão da Onça, em 03/10/2000

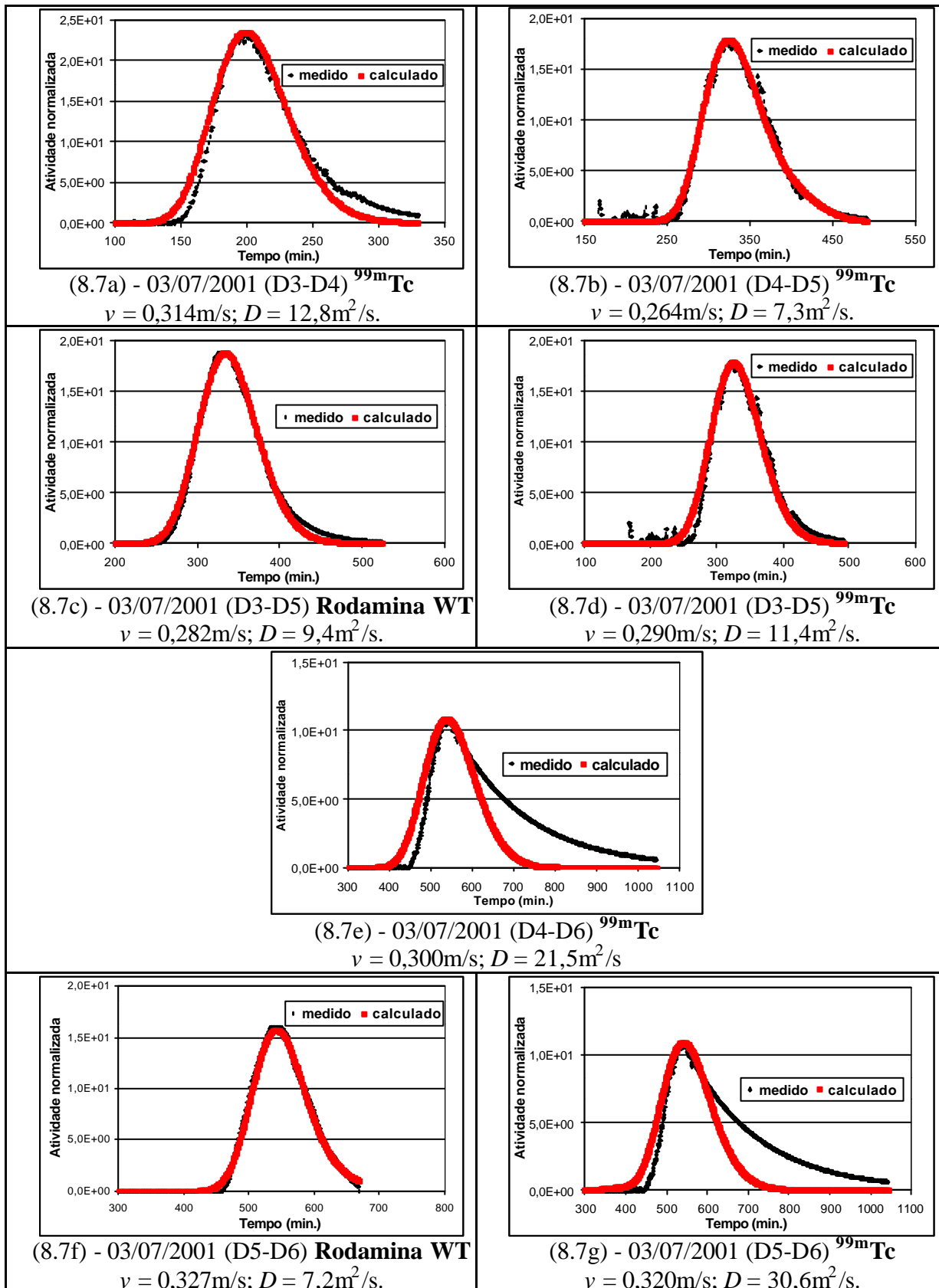


Figura 8.7 - Curvas de passagem (real e modelada) da água (Rodamina WT) e sedimento marcado ( $^{99m}\text{Tc}$ ), no Ribeirão da Onça, em 03/07/2001

### 8.3.3.3 Experimento no Rio das Velhas (26/06/2001)

Com o lançamento dos traçadores em PI-3, no Rio das Velhas, cerca de 530m a jusante da Foz do Ribeirão da Onça e detecções nas estações D7, D8, D9 (figuras 1.6 e 7.5), foram registrados e analisados os resultados das curvas de passagem (Figura 8.3). Os resultados da aplicação e calibração do modelo são mostrados na Tabela 8.1 e Figura 8.8.

Observa-se aqui também um bom ajuste dos valores modelados aos registrados no campo. No primeiro trecho D7-D8 o modelo subestimou as concentrações medidas na parte final do ramo descendente, tanto para a água quanto para o sedimento em suspensão marcados (figuras 8.8a e 8.8b). No trecho D8-D9 o ajuste foi melhor, no caso do traçador da água (Figura 8.8c). Neste trecho, para o sedimento em suspensão, com  $D = 24,8\text{m}^2/\text{s}$  (Figura 8.8d), nota-se no registro em D9 uma oscilação horizontal na parte final a qual é, provavelmente, devida a alguma influência de zona morta retendo parte do material com atividade sensível em relação aos baixos sinais da passagem da cauda da curva. O ajuste do modelo é bom até o início dessa oscilação.

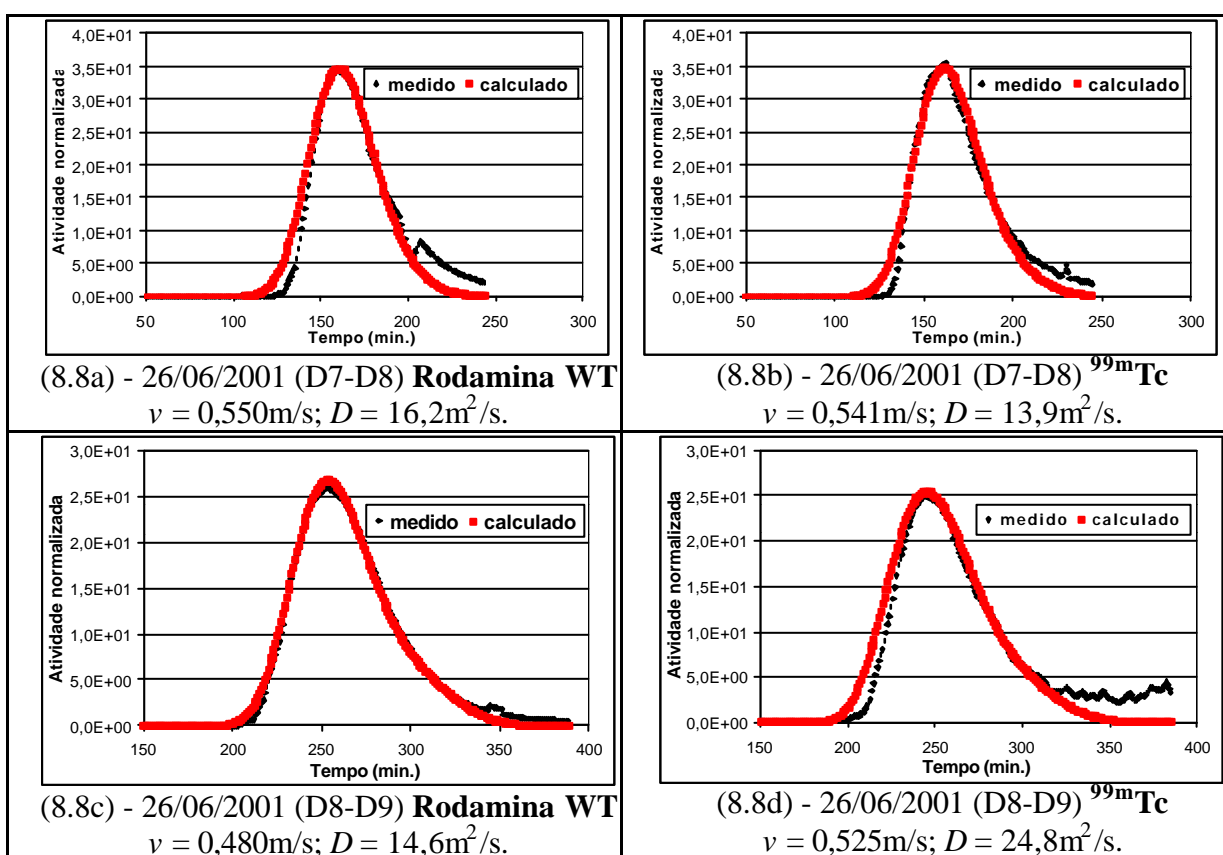


Figura 8.8- Curvas de passagem (real e modelada) da água (Rodamina WT) e sedimento marcado ( $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ), no Rio das Velhas, em 26/06/2001

#### 8.3.3.4 Comentários gerais sobre os resultados

De posse dessas ferramentas poderosas que são os traçadores aqui utilizados, associadas de forma sinérgica a modelos matemáticos, conforme comentado no primeiro parágrafo desse capítulo, pretende-se, em seguimento à presente tese, trabalhar mais profundamente com os dados aqui apresentados e em outros a serem futuramente colhidos, nesta e em outras bacias hidrográficas, e também em laboratório, sobre a dinâmica da água e do sedimento em suspensão por ela transportado, estudando-se as diferenças entre ambos.

Pode-se associar os valores de  $v$  e  $D$  obtidos com a aplicação do modelo aos parâmetros do escoamento: profundidade; vazão; velocidade; largura do canal; raio hidráulico; gradiente hidráulico; meandramento; rugosidade; velocidade de cisalhamento e outros, de forma a se ter uma melhor compreensão dos fenômenos e mesmo procurar, através da introdução de parâmetros adequados que levem em conta a diferença de massa específica entre a água e os materiais por ela transportados em suspensão, melhorar as previsões do modelo de SINGH & BECK (2003) e de outros modelos.

As técnicas aqui mostradas possibilitam que se continue a trilhar com os traçadores, no meio ambiente, caminho semelhante ao que se percorre na Medicina Nuclear, na melhoria da compreensão do funcionamento do corpo humano e no aperfeiçoamento dos diagnósticos e tratamentos.

## 9 SIMULAÇÃO DO DESPEJO DE DRAGAGEM DA REPRESA DA PAMPULHA NOS CURSOS D'ÁGUA A JUSANTE E AVALIAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS DELE DECORRENTES

### 9.1 *Considerações iniciais*

Com a aplicação e calibração do modelo de SINGH & BECK (2003) aos dados de campo (Capítulo 8), em ocasião de seca, época da menor capacidade de hidrot transporte do escoamento e, portanto, a mais crítica sob o ponto de vista de impactos ambientais físicos (concentração natural geralmente mais baixa e maior chance de sedimentação), o próximo passo foi avaliar alguns aspectos do impacto ambiental de um possível despejo (aumento da concentração devido ao despejo e possibilidade de sedimentação) nos cursos d'água a jusante, dos sedimentos finos dragados na Represa da Pampulha, e para ali transportados pelo sistema de DLD.

Para tanto, foi necessário fazer uma simulação empregando o modelo numérico adotado, a teoria da convolução, e os parâmetros calculados ( $v$  e  $D$ ), passando-se de uma injeção instantânea dos experimentos de campo para uma situação de injeção contínua, com concentração constante, para períodos de 9 horas de duração. Esse foi o tempo efetivo considerado no presente estudo para a operação da draga de sucção e recalque no período diurno, uma vez que, dependendo da situação, pode ser antieconômico ou inconveniente trabalhar com a draga em operação de 24 horas por dia, por questões de turnos, horas extras, por ser a área uma zona residencial, etc.

Mesmo no caso de despejo contínuo, a simulação com despejo de 9 horas ou de até 24 horas fornece os mesmos resultados de concentração incremental (acima da concentração natural) a jusante pois, como o escoamento é considerado unidirecional só importa, para os impactos físicos, a concentração inicial de descarga, a qual é constante (depende só do teor da mistura: água + sedimento fino dragado), e o máximo da concentração atingida em cada estação considerada a jusante. Mais adiante será vista, a título de ilustração (Figura 9.3), a simulação com três períodos de 9 horas, intercalados por paradas de 15 horas, correspondendo a três dias de operação com período diurno de trabalho. As concentrações máximas atingidas nas estações de jusante são as mesmas que no caso de apenas um período de despejo (Figura 9.2).

A concentração máxima atingida em pontos a jusante é função da diluição inicial sofrida pelo despejo de dragagem na região próxima desse, denominada campo próximo ("*near field*"). A diluição inicial é dada pela razão entre a vazão que sai pela tubulação de despejo, e a vazão do curso d'água na seção de despejo. A concentração máxima atingida a jusante é também função da diluição sofrida pela pluma ao se propagar na região mais afastada do despejo, conhecida como campo afastado ("*far field*"). Esse é um fenômeno natural, presente nos escoamentos. A diluição no campo afastado é calculada pela razão entre as vazões na seção de montante e de jusante. No presente trabalho essas vazões foram obtidas, simultaneamente, durante os experimentos, como subproduto da marcação de água com Rodamina WT, empregando-se a Equação 7.1.

Assim, a concentração resultante em cada estação a jusante do despejo é obtida como o produto da concentração de despejo multiplicada pelas diluições no campo próximo e no campo afastado. Esse procedimento foi adotado em um primeiro cálculo. Em um segundo cálculo, considerou-se também a atuação da sedimentação.

Foi realizada também uma avaliação da possibilidade de dessorção dos metais e do  $^{99m}\text{Tc}$  (utilizado para marcar o sedimento fino) adsorvidos no sedimento fino, através da medição de parâmetros físico-químicos na água, em todas as estações trabalhadas (Figura 1.6), e em pontos na entrada e saída da Represa da Pampulha (Anexo 1).

## 9.2 Simulação do despejo de dragagem (DLDD)

A convolução dos resultados, com o modelo empregado, foi realizada partindo-se da calibração dos resultados obtidos com as injeções instantâneas (duração entre 1 e 3 minutos, em relação à duração total dos experimentos: 6 a 9 horas), simulando um despejo de concentração unitária com duração contínua de 9 horas, utilizando-se iguais passos de tempo de 10 minutos de duração, empregando-se a Equação 8.6, em sua forma discretizada (Equação 8.7):

$$c(X, t) = \int_0^t c_m(\mathbf{t}) J(X, t - \mathbf{t}) d\mathbf{t} \quad (8.6)$$

$$c(X, n\Delta t) = \sum_{g=1}^n \bar{c}_m(\mathbf{g}\Delta t) d\{(n - \mathbf{g} + 1)\Delta t\} \quad (8.7)$$

Obtiveram-se, assim, as concentrações nas estações de jusante relativas à concentração unitária lançada. Essas concentrações devem ser corrigidas em função da diluição e da sedimentação.

Como referido no capítulo anterior, sendo normalizadas as curvas utilizadas na modelagem de concentração de traçadores, as respostas não incluem a diluição, apenas a advecção e a dispersão. A diluição resultante, produto das diluições no campo próximo e no campo afastado, anteriormente comentadas, deve ser considerada.

Em uma segunda convolução, além da diluição, foi considerada também a decantação do sedimento em suspensão entre duas estações estudadas, com base na comparação das contagens registradas e integradas nessas estações, fornecidas pelo  $^{99m}\text{Tc}$  adsorvido no sedimento fino.

Para ambas as convoluções foram considerados trechos sequenciais e.g.: D1-D3; D3-D4; D4-D5; D5-D6; etc. Assim, não se considerou, neste estudo, por exemplo, os trechos D3-D5 ou D4-D6 (Tabela 8.1). Na Estação D2 não houve registro da passagem do sedimento em suspensão, devido ao mal funcionamento do cintilômetro utilizado (Item 7.2.1).

### **9.2.1 Resultados considerando advecção, dispersão e diluição**

Considerando-se a diluição mas não a decantação, fica maximizado o impacto ambiental do aumento de concentração devido ao despejo, relativamente às concentrações naturalmente existentes nos cursos d'água.

As medições de vazão utilizadas para o cálculo da diluição da concentração foram obtidas, para as estações D1 a D9 (Figura 1.6), com os lançamentos de Rodamina WT, e calculadas com o emprego da Equação 7.1:

$$Q = \frac{M}{\int C dt} \quad (7.1)$$

Para as estações a jusante da Estação D9: Estação Pinhões - DP, Estação Ponte Raul Soares - DPRS e Estação Jequitibá - DJEQ (Figura 9.1), pertencentes à rede da Agência Nacional de Águas (ANA) e consideradas na propagação da concentração incremental devido ao despejo de dragagem, foram consideradas as vazões médias para os meses de seca (maio a setembro) no período entre 1986 e 2001 (HIDROWEB, 2004). Esse período foi selecionado em função dos

trabalhos já realizados por LIMA, *et al.* (2001) e LIMA & SANTOS (2002). O primeiro trabalho trata do diagnóstico do fluxo de sedimentos em suspensão, em toda a bacia hidrográfica do Rio São Francisco e utiliza, como período para a média dos dados, o intervalo entre 1986 e 1999, enquanto que o segundo trabalho avalia, em particular, o fluxo de sedimentos em suspensão no Rio das Velhas, utilizando o intervalo entre 1986 e 2001.

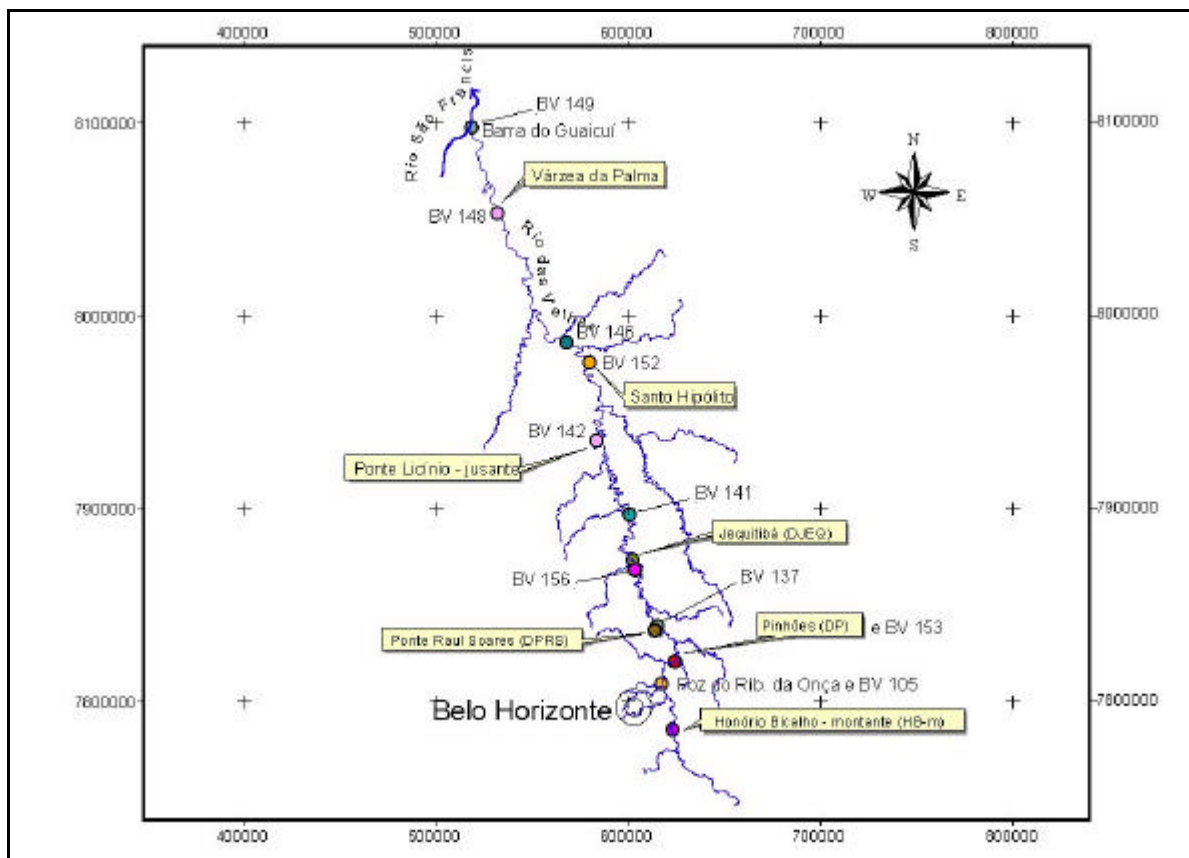


Figura 9.1 - Mapa de situação: Estações de interesse ao atual estudo, no Rio das Velhas

São apresentados, na Tabela 9.1, os dados de vazão líquida utilizados, sendo que os relativos ao Ribeirão da Onça (estações D3, D4, D5 e D6) foram considerados como a média das vazões, em cada estação, das vazões obtidas nos dois experimentos realizados: em 03/10/2000 e 03/07/2001 (Tabela 9.9).

As velocidades  $v$  e os coeficientes de dispersão  $D$  para o sedimento em suspensão, obtidos para cada trecho do Ribeirão da Onça pela aplicação do modelo de SINGH & BECK (2003), foram considerados, para os estudos da convolução aqui tratados, como a média, para cada trecho específico, dos valores, quando os havia, nos dois experimentos ali realizados. Assim, só para o



caso do trecho D3-D4 (Tabela 8.1), foi considerada a média. Os valores de  $v$  e  $D$ , para todos os trechos estudados, encontram-se na Tabela 9.2, juntamente com as distâncias entre as seções consideradas, medidas ao longo do talvegue, desde D1, no Ribeirão Pampulha (Figura 1.6), até a seção mais a jusante no Rio das Velhas, considerada no presente trabalho, a Estação de Jequitibá (DJEQ) (Figura 9.1).

Tabela 9.1- Dados de vazão líquida utilizados para o cálculo de diluição

Trecho	Estação			
<b>Ribeirões Pampulha e Onça (27/09/00)</b>	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>	
<b>Vazão Q (m<sup>3</sup>/s)</b>	1,88	2,18	3,10	
Trecho	Estação			
<b>Ribeirão da Onça (03/10/00 e 03/07/01)</b>	<b>D3</b>	<b>D4</b>	<b>D5</b>	<b>D6</b>
<b>Vazão Q (m<sup>3</sup>/s)</b>	2,36	3,14	5,37	6,11
Trecho	Estação			
<b>Rio das Velhas (26/06/01)</b>	<b>D7</b>	<b>D8</b>	<b>D9</b>	
<b>Vazão Q (m<sup>3</sup>/s)</b>	22,01	25,37	25,08	
Trecho	Estação			
<b>Rio das Velhas Dados da ANA maio a setembro 1986-2001</b>	<b>Pinhões (DP)</b>	<b>Ponte Raul Soares (DPRS)</b>	<b>Jequitibá (DJEQ)</b>	
<b>Vazão Q (m<sup>3</sup>/s)</b>	34,55	41,68	48,54	

A vazão na foz do Ribeirão da Onça foi considerada igual à vazão em D6, pois este ponto dista da foz, pelo talvegue, apenas 524m (Tabela 9.2). As vazões nas estações D8 (debaixo da ponte nova de Santa Luzia) e D9 (ainda na cidade, mas a jusante de D8) calculadas, respectivamente, como 25,37 e 25,08m<sup>3</sup>/s (Tabela 9.1), foram consideradas como sendo iguais a 25,37m<sup>3</sup>/s. Para o estudo da propagação das concentrações a jusante de D9 foram considerados (Tabela 9.2) os valores de  $v$  e  $D$ , do último trecho coberto pelos experimentos (D8-D9).

Tabela 9.2- Distâncias, velocidades e coeficientes de dispersão entre as seções estudadas

Trecho	Distância (m)	$v$ (m/s)	$D$ (m <sup>2</sup> /s)
D1-D3	3986	0,714	8,8
D3-D4	3537	0,35	12,4
D4-D5	1929	0,264	7,3
D5-D6	3932	0,32	30,6
D6-Foz	524	0,32	30,6
Foz-D7	2591	0,541	13,9
D7-D8	4650	0,541	13,9
D8-D9	2617	0,525	24,8
D9-DP	16507	0,525	24,8
DP-DPRS	44583	0,525	24,8
DPRS-DJEQ	94262	0,525	24,8

Com os valores de vazão apresentados na Tabela 9.1 e as considerações anteriores, foi efetuada a convolução para despejo contínuo (duração de 9 horas) no sistema de DLD, fazendo-se a simulação do despejo em três locais (Figura 1.6): a) D1, no Ribeirão Pampulha, logo ao lado da pista do Aeroporto da Pampulha; b) D3, no Ribeirão da Onça, a cerca de 200m a montante da cachoeira; c) na foz do Onça, em um ponto ainda sujeito apenas às vazões desse ribeirão.

A Figura 9.2 apresenta, para um lançamento contínuo efetuado em D1, de concentração considerada unitária e duração de 9 horas, a variação temporal dos perfis de concentração em todas as estações entre D3, no Ribeirão da Onça, até a Estação DJEQ (Jequitibá) no Rio das Velhas, a cerca de 165km a jusante da foz do Ribeirão da Onça. A Figura 9.3 mostra a variação temporal até a Estação DPRS (Ponte Raul Soares), considerando-se três lançamentos de mesma duração (9 horas) em D1, intercalados por intervalos, sem despejo, de 15 horas.

A Tabela 9.3 apresenta, em conjunto, os valores máximos das concentrações atingidas (relativos ao valor unitário da concentração de despejo) em cada uma das estações, para os três locais de simulação anteriormente referidos (D1, D3 e foz do Ribeirão da Onça).

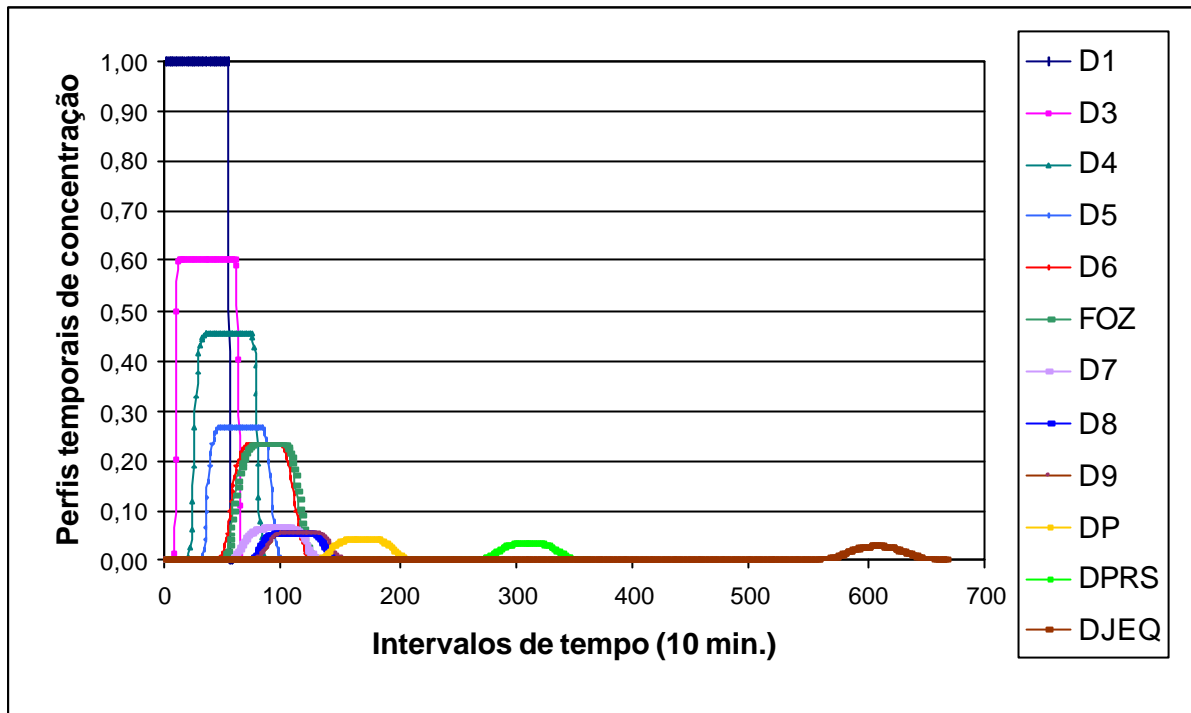


Figura 9.2 - Variação temporal dos perfis de concentração em estações a jusante da Represa da Pampulha, em função de despejo contínuo de dragagem (9 horas) em D1

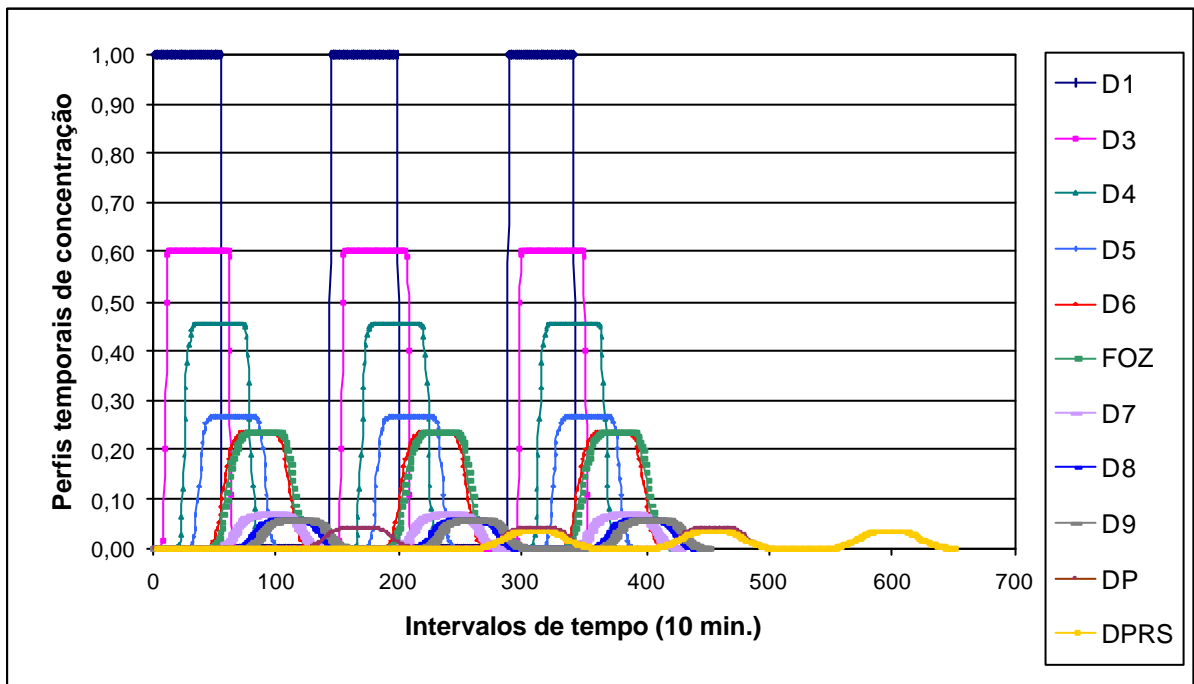


Figura 9.3 - Variação temporal dos perfis de concentração em estações a jusante da Represa da Pampulha, em função de três ciclos de despejo de dragagem (9 horas) em D1

Tabela 9.3- Atenuação de concentrações considerando diluição, para lançamentos em D1, D3 e na Foz do Ribeirão da Onça

Estação	Local de despejo		
	D1	D3	Foz do Onça
D1	1		
D3	0,606	1	
D4	0,455	0,750	
D5	0,266	0,439	
D6	0,234	0,386	
Foz do Onça	0,234	0,386	1
D7	0,065	0,107	0,277
D8	0,056	0,093	0,241
D9	0,056	0,093	0,241
DP	0,041	0,068	0,177
DPRS	0,034	0,056	0,146
DJEQ	0,028	0,046	0,122

A Figura 9.4 é a tradução gráfica da tabela anterior.

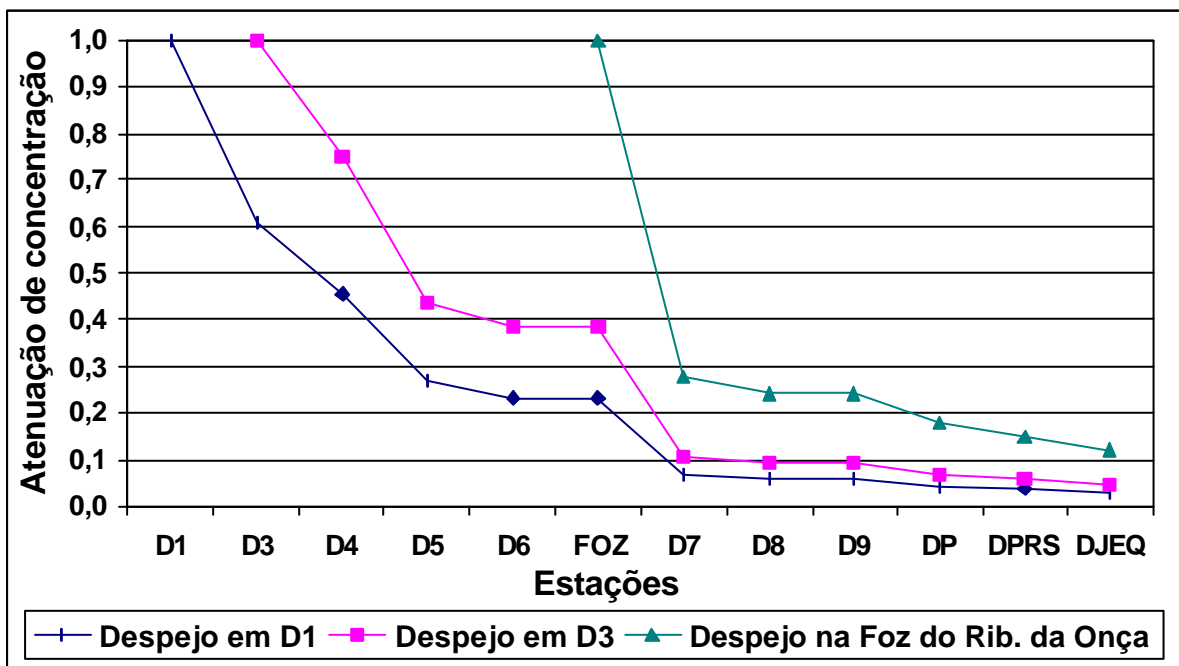


Figura 9.4 - Atenuação da concentração de sedimentos em suspensão com a diluição, para despejo de dragagem no sistema de DLD, em três locais a jusante da Represa da Pampulha

Observa-se na Figura 9.4 que para o lançamento em D1, o incremento de concentração sobre as concentrações naturais, devido ao despejo, quando a sua pluma chega à foz do Ribeirão da Onça, é de cerca de 0,234 (23,4%) da concentração de despejo, reduzindo-se a apenas 0,028 (2,8%) na altura da Estação de Jequitibá; isto considerando-se apenas a advecção, dispersão e diluição no campo afastado. O valor final desse incremento deve ser corrigido da diluição no campo próximo, a fim de se chegar à concentração resultante.

São os seguintes os parâmetros de dragagem da Represa da Pampulha, extraídos de DT ENGENHARIA (1997b):

*"Como volume de assoreamento a ser removido anualmente, considera-se 436.000m<sup>3</sup> .....*

*A maior parte desse volume deverá ser removida na região da lagoa denominada de delta, situada próxima às enseadas do Ressaca/Sarandi, Bom Jesus, Baraúna e Água Suja.*

*Para efeito de cálculos de produção e produtividade foram adotados os seguintes parâmetros, baseados nas necessidades do sistema e no banco de dados da DT ENGENHARIA referentes a obras similares:*

*Número de horas trabalhadas no mês.....350 horas*

*Número de dias trabalhados no mês.....25 dias*

*Número de horas efetivamente trabalhadas no dia.....14 horas*

*Produção Mensal Média.....36.300m<sup>3</sup>*

*Produtividade Média Esperada.....103m<sup>3</sup>/h"*

Ainda, conforme DT ENGENHARIA (1997b), para o transporte hidráulico no sistema de DLD: *"o transporte econômico é aquele que permite que seja mantida a máxima concentração possível (20%) apesar da perda de carga ocasionada pela polpa na tubulação aumentar com a distância"*. Para a granulometria do sedimento considerado em DT ENGENHARIA (1997b): diâmetro médio  $D_m = 0,105\text{mm}$  (areia fina), a massa específica do sedimento é de  $2647\text{kg/m}^3$ , e a massa específica do mesmo, submerso, é considerada igual a  $1848\text{kg/m}^3$ . Porém, para sedimentos finos, a sua massa específica quando submerso, devido à presença de água em seu interior (o que não ocorre com a areia), é certamente menor que o valor  $1848\text{kg/m}^3$ , apontado por DT ENGENHARIA, (1997b). Em vista disso, não se conhecendo o valor real da massa

específica submersa do sedimento fino ( $D_m < 0,062\text{mm}$ ), a ser dragado da Represa da Pampulha, e considerado em todos os estudos aqui apresentados é mostrada, no próximo item, uma avaliação paramétrica da concentração resultante do despejo, em função de três valores considerados para a massa específica do sedimento fino em suspensão.

#### 9.2.1.1 Estudo paramétrico das concentrações resultantes do despejo de dragagem

Foram considerados três valores para a massa específica do sedimento fino em suspensão: 1400, 1600 e 1848 $\text{kg/m}^3$ .

Sendo prevista, para os futuros trabalhos de dragagem no sistema de DLD, uma draga de sucção e recalque com produtividade média de sedimentos ( $103\text{m}^3/\text{h}$ ), em uma mistura com proporção em volume de 20% de sedimento fino para 80% de água (DT ENGENHARIA, 1997b), isto implica em uma vazão de despejo de dragagem de  $515\text{m}^3/\text{h}$ , ou  $0,1431\text{m}^3/\text{s}$ . Dessa forma, a concentração de despejo é dada por:

$$Cd = \frac{rPm}{Qd} = 0,2r(\text{kg/m}^3 \text{ ou g/L}) \quad (9.1)$$

onde:  $r$  = massa específica do sedimento submerso (1400, 1600 e 1848 $\text{kg/m}^3$ );

$Pm$  = produtividade média de sedimentos ( $103\text{m}^3/\text{h}$ );

$Qd$  = vazão de despejo de dragagem ( $Qd = 515\text{m}^3/\text{h}$ ).

Este estudo contempla despejos nos três locais: D1, D3 e foz do Ribeirão da Onça, considerando os três valores de massa específica, e calcula os valores das concentrações finais, devido ao despejo, logo após a pluma entrar no Rio das Velhas e quando ela chega na Estação de Jequitibá. Os resultados são apresentados nas tabelas 9.4 e 9.5.

Na Tabela 9.4 são apresentados os parâmetros hidráulicos (vazão e diluição, nos campos próximo e afastado) e, na Tabela 9.5, os valores calculados de concentração. Este cálculo foi feito, para cada caso, multiplicando-se a concentração de despejo ( $Cd$ ) pelas correspondentes diluições nos campos próximo e afastado.

Tabela 9.4- Atenuação de concentrações para lançamentos em D1, D3 e na Foz do Ribeirão da Onça. Dados de diluição nos campos próximo e afastado.

Local de despejo	Vazão na seção $Q_s$ (m <sup>3</sup> /s) (Tabela 9.1)	Diluição: campo próximo ( $Q_d/Q_s$ )	Diluição no campo afastado (Ver Tabela 9.3)	
			Foz do Onça	DJEQ
D1	1,88	0,076	0,234	0,028
D3	2,36	0,061	0,386	0,046
Foz do Onça	6,11	0,023	1	0,122

Tabela 9.5- Lançamentos em D1, D3 e na Foz do Ribeirão da Onça. Valores finais de concentração resultante do despejo de dragagem.

Local despejo	Concentração no Rio das Velhas junto à Foz do Onça (g/L)			Concentração em DJEQ (g/L)		
	$r=1400$	$r=1600$	$r=1848$	$r=1400$	$r=1600$	$r=1848$
	$Cd=280$	$Cd=320$	$Cd=369,6$	$Cd=280$	$Cd=320$	$Cd=369,6$
D1	4,99	5,70	6,58	0,60	0,68	0,79
D3	6,55	7,49	8,65	0,78	0,89	1,03
Foz do Onça	6,56	7,49	8,65	0,80	0,91	1,06

Para comparação dos valores incrementais máximos de concentração ( $C_i$ ) devido ao despejo (época de seca e sem consideração de decantação), com os valores de concentrações naturais, também em época de seca, foi preparada a Tabela 9.6, com os dados das campanhas efetuadas pelo CETEC (1999), e os dados de HIDROWEB (2004).

Os dados de concentração da Tabela 9.5 são em g/L e os da Tabela 9.6 são em mg/L. Observa-se que as concentrações incrementais máximas devido ao despejo são maiores que as concentrações naturais, nas estações de comparação.

Assim, por exemplo, a concentração incremental no Rio das Velhas, junto à foz do Ribeirão da Onça, em decorrência do despejo realizado em D1, considerando a massa específica do sedimento fino:  $r=1400\text{kg/m}^3$  (concentração de despejo  $Cd=280\text{g/L}$ ) (Tabela 9.5), é:  $C_i=4,99\text{g/L}$  ou  $4990\text{mg/L}$ . Este valor é cerca de 38 vezes maior que a concentração natural no Rio das Velhas na Estação E7, logo a montante da foz do Ribeirão da Onça:  $C_n=131\text{mg/L}$  (Tabela

9.6). Na Estação de Jequitibá, para este mesmo lançamento:  $C_i = 0,6\text{g/L}$  ou  $600\text{mg/L}$ , valor 5,8 vezes maior que a concentração natural média em época de seca nesta estação:  $C_n = 103\text{mg/L}$ .

Tabela 9.6 - Valores de concentrações naturais em época de seca.

Referência	Estação	Concentração (mg/L)
<b>CETEC (1999)</b> (Média de medições de maio a setembro de 1999) (Locais: Ver Figura 1.6)	D3=E5	221
	D6	96
	E7	131
<b>HIDROWEB (2004)</b> (Média de medições de maio a setembro: 1986 a 2001) (Locais: Ver Figura 9.1)	DPRS	156
	DJEQ	103

Estes resultados devem ser considerados sob vários aspectos.

Há, como se vê, uma grande atenuação das concentrações incrementais para jusante, tendendo a diminuir a diferença das concentrações naturais e incrementais a qual, por si só, não implica necessariamente em um aspecto impeditivo para despejo de dragagem. Afinal, se não existissem os reservatórios (ação antrópica) os sedimentos neles depositados seriam transportados naturalmente para jusante.

As concentrações incrementais calculadas são maximizadas pelo fato de se considerar a época de seca (concentrações naturais mais baixas) e não se supor sedimentação parcial.

A capacidade de transporte depende, dentre outros parâmetros, da velocidade e vazão do escoamento. No caso de parcela dos sedimentos oriundos do despejo de dragagem estar acima da capacidade de transporte do escoamento, em uma determinada época (baixos valores desses parâmetros), haverá deposição, podendo os mesmos serem retransportados em ocasiões de valores mais altos desses parâmetros. Assim, deve-se considerar, em uma avaliação de impacto ambiental do despejo de dragagem, não só a concentração de sedimentos em suspensão, como o fluxo desses sedimentos.



No Rio das Velhas há trechos de deposição natural de sedimentos (LIMA & SANTOS 2002), o que é ressaltado quando se considera, para o conjunto das estações hidrossedimentométricas do Rio das Velhas, o fluxo de sedimentos em suspensão  $Q_{ss}$  (t/dia), conforme apresentado na Tabela 9.7.

Tabela 9.7 - Resumo dos resultados médios mensais de fluxo de sedimentos em suspensão ( $Q_{ss}$ ) das estações do Rio das Velhas (t/dia). Fonte: LIMA & SANTOS (2002)

Estação	Honório Bicalho montante	Ponte Raul Soares	Jequitibá	Ponte do Licínio jusante	Santo Hipólito	Várzea da Palma
Jan	8038	16597	28488	25619*	25383*	33036
Fev	1761	6373	11458	10849*	11499	13348
Mar	1016	3647	6757	6607*	7790	8043
Abr	391	1574	2320	1974*	2261	1978*
Mai	191	790	1183	904*	758*	609*
Jun	116	549	820	581*	507*	365*
Jul	90	390	570	390*	334*	222*
Ago	82	315	452	285*	255*	157*
Set	81	345	435	256*	241*	148*
Out	124	546	662	415*	421	274*
Nov	457	2288	3683	3242*	4735	3895*
Dez	2235	10170	17434	13254*	16751	16140*
<b>Média</b>	<b>1215</b>	<b>3632</b>	<b>6188</b>	<b>5365</b>	<b>5911</b>	<b>6518</b>

\* Indicativo de ocorrência de deposição de sedimentos a montante da estação.

De LIMA & SANTOS (2002), extrai-se: *"Os dados de fluxo de sedimentos em suspensão ( $Q_{ss}$ ) indicam uma forte tendência a ocorrência de deposição de sedimentos no trecho entre a estação Jequitibá e a Ponte do Licínio - Jusante. Isto porque, segundo os dados médios anuais do fluxo de sedimentos em suspensão ( $Q_{ss}$ ) da estação de montante para a de jusante apresentou um decréscimo de 300.000 t/ano"*.

Para melhor detalhar o estudo, LIMA & SANTOS (2002) avaliaram os resultados médios mensais de cada estação do Rio das Velhas, no período de 1986 a 1999 (Tabela 9.7), tendo estes autores constatado que: *"Em conformidade com as análises dos dados anuais, os valores mensais mostraram uma forte tendência de ocorrência de deposição de sedimentos no trecho*

*compreendido entre as estações Jequitibá e Ponte do Licínio - Jusante. Entretanto, a análise dos dados mensais também indicaram possibilidades de deposição de sedimentos entre as estações Ponte do Licínio - Jusante e Santo Hipólito, e entre a Santo Hipólito e a Várzea da Palma, o que não pode ser detectado nos dados anuais" .*

Além do mais, LIMA & SANTOS (2002) ressaltam que: "*os dados apresentados correspondem a valores médios, não devendo ser utilizados de forma absoluta, mas como indicativos da possibilidade de ocorrência de problemas provenientes dos sedimentos transportados e/ou depositados nos cursos d'água*".

## **9.2.2 Resultados considerando advecção, dispersão, diluição e decantação**

### **9.2.2.1 Considerações sobre a detecção, em rios, de sedimento em suspensão marcado com $^{99m}\text{Tc}$ e aspectos das detecções efetuadas neste trabalho**

Com base nas detecções de sedimento fino em suspensão marcado com  $^{99m}\text{Tc}$ , foi possível se estimar a decantação do mesmo entre as diversas estações. Adianta-se que estas primeiras estimativas estão sujeitas a algumas incertezas, abaixo comentadas, que necessitam de mais estudos e confirmações experimentais no campo e, em escala controlada, em laboratório pois, por se tratar de aplicação inédita, em cursos d'água, no que tange à comparação simultânea da propagação de sedimentos em suspensão e da água que o transporta, não se conseguiu encontrar, na literatura, estudos semelhantes para avaliação comparativa com os resultados aqui apresentados.

O primeiro e crucial ponto a ser esclarecido em estudos futuros é se, da mesma forma que para o traçador da água (Rodamina WT), que ao fim da distância de mistramento transversal alcança uma concentração uniforme ao longo de toda a seção (mesmo que haja um retardo da pluma nas margens em relação à propagação da mesma na região central da seção - Figura 9.5), o sedimento também a alcança. E mesmo sendo alcançada em uma determinada região, permaneceria essa uniformidade em seções a jusante, com geometria e comportamento de talvegue distintos?

Como foi comentado anteriormente e observado na prática, nas duas detecções efetuadas em D5, nos dias 03/10/2000 e 03/07/2001 (Capítulo 7), parece que em trechos curvos e em regiões

de zonas mortas, devido à sua maior densidade em relação à da água que o transporta, o sedimento em suspensão sofreria efeitos centrífugos e poderia se reconcentrar em determinadas regiões das seções de medida, recriando gradientes transversais de concentração. Dessa forma, dependendo do ponto eleito para a instalação do cintilômetro, poder-se-ia obter uma contagem integrada, com a passagem da nuvem, maior ou menor do que a que corresponderia a uma distribuição uniforme de concentrações.

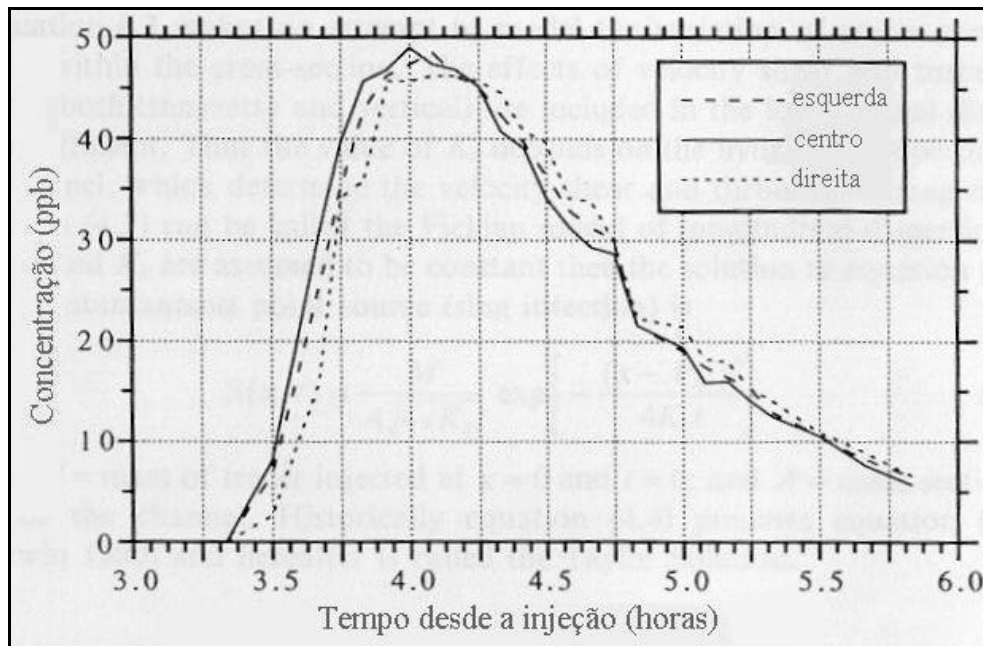


Figura 9.5 - Concentrações de Rodamina WT através de uma seção a 10,9km a jusante do ponto de injeção - Rio Waikato (Nova Zelândia). Adaptado de RUTHERFORD (1994)

Além disso, o detetor de radiação "enxerga" e registra as contagens dentro de sua "esfera de influência" (cujo centro é o centro do cristal do detetor), sendo o seu diâmetro função da eficiência do equipamento e da energia da radiação detectada. Em meio aquoso, o diâmetro é da ordem de 60cm.

Então, passa-se a comentar o segundo ponto, de natureza operacional, que pode ter grande influência nas medições quantitativas de atividade injetada passando pelas seções, afetando diretamente as estimativas de taxa de sedimentação entre seções (quando se trabalha com contagens não normalizadas), mas não tão grandes quando se trabalha com valores normalizados (onde o que importa é a forma e a ocorrência temporal da pluma), como feito no Capítulo 8. Esses permitiram, através do modelo adotado, o cálculo da velocidade de advecção da pluma ( $v$ ) e o seu coeficiente de dispersão longitudinal ( $D$ ), além da comparação do

comportamento do sedimento em suspensão com o do agente hidrodinâmico que o transportou: as correntes líquidas.

Em alguns locais, devido à época de seca e às canalizações existentes nos cursos d'água, impedindo o escoamento de moldar o seu talvegue, a lâmina d'água era inferior a 60cm, como para o trecho canalizado do Ribeirão da Onça (figuras 7.3b e 7.3c) e a Estação D3 (Figura 7.3d).

Assim, parte da esfera de influência do detetor poderia ser o ar acima da superfície e parte poderia ser o concreto do fundo da canalização, com radiação natural ("*background*") distinto daquele para a água e para o ar. Isto causa influência nas contagens registradas. Além disso, mesmo em locais onde os cursos d'água não são canalizados, não havia acesso à região onde passava a maior parte do escoamento, geralmente a parte central da seção, em trechos retilíneos do curso d'água. Este foi o caso da Estação D1 (Figura 7.1d), no Ribeirão Pampulha, estações: D5 (Figura 7.3g), D6 (Figura 7.h), no Ribeirão da Onça e D7 (Figura 7.5e), D8 (Figura 7.5f) e também D9, todas no Rio das Velhas. Em todas elas, o detetor de radiação e a tubulação de sucção do amostrador automático de água foram instalados na extremidade de lanças, apoiadas em forquilhas, para se procurar afastar, um pouco, o ponto de amostragem da margem.

Em locais com pontes, como no da Estação D8 (Figura 7.5f - ponte nova de Santa Luzia) e mesmo logo a jusante de D6 (Figura 7.3h - ao fundo a ponte de Capitão Eduardo) a altura até a superfície da água é grande, inviabilizando a utilização do amostrador automático de água (amostras para contagem de Rodamina WT), em função de sua capacidade de sucção. A única estação adequada nos aspectos: acesso à parte central e lâmina d'água suficiente para conter toda a esfera de influência do detetor, foi a Estação D4 (Figura 7.3f).

Em futuros trabalhos de campo nestes mesmos locais, deve-se tentar operar com dispositivos que permitam acesso dos detetores a pontos adequados de medições (e.g. sensores embarcados; suspensos em cabos que cruzam a seção, sendo comandados das margens; etc.). A utilização de vários sensores (mínimo de três) ao longo da seção pode ajudar a esclarecer aspectos da homogeneidade da concentração de sedimentos ao longo da seção transversal, como no exemplo da Figura 9.5, para a Rodamina WT.

Ademais, estudos comparativos simultâneos entre o sedimento e a água marcados, ao longo de seções transversais judiciosamente escolhidas, e em ocasiões hidrológicas distintas, poderão abrir perspectivas muito ricas para novas pesquisas, inclusive em aspectos fundamentais dos escoamentos à superfície livre. Esses estudos poderão ser feitos em laboratório, em condições controladas e com geometria equivalente para os vários detetores, mesmo que a lâmina d'água não ocupe toda a sua esfera de influência. Pode-se também colimar os detetores (dotá-los de blindagens com aberturas para medição de radiação proveniente de regiões específicas no seio da massa líquida) eliminando, assim, a influência das fronteiras próximas (ar acima da superfície d'água e fundo do canal).

Pode-se pensar em estudos desse tipo para o trecho PI-1 a D4 (Figura 1.6), que é um laboratório a céu aberto, desde que se tenha condições de atender as observações acima. Deve-se também escolher ocasiões de maiores vazões para se ter maiores lâminas d'água, sobretudo nos trechos canalizados os quais, possuindo na maioria das vezes grandes larguras (para evitar transbordamentos nas épocas de cheias), dificultam a presença de lâminas d'água adequadas, na maior parte do tempo. Aqui também, como no caso de estudos em laboratório, poderia se pensar em usar colimadores e se fazer correções adequadas.

Tendo em conta os aspectos de diferenças de densidade entre o sedimento em suspensão e a água (podendo perturbar a homogeneidade de concentrações de sedimentos em suspensão na seção transversal) e a dificuldade de acesso, durante os trabalhos, a pontos de medição em regiões adequadas das seções de medidas, os resultados atuais de taxas de sedimentação, apresentados mais adiante, devem ser encarados com as devidas reservas.

#### 9.2.2.2 Sistemática de cálculos adotada

O primeiro passo foi se integrar numericamente as áreas debaixo das curvas de passagem do sedimento em suspensão. Sendo a ordenada dada em contagens por segundo (cps - as quais já estavam todas corrigidas do decaimento radioativo para o instante da injeção) e a abcissa o eixo dos tempos, a área debaixo da curva fornece contagens integradas, aqui denominadas  $C_i$ . Para efeito de comparação entre as contagens integradas na seção de jusante com a seção de montante, foi necessário se fazer a correção levando-se em conta a diluição (razão de vazões).

Seja:

$C_{ij}$  = Contagem integrada a jusante

$C_{im}$  = Contagem integrada a montante

$Q_j$  = vazão de jusante

$Q_m$  = vazão de montante.

Então, a contagem integrada de jusante corrigida para montante ( $C_{ijm}$ ), é dada pela expressão:

$$C_{ijm} = C_{ij} * (Q_j / Q_m) \quad (9.1)$$

Os dados de contagens integradas nas seções, nos diversos experimentos, encontram-se na Tabela 9.8.

Tabela 9.8 - Contagens integradas nas seções, nos diversos experimentos

		Seção							
Dia	Trecho	D1	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
27/09/00	Pamp-Onça	1035763	548569						
03/10/00	Onça		427571	473650		550365			
03/07/01	Onça		1425816	919353	434932	679217			
26/06/01	Velhas						1070204	366311	474220

Para os cálculos foram consideradas as vazões líquidas mostradas na Tabela 9.1 sendo que aqui, para os experimentos realizados no Ribeirão da Onça nos dias 03/10/2000 e 03/07/2001, não foi utilizada a média e sim os valores de vazões obtidos para cada um dos dias, os quais são mostrados na Tabela 9.9.

Calcularam-se, então, as frações do material de montante que passou em suspensão a jusante ( $F_{pj}$ ) e também a fração que decantou entre as seções ( $F_{dmj}$ ) durante o período dos experimentos.

$$F_{pj} = C_{ijm} / C_{im} \quad (9.2)$$

$$F_{dmj} = 1 - F_{pj} \quad (9.3)$$

Tabela 9.9 - Dados de vazão líquida do Ribeirão da Onça utilizados no cálculo de decantação de sedimentos

Trecho	Estação			
<b>Ribeirão da Onça (03/10/00)</b>	<b>D3</b>	<b>D4</b>	<b>D5</b>	<b>D6</b>
<b>Vazão Q (m<sup>3</sup>/s)</b>	3,06	3,86	5,42	5,89
Trecho	Estação			
<b>Ribeirão da Onça (03/07/01)</b>	<b>D3</b>	<b>D4</b>	<b>D5</b>	<b>D6</b>
<b>Vazão Q (m<sup>3</sup>/s)</b>	1,65	2,42	5,32	6,32

Devido às considerações anteriores sobre possíveis anomalias nas contagens integradas, em função da não homogeneidade das concentrações de sedimentos ao longo da seção e por instalação dos detetores em locais não representativos do fluxo (o que deverá ser corrigido em experimentos futuros, com mais disponibilidade de recursos humanos e materiais), alguns dos cálculos acusaram que teria passado mais material a jusante do que a montante ( $F_{pj} > 1$ ).

Assim, como não se cria matéria, e não há "by pass" em escoamentos naturais (em nenhum caso foi escolhida seção de medidas em braços dos cursos d'água; sempre em seção que contivesse todo o escoamento), a aproximação feita para se calcular globalmente a influência da decantação foi considerar que, nos trechos em que os cálculos acusaram ( $F_{pj} > 1$ ), não houve decantação ( $F_{pj} = 1$ ). Além disso, em trechos como os estudados no Rio das Velhas: (D7-D8) e (D8-D9), em que os cálculos apontaram uma grande decantação entre D7 e D8 (0,61) e maior atividade passando em D9 em relação a D8 (1,74), o que não é realista, conforme mostrado como exemplo na Tabela 9.10, foi considerado o cálculo de D7 para D9 ( $F_{pj} = 0,51$ ) valendo nos trechos D7-D8 e D8-D9 e também para a propagação das concentrações para jusante (Figura 9.6), até a Estação de Jequitibá (DJEQ) pois, além de D9, para o presente estudo, só se possuíam informações de vazão líquida (Tabela 9.1) e de concentração de sedimento em suspensão (Tabela 9.6).

Essas são as limitações dos dados atualmente disponíveis para o cálculo de decantação, possibilitada pela marcação de sedimento fino da Represa da Pampulha com <sup>99m</sup>Tc. Os valores

calculados e os considerados para os estudos de propagação das concentrações, desde D1 até DJEQ, são mostrados na Tabela 9.11.

Tabela 9.10 - Porcentagem do sedimento em suspensão que passa na seção de jusante ( $F_{pj}$ ) e que decanta entre montante e jusante ( $F_{dmj}$ ): trechos no Rio das Velhas

Seções		Fpj	Fdmj
Montante	Jusante		
D7	D8	0,39	0,61
D8	D9	1,74	-0,74
D7	D9	0,51	0,49

Tabela 9.11 - Porcentagem do sedimento em suspensão que passa na seção de jusante ( $F_{pj}$ ) e que decanta entre montante e jusante ( $F_{dmj}$ )

Seções		Fpj	Fdmj
Montante	Jusante		
D1	D3	0,87	0,13
D3	D4	0,95	0,05
D4	D5	1	0
D5	D6	1	0
D6	Foz do Onça	1	0
Foz do Onça	D7	0,51	0,49
D7	D8	0,51	0,49
D8	D9	0,51	0,49
D9	DP	0,51	0,49
DP	DPRS	0,51	0,49
DPRS	DJEQ	0,51	0,49

Então, considerando-se que a deposição seja exponencial, pode-se calcular o coeficiente de decantação ( $k$ ) entre as seções de montante e jusante, pois conhece-se a distância ( $X$ ) entre elas.

Então:

$$\frac{1}{F_{pj}} = \frac{C_{im}}{C_{ijm}} = e^{kx} \text{ ou } F_{pj} = \frac{C_{ijm}}{C_{im}} = e^{-kx} \quad (9.4)$$



Assim:

$$k = \frac{1}{X} \ln \left( \frac{C_{im}}{C_{ijm}} \right) \quad (9.5)$$

Tabela 9.12 - Porcentagem do sedimento em suspensão que passa na seção de jusante ( $Fpj$ ) e que decanta entre montante e jusante ( $Fdmj$ )

Trechos	Distância ( $x$ ) entre seções (m)	Coef, Decantação	Fator de decantação
		$k$	$\exp(-kX)$
<b>D1-D3</b>	3986	3,40E-05	0,873323
<b>D3-D4</b>	3537	1,58E-05	0,945694
<b>D4-D5</b>	1929	0	1
<b>D5-D6</b>	3932	0	1
<b>D6-Foz</b>	524	0	1
<b>Foz-D7</b>	2591	9,25E-05	0,786974
<b>D7-D8</b>	4650	9,25E-05	0,650556
<b>D8-D9</b>	2617	9,25E-05	0,785106
<b>D9-P</b>	16507	9,25E-05	0,217378
<b>P-PRS</b>	44583	9,25E-05	0,016215
<b>PRS-JEQ</b>	94262	9,25E-05	0,000164

### 9.2.2.3 Resultados obtidos

Além da influência da diluição, considerada no Item 9.2.1, introduzindo-se na Equação 8.7, para cada trecho, o respectivo fator de decantação  $\exp(-kX)$  da Tabela 9.12, e processando o modelo, obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 9.13 e na Figura 9.6, que é a sua tradução gráfica. Aqui também foram considerados lançamentos em três pontos do percurso estudado: D1, D3 e na foz do Ribeirão da Onça, antes que ele deságüe no Rio das Velhas.

A Tabela 9.13 e a Figura 9.6 apresentam os resultados até a estação de Ponte Raul Soares, uma vez que ali, todo o material em suspensão decorrente do despejo já teria decantado. Possivelmente este não seria o caso real pois, utilizando-se o fator  $Fpj = 0,51$  calculado para o trecho D7-D9 (com as limitações já apontadas sobre se ele representa a realidade ocorrendo na

natureza), como válido em toda a extensão considerada no Rio Velhas, certamente maximizou-se a decantação.

Tabela 9.13 - Atenuação de concentrações para lançamentos em D1, D3 e na Foz do Ribeirão da Onça, considerando diluição e decantação

Estação	Local de despejo		
	D1	D3	Foz do Onça
D1	1		
D3	0,530	1	
D4	0,376	0,709	
D5	0,220	0,415	
D6	0,193	0,365	
Foz do Onça	0,193	0,365	1
D7	0,042	0,080	0,218
D8	0,024	0,045	0,123
D9	0,019	0,035	0,097
DP	0,003	0,006	0,015
DPRS	0,000	0,000	0,000

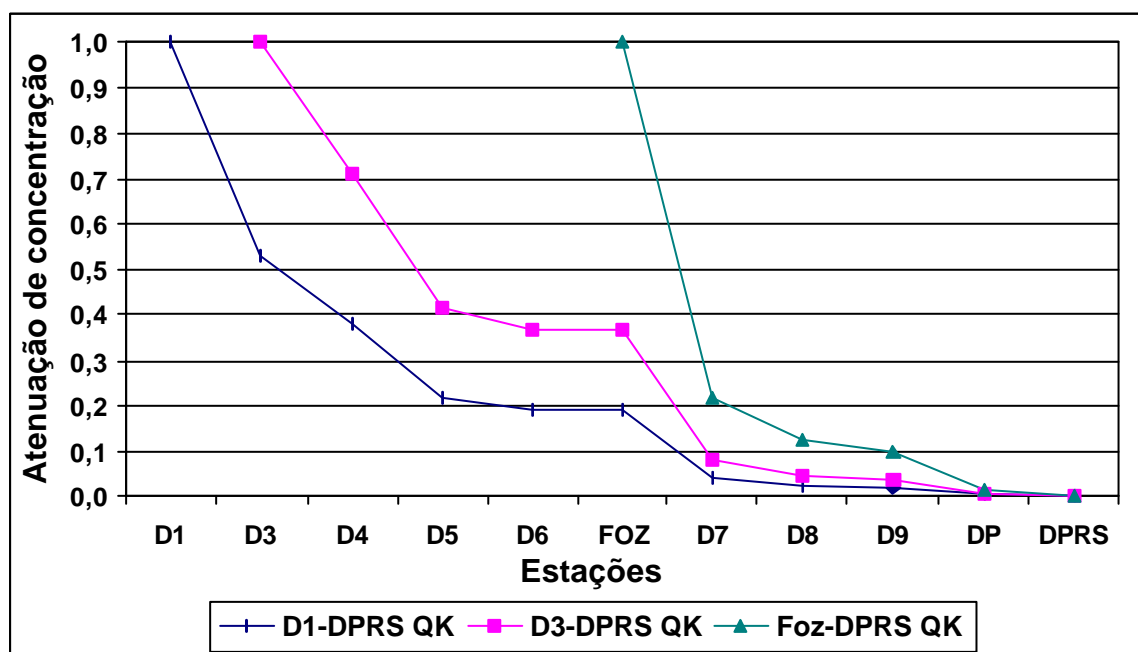


Figura 9.6 - Atenuação da concentração de sedimentos em suspensão com a diluição e a decantação, para despejo de dragagem em D1, D3 e foz do Ribeirão da Onça

No outro extremo, tendo sido calculada a concentração incremental devido ao despejo sem decantação, chegou-se a valores que não parecem, a primeira vista, como impeditivos para despejo de dragagem, sob a ótica desse impacto ambiental estudado (Item 9.2.1.1). Assim, balizou-se a influência do aumento de concentração com o despejo de dragagem.

Para avaliar, com os dados colhidos, a influência máxima teórica da decantação sobre o assoreamento da calha fluvial, basta considerar o volume de dragagem ( $436000\text{m}^3/\text{ano}$ ) adotado em DT ENGENHARIA (1997b) e multiplicá-lo pelo fator de decantação ( $F_{dmj}$ ), entre a seção de despejo e a primeira seção a jusante. Ter-se-ia, assim, o volume anual decantado. A espessura média máxima teórica de assoreamento seria obtida dividindo-se a parcela do volume decantado pela área em planta do trecho, a qual pode ser aproximadamente calculada com a distância entre as seções medida pelo talvegue (tabelas 9.2 e 9.12) e a largura média do curso d'água no trecho considerado. O cálculo poderia ser aplicado aos trechos a jusante, abatendo-se, a parcela do volume anual de dragagem, que teria se depositado no trecho anterior.

A título de exemplo, considerando-se o despejo em D1 e com o fator de decantação calculado  $F_{dmj} = 0,13$ , ter-se-ia um volume anual de  $56800\text{m}^3$ , sendo depositado entre D1 e D3. Com a distância D1-D3 = 3986m e considerando uma largura média de 10m, obtém-se uma altura de deposição média máxima de 1,42m.

Esse resultado parece alarmante à primeira vista. Porém, o fator de decantação apresenta as incertezas já apontadas anteriormente, que devem ser esclarecidas através de experimentos de campo mais bem elaborados. Além disso, o ciclo de dragagem é descontínuo, permitindo ressuspensão e o transporte dos sedimentos finos para jusante pela capacidade de transporte do escoamento. Deve-se lembrar que o transporte de sedimentos finos ocorre praticamente em suspensão. As condições hidrodinâmicas de seca (época crítica para o transporte de sedimentos aqui considerada) não permanecem o ano inteiro.

Assim, no caso de se optar pelo despejo de dragagem nos cursos d'água a jusante, recomenda-se a execução de novos estudos no trecho D1-D3. Ele possui o atrativo de se utilizar menores extensões de tubulações de recalque, implicando em menor perda de carga e, portanto, reduzindo-se o emprego de bombas intermediárias ao longo da linha de recalque ("*boosters*") (DE HEER, 1986b).

Adianta-se também que neste trecho existem, na altura da Av. Cristiano Machado, galerias cujo funcionamento e capacidade de escoamento devem ser considerados no caso de despejo de dragagem em D1, ou mesmo a montante, em PI-1 (Figura 1.6). O ponto de injeção PI-1 (figuras 7.1a e 7.1b) foi escolhido em função da maior declividade no local, em relação àquelas existentes a montante da seção.

Considerando agora o despejo em D3 (Figura 7.3d), logo antes da cachoeira (Figura 7.3e) e fazendo os cálculos semelhantes ao para o despejo em D1, obtém-se em D3-D4 uma altura de deposição média máxima de 0,62m, com  $F_{dmj} = 0,05$  (Tabela 9.11), com a distância D1-D3 = 3537m (tabelas 9.2 e 9.12) e supondo, para efeitos de comparação com o despejo anterior, a mesma largura média de 10m. Entretanto, ao sair no final do trecho canalizado do Ribeirão da Onça (largura real de 11m) a cerca de 200m a jusante de D3, o sedimento em suspensão desce a cachoeira (Figura 7.3e) e passa por um ampla área, chegando em D4 (Figura 7.3f) com largura média de cerca de 30 a 40m. Considerando assim uma largura média de 35m, a altura de deposição média máxima se reduziria a apenas 0,18m. O impacto da sedimentação iria diminuindo rapidamente para jusante.

Em vista desses valores e, dada a magnitude da ampla área da bacia hidrográfica do Rio São Francisco, entre a barragem da Pampulha e a primeira represa a jusante da mesma, a de Sobradinho, situada a cerca de 1400km a jusante, chega-se à conclusão racional de que o impacto da sedimentação na calha fluvial é mínimo.

### **9.2.3 Considerações sobre os impactos físicos do despejo de dragagem**

A magnitude dos trabalhos de dragagem e sua sistemática de operação apresentados em DT ENGENHARIA (1997b), com cerca de pouco mais de 400000m<sup>3</sup>/ano de sedimento a ser dragado da Represa da Pampulha, aliada às evidências anteriores de baixos impactos de aumento da carga de sedimento em suspensão (Item 9.2.1) e da sedimentação do material despejado (Item 9.2.2), e às dimensões e características dos cursos d'água a jusante, possíveis receptores dos sedimentos, tratadas aqui e em outras referências, são fatores alentadores no prosseguimento das atividades para se procurar viabilizar e efetivar o despejo de dragagem de sedimentos finos da Represa da Pampulha, através do sistema de dragagem de longa distância (DLD), nos cursos d'água a jusante.

A metodologia de cálculo aqui apresentada, que permite quantificações difíceis de serem obtidas por outros métodos, juntando o uso de traçadores (aplicação simultânea de sedimento fino marcado com  $^{99m}\text{Tc}$  e água marcada com Rodamina WT) com modelagem matemática, como recentemente abordado em AIREY *et al.* (2002), poderá ser integrada a outros estudos, como os de LIMA & SANTOS (2002) e aos anseios da comunidade, expressos de maneira muito consistente na publicação periódica da UFMG: MANUELZÃO (1997-2004), na busca de uma melhor compreensão dos fenômenos da natureza e para uma intervenção mais criteriosa, mais fundamentada e menos passional do ser humano no meio ambiente.

Agora que já se avaliou com os meios, até o momento disponíveis, os impactos físicos do despejo da dragagem é tratado, a seguir, o último aspecto do impacto ambiental proposto no presente trabalho: a possibilidade de migração para o meio líquido dos metais adsorvidos no sedimento fino a ser dragado na Represa da Pampulha.

### **9.3 Parâmetros físico-químicos como ferramenta de estudo**

A dinâmica de metais presentes nos cursos d'água, sejam eles dissolvidos na água ou adsorvidos em compostos orgânicos ou sedimentos em suspensão ou de fundo, é influenciada por vários fatores tais como potencial redox (Eh), pH, oxigênio dissolvido (OD), condutividade, temperatura e outros agentes que exercem influência física ou química.

O termo potencial redox (Eh) ou valor redox é um acrônimo para potencial de redução-oxidação, com o qual a voltagem observada é uma resultante da transferência de elétrons entre vários átomos e moléculas no meio em estudo, ou seja: é a soma entre os processos redutivos e oxidativos (MIOZZO, 2002).

Os átomos e as moléculas tendem a atingir uma condição de estabilidade isto é, de baixa energia, através de troca eletrônica, ou seja: doando ou recebendo elétrons. Como cargas elétricas não podem ser destruídas ou criadas, se uma molécula aceita elétrons, outra estará doando. Por essa razão, redução e oxidação serão sempre ações concatenadas. A entidade que doa elétrons é oxidada (agente redutor) no processo, enquanto a que os recebe (agente oxidante) é reduzida.

Geralmente o Eh (mV) é medido com a utilização de eletrodos eletrônicos de metais nobres (Pt ou Au) ou eletrodos de carvão.

O valor de Eh está intimamente ligado às variações de pH, OD, condutividade e temperatura.

Em relação ao pH, os valores de Eh decrescem com o aumento de pH e aumentam com sua redução. Teoricamente, a diferença por unidade de pH é de 57,7mV, havendo exceções. Sendo assim, quando da medição e interpretação do Eh, deve-se sempre informar também as condições de pH e temperatura do meio analisado.

Por meio de diagramas de Eh x pH (Figura 9.7), também conhecidos como Diagramas “*Pourbaix*” (WOU, 2004), é possível conhecer a forma termodinamicamente mais estável de um elemento químico em determinadas condições de Eh e pH, ou seja, este tipo de diagrama indica a espécie química predominante de um elemento em certas condições ambientais.

De maneira geral, os processos oxi-redutivos exercem considerável influência na química e bioquímica da água, pois várias funções (como respiração) dependem dela. Uma alta concentração de oxigênio no meio eleva os valores de Eh, enquanto que, em caso contrário, processos redutivos são dominantes, como a respiração anaeróbica de bactérias. Ambientes contaminados por matéria orgânica (proteínas de alimentos, excrementos, animais e vegetais mortos) usualmente agem de maneira redutiva, apresentando sempre a água poluída, valores de potencial redox bem inferiores aos da água livre de poluentes.

### **9.3.1 Análise dos parâmetros físico-químicos medidos e sua influência na adsorção de <sup>99m</sup>Tc e metais em sedimentos finos**

A marcação de sedimentos finos com o objetivo de se observar a sua dinâmica em suspensão em um curso d'água, ocorre através de interações eletrostáticas entre o marcador e o sedimento.

No desenvolvimento da técnica de marcação de sedimentos finos com <sup>99m</sup>Tc (Capítulo 6) foi avaliada a estabilidade do marcador no sedimento, através de testes de agitação de duas horas de duração, os quais mostraram que as perdas de marcador para a água são inferiores a 10% (BANDEIRA *et al.* 1999a); (BANDEIRA *et al.* 1999b).

Nos estudos de campo é interessante se conhecer as características físico-químicas do meio aquoso em estudo. O meio aquoso deve apresentar valores adequados de alguns parâmetros físico-químicos, principalmente pH e Eh, além de outros, tais como OD e condutividade elétrica. Esses parâmetros irão refletir o estado de oxidação mais provável do marcador naquele meio e, conseqüentemente, a probabilidade de êxito de sua permanência no sedimento.

O  $^{99m}\text{Tc}$ , que é gerado sob a forma de  $\text{TcO}_4^-$  (estado de oxidação VII), antes de sua adição ao sedimento em suspensão, deve passar por um processo de redução química (Equação 9.6), por  $\text{SnCl}_2$ , a Tc(IV), para permitir a formação de espécies, tais como,  $\text{TcO}^{2+}$  e  $\text{TcO}(\text{OH})^+$  (solúveis) e  $\text{TcO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{TcO}(\text{OH})_2$  (colóides), que possam ser adsorvidas em sedimentos. Segundo LIESER & BAUSCHER (1987, 1988), as primeiras são espécies químicas catiônicas solúveis e estáveis em pH ácido e meio anaeróbico; já os últimos são espécies coloidais neutras, pouco solúveis, que apresentam adsorção irreversível em sedimentos em meios extremamente anaeróbios e de pH neutro. Pelo diagrama Eh x pH (Figura 9.7) pode-se visualizar as zonas de estabilidade de cada uma das espécies supracitadas.

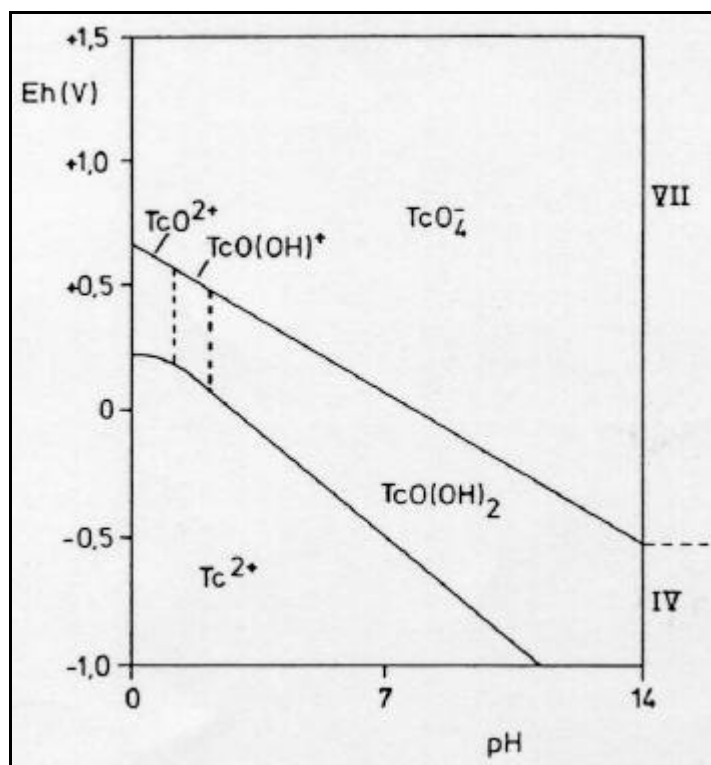


Figura 9.7 - Diagrama Eh x pH para o Tc. Adaptado de Lieser *et al.* (1987)

Tabela 9.14 - Parâmetros físico-químicos para pontos de amostragem georreferenciados da sub-bacia da Pampulha (Ver Figura 1.6 e Anexo 1)

<b>Estação</b>	<b>Data</b>	<b>Hora</b>	<b>OD (mg/L)</b>	<b>pH</b>	<b>Eh (mV)</b>	<b>Cond. (<math>\mu</math>S/cm)</b>	<b>Temp (<math>^{\circ}</math>C)</b>
<b>S1</b>	13/12/01	09:45	0,64	6,22	-8	915	26,1
<b>S2</b>	13/12/01	10:14	1,78	7,39	-14	484	23,6
<b>S3</b>	13/12/01	10:42	0,69	7,05	-70	444	24,7
<b>S4</b>	13/12/01	11:10	0,68	7,30	-90	473	25,4
<b>E1</b>	13/12/01	11:36	0,26	7,30	-73	477	26,6
<b>R1*</b>	13/12/01	12:15	1,94	7,65	29	19800	36,5
<b>R1**</b>	13/12/01	12:25	3,01	5,34	191	156	25,0
<b>R2</b>	13/12/01	13:06	1,65	7,14	-65	477	25,8
<b>R3</b>	13/12/01	13:28	1,07	7,03	-80	492	27,1
<b>E2</b>	13/12/01	13:48	0,65	7,19	-96	500	28,1
<b>ERPAM</b>	13/12/01	14:10	0,45	7,40	-81	515	28,6
<b>E3</b>	13/12/01	15:33	4,54	6,84	139	238	26,2
<b>SRPAM</b>	13/12/01	16:05	2,08	7,06	118	261	26,7
<b>E4</b>	13/12/01	16:40	0,88	6,91	47	266	27,5
<b>E4</b>	14/12/01	09:16	0,55	6,87	-31	279	23,4
<b>D1</b>	14/12/01	09:48	1,34	7,11	-71	523	25,5
<b>Eng. Nog.</b>	14/12/01	10:00	0,11	7,61	-150	711	25,3
<b>D2</b>	14/12/01	11:32	0,08	7,16	-101	586	25,8
<b>PI2</b>	14/12/01	12:02	0,15	7,23	-52	601	26,0
<b>D3</b>	14/12/01	12:26	0,16	7,25	-92	609	26,7
<b>D4</b>	14/12/01	12:58	0,00	5,55	-96	675	26,6
<b>D5</b>	14/12/01	13:21	3,53	7,46	116	507	26,2
<b>D6</b>	14/12/01	14:27	0,12	6,82	-124	612	26,0
<b>PI3</b>	14/12/01	15:00	1,67	7,21	58	381	26,6
<b>D7</b>	14/12/01	15:24	0,37	7,07	82	257	25,7
<b>D8</b>	14/12/01	16:10	0,55	6,99	-22	263	26,4
<b>D9</b>	14/12/01	16:38	0,62	7,04	-41	267	26,3
<b>E7</b>	14/12/01	17:18	1,63	7,05	113	238	26,0

\* início do Ribeirão Ressaca; \*\* saída de água junto ao início do Ribeirão Ressaca, na área do Aterro Sanitário da SLU, em Belo Horizonte



Ao se analisar os dados da Tabela 9.14, obtidos em dois dias de trabalhos de campo, pode-se perceber que a predominância, em cada parâmetro físico-químico medido, é a seguinte:

**Oxigênio Dissolvido (OD)** - há predominância de meio fortemente anaeróbio com raras exceções. Isto é devido ao grande aporte de esgoto doméstico nos cursos d'água da bacia em questão, sobretudo no ponto D4 (nas proximidades do qual existe um grande aglomerado populacional) no qual foi encontrado valor nulo de oxigênio dissolvido na água, apesar desse ponto estar localizado logo após uma cachoeira (que serve como um aerador natural do meio) existente a jusante do trecho canalizado do Ribeirão da Onça (Figura 7.3e);

**pH** - varia em torno da neutralidade, exceto para os pontos R1\*\* (filete d'água situado dentro do Aterro Sanitário da SLU em Belo Horizonte na BR 040) e D4 (ponte verde no Ribeirão da Onça - Figura 7.3f). Os pontos anteriormente destacados apresentam águas com altos índices de contaminantes;

**Condutividade** - os valores medidos são altos, o que comprova a existência de grandes quantidades de espécies iônicas em solução, principalmente no ponto R1\* (chorume do Aterro Sanitário de Belo Horizonte);

**Potencial Redox (Eh)** - de uma forma geral, apresenta valores predominantemente negativos (meio redutor). Esse parâmetro mostrou-se, como esperado, fortemente influenciado pelas variações de OD e pH;

**Temperatura** - variou em torno de 25°C, sofrendo pequenas alterações de acordo com o horário de coleta. O ponto de coleta R1\* apresentou o maior valor de temperatura (36,5°C), o que é justificável pela alta taxa de metabolismo devido à decomposição, por microorganismos, de nutrientes orgânicos contidos no chorume.

O diagnóstico, colocado acima, para cada um dos parâmetros físico-químicos, indica que o Tc(IV), adsorvido no sedimento fino, ao ser injetado num curso d'água nestas condições, dificilmente se desprenderia do mesmo. As formas químicas mais prováveis nas quais se encontraria o <sup>99m</sup>Tc seriam as formas coloidais TcO<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O ou TcO(OH)<sub>2</sub>.

Ao se comparar as duas medições na Estação E4, logo a jusante da Represa da Pampulha (Figura 1.6), uma efetuada no final da tarde e a outra na manhã do dia seguinte, pode-se perceber, nitidamente, que os parâmetros sofrem variação ao longo do dia.

Segundo FÖRSTNER (1984), a fração do sedimento possuindo diâmetro:  $D < 63\mu\text{m}$ , é a mais importante em termos de adsorver metais, pois na fração fina (lama e silte), que apresenta alta superfície específica, são encontradas as maiores concentrações de metais. Além disso, essa fração é aproximadamente equivalente ao material carregado em suspensão, que geralmente representa cerca de 90% do transporte sólido total. Considerando-se os parâmetros físico-químicos analisados anteriormente, pode-se dizer que os metais adsorvidos no sedimento fino dificilmente migrariam para o corpo d'água, haja vistas que o processo de dessorção de metais exige, geralmente, condições ácidas nas quais os sítios de adsorção ocupados pelos metais possam então ser ocupados pelo próton ( $\text{H}^+$ ) através do processo de Troca Iônica. Além disso, caso a dessorção viesse a ocorrer, o fato de o meio aquoso ser predominantemente anaeróbico e redutor levaria à formação de sulfetos e substâncias húmicas insolúveis, que contribuiriam para a redução da mobilidade dos metais (MMS, 2004).

Dessa forma, com os valores encontrados para a região de estudos (Tabela 9.14), associados a informações sobre a qualidade d'água disponíveis em IGAM (2004) para as estações com sigla BV (Figura 9.1), não é de se esperar dessorção significativa dos metais adsorvidos no sedimento fino a ser dragado da Represa da Pampulha e possivelmente integrado, no futuro, por intermédio da dragagem de sucção e recalque no processo de DLD, nos cursos d'água a jusante.

Finalmente, a Figura 9.8 mostra a variação da condutividade elétrica (Tabela 9.14) nas amostras de água superficial colhidas ao longo dos ribeirões Sarandí e Ressaca.

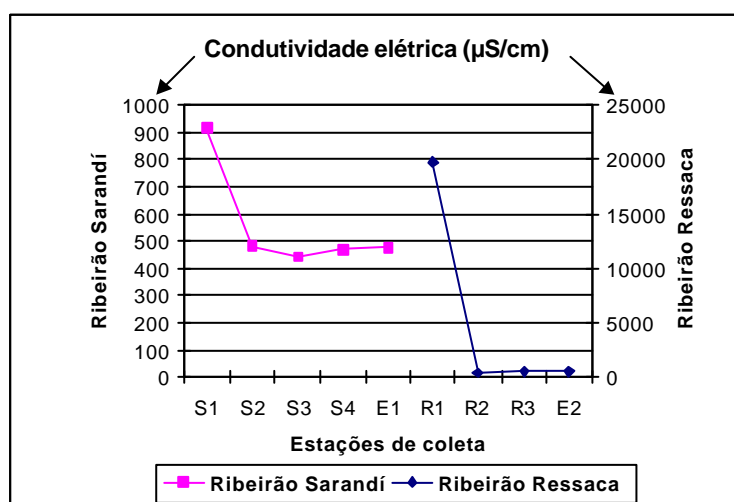


Figura 9.8 - Condutividade elétrica na água dos ribeirões Sarandí e Ressaca

Note-se que, em ambos, a variação é decrescente de montante para jusante, mas não de forma monotônica, como para os teores de trítio, observados para o Ribeirão Ressaca (Figura 4.2). Nos dois casos, após uma abrupta queda de valores entre a primeira e segunda estações, observa-se um suave aumento progressivo para jusante, fruto de outras contribuições não oriundas dos aterros sanitários, o que não ocorre para o caso do trítio, nas águas do Ribeirão Ressaca, que tem a sua fonte principal no chorume do Aterro Sanitário da SLU.



## 10 CONCLUSÕES, RECOMENDAÇÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dada a amplitude dos assuntos tratados no presente trabalho, as conclusões e recomendações dele extraídas, foram divididas pelos principais tópicos abordados:

- a) o trítio ( $^3\text{H}$ ) presente no chorume de aterros sanitários como traçador em estudos ambientais;
- b) estudo da distribuição de metais na água, nos sedimentos de fundo e em suspensão, na Bacia Hidrográfica da Pampulha e no Rio das Velhas;
- c) desenvolvimento da marcação de sedimento fino com  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ;
- d) estudo da capacidade de hidrotransporte, para sedimentos finos, dos cursos d'água a jusante da Represa da Pampulha e do Rio das Velhas;
- e) avaliação dos impactos ambientais físicos (aumento de concentração e quantificação da decantação), do despejo nos cursos d'água a jusante, do sedimento fino dragado na Represa da Pampulha, e da possibilidade de dessorção dos metais presentes no sedimento dragado;
- f) avaliação da metodologia empregada, resultados alcançados, sua consideração em função de critérios de qualidade ambiental para solos e para aperfeiçoar a Proposta de Resolução sobre a disposição final do material dragado (CONAMA, 2003).

Procurou-se, ao sintetizar o trabalho realizado através das conclusões e recomendações a seguir apresentadas, avaliar os ganhos e perspectivas dele decorrentes, considerando os níveis: científico, tecnológico e ambiental.

### 10.1 Conclusões

#### 10.1.1 O trítio presente no chorume de aterros sanitários como traçador em estudos ambientais

i) O teor de trítio ( $^3\text{H}$ ) no chorume do aterro sanitário de Belo Horizonte (muito mais elevado que o valor da água de chuva (2,8TU) (PEIXOTO & JACOMINO, 2001, 2003) pode ser usado como um traçador da dinâmica da água no Ribeirão Ressaca. Os aspectos tecnológico e ambiental de tal constatação são evidentes, pois a variação ambiental decrescente dos teores de  $^3\text{H}$  na água superficial ao longo do Ribeirão Ressaca (Figura 4.2), o qual é totalmente

canalizado, poderá ser uma ferramenta útil em futuros estudos quantitativos de contribuições da rede de drenagem pluvial ao longo desse curso d'água, bem como essa metodologia poderá ser aplicada a outras situações semelhantes.

ii) O teor elevado de trítio pode também, juntamente com teores de metais presentes na água, ser utilizado como um indicador da contaminação das águas subterrâneas em piezômetros dos aterros sanitários de Belo Horizonte e de Contagem e em poços de regiões vizinhas. As determinações apresentadas no Capítulo 4 indicaram forte presença de trítio associado a metais na água de alguns piezômetros do aterro sanitário de Belo Horizonte, mas não tão significativa em piezômetros do aterro sanitário de Contagem e em poços ao longo dos ribeirões Ressaca e Sarandí, já fora da área dos aterros.

iii) A associação de medições dos teores de  $^3\text{H}$  e metais em amostras de água subterrânea à medições de eletroresistividade do solo, como as realizadas em CPRM (2001), poderá ser de grande valia nos futuros estudos de contaminação da água subterrânea pelos lixiviados do aterro sanitário Sanitário de Belo Horizonte. Comparações das zonas de baixa eletroresistividade determinadas em CPRM (2001) com os dados de altos teores de  $^3\text{H}$ , mostraram coincidência de posicionamento (Figura 4.6).

iv) Teores de  $^3\text{H}$  + teores de metais + eletroresistividade de solos são uma combinação de grande sinergia, não apenas nos trabalhos de remediação de solos mas, principalmente, em estudos da prevenção de sua poluição.

### **10.1.2 Estudo da distribuição de metais na água, nos sedimentos de fundo e em suspensão, na Bacia Hidrográfica da Pampulha e no Rio das Velhas**

Atuou-se na determinação de metais na água superficial, sedimentos de fundo e em suspensão, dentro do programa de monitoramento hidrossedimentométrico efetuado em 1998 e 1999 (SUDECAP, 1999) nas estações E1 a E7, o qual foi estendido e mais detalhado, por iniciativa do autor, na região a montante da Represa da Pampulha (estações S1 a S4 no Sarandí e R1 a R3 no Ressaca - Figura 1.6) (de onde provém os metais a contaminar os sedimentos finos que nela se depositam, e que necessitam ser dragados), com coletas de amostras antes (outubro/1999) e ao final da estação de chuvas de 1999 (abril/2000), produzindo os resultados apresentados nas

tabelas 5.1 a 5.4, cujas principais conclusões (facilitadas com a utilização da análise multivariada), são a seguir apresentadas.

i) As informações geradas auxiliaram no sentido do estabelecimento de uma base de dados com valores de teores de metais e outros elementos para toda a Bacia Hidrográfica da Pampulha, bem como o levantamento de pontos críticos de contaminação, através de estudos georeferenciados, sobretudo na região a montante da represa.

ii) As maiores fontes pontuais de metais para os sedimentos e a água da sub-bacia do Ribeirão Sarandí são as indústrias classificadas como Classe A (Figura 5.41), que já demandavam intervenção imediata por parte dos órgãos de controle ambiental (ESSE, 1996 citado em SUDECAP, 2000), pois os picos de teores de metais ocorrem sobretudo na Estação S2, que engloba a região onde se situam as indústrias.

iii) Na bacia do Ressaca a poluição é mais difusa, sendo os teores de metais dessa região geralmente menores que os correspondentes na região do Sarandí. Este aspecto reflete a diferença de ocupação nas duas sub-bacias: a) Sarandí, com indústrias de maior porte e concentradas a montante da Estação (S2), e uma ocupação urbana descontinuada a jusante, que começou a se adensar mais a partir de 1999, com o término da construção da avenida sanitária ao longo do Ribeirão Sarandí; b) Ressaca, totalmente situada no município de Belo Horizonte, com indústrias de menor porte, porém praticamente toda tomada pela ocupação urbana, contribuindo para a poluição, por metais, mais difusa.

iv) Ao se observar a distribuição e variação dos elementos na água e nos sedimentos em suspensão ao longo da Bacia Hidrográfica da Pampulha, percebe-se que os elementos Zn, Cr, Ni e Cu são provenientes, sobretudo, de ações antrópicas (galvanoplastias, indústrias mecânicas, etc.), especialmente na Região 1 (Sarandí) (figuras 5.6 e 5.7 - para a água), (figuras 5.30, 5.31, 5.33 e 5.34 – para os sedimentos em suspensão), ocorrendo os maiores teores na época de chuva, devido ao carreamento dos metais pelo escoamento superficial resultante da precipitação. Além disso, nota-se nas figuras mencionadas, que os picos ocorrem quase que totalmente na Estação 12 ou S2 para a água e na Estação 13 ou S3 para o sedimento em suspensão, o que reforça a conclusão (ii). Já o Mn e o Al (figuras 5.8 e 5.9) são oriundos da litologia e de ações antrópicas, pois se apresentam bem distribuídos ao longo da bacia

hidrográfica e em concentrações baixas e pouco variáveis; o Ti ocorre em elevados teores no sedimento em suspensão, em toda a bacia e também no Rio das Velhas, assunto que merece mais investigação.

v) Uma interessante conclusão, fruto dessa abordagem sistêmica no estudo da distribuição de metais na Bacia Hidrográfica da Pampulha é que tanto para os teores de metais na água, quanto nos sedimentos, a Represa da Pampulha atua como um elemento modificador, quando se consideram as regiões de montante e jusante.

vi) Foi realizado um estudo para identificar as estações onde ocorrem picos e quais os principais metais presentes para cada matriz: água, sedimento de fundo e sedimento em suspensão, cujos resultados encontram-se, respectivamente, nas tabelas 5.11, 5.12 e 5.13:

- para a matriz água as estações críticas são R1 ou 21 (saída do aterro sanitário de Belo Horizonte) e S2 ou 12, no Ribeirão Sarandí (Figura 1.6), sendo que os três elementos com teores mais altos, são: Al (5,8ppm em R1); Zn (2,4ppm em S2) e Cr (1,1ppm em S2);
- na matriz sedimento de fundo as três estações mais críticas quanto à quantidade de picos, são (Figura 1.6): E6 ou 43, R3 ou 23 e E7 ou 51, respectivamente. Os três elementos com teores mais altos são: Fe (320000ppm; Estação S1), K (230000ppm; Estação E6) e Cu (48000ppm; Estação E6);
- na matriz sedimento em suspensão, as três estações mais críticas, quanto à quantidade de picos, são (Figura 1.6): E7 ou 51, S3 ou 13 e E2 ou 24, respectivamente. Os três elementos que apresentam teores mais altos são: Fe (300000ppm; Estação S1), K (15000ppm; estações E2 e E6) e Zn (13000ppm; Estação S2);

vii) Realizou-se um estudo comparativo dos teores de metais no sedimento fino de fundo a ser dragado na represa e os teores naturais do sedimento em suspensão nos cursos d'água a jusante, baseando-se apenas no valor do teor de metal do pico (Tabela 5.14). Para alguns metais, como: Cr, Cu, K e Ti, os valores foram maiores, no sedimento da represa, do que os correspondentes para os sedimentos em suspensão nos cursos d'água a jusante. Entretanto, isto não implica, *a priori*, na inviabilidade do despejo de material dragado nesses cursos d'água. Outras considerações a influenciar o impacto ambiental de tal intervenção foram levadas em conta, como: critérios de qualidade de sedimentos (Item 5.4.6), a capacidade de hidrotransporte e



dispersora dos cursos d'água, confirmada com os estudos efetuados com o emprego de traçadores marcando a água e o sedimento (capítulos 7, 8 e 9), a permanência do metal fixado ao sedimento dragado em seu novo ambiente hídrico a jusante, que foi confirmada pela medição de parâmetros físico-químicos (Capítulo 9).

viii) Com os valores de teores de metais mostrados na Tabela 5.15 (Item 5.4.3) foi possível efetuar uma comparação entre os teores nos sedimentos de fundo da Represa da Pampulha e os no sedimento de fundo, suspensão e na água da região a jusante da represa, com os teores de metais - Nível 2 (limiar acima do qual espera-se efeito adverso à biota) da Proposta de Resolução do CONAMA (2003) e/ou os teores do valor de intervenção de CETESB (2001) para solos no Cenário Agrícola/Área de Proteção Máxima (APMax) (Item 5.4.4). Nas comparações, deve-se ter em conta a compatibilidade de valores, pois os teores de metais determinados nos sedimentos de fundo, no presente trabalho, são referentes somente à fração fina ( $\phi < 74\mu\text{m}$ ) de amostras de sedimento, e não à fração total, como preconizado na Proposta de Resolução do CONAMA (2003). Os sedimentos em suspensão também apresentam somente a fração fina pois foram obtidos por amostragem da água e posterior decantação. Como a maior parte dos metais, nutrientes e compostos orgânicos presentes nos sedimentos encontram-se fixados na fração mais fina devido às suas características físico-químicas e à maior superfície específica dos grãos, conforme a Figura 6 de BANDEIRA *et al.* (2002b) e FÖRSTNER & SCHOER (1984), os teores determinados neste trabalho deverão apresentar valores mais elevados que aqueles encontrados em amostras não fracionadas. Assim, este fato deve ser levado em consideração ao se estabelecer comparações entre esses teores:

- Os sedimentos de fundo da represa apresentam os seguintes elementos críticos (teores maiores que os limites): Ba, Cr, Cu, Zn e provavelmente o Ni, devido ao limite alto para a análise das amostras colhidas em 1998. As regiões críticas, são: pontos "L" da amostragem de 2001, sobretudo para Ba, Cr e Cu. Entretanto, eles não apresentam problemas quanto aos seguintes metais: Cd, Co, Hg, Pb e V;
- Para os sedimentos de fundo a jusante da represa, os elementos críticos, são: As (Velhas), Ba (Onça), Cr (Onça e Velhas), Cu, Ni e Zn (Pampulha, Onça e Velhas);
- Para os sedimentos em suspensão a jusante da represa, os elementos críticos, são: As, Cu, Ni e Zn (Pampulha, Onça e Velhas), Ba (Onça e Velhas), Cr (Velhas), Pb (Onça);

- Regiões críticas: Onça e Velhas (o ponto E6, no Ribeirão da Onça, é o que apresenta maiores teores, sobretudo em Cu e Zn).

Apesar dos sedimentos de fundo e em suspensão a jusante da represa, anteriormente a qualquer despejo de material dragado, apresentarem alto grau de contaminação por metais, os teores destes metais na água estão dentro dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 20/86 para águas de Classe 3, como são classificadas por FEAM (2003), as águas do Ribeirão da Onça em sua foz e a do Rio das Velhas, entre a foz do Onça e a Estação BV137 (Figura 9.1), na Ponte Raul Soares. Isto está de acordo com os valores dos parâmetros físico-químicos medidos na água da bacia hidrográfica (Capítulo 9), que mostram ser ela um meio bastante redutor. Além disso, apesar de não ter sido medido, o teor em matéria orgânica nos cursos d'água é bastante alto devido ao despejo, nestes, do esgoto não tratado da região metropolitana de Belo Horizonte, o que facilita uma adsorção dos metais.

ix) Com base na Tabela 5.15 (Item 5.4.3) foi também efetuada uma comparação entre teores de metais dos sedimentos de fundo da Represa da Pampulha, e das represas: Billings, Rasgão, Bariri, Barra Bonita e Promissão, todas situadas no Estado de São Paulo:

- A Represa da Pampulha encontra-se mais contaminada em Cr, Cu, Pb e Zn do que as represas Bariri, Barra Bonita e Promissão;
- A Represa da Pampulha encontra-se menos contaminada em Pb do que as represas Billings e Rasgão.

Em relação aos níveis de referência geológico geral (Ref.1 e Ref.2 - Tabela 5.15) verifica-se o seguinte para as cinco represas paulistas e para a Represa da Pampulha:

- Elementos críticos em todas elas: Cu, Pb, e Zn;
- Principais elementos críticos apenas em determinadas represas: As (Represa Promissão); Cd e Cr (Billings e Rasgão); Ni (Billings, Rasgão e provavelmente também Pampulha, devido ao limite alto para a análise das amostras colhidas em 1998).

Em relação aos valores de CONAMA (2003) e de CETESB (2001) as represas apresentam:

- Elemento crítico em todas elas: Ni (provavelmente também na Pampulha, devido ao limite alto para a análise das amostras colhidas em 1998);

- Elementos críticos apenas em determinadas represas: As (Represa Promissão); Cr, Cu e Zn (Represas: Billings, Rasgão e Pampulha); Pb (Represas: Billings e Rasgão).

### 10.1.3 Desenvolvimento da marcação de sedimento fino com $^{99m}\text{Tc}$

i) Foi desenvolvida (Capítulo 6), utilizando-se o sedimento fino do fundo da Represa da Pampulha, a técnica pioneira de marcação do mesmo com o traçador radioativo tecnécio 99 meta-estável ( $^{99m}\text{Tc}$ ), sendo o seu comportamento deposicional similar ao do sedimento não marcado (BANDEIRA, 2001), (BANDEIRA *et al.* 2002a).

ii) A utilização desse novo traçador em relação a outros empregados na marcação de sedimentos finos, desde a década de 60 (e.g.  $^{198}\text{Au}$ ,  $^{46}\text{Sc}$ ), apresenta as seguintes vantagens:

a) a técnica de marcação: muito apropriada para condições de campo; a redução do  $^{99m}\text{TcO}_4^-$  e a adsorção do  $^{99m}\text{Tc}$  no sedimento é rápida; a ligação ao sedimento é forte; não é necessário equipamento especial para a marcação;

b) seu uso como um novo traçador em Sedimentologia: o aspecto da sua portabilidade, em aplicações sedimentológicas, traduzido pela utilização de um gerador de Mo/Tc, facilitando o trabalho de campo em áreas remotas onde a disponibilidade de outros traçadores de meia vida curta, como o  $^{198}\text{Au}$  (que precisa ser irradiado em reator nuclear a cada utilização) é um problema:

- um gerador pode ser usado para um experimento diário durante uma semana. Em 24 horas após a eluição total do Tc, cerca de 90% do valor de equilíbrio é alcançado;
- iniciando-se com um gerador de 1Ci na segunda-feira e, fazendo uma eluição a cada manhã, devido à maior meia vida do isótopo pai, o  $^{99}\text{Mo}$  ( $T_{1/2} = 66\text{h}$ ), quase 340mCi de  $^{99m}\text{Tc}$  seriam ainda disponíveis na sexta-feira;
- além disso, a baixa energia da radiação  $\gamma$  emitida pelo  $^{99m}\text{Tc}$  (140keV) possibilita o uso de blindagens de chumbo (de transporte e manuseio), mais leves;

c) aceitação pública:

- o  $^{99m}\text{Tc}$  é largamente usado em Medicina Nuclear;

- o traçador é injetado por via endovenosa nos pacientes, mas é depois normalmente eliminado no meio ambiente, como acontece também em estudos ambientais;
- No “paciente ambiental”, o curso d’água sendo examinado, muito mais volumoso, as concentrações necessárias (Bq/mL de água) são muito menores (da ordem de  $10^{-7}$ ) do que no paciente humano (Bq/mL de sangue), devido à “Geometria 4δ” de contagem no meio ambiente (detetor imerso na água); no paciente humano, o detetor fica externo.

iii) Em decorrência das atividades relativamente baixas utilizadas em estudos ambientais pode-se conseguir, para os estudos laboratoriais e para grande parte dos estudos de campo, como ocorreu no desenvolvimento e nas aplicações efetuadas no presente trabalho (Tabela 7.1), o traçador sem custo, utilizando-se geradores de tecnécio de 2<sup>a</sup> semana, mais de um, se for o caso, dos laboratórios de Medicina Nuclear, caso estes não tenham um sobrecarga de exames pois, a cada semana, os laboratórios recebem um novo gerador com a carga máxima e, por questões logísticas, só devolvem os geradores para renovação, a cada três ou quatro semanas.

iv) Outro aspecto importante desse desenvolvimento é permitir que países que não possuam reatores nucleares mas que recebam o  $^{99m}\text{Tc}$  para aplicações médicas possam usar o mesmo em Sedimentologia. Isto amplia muito o uso de técnicas nucleares em estudos de Sedimentologia.

#### **10.1.4 Estudo da capacidade de hidrotransporte de cursos d’água a jusante da Represa da Pampulha e no Rio das Velhas**

Foram realizados quatro experimentos com o emprego simultâneo de  $^{99m}\text{Tc}$  e Rodamina WT marcando, respectivamente, o sedimento fino e a água. Injeções instantâneas e simultâneas (pontos PI – Figura 1.6) foram efetuadas nos ribeirões Pampulha, Onça e no Rio das Velhas (Capítulo 7), desde a área do Aeroporto da Pampulha até depois da cidade de Santa Luzia, em um trecho de cerca de 25km. Os estudos foram efetuados em ocasião de seca, quando é menor a capacidade de hidrotransporte do escoamento e, portanto, mais crítica sob o ponto de vista de impactos ambientais físicos (concentração natural geralmente mais baixa e maior chance de sedimentação). As detecções foram efetuadas de forma euleriana: detetor e amostrador fixos, enquanto as plumas marcadas passavam pela estação de medidas.

i) Os experimentos permitiram avaliar as diferenças de comportamento do sedimento fino em suspensão e da água que o transporta, em termos das velocidades de advecção ( $v$ ) dos centróides das curvas de passagem, e de seus coeficientes de dispersão ( $D$ ), o que foi calculado com um programa de computador (SALIM, 2003) que usa o modelo de SINGH & BECK (2003). Os seguintes resultados foram obtidos:

- para os diversos trechos estudados e para as fases: sólida e líquida, as velocidades de advecção foram semelhantes (Tabela 8.1);
- para as duas fases, em uma mesma estação de medidas, as formas das curvas de passagem (figuras 8.1 a 8.4) vão se diferenciando e os coeficientes de dispersão vão apresentando valores distintos para as estações mais a jusante do ponto de injeção (e.g. Estação D6 no Ribeirão da Onça – figuras 8.2 e 8.4) com as plumas de sedimento com caudas mais alongadas, resultando em maiores coeficientes de dispersão longitudinal relativamente aos da água (últimos trechos dos experimentos neste ribeirão (Tabela 8.1); a maior densidade do sedimento em suspensão em relação à da água, os efeitos centrífugos daí decorrentes em trechos curvos do escoamento, e a existência de zonas mortas explicam essa diferença de comportamento (e.g. observações na Estação D5, no Ribeirão da Onça – itens 7.2.2 e 7.2.4);
- a largura relativamente pequena em relação às dimensões da zona morta induz efeito retardador pronunciado na passagem do sedimento (e.g resultados nas estações D5 e D6 do Ribeirão da Onça – itens 7.2.2 e 7.2.4 – comparados com o experimento no Rio das Velhas – Item 7.2.3).

ii) O modelo de dispersão longitudinal utilizado (SINGH & BECK, 2003), fundamenta-se na solução analítica completa (equações 8.3 ou 8.8) da equação unidimensional de advecção e dispersão (Equação 8.1) e, assim, torna-se livre de erros de aproximação empregados em modelos anteriores, sendo esta a sua grande vantagem. Entretanto, foi desenvolvido para estudos de dispersão da fase líquida e, portanto, considera iguais as densidades da água e do componente sendo transportado (soluto ou traçador). Mesmo assim, por falta de outro, ele foi utilizado no presente trabalho para modelar a advecção e dispersão do sedimento em suspensão, o qual possui densidade diferente daquela da água. Assim, este modelo é susceptível de melhorias para um melhor ajuste de suas previsões aos dados registrados no campo.

iii) Mesmo com a limitação anteriormente apontada, a aplicação do modelo de SINGH & BECK (2003) aos dados experimentais nos ribeirões Pampulha e Onça, e no Rio das Velhas forneceu resultados coerentes, como comentado no Item 8.3.3 e mostrado nas figuras 8.5 a 8.8.

#### **10.1.5 Avaliação de impactos ambientais do despejo de sedimento fino em cursos d'água e da possibilidade de dessorção de metais nele presentes**

i) A execução dos experimentos possibilitando o estudo da dinâmica simultânea da água e do sedimento em suspensão transportado por ela, juntamente com a aplicação e calibração do modelo de SINGH & BECK (2003) aos dados medidos, permitiu se estimar quantitativamente os impactos ambientais físicos:

- aumento de concentrações de sedimento em suspensão devido ao despejo, em relação às concentrações naturais existentes (Item 9.2.1);
- quantidade de sedimento que decanta entre seções de medida (Item 9.2.2).

Quanto aos impactos estudados, conclui-se que não há impedimento para o despejo de material fino nos cursos d'água a jusante. A espessura de decantação máxima teórica, em época de seca, em função do despejo de dragagem, no trecho D3-D4, (supondo que não haja ressuspensão em seguida à deposição ou em épocas de maiores vazões) é de apenas 0,18m/ano.

ii) Medições de parâmetros físico-químicos (OD, pH, Eh, condutividade e temperatura) (Tabela 9.14 - Item 9.3) na água, em toda a Bacia Hidrográfica da Pampulha, permitiram concluir que o meio é fortemente anaeróbio (baixos valores de OD), com raras exceções, devido ao grande aporte de esgoto doméstico nos cursos d'água. O pH variou em torno da neutralidade à exceção de amostras tomadas na região do aterro sanitário de Belo Horizonte. Os valores medidos de condutividade foram altos, comprovando a existência de grandes quantidades de espécies iônicas em solução. O potencial redox (Eh), de modo geral, apresentou valores predominantemente negativos (meio redutor). A temperatura se situou em torno de 25°C. Com os valores encontrados para a região de estudos de despejo de dragagem, a jusante da Represa da Pampulha (Tabela 9.14), associados a informações sobre a qualidade d'água, disponíveis em IGAM (2004) para as estações com sigla BV (Figura 9.1), não é de se esperar dessorção significativa dos metais adsorvidos no sedimento fino a ser dragado da Represa da Pampulha, caso sejam despejados nos cursos d'água a jusante.

### **10.1.6 Metodologia empregada, resultados alcançados, sua consideração em função de critérios de qualidade ambiental para solos e para aperfeiçoar a Proposta de Resolução sobre a disposição final do material dragado (CONAMA, 2003)**

i) As inovações tecnológicas do presente trabalho contribuem para uma consideração mais adequada dos aspectos físicos da dinâmica do sedimento despejado em meio líquido. Elas são ferramentas fundamentais na avaliação da área a ser afetada e do grau de impacto devido ao despejo de dragagem na água. Dessa forma:

- o texto do Art. 2º, em seu Inciso III - *Disposição final do material dragado*, da Proposta de Resolução (CONAMA, 2003), poderá ser mais bem compreendido, caso a caso;
- as inovações tecnológicas poderão também auxiliar para o aperfeiçoamento da redação do Art. 7º - Inciso II, da Proposta de Resolução (CONAMA, 2003) o qual, em sua forma atual, não aceita "*técnicas que considerem, como princípio de disposição, a diluição ou a difusão dos sedimentos do material dragado*". Mesmo no caso de critérios ambientais para solos adotados na Holanda (Item 3.3.2.2) e nos Estados Unidos (Item 3.3.2.3), e no caso de efluentes líquidos e gasosos (último parágrafo do Item 3.3.2.6), a diluição é considerada na avaliação do impacto ambiental de despejos.

ii) A consideração conjunta:

- da diluição (acima mencionada);
- do estudo da capacidade de retenção dos metais nos sedimentos mobilizados pela dragagem, avaliada através da medição dos parâmetros físico-químicos das águas receptoras;
- da comparação dos teores de metais nos sedimentos a serem descarregados e nos já existentes (no sedimento de fundo, no sedimento em suspensão e na água superficial a jusante), como realizado nos estudos aqui apresentados para a dragagem da Represa da Pampulha;

certamente contribuirá com a realista e criteriosa avaliação do impacto ambiental do despejo de dragagem, em cada caso. Estudos desse tipo poderão dar subsídios à:

- revisão da Proposta de Resolução (CONAMA, 2003), prevista em seu Art. 9º para ser efetuada em até cinco anos;

- poderá ser incluída na normatização, a cargo do IBAMA, do monitoramento das áreas de dragagem e de disposição, como preconizado no Artigo 10º daquela Proposta de Resolução.

## **10.2 Recomendações**

i) No presente estudo, além da determinação das regiões topográficas na bacia hidrográfica, delimitadas pelas estações de coleta de metais (Figura 5.41) empreenderam-se esforços para tentar sobrepor à topografia (dado que a bacia hidrográfica tem características eminentemente urbanas), as redes de drenagem pluvial e de esgotamento sanitário, atualizadas, para uma identificação mais precisa e completa das regiões críticas produtoras de metais e outros poluentes. Isto possibilitará efetivas ações preventivas no combate à poluição. Como a magnitude das tarefas de geoprocessamento, de trabalhos de campo e escritório excedeu em muito a equipe, o orçamento e o tempo de que dispunha o autor, sugere-se às autoridades municipais de Belo Horizonte e Contagem, órgãos ambientais, e outros atores que trabalham com este tema que, efetivamente, tornem disponíveis e sempre atualizadas estas informações. Além disso, é importante considerar, neste futuro trabalho de identificação precisa das regiões fontes de metais e de outros poluentes, os resultados do Programa Caça-Esgoto implementado pela COPASA-MG em 1996, conforme SOUZA (1996) citado em SUDECAP (2000), tendo em vista a implantação, nas bacias dos ribeirões Arrudas e Onça, das estações de tratamento de esgoto (ETE), através do PROSAM, e a necessidade de encaminhamento da maior vazão possível de esgotos para ser tratada. Este Programa tem entre seus objetivos a identificação e eliminação de interconexões esgotos/águas pluviais, bem como a proposição de medidas para eliminar lançamentos de redes de esgotos em córregos, o que certamente contribuirá para a melhoria da qualidade da água e dos sedimentos na bacia hidrográfica.

ii) Considerando-se, para a Região 1 (sub-bacia do Ribeirão Sarandí), as ocorrências simultâneas de picos nas matrizes água e sedimento em suspensão, respectivamente: tabelas 5.11 e 5.13, e com relação à ocorrência dos picos de elementos de origem eminentemente antrópica: Cr, Cu, Ni e Zn, os picos na água, para os três primeiros, ocorrem na Estação 12 (figuras 5.6 e 5.7), enquanto que os picos para os mesmos três elementos, no sedimento em suspensão, ocorrem na Estação 13, seguinte (figuras 5.34, 5.30 e 5.31, respectivamente). Quanto ao Zn, os picos na água e no sedimento em suspensão ocorrem na Estação 12 (figuras 5.6 e 5.32, respectivamente). Mesmo considerando que os teores de metais presentes na água



são de uma a duas ordens de grandeza menores que nos sedimentos em suspensão, e que a entrada de metais, água e sedimentos no Ribeirão Sarandí é difusa será que, à medida que os metais presentes na água, ao transitarem para jusante, vão se adsorvendo aos sedimentos em suspensão? É interessante um aprofundamento futuro na observação dessa evolução dinâmica e espacial dos metais no sistema hídrico em estudo, e em outros, baseando-se em um maior número de observações e em medições simultâneas de parâmetros físico-químicos.

iii) Recomenda-se que a metodologia aqui apresentada, no tocante à distribuição de metais na água e nos sedimentos da Bacia Hidrográfica da Pampulha, não só na região a montante da represa, possa ser aperfeiçoada e implementada, possibilitando um melhor controle desses poluentes no sistema. O prosseguimento desse trabalho permitirá aos órgãos ambientais melhor fiscalizar e corrigir as entradas de metais e outros poluentes no sistema hídrico, colaborando para que os futuros sedimentos finos que assorearão e terão que ser dragados na represa, sejam mais limpos.

iv) De posse dessas ferramentas poderosas que são os traçadores aqui utilizados, que permitem estudar, de um modo muito prático, o comportamento simultâneo da água (Rodamina WT) e do sedimento em suspensão ( $^{99m}\text{Tc}$ ) por ela transportado, associadas sinergicamente a modelos matemáticos, pode-se trabalhar mais profundamente com os dados aqui apresentados e com outros a serem futuramente colhidos, nesta e em outras bacias hidrográficas, e também em estudos controlados em laboratório, sobre a diferença das dinâmicas da água e do sedimento em suspensão, através da:

- associação de valores de  $v$  e  $D$  dos experimentos aos parâmetros do escoamento e às características geométricas dos cursos d'água, de forma a se ter uma melhor compreensão dos fenômenos envolvidos;
- introdução de parâmetros adequados que levem em conta a diferença de densidade entre a água e o sedimento em suspensão, visando melhorar as previsões do modelo aqui empregado e também de outros modelos.

Estes são assuntos que poderão se constituir em novas teses, resultando em um avanço do conhecimento científico, através de um melhor entendimento do complexo fenômeno do transporte e dispersão de sedimento em suspensão em escoamentos unidirecionais (caso de rios

com profundidades relativamente baixas) e, talvez, em situações multidirecionais (caso de estuários e mar aberto).

v) Dadas as concentrações de  $^{99m}\text{Tc}$  (Bq/mL de água) empregadas normalmente no "paciente ambiental", o curso d'água sendo examinado, muito menores (da ordem de  $10^{-7}$ ) do que as necessárias (Bq/mL de sangue) para o paciente humano, dado o pouco conhecimento da sociedade em relação ao real efeito e potencialidade dessa ferramenta em estudos ambientais, recomenda-se a sua divulgação pelas comunidades científicas e autoridades ambientais, assim como deve ser reavaliado o preconceito existente em alguns países de não se utilizar traçadores radioativos, expressamente adicionados, em estudos ambientais. O corpo ambiental é tão importante quanto o corpo humano no qual essa técnica é largamente utilizada, acarretando grandes benefícios.

vi) Recomenda-se a execução de trabalho de campo no trecho D1-D3, englobando os ribeirões Pampulha e Onça, até o final do trecho canalizado neste último (início da cachoeira no Bairro Alto Vera Cruz – figuras 1.6 e 7.3e) utilizando três detetores de  $^{99m}\text{Tc}$ , distribuídos ao longo das seções transversais de medidas, de forma a melhor se avaliar os fatores de decantação do sedimento em suspensão (Tabela 9.11), antes de um possível despejo, nos cursos d'água a jusante, do sedimento fino dragado na Represa da Pampulha.

vii) Finalmente, deve-se realizar uma nova batimetria entre a região da Ilha dos Amores e a Barragem da Pampulha, de forma a se quantificar o volume líquido restante na represa, pois cinco anos já se passaram desde o último levantamento efetuado em 1999 (SALIM *et al.* 2000).

### **10.3 Considerações finais**

i) A Medicina Nuclear tem possibilitado diagnósticos e tratamentos muito mais precisos e eficientes, auxiliando bastante na compreensão do funcionamento do organismo humano. Do mesmo modo, o novo desenvolvimento apresentado nesse trabalho para o uso, em Sedimentologia Dinâmica, do  $^{99m}\text{Tc}$ , traçador radioativo ambientalmente amigável, dada a baixa energia da radiação a ser emitida e sua meia vida curta, possibilita estudos mais aprofundados do transporte e deposição de sedimentos finos em escoamento à superfície livre. Fica assim estabelecido o paralelo entre a Engenharia Nuclear Ambiental (expressão aqui cunhada), que

faz uso das técnicas nucleares no meio ambiente (um dos objetivos do presente trabalho é a promoção deste uso) e a Medicina Nuclear, que as utiliza no ser humano.

ii) Os cursos d'água a jusante são o caminho natural dos sedimentos retidos nas represas as quais são, em geral, intervenções antrópicas fortemente impactantes, sob vários aspectos, no meio ambiente. A dragagem com transposição, reintegrando os sedimentos aos cursos d'água a jusante, como aqui estudado em detalhes para a Represa da Pampulha, é uma atitude para a minimização desses impactos ambientais, que deve ser considerada pela coletividade. No caso de assoreamento completo, o que poderá ocorrer, com mais frequência, com as pequenas represas, como a da Pampulha e as PCH's, o sedimento que por elas transitar irá naturalmente para jusante. Por que não fazer, então, a dragagem com transposição antes que isso aconteça?

iii) Na dragagem de reservatórios, um aspecto a ser abordado, é o da manutenção da descarga sedimentar para jusante. Do mesmo modo que a coletividade se preocupa com a manutenção da descarga líquida, quando se constrói reservatórios, por ser a água vital para as atividades de irrigação, consumo, recarga do lençol freático e outras, o sedimento fino, com a matéria orgânica e os nutrientes associados, é também vital para a manutenção da biota aquática. Assim, nos estudos ambientais deve-se considerar, em bacias hidrográficas onde existam reservatórios, a manutenção do fluxo sedimentar para jusante, pelo menos de sedimentos finos, que são mais facilmente hidrotransportáveis. O impacto ambiental na região da foz, devido à retenção dos sedimentos silto-argilosos, bem como dos arenosos, após a construção dos grandes barramentos na Bacia do Rio São Francisco, que se iniciou com a Hidrelétrica de Paulo Afonso, na década de 40 do século passado, produziu erosões de margens, uma queda drástica na taxa de piscosidade no baixo São Francisco e uma erosão na foz, junto à margem direita, na localidade de Cabeço, SE, (PROJETO GEF - São Francisco, 2002).

iv) Assim como os projetistas de barragens procuram diminuir os efeitos destas sobre a piracema, dotando-as de escadas para peixes, deve-se considerar as dragagens de reservatórios sucessivos, com a transposição de sedimentos para jusante, como uma "escada de sedimentos". Mesmo com a presença das barragens, os rios devem continuar, para a harmonia ambiental, sendo uma via de mão dupla. Os peixes devem poder subir o rio, assim como os sedimentos devem poder descê-lo, pelo menos os finos, em um futuro não muito distante e os grossos, pelo menos em parte, quem sabe, em um horizonte mais amplo. É uma questão de harmonizar o

benefício econômico (e.g. desassoreamento de barragens) e ambiental (e.g. diminuição de erosão nas margens e diminuição do impacto ambiental na região do estuário e embocadura) com o custo da implementação efetiva dessa via de mão dupla. Tanto os peixes quanto os sedimentos têm a sua importância ambiental. Eles estão ligados em rede (CAPRA, 2002). Afinal de contas, os peixes e outros componentes da fauna e flora do baixo São Francisco e de todos os outros estuários, dependem também do sedimento que vem de montante.

## 11 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAGUÁS-ARAGUÁS, L. Changes of soil water balance due to forest clearing in the central amazon region. In: CONGRESS OF THE IAH - SOLUTIONS'95, 26, 1995, Edmonton. **Proceedings...**: IAH, 1995. 381p.

ABRH; CEMIG; CETEC/MG; CNEN/CDTN; CPRM; SUDECAP; UFMG. **Programa de monitoramento hidrossedimentométrico da bacia da Pampulha**. Belo Horizonte: [s.n.], 1996.

AIREY, P. *et al.* Evolving role of radiotracers in coastal zone studies. **Journal of Applied Radiation and Isotopes**, v.58, p. 401-406, 2002

ANDRADE, E.M. *et al.* Investigação da estrutura multivariada da evapotranspiração na região centro sul do Ceará pela análise de componentes principais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.8, n.1, p. 39-44, jan./mar. 2003.

AUN, P.E.; BANDEIRA, J.V. Sepetiba bay: an integrated study of an harbour location. In: IV SIMPÓSIO NIPO-BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA, 4, 1984, São Paulo.

AUN, P.E. *et al.* Selection of spoil disposal areas in Brazilian harbours with the aid of tracer techniques. In: CONFERENCIA INTERNACIONAL EM ENGENHARIA COSTEIRA E PORTUÁRIA EM PAÍSES EM DESENVOLVIMENTO, 3, 16-20 de set. 1991., Mombasa, Quênia. **Anais...** Mombasa: COPEDEC, 1991. p.950-962

AUN, P.E; MENDES, V.L. Radioactive tracers in the study of the movement of sediments. In: REGIONAL TRAINING COURSE ON THE USE OF ISOTOPE TECHNIQUES IN ENVIRONMENTAL STUDIES OF THE HYDROSPHERE AND THE ATMOSPHERE, IAEA, 1992, Piracicaba, Belo Horizonte. Apostilas [s.n.], 1992.

AUN, P.E.; BANDEIRA, J.V. The role of nuclear techniques in sedimentological studies and some applications in Latin America. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Use of nuclear techniques in studying soil erosion and siltation**. Vienna: IAEA, 1995 p. 29-97. (IAEA-TECDOC-828)

AUSILI, A. *et al.* Physico-chemical characteristics and multivariate analysis of contaminated harbour sediments. **Wat. Sci. Tech.**, v. 37, n. 6-7, p. 131-139, 1998

BANDEIRA, J.V. **Notas de aula.** International Institute for Hydraulic and Environmental Engineering (IHE), Delft, 1986.

BANDEIRA, J.V.; PINTO, G.G. **Estudios sedimentológicos en la bahía de Montevideo con la aplicación de técnicas nucleares.** Relatório final de missão para a Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) - Projeto de Cooperação Técnica URU/8/009. Montevideu, Uruguai. Belo Horizonte: [s.n.], 1997.

BANDEIRA, J.V. *et al.* The use of  $^{99m}\text{Tc}$  as an adsorbable tracer for studying the dynamics of fine sediments in suspension. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ISOTOPE TECHNIQUES IN WATER RESOURCES DEVELOPMENT AND MANAGEMENT, 10-14 May 1999, Vienna. **Proceedings...** Vienna: IAEA, 1999a. 1 CD-ROM.

BANDEIRA, J.V. *et al.* A utilização do  $^{99m}\text{Tc}$  como um traçador adsorvível para o estudo da dinâmica de sedimentos finos em suspensão. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 13, 1999, Belo Horizonte. **Anais...**São Paulo: ABRH, 1999b. 1 CD-ROM.

BANDEIRA, J.V. **The use of the  $^{99m}\text{Tc}$  as an adsorbable tracer for studying the dynamics of fine sediments.** Relatório final do projeto de pesquisa. Belo Horizonte: [s.n.], 2001. (IAEA RC BRA-10891).

BANDEIRA, J.V. *et al.* Development of a technique for using  $^{99m}\text{Tc}$  as an adsorbable tracer for hydrodynamic studies of fine sediments in suspension. **Journal of Applied Radiation and Isotopes**, v.57, p. 85-92, 2002a.

BANDEIRA, J.V. *et al.* Estudo da distribuição granulométrica e do teor de metais pesados dos sedimentos de fundo na Represa da Pampulha, em Belo Horizonte/MG. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS, 5, 25-29 de nov. 2002. São Paulo. **Anais...**São Paulo: ABRH/EPUSP, 2002b. p.147-155

BAPTISTA, M.B.; PINHEIRO, M.C. O funcionamento hidráulico e sedimentológico dos canais da ilha da Pampulha. In: SEMINÁRIO DA BACIA HIDROGRÁFICA DA PAMPULHA, 1992, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: 1992. p. 166-178.

BAPTISTA, M.B. *et al.* Aspectos técnicos e econômicos do assoreamento de lagos urbanos - análise do caso de Belo Horizonte" In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 11, 1995, Vitória. **Anais...** Vitória: ABRH, 1995.

BARD, A.J., PARSONS, R., JORDAN, J (Eds.). **Standard potentials in aqueous solution**. New York: M. Dekker, 1985. 834p.

BORROTO, J. et al. Behavior of  $^{99m}\text{Tc}$  in highly polluted surface waters: field and laboratory studies. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ISOTOPE TECHNIQUES IN WATER RESOURCES DEVELOPMENT AND MANAGEMENT 1999, Vienna, 10-14 May 1999. **Proceedings...** Vienna: IAEA, 1999. 1 CD-ROM.

BORROTO, J. **Comportamiento del  $^{99m}\text{Tc}$  como radiotrazador en aguas superficiales y residuales**. 2004. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Químicas. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas. Facultad de Ciencias y Tecnología Nucleares (INSTEC), Departamento de Radioquímica, La Habana, Cuba, 2004.

BOUGAULT, H. **Étude de la sorption de quelques radioéléments artificiels par les sédiments pélitiques en vue de son application au marquage radioactif de ces matériaux..** 1970. Thèse (Doctorat) - Faculté des Sciences , l'Université de Paris, France, 1970.

CAILLOT, A. Sediment labeling with radioactive isotopes. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Tracer techniques in sediment transport**. Vienna:IAEA, 1973. p. 169-176 (IAEA TECDOC-145).

CAILLOT, A. *et al.* **Étude au laboratoire et in situ du comportement hydrodynamique des fines particules en suspension à l'aide de traceurs radioactifs - Application au cas particulier du rejet des produits de dragage du port de Recife (N-E du Brésil)**. Belo Horizonte: Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear; Divisão de Radioisótopos,

1978. Relatório final de missão para a Agência Internacional de Energia Atômica AIEA. Projeto de Cooperação Técnica BRA/8/018.

CAPRA F. **Conexões ocultas**: ciência para uma vida sustentável. 2.ed.. Editora: Cultrix, 2002.

CARVALHO, M.A.G. **Análise de dispersão de poluentes em rios - Uso de traçadores**. Dissertação (Mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares - CCTN) - Escola de Engenharia., Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1983.

CARVALHO, N.O. **Hidrossedimentologia prática**. Rio de Janeiro: CPRM, 1994. 372p.

CETESB. **Relatório de estabelecimento de valores orientadores para solos e águas subterrâneas no Estado de São Paulo**. São Paulo, 2001.

CHAMPS, J.R.B. O problema de assoreamento da represa da Pampulha e as medidas adotadas para o seu controle. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS, 1991, Ouro Preto. **Anais...** São Paulo: ABRH, 1991. Ouro Preto: ABRH, UFOP, 1991.

CHAMPS, J.R.B. Transposição de sedimentos na represa da Pampulha: algumas considerações sobre a sua viabilidade. In: SEMINÁRIO DA BACIA HIDROGRÁFICA DA PAMPULHA, 1992, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: SUDECAP, 1992. p. 187-189.

CLARK, I.D; FRITZ, P. **Environmental isotopes in hydrogeology**. Boca Raton: Lewis, 1999. 328p.

COMISSÃO DE POLÍTICA AMBIENTAL - COPAM, MINAS GERAIS. Deliberação Normativa COPAM nº 1, de 26 de maio de 1981. Disponível em [www.feam.br/Normas\\_Ambientais](http://www.feam.br/Normas_Ambientais). Acessado em 21 nov. 2003.

COMISSÃO DE POLÍTICA AMBIENTAL - COPAM. Deliberação Normativa COPAM nº 11, de 16 de dezembro de 1986. Disponível em [www.feam.br/Normas\\_Ambientais](http://www.feam.br/Normas_Ambientais). Acessado em 21 nov. 2003.



COMISSÃO DE POLÍTICA AMBIENTAL - COPAM. Deliberação Normativa COPAM nº 49, de 28 de setembro de 2001. Disponível em [www.feam.br/Normas\\_Ambientais](http://www.feam.br/Normas_Ambientais). Acessado em 21 nov. 2003.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear. BELO HORIZONTE. Prefeitura Municipal. SUDECAP. Termo de ajuste de mútua cooperação - Implementação do Programa de monitoramento hidrossedimentométrico da bacia hidrográfica da Pampulha. **Diário Oficial do Município**, Belo Horizonte, 27 jan. 1998.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear. UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS. Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos. **Projeto de Pesquisa: Estudo do conteúdo de metais pesados em sedimentos fluviais, lacustres e na água da bacia hidrográfica da Pampulha, com vistas á avaliação do impacto ambiental decorrente do despejo, à jusante, de material dragado na lagoa**. Belo Horizonte: [s.n.], 1998.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. **Gerador de tecnécio – 99m**. São Paulo: [s.d.].

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. Resolução nº 20, de 18 de junho de 1986. Disponível em [www.mma.gov.br/port/conama/](http://www.mma.gov.br/port/conama/). Acessado em 21 nov. 2003.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. Resolução CONAMA nº 005, de 15 de junho de 1989. Disponível em [www.mma.gov.br/port/conama/](http://www.mma.gov.br/port/conama/). Acessado em 21 nov. 2003.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. Proposta de Resolução da 3ª Reunião da Câmara Técnica Assuntos Jurídicos, 03 e 04 de setembro de 2003. Disponível em <http://www.mma.gov.br/port/conama/processo.cfm?processo=02000.001361/2002-79>. Acessado em 21 nov. 2003.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil. **Projeto Pampulha: Estudo hidrogeológico da bacia da Lagoa da Pampulha**, Belo Horizonte, 2001.

CRUZ, M.A.S.; TUCCI, C.E.M.; SILVEIRA, A.L.L. Controle do escoamento com detenção em lotes urbanos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v 3, n. 4. p. 19, 1998.

DE HEER, R. **Soil investigation for dredging purposes**. Delft: International Institute for Hydraulic and Environmental Engineering, 1986a.

DE HEER, R. **Reclamation by hydrotransport**. Delft: International Institute for Hydraulic and Environmental Engineering, 1986b.

DE HEER, R. **Calculation of dredging works**. Delft: International Institute for Hydraulic and Environmental Engineering, 1986c.

DE KONING, J. **Boundary conditions for the use of dredging equipment**. Delft University of Technology, 1981.

DRUMOND, M.M. **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**. 2004. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SMARH), Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

DULSKI, T.R. **A Manual for the chemical analysis of metals**. Ann Arbor: ASTM, 1996. 251p.

DT ENGENHARIA. **Anteprojeto e estudo de viabilidade técnico-econômico-ambiental do novo sistema de desassoreamento e recuperação ambiental da lagoa da Pampulha e áreas adjacentes** - Inventário AT 1.1. Reconhecimento de campo, inventário de dados e programa de levantamentos de campo Belo Horizonte: [s.n.], 1997a. Relatório técnico 01. Etapa 1.

DT ENGENHARIA. **Anteprojeto e estudo de viabilidade técnico-econômico-ambiental do novo sistema de desassoreamento e recuperação ambiental da lagoa da Pampulha e áreas adjacentes** - Anteprojeto de alternativas para o novo sistema de desassoreamento da lagoa da Pampulha -Belo Horizonte: [s.n.], 1997b. Relatório técnico 3. Etapa 2.

EATON, A.D.; CLESCERI, L.S.; GREENBERG, A.D.,(Eds.) **Standard methods for examination of water and wastewater**. 19 ed. Washington: American Public Health Association, 1995.

FERREIRA, A.B. DE H. **Novo Aurélio século 21: o dicionário da língua portuguesa**. 3.ed.. Rio de Janeiro: Nova Fronteira , 1999.

FIORAVANTE NETO, A. **Levantamento eco-batimétrico da Lagoa da Pampulha**. Belo Horizonte: CDTN, 1995.(CDTN/CNEN RC-CT7-003/95).

FISCHER, H.B. Dispersion prediction in natural streams. **Journal of Sanitary Engineering**, ASCE, 94(5),p. 927-941, 1968.

FÖRSTNER, U.; SCHOER, J. Some typical examples of the importance of the role of sediments in the propagation and accumulation of pollutants. In: RESEARCH COORDINATION MEETING ON THE ROLE OF IN THE ACCUMULATION AND TRANSPORT OF RADIONUCLIDES IN WATERWAYS, 1984, Vienna. **Introductory lectures: sediments and pollution in waterways. General Considerations**. Vienna: IAEA, 1984. 184p. p.137-158 (IAEA-TECDOC 302).

FRITZ, P.; FONTES, J.C. **Handbook of environmental isotope geochemistry**. Amsterdam: Elsevier Science , 1986. 2v.

FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. **Programa de monitoramento hidrossedimentométrico da bacia hidrográfica da Pampulha - Certificados de ensaio relativos à análise de concentração de sedimentos em suspensão em cursos de água naturais pelo método de evaporação**. Belo Horizonte: CETEC, 1999.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE - FEAM, MINAS GERAIS. Disponível em: <http://www.feam.br>. Acessado em: 16 jun.2003.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO. Centro de Estudos Históricas e Culturais. **Panorama de Belo Horizonte: atlas histórico**. Belo Horizonte: FJP, 1997. 104p.

GARCIA-AGUDO. E. Use of tracers and environmental isotopes in surface water pollution studies. In:IAEA CONSULTANT'S MEETING, May 1997, Vienna. **Report**. Vienna: IAEA, 1997.

GONÇALVES, M.L.S.S. **Métodos instrumentais para análise de soluções**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1983.

HIDROWEB. Disponível em: <http://hidroweb.ana.gov.br/HidroWeb/>. Acessado em: 13 fev. 2004.

HYDROLOGIC DATA COLLECTION. **Programa de monitoramento hidrossedimentométrico da bacia hidrográfica da Pampulha**: Relatórios mensais de Hidrometria. Belo Horizonte: HDC, 1999.

IDRISI<sup>®</sup> for Windows<sup>®</sup>. **Version 32**. Worcester: Clark University, 2000.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM. Disponível em: <http://www.igam.mg.gov.br/aguas/htmls/index.htm>. Acessado em: 13 nov. 2004.

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDROVIÁRIAS (Rio de Janeiro, RJ). **Modelo físico de fundo móvel da embocadura do rio Sergipe, Aracaju, Coroa do Meio** - Relatório final.. Rio de Janeiro, 1987. 2 v. (INPH/DIDEPE 59/87).

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Guidebook on nuclear techniques in hydrology**. Vienna: IAEA, 1983.

KEITH, L.H., (Ed.). **Principles of environmental sampling**. Washington: American Chemical Society, 1986. 458p. (Professional reference book)

LEVIN, M.; VERHAGEN, B.T. **A unique approach to evaluate the utility of landfill monitoring boreholes Republic of South Africa**. 1999.

LIESER, K.H.; BAUSCHER, C. Technetium in the hydrosphere and in the Geosphere - I. Chemistry of technetium and iron in natural waters and influence of the redox potencial on the sorption of technetium. **Radiochimica Acta**, v. 42, p.205 - 213, 1987.

LIESER, K.H.; BAUSCHER. C. Technetium in the hydrosphere and in the geosphere - Influence of pH, of complexing agents and of some minerals on the sorption of technetium. **Radiochimica Acta**, .v. 44/45, p.125 - 128, 1988.

LIMA, J.E.F.W., *et al.* **Diagnóstico do fluxo de sedimentos em suspensão na bacia do rio São Francisco**. Brasília: ANA, ANEEL, Embrapa, 2001.

LIMA, J.E.F.W.; SANTOS, P.M.C. **Avaliação do fluxo de sedimentos em suspensão no Rio das Velhas - MG**. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS, 5, 25-29 de nov. 2002., São Paulo. **Anais....**São Paulo: ABRH/EPUSP, 2002, p.381-393

LIU, D.H.F.; LIPTÁK, B.G. **Environmental engineers' handbook**. 2.ed. New York.: Lewis, 1997. 1431p.

L'VOV, B.V. **Atomic absorption spectrochemical analysis**. London: Adam Hilger 1970.

MANUELZÃO: Saúde, Meio Ambiente e Cidadania. Belo Horizonte: UFMG, 1997-2004. Bimestral.

MENEZES, M.A.B.C. **Avaliação da exposição e contaminação por metais em galvanoplastias utilizando filtros de ar e biomonitores**. 2002. Tese (Doutorado em Química). Departamento de Química, Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.

MIGNIOT, C. Étude des propriétés physiques de différents sédiments très fins et de leur comportement sous des actions hydrodynamiques. **La Houille Blanche**, n. 7, p.591-620, 1968.

MINERALS MANAGEMENT SERVICE - MMS. Technical Summary: MMS Publication 99-0060. Effect of Produced-Water Discharge on Bottom Sediment Chemistry. Disponível em [www.gomr.mms.gov/homepg/regulate/enviro/techsumm/1999/99-0060.html](http://www.gomr.mms.gov/homepg/regulate/enviro/techsumm/1999/99-0060.html). Acessado em 23 ago. 2004.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Padrão de Potabilidade da Portaria 1.469 de 29/12/00**. Disponível em: [www.anvisa.gov.br/legis/portarias/1469\\_00.htm](http://www.anvisa.gov.br/legis/portarias/1469_00.htm). Acessado em : 23.06.03.

MIOZZO, R. Disponível em: <http://www.aqua.brz.net/rep/marinho48.htm> Acessado em: 17 set. 2002.

MOOK, W.G. (Ed.). **Environmental isotopes in the hydrological cycle. principles and applications**. International Hydrological Programme. IHP-V. Paris: UNESCO, 2000. (Technical documents in hydrology, .n. 39, v.1)

MOREIRA, R.M. *et al.* **Distribuição de tempos de residência e desenvolvimento de modelos para o Ribeirão Arrudas no trecho compreendido entre as pontes da Rua Itamar e de General Carneiro**. Belo Horizonte: CDTN/NUCLEBRÁS, 1980. Relatório DERL.PD-026/80 - DIRAP.PD.

MOREIRA, R.M. *et al.* Industrial Effluent discharges in coastal waters: Open and confined bodies. In: CONFERENCE ON ISOTOPE TECHNIQUES IN THE STUDY OF PAST AND CURRENT ENVIRONMENTAL CHANGES IN THE HYDROSPHERE AND THE ATMOSPHERE, Vienna: IAEA, 1991. Proceedings... (IAEA-SM-329/24).

MOZETO, A.A. **Crítérios de qualidade de sedimentos (CQS) para metais pesados: fundamentos teóricos e técnicos para implementação**. São Carlos: UFSCar, 2001. Relatório Científico à FAPESP (anexo) - proc. No. 00/05296-5. Jan. 2001.

NASCIMENTO, M.R.L.; MOZETO, A.A. Valores de referência para metais pesados e contaminação em sedimentos fluviais e lacustres na bacia do rio Tietê. In: WORKSHOP DE AVALIAÇÃO - PROJETO QUALISED, 1. Abr. 2001, São Carlos: **Artigos...**: UFSCar, 2001. p. 29-33. Disponível em: <http://lavoisier.dq.ufscar.br/Labs/biogeoquimica/qualised.htm> Acessado em: 9 abr. 2003.

NASCIMENTO, M.R.L.; MOZETO, A. A. Valores de referência para metais pesados. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE QUÍMICA, 25, maio 2002, Poços de Caldas. **Livro de resumos...**São Paulo: SBQ, 2002.

OLIVEIRA, M.G.B. **Estudo dos processos erosivos e avaliação da produção de sedimentos na bacia hidrográfica da Pampulha**. 1996. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio

Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 1996.

OLIVEIRA, M.G.B.; BAPTISTA, M.B. Análise da evolução temporal da produção de sedimentos na bacia hidrográfica da Pampulha e avaliação do assoreamento do reservatório. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 12, Vitória.. **Anais....** Vitória: ABRH, 1997.

PEIXOTO, C.M; JACOMINO, V.M.F. **Relatório de apresentação e análise dos resultados analíticos provenientes da operação do Programa de monitoramento ambiental do CDTN, 01/1986 a 06/2001.** Belo Horizonte: CDTN/CNEN, 2001. (CDTN- NI-CT6-001/01)

PEIXOTO, C.M; JACOMINO, V.M.F. **Relatório de avaliação dos resultados analíticos do Programa de monitoramento ambiental do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, 2002.** Belo Horizonte: CDTN, 2003. (Publicação CDTN-932)

PINTO COELHO, R.M. **Monitoramento do reservatório da Pampulha** - terceiro relatório trimestral. Belo Horizonte: PBH - FUNDEP - UFMG, 2001. p. 2-45.

PINTO COELHO, R.M.; GRECO, M.K.B. Teores de metais pesados em organismos Zooplânticos e na Macrófita *Eichhornia crassipes* no reservatório da Pampulha, Belo Horizonte, MG. **Água em Revista**, n. 10, p. 64-69, 1998.

PINTO, G.G. *et al.* Estudios sedimentológicos en la región de la bahía de Montevideo, con el empleo de técnicas nucleares y trazadores radiactivos y fluorescentes. In: ENCONTRO DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS, 3, 1998, Belo Horizonte. **Anais....** Belo Horizonte: ABRH, 1998.

PLATA-BEDMAR, A. **Isótopos en hidrología.** Madrid: Alhambra, 1972.

PLATA-BEDMAR, A. **Manual de fugas en embalses.** Madrid: CEDEX, 1999.

PREFEITURA MUNICIPAL DE BELO HORIZONTE; COMPANHIA MINEIRA DE METAIS. **Projeto básico de contenção, remoção e disposição final de sedimentos da lagoa da Pampulha.** Belo Horizonte: PBH, 1994.

PROJETO GEF - São Francisco. Do velho ao novo Chico. Uma discussão dos problemas e soluções hidroambientais para o baixo São Francisco e a foz. In: WORKSHOP DE DIVULGAÇÃO DOS RESULTADOS DO PROJETO GEF-SÃO FRANCISCO. Nov. 2002, Propriá. **Palestras...**São Cristóvão: UFS, 2002.

QUALISED. Disponível em: <http://lavoisier.dq.ufscar.br/Labs/biogeoquimica/qualified.htm>  
Acessado em: 9 abr. 2003.

RADIOLOGICAL HEALTH HANDBOOK. U.S. Department of Health, Education and Welfare - Public Health Service. Washington D.C. : USGPO, 1960.

ROBINSON, H.D.; GRONOW, J.R. Tritium levels in leachate from domestic wastes in landfill sites. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM CISA, 5, Cagliari. **Proceedings...** Cagliari: CISA, 1995.

RTAL International plc. Disponível em: <http://www.rtalinternational.com>. Acessado em: 19 out. 2002.

RUTHERFORD, J.C. **River mixing**. Chichester: J. Wiley, 1994.

SALIM, L.H. et al. Nuclear techniques in planning and controlling dredging works in São Marcos bay Maranhão - Brazil. In: CONFERENCIA INTERNACIONAL EM ENGENHARIA COSTEIRA E PORTUÁRIA EM PAÍSES EM DESENVOLVIMENTO, 4, 1995, Rio de Janeiro. **Anais...**Rio de Janeiro: COPEDEC, 1995.

SALIM, L.H.; *et al.* **Levantamento eco-batimétrico da lagoa da Pampulha - setembro/1999**. Belo Horizonte: CDTN/CNEN, 2000. (CDTN-RC-CT7-002/2000).

SALIM, L.H. **Programa de computador para calibração de modelo de dispersão longitudinal com dados de campo e cálculo de propagação de concentração para jusante**. Belo Horizonte: CDTN/CNEN, 2003. Comunicação Pessoal.

SANDLER, M.P. *et al.* **Diagnostic nuclear medicine**. 3 ed. Baltimore: Williams & Wilkins, 1996. v.1



SCHWOCHAU, K. The present status of technetium chemistry. **Radiochimica Acta**, v. 32, p.139-152, 1983.

SEKINE, T., *et al.* Complexation of technetium with humic acid. **Radiochimica Acta**, v. 63, p.87-90, 1993.

SENA, M.M., *et al.* Avaliação do uso de métodos quimiométricos em análise de solos. **Química Nova**, v. 23, n.4, p.547-556, 2000.

SILVA, A.B, *et al.* **Estudos geológicos, hidrogeológicos, geotécnicos e geoambientais integrados no município de Belo Horizonte**: relatório final. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 1995.

SINGH, S.K.; BECK, M.B. Dispersion coefficient of streams from tracer experimental data. **Journal of Environmental Engineering**, v. 129, n.6, p.539-546, June 2003.

SOUSA, H.A. **Estudo da contaminação ambiental do aterro sanitário da BR 040, da Prefeitura Municipal de Belo Horizonte. 1998.** Dissertação ( Mestrado) - Departamento de Geologia , Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 1998.

STIGTER, C. *et al.* **Sedimentation control of reservoirs** - guidelines - Report prepared by a Working Group of the International Committee on Sedimentation of Reservoirs. 1989.

SUIJLEN, J.M.; BUYSE, J.J. Potentials of photolytic rhodamine WT as a large-scale water tracer assessed in a long-term experiment in the Loosdrecht lakes. **Limnol. Oceanogr.**, v.39, n.6, 1994, p.1411-1423.

SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DA CAPITAL. **Condições hidrológicas da bacia hidrográfica da Represa da Pampulha**. Belo Horizonte: SUDECAP, 1985. 178p.

SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DA CAPITAL. **Projeto de canalização do canal da ilha I**. Belo Horizonte: SUDECAP, 1988.

SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DA CAPITAL. **Anteprojeto de recuperação da Represa da Pampulha**. Belo Horizonte: SUDECAP, 1989.

SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DA CAPITAL. **Desassoreamento da lagoa da Pampulha - Fase B. Disposição final do material dragado. Levantamento de possíveis áreas para disposição final de material dragado isento de lixo.** Belo Horizonte: SUDECAP, 1996.

SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DA CAPITAL. **Programa de monitoramento hidrossedimentométrico da bacia hidrográfica da Pampulha.** Belo Horizonte: SUDECAP, 1999.

SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DA CAPITAL. **Plano diretor de drenagem de Belo Horizonte - primeira etapa - análise integrada do sistema de drenagem de Belo Horizonte.** Belo Horizonte: SUDECAP, Magna Engenharia, 2000. v 1.

SYSTAT<sup>®</sup> 7.0 for Windows<sup>®</sup>. **Statistics.** Chicago: SPSS Inc., 1997.

TAYLOR, G.I. The dispersion of matter in turbulent flow through pipe. **Proc. R. Soc. London**, Ser. A, v. A223, p. 446-468, 1954.

THACKSTON, E.L. *et al.* Least squares estimation of mixing coefficients. **Journal of the Sanitary Engineering Division**, 93(2), p.47-58, 1967.

TOLA, F. The use of radioactive tracers in dynamic sedimentology. In: IAEA REGIONAL SEMINAR ON THE USE OF ISOTOPE TECHNIQUES IN WATER RESOURCES DEVELOPMENT, 1980, Athens. **Proceedings...** Vienna: IAEA, 1981.

TOLA, F. *et al.* Study of the evolution of dredged material discharges by means of radioactive tracers. In: SYMPOSIUM ON ISOTOPE TECHNIQUES IN WATER RESOURCES DEVELOPMENT, 1987, Vienna. **Proceedings...** Vienna: IAEA, 1987. P. 663-682.

U.S. ARMY - COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER. **Shore protection manual.** Fort Belvoir, Virginia, USA. 1975.v. 1.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **Integrated Risk Information System (IRIS) database. Appendix A, Reference dose (RfD):** Description and use in health risk assessments. Washington, D.C.: Office of Health and Environmental Assessment, 1986.

VEADO, M.A.R.V. **Application de l'analyse par activation neutronique et la spectrométrie de masse associée à un plasma d'argon pour l'identification et le dosage des éléments métalliques apportés par les rejets miniers dans la rivière das Velhas - Brésil.** 1997. Thèse (Docteur en Sciences) -- U.F.R. Scientifique D'Orsay, Université de Paris-Sud, 1997

VERHAGEN, B.T., *et al.* High level tritium in leachate from landfill sites in Republic of South Africa with emphasis on its distribution and value as an environmental tracer. In: WISA CONFERENCE, 1998, Cape Town. **Proceedings...** Cape Town: WISA, 1998.

VERHAGEN, B.T., *et al.* Tritium in waste as a tracer of landfill leachate in surface and ground water in South Africa. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ISOTOPE TECHNIQUES IN WATER RESOURCES DEVELOPMENT AND MANAGEMENT, 10-14 May 1999, Vienna. **Proceedings...** Vienna: IAEA, 1999. 1 CD-ROM.

VIGNOLI FILHO, O. **Avaliação preliminar do transporte de sedimentos pelo ribeirão Pampulha a jusante da barragem.** Belo Horizonte: [s.n.], 1996. Relatório para a SUDECAP, Belo Horizonte.

VINE, E., WAHL, A.C. The chemical behavior of tracer-level technetium isotopes. **Int. J. Appl. Radiat. Isot.** v.33, p.861-866, 1982.

WESTERN OREGON UNIVERSITY - WOU. Diagrams Used in Redox Chemistry. Disponível em [www.wou.edu/las/physic/ch462/redox.htm](http://www.wou.edu/las/physic/ch462/redox.htm). Acessado em 23 ago. 2004.

WILSON-JR, G. **Étude du transport et de la dispersion des sédiments en tant que processus aléatoires.** 1987. Thèse (Docteur d'Etat en Sciences Physiques) - Université Pierre et Marie Curie. Paris VI. Paris, 1987. 418p.



## **ANEXO 1**

### **Coordenadas UTM (Datum SAD 69) dos pontos de medição**



Pontos	Coordenadas UTM		Pontos	Coordenadas UTM	
	E	N		E	N
<b>Ribeirão Sarandi</b>			<b>Rio das Velhas</b>		
S1 <sup>a, b, c</sup>	598.981	7.797.670	PI3 <sup>d</sup>	617.577	7.809.446
S2 <sup>a, b, c</sup>	600.354	7.799.856	D7 <sup>b, d</sup>	618.565	7.810.665
S3 <sup>a, b, c</sup>	600.997	7.801.654	D8 <sup>b, d</sup>	618.777	7.813.232
S4 <sup>a, b, c</sup>	602.616	7.802.273	D9 <sup>b, d</sup>	617.721	7.815.076
E1 <sup>a, b, c</sup>	604.189	7.803.196	E7 <sup>a, c</sup>	–	–
<b>Ribeirão Ressaca</b>			E7-Ponte <sup>b</sup>	618.754	7.805.694
R1 <sup>*a, b, c</sup>	603.233	7.798.102	<b>Poços</b>		
R1** <sup>b</sup>	603.292	7.798.138	110 <sup>e</sup>	605.037	7.803.101
R2 <sup>a, b, c</sup>	603.838	7.800.063	135 <sup>e</sup>	604.194	7.801.823
R3 <sup>a, b, c</sup>	604.110	7.801.225	160 <sup>e</sup>	603.993	7.800.894
E2 <sup>a, b, c</sup>	604.823	7.802.725	158 <sup>e</sup>	604.109	7.800.928
<b>Represa da Pampulha</b>			173 <sup>e</sup>	603.989	7.800.467
ERPAM <sup>b</sup>	605.025	7.803.649	178 <sup>e</sup>	603.833	7.800.205
L1 <sup>c</sup>	605.911	7.804.949	185 <sup>e</sup>	603.631	7.799.915
L2 <sup>c</sup>	606.101	7.804.902	MC <sup>e</sup>	602.953	7.799.436
L3 <sup>c</sup>	606.306	7.804.857	199 <sup>e</sup>	602.630	7.799.031
L4 <sup>c</sup>	606.773	7.804.573	205 <sup>e</sup>	602.944	7.798.601
L5 <sup>c</sup>	607.423	7.804.480	263 <sup>e</sup>	599.517	7.798.387
L6 <sup>c</sup>	607.903	7.804.750	262 <sup>e</sup>	599.686	7.798.567
L7 <sup>c</sup>	608.058	7.805.294	234 <sup>e</sup>	598.278	7.796.507
SRPAM <sup>b</sup>	608.129	7.805.380	133 <sup>e</sup>	601.487	7.802.026
<b>Ribeirão Mergulhão</b>			P2 – ASP <sup>e</sup>	598.183	7.797.727
E3 <sup>a, b</sup>	607.232	7.803.020	P3 – ASP <sup>e</sup>	598.961	7.797.650
<b>Ribeirão Pampulha</b>			P4 – ASP <sup>e</sup>	598.865	7.797.593
E4-Ponte <sup>a, b, c</sup>	609.542	7.805.123	PSB 1 <sup>e</sup>	603.700	7.797.739
PI1 <sup>d</sup>	610.646	7.804.594	PSB 2 <sup>e</sup>	603.095	7.798.170
D1 <sup>b, d</sup>	611.385	7.804.361	PSB 3 <sup>e</sup>	603.299	7.798.127
D2 <sup>b, d</sup>	611.748	7.803.570	PSB 4 <sup>e</sup>	603.250	7.798.077
<b>Engenho Nogueira<sup>b</sup></b>	–	–	PSB 5 <sup>e</sup>	603.182	7.798.007
<b>Ribeirão da Onça</b>			<b>Outros</b>		
PI2 <sup>b, d</sup>	612.679	7.803.725	Córrego Bitácula <sup>a</sup>	597.441	7.796.118
D3 = E5 <sup>a, b, c, d</sup>	613.591	7.805.139	Chorume – A <sup>b</sup> (Belo Horizonte)	603.434	7.797.732
D4 <sup>b, d</sup>	614.834	7.806.666	Chorume – V <sup>b</sup> (Belo Horizonte)	603.332	7.797.579
D5 <sup>b, d</sup>	615.099	7.808.000	Chorume (Contagem)	598.830	7.797.646
D6 <sup>a, b, c, d</sup>	617.435	7.808.523			

a – coleta de água superficial; b – medição de parâmetros físico-químicos; c – coleta de sedimentos; d – estações de estudos com traçadores; e – coleta de água subterrânea; \* início do Ribeirão Ressaca; \*\* saída de água junto ao início do Ribeirão Ressaca; ERPAM e SRPAM = entrada e saída da Represa da Pampulha; ponto Engenho Nogueira é junto à confluência do córrego com o Ribeirão Pampulha; ponto E7 é no Rio das Velhas, logo antes da foz do Onça; os pontos ASPI 1 a ASPI 4, na área de bota-fora interna na represa (Figura 5.1), não foram posicionados.





## **ANEXO 2**

**Saídas do programa SYSTAT<sup>®</sup> (sedimento de fundo e em suspensão)**



**2.1 - Avaliação das amostras tipo 2 (sedimento de fundo: SDFU)  
Saída do Programa SYSTAT®**

*"Component loadings"*

	<i>CP1</i>	<i>CP2</i>	<i>CP3</i>	<i>CP4</i>
<b>Al</b>	0,697	-0,546	0,284	0,060
<b>Ba</b>	0,888	0,141	-0,105	-0,129
<b>Co</b>	<b>0,983</b>	0,101	-0,082	0,117
<b>Cr</b>	-0,153	0,456	<b>0,791</b>	0,104
<b>Cs</b>	0,921	0,106	0,219	0,040
<b>Cu</b>	-0,005	<b>0,833</b>	-0,260	-0,048
<b>Fe</b>	<b>0,981</b>	0,074	-0,140	0,093
<b>Ga</b>	0,846	0,103	0,214	-0,191
<b>Hg</b>	0,112	<b>-0,772</b>	0,160	0,526
<b>K</b>	<b>0,979</b>	0,113	-0,090	0,117
<b>La</b>	<b>0,985</b>	0,094	-0,097	0,094
<b>Mn</b>	-0,292	0,673	-0,050	-0,040
<b>Na</b>	<b>0,978</b>	0,100	-0,101	0,130
<b>Ni</b>	-0,296	0,513	<b>-0,517</b>	0,537
<b>Pb</b>	<b>-0,744</b>	-0,034	0,102	0,641
<b>Rb</b>	<b>0,951</b>	0,198	0,159	0,120
<b>Sc</b>	<b>0,950</b>	0,194	0,157	0,140
<b>Ti</b>	-0,498	0,440	<b>0,591</b>	0,020
<b>V</b>	0,072	0,471	0,255	0,135
<b>Zn</b>	-0,131	<b>0,802</b>	0,015	0,075

*"Variance Explained by Components"*

<i>CP1</i>	<i>CP2</i>	<i>CP3</i>	<i>CP4</i>
10,495	3,738	1,702	1,169

*"Percent of Total Variance Explained"*

<i>CP1</i>	<i>CP2</i>	<i>CP3</i>	<i>CP4</i>
52,474	18,692	8,508	5,844

Total = 85,51% - Total das 3 primeiras CP's = 79,67%

**2.2 - Avaliação das amostras tipo 3 (sedimento em suspensão: SDSU)  
Saída do Programa SYSTAT**

"Component loadings"

	<i>CP1</i>	<i>CP2</i>	<i>CP3</i>	<i>CP4</i>	<i>CP5</i>	<i>CP6</i>
Al	0,881	-0,210	-0,047	0,193	-0,121	0,154
As	0,467	0,149	-0,252	0,692	-0,127	-0,036
Au	0,385	0,518	0,329	0,091	-0,547	0,253
Ba	<b>0,926</b>	-0,237	0,066	-0,122	0,162	-0,024
Cd	0,355	0,113	<b>0,767</b>	0,084	0,140	-0,054
Ce	0,266	-0,199	0,110	0,832	0,100	-0,166
Cl	0,462	0,308	0,350	-0,125	-0,326	-0,107
Co	<b>0,939</b>	-0,172	0,023	-0,109	0,180	-0,040
Cr	0,141	<b>0,771</b>	0,374	0,062	0,317	0,019
Cs	0,866	0,341	-0,156	-0,213	0,135	-0,040
Cu	0,062	<b>0,916</b>	0,081	0,056	-0,100	0,131
Fe	<b>0,909</b>	-0,278	0,102	-0,123	0,177	-0,010
Ga	0,087	-0,370	-0,147	0,573	0,276	0,406
Hg	0,686	0,017	-0,233	0,018	0,137	-0,573
K	0,391	0,127	<b>-0,603</b>	0,026	0,140	0,477
La	0,718	-0,226	0,058	0,077	-0,503	0,055
Mn	<b>-0,678</b>	0,142	0,296	0,149	0,465	0,114
Na	0,888	-0,186	-0,007	0,188	-0,167	0,178
Ni	-0,072	<b>0,818</b>	-0,059	0,198	0,231	0,081
Pb	0,176	<b>0,817</b>	-0,365	0,045	-0,073	-0,216
Rb	0,871	-0,045	0,063	-0,271	0,163	0,086
Sb	0,474	0,503	0,434	-0,043	0,177	0,302
Sc	0,810	-0,214	0,043	-0,067	0,289	-0,306
Ta	0,270	-0,006	<b>-0,607</b>	-0,355	0,119	0,500
Ti	0,057	0,500	<b>-0,726</b>	0,005	-0,101	-0,185
V	0,102	0,727	<b>-0,548</b>	0,098	0,096	-0,213
Zn	0,175	<b>0,806</b>	0,393	-0,077	0,004	0,065

"Variance Explained by Components"

<i>CP1</i>	<i>CP2</i>	<i>CP3</i>	<i>CP4</i>	<i>CP5</i>	<i>CP6</i>
9,079	5,520	3,297	1,988	1,531	1,501

"Percent of Total Variance Explained"

<i>CP1</i>	<i>CP2</i>	<i>CP3</i>	<i>CP4</i>	<i>CP5</i>	<i>CP6</i>
33,627	20,443	12,210	7,364	5,669	5,558

Total = 84,87% - Total das 3 primeiras CP's = 66,28%