

O uso de técnicas nucleares na otimização das operações de dragagem e nos estudos de seus impactos ambientais físicos

The use of nuclear techniques for the optimisation of dredging operations and physical environmental impact studies

Jefferson V. Bandeira (DSc.)

Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN
Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear - CDTN
Serviço de Meio Ambiente e Técnicas Nucleares - TR-1
jvb@cdtn.br

Lécio H. Salim (MSc.)

Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN
Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear - CDTN
Serviço de Meio Ambiente e Técnicas Nucleares - TR-1
salimlh@cdtn.br

Pedro E. Aun (MSc.)

Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN
Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear - CDTN
Serviço de Meio Ambiente e Técnicas Nucleares - TR-1
pedro.aun@gmail.com

Resumo

As técnicas nucleares têm sido utilizadas, em ambiente aquático, para o estudo do transporte de sedimentos, através de sua marcação com radioisótopos emissores de radiação γ de meia-vida adequada. Outra importante aplicação é o seu uso em fontes seladas para a medição de perfis verticais de densidade de sedimentos finos em reservatórios, áreas portuárias, e na cisterna de dragas auto-transportadoras. Estes tipos de estudos, associados ao conhecimento dos agentes hidrodinâmicos, são ferramentas poderosas para a compreensão e quantificação do transporte de sedimentos e para sua resposta às intervenções antrópicas, otimizando trabalhos de dragagem, a avaliação de locais de despejo e os impactos ambientais físicos do despejo. Possibilitam também calibrar modelos matemáticos do transporte de sedimentos. Um recente aperfeiçoamento para a utilização de traçadores radioativos na marcação de sedimentos finos foi o desenvolvimento da metodologia para utilização do ^{99m}Tc , amplamente utilizado em Medicina Nuclear.

Palavras-Chave: Técnicas nucleares, transporte de sedimentos, otimização de dragagem, impactos ambientais físicos, calibração de modelos matemáticos

Abstract

Nuclear techniques are being used, in aquatic environment, for studying sediment transport, through its labelling with γ emitters radioactive tracers of suitable half-life. Another important application is its use in sealed sources for measuring vertical density profiles of fine sediments in reservoirs, harbour areas, and in the well of trailing suction hopper dredgers (TSHD). These kinds of studies associated with the knowledge of the hydrodynamic agents, are powerful tools for the understanding and quantification of the sediment transport and also for its response to human interventions, allowing the optimization of dredging works, the evaluation of dumping sites and the physical environmental impacts of the dumping. They also allow the calibration of mathematical models of sediment transport. A recent improvement for the utilisation of radioactive tracers in labelling fine sediment was the development of the methodology for the use of ^{99m}Tc , broadly applied in Nuclear Medicine.

Key-Words: Nuclear techniques, sediment transport, dredging optimization, physical environmental impacts, calibration of mathematical models.

1 - Introdução

1.1 Traçadores artificiais

Ao se lidar com vários aspectos do comportamento de sedimentos em ambiente aquático os traçadores são, geralmente, uma abordagem pragmática a muitas questões de engenharia e ambientais. Eles fornecem resposta para as interações de longo termo entre o sedimento e os escoamentos que atuam sobre ele, pois são capazes de integrar todas as ações experimentadas pelo sedimento durante o período de observação.

Traçadores radioativos (emissores de radiação γ) de meia-vida adequada são usados para estudos do movimento de sedimentos em rios, estuários, baías e em costa aberta (AUN & BANDEIRA, 1995). Os passos para estes estudos são: marcação do sedimento; injeção; detecção e análise dos resultados.

Os traçadores radioativos possuem a vantagem da versatilidade: eles podem ser utilizados na marcação e estudos do transporte de cascalho, areia e sedimento fino (silte e argila). Além disso, eles possibilitam a detecção *in situ* do material, o que significa que o mapeamento da nuvem de traçador é sempre feito com “olhos abertos”, uma grande ajuda no planejamento da estratégia da detecção. A detecção *in situ* é realizada por meio de detectores de cintilação rebocados por embarcações posicionadas (detecção lagrangeana), sendo estes arrastados junto ao fundo acoplados a trenós para detecção do transporte de areia no fundo, ou transportados em profundidades adequadas para detecção de sedimento fino em suspensão (TOLA, 1981; AUN & BANDEIRA, 1995). Para cursos d'água estreitos, os detectores podem ser pendurados em pontes ou hastes (detecção euleriana) (BANDEIRA, 2004). O problema em relação aos traçadores não radioativos (fluorescentes e ativáveis), é a detecção “cega”, feita pela amostragem e subsequente análise em laboratório, o que significa que realimentação (*feedback*) não é recebida enquanto se procede à detecção no campo.

São necessárias apenas algumas gramas do radioisótopo para marcar uma considerável massa de sedimento fino (e.g. 2 gr de ^{198}Au podem ser suficientes para marcar a carga de uma draga auto-transportadora de 4000 m³ de capacidade na cisterna). O traçador radioativo é o

único adequado para a marcação confiável de sedimento fino e proporciona o mesmo comportamento, em condições hidrodinâmicas, do sedimento marcado e não marcado (BOUGAULT, 1970; BANDEIRA *et al.*, 2002).

A escala de tempo do experimento determina o tipo de radioisótopo a ser empregado: radioisótopos de meia-vida curta para pequenas escalas de tempo (e.g. estudo do transporte de sedimento em suspensão) e o oposto para grandes escalas de tempo (e.g. transporte lento de areia no fundo).

Um recente aperfeiçoamento para a utilização de radioisótopos na marcação de sedimento fino foi o desenvolvimento da metodologia para o uso do ^{99m}Tc (tecnécio meta-estável) (BANDEIRA *et al.* 1999a, 1999b, 2002; BANDEIRA 2001, 2004), largamente utilizado em Medicina Nuclear (SANDLER *et al.* 1996). A utilização do ^{99m}Tc para a marcação de sedimento fino e sua aplicação em estudos de Sedimentologia Dinâmica, é muito interessante devido à sua curta meia-vida ($T_{1/2} = 6,02$ horas); baixa energia da radiação γ emitida (0,14 MeV) e disponibilidade mesmo em locais onde não existem instalações nucleares. Assim, o ^{99m}Tc foi utilizado para estudar o comportamento físico (advecção, dispersão, taxa sedimentação) e os correspondentes impactos ambientais físicos (aumento da concentração e possibilidade de deposição) do sedimento fino dragado na assoreada Represa da Pampulha, em Belo Horizonte, caso ele seja despejado nos cursos d'água a jusante da barragem (BANDEIRA, 2004).

Espera-se que o ^{99m}Tc , com a sua nova utilização para a marcação de sedimento fino, possa ser utilizado em estudos em ambientes estuarinos e costeiros, como aqueles já efetuados usando o ^{198}Au (AUN & BANDEIRA, 1995), alguns dos quais abordados no Item 3 (Casos-estudo) desse artigo.

1.2 Sondas nucleares para a determinação da densidade volumétrica de sedimentos finos depositados

A absorção (efeito fotoelétrico) e espalhamento (efeito Compton) da radiação eletromagnética (X ou γ) emitida por uma fonte radioativa artificial são funções da concentração ou da densidade volumétrica da mistura sedimento-água. Dessa forma é possível construir sondas nucleares baseadas nesses princípios, desde que o sistema seja calibrado para concentrações conhecidas. As sondas usam fontes seladas e detetores de cintilação. As sondas baseadas no efeito fotoelétrico e Compton são, respectivamente, as sondas de transmissão e de retroespalhamento (figuras 1a e 1b). Elas são normalmente equipadas com sensores de pressão e inclinômetros, para a unidade que opera na água, e são usados sistemas de medições pontuais sendo baixadas, por intermédio de um cabo, para enterrar no solo macio por gravidade. Dessa forma, perfis de densidade volumétrica entre 1,0 e 1,5 ton/m³ podem ser determinados.

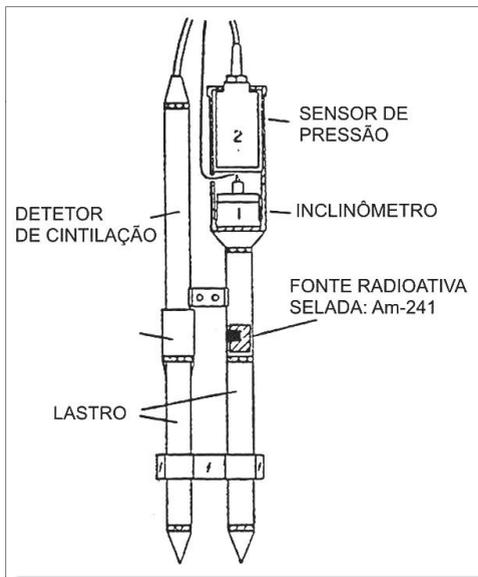


Figura 1a. Sonda de transmissão
Fonte: Salim et al. [19]

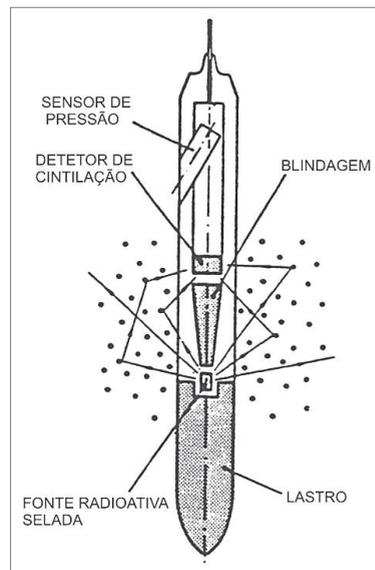


Figura 1b. Sonda de retroespalhamento
Fonte: Meyer et al. [16]

2 Usos práticos de traçadores artificiais e sondas nucleares

2.1 Transporte de areia no fundo

Estudos do transporte de sedimento de fundo apresentam diferentes graus de importância em função do ambiente nos quais eles são efetuados. No caso de estuários e costa aberta este conhecimento é muito importante: para a monitoração da sedimentação, por areia, em áreas dragadas existentes (e.g. canais de acesso) ou para a previsão de manutenção em áreas a serem futuramente dragadas; para projetos de transposição de sedimentos; para a construção de estruturas costeiras e para alimentação artificial de praias; para a escavação temporária, abaixo das profundidades naturais, para o enterramento de tubulações e cabos.

Uma descrição detalhada da metodologia utilizada no estudo do transporte de areia no fundo, aplicando traçadores radioativos, pode ser vista em SAUSAY (1967), TOLA (1981) e AUN & MENDES (1992).

2.2 Transporte de sedimento fino em suspensão

O estudo da dinâmica de sedimento fino em suspensão é de interesse na otimização de locais de despejo para material dragado (o local mais próximo ambientalmente aceitável para o despejo) e em problemas de poluição hídrica. Em tais casos, deve-se conhecer como um dado poluente adsorvido ao sedimento fino ou o próprio sedimento é dispersado. Os resultados mais importantes obtidos com tais experimentos, são: o trajeto do material produzido pelas correntes; a velocidade média de transporte; os coeficientes de dispersão turbulenta que caracterizam a dispersão do sedimento pelo corpo hídrico; a diluição do sedimento (concentração máxima em função do tempo); a taxa de sedimentação e a área principal sobre a qual o sedimento é depositado.

A metodologia para o estudo do sedimento fino em suspensão utilizando traçadores radioativos pode ser consultada em CAILLOT (1978), TOLA (1981) e AUN & MENDES (1992). Os resultados quantitativos obtidos com a aplicação de traçadores radioativos, para o transporte de sedimentos de fundo e em suspensão, permitem calibrar modelos matemáticos para diferentes aspectos do movimento do sedimento e condições hidrodinâmicas conhecidas.

2.3 Sondas nucleares para a medição de densidade volumétrica

As sondas nucleares podem ser empregadas para medir a densidade volumétrica em perfis verticais de sedimentos finos depositados em reservatórios; em regiões estuarinas e costeiras: canais de acesso, bacias de evolução e berços de atracação em portos, e também em cisternas de dragas e de batelões.

Em portos sujeitos à forte deposição de sedimento fino, tais como: Rotterdam na Holanda e Zeebrugge na Bélgica, e em alguns portos da América do Sul: Alumar-MA, Rio Grande-RS, Santos-SP e Vitória-ES, no Brasil, Buenos Aires, na Argentina e Montevidéu, no Uruguai, e também na Indonésia, dentre outros, existe, em certas partes, uma camada de baixa densidade acima do sedimento mais consolidado, conhecida como lama fluida (“fluid mud”), a qual pode alcançar vários metros. A interface entre a camada de lama fluida e a água acima é detetada pelo ecobatímetro de 210 kHz de frequência, utilizado normalmente para a determinação de profundidades náuticas. Foi demonstrado, através da manobra de navios e estudos em modelo reduzido, em laboratório, que a camada de lama fluida não representa obstáculo para a navegação, desde que a densidade volumétrica seja igual ou inferior a 1,2 ton/m³ (Figura 2). Desse modo, desde a década de 70, sondas radioativas têm sido operadas nos canais do porto de Rotterdam, conjuntamente com sondagens ecobatimétricas, permitindo a confecção de cartas náuticas contendo as batimétricas para a densidade de 1,2 ton/m³. Elas são usadas para a navegação (adição da camada de lama fluida à folga sobre a quilha “*keel clearance*”) e para melhorar a eficiência de dragagem (posicionar o tubo de sucção da draga abaixo da camada de lama fluida, quando se draga, succionando material mais denso).

Entre 1983 e 1994, uma sonda de transmissão (Figura 1a), desenvolvida na CNEN/CDTN, em Belo Horizonte, foi utilizada no canal de acesso ao Porto da Alumar, MA, e em sua bacia de evolução e berço de atracação (Figura 2), e também na cisterna de uma draga autotransportadora, com bons resultados técnicos e econômicos (SALIM *et al.* 1983-1994). Este último uso permite avaliar a eficiência de carregamento de uma prática particular de dragagem (Figura 3). Nesta figura são mostradas curvas de carregamento da draga, de acordo com a porcentagem de areia dragada, relativamente à quantidade total de areia, silte e argila. Para um determinado tempo de viagem e despejo do material dragado (mesma região dragada e mesmo local de despejo), e para cada curva de carregamento, corresponde um tempo ótimo de dragagem com desborde (“*overflow*”) ($t_3 - t_2$), de modo a se obter o tempo ótimo do ciclo de dragagem (tangente à curva específica de carregamento). Estudos de sedimento em suspensão marcando a carga total de dragas autotransportadoras ou de batelões (ver Casos-estudo - Item 3) podem promover a otimização de locais de despejo com a conseqüente redução do tempo de viagem e despejo do material dragado, diminuindo, ainda mais, o ciclo e aumentando a eficiência de dragagem (Figura 3).

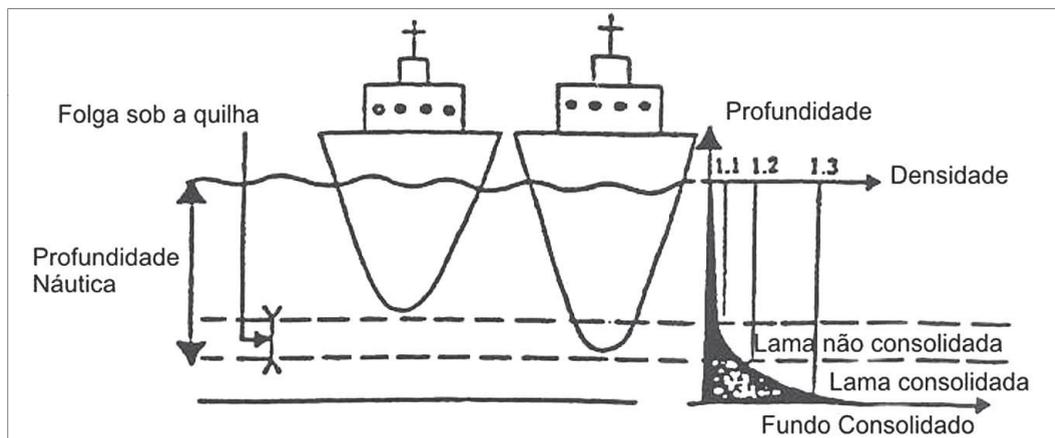


Figura 2 – Esquema da folga sob a quilha. Fonte: Caillot et al [14]

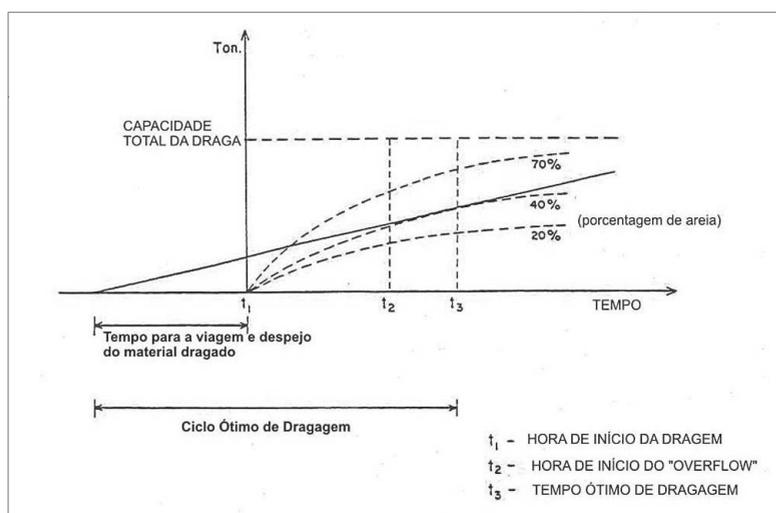


Figura 3

Ciclo de dragagem - draga autotransportadora. Fonte: DE HEER [15]

3 - Casos-estudo

3.1 Baía de Santos, Santos, SP

Estudos efetuados na região da Baía de Santos, em 1973/74 (AUN & BANDEIRA, 1974) tiveram o objetivo de tentar reduzir a distância da região de dragagem ao local de despejo. No primeiro estudo, marcando-se a carga total de batelões (600 m³ de capacidade) com ¹⁹⁸Au, foi determinado que a área de despejo utilizada, próxima à Ponta de Itaipú (Figura 4), era inadequada, pois o material retornava, pela ação da circulação hidrodinâmica, ao sistema baía-estuário. Um novo local de despejo foi escolhido, próximo à Ilha da Moela, fora da baía e a E da mesma. Sua utilização, logo após os estudos, resultou em sensível redução dos custos de dragagem. Em 1985, outro local de despejo, também a E da entrada da baía, próximo à Ponta da Munduba foi definido (Figura 4), com o objetivo de reduzir, ainda mais, a distância de transporte (BOMTEMPO *et al.*, 1986). Novamente, a técnica utilizada foi a marcação, com ¹⁹⁸Au, do material dragado transportado por batelões. O novo local foi utilizado a partir de 1986.

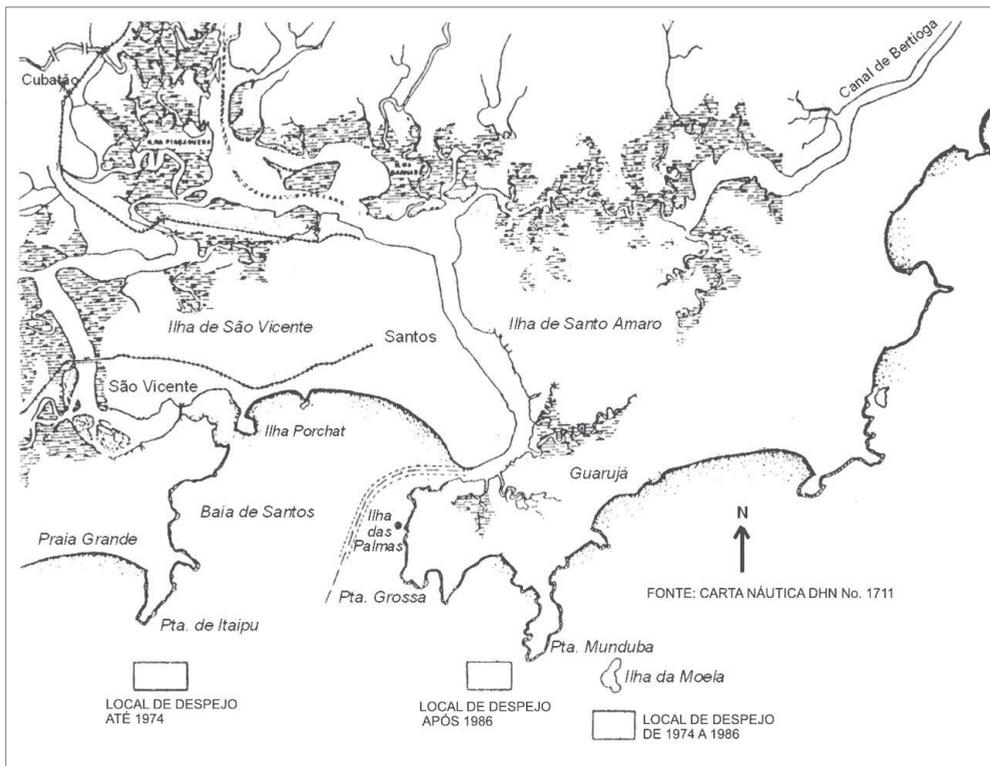


Figura 4 – Mapa da baía e estuário de Santos. Fonte: Adaptado de AUN & BANDEIRA (1995).

Medições hidráulicas e experimentos com traçadores realizados em 1980/81 (BANDEIRA *et al.*, 1981), foram efetuados para estudar o comportamento da areia fina de fundo que é encontrada em algumas regiões da Baía de Santos, tendo em vista utilizar os resultados em modelos físicos de fundo móvel. Seis injeções foram efetuadas: três no inverno de 1980 e três no verão de 1981 (Figura 5). Tanto em regime de verão quanto de inverno, o sedimento de fundo tem movimento resultante em direção à praia, sendo mais intenso em condições de inverno. A taxa de transporte foi quantificada em ambos os regimes (Tabela 1). Os mais importantes agentes hidrodinâmicos responsáveis por este movimento são as ondas, associadas às correntes de maré no interior da baía, sendo a direção de movimento compatível com a direção principal de incidência das ondas. Este caso-estudo mostra quão poderosos os traçadores radioativos podem ser nas respostas a questões sobre o movimento de sedimento de fundo e em suspensão, desde que se disponha de um bom conhecimento das condições hidrodinâmicas do local em estudo.

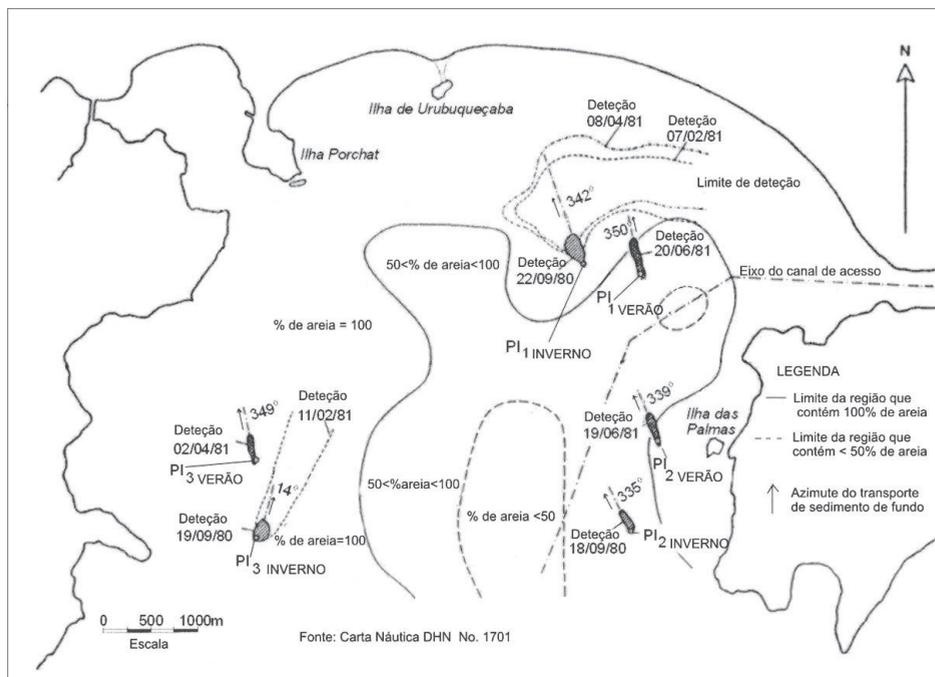


Figura 5 – Baía de Santos: Pontos de injeção de traçador (PI). Nuvens próximo dos PI são relacionadas à última detecção realizada. Fonte: Adaptado de AUN & BANDEIRA (1995).

Tabela 1 - Principais resultados obtidos com os estudos do transporte de areia no fundo, na Baía de Santos.

Pontos de injeção (Figura 5)	Intervalo de tempo considerado	Profundidade relativa ao zero hidrográfico (m)	Transporte sedimento de fundo (kg/m/dia)	Azimute do eixo da nuvem de transporte
PI1 INVERNO	03/08/80 a 22/09/80	7,9	270	342*
PI2 INVERNO	08/08/80 a 18/09/80	12,3	350	335*
PI3 INVERNO	06/08/80 a 19/09/80	10,0	200	14*
PI1 VERÃO	09/02/81 a 08/04/81	7,6	10	350*
PI1 VERÃO	08/04/81 a 20/06/81	7,6	20	350*
PI2 VERÃO	21/02/81 a 07/04/81	10,9	40	339*
PI2 VERÃO	07/04/81 a 19/06/81	10,9	40	339*
PI3 VERÃO	19/02/81 a 02/04/81	9,3	10	349*

3.2 Porto da Alumar, São Luis, MA

O Porto da Alumar (Figura 6) foi construído para servir uma fábrica de alumínio instalada próximo à São Luis, MA. O canal de acesso no Estreito dos Coqueiros, que liga o terminal portuário à Baía de São Marcos, a bacia de evolução e o berço de atracação foram dragados em uma região entre duas ilhas: Tauá Mirim e São Luis. As correntes na região são principalmente influenciadas pela maré e podem alcançar valores acima de 2,0 m/s durante a maré de sizígia, a qual é semi-diurna, com amplitudes de cerca de 7,0 m, em sizígia. O sedimento constituinte do fundo, na Baía de São Marcos, é sobretudo areia.

Devido à alta concentração natural de sedimento em suspensão (cerca de 600 mg/L), constituído sobretudo de silte e argila, uma forte sedimentação ocorre nas regiões artificialmente alargadas e aprofundadas pela dragagem de estabelecimento (“*capital dredging*”) do porto. Desse modo, o sedimento fino é o principal material da dragagem de manutenção, exceto quando certas partes do canal de acesso, próximas à Baía de São Marcos são dragadas. Profundidades naturais são mantidas nessa baía devido às altas intensidades de corrente de maré, sendo a baía a região adequada para o despejo do material dragado.

Tendo em vista otimizar os trabalhos de dragagem, foram realizados vários estudos empregando técnicas nucleares juntamente com medições hidráulicas. A marcação da carga total de sedimento fino transportado na cisterna de dragas auto-transportadoras mostrou que as condições de dispersão do material dragado e despejado na Baía de São Marcos foram muito favoráveis (MOREIRA & BANDEIRA, 1984a). Muito pouco do material fino descarregado pela draga e que atingiu o fundo, devido ao *momentum* vertical descendente associado à maior densidade do material da cisterna, permaneceu nele, tendo sido ressuspensionado pelas altas correntes existentes na baía. Além disso, a concentração do sedimento descarregado que continuou em suspensão logo alcançou o nível de concentração natural presente na baía. Em consequência, o local de despejo escolhido pôde ser mudado para uma área mais próxima da entrada do Estreito dos Coqueiros, tendo-se o cuidado de evitar o despejo logo antes ou depois da inversão da maré, ocasião em que as correntes são relativamente fracas.

Outros estudos foram realizados na região portuária (MOREIRA & BANDEIRA, 1984b) na tentativa de se implantar uma espécie de dragagem de agitação nessa área, onde é acentuada a deposição de sedimento fino. Nesse caso, o comportamento do despejo de dragagem depende da posição do local de despejo e da fase da maré.

Seis injeções de sedimento fino em suspensão marcado com ^{198}Au foram efetuadas em diferentes pontos no Estreito dos Coqueiros e na bacia de evolução do porto (Figura 7), possibilitando calcular a velocidade de advecção u , os coeficientes de dispersão longitudinal D_L e transversal D_T , a diluição e a taxa de sedimentação S_R , o tempo necessário para a sedimentação da metade do material em suspensão $T_{1/2}$, e $L_{1/2} = u \cdot T_{1/2}$, para as nuvens de todos os experimentos.

Medições de densidade *in situ*, usando uma sonda nuclear de transmissão desenvolvida na CNEN/CDTN, em Belo Horizonte (Figura 1a), permitiu avaliar a espessura da lama fluida até a densidade volumétrica de 1,3 ton/m³. As variações nessa espessura claramente mostraram uma sedimentação preferencial na bacia de evolução e uma tendência ainda maior de deposição no berço de atracação, na metade da distância entre seu centro e a extremidade leste. Essas medições foram efetuadas, com uma frequência mensal, de 1983 a 1994, para controlar as variações de profundidade e otimizar as operações de dragagem no Porto da Alumar (SALIM *et al.* 1983-1994).

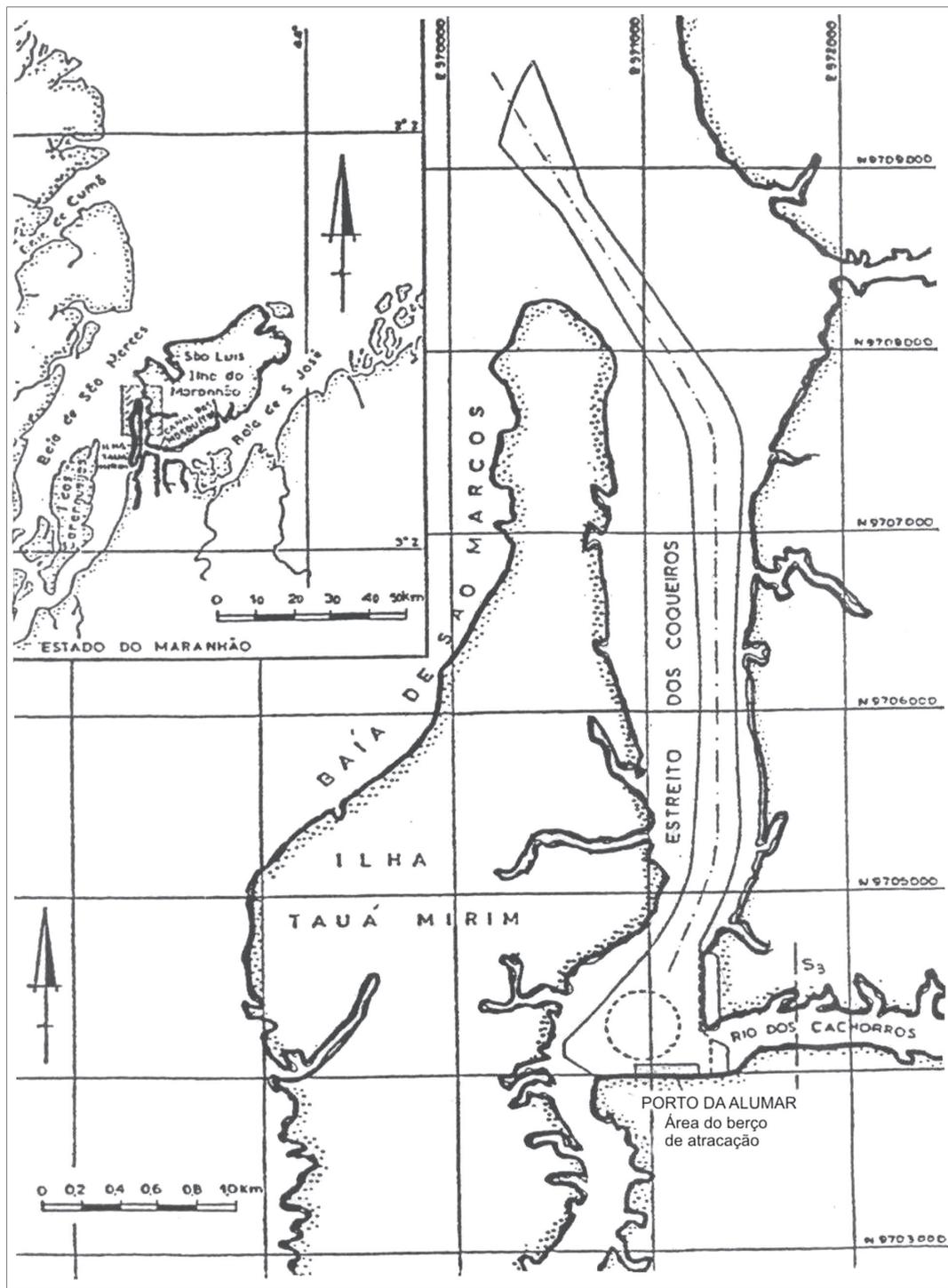


Figura 6 – Mapa de situação, Porto da Alumar. Fonte: Adaptado de AUN & BANDEIRA (1995).

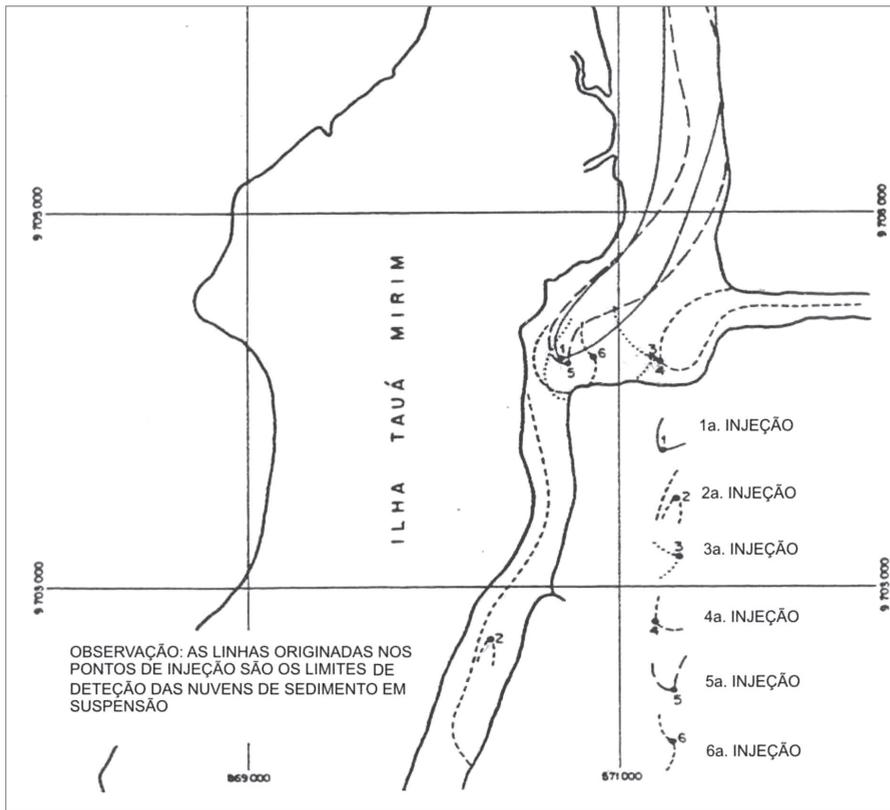


Figura 7
Pontos de injeção do sedimento em suspensão marcado com ^{198}Au .
Fonte: MOREIRA & BANDEIRA (1984b)

A Tabela 2 apresenta os resultados de alguns desses parâmetros, onde os valores dos coeficientes de dispersão foram calculados para o instante $T_{1/2}$.

Tabela 2 – Principais resultados dos estudos do transporte de sedimento em suspensão, no Porto da Alumar, empregando lama marcada com ^{198}Au

Número da Injeção	Sonda	Amplitude da maré (m) e fase	Velocidade média de advecção (m/s)	Dispersão longitudinal D_L (m^2/s)	Taxa de sedimentação S_R (g/ton/s)	$L_{1/2}$ (m)
1	1	6,6 vaz.	0,75	2,15 2,76	431 361	896 1069
	2					
2	1	5,8 ench./vaz.	0,22-0,63	0,88	532 306	290 449
	2					
3	1	3,9 ench.	0,32	0,19 0,10	2289 2257	94 95
	2					
4	1	3,2 ench.	0,38	3,27	233	1123
5	1	3,4 vaz.	0,55	0,10	449 371	794 961
	2					
6	1	5,4 vaz./ench.	0,08-0,28	1,10 2,89	917	68

3.3 Represa da Pampulha, Belo Horizonte, MG

A Represa da Pampulha, em Belo Horizonte, encontra-se em acelerado processo de diminuição de seu volume de reservação e da superfície de água, em virtude de um assoreamento da ordem de 400.000 m³/ano causado, sobretudo, por sedimentação fina (BANDEIRA, 2004). Como o reservatório é localizado em uma área urbana, não há lugar adequado para despejar o material dragado em terra, em uma base permanente. Desse modo, uma interessante possibilidade avaliada foi a da transposição dos sedimentos finos, para os cursos d'água a jusante da barragem, utilizando uma draga hidráulica de sucção e recalque, em um processo conhecido como dragagem de longa distância (DLD). Este seria o caminho natural dos sedimentos na ausência da barragem, e será seu caminho natural no caso do assoreamento completo da represa. A avaliação dos impactos ambientais dessa transposição de sedimentos foi a principal motivação para efetuar os estudos pioneiros de marcação do sedimento fino com ^{99m}Tc (BANDEIRA *et al.* 1999a, 1999b, 2002; BANDEIRA 2001, 2004).

Experimentos de campo, com injeções simultâneas e instantâneas de sedimento fino e água marcados, respectivamente, com ^{99m}Tc e Rodamina WT, foram efetuados em ocasião de seca, época da menor capacidade de hidrotransporte do escoamento, para medir essa capacidade, considerando um trecho de 25 km, desde o Ribeirão Pampulha (Seção PI-1) até a Seção D9 no Rio das Velhas (Figura 8).

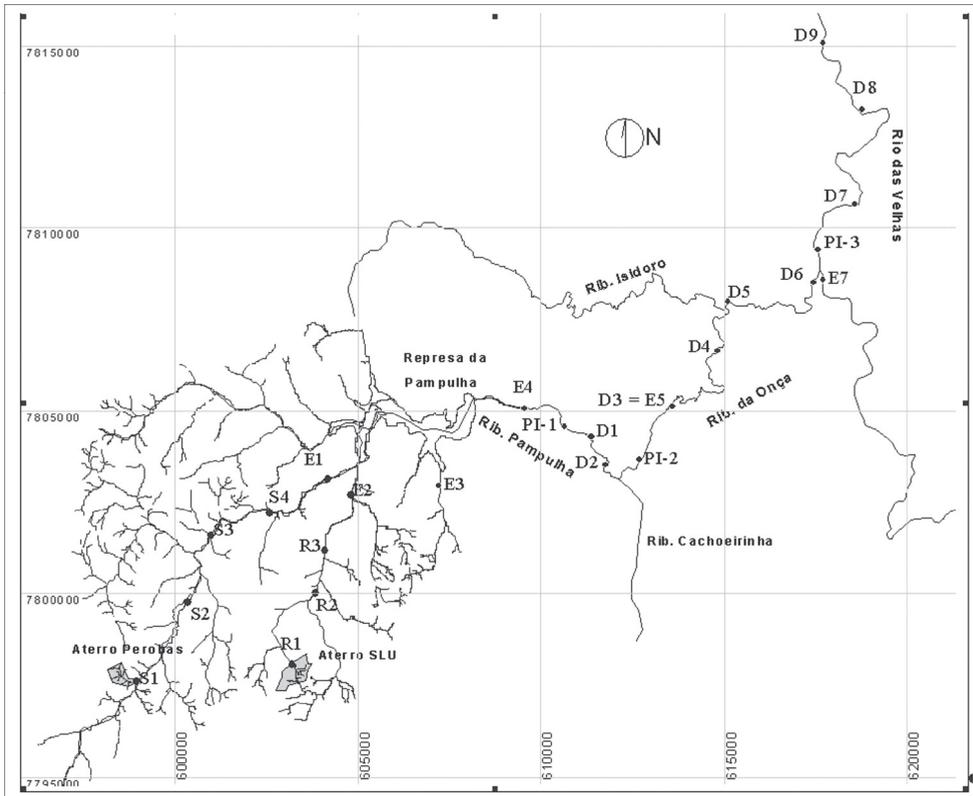


Figura 8 – Mapa de situação da região de estudo. Bacia Hidrográfica da Pampulha e Rio das Velhas. Fonte: BANDEIRA (2004).

Um recente modelo matemático foi calibrado com os dados de campo e aplicado em ocasião de seca, a mais crítica sob o ponto de vista de impactos ambientais físicos: concentração natural geralmente mais baixa e maior chance de sedimentação. Através de técnicas matemáticas de convolução, o despejo continuado de sedimento, utilizando uma draga hidráulica de sucção e recalque, foi simulado (Figura 9), calculando-se os impactos ambientais físicos quanto ao aumento de concentração de sedimento, devido ao despejo, e seu decréscimo pela subsequente diluição, assim como a possibilidade de sedimentação.

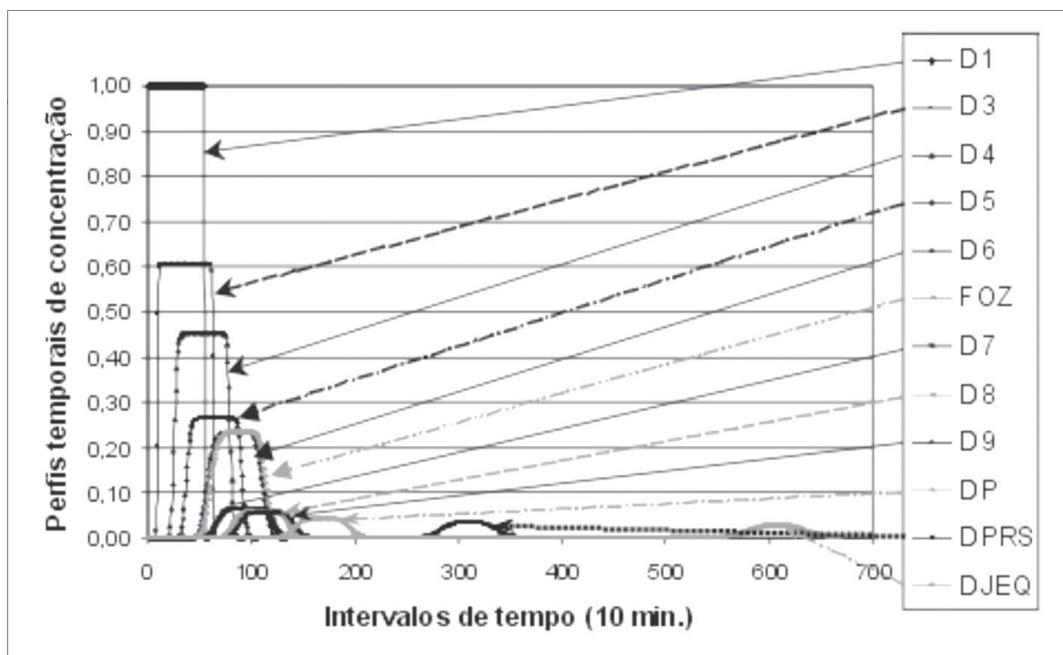


Figura 9 – Variação da concentração a jusante da barragem da Pampulha, em função do despejo de dragagem em D1 (Fig. 8) durante 9 horas. Fonte: BANDEIRA (2004).

Através da medição de parâmetros físico-químicos da água, foi avaliada a possibilidade de dessorção dos metais adsorvidos ao sedimento a ser dragado. Concluiu-se que, quanto aos temas pesquisados, não há impedimento ambiental para o despejo do material fino dragado, nos cursos d'água a jusante.

4 - Conclusões

O uso de traçadores artificiais e sondas nucleares contribuem para a otimização dos trabalhos de dragagem e possibilitam a avaliação de locais de despejo e também dos impactos ambientais físicos decorrentes desse despejo. Além disso, traçadores artificiais permitem a calibração de modelos matemáticos para diferentes aspectos do movimento dos sedimentos.

Como na Medicina Nuclear, em que o ^{99m}Tc e outros traçadores e técnicas nucleares têm possibilitado diagnósticos e tratamentos muito mais precisos e eficientes, auxiliando bastante na compreensão do funcionamento do organismo humano, assim também ele pode ser aplicado para estudos do transporte de sedimentos finos em ambientes continentais, estuarinos e costeiros como os do caso-estudo mostrado na Bacia Hidrográfica da Pampulha, em Belo Ho-

rizonte (BANDEIRA, 2004). Além disso, a concentração da atividade de ^{99m}Tc em aplicações em meio hídrico é da ordem de 10^{-7} das concentrações utilizadas em aplicações médicas. A razão é que, para aplicações médicas, o detetor é colocado fora do paciente enquanto que para usos ambientais o detetor é colocado dentro da água, em uma “Geometria 4π ”, e isto resulta em um enorme ganho em termos de eficiência de contagem.

As aplicações tecnológicas da Energia Nuclear incluindo as inovações, aqui mostradas, são ferramentas fundamentais na avaliação da área a ser afetada e dos impactos ambientais físicos do despejo de dragagem em meio hídrico. Elas podem ser úteis para o aperfeiçoamento da *Resolução CONAMA 344, de 25 março de 2004*, em relação à disposição final do material dragado. Dessa forma, o texto do Art. 2 dessa Resolução, em seu *Inciso III – Disposição final do material dragado*, poderá ser melhor compreendido, caso a caso. Poderão ainda auxiliar no aperfeiçoamento da redação do Art. 7 – *Inciso II* 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*”, e também na revisão da Resolução, prevista em seu Art. 9, para ser efetuada em até cinco anos. Finalmente, poderão ser incluídas na normatização, a cargo do IBAMA, do “...*monitoramento das áreas de dragagem e de disposição...*”, como preconizado no Art. 10.

5 - Referências bibliográficas

AUN, P. E.; BANDEIRA, J. V. Relatório final sobre a viabilidade de novas áreas para despejo do material dragado na região de Santos. Belo Horizonte: IPR, 1974. 2 v.

AUN, P. E. et al. Selection of spoil disposal areas in Brazilian harbours with the aid of tracer techniques. In: COPEDEC INTERNATIONAL CONFERENCE ON COASTAL AND PORT ENGINEERING IN DEVELOPING COUNTRIES, 3, Sept. 1991, Quênia. Proceedings. Mombasa: COPEDEC, 1991. 2 v. v. 2. p. 950-962.

AUN, P. E.; MENDES, V. L. Traçadores radioativos no estudo do movimento de sedimentos. CURSO REGIONAL DE TREINAMENTO NO USO DE TÉCNICAS ISOTÓPICAS EM ESTUDOS AMBIENTAIS DA HIDROSFERA E DA ATMOSFERA, 1992, Piracicaba; Belo Horizonte. Belo Horizonte: IAEA, 1992.

AUN, P. E.; BANDEIRA, J. V. The role of nuclear techniques in sedimentological studies and some applications in Latin America. In: ADVISORY GROUP MEETING ON THE USE OF NUCLEAR TECHNIQUES IN STUDYING SOIL EROSION AND SILTATION, Apr, 1993, Vienna. Proceedings... Vienna: IAEA, 1995. p. 29-97. (IAEA-TECDOC-828).

BANDEIRA J. V. et al. Estudo do comportamento dos sedimentos de fundo na Baía de Santos entre Junho/80 e Junho/81. Belo Horizonte: CDTN, 1981. (Relatório DERL.PD-042/81).

BANDEIRA, J. V. et al. The use of ^{99m}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, May 1999, Vienna. Proceedings... Vienna: IAEA, 1999a. 1 CD-rom.

BANDEIRA, J. V. et al. O uso do ^{99m}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}Tc as an adsorbable tracer for studying the dynamics of fine sediments. Final report. Belo Horizonte: CDTN, 2001. (IAEA Research Contract BRA-10891).
- BANDEIRA, J. V. et al. Development of a technique for using ^{99m}Tc as an adsorbable tracer for hydrodynamic studies of fine sediments in suspension. *Journal of Applied Radiation and Isotopes*, v. 57, p.85-92, 2002.
- BANDEIRA, J. V. Desenvolvimento de técnicas nucleares e correlatas para estudos em hidrologia urbana - aplicações na bacia hidrográfica da Pampulha e no Rio das Velhas, MG. 2004. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.
- BOMTEMPO V. L. et al. Estudos hidráulicos e sedimentológicos para a determinação de novas áreas para despejo de material dragado na baía e no porto de Santos em Junho e Julho, 1985. Belo Horizonte: CDTN, 1986. (Relatório DERL.PD-001/86).
- BOUGAULT, H. Étude de la sorption de quelques radioéléments artificiels par les sédiments péliques en vue de son application au marquage radioactif de ces matériaux. 1970. Thèse (Doctorat) - Faculté des Sciences, Université de Paris, France, 1970.
- CAILLOT, A. et al. Étude au laboratoire et in situ du comportement hydrodynamique des fines particules en suspension, à l'aide de traceurs radioactifs. Belo Horizonte: CDTN, 1978. Technical Co-operation Project BRA/8/018.
- CAILLOT, A. et al. A new nuclear gauge to measure high turbidities in muddy areas. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COASTAL ENGINEERING, 19, 1984, Houston. Proceedings...New York: ASCE, 1984.
- DE HEER, R. INTERNATIONAL COURSE IN HYDRAULIC ENGINEERING, BRANCH: PORT, COASTAL AND OFFSHORE ENGINEERING, 1985/1986. Lecture notes on dredging. Delft: IHE, 1985.
- MEYER, G. et al. Use of nuclear density gauges for studying and measuring silt deposit formation and concentration in the laboratory and in situ. In: SYMPOSIUM ON USE OF ISOTOPES IN HYDROLOGY, 1983, Vienna. Proceedings... Vienna:IAEA, 1984. p. 741-752.
- MOREIRA, R. M.; BANDEIRA, J. V. Estudo do despejo do material da dragagem de manutenção do Porto da Alumar na baía de São Marcos, Maranhão. Belo Horizonte: CDTN, 1984. (Relatório DERL.PD-009/84). (1984a).
- MOREIRA, R. M.; BANDEIRA, J. V. Estudo do despejo do material da dragagem de manutenção do Porto da Alumar no Estreito dos Coqueiros, Maranhão. Belo Horizonte: CDTN, 1984. (Relatório DERL.PD-019/84). (1984b).
- SALIM L. H. et al. Pesquisa do fundo na bacia de evolução e no canal de acesso ao Porto da Alumar - São Luis, Maranhão. Belo Horizonte: CDTN, 1983-1994. Relatórios técnicos do CDTN para ALUMAR.
- SANDLER, M. P. et al. Diagnostic nuclear medicine. 3 ed. Baltimore: Williams & Wilkins, 1996. v.1
- SAUZAY, G. Méthode du bilan des taux de comptages d'Indicateurs radioactifs pour la détermination du débit de charriage des lits sableu. 1967. Thèse (Ingénieur Docteur) - Faculté des Sciences de Toulouse, Toulouse, 1967. (CEA- R- 3431).