

DETERMINAÇÃO DA VAZÃO SÓLIDA POR ARRASTO DE FUNDO NO RIO PARANÁ UTILIZANDO TRAÇADOR RADIOATIVO

Pedro Eiti Aoki, Cyro Teiti Enokihara, Hector Carlos C. Rocca* e André V. Lima Bittencourt**

*Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN-CNEN/SP
Caixa Postal 11049
05422-970, São Paulo, Brasil

**Universidade Federal do Paraná, UFPR
Jardim das Américas
81531-990 - Curitiba, Brasil

RESUMO

A técnica de marcação de areia com traçador radioativo foi utilizada para determinar a vazão sólida por arrasto de fundo no Rio Paraná, nas proximidades da cidade de Guaira, PR. O radioisótopo utilizado foi o ^{198}Au que permitiu realizar medições durante um período de quinze dias, obtendo-se uma vazão sólida média de 914,8 t/dia para uma camada móvel de espessura média de 0,33m e velocidade média de 1,65m/dia.

I. INTRODUÇÃO

O presente trabalho foi executado pelo Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN-CNEN/SP com colaboração da empresa Geologia e Engenharia Ambiental Ltda, sob contrato da Itaipú Binacional, nas proximidades da cidade de Guaira, PR, no local indicado na Figura 1.

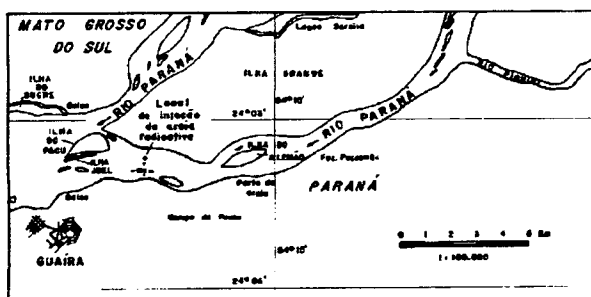


Figura 1 - Mapa de localização do ponto de injeção do traçador.

O conhecimento da magnitude do transporte de sedimentos por um curso de água é de vital importância em muitos estudos tais como projeto de barragem, devido ao assoreamento que produz, e o controle de erosão do solo, que aumenta o material transportado.

A possibilidade de utilizar técnicas radioisotópicas para determinar a vazão sólida de arrasto de fundo em leitos arenosos foi amplamente estudada [1,2,3] e sua aplicação totalmente aceita.

O método consiste em depositar na superfície da camada móvel determinada massa de areia marcada com material radioativo e acompanhar o seu deslocamento por meio de um sistema de detecção de radiações. Com os dados obtidos calculam-se vários parâmetros, tais como: velocidade e direção do movimento, espessura da camada móvel e a vazão sólida.

Como traçador foi escolhido o ^{198}Au que tem meia-vida de 2,693 dias, compatível com a duração do ensaio e que permite repeti-lo após três meses da injeção.

A marcação foi feita em duas etapas: primeiro com prata inativa [4,5] e finalmente a deposição do ouro sobre a prata no local da injeção.

O sistema de detecção consistiu de um espectrômetro monocanal tipo BASC III com uma sonda cintiladora de NaI(Tl) de 2" de diâmetro.

Realizou-se o trabalho no período de quinze dias e obtiveram-se sete configurações da nuvem radioativa.

II. METODOLOGIA

É escolhida uma seção transversal que contenha um trecho de fundo plano com material comprovadamente não coesivo e homogêneo.

Nesta seção, denominada de S_0 , é feita a injeção do traçador radioativo e seu deslocamento é acompanhado por meio de um sistema de detecção de radiações, composto por uma sonda cintiladora gama e por um espectrômetro monocanal, instalado em uma plataforma móvel.

A plataforma, com dimensões de 15m de largura por 6m de comprimento, tem demarcadas duas seções de medições com trinta pontos cada, distantes 4m uma da outra, como mostra a Figura 2.

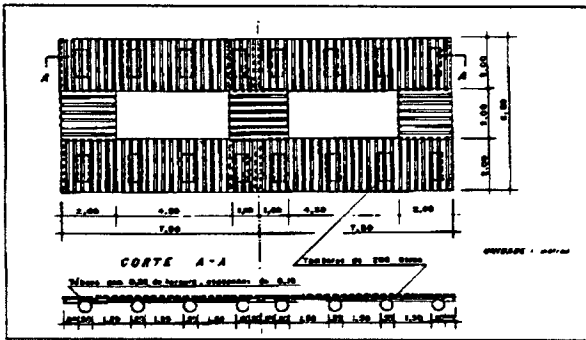


Figura 2 - Plataforma flutuante utilizada no trabalho.

Ela pode ser mantida em qualquer posição, por meio de cabos amarrados em lastros previamente colocados no fundo do rio, à montante. Para auxiliar o posicionamento lateral, utilizam-se lastros laterais que são colocados e removidos de acordo com as necessidades.

Em uma das margens do rio, fixa-se uma série de piquetes, alinhados e distantes entre si oito metros. Estes, começando pelo piquete P_0 , são referências para posicionar a plataforma durante o deslocamento para jusante.

As operações de deslocar, alinhar, e posicionar a plataforma em um piquete, são feitas com auxílio de dois teodolitos: um estacionado no piquete correspondente à seção de medições e outro no último piquete à jusante.

O traçador radioativo consiste de sedimentos previamente retirados da seção transversal e marcados com ^{198}Au . A marcação dos sedimentos é feita em duas etapas:

A primeira realiza-se no laboratório e consiste em fazer um tratamento químico que elimina os produtos orgânicos e deixa o material em boas condições para a deposição da prata. Feito isso, seca-se em estufa e classifica-se de acordo com a granulometria. Em seguida, faz-se a prateação com AgNO_3 em quantidade proporcional à massa de cada uma das frações granulométricas.

A segunda etapa da marcação realiza-se no local da aplicação e consiste em depositar o ouro radioativo sobre os sedimentos. O ouro, inicialmente na forma sólida, é dissolvido com água régia em um becker. Esta solução é diluída com água e a solução resultante adicionam-se os sedimentos para que se inicie o processo de deposição do ouro.

Após a marcação, retira-se uma alíquota, pesando alguns gramas, para calibrar a sonda cintiladora. Divide-se a massa resultante em duas partes, introduz-se uma de

cada vez no injetor e então transporta-se para a plataforma por meio de um barco.

O injetor, mostrado na Figura 3, consiste de um recipiente montado em um suporte e de um dispositivo que mantém o traçador confinado durante o transporte e imersão na água. Quanto ele atinge o fundo, o recipiente muda de posição, sua tampa passa para a parte inferior e se abre, liberando o traçador que é então depositado no fundo do rio.

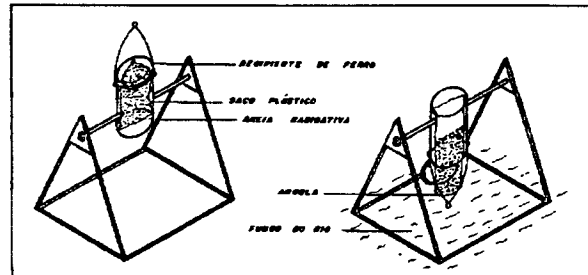


Figura 3 - Dispositivo utilizado para injetar o traçador radioativo.

A partir deste instante, os sedimentos que compõe o traçador se deslocam sob a ação do fluxo da água e iniciam o processo de homogeneização na camada móvel. A distribuição desses sedimentos é normalmente denominada nuvem radioativa.

A equação utilizada para o cálculo da vazão sólida por arrasto de fundo é a seguinte:

$$Q_s = \gamma_s V_m E_m L_m \quad (1)$$

Onde: γ_s = peso específico submerso dos sedimentos; V_m = velocidade média de deslocamento da nuvem radioativa; L_m = largura média da seção transversal do rio e E_m = espessura média da camada móvel.

Determinações dos parâmetros da equação 1. O peso específico γ_s é obtido por meio de ensaios de laboratório, após coleta de amostra na camada móvel; a largura média, L_m , por medição direta; a velocidade média, V_m , é a razão entre o deslocamento relativo da nuvem radioativa e o intervalo de tempo correspondente; a espessura média E_m , é obtida por comparação entre a concentração média da nuvem radioativa e a concentração do radioisótopo, ou do padrão, em um tanque de calibração.

Cálculo da velocidade média V_m . Considerando-se que a velocidade de deslocamento da nuvem radioativa é a mesma da camada móvel de sedimentos, pode-se calcular a velocidade V , pela fórmula seguinte:

$$V = \frac{\Delta X_G}{\Delta t_G} = \frac{X_{G_i} - X_{G_{i-1}}}{t_{G_i} - t_{G_{i-1}}} \text{ (m / dia)} \quad (2)$$

Onde: $X_{G_i} - X_{G_{i-1}}$ = deslocamento da nuvem radioativa (m) e $t_{G_i} - t_{G_{i-1}}$ = intervalo de tempo (dias).

Para n detecções, a velocidade V_m é dada por:

$$V_m = \frac{V_1 + V_2 + \dots + V_n}{n} \text{ (m / dia)} \quad (3)$$

Cálculo da posição do centro de massa da nuvem radioativa, em relação ao ponto de lançamento do traçador. Considera-se inicialmente uma seção qualquer, localizada à distância x_j do ponto de injeção e que cada um de seus trinta pontos está associado a uma detecção em termos de contagem líquida por minuto (cpm).

A massa dessa seção pode ser obtida somando-se todas as áreas dos trapézios formados pelos pontos e contagens líquidas sucessivas:

$$N_j = \frac{(C_{0,0} + C_{0,5})}{2} \Delta y + \frac{(C_{0,5} + C_{1,0})}{2} \Delta y + \dots + \frac{(C_{29,5} + C_{30,0})}{2} \Delta y \text{ (cpm.m)} \quad (4)$$

Onde: N_j (cpm.m) = massa da seção j localizada à distância x_j do ponto de injeção e Δy (m) = distância entre pontos consecutivos de medições, na plataforma.

A posição do centro de massa da nuvem radioativa X_G é dada pela fórmula:

$$X_G = \frac{\sum_{j=0}^{k-2} \left(\frac{N_j + N_{j+2}}{2} \right) * \Delta x * X_{G_j}}{\sum_{j=0}^{k-2} \left(\frac{N_j + N_{j+2}}{2} \right) * \Delta x} \text{ (m)} \quad (5)$$

Onde: $j=(0,2,4, \dots k-2)$ índice das seções de medições; k = última seção de medições; Δx (m) = distância entre seções consecutivas e X_{G_j} (m) = posição do centro de massa da área entre as massas N_j e N_{j+2} das seções j e $j+2$ respectivamente.

Calibração da sonda cintiladora gama. Para a calibração da sonda, deve-se reproduzir a geometria das medições no fundo do rio, em um tanque, com os seguintes pré-requisitos:

- o material, areia, deve ser o mesmo do leito do rio;
- o tanque de calibração deve ter dimensões tais que ocorra o *raio infinito* para o traçador e o detector utilizados;

Roteiro da calibração:

- pesa-se o padrão com sensibilidade mínima de 0,1g;
- colocam-se os sedimentos no tanque, até que a altura seja da ordem de alguns milímetros, instala-se a sonda e enche-se o tanque com água;
- mede-se a contagem de fundo, *BG* ou *background* em quatro posições e calcula-se o valor médio;
- drena-se a água, adiciona-se o padrão e homogeneiza-se;
- posiciona-se a sonda, adiciona-se água e mede-se em quatro posições;
- repetem-se as operações para espessuras variáveis, até cerca de 40cm;
- subtrai-se de cada valor médio obtido, o valor do *background* e em papel monolog, traça-se a curva das contagens líquidas por minuto n (cpm) em função das espessuras da camada de areia, em centímetros, E (cm);
- extrapola-se a curva e define-se para $E = 0$ (cm) o valor $n = n_0$, como sendo a contagem líquida correspondente à camada de sedimentos com espessura tendendo a zero;
- normaliza-se a curva, dividindo-se todos os valores das contagens líquidas por n_0 (cpm). Define-se então, nova curva: fator f em função da espessura E (cm):

$$f = \frac{n}{n_0} = \exp(c * E) \quad (6)$$

Onde: c (cm⁻¹) = coeficiente angular da curva.

- define-se a constante de calibração K , da sonda cintiladora, como sendo:

$$K = \frac{n_0 s}{m} \frac{(\text{cpm}) * (\text{m}^2)}{(\text{g})} \quad (7)$$

Onde: n_0 (cpm) = contagem líquida para a espessura zero; s (m²) = área da superfície do tanque de calibração e m (g) = massa do padrão.

Cálculo da velocidade média. Conhecidas a curva de calibração bem como a constante K para a sonda, dada

pela Eq. (7), pode-se determinar a espessura E , da camada móvel de sedimentos, seguindo-se o roteiro seguinte:

Calcula-se a contagem líquida correspondente à atividade do traçador contida na espessura zero N_0 da nuvem radioativa.

$$N_0 = \frac{K * M}{S} \text{ (cpm)} \quad (8)$$

Onde: M (g) = massa do traçador e S (m^2) = área da nuvem radioativa.

Calcula-se a concentração média real, N_{real} , pela fórmula:

$$N_{real} = \frac{\sum_{j=0}^k N_j \Delta x}{\sum_{j=0}^k S_j} = \frac{\Delta x \sum_{j=0}^k N_j}{S} = \frac{(m)(cpm * m)}{(m^2)} = (cpm) \quad (9)$$

Onde: $\Delta x(m)$ = distância entre duas seções de medições; N_j (cpm.m) = massa da seção transversal, dada pela Eq. (4) e S_j (m^2) = área da nuvem radioativa correspondente à seção j .

Neste ponto, calcula-se o fator f , adimensional:

$$f = \frac{N_{real}}{N_0} = \frac{\frac{\Delta x \sum_{j=0}^k N_j}{S}}{\frac{K * M}{S}} = \frac{\Delta x \sum_{j=0}^k N_j}{K * M} \quad (10)$$

Calcula-se a espessura da camada móvel combinando-se as Equações (6) e (10):

$$\frac{\Delta x \sum_{j=0}^k N_j}{K * M} = \exp(c * E) \quad (11)$$

Portanto:

$$E = \frac{\ln f}{c} \text{ (cm)} \quad (12)$$

Onde: c (cm^{-1}) = coeficiente angular da curva de calibração. Para n detecções, resulta o valor da espessura média E_m :

$$E_m = \frac{E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_n}{n} \text{ (cm)} \quad (13)$$

III. RESULTADOS

Preparou-se o traçador radioativo nas margens do rio Paraná, com 2028,2g de areia e cerca de 1,0Ci de ^{198}Au . Retirou-se o padrão com $m=7,1435g$, utilizado na calibração da sonda cintiladora gama. A massa injetada no dia 10 de fevereiro às 19:30 horas foi de $M=1993,56g$.

Fizeram-se sete detecções da nuvem radioativa, em dias alternados, durante o período de 11 a 25 de fevereiro. A maior nuvem radioativa detectada correspondeu a 58 seções ou 116m de extensão.

A Tabela 1 mostra o resumo dos resultados obtidos, onde constam:

- As massas N_j (cpm.m), de acordo com a Eq.(4).
- A distância entre seções consecutivas é $\Delta x = 4m$;
- A somatória das massas $\sum N_j$ (cpm.m);
- A posição do centro de massa X_G (m);
- O deslocamento relativo ΔX_G (m);
- O tempo, t_G (dias), correspondente ao centro de massa, a partir do dia e hora da injeção;
- O intervalo de tempo Δt_G (dias);
- A velocidade de deslocamento V (m / dia) dada pela Eq. (2).

TABELA 1 - Massas das seções transversais da nuvem radioativa e cálculo das velocidades de deslocamento.

Campa- nhas /	1. 11/2	2a. 15/2	3a. 17/2	4a. 19/2	5a. 21/2	6a. 23/2	7a. 25/2
Resultados							
$\sum N_j$ (cpm.m)	12,3 10 ⁶	10,9 10 ⁶	10,9 10 ⁶	9,9 10 ⁶	10,3 10 ⁶	10,9 10 ⁶	9,3 10 ⁶
X_G (m)	10,3	19,4	21,5	26,7	28,8	31,3	28,5
ΔX_G (m)	10,3	9,1	2,1	5,2	2,1	2,5	-
t_G (dias)	0,7	4,6	6,6	8,6	10,5	12,6	-
Δt_G (dias)	0,7	3,9	2,0	2,0	1,9	2,1	-
$V = \frac{\Delta X_G}{\Delta t_G}$ (m / dia)	V1= 14,7	V2= 2,3	V3= 1,1	V4= 2,6	V5= 1,1	V6= 1,2	-

O resultado da primeira detecção, $V_1 = 14,7(m/dia)$, indica o quanto o traçador foi espalhado pelo fluxo durante a injeção.

A sétima detecção feita no dia 25/2, também não foi considerada nos cálculos, porque o valor da posição do centro de massa resultou inferior ao do anterior.

De acordo com a Eq. (3) a velocidade média V_m é:

$$V_m = \frac{V_2 + V_3 + V_4 + V_5 + V_6}{5} = 1,6 (m/dia)$$

A calibração da sonda cintiladora gama foi feita em um tanque com dimensões 1,2m x 1,2m e área de superfície $s = 1,44m^2$.

A Tabela 2 mostra os resultados da calibração, que se iniciou com a espessura de $E = 0,4cm$ de areia e terminou com $E = 35cm$.

TABELA 2 - Calibração da sonda cintiladora gama.

E (cm)	Δt (h:min)	n' (cpm)	[n' -BG] (cpm)	[n' -BG] Corrigida (cpm)
0,4	41:32	415254	405854	633487
1,2	43:04	381121	371721	589825
1,9	44:32	392612	383212	617695
3,0	45:50	372993	363593	594296
4,4	46:55	323574	314174	519519
6,6	61:35	249224	239824	464096
8,0	63:05	208273	198873	391088
9,4	64:10	194248	184848	367754
11,4	65:19	165886	156486	315189
14,7	66:55	145782	136382	279449
18,0	68:37	122196	112796	235371
21,1	70:02	106518	97118	205757
29,5	136:19	37709	28309	122061
35,0	137:47	32964	23564	103212

n' = Contagem. ; Injeção: 19:13 horas do dia 10/2.

BG = 9400 cpm (Background).

Ajustou-se uma curva tipo exponencial a estes pontos, cuja curva, constante na Figura 4, é expressa como se segue:

$$n(\text{cpm}) = 644337,14 * \exp(-0,05483701 * E) \quad (14)$$

Consequentemente, para a espessura tendendo a zero: $n_0 = 644337,14$ (cpm)

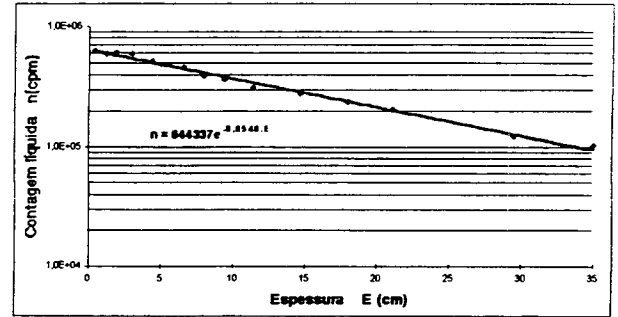


Figura 4 - Curva de calibração da sonda cintiladora gama.

A expressão que fornece o fator f , adimensional, é a seguinte:

$$f = \frac{n}{n_0} = \exp(-0,05483701 * E) \quad (15)$$

A constante de calibração K , da sonda cintiladora gama, dada pela Eq. (7), é igual a:

$$K = \frac{n_0 s}{m} = \frac{644337,14 * 1,44}{7,1435} = 129886,67 \frac{(\text{cpm} \cdot \text{m}^2)}{\text{g}}$$

Conhecidos os valores da distância entre as seções Δx , a constante de calibração K , a massa de traçador M e as massas N_j , constantes na Tabela 1, obtém-se os valores de f para cada campanha de medições.

Por aplicação da Eq. (12) e sabendo-se que o coeficiente angular da curva de calibração é $c = -0,05483701 (cm^{-1})$, calculam-se as espessuras da camada móvel E , mostradas na Tabela 3.

TABELA 3 - Espessura da camada móvel

Campa- nhas / Resultados	2a. 15/2	3a. 17/2	4a. 19/2	5a. 21/2	6a. 23/2
$\sum N_j (\text{cpm} \cdot \text{m})$	10,9 *10 ⁶	10,9 *10 ⁶	9,9 *10 ⁶	10,3 *10 ⁶	10,9 *10 ⁶
f	0,17	0,17	0,15	0,16	0,17
Espessura E (cm)	32,5	32,4	34,1	33,4	32,4

A espessura média da camada móvel é, de acordo com a Eq. (13):

$$E_m = \frac{E_2 + E_3 + E_4 + E_5 + E_6}{5} = 33,0 (cm)$$

Ou $E_m = 0,33m$.

Conhecidos os valores de V_m e E_m , e sabendo-se que $\gamma = 1,65(t/m^3)$ e a largura média $L_m = 1050m$, calcula-se a vazão sólida por arrasto de fundo, pela Eq. (1):

$$Q_s = \gamma_s V_m E_m L_m = 914,8 (t / dia) = 333887(t / ano)$$

As Figuras 5, 6 e 7 mostram o traçador em três fases do seu deslocamento: no início, logo após a injeção do traçador, no meio e na fase final dos trabalhos.

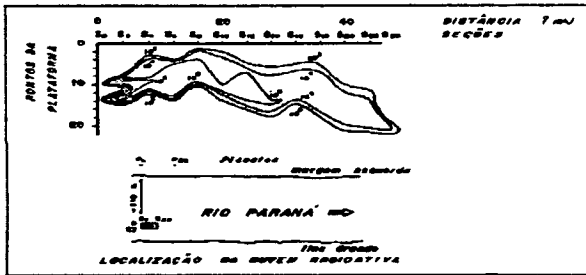


Figura 5 - Curvas de isoconcentração do traçador. Data: 11 de fevereiro.

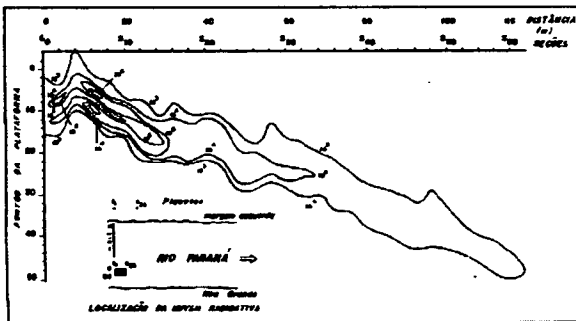


Figura 6 - Curvas de isoconcentração do traçador. Data: 17 de fevereiro.

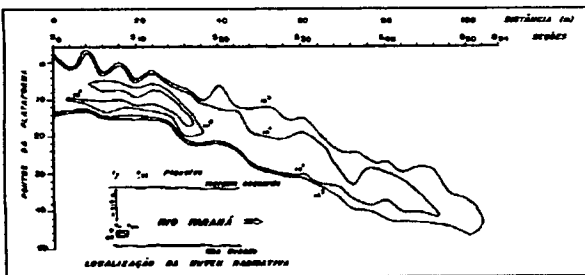


Figura 7 - Curvas de isoconcentração do traçador. Data: 23 de fevereiro.

IV. CONCLUSÕES

A técnica de aplicação de traçador radioativo utilizada neste trabalho, mostrou-se perfeitamente aplicável na prática, pelos seguintes motivos:

1. A atividade do traçador, cerca de 1,0Ci de ^{198}Au , possibilitou boas detecções, com dados suficientes para calcular a velocidade e a espessura da camada móvel;
2. Ausência de qualquer vestígio do traçador quinze dias após o início dos trabalhos, quando as detecções estavam ao nível próximo do *background* ou contagem de fundo;
3. Grande representatividade das medições, por causa da sensibilidade do sistema de detecção;
4. A espessura média da camada móvel, $E_m = 33,0cm$ foi proveniente de cinco determinações perfeitamente coerentes entre si;
5. Pode-se fazer comentário semelhante à respeito da velocidade média $V_m = 1,65 (m / dia)$.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a participação da Física Maria Elisa C.M. Rostelato nas atividades de marcação da areia utilizada como traçador.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CURTOIS, G., Possibilités d'emploi d'un nombre limité de grains radioactifs dans l'étude quantitative de mouvements de sédiments, Int J. Appl. Rad. And Isotopes, vol. 15, p 655-660, 1964.
- [2] SAUZAY, G., Méthode du bilan des taux de comptage d'indicateurs radioactifs pour la détermination du débit de charriage des lits sableux, Commissariat à l'Energie Atomique. (CEA-R-3431), 1968.
- [3] SANCHEZ, W., Contribuição à determinação da vazão sólida de arraste em leitos arenosos utilizando técnicas radioisotópicas. Instituto de Energia Atômica, Tese de Doutorado, São Paulo, 1976.
- [4] PLATA BEDMAR A, Isótopos em hidrologia. Ed Allambra, Madrid, 1972.
- [5] BARO, G.B.; AGUDO, E.G; GOMES, H.R.; ROCCA, H.C.C.R., Trazadores radioactivos en el rio de la Plata. In: Quinto Congreso Argentino de Ingenieria, Buenos Aires, 1966.

ABSTRACT

Radioactive tracing technique with labeled sand was employed to evaluate the bottom sediment drag of Paraná River, near Guaira City, State of Paraná. ^{198}Au radioisotope was used and measurements have been performed for a period of fifteen days. A bed load rate of 914,8 t/day was obtained for a laminar layer of 0,33m mean thickness and 1,65 m/day mean velocity.