

AVALIAÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL NA BACIA AMAZÔNICA ATRAVÉS DO TRANSPORTE DE MATERIAL FLUVIAL

J. Mortati¹, J.-L. Probst², Y. Tardy³

1. Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, Brasil

2. Centre de Géochimie de la Surface, CGS/CNRS, Strasbourg, França

3. ORSTOM-Instituto Francês de Pesquisa Científica para o Desenvolvimento e Cooperação, França; CGS/ULP Institut de Géologie de l'Université Louis Pasteur, França; Instituto Astronômico e Geofísico, e Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Brasil

ABSTRACT

The surface runoff, basically responsible to the total mechanical erosion, was evaluated for Amazon basin in terms of the fluvial transport of dissolved and particulated material. The methodology applied in two sampling stations, Vargem Grande (high Solimões river) and Obidos (low Amazon river), is related to a variable contribution of the reservoirs with constant load in time. The mass balance model was carried out using chemical data of 7 sampling cruises realized by Camrex Project, occurred at different hydrograph stages in the Solimões/Amazon river, in consonance with measured discharge values. The chemical species involved in this model were the dissolved NO_3 , Na, K ($\mu\text{mol/l}$) and the particulates POCC, POCF, FSS, CSS (mg/l). The obtained results showed to be independent of the nature of the chemical species used in the model. The calculated surface runoff value obtained for Obidos station (27,13%) was higher than that calculated for Vargem Grande (23,55%). The total suspended load estimated in the surface runoff waters showed to be depleted toward the mouth of the Amazon river, varying of 1.8 to 0.8 g/l, while the surface runoff coefficient was higher near the mouth than upper station, not considering the Andean influences. These results show the important role exercised by the floodplains in the hydrogeochemical control of the erosion in the Amazon basin.

RESUMO

O escoamento superficial rápido, onde se concentra basicamente toda a erosão mecânica, foi avaliado, para a Bacia Amazônica, através do transporte do próprio material fluvial em suspensão e dissolvido. O método proposto é o de reservatórios de contribuição variável, com composição constante no tempo, o qual foi aplicado em duas estações de amostragem situadas no canal principal do rio Solimões/Amazonas, uma no alto Solimões, Vargem Grande, e outra próximo à foz do rio Amazonas, em Obidos. O modelo de balanço de massas executado foi composto pelos dados analítico-químicos de sete excursões de amostragens realizadas durante a execução do Projeto Camrex, em fases distintas da hidrógrafa, em consonância com os respectivos dados de vazão, medidos nos locais. As espécies químicas utilizadas foram os elementos dissolvidos (NO_3 , Na, K, $\mu\text{mol/l}$) e os particulados (POCC, POCF, FSS, CSS, mg/l). Os resultados obtidos mostraram ser independentes da natureza da espécie química utilizada no modelo proposto, apresentando um valor médio do escoamento superficial rápido, obtido para a estação de Obidos (27,13%), superior ao obtido para a estação de Vargem Grande (23,55%). A carga total em suspensão no escoamento superficial, para as duas estações, apresentou um decréscimo, desde o alto Solimões até o baixo Amazonas, com valores variando de 1,8 (Vargem Grande) a 0,8 g/l (Obidos), e o coeficiente de escoamento superficial foi mais elevado a jusante, junto à foz, do que na estação a montante, independentemente da influência exercida pela região andina. Tais fatos enfatizam o importante papel de controle hidroquímico da erosão, imposto pelas áreas de alagamento ou várzeas na região Amazônica.

INTRODUÇÃO

O escoamento total (D_o , mm/a) de um pequeno curso d'água ou de um grande rio é o resultado de dois escoamentos principais combinados: o escoamento superficial (D_r , mm/a) e o escoamento de base (D_b , mm/a), com $D_o = D_r + D_b$. Durante um ciclo hidrológico, a vazão total aumenta, culminando num período de cheia, diminuindo na vazante, para se tornar mínima no período de estiagem. A lâmina d'água escoada é resultado da combinação de dois tipos de escoamentos, um mais rápido, cha-

mado de escoamento superficial, e outro de circulação lenta e mais profundo, chamado de base. No decurso do ciclo hidrológico, os volumes de cada um dos reservatórios, superficial e profundo, apresentam-se variáveis. A amplitude das variações de vazão, sob a influência direta das flutuações e das diferenças dos regimes pluviométricos entre as estações seca e úmida, apresentam-se mais importantes na composição do reservatório superficial do que para a composição do reservatório profundo.

O escoamento superficial rápido apresenta, pelo menos, três tipos de componentes: o escoamento na superfície do solo ou superficial propriamente dito, o escoamento nas camadas subsuperficiais do solo ou hipodérmico, e o escoamento de superfície sobre as zonas inundadas (várzeas, segundo Martinelli et al., 1989). O escoamento representa inúmeros reservatórios de água subterrânea, confinados ou não, de escoamento geralmente lentos.

A erosão química (perdas de SiO_2 , Na, K, Ca, Mg e material orgânico em solução) é produzida, mais intensamente, nas águas do escoamento hipodérmico, que concerne os horizontes dos solos, do que nas águas dos aquíferos profundos. A erosão mecânica representa as perdas em suspensão: (1) das argilas, dos minerais secundários e matéria orgânica dos solos; (2) dos minerais primários hidrolisáveis dos materiais parentais. Ela é produzida pelo escoamento direto, independentemente de sua natureza (superficial, hipodérmica ou de zonas inundadas).

O principal problema debatido há muito tempo é aquele concernente à separação dos componentes do escoamento total, particularmente o escoamento superficial, o qual é responsável pela erosão mecânica. Com a falta dessa avaliação, toda a carga em suspensão é, geralmente, atribuída ao escoamento total dos rios e nunca ao superficial.

Gac (1980), Gac & Tardy (1980) e Probst (1992) propuseram avaliar o escoamento superficial rápido, com a hipótese de que a carga em suspensão das águas desse reservatório devesse permanecer constante em toda a bacia de drenagem. Essa idéia é novamente considerada e aplicada aqui em duas estações de amostragem, situadas no canal principal do rio Solimões/Amazonas, uma no alto Solimões, Vargem Grande, e outra próxima à foz do rio Amazonas, em Obidos. O escoamento em Obidos compreende, praticamente, toda a Bacia Amazônica, com toda a sua planície de inundação, enquanto que o escoamento na estação de Vargem Grande compreende toda a parte alta da bacia de drenagem, sob influência direta dos Andes.

As planícies de inundação, várzeas, que ocupam cerca de $140 \times 10^3 \text{ km}^2$ da superfície total da Amazônia e são situadas entre as estações de Vargem Grande e Obidos, têm uma participação significativa no comportamento hidroquímico de toda a

bacia de drenagem. Representam um papel importante como regulador de cheia e de escoamento superficial, controlando a erosão mecânica, cuja fonte principal é situada nos Andes, a montante na bacia de drenagem.

A estimativa do escoamento superficial rápido é indispensável para a avaliação da erosão, seja ela química ou mecânica. O método conhecido como o "dos reservatórios de contribuição variável", mas com composição constante no tempo, largamente utilizado, ao lado das medidas diretas, em estudos de pequenas bacias de drenagem, parece ser o único método disponível que permita uma estimativa do escoamento superficial para grandes bacias de drenagem. A presente proposição metodológica, com várias adaptações, pretende solucionar o problema científico das dimensões das bacias, até o momento não resolvido, com a utilização de um único modelo. O escoamento superficial e as taxas de erosão química e mecânica, são, portanto, os parâmetros mais críticos a serem determinados com certa prioridade para o controle ambiental, em ecossistemas naturais ou agrícolas.

ANÁLISE DO ESCOAMENTO TOTAL DO RIO SOLIMÕES/AMAZONAS PARA AS ESTAÇÕES DE VARGEM GRANDE E OBIDOS

Durante a realização do projeto Camrex (Richey et al., 1986), foram efetuadas amostragens no trecho do canal principal, compreendido entre as estações de Vargem Grande e Obidos. O presente trabalho se reporta a sete missões realizadas no período de 1982 a 1984. Pode ser observado na Figura 1, que para a estação de Obidos, duas amostragens foram efetuadas no período de vazante: n^os. 2 e 8, respectivamente no meio e no início do processo de descida das águas. Três amostragens foram realizadas no período ascendente das águas, n^os. 3, 4 e 7. A amostragem n^o 5 foi realizada no período de cheia, enquanto que a n^o 6, durante o período de estiagem. É observado ainda que, as amostragens na estação de Vargem Grande foram realizadas na mesma época e anteriormente às amostragens de Obidos, apresentando uma pequena defasagem de posições com relação aos hidrogramas anuais. As amostragens n^os. 2 e 8 ocorreram, respectivamente, no fim e na metade do período de descida das

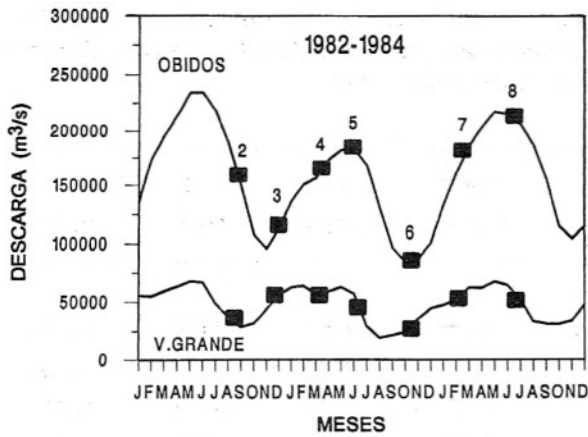


Figura 1 - Excursões de amostragem realizadas durante a execução do Projeto Camrex, no canal principal do rio Solimões/Amazonas, nas estações de Vargem Grande e Obidos, no período de 1982-1984, em diferentes fases da hidrógrafa.

águas, enquanto que as amostragens n.ºs. 3, 4 e 5 foram realizadas nos períodos de cheia e as amostragens n.ºs. 6 e 7, durante a subida das águas.

Na Tabela 1, são apresentados os valores dos diferentes parâmetros medidos durante as excursões realizadas para as estações de Obidos e Vargem Grande, referentes à vazão total do rio (Q , m^3/s): elementos dissolvidos - nitrato (NO_3), sódio (Na), potássio (K), em $\mu mol/l$; e particulados - carbono orgânico fração grosseira (POCC), carbono orgânico fração fina (POCF), sedimento em suspensão fração fina (FSS) e sedimento em suspensão fração grosseira (CSS), em mg/l . Pode ser observado que, as concentrações de nitrato, sódio e potássio em solução variam inversamente proporcional às vazões, também verificado por Martinelli et al. (1989), ao passo que as cargas orgânicas e minerais em suspensão apresentam-se mais fortes quanto mais fortes forem as vazões. Tal observação é usada como base de cálculo para o presente método proposto.

O escoamento total resulta na combinação variável entre dois escoamentos distintos: um rápido, que corresponde ao escoamento superficial e que arrasta consigo material em suspensão e uma parte dos elementos em solução (é o caso particular de elementos que, como o potássio, são submetidos às interações biológicas); o outro, lento, que corresponde à infiltração e ao escoamento de base, e que carrega

elementos lixiviados em solução. Como hipótese, é considerado que, dentro de cada um desses reservatórios, a concentração das espécies químicas utilizadas é constante.

MÉTODO DE CÁLCULO

O princípio da metodologia é simples. Sejam respectivamente Q_n , X_n e Y_n , a vazão total, o escoamento superficial e o escoamento de base, todos em m^3/s e n , um índice que indica o número da excursão ($n = 2 \rightarrow 8$). Temos que:

$$Q_n = X_n + Y_n \quad (1)$$

Para uma determinada espécie química i , C_n^i é sua concentração na água do rio, C_x^i é sua concentração na água do escoamento superficial e C_y^i é sua concentração no escoamento de base ou subterrâneo; o valor de C_n^i é variável no tempo e no espaço geográfico. No momento em que é efetuada a coleta da amostra, o fluxo total do elemento i é descrito pela seguinte equação de balanço de massa:

$$F_n^i = Q_n C_n^i = X_n^i C_x^i + Y_n^i C_y^i \quad (2)$$

As concentrações C_x^i e C_y^i são consideradas, por hipótese, constantes e os escoamentos superficial X_n^i e o de base Y_n^i são as variáveis da combinação linear que fornece o escoamento total; os valores de X_n^i e Y_n^i variam em cada excursão.

O presente modelo tem como base duas hipóteses. A primeira é que as concentrações das espécies químicas no escoamento superficial e no escoamento de base são constantes e, portanto, não variando de excursão para excursão. A segunda limita o escoamento superficial (X) a um máximo de 50% da vazão total (Q) e, conseqüentemente, o escoamento de base (Y) deverá ter no mínimo esse valor.

Os valores da vazão do rio (Q_n) foram medidos no momento das amostragens para cada excursão, além disso são conhecidas as concentrações dos elementos i consideradas C_n^i , ($i = a \rightarrow g$).

O sistema de equações a ser resolvido, composto pelas expressões (1) e (2), apresenta, como pode ser observado, quatro incógnitas X_n^i , C_x^i , Y_n^i e C_y^i , sendo portanto, indeterminado.

Dessa forma, devemos gerar valores ao acaso para X_n^i , dentro das limitações já

Tabela 1 – Resultados químico-analíticos das águas e sedimentos fluviais amostrados durante a realização das excursões no rio Solimões/Amazonas, nas estações de Vargem Grande e Obidos e os valores de descarga medidos, no período de 1982-1984.

Excursão	Q (m ³ /s)	NO ₃ (μM)	Na (μM)	K (μM)	POCF (mg/l)	POCC (mg/l)	FSS (mg/l)	CSS (mg/l)
OBIDOS								
2	161300	9,00	90,00	21,00	2,35	0,27	145,00	43,00
3	122900	18,90	120,00	49,00	2,24	0,24	238,00	11,00
4	166800	11,00	93,00	28,00	2,57	0,42	254,00	31,00
5	177300	9,20	105,00	23,50	2,43	0,34	188,00	28,00
6	91700	17,50	183,00	19,70	1,17	0,05	88,00	5,00
7	177000	14,10	86,90	25,30	3,28	0,38	345,00	40,00
8	203000	7,90	108,70	22,50	1,66	0,35	148,00	47,00
Média	157142,9	12,50	112,40	27,00	2,24	0,29	200,90	29,30
V. GRANDE								
2	31700	14,00	125,00	28,00	2,58	0,92	217,00	59,00
3	57100	17,30	170,00	36,00	4,65	0,82	470,00	136,00
4	52400	14,00	212,00	31,00	4,64	0,94	436,00	92,00
5	38800	14,20	227,00	29,90	3,34	0,61	299,00	41,00
6	26600	15,50	241,00	26,30	2,81	0,56	232,00	44,00
7	51500	14,90	203,80	29,90	4,96	0,81	486,00	106,00
8	48000	12,80	217,40	31,20	2,65	0,54	252,00	71,00
Média	43728,6	14,67	199,46	30,33	3,66	0,74	341,70	78,40

definidas para o escoamento superficial, conseqüentemente, através da equação (1), o valor de Y_n^i passa a ser conhecido, e o sistema de equações passa a ser determinado. Como exemplo, vamos interagir os dados para as excursões 2 e 3. A resolução do sistema composto pelas equações (1) e (2) é a seguinte:

$$[C_x^i]_2^3 = \frac{Y_3^i F_2^i - Y_2^i F_3^i}{Y_3^i X_2^i - Y_2^i X_3^i} \quad (3)$$

onde: $F_2^i = Q_2^i C_2^i$ e $F_3^i = Q_3^i C_3^i$.

Com a geração de valores ao acaso para X_2^i e X_3^i , e posterior cálculo de F_2^i e F_3^i , Y_2^i e Y_3^i são calculados pela equação (1). Dessa forma, para as sete excursões realizadas, devemos montar o sistema de equações com a interação das mesmas duas a duas, perfazendo uma combinação de sete,

dois a dois: C_7^2 . O resultado dessa análise combinatória mostra um conjunto de 21 valores obtidos para C_x^i . São calculados, a seguir, a média dos valores de C_x^i e o seu desvio padrão. Com a introdução de valores ao acaso de X_n^i , essa linha de cálculo é realizada 1000 vezes e o menor desvio padrão de C_x^i é selecionado entre eles. Todo esse procedimento é realizado com seis repetições. O resultado final apresenta, então, os valores obtidos para o escoamento superficial X^i e para o escoamento de base Y^i , calculados para cada excursão e para cada elemento químico selecionado. Da mesma forma, são obtidos os valores das concentrações de cada um desses elementos tanto no escoamento superficial, rápido, como no escoamento de base, lento.

Os valores médios dos escoamentos e das concentrações são calculados para o total de excursões através das seguintes relações:

$$X = \sum X_n / 7 \quad (4)$$

$$Y = \sum X_n / 7 \quad (5)$$

$$C_y^i = (Q C^i - X C_x^i) / Y \quad (6)$$

Os elementos i , que serviram para a base de cálculo concernentes as sete excursões fluviais (2 a 8), foram os seguintes: a: NO_3 ; b: Na; c: K; d: POCF; e: POCC; f: FSS e g: CSS.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do modelo proposto para a estimativa do escoamento superficial em sete excursões de amostragem realizadas no canal principal do rio Solimões/Amazonas, nas estações de Obidos e Vargem Grande, podem ser observados na Tabela 2. O valor médio do escoamento superficial rápido, obtido para a estação de Obidos foi de 27,13%, enquanto que para Vargem Grande

foi da ordem de 23,55%. O escoamento de base se apresentou superior em comparação com o superficial, variando entre 72,87% para a estação de Obidos e 76,45% para Vargem Grande. Em ambos os casos, os valores inferiores observados, em termos de escoamento superficial, foram os obtidos através do potássio, respectivamente 22,68 e 19,03%, para Obidos e Vargem Grande. Para a estação de Obidos, o valor mais alto estabelecido para o escoamento superficial foi obtido pelo sódio, 31,37%, enquanto que para a estação de Vargem Grande, a fração grosseira do sedimento em suspensão foi responsável pelo valor de 27,73%.

De fato, não nos parece que os valores calculados para o escoamento superficial dependam da natureza da variável utilizada para a determinação. A variação dos resultados obtidos em torno dos valores médios, nessa primeira aproximação, ficou entre 10 e 15%. Entretanto, para ambas as estações,

Tabela 2 – Concentração dos elementos dissolvidos NO_3 , Na e K (μM) e particulados POCF, POCC, FSS e CSS (mg/l), estimados pelo modelo proposto, nas águas do escoamento superficial rápido (SR) e escoamento de base (BF), e as respectivas porcentagens de cada reservatório.

	Total	Concentração		Hidrograma	
		SR	BF	SR (%)	BF (%)
OBIDOS					
NO_3 (μM)	12,50	-3,70	19,00	25,96	74,04
Na	112,40	-20,00	165,60	31,37	68,63
K	27,00	56,90	19,30	22,68	77,32
POCF (mg/l)	2,24	5,96	0,73	28,14	71,86
POCC	0,29	0,82	0,07	29,93	70,07
FSS	200,90	582,50	72,20	25,64	74,36
CSS	29,30	92,80	7,20	26,16	73,84
Média				27,13	72,87
V. GRANDE					
NO_3 (μM)	14,67	8,05	16,67	23,23	76,77
Na	199,46	-28,61	257,98	20,20	79,80
K	30,33	41,33	27,42	19,03	80,97
POCF (mg/l)	3,66	7,31	2,08	27,56	72,44
POCC	0,74	2,10	0,36	21,35	78,65
FSS	341,70	771,29	172,33	25,76	74,24
CSS	78,40	250,13	5,96	27,73	72,27
Média				23,55	76,45

os valores calculados para o nitrato foram os que mais se aproximaram dos valores médios.

Observa-se ainda, através da Tabela 2, que a concentração dos materiais em suspensão é maior nas águas do escoamento superficial do que no próprio escoamento total e, conseqüentemente, no escoamento de base. O erro do modelo apresentado, correspondente à parte de material em suspensão que transita no reservatório subterrâneo, é menor para a fração grosseira (10%) do que para o material particulado fino (20%).

Da mesma maneira pode ser verificado que o sódio e o nitrato transitam em grande parte, ou quase na totalidade, nas águas subterrâneas, ao passo que o potássio é preferencialmente concentrado nas águas do escoamento superficial. Quanto ao material particulado em suspensão, o comportamento geral observado é o de serem sistematicamente superiores na estação de Vargem Grande, a montante no alto Solimões, do que em Obidos, a jusante, no baixo Amazonas, próximo à foz. As frações grosseiras, mineral e orgânica, são mais sensíveis à ablação mecânica, a montante da bacia de drenagem, e à sedimentação na planície de inundação, a jusante, na direção da foz, configurando perda de material. Tal fato pode ser melhor observado através da

Tabela 3, que reporta o transporte de material particulado grosseiro e fino ao longo de toda a bacia. Pode ser verificado que a quantidade de material, tanto mineral, quanto orgânico, que deixa a estação de Obidos, é inferior ao total que entra na bacia (aportes dos tributários principais).

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos da aplicação da metodologia proposta mostram que o modelo de mistura de dois reservatórios, onde as características são constantes (cargas em solução e suspensão), mas de volumes variáveis no tempo, pode ser um bom instrumento de avaliação das flutuações do escoamento superficial e do escoamento de base, independentemente das dimensões da bacia de drenagem. As duas estações estudadas ao longo do canal principal do rio Solimões/Amazonas, Vargem Grande, situada a montante, mais perto dos Andes e Obidos, situadas a jusante, próximo à foz, apresentaram, entre si, resultados muito coerentes. Observou-se um gradiente positivo para o escoamento superficial rápido, no sentido da foz do rio Amazonas (valores entre 23,55 e 27,13%). O escoamento de base apresentou teores mais elevados, variando entre 72,87% para Obidos e 76,45% para a estação de Vargem Grande.

Tabela 3 - Fluxo de material particulado, frações grosseira e fina, expressos em milhões de toneladas por ano, ao longo da Bacia Amazônica, período 1982-1984.

Estação	Q x 1000 (m ³ /s)	FLUXO (milhões ton/a)			
		FSS	CSS	POCF	POCC
V. Grande	46,975	516,86	159,15	5,57	1,21
R. Iça	7,313	16,80	2,79	0,31	0,05
R. Jutai	3,425	1,65	0,08	0,09	0,00
R. Jurua	3,738	20,81	2,01	0,18	0,02
R. Japura	16,000	25,37	2,21	0,74	0,24
R. Purus	11,863	26,13	1,47	0,38	0,07
R. Negro	28,938	6,14	0,16	0,43	0,09
R. Madeira	25,443	372,40	61,20	2,53	1,81
Total	143,70	986,16	229,07	10,23	3,49
Obidos	157,143	1024,98	159,77	11,45	1,54
R	91,4	96,2	143,4	89,3	226,6
R = Total/Obidos					

Do alto Solimões até o baixo Amazonas, a carga total do material em suspensão nas águas do escoamento superficial diminui de 1,8 a 0,8 g/l, ao passo que a fração grosseira do material orgânico decresce mais suavemente, de 0,24 a 0,12 g/l, o mesmo acontecendo com o material mineral, de 0,17 a 0,13 g/l.

De maneira semelhante, o coeficiente de escoamento superficial, $K_r = D_r/D_t$, é mais alto a jusante, junto à foz, do que na

estação a montante, mesmo sobre influência de uma declividade topográfica muito pequena em comparação com a exercida pela região andina. Tal diferenciação, aparentemente surpreendente, mostra bem o importante papel realizado pelas áreas de alagamento, ou várzeas, onde o escoamento superficial, rápido, é favorecido, enquanto que o escoamento lento, ou de base, é limitado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- GAC, J.Y. (1980) Géochimie du bassin du Lac Tchad. Bilan de l'altération, de l'érosion et de la sédimentation. Trav. et Doc. ORSTOM, Paris, 123, 251p.
- GAC, J.Y. & TARDY, Y. (1980) Géochimie d'un bassin tropical. Le bassin du Lac Tchad. In: Géochimie des interactions entre les eaux, les minéraux et les roches. Y. Tardy (ed.), Elements Tarbes, editeur, p. 199-239.
- MARTINELLI, L.A.; DEVOL, A.H.; FORSBERG, B.R.; VICTORIA, R.L.; RICHEY, J.E.; RIBEIRO, M.N.G. (1989) Descarga de sólidos dissolvidos totais do rio Amazonas e seus principais tributários. Geochim. Brasil. 3(2): 141-148.
- PROBST, J.L. (1992) Géochimie et hydrologie de l'érosion continentale: mécanismes, bilan global actuel et fluctuations au cours des 500 derniers millions d'années. Sci. Géol., Bull., Strasbourg, 94, 161p.
- RICHEY, J.E.; MEADE, R.H.; SALATI, E.; DEVOL, A.H.; NORDIN, C.F.; SANTOS, U.M. (1986) Water discharge and suspended sediment concentration in the Amazon river. 1982/1984. Wat. Res. Resour. 22: 756-764.