

**Transport de matières dissoutes et
particulaires des Andes vers le Rio de La
Plata par les tributaires boliviens (rios
Pilcomayo et Bermejo) du Rio Paraguay**

JEAN LOUIS GUYOT

ORSTOM, CP 9214, La Paz, Bolivie

HECTOR CALLE & JOSE CORTES

SENAMHI, CP 996, La Paz, Bolivie

MARIO PEREIRA

ENDE, CP 565, Cochabamba, Bolivie

Résumé - Les données recueillies à 13 stations hydrométriques des réseaux du SENAMHI et de ENDE, de 1975 à 1983, permettent d'estimer les flux de matières particulaires et dissoutes dans les bassins andins des rios Pilcomayo et Bermejo, formateurs du Rio Paraguay. Les résultats obtenus en Bolivie sur le bassin versant du Rio Pilcomayo, montrent que l'essentiel de l'exportation est le fait des matières en suspension (90%). Le flux de sédiments mesuré à la sortie des Andes sur le Rio Pilcomayo ($80 \times 10^6 \text{ t an}^{-1}$) est du même ordre de grandeur que celui observé 2000 kilomètres à l'aval sur le Moyen Parana.

Transport of suspended sediment and dissolved material from the Andes to the Rio de la Plata by the Bolivian tributaries of the Rio Paraguay (Rios Pilcomayo and Bermejo)

Abstract The data collected from 13 gauging stations in the SENAMHI and ENDE networks (between 1975 and 1983), permit estimations of the suspended sediment and dissolved material yields in the Andean drainage basins of the Pilcomayo and Bermejo rivers, tributaries of the Rio Paraguay. In Bolivia, results from the Rio Pilcomayo drainage basin show that the greatest part of the transport from the basin consists of suspended sediment (90%). The sediment yield measured at the Andean exit of the Rio Pilcomayo ($80 \times 10^6 \text{ t year}^{-1}$) is of the same order of size as that observed 2000 km downstream in the Middle Parana.

INTRODUCTION

Avec une superficie de $3.2 \times 10^6 \text{ km}^2$, le bassin versant du Rio de la Plata est le second grand bassin d'Amérique du Sud, après celui de l'Amazone (Fig. 1). Le Rio de la Plata présente à son embouchure un débit moyen de

Open for discussion until 1 June 1991

653

ORSTOM Fonds Documentaire

N° : 31.611 ex 1

Cote : B 11 p 31

20 MARS 1991

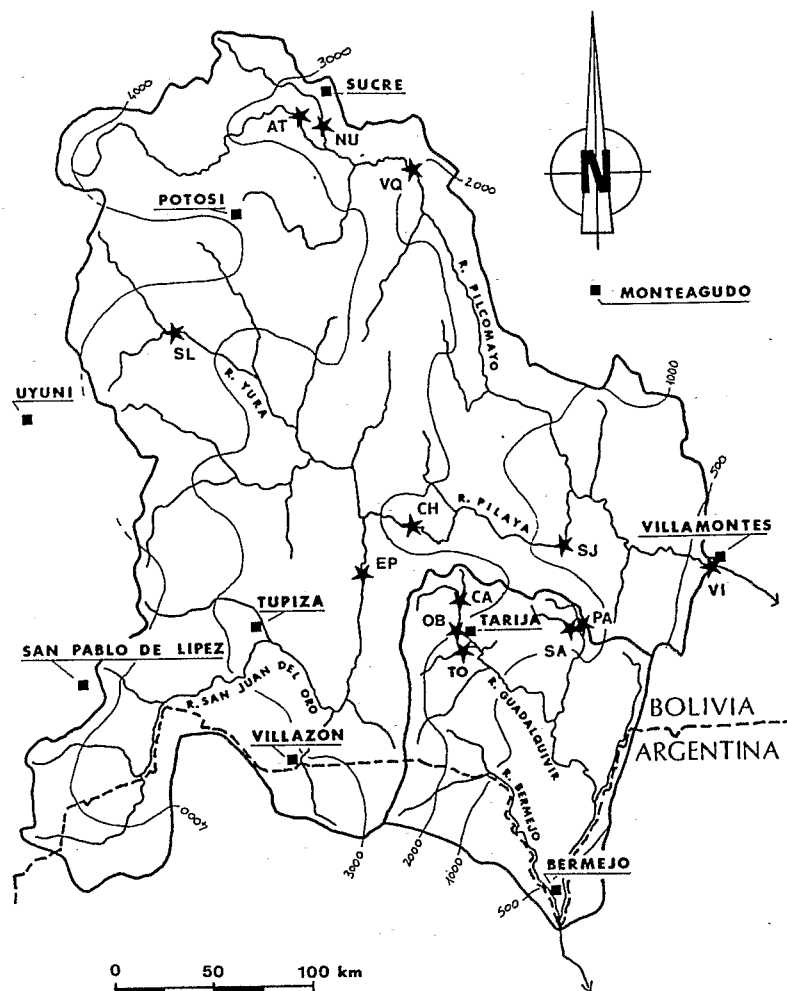


Fig. 2 Les bassins boliviens des rios Pilcomayo et Bermejo, localisations des stations de mesure: voir tableau 1 pour le code des stations.

réseau d'environ 150 stations hydrologiques dans les Andes boliviennes. ENDE (Empresa Nacional de Electricidad de Bolivia) a effectué des campagnes de prélèvements suivies à quelques stations, dans le cadre d'études de faisabilité d'un barrage sur le Rio Pilcomayo à Icla.

Les débits utilisés correspondent aux débits moyens journaliers du SENAMHI et/ou de ENDE pour les stations possédant des relevés limni-

Tableau 1 Caractéristiques des stations étudiées

Code de station	Cours d'eau	Station	Altitude (m)	Superficie (km ²)	Institution
AT	Pilcomayo	Angosto Talula	2500	6340	ENDE-SENAMHI
NU	Cachimayu	Nucchu	2300	1600	ENDE-SENAMHI
VQ	Pilcomayo	Viña Quemada	2000	13200	ENDE-SENAMHI
SL	Yura	Salto Leon	3100	4200	SENAMHI
EP	San Juan del Oro	El Puente	2300	20100	SENAMHI
CH	Pilaya	Chillcara	2100	42900	SENAMHI
SJ	Pilaya	San Josécito	800	47500	SENAMHI
VI	Pilcomayo	Villamontes	340	81300	SENAMHI
CA	Chamata	Cañasmoro	2100	230	SENAMHI
OB	Guadalquivir	Obrajes	1900	920	SENAMHI
TO	Tolomosa	San Jacinto	1900	460	SENAMHI
SA	Santa Ana	Entre Ríos	1200	290	SENAMHI
PA	Pajonal	Entre Ríos	1200	220	SENAMHI

métriques et des courbes de tarage (AT, NU, VQ, SL, CH, VI, TO, SA et PA, Tableau 1). Pour les autres stations (EP, SJ, CA et OB), les débits utilisés sont les débits ponctuels des jaugeages réalisés lors des prélèvements.

Les matières en suspension ont été prélevées à l'aide d'échantillonneurs intégrateurs de type USD 49, sur plusieurs verticales, de trois à six suivant la largeur des cours d'eau. Un échantillonneur ponctuel de type USP 61 a également été utilisé sur le Rio Pilcomayo aux stations d'Angosto Talula et de Viña Quemada (ICLA, 1982; Vollmers & Palenque, 1983). En période de hautes eaux, l'échantillonnage était généralement journalier. Le reste de l'année, la fréquence des prélèvements était de deux à trois par semaine, quelquefois moins en période de basses eaux. Une concentration moyenne journalière a été calculée à partir des résultats des différentes verticales, par la méthode de la moyenne arithmétique, qui dans ce type de cours d'eau donne des résultats comparables à ceux obtenus par la méthode de la moyenne pondérée par les vitesses de courant (Guyot *et al.*, 1989). Ce dernier mode de calcul plus rigoureux requiert l'utilisation des données des jaugeages, qui ne sont plus disponibles. Certaines stations présentent des lacunes d'observation, qui s'étendent parfois sur plusieurs mois.

Le transport de fond ou charriage, a été mesuré aux deux stations du haut bassin du Rio Pilcomayo par ENDE, à l'aide d'un échantillonneur Helley-Smith et de nasses de fabrication locale (ICLA, 1982; Palenque, 1981; Vollmers & Palenque, 1983). Les prélèvements de transport de fond ont toujours été effectués en période de hautes eaux.

Des mesures régulières de la conductivité électrique ont été réalisées aux stations du SENAMHI du département de Tarija. La fréquence de l'échantillonnage est la même que pour les matières en suspension. Ces données ont permis le calcul de la minéralisation globale de ces eaux, en utilisant les relations (Minéralisation) = f(Conductivité) proposées par Rodier (1975). La même relation établie sur le bassin voisin du Rio Grande à Abapo (Guyot *et al.*, 1989), donne des résultats similaires.

Les flux de matières particulaires en suspension (MES) et dissoutes ont

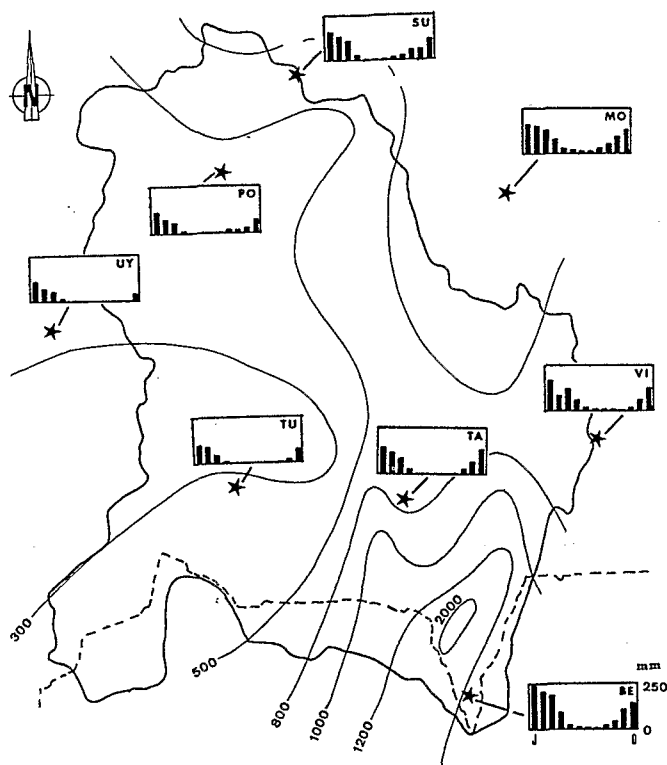


Fig. 3 Pluviométrie (en mm, de Janvier à Décembre) des bassins boliviens des rios Pilcomayo et Bermejo, 1968-1982, d'après Arellano (1988), Frias (1989), Herbas (1987) et Mariaca (1985).

BE = Bermejo (410 m) 1081 mm; MO = Monteagudo (1130 m) 927 mm; PO = Potosi (3860 m) 404 mm; SU = Sucre (2890 m) 706 mm; TA = Tarija (1860 m) 616 mm; TU = Tupiza (2950 m) 346 mm; UY = Uyuni (3660 m) 350 mm; et VI = Villamontes (340 m) 691 mm.

été obtenus de la manière suivante:

- calcul du flux journalier qui est le produit du débit moyen journalier (ou débit instantané suivant les stations) par la moyenne des concentrations mesurées dans la journée;
- calcul de la moyenne mensuelle des flux journaliers, pour chaque mois de chaque année de mesures;
- calcul de la moyenne des moyennes mensuelles, mois par mois; et
- calcul de la moyenne annuelle à partir de ces moyennes mensuelles interannuelles.

Compte tenu des fréquentes lacunes d'observation, ce mode de calcul a été utilisé afin de donner le même poids aux différents mois de l'année, c'est à dire aux différentes périodes hydrologiques.

Aucune régression de type (transport de matières) = $f(\text{débit})$ n'a été utilisée du fait de l'absence de chroniques hydrologiques pour certaines stations. Toutes les valeurs utilisées pour les calculs, et reportées dans les tableaux, sont donc uniquement des données mesurées.

Les valeurs des flux de sédiments charriés ont été extraites des études de ICLA (1982) et Vollmers & Palenque (1983).

LES RESULTATS

L'interprétation de ces données ne se fera que sur l'ordre de grandeur des résultats obtenus, compte tenu de la disparité de l'information: périodes d'observation différentes, nombreuses lacunes, fréquence de prélèvements variable...

Avec de fortes variations des débits spécifiques moyens annuels allant de 0.5 à $20 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$, la totalité des stations étudiées présente le même régime hydrologique (Fig. 4), dépendant du régime des précipitations. Une saison de hautes eaux apparaît nettement de Décembre à Mars, ainsi qu'une période d'étiage s'étalant de Mai à Octobre. Les quatre mois de hautes eaux totalisent de 53% (Rio Yura) à 79% (Rio Pilaya) du volume annuel écoulé, alors que les six mois d'étiage ne représentent respectivement pour ces mêmes cours d'eau, que de 35% à 13% de ce volume.

Le bassin du Rio Pilcomayo à Villamontes présente un débit spécifique moyen annuel de $3.2 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$. Les cours d'eau drainant la bordure occidentale de ce bassin, ont des débits spécifiques beaucoup plus faibles $1.5 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ pour le Rio Yura et $0.5 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ pour le Rio San Juan del Oro. D'autre part, le régime hydrologique de ces deux cours d'eau est plus régulier, avec une décroissance plus lente des débits, ainsi que l'absence d'un étiage prononcé. Cette particularité du comportement hydrologique peut s'expliquer par l'existence d'un aquifère important, qui pourrait être dans ce cas lié aux séries volcano-sédimentaires drainées par ces deux cours d'eau. Le bassin du Rio Bermejo à Bermejo présente un débit spécifique moyen annuel de $18 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$, pour un module de $92 \text{ l m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Frias, 1989). Les stations étudiées, toutes situées en tête de bassin, ont des débits spécifiques moyens annuels variant de 4 à $20 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$.

L'évolution des matières en suspension au cours du cycle hydrologique, montre à Villamontes (Fig. 5) que les maxima de concentrations se produisent lors de l'amorce de crue, et ne coïncident donc pas avec les points de crue. Ce phénomène rend l'utilisation des formules classiques (débit solide) = $f(\text{débit})$ inadéquate.

La minéralisation présente à l'inverse des suspensions, des teneurs maxima en période de basses eaux, et des teneurs minima en pointe de crue, dues au phénomène de dilution. Les concentrations en matière dissoute varient au cours du cycle hydrologique avec une amplitude beaucoup plus faible que celle observée pour les teneurs en matières en suspension.

Les régimes des débits solides (Fig. 6) montrent clairement pour l'ensemble des stations étudiées, la prédominance des quatre mois de hautes eaux qui totalisent de 84% à 98% des sédiments exportés, alors que les six mois de la période sèche ne représentent que de 1% à 3% de ce même

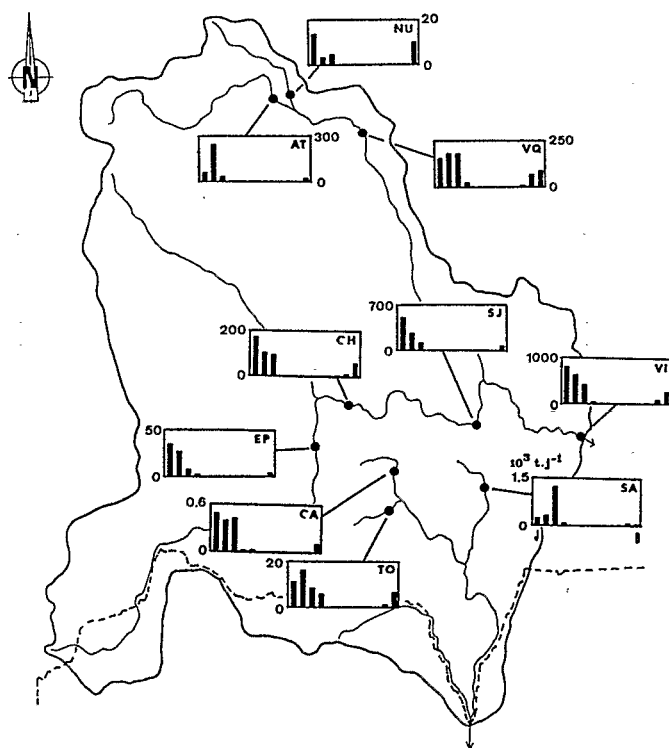


Fig. 6 Les régimes des flux de matières particulaires en suspension ou débit solide (de Janvier à Décembre), d'après les données du SENAMHI et de ENDE; voir Tableau 1 pour le code des stations.

l'exportation des matières dissoutes. Les quatre mois de hautes eaux (de Décembre à Mars) sont alors responsables de 50% à 80% du volume annuel des exportations. L'ensemble des stations du bassin du Rio Pilcomayo présente des teneurs en solution comprises entre 0.5 et 1 g l⁻¹, pour des taux d'érosion spécifique voisins (Tableau 4). Le Rio Pilcomayo à la sortie des Andes présente un flux de matières dissoutes de 2.9×10^6 t an⁻¹, soit environ 25 fois moins que de sédiments. Dans le haut bassin du Rio Guadalquivir, les concentrations observées sont généralement faibles, et les taux d'érosion spécifique évoluent de 10 à 80 t km⁻² an⁻¹ en fonction des bassins, ce qui représente de 1 à 30% des flux de sédiments mesurés à ces mêmes stations.

CONCLUSION

L'étude des transports de matière, des Andes boliviennes, vers le bassin du

Tableau 2 Les matières en suspension (MES)

Code de station	Période d'observation	Nombre mesures	Débit (m ³ s ⁻¹)	MES (mg l ⁻¹)	Flux matières particulaires (10 ⁶ t an ⁻¹)	Taux d'érosion (t km ⁻² an ⁻¹)
AT	06/1975-04/1983	1088	20	5620	12	1900
NU	11/1975-11/1982	46	8.5	1630	1.1	660
VQ	01/1978-01/1983	552	49	6910	22	1700
SL	11/1976-02/1977	57	6.5	(2200)	(0.5)	(110)
EP	09/1979-12/1982	484	10	3830	2.4	120
CH	05/1977-04/1983	459	53	4790	14	320
SJ	09/1979-12/1982	309	82	5380	31	650
VI	01/1977-12/1982	745	260	6240	72	890
CA	08/1979-05/1982	444	1.5	590	0.05	200
OB	07/1979-12/1982	192	3.8	1740	0.40	440
TO	05/1977-12/1982	584	9.0	1480	1.5	3300
SA	07/1979-12/1982	181	5.9	120	0.06	220
PA	07/1979-12/1982	182	4.6	440	0.11	500

Toutes les données (débit, MES, flux, taux d'érosion) sont des valeurs moyennes annuelles.

Tableau 3 Le charriage

Code de station	Période d'observation	Nombre mesures	Référence	Flux (10 ⁶ t an ⁻¹)	% MES
AT	01/1980-04/1981	36	Vollmers, 1983	1.1	10
VQ	01/1979-03/1981	182	Icla, 1982	3.4	11

Tableau 4 Les matières dissoutes (MIN)

Code de station	Période d'observation	Nombre mesures	Débit (m ³ s ⁻¹)	MIN (mg l ⁻¹)	Flux matières dissoutes (10 ⁶ t an ⁻¹)	Taux d'érosion (t km ⁻² an ⁻¹)
EP	10/1979-12/1982	469	10	870	0.25	13
SJ	10/1979-12/1982	295	82	660	1.4	28
VI	01/1977-12/1982	672	260	650	2.9	36
CA	10/1979-05/1982	423	1.5	120	0.003	13
OB	10/1979-12/1982	171	3.8	80	0.01	10
TO	05/1977-12/1982	519	9.0	42	0.02	39
SA	09/1979-12/1982	172	5.9	160	0.02	62
PA	09/1979-12/1982	172	4.6	250	0.02	83

Toutes les données (débit, minéralisation, flux, taux d'érosion) sont des valeurs moyennes annuelles.

Rio Paraguay, a permis d'estimer l'ampleur des transports de sédiments, notamment sur le bassin du Rio Pilcomayo. A la sortie des Andes, ce cours d'eau dont le débit moyen est de 260 m³ s⁻¹, présente un flux de sédiments

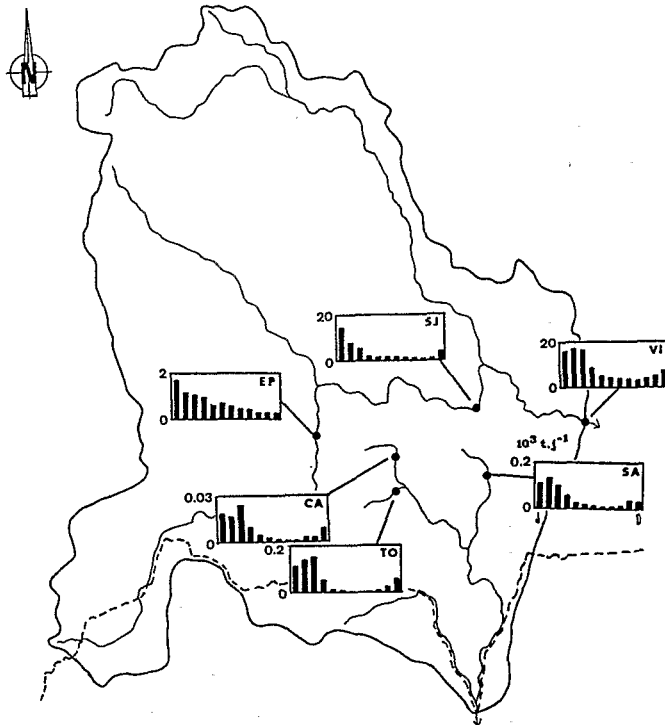


Fig. 7 Les régimes des flux de matières dissoutes (de Janvier à Décembre), d'après les données de SENAMHI; voir Tableau 1 pour le code des stations.

de $80 \times 10^6 \text{ t an}^{-1}$, essentiellement sous forme de suspensions (90%). Avec un flux de matières dissoutes de l'ordre de $3 \times 10^6 \text{ t an}^{-1}$, soit environ 25 fois moins que de sédiments, le bassin du Rio Pilcomayo à Villamontes est soumis à un taux d'érosion global de $930 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$.

Les taux d'érosion spécifiques observés par stations, présentent des variations significatives en fonction des caractéristiques biogéographiques des bassins (végétation, superficie, géologie, pluviométrie). Ainsi, les taux d'érosion mécanique varient de $100 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ pour les bassins semi-arides de la bordure ouest du bassin du Rio Pilcomayo, à plus de $3000 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ dans un petit bassin à forte pluviométrie de la région de Tarija. Les taux d'érosion chimique évoluent pour ces mêmes bassins de 10 à $80 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$.

Malgré des apports hydriques modestes au Rio Paraguay, le flux de sédiments mesuré à Villamontes sur le Rio Pilcomayo est du même ordre de grandeur que celui observé sur le Moyen Parana, 2000 kilomètres à l'aval (Depetris & Griffin, 1968; Drago & Amsler, 1988). La plus grande partie de ces sédiments va donc se déposer avant d'arriver au Rio Parana, dont

l'essentiel de la charge solide provient du Rio Bermejo.

REFERENCES

- Arellano, R. (1988) Balance hídrico superficial de la cuenca del Río Pilcomayo, Río de la Plata, Bolivia. Tesis de grado, UMSA, La Paz, Publ. PHICAB.
- Bonetto, A. A. (1975) Hydrologic regime of the Paraná River and its influence on ecosystems. *Landscapes of River Basins (South America)* (ed.) Springer Verlag New York Inc., 175-197.
- Bonetto, A. A., Dioni, W. & Pignalberi, C. (1969) Limnological investigations on biotic communities in the Middle Paraná River Valley. *Verh. Int. Ver. Limnol.* 17, 1035-1050.
- Depetris, P. J. & Griffin, J. J. (1968) Suspended load in the Río de la Plata drainage basin. *Sedimentology* 11, 53-60.
- Drago, E. C. & Amsler, M. L. (1988) Suspended sediment at a cross section of the Middle Paraná River: concentration, granulometry and influence of the main tributaries. *Sediment Budgets*, Proc. Porto Alegre Symp., December 1988. IAHS Publ. no. 174, 381-396.
- Frias, R. I. (1989) Balance hídrico superficial de la cuenca de los ríos Bermejo y Grande de Tarija, Bolivia, Argentina. Tesis de grado, UMSA, La Paz, Publ. PHICAB.
- Guyot, J. L., Roche, M. A. & Bourges, J. (1989) Etude de la physico-chimie et des suspensions des cours d'eau de l'Amazonie bolivienne: l'exemple du Río Béni. *Journées hydrologiques de l'ORSTOM*, Montpellier, Septembre 1988, 13-41.
- Montes de Oca, I. (1982) *Geografía y Recursos Naturales de Bolivia*. Imp. Superel, La Paz, Bolivia.
- Palenque, G. (1981) Analisis de las ecuaciones para el transporte de la carga de fondo. Tesis de grado, UMSA, La Paz.
- Roche, M. A. & Rocha, N. (1985) Mapa pluviométrico de Bolivia y regiones vecinas, 1/4000000. Publ. PHICAB.
- Rodier, J. (1975) *L'Analyse de l'Eau*. Tome 1. Ed. Dunod, Paris, France.
- SOFRELEC (1978) Estudio de factibilidad del proyecto multiple San Jacinto. Rapp. Interne, San Jacintho, Paris, France.
- UCLA (1982) *Proyecto Hidroelectrico UCLA*. Hidrología y sedimentología. Informe final. UCLA, La Paz, Bolivia.
- Vollmers, H. J. & Palenque, G. (1983) Sediment measurements in the Pilcomayo River in Bolivia. 2nd Int. Symp. on River Sedimentation, Nanjing, May 1983, 1050-1070.

Received 2 October 1989; accepted 17 May 1990