

O.R.S.T.O.M.

I.H.H. - U.M.S.A

PHICAB

I.I.Q. - U.M.S.A.

S.E.N.A.M.H.I.

Tercer Simposio de la Investigación Francesa
en Bolivia Santa Cruz de la Sierra
Bolivia, Junio 1989



J.L. Guyot, J. Bourges & M.A. Roche

O.R.S.T.O.M.

I.H.H. - U.M.S.A

PHICAB

I.I.Q. - U.M.S.A.

S.E.N.A.M.H.I.

Tercer Simposio de la Investigación Francesa en Bolivia
Santa Cruz de la Sierra, Bolivia, Junio 1989.

- * Transporte de sedimentos y materias disueltas en la cuenca amazónica de Bolivia.

J.L. Guyot, J. Bourges & M.A. Roche

- * La investigación hidrológica en el Beni : ejemplos de aplicación para el desarrollo de infraestructuras y previsión de crecidas.

J. Bourges

O.R.S.T.O.M., C.P. 8714, La Paz, Bolivia.

Octubre 1989

**Tercer Simposio de la Investigación Francesa en Bolivia
Santa Cruz de la Sierra, Bolivia, Junio 1989**

**TRANSPORTE DE SEDIMENTOS Y MATERIAS DISUELTAS
EN LA CUENCA AMAZONICA DE BOLIVIA.**

**Jean Louis GUYOT, Jacques BOURGES y Michel Alain ROCHE
ORSTOM, C.P. 8714, La Paz, Bolivia.**

1. Introducción

La cuenca alta del río Madera, principal afluente meridional del río Amazonas, cubre una superficie de aproximadamente 900,000 Km² y se extiende sobre tres países : Bolivia, Perú y Brasil. En la frontera boliviana-brasilera, el río Madera es esencialmente alimentado por tres cursos de agua originados en los Andes : los ríos Madre de Dios, Beni y Mamoré. En cuanto al río Itenez, éste drena el escudo brasilero.

Las cuencas de estos ríos corresponden a medios biogeográficos muy contrastados, desde los glaciares de la Cordillera Oriental de los Andes del Perú y de Bolivia (6500 m) hasta la selva tropical húmeda de la planicie amazónica (150 m) (Roche & al., 1989).

2. El programa PHICAB

Desde 1983, el Programa Climatológico e Hidrológico de Bolivia (PHICAB) se interesa por el estudio del clima y de sus variaciones espacio-temporales, así como por el estudio de los regímenes hidrológicos y del balance hídrico. El estudio de la calidad de las aguas y el balance de los transportes de materias disueltas y en suspensión, completan este vasto programa (Roche, 1982 - Roche & Canedo, 1984).

El programa PHICAB es el resultado de acuerdos de cooperación entre el Instituto Francés de Investigación Científica para el Desarrollo en Cooperación (ORSTOM), el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Bolivia (SENAMHI), los Institutos de Hidráulica e Hidrología (IHH), de Investigaciones Químicas (IIQ) de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA) de La Paz, y del Servicio Hidrográfico de la Fuerza Naval (SHN). Puntualmente, y en función a los estudios específicos, se extendieron colaboraciones con la Honorable Alcaldía de La Paz (HAM), la Administración de los Aeropuertos y los Servicios Auxiliares para la Navegación Aérea (AASANA) y la Empresa Nacional de Electricidad en Bolivia (ENDE).

3. Medios

Con el fin de llevar a bien este programa de estudios, una red de 15 estaciones hidrométricas fue instalada en la Amazonia boliviana, desde el pie de monte de los Andes hasta la frontera con el Brasil (Abasto & al., 1985 - Bourges, 1986). Esta red, regida por el PHICAB, permite controlar tanto los caudales como los flujos de materias, a partir de un muestreo regular.

Los datos de las estaciones climatológicas (AASANA, SENAMHI) e hidrométricas (SENAMHI, ENDE) son igualmente utilizados por los investigadores de las instituciones que colaboran en este programa.

4. Los resultados

El conjunto de la cuenca Amazónica de Bolivia está sometido a un mismo régimen de precipitaciones de origen Atlántico (Ronchail, 1985), cuyas variaciones estacionales son determinadas por los movimientos de la Zona Intertropical de Convergencia (Roche & Fernández, 1988). La distribución espacial de las lluvias (Roche & Rocha, 1985) muestra la existencia de dos medios distintos (Fig. 1) : la planicie Amazónica, donde la pluviometría media anual es del orden de 1700 mm (Abasto, 1987 - Cruz, 1987 - Espinoza, 1985 - García, 1985), y una zona andina que presenta una fuerte heterogeneidad de módulos pluviométricos (de 400 a 6000 mm) en función a las condiciones topográficas (Roche & al., 1986).

A raíz del régimen pluviométrico, los ríos originados en los Andes, presentan regímenes hidrológicos parecidos (Fig. 2), con un período de aguas altas de Noviembre a Abril (Bourges & al., 1987). Río arriba hacia río abajo, el hidrograma es más regular, con un desfase de máximo de crecida más o menos sensible según las cuencas, y en relación con la extensión de las zonas de inundación (Roche & al., 1986, 1988). De la misma manera que para los módulos pluviométricos, fuertes variaciones espaciales de caudales específicos se observan (de 6 a 75 l/s.Km²) en las diferentes cuencas estudiadas (Cuadro 1). Para el período 1983-1987, los aportes hídricos al río Madera son del orden de 18,000 m³/s (Bourges & al., 1987 - Bourges, 1988).

La variación estacional de concentraciones de materias en suspensión (Fig. 3) muestra una fuerte influencia del régimen hidrológico. A los períodos de aguas altas corresponden los tenores máximos, lo esencial de la exportación de sedimentos se producirá por lo tanto en la estación de aguas altas (Guyot, Bourges & al., 1988, 1989). Para cada cuenca, las concentraciones máximas de materias en suspensión (MES) se observan a la salida de los Andes : 1100 mg/l en Angosto del Bala y 7500 mg/l en Abapo (Guyot, 1986). Luego, estas concentraciones disminuyen bajo el efecto de dilución a raíz de los aportes de los ríos de la

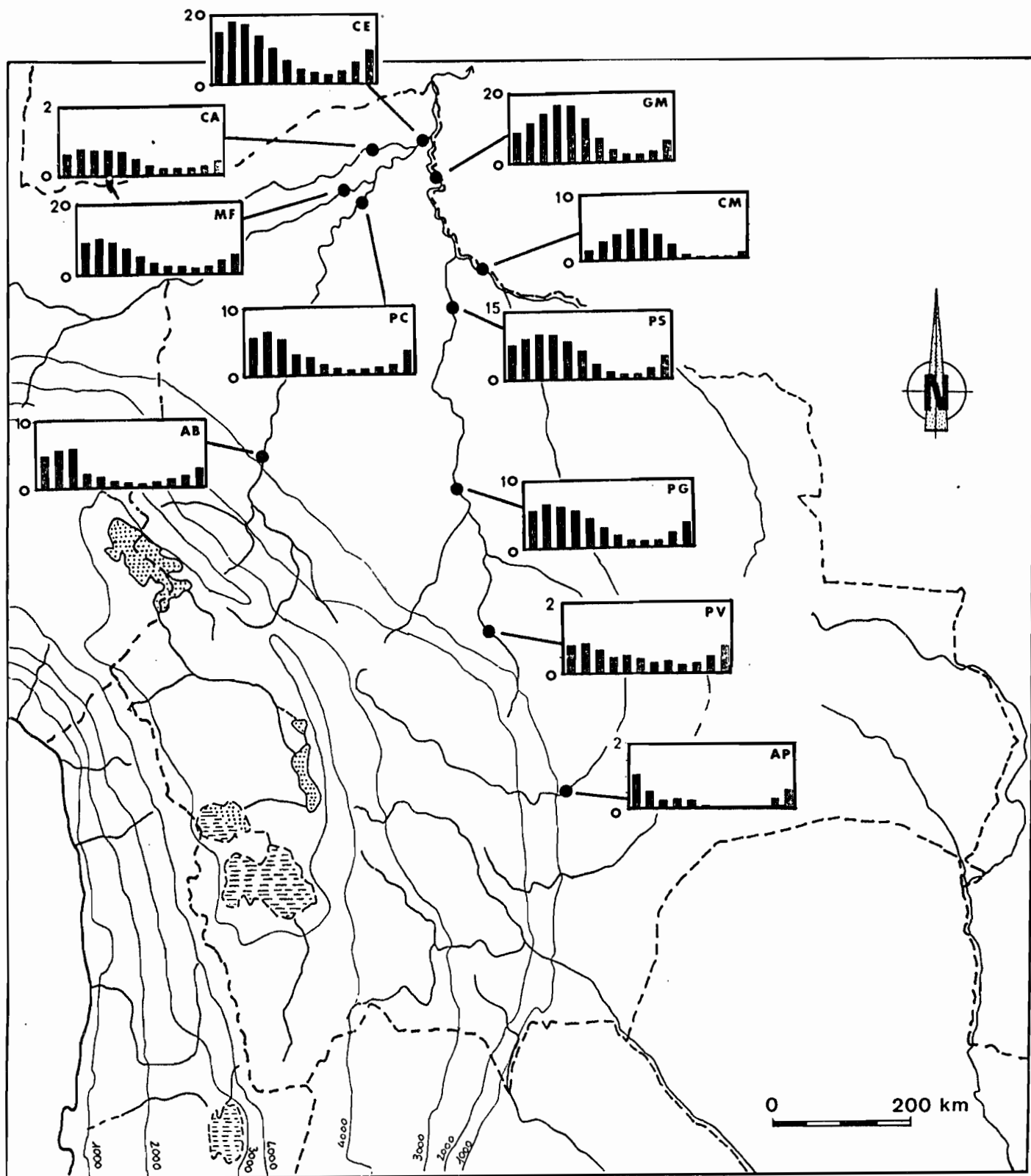


Figura 2 : Los regímenes hidrológicos (en $10.3 \text{ m}^3/\text{s}$) en las estaciones de la red PHICAB para el período 1983-1987. Ver Cuadro 1 para el código de las estaciones.

Los Resultados (1983-1987)

Estación	Río	Alt. (m)	Sup. (10 ³ km ²)	Pluvio.x (mm)	Caudal (m ³ /s)	(10 ⁹ m ³ /año)	Mineralización (mg/l)	(10 ⁶ t/año)	Sedimentos (mg/l)	(10 ⁶ t/año)
AB	Angosto del Bala	280	67	1.720	2.200	69	100	6,9	1.140	150
PC	Portachuelo	140	119	1.750	3.000	95	92	3,4	890	120
MF	Miraflores	140	124	2.380	5.250	166	72	11	310	51
CA	Caracoles	130	32	2.000	480	15	66	0,9	130	1,8
CE	Cachuela Esperanza	125	282	2.060	9.300	293	76	22	360	150
AP	Abapo	450	59	750	330	10	400	2,5	7.500	110
PV	Puerto Villarroel	170	7,6	3.000	560	18	54	1,0	220	5,1
PA	Puerto Almacen	150	5,3	1.850	(140)	(4)	84	(0,4)	78	(0,3)
PG	Puerto Ganadero	150	159	1.480	3.540	112	100	10	460	51
PS	Puerto Siles	130	216	1.700	5.660	173	110	16	260	53
CM	Campamento More	130	340	1.370	2.240	71	47	2,7	30	1,3
GM	Guayaramerin	125	590	1.520	8.950	282	79	13	220	53
Confluencia	Madera	120	872	1.700	18.250	575	--	41	--	213

x Datos pluviométricos correspondientes al periodo de 1968-1982.

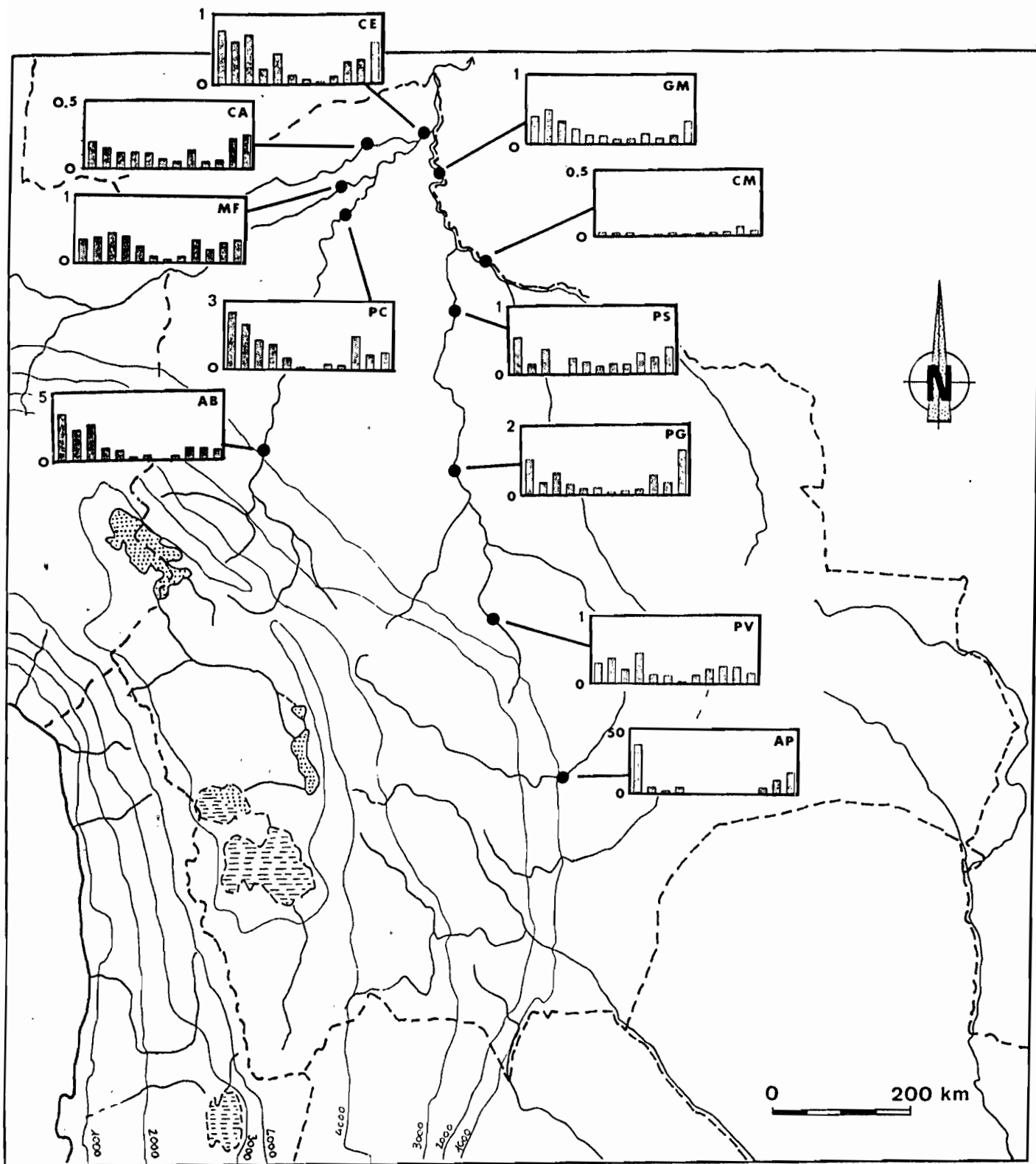


Figura 3 : Distribución estacional de la concentración de materia en suspensión (en g/l) en las estaciones de la red PHICAB para el período 1983-1987. Ver Cuadro 1 para el código de las estaciones.

planicie. A pesar de aportes hídricos diferentes, los flujos de sedimentos medidos a la salida de los Andes en los ríos Alto-Beni y Grande tienen el mismo orden de amplitud, tomando en cuenta las diferencias de concentración. En el caso del río Beni, el volumen de sedimentos exportados a Cachuela Esperanza es próximo al observado en Angosto del Bala. Sólo el 20% de las materias en suspensión parecen depositarse desde el pie de monte de los Andes (Angosto del Bala) hasta el confluente del río Madre de Dios (Portachuelo), situado a 600 Kms río abajo, en la planicie amazónica (Guyot, Calle & al., 1988). En el caso del río Mamoré, más del 50% de los sedimentos originados en los Andes, por el río Grande en particular, no llegan a la estación de Puerto Siles (Guyot, Bourges et al., 1989). Es posible que esta diferencia de comportamiento observada entre los ríos Beni y Mamoré guarde relación con la extensión de las zonas inundadas. Para el período 1983-1987, el aporte de materias en suspensión al río Madera fue estimado en 213,000,000 t/año (Cuadro 1).

La variación estacional de tenores en materia disuelta (Fig. 4), muestra una ligera influencia del régimen hidrológico. A los períodos de aguas bajas corresponden las concentraciones máximas (Roche & al., 1986, 1988). Sin embargo, la débil amplitud de estas variaciones en comparación a las variaciones estacionales del caudal, hará que lo esencial de la exportación de materias disueltas se produzca en período de aguas altas (Guyot, Roche et al., 1988). El conjunto de cursos de agua presentan mineralizaciones inferiores a 500 mg/l y el mismo fenómeno de dilución desde los Andes hasta la planicie amazónica es observado (Guyot, 1986). No obstante, los flujos de materia disuelta aumentan del río arriba hacia el río abajo, traduciendo un aporte en soluciones de la planicie amazónica. Para el período 1983-1987, el aporte de materias disueltas al río Madera fue estimado en 41,000,000 t/año (Cuadro 1), sea 5 veces menos que el de materias en suspensión.

5. Conclusión

Estos resultados, que corresponden al período 1983-1987, permiten una primera estimación tanto de los regímenes hidrológicos como de los balances hídricos y de materias, desde el pie de monte de los Andes hasta la frontera con el Brasil en la planicie amazónica. Esta información será completada mediante la actualización, hasta 1990, de los datos provenientes de la red PHICAB, así como por la utilización crítica de los antiguos datos provenientes de otras instituciones (AASANA, ENDE, SENAMHI).

El conjunto de datos así obtenidos debería permitir a mediano plazo, comprender mejor los fenómenos climáticos e hidrológicos en los Andes y en la planicie amazónica de Bolivia. Finalmente, los balances de materias permitirán apreciar la velocidad de la erosión actual de la cadena andina y evaluar luego las tasas de sedimentación en la planicie amazónica.

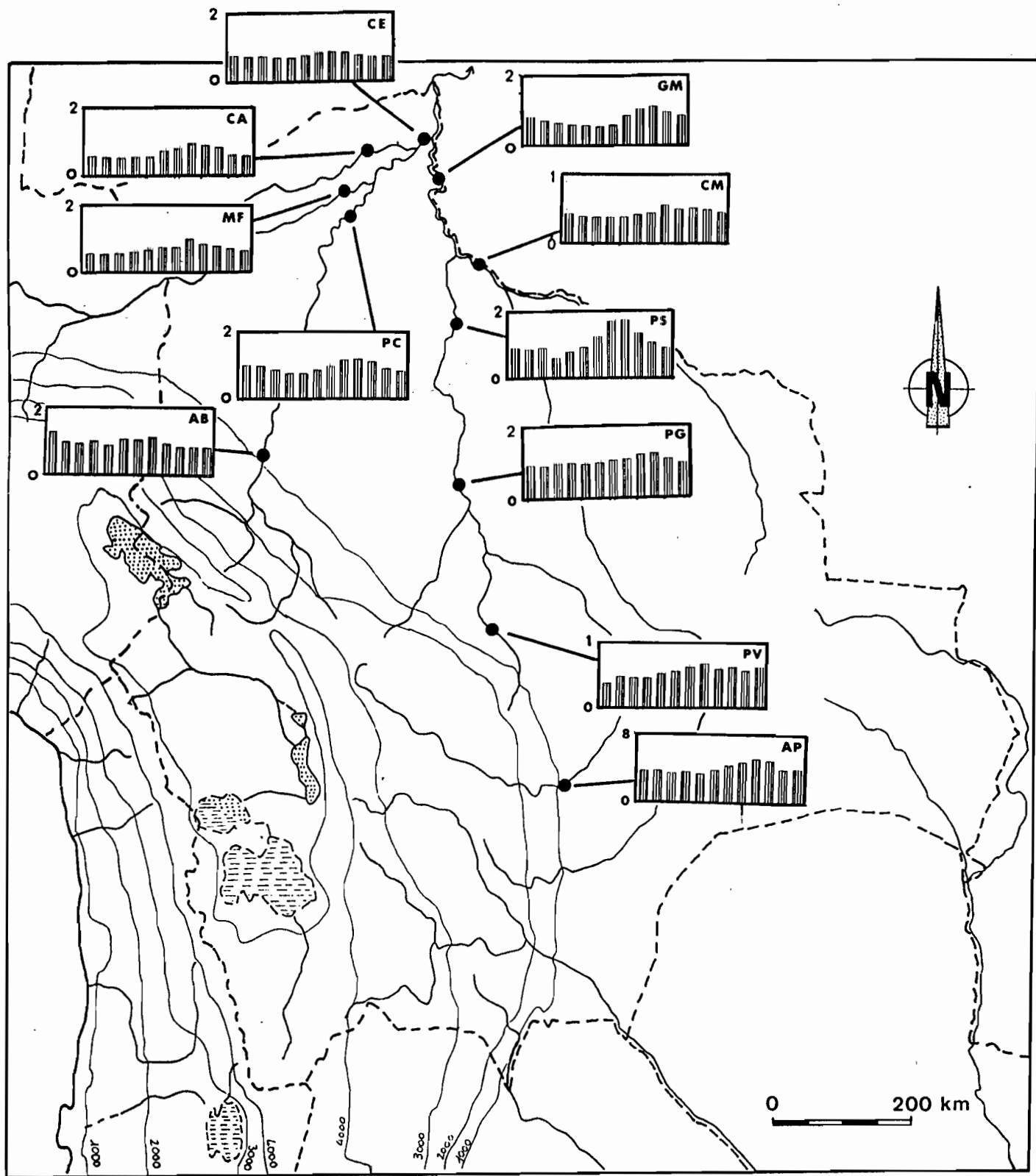


Figura 4 : Distribución estacional de la concentración de materias disueltas (en 10⁻¹ g/l) en las estaciones de la red PHICAB para el período 1983-1987. Ver Cuadro 1 para el código de las estaciones.

Tercer Simposio de la Investigación Francesa en Bolivia
Santa Cruz de la Sierra, Bolivia, Junio 1989

LA INVESTIGACION HIDROLOGICA EN EL BENI :
EJEMPLOS DE APLICACION PARA EL DESARROLLO DE
INFRAESTRUCTURAS Y PREVISION DE CRECIDAS

Jacques BOURGES
ORSTOM, C.P. 8714, La Paz, Bolivia.

La importancia del agua como factor de desarrollo es obviamente conocida en el campo de la infraestructura, la agricultura y la navegación. El estudio de recursos hídricos, en la perspectiva de su explotación o de protección contra las inundaciones, exige la previa observación de un cierto número de estaciones hidrométricas que permitan la evaluación de dichos recursos y el conocimiento de su variación espacio-temporal.

La ubicación de estas estaciones es sumamente importante, porque debe tomar en cuenta la representatividad de la cuenca, las ramificaciones de la red hidrográfica y, en lo posible, permitir un control recíproco de las estaciones a través de las relaciones río arriba o río abajo.

La red hidrométrica boliviana es observada por el SENAMHI en la parte andina hasta la llanura (115 estaciones) y, por el proyecto PHICAB, en la planicie amazónica desde el pie de los Andes hasta la formación del río Madera; 15 estaciones hidrométricas están instaladas en esta zona de 750,000 Km² (Figura 1) que representa mas de 80% de la superficie de la cuenca del río Madera a Villabella y los 3/4 del territorio nacional.

Todas estas estaciones son controladas por observadores permanentes que cumplen sus funciones con relativa seriedad. En algunos casos, el seguimiento de las observaciones es llevado a cabo por un aparato automático, llamado limnógrafo, que utiliza flotador o toma de presión como medio para medir los niveles de agua. Tiene la ventaja de no falsear las lecturas de escala y de realizar medidas continuas.

Frecuentemente, la necesidad de poseer datos en tiempo real ha hecho que se extienda la teletransmisión, radio o satélite, que presenta la ventaja - fuera del hecho de disponer de una radioscopia inmediata y completa de la red en cualquier momento - de generar costos de explotación inferiores a los de una red clásica, ya que evita visitas sistemáticas de control (Bourges, 1986). Bolivia, se está dotando de dicha red, en el marco de un proyecto de asistencia de la CEE.

Además de la observación permanente de los niveles de los ríos, es necesario formar comisiones para el mantenimiento de la red y, sobre todo, para realizar las medidas de caudal que permitirán establecer las calibraciones y, de esta manera, obtener los caudales diarios e instantáneos.

En vista de que los fenómenos no pueden ser predichos, se debe disponer - para preverlos - de extensas series de medidas que permitan un enfoque estadístico o sistemático. Este enfoque constituye la base de todo proyecto en el cual intervenga el factor agua. Diez años de observación pueden constituir un período mínimo para sentar las bases de un proyecto serio.

La puesta en funcionamiento y la explotación de una red, constituyen por lo tanto una primera etapa, anterior e indispensable a las fases posteriores de los estudios, que debe iniciarse varios años antes que los primeros pre-proyectos de desarrollo.

Después de haber definido lo que es una red hidrométrica y de haber demostrado su necesidad, corresponde describir algunas de las aplicaciones prácticas en los departamentos de Santa Cruz y Beni : estudio del proyecto de represas hidroeléctricas y la previsión de inundaciones en Trinidad.

I. APLICACION A LOS ESTUDIOS DE REPRESAS

Sobre el río Beni, se han elegido dos sitios para represas : uno ubicado a la salida de los Andes, río arriba de Rurrenabaque, en Angosto del Bala, objeto de estudio en curso con el IHH y el SENAMHI. Otro, ubicado sobre el río Beni, antes de la confluencia con el río Mamoré, en el sitio de los rápidos de Cachuela Esperanza, cuyo interés inmediato reside en el aprovisionamiento de energía a las poblaciones de Guayaramerin y Riberalta, y a su exportación hacia el Brasil.

En este caso, el proyecto del cual se habló últimamente en los acuerdos entre Bolivia y Brasil, no dispone más que de 26 meses completos de observación para el período 1980-1984 y de cuatro años completos de 1985 a 1989, lo que resulta insuficiente para poder establecer directamente las características útiles al proyecto de la presa.

La ventaja de una red bien estructurada consiste en poder ampliar el período de estudio a partir de observaciones hechas en otras estaciones. En el presente caso, sobre la base de los caudales de Guayaramerin en el río Mamoré y de Abuna sobre el Madera (Figura 3), tomando en cuenta el desfase debido al tiempo de propagación de las crecidas, se han podido recrear las observaciones que faltaban o defectuosas, y reconstituir las crónicas de caudal diario desde 1976.

Una comparación de los caudales mensuales así deducidos y de los caudales directamente medidos permite observar una diferencia inferior a 7% (Bourges, 1987).

Un rápido examen de los módulos calculados sobre el año hidrológico, de Octubre a Septiembre, traduce (Figura 2) la aparición de un ciclo más húmedo a partir de 1980-1981, ciclo que parece terminar rápidamente. Claramente, este periodo húmedo aparece también en la cuenca del Mamoré a partir de 1981-1982 (Bourges & al., 1987) y manifiesta la misma tendencia a decrecer.

Para juzgar mejor la hidraulicidad de este sitio y la regularidad interanual de los aportes, hemos realizado un examen estadístico de los caudales medios anuales calculados sobre el año civil y el año hidrológico, es decir de Octubre a Septiembre, a fin de no separar artificialmente los aportes anteriores y posteriores al 1ro de Enero. Los aportes característicos son :

Cuadro 1 : aportes anuales (km³)

	Año hidrológico	Año civil
Aporte promedio	270,6	268,5
Aporte centenal(Hm)	378,4	394,2
Aporte centenal(S)	160,8	145,1
Coefficiente de variación	0,42	0,37

Esta distribución denota una variabilidad bastante fuerte que puede requerir, para una utilización óptima de los recursos, una regulación interanual de los aportes (Bourges, 1988).

1) En caso de regulación interanual : si en la represa de Cachuela Esperanza, supuestamente llena, se realiza una simulación de su funcionamiento en el período 1976-1987, sin tomar en cuenta en una primera aproximación la evaporación estimada de 1400 mm/año (Roche & al., 1986), se verán en el gráfico de los aportes acumulados (Figura 4) las variaciones estacionales y anuales. La clara desviación de la curva a partir de 1981, debida al período más húmedo ya señalado, se traducirá en importantes vertimientos.

En el caso óptimo, la regulación interanual permitirá explotar lo mejor posible las potencialidades hidroeléctricas de este sitio y se podría disponer de un caudal de 8,200 m³/s. Sin embargo, esto implica la construcción de una represa de más de 150 Km³ de volumen útil. A pesar de esto, después de 1981, se debería vertir en promedio 1,500 m³/s. Dicha represa es inconcebible en

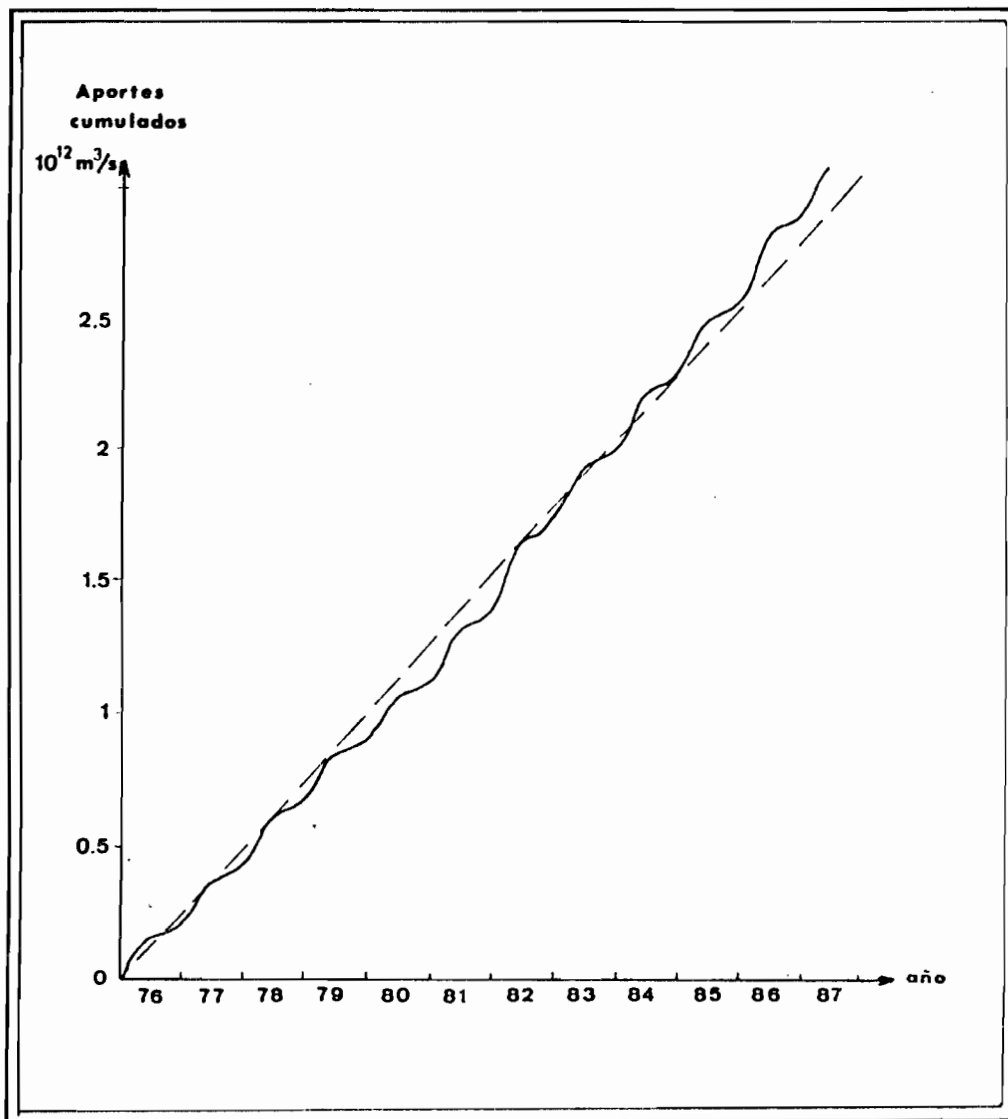


Figura 4 : Cronica de caudales acumulados en Cachuela Esperanza, desde 1976.

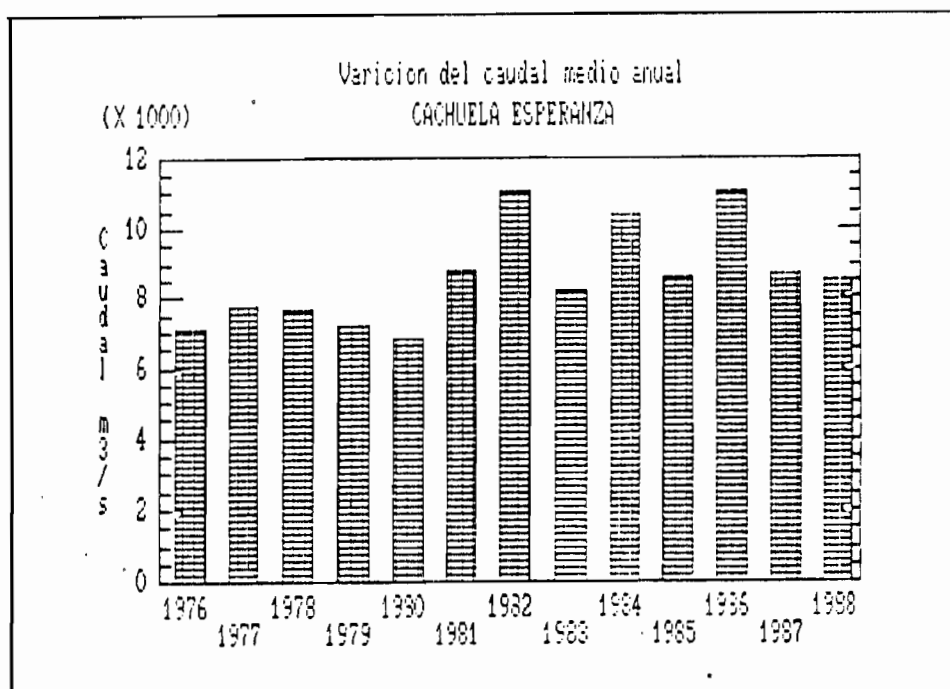


Figura 5

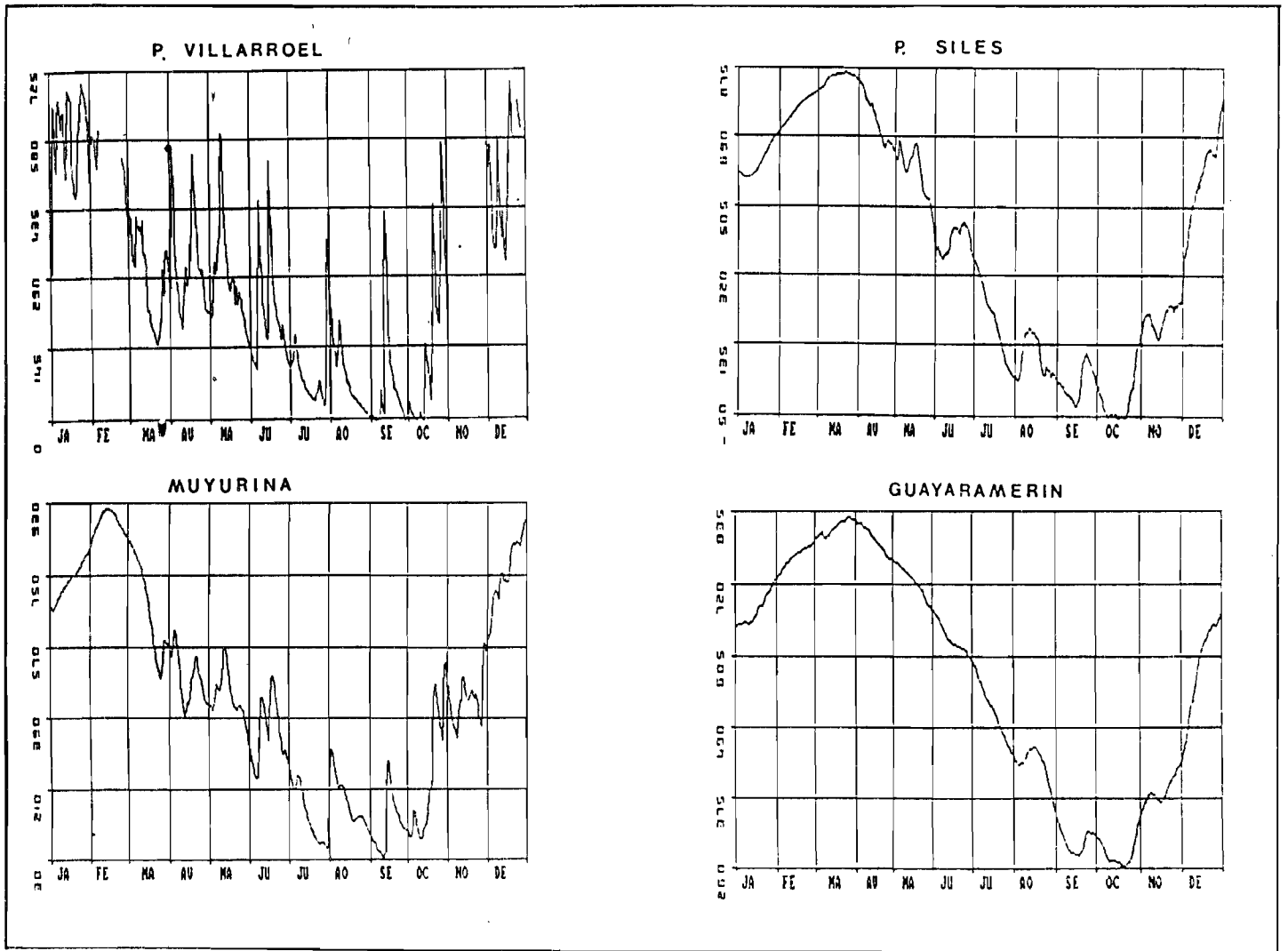


Figura 6 : Limnigramas del año 1987 en las 4 estaciones del Río Mamore.

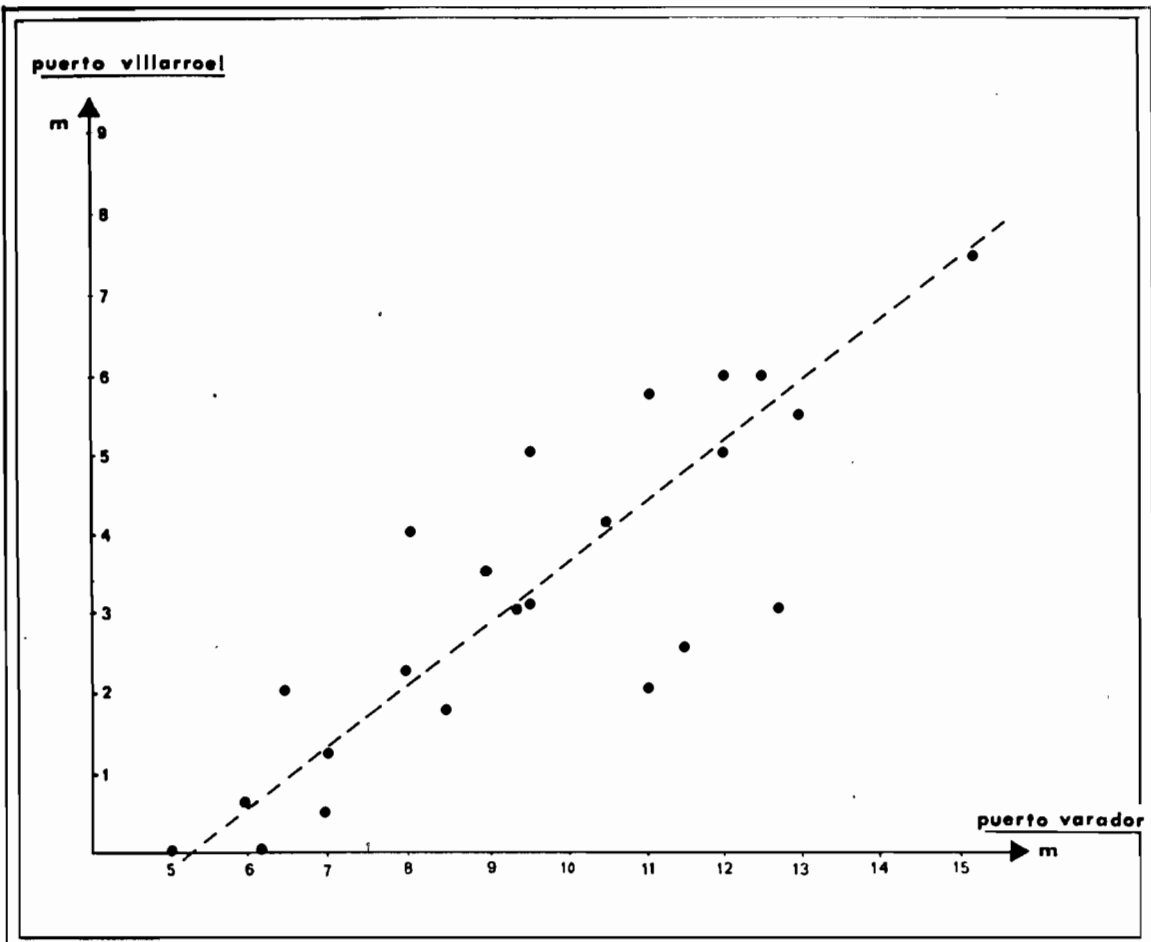


Figura 7 : Corelación de alturas Puerto Varador - Puerto Villarroel.

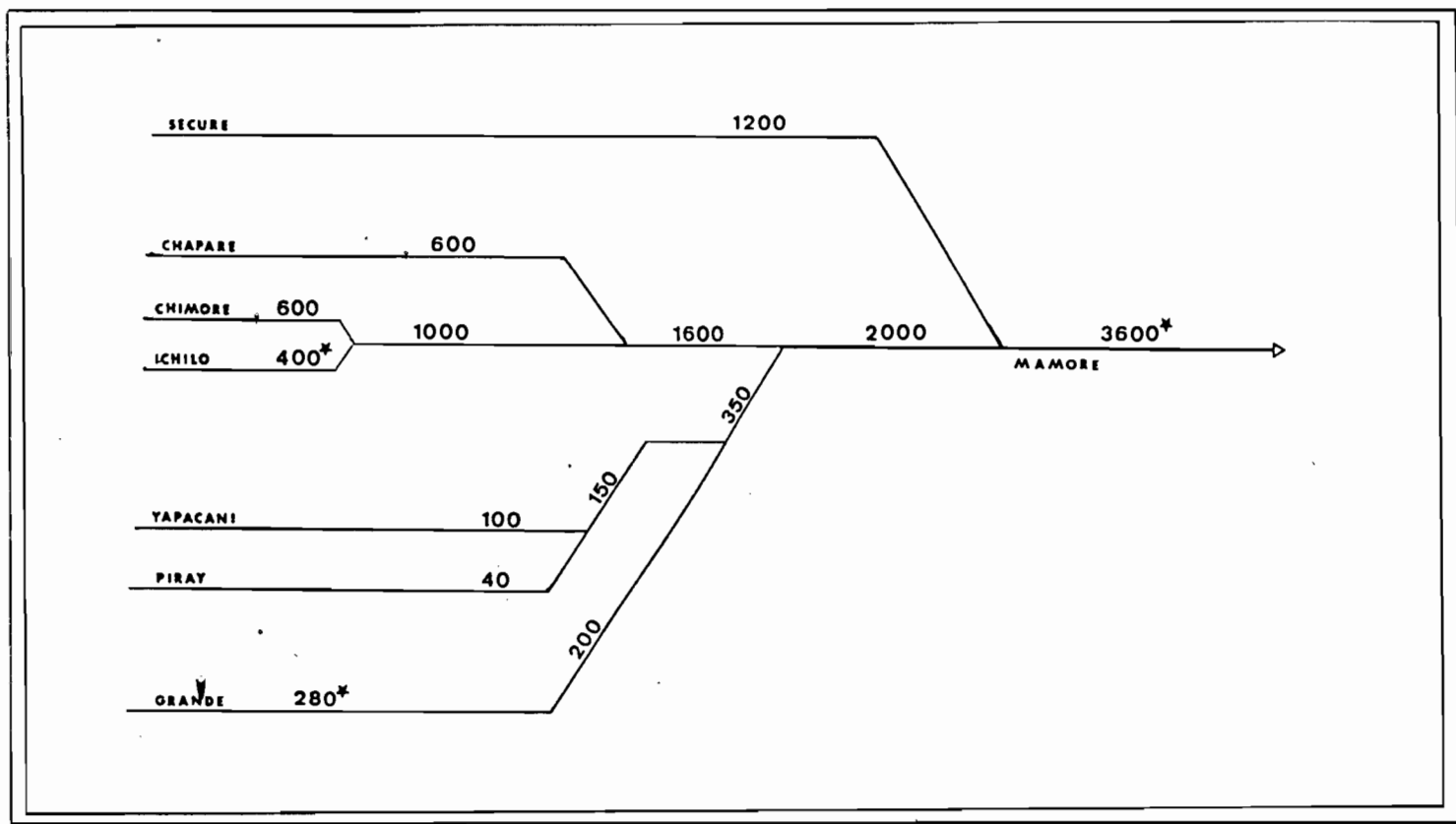


Figura 8 : Aportes medios (m³/s) del sistema Mamore-Grande y cuencas andinas a Trinidad. Los datos con (*) son datos medidos, los otros son datos estimados.

La velocidad de propagación en estos dos tramos se situa entre 1 a 2 m/s según el nivel del agua. Es relativamente débil, limitada por la pendiente (de alrededor 4 cm/Km) como lo muestra el trayecto bastante sinuoso del río.

Río abajo de Trinidad, las velocidades de propagación disminuyen. Una crecida requiere de 5 a 6 días para llegar a Puerto Siles, generando una velocidad de 0,5 a 1 m/s. Sin embargo aguas abajo, los importantes y regulares aportes de los ríos del llano (Itenez, Yata...) y la regularización de las crecidas, ya no permiten calcular el tp, pero sin embargo se lo puede estimar, a la altura de Guayaramerin, en 20 días.

Para preveer las inundaciones en la región de Trinidad, basta establecer una relación entre los niveles del agua en Puerto Villarroel o Muyurina y Trinidad.

En la Figura 7 se ve que el ploteo de las alturas correspondientes a Puerto Villarroel y Trinidad pone en evidencia una mala correlación entre estos dos parámetros, lo que se explica por la diferencia de tamaño de las cuencas vertientes (8,350 Km² con respecto a 147,000 Km²) y por la gran variación de las alturas de agua en Puerto Villarroel.

En Muyurina, la correlación es mejor pero el plazo de previsión es muy corto y el método resulta, impreciso. El elemento más aplicable a este caso es el modelo matemático asociado a una red de teletransmisión. La ORSTOM ha desarrollado un modelo, basado en la propagación en función de las características hidráulicas de la red (modelo LAMAGAT), que ya dió pruebas de su eficacia en otros países. En lo que se refiere a la red, se preveen 3 casos :

1. En el diagrama de aportes, estimados o medidos, de la red Mamoré (Figura 8) resulta que la contribución más importante es asegurada por el eje Ichilo-Mamoré-Chapare. Por lo tanto, instalando una estación hidrométrica en Mamorecillo con teletransmisión por satélite ARGOS, del tipo de las perfeccionadas por la ORSTOM, y otra en Santa Rosa, sobre el Securé, se controla el 85% de los caudales con un plazo de anuncio de dos días (Figura 9).

Dada la proximidad y la similitud de las cuencas vertientes del Securé y del Chapare-Chimoré, la estación de Mamorecillo puede ser representativa para el uso en el conjunto de cuencas, de origen andino y muy regadas.

2. Una segunda opción, proporcionando un tiempo de previsión de 3 a 4 días pero con una precisión menor, se basaría en tres estaciones : Puerto Villarroel (recientemente equipada con una estación de teletransmisión), Villa Tunari y Santa Rosa (Figura 9).

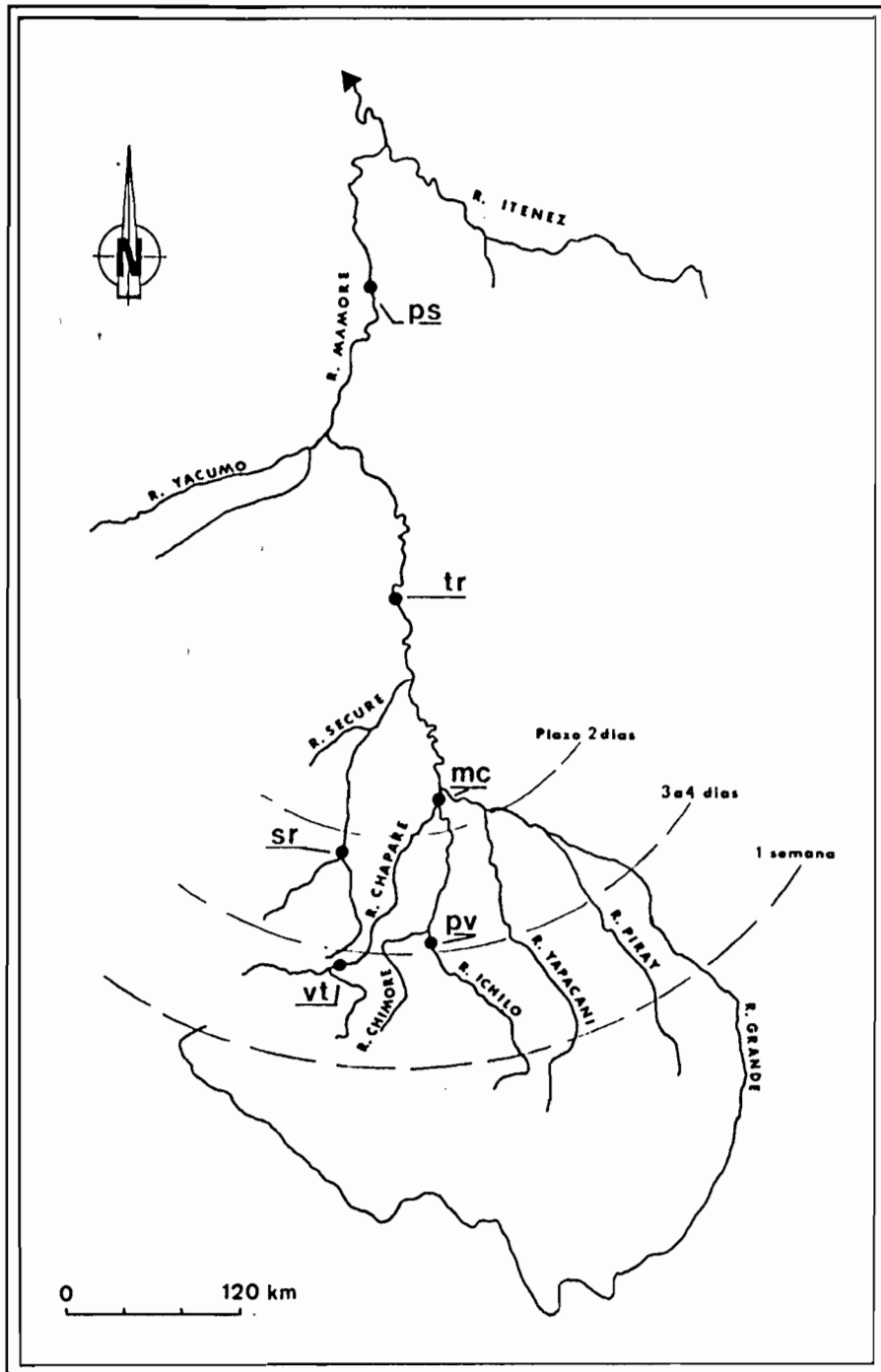


Figura 9 :
 Previsión de crecidas, aguas arriba de Trinidad. Ubicación de las estaciones de alerta y opciones posibles. ps = Puerto Siles, tr = Trinidad (Puerto Varador), mc = Mamorecillo, pv = Puerto Villarroel, vt = Villa Tunari, sr = Santa Rosa.

¶ 3. La tercera opción, basada en una red de pluviógrafos a teletransmisión, y bajo un modelo diferente, deja un plazo más largo pero menos preciso aún. Además, resulta más costoso, ya que requiere de un número más elevado de estaciones.

En el actual contexto de Bolivia, las dos primeras opciones pueden ser fácilmente llevadas a cabo, sin utilizar demasiados medios. Se accede fácilmente por carretera a estaciones como Puerto Villarroel y Villa Tunari que ya están, en parte, equipadas. Mamorecillo podría ser integrada a la actual red del PHICAB. Sólo Santa Rosa, que se halla aislada en el río Securé que es poco transitado, resultaría difícil de explotar.

Referencias

- ABASTO N (1987). Balance hídrico superficial de la cuenca del Rio Madre de Dios, Amazonia, Bolivia, Perú. PHICAB : CONAPHI, IHH-UMSA, ORSTOM, SENAMHI. Tesis UMSA, La Paz, 295 p.
- ABASTO N, HOORELBECKE R, ROCHE MA & al. (1985). Características y calibración de la red hidrométrica PHICAB en la cuenca amazónica de Bolivia. PHICAB : ORSTOM, SENAMHI, 120 p.
- BOURGES J (1986). La red hidrométrica del PHICAB y los primeros resultados obtenidos. Premier Symposium de la Recherche Française en Bolivie, La Paz, Sept. 1986 : 37-43.
- BOURGES J (1987). Projet de Cachuela Esperanza. Etude sommaire des apports. PHICAB : ORSTOM, SENAMHI, 20 p.
- BOURGES J (1988). Necesidad de una red hidrométrica para el desarrollo. Aplicación al embalse de Cachuela Esperanza. Deuxième Symposium de la Recherche Française en Bolivie, La Paz, Avril 1988 : 90-97.
- BOURGES J, CORTES J, HOORELBECKE R (1987). Etude des débits du Mamoré à Guayaramerin. PHICAB : ORSTOM, SENAMHI, 29 p.
- CRUZ C (1987). Balance hídrico superficial de la cuenca del Rio Itenez, Amazonia, Bolivia, Brasil. PHICAB : CONAPHI, IHH-UMSA, ORSTOM, SENAMHI. Tesis UMSA, La Paz, 218 p.
- ESPINOZA O (1985). Balance hídrico superficial de la cuenca del Río Beni, Amazonia, Bolivia. PHICAB : IHH-UMSA, ORSTOM, SENAMHI. Tesis UMSA, La Paz, 181 p.
- GARCIA WA (1985). Balance hídrico superficial de la cuenca del Rio Mamoré, Amazonia, Bolivia. PHICAB : IHH-UMSA, ORSTOM, SENAMHI. Tesis UMSA, La Paz. 110 p.
- GUYOT JL (1986). Evolución en el espacio y el tiempo de las concentraciones de materia en solución y en suspensión de las aguas de la cuenca amazónica de Bolivia. Premier Symposium de la Recherche Française en Bolivie, La Paz, Sept. 1986 : 48-53.
- GUYOT JL, BOURGES J, HOORELBECKE R, ROCHE MA, CALLE H, CORTES J (1989). Transports of suspended sediments to the Amazon by an andine river : the Mamore river, Bolivia. IRTCES international Symposium on River Sedimentation, Beijing, November 1989.

