

HIDROLOGIA DE LA CUENCA AMAZONICA BRASILEIRA: HIBAM

PRIMEROS RESULTADOS SOBRE LA CUENCA DEL RIO MADEIRA

*Michel MOLINIER⁽¹⁾, Jean Loup GUYOT⁽¹⁾, Jacques CALLEDE⁽¹⁾
Eurides de OLIVEIRA⁽²⁾, Valdemar GUIMARAES⁽²⁾
Kazimierz Josef CUDO⁽²⁾ y Moacyr C. de AQUINO⁽²⁾*

(1) ORSTOM, CP 09747, 70001-970, Brasilia DF, Brasil.

(2) CTRH/DNAEE, Ministerio de Minas y Energía, 70000 Brasilia DF, Brasil

INTRODUCCION

Para atender las recomendaciones de los seminarios sobre el balance hídrico de América del Sur (La Paz 1987) y, más específicamente, de la región amazónica (Manaus 1988), en el ámbito del proyecto internacional UNESCO/PNUD (RLA-06/86), como responsable, a nivel federal, del Sistema de Informaciones Hidrometeorológicas, la Coordinación General de Recursos Hídricos (CGRH) del Departamento Nacional de Aguas y Energía Eléctrica (DNAEE), presentó, para los países miembros del Tratado de Cooperación de la Amazonia, una propuesta Brasileira (DNAEE 1988) de Balance Hídrico Superficial de la Cuenca Amazónica. Desde 1990, en colaboración con l'Institut français de recherche scientifique pour le développement en Coopération (ORSTOM), el CGRH inició un programa sobre el Balance Hídrico de la Amazonia con objeto de realizar una evaluación cuantitativa espacial y temporal de los recursos hídricos de la cuenca hidrográfica amazónica.

Con el fin de establecer una contabilidad a nivel nacional y continental, el proyecto tomó como base de referencia principal el documento "Guía metodológica para la elaboración del balance hídrico de América del Sur" (UNESCO-ROSTLAC-1992), y como banco de datos el Micro-Sistema de Datos Hidrometeorológicos del DNAEE (MSDHD) que abarca cerca de 1000 estaciones pluviométricas de las cuales 320 son operadas por el DNAEE, 321 estaciones pluviométricas localizadas en la región amazónica (219 operadas por el DNAEE) y 40 estaciones climatológicas como depósito evaporimétrico pertenecientes al DNMET para la totalidad de la región amazónica brasileira.

Este trabajo presenta los resultados obtenidos en la parte brasileira de la cuenca del Río Madeira (1 420 000 km², de los cuales 580 000 km² están en territorio brasileiro - figura 1), donde fue efectuado un estudio detallado, a nivel mensual, de los principales términos del balance hídrico.

METODOLOGIA

Ecuación del balance hídrico

Como se menciona arriba, la metodología elaborada sigue las recomendaciones hechas por la UNESCO en su guía de 1982. La meta es evaluar los principales límites de la ecuación simplificada del Balance Hídrico superficial. Para grandes períodos de tiempo y grandes áreas de drenaje la ecuación tiene la siguiente fórmula:

$$[P] = [LE] + [ETR] + B$$

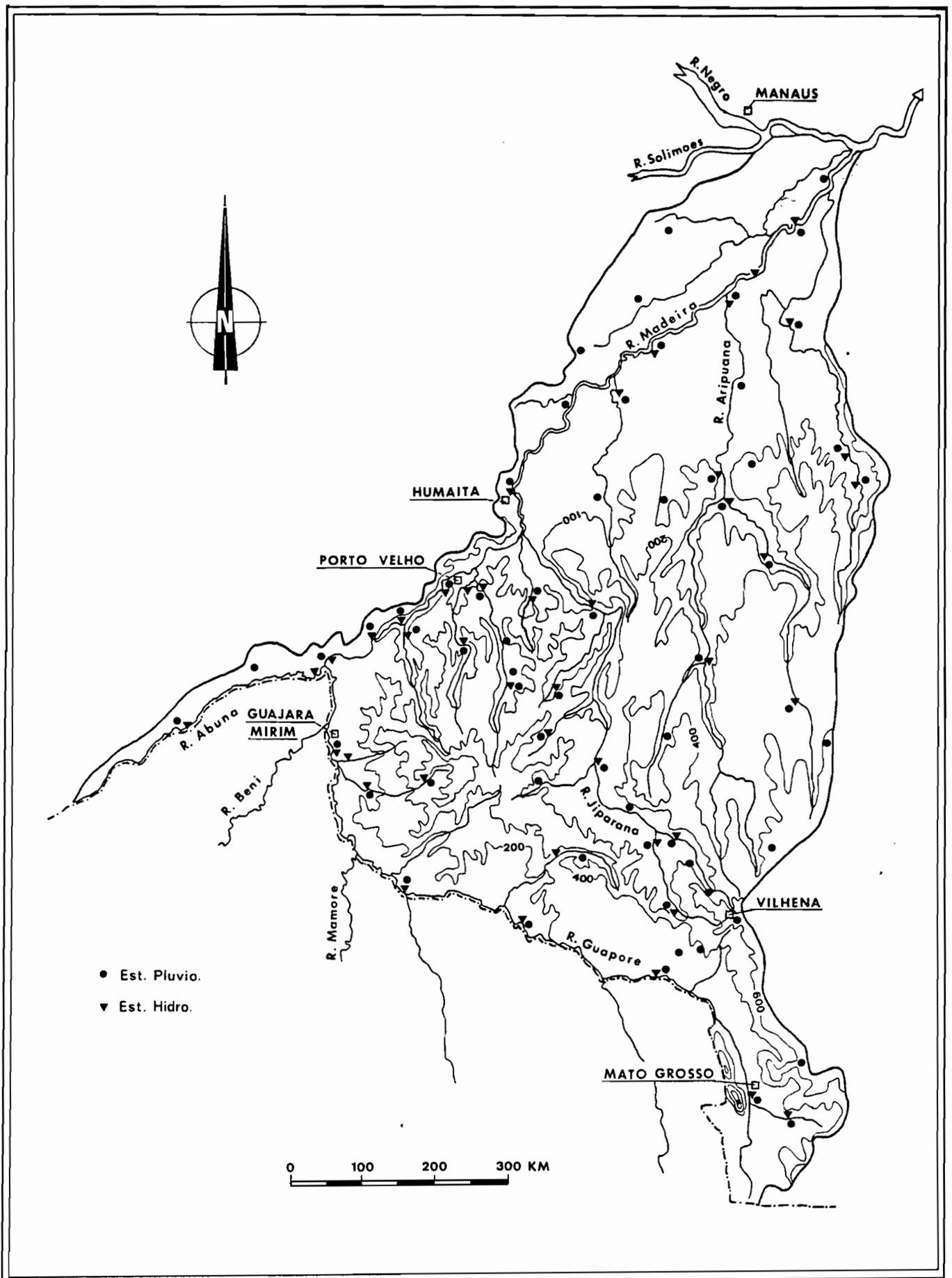


Figura 1 : Cuenca brasileña del río Madeira

- como [P] = Precipitación media del período y del área considerada;
 [LE] = Lámina media escurrida del mismo período y de la misma área;
 [ETR] = Evapotranspiración Real del mismo período y de la misma área;
 B = Término de discrepancia

El símbolo "[]" indica una media espacial horizontal de largo período y la barra "-" la media temporal de largo período. El término (termino de discrepancia "B" el término residual que representa el error de estimación o de medición, permite comparar los valores calculados del Déficit Hídrico ([P] - [LE]) con una Evapotranspiración Real ([ETR]) estimada a partir de las fórmulas empíricas. Los valores bajos de B indican que los términos del balance hídrico tienden a compensarse.

Homogeneización de los datos

Después de analizar los datos hidropluviométricos del Banco de Datos del microsistema MSDHD del DNAEE, la consistencia fue hecha a través del Método del Vector Regional (MVR) desarrollado en ORSTOM por Hiez (1977).

El "Vector Regional" es una serie cronológica, sintética de índices pluviométricos o fluviométricos anuales o mensuales, procedentes de la extracción, por un método de máxima semejanza, de la información "más probable" contenida en los datos de un conjunto de estaciones de observación, agrupadas por región considerada como homogénea en lo que respecta a pluviometría o a fluviometría.

Esta definición se apoya en dos principios fundamentales:

- en el de la "pseudo-proporcionalidad" de los totales anuales o mensuales entre puestos vecinos. Esto es, debe coincidir entre datos anuales o mensuales en las series agrupadas, independientemente de la abundancia pluviométrica o fluviométrica;
- la información "más probable" es la que se repite con mayor frecuencia.

Además de estos dos principios, conviene agregar algunas hipótesis complementarias:

- la elaboración del Vector no parte de ninguna hipótesis en cuanto a distribución estadística de datos;
- dentro del agrupamiento regional de estaciones, no debe existir ninguna variación sensible de tendencia climática ("región homogénea");
- cualquier medición hidroclimatológica, por naturaleza puntual en el espacio y en el tiempo, debe estar sujeta a error y, por lo tanto, no debe servir de referencia para rellenar lagunas de otra estación;
- con todo se admite que la información globalmente proporcionada para el conjunto de las estaciones contiene un valor estimativo más representativo que aquel proporcionado aisladamente por cualquiera de las estaciones;
- consecuentemente, toda la información contenida en cada una de las estaciones contribuye en la elaboración del vector, sin que los datos erróneos puedan tener una influencia sensible sobre el resultado.

El método del Vector regional se basaba esencialmente:

- sobre la elección de una estimación del modo, sin tomar en consideración la forma de las funciones de distribución;
- sobre un proceso de extracción del vector de referencia, por interacciones sucesivas sobre las líneas (año o mes) y columnas (puesto pluviométrico) de la matriz de datos.

El producto de este procesamiento es una secuencia de índices representativos de los eventos hidroclimatológicos ocurridos más frecuentemente en la región considerada, abarcando la totalidad del período de observación de un conjunto de puestos.

El gran poder informativo del "Vector Regional" se revela sobre dos aspectos distintos:

- como instrumento de síntesis: ésta constituye un resumen de la crónica hidroclimatológica de cada región homogénea, libre del "ruido" inherente al proceso de adquisición de datos o debido a una anomalía climática localizada en un punto de medición;
- como instrumento de análisis potencial: es el mejor referencial disponible en la crítica de los datos observados, estación por estación.

DATOS DISPONIBLES

Pluviometría

Homogenización

A fin de analizar de manera más completa la pluviometría, fueron reunidos todos los datos de las estaciones pluviométricas de la cuenca del río Madeira, así como de las estaciones más próximas de las cuencas vecinas. Al principio, sólo fueron tomadas en cuenta las estaciones brasileras. Una primera crítica llevó a eliminar algunos puestos con datos insuficientes o dudosos. Así quedaron 140 estaciones, para las cuales fue aplicado el Método del Vector Regional a nivel mensual. La elección de 10 regiones elementales proporcionó 10 vectores regionales. Esta primera homogeneización permitió detectar y (desprezar) otras series dudosas y, entonces, elaborar la tendencia pluviométrica regional de cada zona elemental y, así, agrupar dichas zonas en regiones homogéneas de superficie mayor. Al final sólo se conservaron 47 estaciones pluviométricas para la parte brasileras de la cuenca. Gracias a los datos proporcionados por el SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología) de Bolivia, el número total de puestos considerados como de buena calidad es de 65.

Finalmente, la cuenca fue cubierta con tres vectores regionales representando las tendencias pluviométricas de cada gran zona de la región estudiada.

Período de estudio

El período de homogeneización varía en función de las series observadas. Así, desde la frontera Brasil-Bolivia hasta el Río Amazonas fue posible generar vectores con un período continuo, sin lagunas, desde 1943 hasta 1988. De este modo, las series mensuales y anuales de cada estación de esas regiones, son completas para estos 46 años. Lamentablemente, no fue posible conseguir series con el mismo período para otras zonas de la región estudiada. En realidad, el límite fue definido por los datos pluviométricos. En efecto, siendo la meta de este trabajo calcular los componentes del balance hídrico, es imprescindible que el período de estudio sea el mismo para cada uno de los componentes. Como se expone en el párrafo a seguir (Esguerramiento), el mayor período común de homogeneización para la pluviometría fue de 15 años (1973-1987). Consecuentemente, el mismo período fue observado para la pluviometría.

Trazado de las isoyetas

Los resultados obtenidos son utilizados para calcular la pluviometría media mensual y anual de cada cuenca y subcuenca por el método de los polígonos de Thiessen y para trazar las curvas isohietas. La figura 2 presenta la isohietas anuales obtenidas para el período 1973-1987. En la parte brasileras de la cuenca, la pluviometría anual es gradualmente creciente en el sentido sur-norte.

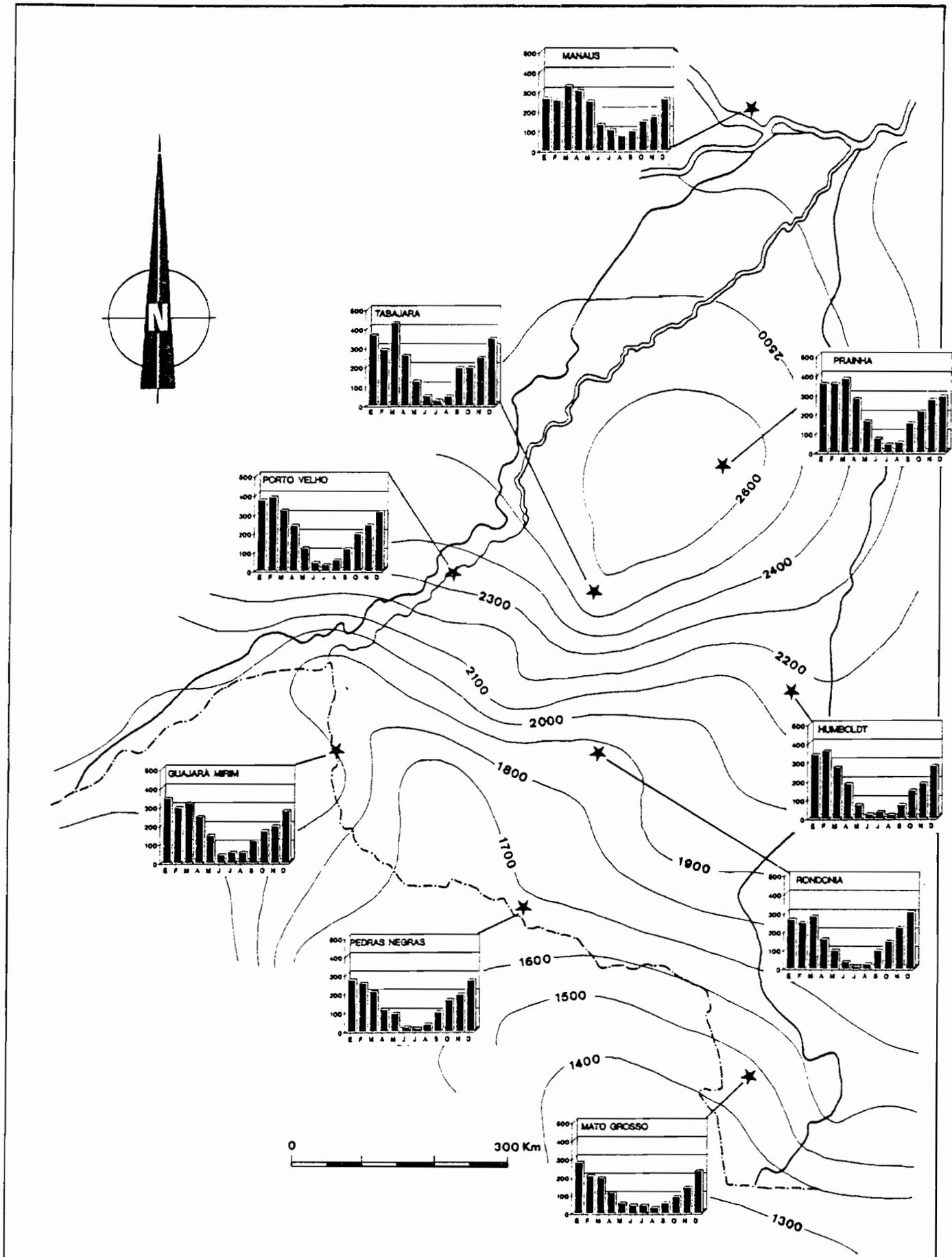


Figura 2 : Pluviometria média anual de la cuenca brasileña del rio Madeira

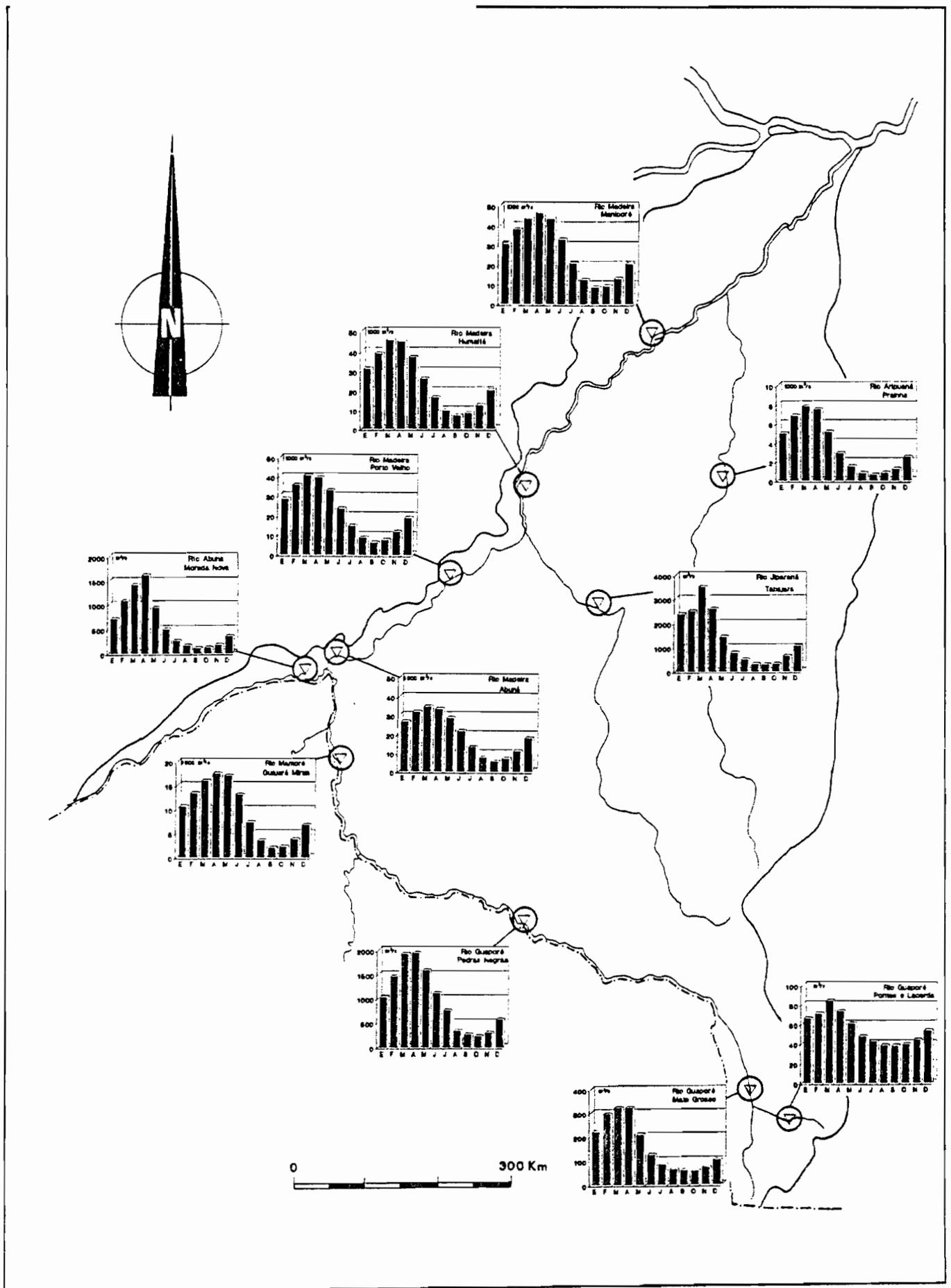


Figura 3 : Régimen hidrológico de la cuenca brasileña del rio Madeira

Escurrimiento

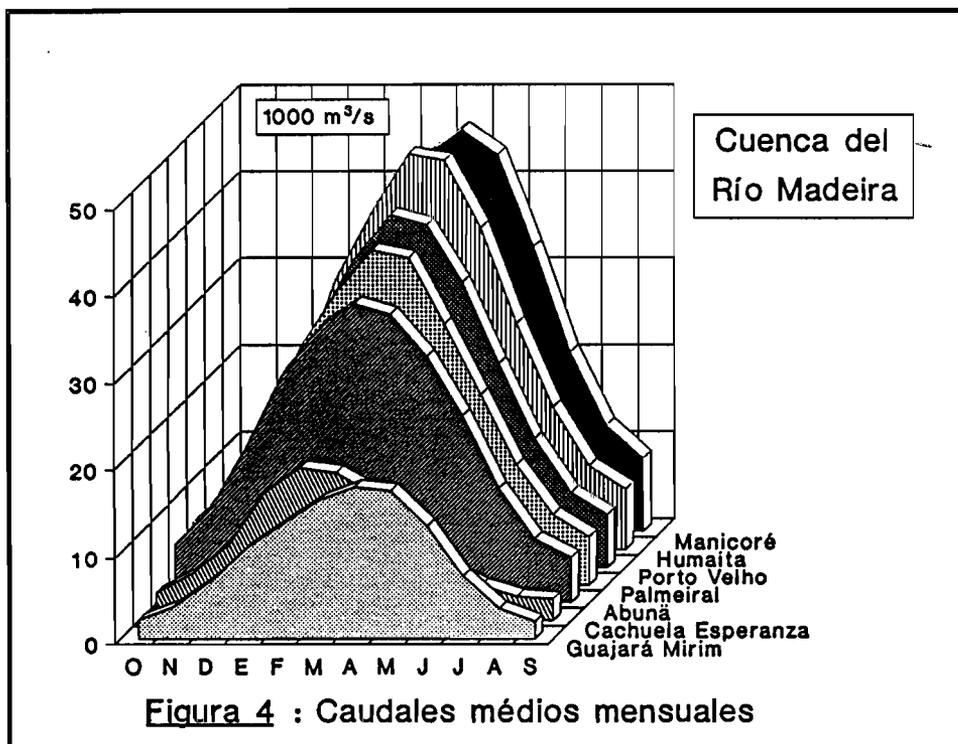
Homogeneización

El análisis del escurrimiento de las cuencas fue realizado de manera idéntica al de la pluviometría. Evidentemente, sólo fueron tomadas en cuenta las estaciones con observaciones limnimétricas y mediciones de descargas, y con una curva de calibración de buena calidad. El total de estaciones fluviométricas correspondiendo a este criterio fue de 27.

Un primer procesamiento del Vector Regional fluviométrico a nivel mensual sobre las láminas escurridas permitió generar 3 vectores, uno aguas arriba, uno aguas abajo y uno intermedio y, así, descartar tres estaciones dudosas o sin datos suficientes. Al final quedaron 24. El área de drenaje de las otras estaciones varía entre 946 km² (río Pacaas Novas en Seringal Sao Luiz) y 1 124 000 km² (río Madeira en Manicoré).

Pluviometría medida por subcuenca

La pluviometría media de cada una de las 24 subcuencas fue calculada por el método de los polígonos de Thiessen, utilizando los resultados obtenidos durante el procesamiento de la pluviometría sobre los 65 puestos. El resultado final es una tabla de 4320 valores mensuales para los 15 años y las 24 estaciones. Este cuadro, junto con el cuadro de la fluviometría, fueron utilizados para calcular el déficit medio mensual de cada subcuenca como se presenta más abajo en el párrafo 5.



Regimen hidrológico

El régimen hidrológico del río Madeira parece bastante homogéneo en su parte brasilera (figura 3), desde la frontera con Bolivia hasta su confluencia con el río Amazonas. La influencia de los Andes y de las grandes zonas de inundación cruzadas por sus tributarios en Bolivia es predominantemente en la composición del régimen hidrológico en territorio brasilero. De Abuna (900 000 km²) a Humaitá (1 066 000 km²) el mes con el escurrimiento más importante es el mes de marzo (figura 4). En Abuna el régimen del río Madeira es el resultado de los regímenes del río Beni (máximo en

febrero) (Bourges, 87; Bourges et al., 87) y del río Mamoré (máximo en abril). En Manicoré, el mes más abundante es el mes de abril debido al tiempo de propagación de la crecida anual y a causa de la gran extensión de las zonas de inundación (Roche y Fernández, 82).

BALANCE HIDRICO

Como ya fue mencionado arriba, la evaluación de los términos del balance hídrico superficial de algunas estaciones de la cuenca del río Madeira (cuadro 1 y figura 5) fue efectuada en 15 años (1973-1987) de acuerdo con la ecuación [1]. Con este período, el déficit hídrico medio anual (**Déf**) puede ser asimilado a la evapotranspiración real (**ETR**). En la totalidad de la cuenca el escurrimiento medio anual es de 693 mm (31 200 m³ s⁻¹) (Molinier, 92), con una pluviometría media anual de 1 820 mm se puede estimar la evapotranspiración real a 1 127 mm. En lo que respecta a la parte brasilera de esta cuenca (580 000 km²) el escurrimiento es del mismo orden (700 mm o sea 12 870 m³ s⁻¹), pero con un valor de la pluviometría medio anual más elevado, que proporciona un déficit hídrico (o evapotranspiración real) de 1 350 mm. Dicho valor corresponde al valor de la ETR (1 368 mm) calculada para la cuenca vecina del río Purus (Molinier et al., 1991) cuya casi totalidad de superficie (370 000 km²) está situada dentro del territorio brasilero.

Cuadro 1: Balance Hídrico de la cuenca del Río Madeira

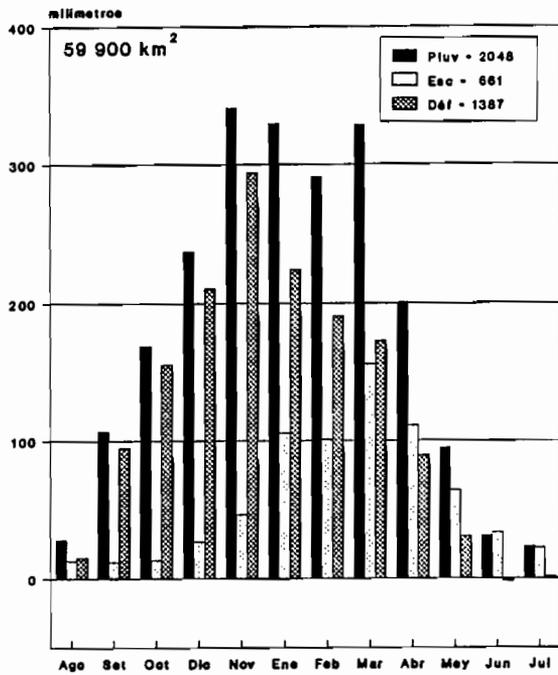
Río	Estación	Area de drenaje (km ²)	Pluviometría media (mm)	Escurrimiento medio (mm)	Déficit hídrico (mm)	Coef. de escurrimiento (%)
Guaporé	Mato Grosso	18 400	1 482	225	1 257	15
Guaporé	Pedras Negras	109 800	1 544	254	1 290	16
Mamoré	Guajará Mirim	589 500	1 410	463	947	32
Madeira	Abunã	900 000	1 566	659	907	42
Madeira	Palmeiral	936 800	1580	667	913	42
Madeira	Porto Velho	954 300	1 589	685	904	43
Jiparaná	Tabajara	59 900	2 048	661	1 387	32
Aripuanã	Prainha	108 600	2 131	1 010	1 121	47
Madeira	Humaitá	1 066 000	1 653	680	973	41
Madeira	Manicoré	1 124 000	1 696	692	1 004	40
Madeira	Confluência	1 420 000	1 820	693	1 127	38
Madeira	Brasil	580 000	2 050	700	1 350	34

Una primera tentativa de regionalización de las descargas efectuadas con los datos de la cuenca del río Madeira junto con los resultados obtenidos en la cuenca del río Purus, sobre una muestra de 49 valores de caudales medios anuales, evidenciaron el papel predominante del área de drenaje de la cuenca. Como efecto, en esta región, donde la repartición de la pluviometría es relativamente homogénea y varía poco tanto en el espacio como en el tiempo, es evidente que el factor principal de la variabilidad de la producción de los puntos representativos de los pares - área de drenaje / caudales media anual - en relación a la curva de regresión, mostró que ésta está muy bien correlacionada con la pluviometría anual. Después de varias tentativas fue establecida una relación entre el área de drenaje (**A**) en km², la pluviometría media anual (**P**) en mm y el caudal medio anual (**Q**) en m³ s⁻¹ cuya fórmula es la siguiente:

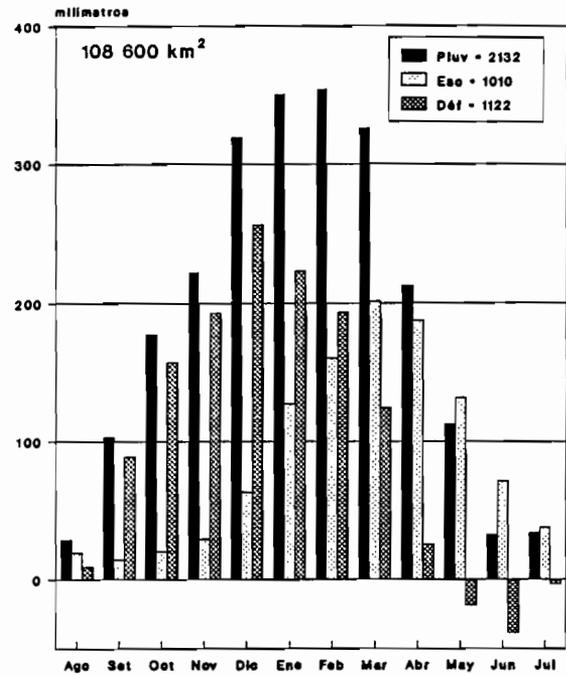
$$Q = A / 259,5 * e^{P/1133} \quad [2]$$

Este resultado aún es provisorio y no permite llegar a una conclusión definitiva. Es necesario esperar la inclusión de otras subcuencas de la región para mejorar esta

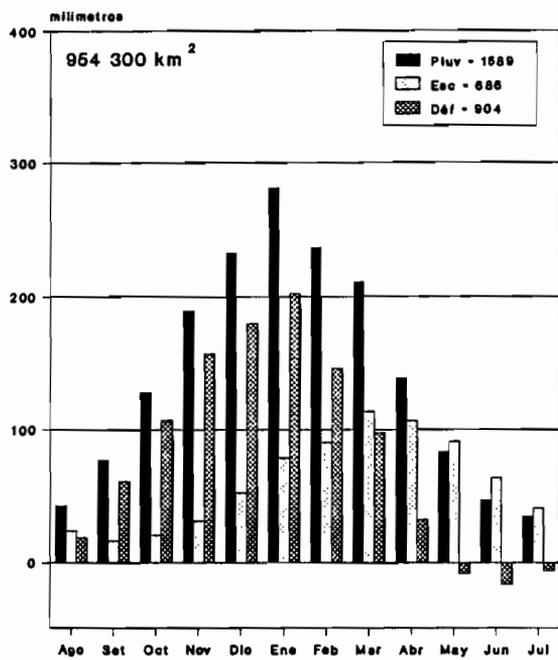
Río Jiparaná en Tabajara



Río Aripuaná en Prainha



Río Madeira en Porto Velho



Río Madeira en Manicoré

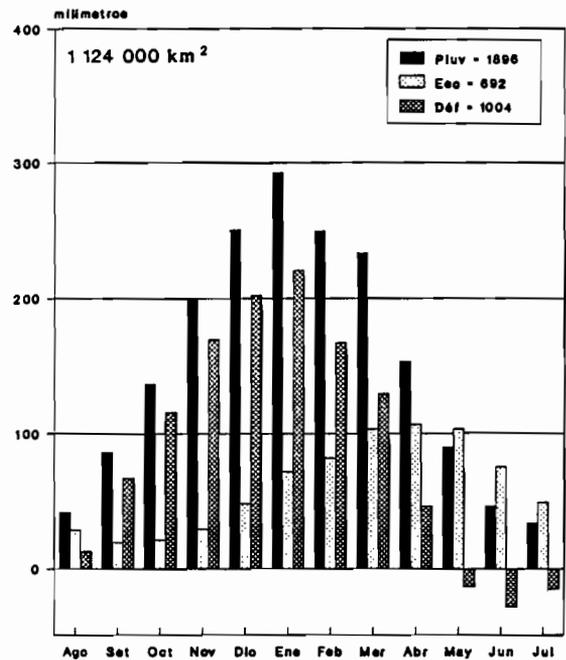


Figura 5 : Balance hídrico de la cuenca brasileña del río Madeira

relación. Aparte de esto, sería bueno probar la relación a nivel mensual, tal vez tomando en cuenta la pluviometría de los meses anteriores, para caracterizar el estado de humedad previa del suelo, o el abastecimiento en de agua en las primeras capas del suelo. Un test de simulación, efectuado en las estaciones intermedias del río Purus, dió resultados promisorios.

CONCLUSION

Los resultados obtenidos en esta cuenca del Río Madeira, junto con los de la cuenca del Río Purus, constituyen la primera etapa de un proyecto más amplio que está siendo desarrollado en el DNAEE en cooperación con el ORSTOM para la totalidad de la cuenca amazónica brasilera. Dichos resultados permitirán establecer relaciones entre el escurrimiento, la pluviometría y el área de drenaje de 47 subcuencas de las cuales ríos y, así comenzar una primera regionalización, a nivel anual, de la pluviometría, la fluvimetría y, luego, del déficit hídrico, término que puede asimilar la evapotranspiración real cuando se trata de largos períodos de tiempo y grandes áreas de drenaje.

Se prevee proseguir con este trabajo en los dos próximos años para alcanzar la totalidad de la cuenca amazónica brasilera. Además de proporcionar valores confiables de los principales componentes del balance hídrico superficial, los resultados permitirán establecer una estimación cuantitativa espacial y temporal de los recursos hídricos, para caracterizar mejor el régimen hidrológico de la región Amazónica, propiciando así, un uso más racional de estos recursos. Uno de los resultados esperados es la evaluación de la degradación antrópica de la vegetación amazónica a través de las variaciones de los regímenes hidrológicos de cada una de las subcuencas durante los veinte últimos años.

BIBLIOGRAFIA

- BOURGES, J., (1987), *Projet de Cachuela Esperanza. Etude sommaire des apports*. Publ. PHICAB, La Paz, 20 pp.
- BOURGES, J., CORTES, J., HOORELBECKE, R., (1987), *Etude des débits du Rio Mamoré à Guayaramerin*. Publ. PHICAB, La Paz, 26 pp.
- DNAEE, (1988), *Balanço hídrico superficial da bacia amazônica. Proposta brasileira. 2a versao*. Brasília-DF, DNAEE, DCRH.
- HIEZ, G., (1977), *L'homogénéité des données pluviométriques*. Cahiers ORSTOM, série Hydrologie, Paris, V. 14, n.2, p. 129-172.
- HIEZ, G., TELLES, C. (1983), *SIH Sistema de Informação Hidrometeorológica. Subsistema de modelos matemáticos. Modelo do Vetor Regional*. Brasília, DNAEE, DCRH.
- MOLINIER, M., MAIA, A.C. da S., SANTOS, D. dos, (1991), *Balanço hídrico da bacia amazônica - Metodologia e primeiros resultados*. IX Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos. Rio de Janeiro, 10-14 de novembro 1991, vol. 1, pp 158-167.
- MOLINER, M. (1992), *Régionalisation des débits du bassin amazonien: Premier résultats*. VII Journées Hydrologiques de l'ORSTOM, Montpellier, 22-23 septembre 1992.
- PENMAN, H.L., (1956), *Estimating evaporation*. Trans. Americ. Geophysic Union. V. 37, n.1, p. 43-50.
- ROCHE, M.A., FERNANDEZ, C., (1988), *Water Resources Salinity and Salt Yields of the Rivers of the Bolivian Amazon*. Journal of Hydrology, 101: 305-331.
- THORNTHWAITE, C.W., (1954), *The mesurement of potential evapotranspiration*. John P. Mather Seabrook, New Jersey.
- THORNTHWAITE, C.W., MATHER, J.P., (1955), *The water balance. Laboratory of Climatology*. Publ. n.8, Criterin, N.J.
- TURC, L. (1955), *Le bilan d'eau des sols: relation entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement*. Institut National de Recherche Agronomique. Laboratoire des sols. Versailles.
- UNESCO-ROSTLAC, (1982), *Guía metodológica para la elaboración del balance hídrico de América del Sur*. Estudios e informes en hidrología. Montevideo.
- UNESCO-ROSTLAC, (1987), *Taller sobre el balance hídrico de América del Sur. Informe Final*. La Paz, Bolivia.