

A divergência do campo do fluxo de vapor d'água e as chuvas na região Amazônica

José Marques ⁽¹⁾
Eneas Salati ⁽²⁾
Jesus Marden dos Santos ⁽³⁾

Resumo

Foram estimados, a partir dos dados de radiossondagens do período 1972/1975, os valores da divergência do campo do fluxo de vapor d'água sobre a bacia Amazônica, V.Q. De um modo genérico, houve predominância dos valores negativos da divergência, ficando evidenciada sua relação com o campo da precipitação, principalmente no mês de março. Utilizando os valores de V.Q. estimou-se em 172.616m³/s o valor médio da vazão do rio Amazonas no período estudado, constituindo-se em um método independente para estimativas de vazão em grandes bacias, mesmo desconhecendo-se os valores da precipitação e da evapotranspiração. Comparações com outros resultados utilizando-se metodologias distintas foram feitas, tendo o método aerológico mostrado ser útil inclusive para a previsão de vazões mensais com antecedência de 3 meses na bacia Amazônica. Foi de 2328mm/ano a precipitação média no período estudado na bacia.

INTRODUÇÃO

Os estudos da circulação geral da atmosfera conduziram a uma nova metodologia de pesquisas hidrológicas baseadas na análise dos campos das diversas grandezas que caracterizam o estado da atmosfera e a dinâmica da água na fase vapor. Utilizando esta metodologia Marques *et al.* (1979a, 1979b) caracterizaram os campos do transporte e do armazenamento aéreo do vapor d'água atmosférico sobre a bacia Amazônica. No presente trabalho, terceiro da série, estuda-se a divergência do campo do transporte aéreo do vapor d'água, demonstrando-se que ele está bem associado com o campo de precipitação, constituindo também um método independente para estimativas da vazão em grandes bacias, mesmo desconhecendo-se os valores da precipitação e da evapotranspiração.

REVISÃO DA LITERATURA

Pesquisas recentes têm permitido obter informações do balanço hídrico de uma vasta região a partir do estudo dos campos de distribuição dos parâmetros que caracterizam o comportamento do vapor d'água na atmosfera, podendo-se inferir o balanço hídrico de uma região a partir do estudo do "ramo aéreo" do ciclo hidrológico, Peixoto (1968, 1970).

Vários estudos utilizando esta metodologia foram feitos, podendo serem citados os trabalhos de Benton & Estoque (1954) e Rasmusson (1966, 1967) para os Estados Unidos; para o mar Báltico por Palmén & Söderman (1966); para a Austrália por Hutchings (1961) e para a bacia Amazônica por Molion (1975) e Marques (1976) e Marques *et al.* (1977). Cobrindo todo o hemisfério norte, citamos o trabalho de Peixoto (1970); Peixoto *et al.* (1976) apresentaram um estudo cobrindo todo o globo.

Benton *et al.* (1950) utilizaram o método para o balanço hidrológico na bacia do rio Mississipi e concluíram que, a maior parte da chuva caída na região provinha de vapor d'água oriundo do oceano e transportado pelos ventos. Segundo os autores não foi necessária a existência de uma alta correlação entre os valores mensais da transferência de vapor d'água e da precipitação, mas esta foi mais associada aos valores negativos da divergência (convergência) do campo de vapor d'água atmosférico do que com sua transferência. Bettencourt *et al.* (1970) afirmaram que pequenos valores de fluxo de vapor não estão associados a valores elevados da precipitação mas a existência de alto valor do fluxo de

(1) — UFRJ — I. Geociências, Departamento de Meteorologia
(2) — Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus
(3) — CENA — Centro de Energia Nuclear na Agricultura

vapor é condição necessária mas não suficiente para a ocorrência de chuvas em uma região.

Hutchings (1957), na Inglaterra, comparando os dados medidos de chuva e evapotranspiração com os estimados a partir da divergência do campo do fluxo de vapor, no verão, concluiu ser a divergência um bom índice de estimativa, podendo ser utilizado para fornecer uma visão correta do balanço de água também em áreas relativamente pequenas.

MATERIAL E MÉTODOS

Os dados de precipitação (P) utilizados no presente estudo foram obtidos a partir do levantamento dos totais mensais de 117 estações na região e adjacências cobrindo o período 1972/1975 com os quais foram traçadas cartas mensais e anuais do campo da precipitação. Os dados básicos de altitude foram os mesmos utilizados em Marques *et al.* (1979a). A partir destes dados foram computados os campos do fluxo de vapor d'água atmosférico (\vec{Q}) Marques *et al.* (1979a) bem como a sua divergência ($\nabla \cdot \vec{Q}$) na região e o armazenamento atmosférico, representado pela água precipitável, Marques *et al.* (1979b) cuja metodologia de cálculo se acha detalhada em Marques (1976, 1978).

A partir das expressões,

$$\omega = \frac{\partial p}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla p \dots\dots\dots (1)$$

e

$$\frac{dq}{dt} = \frac{\partial q}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla q, \dots\dots\dots (2)$$

mediante as condições físicas impostas ao problema chegou-se à seguinte expressão, aplicável para médias anuais e grandes regiões:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \frac{1}{g} q dp + \nabla \cdot \int \frac{1}{g} q \vec{V} dp = - \frac{1}{g} (q\omega)_s + \frac{1}{g} (q\omega)_c \dots\dots\dots (3)$$

onde os termos

$$\vec{Q} = \frac{1}{g} \int q \vec{V} dp$$

— representa o campo do escoamento aéreo de vapor d'água (Marques *et al.*, 1979a);

$$W = \frac{1}{g} \int q dp$$

— representa o armazenamento aéreo do vapor d'água (Marques *et al.*, 1979b);

$$E = - \frac{1}{g} (q\omega)_s$$

— é o fluxo vertical ascendente de vapor d'água que atravessa uma superfície *s*, representado pela evapotranspiração real;

$$P = \frac{1}{g} (q\omega)_c$$

— é o fluxo vertical descendente de água na fase condensada *c* que atravessa uma superfície *s*, representada pela precipitação.

Assim, a expressão (3) pode ser escrita na seguinte forma:

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{Q} = E - P \dots\dots\dots (4)$$

Para a bacia Amazônica, verificou-se que a variação do armazenamento aéreo de vapor d'água foi desprezível. Marques *et al.* (1976, 1978) quando comparado com os demais termos da expressão (4), o que nos permite utilizá-la na seguinte forma simplificada:

$$\nabla \cdot \vec{Q} = E - P \dots\dots\dots (5)$$

Quando $\nabla \cdot \vec{Q} > 0$ em uma região, haverá aí uma fonte de umidade para a atmosfera, isto é, para o mesmo período haverá, em média, um excesso da evaporação sobre a precipitação. Quando o valor é negativo (convergência) existirá um sumidouro de vapor d'água, em consequência de ser a precipitação maior que a evaporação. Nestes casos, as regiões devem possuir um meio de dispor do excesso de água, implicando na existência de bacias de drenagem. Assim, áreas de convergência dos campos do fluxo coincidirão com áreas de

grandes bacias. Por outro lado as regiões de forte divergência constituem fonte de umidade para a atmosfera e, geralmente, acham-se sobre oceanos e desertos.

Uso do método aerológico para estimativa da vazão em uma bacia hidrográfica

Para períodos relativamente longos, a equação clássica da Hidrologia se reduz a

$$E - P = -r \dots\dots\dots (6)$$

isto é, o escoamento superficial, representado pela vazão do rio, é mantido às expensas do balanço entre a evaporação e a precipitação no mesmo período.

RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO

A precipitação média, \bar{P}

A análise das cartas de precipitação, figuras 1 a 5, evidenciou que o deslocamento meridional do Sol, atuando como fonte de energia para os processos convectivos, e o oceano Atlântico, fornecendo vapor d'água para a região, são os responsáveis pelos padrões de distribuição de chuva que ocorrem na Amazônia.

De janeiro a março, a faixa de máximos de chuva situa-se entre os paralelos 0-10°S tendo, a partir de março, um deslocamento progressivo em direção ao hemisfério norte. No período de junho a setembro, observam-se os menores valores da precipitação na parte sul da bacia.

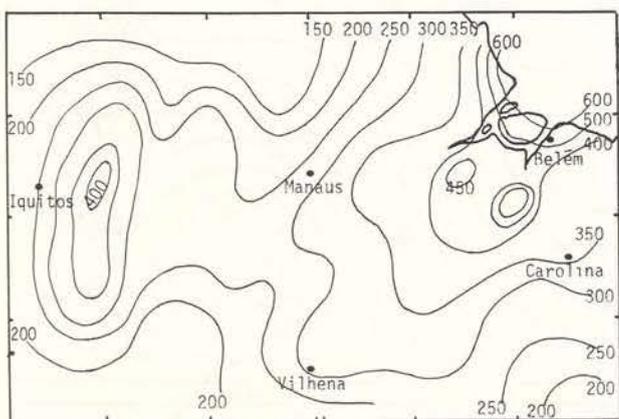


Fig. 1 — Distribuição da precipitação média do mês de março. Período 1972/1975. Isoietas graduadas em mm.

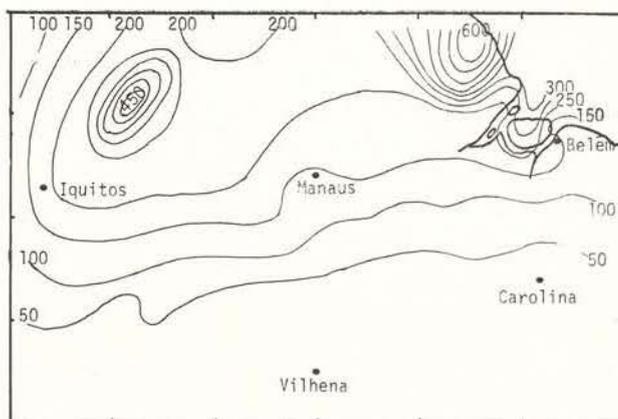


Fig. 2 — Distribuição da precipitação média do mês de junho. Período 1972/1975. Isoietas graduadas em mm.

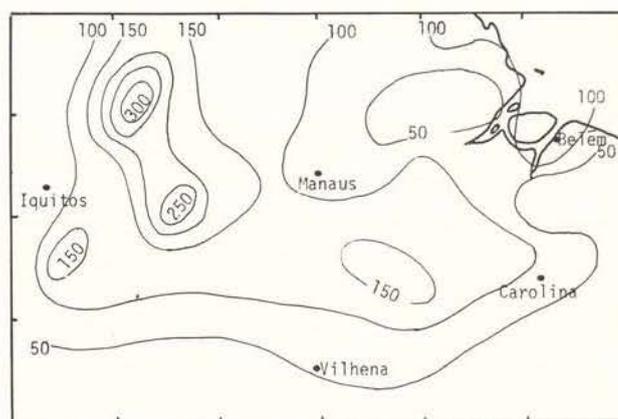


Fig. 3 — Distribuição da precipitação média do mês de setembro. Período 1972/1975. Isoietas graduadas em mm.

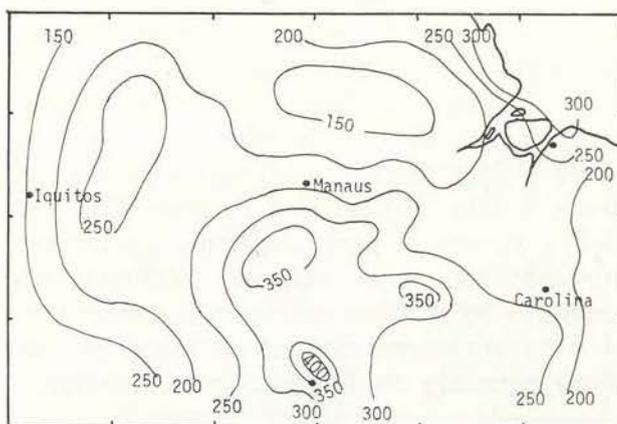


Fig. 4 — Distribuição da precipitação média do mês de dezembro. Período 1972/1975. Isoietas graduadas em mm.

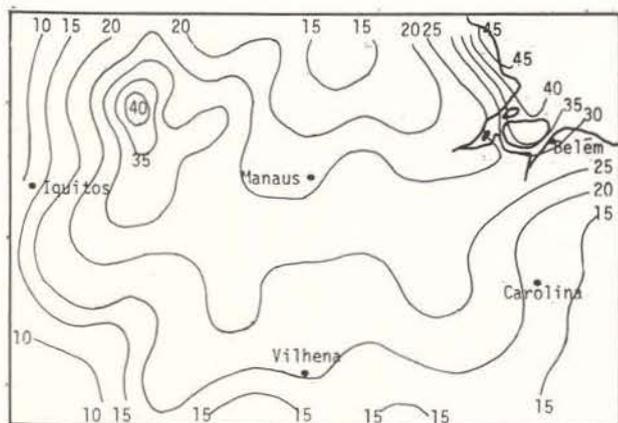


Fig. 5 — Distribuição da precipitação média anual do período 1972/1975. Isoietas graduadas em 10²mm.

Utilizando-se o método de isoietas, foram estimados os seguintes valores médios das precipitações :

Mês	Precipitação média (mm)	(10 ¹² m ³)
Março	286	1,46
Junho	164	0,84
Setembro	109	0,56
Dezembro	219	1,12
Mensal	194	0,99
Anual	2328	11,88

Para a média anual do período estudado, figura 5 a, faixa de máximos acha-se distribuída ao longo da zona compreendida entre os paralelos de 5°S — 5°N, com outros distintos de máximos, locados em 52°N e 69°N. Ao longo do Equador, a partir do litoral, os totais anuais das chuvas vão decrescendo, desde o valor 4500mm até alcançar 2000 próximo a Manaus; a partir daí, começa a crescer atingindo seu novo máximo (4000mm) em torno dos 69°W. Esta distribuição é semelhante à do armazenamento aéreo (água precipitável) estudado em Marques *et al.* (1979b).

Divergência média do campo do fluxo de

vapor $\nabla \cdot \vec{Q}$

De um modo geral, na bacia Amazônica houve uma predominância do valor negativo da divergência. Comparando-se estes campos

de $-\nabla \cdot \vec{Q}$ com a de \bar{P} no mesmo período, nota-se uma semelhança de configuração entre eles.

Analisando a figura 6, observa-se que em março existiu um domínio quase total da área convergente coincidindo com a época de máximos valores da precipitação observada na área conforme constatado por Azevedo (1974) e Salati *et al.* (1978). Na figura 11, para comparação, estão os histogramas das chuvas de várias localidades na bacia.

Em junho, figura 7, com a zona divergente dominando metade da bacia, teremos menores valores para a precipitação nesta área,

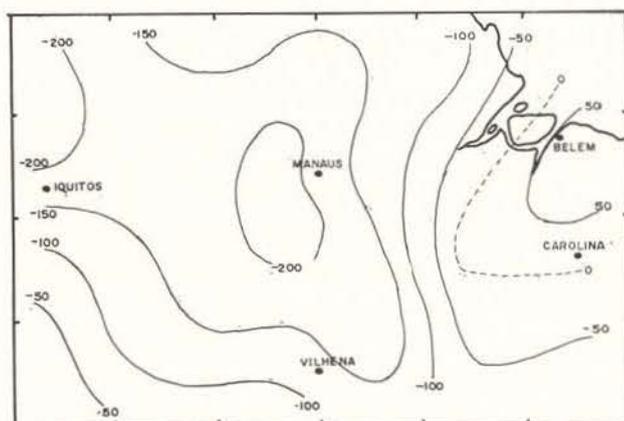


Fig. 6 — Campo da divergência do fluxo de vapor médio, $\nabla \cdot \vec{Q}$, para março. Média do período 1972/1975. Isolinhhas graduadas em mm.

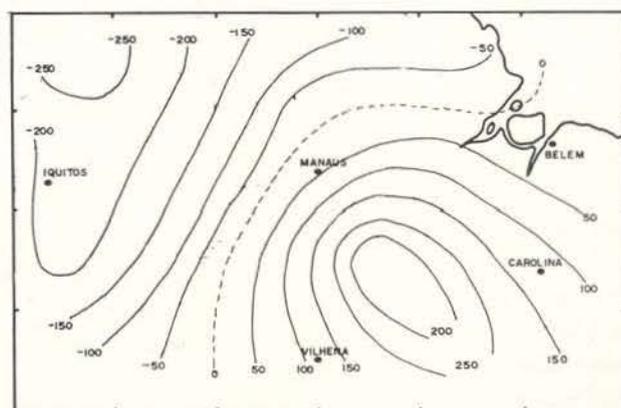


Fig. 7 — Campo da divergência do fluxo de vapor, $\nabla \cdot \vec{Q}$, para o mês de junho. Média do período 1972/1975. Isolinhhas em mm.

ao passo que o deslocamento da área convergente para a região do alto Amazonas, Venezuela e Colômbia, produzem ali os máximos de chuva. A partir desta época a área divergente irá diminuir, possibilitando a evolução da zona convergente até alcançar seu máximo em março, indo assim o ciclo se repetir.

Não foi encontrada uma relação numérica

entre os valores de P e $-\nabla \cdot \vec{Q}$, porém há uma grande justaposição entre as áreas convergentes e as de maiores valores da precipitação.

Da análise das figuras 6 a 10, em conjunto com o campo do transporte de vapor estudado em Marques *et al.* (1979a), as seguintes informações podem ser obtidas:

- no mês de março, praticamente em toda a bacia os valores de precipitação excedem aos da evapotranspiração dando, em consequência, valores negativos para a divergência; pelo menos neste mês, as evidências demonstram que a maior parte do vapor é de origem oceânica;
- para o mês de junho, a área divergente avançou por sobre grande parte da bacia e grande parte da evaporação local está sendo transportada para o interior isto é, a área abrangendo Belém-Manaus-Carolina-Vilhena também funciona com fonte de vapor para o resto da bacia; em setembro, a área divergente já

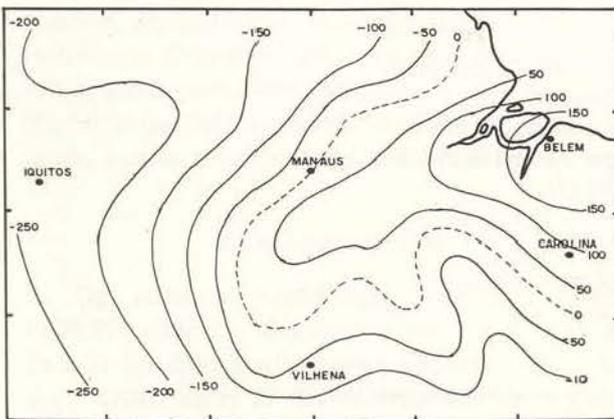


Fig. 8 — Campo da divergência do fluxo de vapor médio, $\nabla \cdot \vec{Q}$, para setembro. Média do período 1972/1975. Isolinhas graduadas em mm.

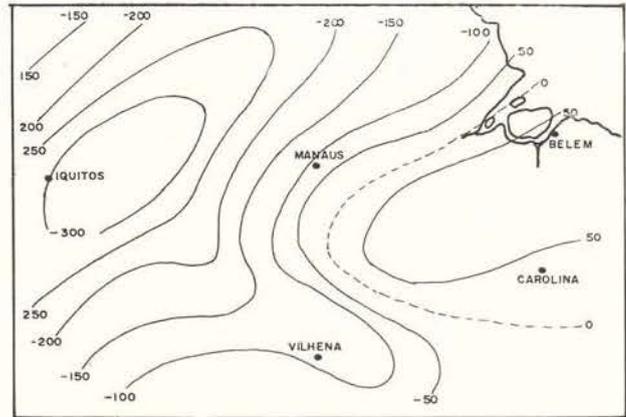


Fig. 9 — Campo da divergência do fluxo de vapor médio, $\nabla \cdot \vec{Q}$, para dezembro. Média do período 1972/1975. Isolinhas graduadas em mm.

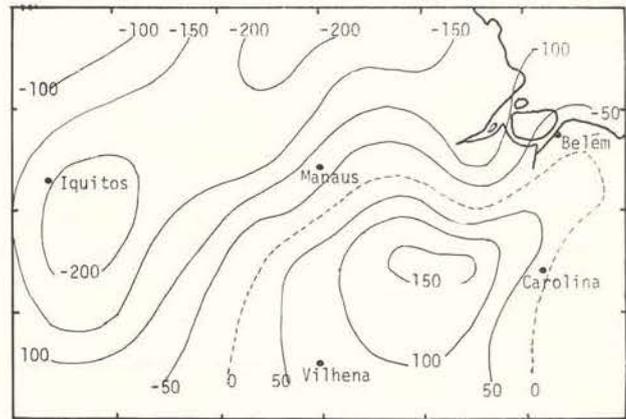


Fig. 10 — Campo da divergência do fluxo médio mensal, $\nabla \cdot \vec{Q}$. Média do período 1972/1975. Isolinhas graduadas em mm.

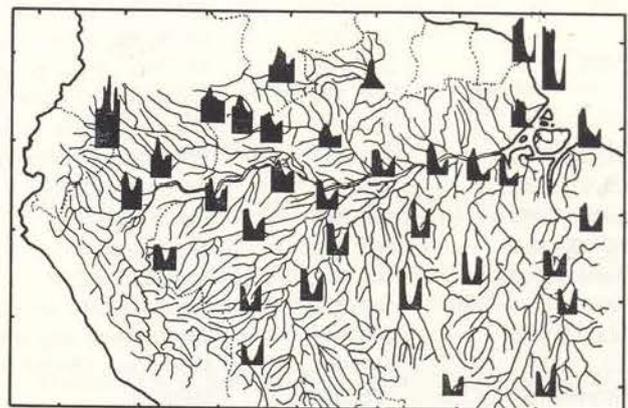


Fig. 11 — Distribuição das chuvas na bacia Amazônica (Salati *et al.*, 1978).

está bem menor; em dezembro, ela permanece praticamente inalterada, porém os valores da área convergente são bem maiores que no período anterior.

- ao longo da calha principal da bacia Amazônica e, mais precisamente, no trecho Manaus-Iquitos, verificam-se os maiores valores da convergência da precipitação e da água precipitável. Como os valores do fluxo Marques *et al.* (1979a), nesta região decrescem de modo acentuado a partir de Manaus em direção à cordilheira, infere-se que um forte mecanismo de recirculação do vapor d'água tem lugar neste trecho.

A divergência do fluxo e as vazões do rio Amazonas.

Aplicando-se a metodologia descrita em uso do método aerológico estimaram-se as va-

zões (r) do rio Amazonas, cujos resultados se acham na tabela 1, comparados com os demais dados encontrados na literatura.

À convergência do fluxo de vapor ($-\nabla \cdot \vec{Q}$) em determinado mês não deve necessariamente corresponder uma vazão (r) no mesmo período. No presente estudo, a região de máximos valores para a convergência situa-se a quase 2500Km da foz do rio, sendo válido admitir-se um período razoavelmente longo para que toda a água precipitada alcance a foz, principalmente levando-se em conta a pequena declividade da superfície da água do rio Amazonas, estimada por Soares (1956) citado por Oltman *et al.* (1964) como sendo da ordem de 65m em 3000Km.

A figura 12 mostra as vazões estimadas, aplicando o método aerológico para o período 1972/1975 e as vazões obtidas segundo os dados de Oltman (1967) para o período 1963/1964 mas ajustando os dados às medições fei-

TABELA 1 — Resultados estimados para as vazões do rio Amazonas, em m^3/s , na foz, utilizando o método aerológico, comparados com os obtidos por outros autores utilizando outros métodos (Marques, 1978).

Época	Vazão (m^3/s)	Observações
Junho	222.782	Média do período 1972/1975 utilizando o método aerológico para a previsão da estimativa da vazão na foz do rio Amazonas.
Setembro	115.104	Idem
Janeiro	127.893	Idem
Março	224.686	Idem
Média	172.616	Idem
.....		
1928/1946	186.892	Média do período 1928/1946, em Óbidos (1)
	233.615	Idem, na foz do rio Amazonas (1)
1953	280.000	Máxima descarga provável ocorrida (1)
	90.000	Média em Óbidos, citado por Pardé (1956) (1)
	124.610	Média; Durum et alii (1960) (1)
16/07/1963	212.800	Próximo a Óbidos (1)
20/07/1963	149.038	Próximo a Manaus (1)
Junho/1963	216.342	Em Óbidos (1)
09/08/1964	160.000	Em Óbidos (1)
Agosto/1964	161.406	Em Óbidos (1)
	177.430	VILLA NOVA, et alii (1976)
Maio/junho	240.000	Em Óbidos, segundo OLTMAN et al., citado por Villa Nova et alii (1976)
	157.000	Média em Óbidos, segundo OLTMAN citado por Villa Nova (1976)
Novembro	85.000	Idem
	177.430	VILLA NOVA et alii (1976)
	175.000	Média na foz do rio Amazonas, segundo OLTMAN citado por Villa Nova et alii (1976)

(1) — FONTE: Brasil, Ministério das Minas e Energia (1964).

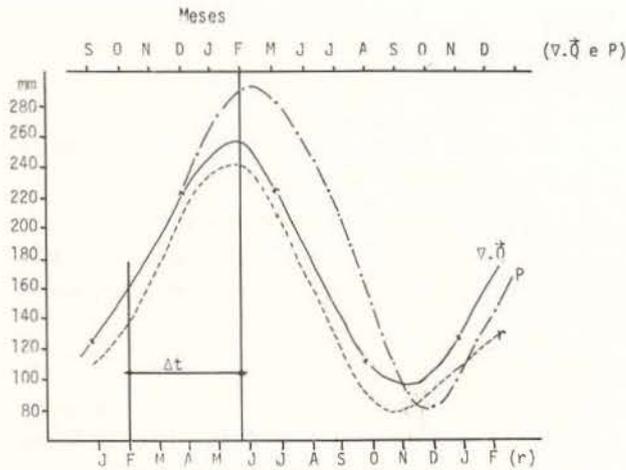


Fig. 12 — Valores mensais da descarga estimada ($\nabla \cdot \vec{Q}$) aplicando o método aerológico; da precipitação P, média do período 1972/1975; da descarga (r), segundo os dados de Oltman (1967). Valores em mm.

tas com régua no período 1928/1946 em Óbidos segundo os valores constantes na tabela 2. Constata-se que as vazões estimadas por Oltman acham-se defasados aproximadamente de 3,5 meses em relação aos valores estimados para a $\nabla \cdot \vec{Q}$. Mesmo levando-se em conta que os valores de r e $\nabla \cdot \vec{Q}$ não correspondem ao mesmo período, o método apresenta-se válido inclusive para prever, com razoável acerto as vazões do rio Amazonas, com mais de 3 meses de antecedência, independente do conhecimento dos valores da precipitação e evapotranspiração na região, tão necessários quando se utiliza a equação fundamental da Hidrologia Clássica, uma vez que os dados de radiossondagem são obtidos e transmitidos diariamente pela rede sinótica de altitude, estando assim prontamente disponíveis.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FINEP, CNPq, FAPESP, CNEN e Secretaria de Tecnologia do Estado de São Paulo pelos recursos concedidos; à SUDENE, ao Ministério da Aeronáutica (Divisão de Meteorologia/DEC e DCA/CTA), à Força Aérea Venezuelana, à EMBRAPA/CPATU e ao INPA pela cessão dos dados meteorológicos de superfície e/ou de altitude necessários a esta pesquisa.

A divergência...

SUMMARY

Water vapor divergences $\nabla \cdot \vec{Q}$, are estimated over the Amazonas basin with radiosonde data from 1972/1975. Negative values for divergence were predominant over the basin and using the "aerological method" the mean Amazonas river discharge was estimated in $172,616 \text{ m}^3/\text{s}$; showed to be an independent method for estimatives of discharges from large basin independently of knowledge of precipitation and evapotranspiration values. The mean precipitation value estimated for 1972/1975 period was $2,328 \text{ mm}/\text{year}$.

BIBLIOGRAFIA

- AZEVEDO, D.C.
1974 — **Chuvas no Brasil — regime, variabilidade e probabilidades de alturas mensais e anuais**. Tese de Mestrado — Univ. Fed. Rio Grande do Sul.
- BENTON, G.S.; BLACKBURN, R.T. & SNEAO, V.O.
1950 — The role of the atmosphere in the hydrologic cycle. *Trans. Am. Geophys. Un.*, 31 : 61-73.
- BENTON, G.S. & ESTOQUE, M.A.
1954 — Water-vapor transfer over the North American Continent. *J. Met.*, 11 : 462-477.
- BETTENCOURT, M.L. & FARIA, J.M.R.
1970 — The water vapor in the atmosphere and the hydrological cycle. *Időjárás*, Budapest, (5-6) : 307-312.
- HUTCHINGS, J.W.
1957 — Water-vapor flux and flux-divergence over Southern England: summer 1954. *Quart. J. Royal Met. Soc.*, London, 83 : 30-48.
1961 — Water-vapor transfer over the Australian continent. *J. Met.*, 18 : 615-634.
- MARQUES, J.
1976 — **Contribuição ao estudo hidrológico da bacia Amazônica**. Dissertação MS. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP, 116 p.
1978 — **A transferência horizontal de vapor d'água na troposfera e a hidrologia da bacia Amazônica**. Tese de Doutorado. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP, 112 p.
- MARQUES, J.; SANTOS, J.M. DOS; VILLA NOVA, N.A. & SALATI, E.
1977 — Precipitable water and water vapor flux between Belém and Manaus. *Acta Amazonica*, Manaus, 7(3) : 355-362.

- MARQUES, J.; SANTOS, J.M. DOS & SALATI, E.
1979a — O campo do fluxo de vapor d'água atmosférico sobre a região amazônica. **Acta Amazonica**, Manaus, 9(4) : 701-713.
- MARQUES, J.; SALATI, E. & SANTOS, J.M. DOS
1979b — O armazenamento atmosférico de vapor d'água sobre a região Amazônica. **Acta Amazonica**, Manaus, 9(4) : 715-721.
- MOLION, L.C.B.
1975 — A climatonic study of the energy and moisture fluxes of the Amazonas basin with considerations of deforestation effects. PhD. Thesis, University Wisconsin, Madison, 133 p.
- OLTMAN, R.E.; STERNBERG, H.O.R.; AMES, F.C. & OAVIS, J.R.
1964 — Investigações no rio Amazonas. Reconhecimento das medições de julho de 1963. Circ. 486, Geological Survey, Wash. — Tradução de Stelio Souza. In: Brasil, MME, 1964. **As mais recentes medições do rio Amazonas**. Div. Tec. n.º 1, DNPM, DA, em colab. com Univ. do Pará, 81 p.
- OLTMAN, R.E.
1967 — Reconnaissance investigations of the discharge and water quality of the Amazon. In: **Atas do Simpósio sobre a Biota Amazônica**, Rio de Janeiro, 3 (Limnologia): 163-185.
- PALMÉN, E. & SÖDERMAN, D.
1966 — Computation of the evaporation from Baltic Sea from the flux of water vapor in the atmosphere. **Geophysica**, 8 : 261-279.
- PEIXOTO, J.P.
1968 — O ramo aéreo do ciclo hidrológico. **Fomento**, Lisboa, 6(2) : 111-119.
1970 — Water vapor balance on the atmosphere from five years of hemispheric data. **Nordic Hydrology**, Copenhagen, 2 : 120-138.
- PEIXOTO, J.P.; ROSEN, R.D. & WU, MAO-FU
1976 — Seasonal variability in the Pole-to-Pole water vapor balance during the IGY. **Nordic Hydrology**, Denmark, 7(2) : 95-114.
- RASMUSSEN, E.M.
1966 — Diurnal variations in the summer water vapor transport over North America. **Water Resources Research**, 2(3) : 469-477.
1967 — Atmospheric water-vapor transport and the water balance of North America. **Month Weather Rev.**, 95 : 403-425.
- SALATI, E.; MARQUES, J. & MOLION, L.C.B.
1978 — Origem e distribuição das chuvas na Amazônia. **Interciência**, 3(4) : 200-205.
- SOARES, L. DE C.
1956 — Amazônia, 18.º Congresso Internacional de Geografia, Rio de Janeiro, UGI — Comissão Nacional do Brasil. **Guia de Excursão**, 8, 320 p.

(Aceito para publicação em 28/09/79)