

A Resposta hidrológica das sub-bacias brasileiras e sua relação com o fenômeno ENSO-El Niño/Oscilação Sul

Felix Carriello¹
João Viane Soares¹
Nelson Jesus Ferreira¹
{felix; viane; nelson}@ltid.inpe.Br

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil

Abstract. This work analyses the hydrological response of Brazilian sub basins during the 1970 to 2000 period in order to give support to the hydric resources management in a national level and its relationship to ENSO. The hydrological response was carried out using streamflow and observed precipitation data. The results indicated that Northeast and South regions of Brazil showed a strong relationship to ENSO. Sub basins located in the middle west and the Amazon Basin showed relationship to ENSO, but weaker than those showed by the Northeast and South regions of Brazil.

Palavras Chaves: Hydrology, hydrological response, ENSO, hidrologia, resposta hidrológica, ENOS.

1. Introdução

A resposta hidrológica refere-se à produção de vazão nos canais de drenagem a partir das diferentes formas de precipitação (Hewlett, 1982). A água proveniente da precipitação pode seguir diferentes caminhos, ora transformando-se em vazão que irá alimentar os rios e canais, ora evaporando-se a partir das superfícies do solo ou das copas das árvores, ou indo alimentar os aquíferos permanecendo armazenada por longo tempo. A bacia é o local que reúne as mesmas características da paisagem que regem os fenômenos que nela acontecem. Sobre uma mesma área, temos o espaço físico, a flora, a fauna, e os fenômenos climatológicos ocorrendo, teoricamente, de maneira uniforme sobre toda a área e, dessa forma, a interação entre os elementos da paisagem condiciona sua resposta hidrológica.

2. Cálculo da resposta hidrológica observada

2.1. Dados de vazão

Para a elaboração dos mapas de resposta hidrológica observadas (citadas neste trabalho como RHO) selecionou-se as estações com dados de vazão, a partir de levantamentos do “Inventário das Estações Fluviométricas” documento da Divisão de Controle de Recursos Hídricos do Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica do Ministério das Minas e Energia (1997), e de consultas ao Portal da Agência Nacional de Águas (ANA, 2003). A partir destas fontes foram selecionadas as estações que possuíam os dados para o período de 1970 a 2000, bem como informações sobre a área drenada pela estação, longitude, latitude, tipo de estação e período de funcionamento da estação. Os dados consistidos de vazão, de cada estação fluviométrica disponíveis no Portal da ANA, foram recuperados em médias diárias e convertidos em médias mensais e, anuais, para o cálculo do *runoff* anual de cada bacia.

2.2. Dados de precipitação

Os dados de chuva utilizados para o cálculo da RHO foram reunidos, compilados e interpolados pelo Tyndall Center for Climate Change Research (New et al., 1999; 2000 e 2002) em grades de

0,5° x 0,5° para todo o globo terrestre, para o período de 1900 a 2000. Estes dados estão em arquivos mensais para todo o globo terrestre e foram processados a partir de dados cedidos por agências e institutos de meteorologia de vários países; dados do Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT); dados do próprio Climatic Research Unit (CRU - Tyndall Center) e da Agência Meteorológica Mundial - WMO (World Meteorological Organization). Os dados mensais de chuva foram transformados em dados anuais para o cálculo da resposta hidrológica.

A interpolação é um procedimento de estimação do valor de um atributo em locais não amostrados a partir de pontos amostrados na mesma área ou região. O interpolador escolhido para a representação dos dados de precipitação é o “Thin-plate spline”, que considera funções polinomiais e utiliza dados pontuais para ajustar uma superfície, dado um conjunto de pontos. Esta técnica é apropriada principalmente para áreas em que os dados pontuais têm distribuição espacial esparsa e irregular. A superfície gerada por este interpolador apresenta um ajustamento para minimizar mudanças bruscas na geração das isolinhas do dado a ser interpolado e a interpolação da superfície de precipitação a ser gerada é função da latitude, longitude e elevação (New et al., 1999).

3. Metodologia para a estimativa da resposta hidrológica observada

Os dados de vazão das estações fluviométricas selecionadas para cada bacia foram organizados em planilhas para posterior processamento pelo aplicativo GRADS (Grid Analysis and Display System), incluindo-se os dados de latitude, de longitude e da área drenada pela estação, os quais foram utilizados para a interpolação da resposta hidrológica nos mapas gerados. As planilhas também serviram para o cálculo da resposta hidrológica das estações fluviométricas, bem como para obtenção da correlação linear entre a resposta hidrológica observada (RHO) e os valores médios anuais de NDVI de cada sub-bacia para o período de 1982 a 1999.

Os dados de precipitação foram processados no GRADS, sendo utilizado um dispositivo em que os dados de determinada área (sub-bacia) pudessem ser calculados somente para esta área específica (máscaras) e dessa forma, pudessem ser determinados os valores de médias anuais de precipitação espacial, em mm, de cada uma das sub-bacias para cada ano do período considerado. Os dados de precipitação para o Brasil estão situados entre as coordenadas 6°N a 34°S e entre 74°(O) a 34°(O).

Com os dados de vazão e da área de cada estação fluviométrica foi calculado o *runoff* de cada sub-bacia. O cálculo do *runoff* considerou a área drenada pela estação fluviométrica e a respectiva vazão dessa estação (Equação 1.1). Posteriormente, assumiu-se que o *runoff* gerado na área drenada pela estação é o *runoff* correspondente a toda sub-bacia.

$$R = \frac{Q}{A} \quad (3.1)$$

em que R é o *runoff* em m (ou mm); Q é a vazão em m³ e A é a área em m².

Com os dados de *runoff* e de precipitação calculou-se a resposta hidrológica anual das sub-bacias através da Equação 3.2. O GrADS foi utilizado para a apresentação dos resultados. Estes resultados foram interpolados, tendo sido levados em consideração os raios de influência das estações de medição (que, de forma simplificada, quanto mais próximo à estação, maior influência ela exercerá sobre o dado) e plotados através do aplicativo em gráficos anuais para o período de estudo. Para o presente trabalho estabeleceu-se um atraso (*lag*) de dois meses para a vazão, em relação à precipitação. Este *lag* foi estabelecido a partir da análise gráfica da precipitação versus a vazão das sub-bacias, mostrando que os picos de vazão acontecem dois

meses, na média, depois dos maiores eventos de precipitação. Assim, o cálculo da resposta hidrológica será realizado com a precipitação do mês e a vazão de dois meses à frente. Por exemplo, para o mês de outubro de 1970, a precipitação é a de outubro de 1970, e a vazão é a de dezembro de 1970.

$$\text{Resposta hidrológica média anual} = \left\langle \frac{R}{P} \right\rangle \quad (3.2)$$

sendo R o *runoff* em mm, média anual e P a precipitação média anual espacial, em mm.

Deste modo foram calculadas as respostas hidrológicas para 74 sub-bacias das 76 situadas em território brasileiro. As duas sub-bacias não consideradas (80 e 89) não possuíam dados de vazão em estações fluviométricas suficientes para o período estudado.

4. Bacias brasileiras

As bacias brasileiras são divididas em oito grandes bacias, conforme apresentadas na Figura 3.1. De acordo com o tipo de drenagem, observam-se dois tipos principais de bacias: a) bacias que drenam para um único rio, ficando as sub-bacias encadeadas ou ligadas, uma após a outra, como é o caso das bacias 1 (Amazônica), 2 (Araguaia-Tocantins), 4 (São Francisco), 6 (Paraná) e 7 (Uruguai), e b) bacias cujos rios deságuam no oceano Atlântico, não possuindo um rio principal (com algumas exceções, por exemplo a sub-bacia 58 – Paraíba do Sul) mas vários rios desaguando no oceano Atlântico, como é o caso das bacias 3, 5 e 8 (Bacias do Atlântico trecho N/NE, trecho Leste e trecho Sudeste, respectivamente). As grandes bacias são divididas em bacias menores formadas pelos afluentes principais dos formadores da Bacia. Cada grande Bacia é sub-dividida em dez sub-bacias, totalizando 76 sub-bacias, pois a Bacia 6 possui 8 sub-bacias em território brasileiro (da 60 a 67); e as Bacias 7 e 8 possuem 9 bacias, cada uma, em território brasileiro.

Bacias do Brasil

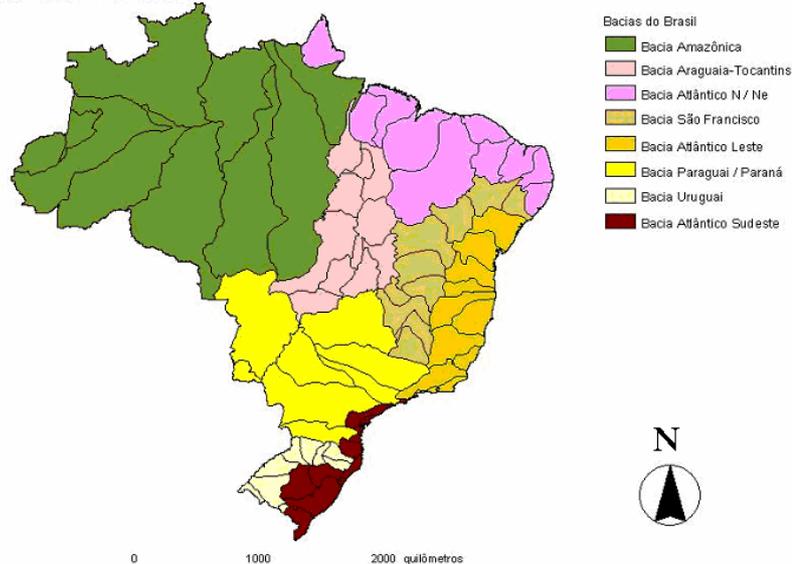


FIGURA 1. Bacias do Brasil

Para a obtenção da RHO, que consiste em produzir os mapas de resposta hidrológica das sub-bacias brasileiras com dados observados, considerando anos hidrológicos (início em 01 de outubro e final em 30 de setembro do ano seguinte), foram utilizados dados de vazão do período de 1970 a 2000 de estações fluviométricas instaladas nos rios das respectivas sub-bacias.

5. Resposta Hidrológica Observada e o fenômeno ENSO

A figura 5.1 apresenta a resposta hidrológica observada, média anual para o período de 30 anos. O padrão espacial da RHO média apresenta valores altos no oeste da Amazônia e em algumas sub-bacias do Sul do Brasil; alto a médio na Amazônia central, baixos no Nordeste do Brasil e oeste da região Centro-Oeste (limite do Brasil com a Bolívia), e médio no Centro-Oeste e Sudeste.

Não se pode explicar a resposta hidrológica unicamente como um produto direto e linear da precipitação, visto que outros fatores, tais como recobrimento da terra, morfologia da bacia, tipos de solo e a geologia que compõem o arcabouço sobre o qual cai a precipitação, também influenciam essa variável (Woodruff and Hewlett, 1970).

Além disso, a resposta hidrológica também depende da variabilidade espacial da precipitação. A influência da precipitação é mais evidente quando fenômenos atmosféricos influenciam grandes áreas e a precipitação aumenta (diminui), ocasionando aumento (diminuição) da resposta hidrológica. Por exemplo, o ENSO exerce uma influência distinta nas regiões Sul e Nordeste do Brasil. No primeiro caso, o El Niño provoca um aumento da precipitação enquanto no segundo observa-se uma diminuição, inclusive com secas severas em determinados anos. Por outro lado, o fenômeno La Niña, provoca maior (menor) precipitação na região Nordeste (Sul).

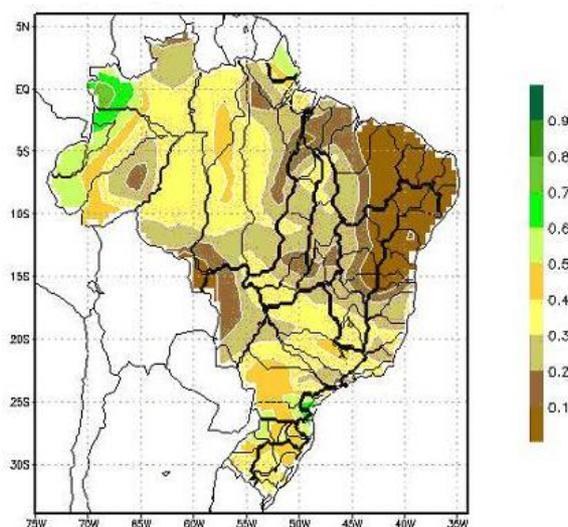


Figura 5.1. Resposta Hidrológica Observada média anual (RHO), período de 1970 a 2000.

Observando os padrões de resposta hidrológica durante o período estudado, verifica-se que algumas regiões apresentam padrões que se repetem, sendo possível delimitar espacialmente esse comportamento. Particularmente a região Norte apresenta respostas médias a altas, a região

Nordeste respostas baixas, as regiões Centro-Oeste e Sudeste respostas médias; e a região Sul apresenta respostas altas. Porém, este padrão apresenta variações significativas em determinados anos, que podem ser associados principalmente à presença do fenômeno El Niño/La Niña. Na região Nordeste, por exemplo, os níveis mais baixos de RHO situam-se entre os paralelos 35° e 45° W; e 2,5° e 15° S.

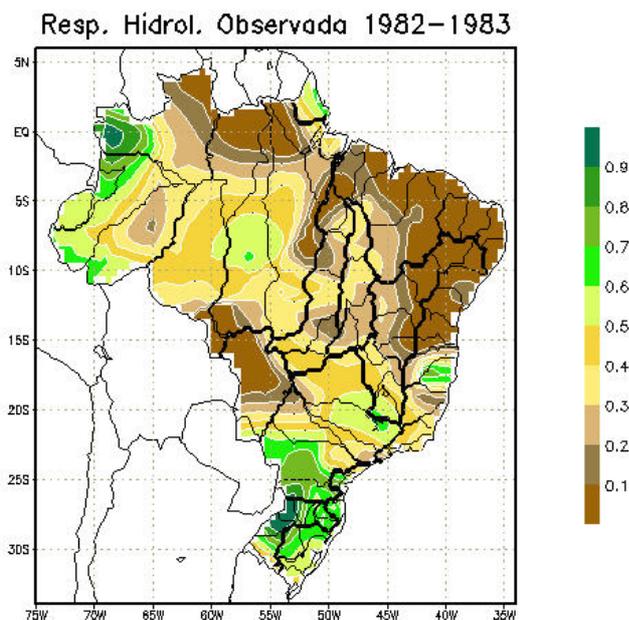


Figura 5.2. Resposta Hidrológica Observada média anual (RHO) 1982-1983.

A figura 5.2 apresenta um ano de ocorrência de El Niño, podendo ser observado o aumento da RHO em relação à média anual de 30 anos (figura 5.1) nas regiões Sul e parte sul da Bacia Amazônica. Inversamente, há diminuição da RHO em grande parte da região Nordeste e norte da Bacia Amazônica. Deve ser destacado que durante anos de El Niño observam-se anomalias negativas de precipitação na região Nordeste. Por outro lado, ocorrem anomalias positivas de precipitação e aumento de resposta hidrológica durante períodos de atuação de fenômenos de La Niña. Marengo e Uvo (1996) ressaltam que a correspondência entre a chuva e a vazão de rios é não linear; porém, pode-se assumir que anomalias de precipitação provocam anomalias de descargas de mesmo sinal. Segundo os mesmos autores, as vazões integram a variabilidade espacial de precipitação dentro da bacia. Desta forma, essas anomalias de precipitação podem ser relacionadas com anomalias de RHO. Ropelewski e Halpert (1987) investigaram padrões globais e regionais de precipitação e inferiram que o Nordeste brasileiro é uma das áreas do globo de maior correspondência entre ENSO e precipitação. Nove entre onze eventos de seca estudados ocorreram em associação com anos de El Niño e nenhuma estação úmida ocorreu durante anos El Niño. Cavalcanti (1996) encontrou anomalias negativas de precipitação na região Nordeste e positivas na região Sul, durante a década de 1986 a 1996, em períodos de El Niño. Na região Nordeste, o pior período ocorreu durante a seca de 1990 a 1993, e, somente em 1994, a estação chuvosa apresentou anomalias positivas de precipitação. Por outro lado, no sul da América do Sul, a relação não é tão forte, porém, há uma tendência clara de ocorrência de aumentos de precipitação na vigência de El Niño. Kousky et al. (1984) relataram a tendência de ocorrência de

secas severas em certas regiões tropicais e subtropicais e excessiva precipitação em outras regiões durante os períodos de ocorrência de El Niño; porém, nem sempre ocorrerá seca, uma vez que ela depende de outras forçantes.

A figura 5.3 apresenta a RHO para o ano de 1974-1975, com ocorrência de La Niña. Pode ser observado um aumento da RHO na região Nordeste em relação à média anual de 30 anos (figura 5.1) e também uma diminuição da RHO em algumas regiões da região Sul.

Observou-se também que o campo de RHO é sensível tanto para as anomalias positivas quanto para as negativas associadas ao fenômeno ENSO, tal que a relação é maior no Nordeste do que no Sul do Brasil.

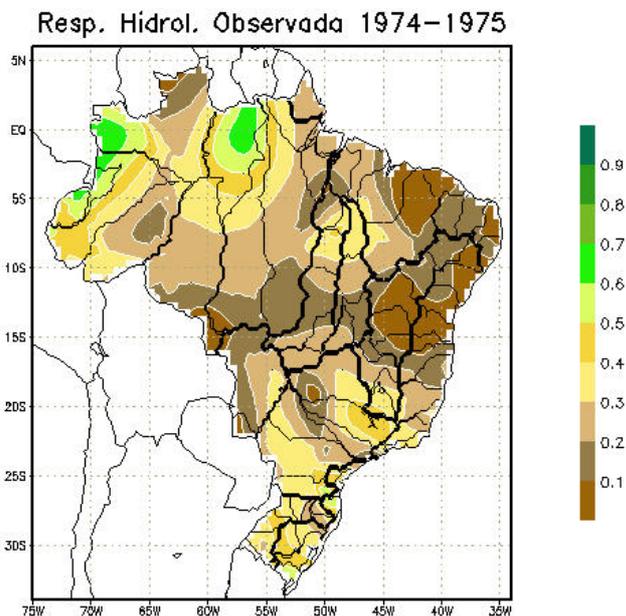


Figura 5.3. Resposta Hidrológica Observada média anual (RHO) 1974-1975

Segundo Zeng (1999), a influência de um evento ENSO sobre o *runoff* na bacia Amazônica ocorre até sete meses após o início do evento. Por este motivo, as influências do fenômeno sobre a região podem ocorrer dentro do ano hidrológico em estudo e também em anos seguintes. A umidade do solo na Bacia Amazônica durante eventos de El Niño é reduzida na mesma escala da precipitação subordinada a um evento de EL Niño (Poveda e Mesa, 1997).

As anomalias observadas para a Bacia Amazônica em relação ao fenômeno ENSO têm comportamento que varia com seu posicionamento: as sub-bacias do centro e sul da Amazônia apresentam tendência em ter anomalias positivas de resposta hidrológica em períodos de El Niño, enquanto as sub-bacias do norte possuem tendência de apresentar anomalias negativas de resposta hidrológica em eventos de El Niño. Marengo et al. (2004), avaliando as relações existentes entre a Amazônia e El Niño Oscilação Sul relataram que vários autores encontraram anomalias positivas (negativas) de vazão em sub-bacias do sul (norte) da Amazônia, bem como obtiveram resultados semelhantes, sendo que na porção norte da Amazônia predominam condições mais secas durante eventos El Niño e nas regiões do sul e centro da Amazônia prevalecem condições mais úmidas.

Amarasekera et al. (1997) associaram o aumento de vazão no Rio Paraná com anos El Niño. Mais recentemente, Camilloni e Barros (2003) comprovaram a correlação existente entre a vazão do rio Paraná e eventos de El Niño, mostrando a relação positiva entre o fenômeno e a anomalia positiva de vazão do alto Paraná, situado entre a confluência dos rios Grande e Parnaíba (início) e a cidade de Corrientes na Argentina. Eles observaram que entre as dezesseis maiores vazões do rio Paraná em Corrientes, onze ocorreram na vigência de El Niño, mas nenhuma ocorreu em períodos de La Niña.

Eventos de El Niño implicam em anomalias positivas de precipitação no Sul, enquanto anos de La Niña produzem anomalias negativas. Ropelewski e Halpert (1987) destacaram que no Sul do país, em dezesseis eventos El Niño estudados houve quatorze episódios de índices pluviométricos mais elevados.

6. Bibliografia

Amarasekera, K. N.; Lee, R. F.; Willians, E.R.; Eltahir, E.A.B. ENSO and natural variability in the flow of tropical rivers. **Journal of Hydrology**, v. 200, n. 1-4, p. 24-39, Dec.1997.

ANA - Agência Nacional de Águas. Disponível em: <www.ana.gov.br>. Acesso em junho de 2003.

Camilloni, I.A; Barros, V.R. Extreme discharges events in The Paraná River and their climate forcing. **Journal of Hydrology**, v. 278, n. 1-4, p. 94-106, Jul. 2003.

Cavalcanti, I.F.A. Episódios de El Niño/Oscilação Sul durante a década de 1986 a 1996 e suas influências sobre o Brasil. *Climanálise Edição Especial Comemorativa – 10 anos Cap. 6*, Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br/products/climanalise/cliesp10a/index1.html>>. Acesso em 11 set 2003.

Hewlett, J.D **Principles of Forest Hydrology**. Athens: The University of Georgia Press: 1982. 183 p.

Kousky, V.E.; Kagano, M.T.; Cavalcanti, I. F. A A review of the Southern Oscillation: oceanic-atmospheric circulation changes and related rainfall anomalies. **Tellus**, v. 36 A, n. 5, p. 490-504, Oct.1984.

Marengo, J.A.; Nobre, C.A.; Sampaio, G. On The Associations Between Hydrometeorological Conditions In Amazônia And The Extremes Of The Southern Oscillation. Disponível em:<<http://www.unesco.org/uy/phi/libros/enso/marengo.pdf>> Acesso em 16 de março de 2004.

Marengo, J.A.; Uvo, C. B. Variabilidade e Mudança Climática no Brasil e América do Sul. **Climanálise**. Edição Comemorativa 10 anos, out. 1996. Disponível em: <www.cptec.inpe.br/products/climanalise/cliesp10a/mudanca.html>. Acesso em 22/06/2003

Ministério de Minas e Energia - Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica, Divisão de Controle de Recursos hídricos. **Inventário das Estações Fluviométricas**. Brasília, 1997.

New, M.; Hulme, M.; Jones, P. Representing Twentieth-Century Space-Time Climate Variability. Part II: Development of 1901-96 Monthly Grids of Terrestrial Surface Climate. **Journal of Climate**, v. 13, n.13 , p. 2217-2238, Jul. 2000.

New, M.; Lister, D.; Hulme, M.; Makin, I. A high resolution data set of surface climate over global land areas. **Climate Research**, v. 21, n. 1, p. 1-25, May. 2002.

New, Mark; Hulme, M.; Jones, P. Representing Twentieth-Century space-Time Climate Variability. Part I: Development of a 1961-90 Mean Monthly Terrestrial Climatology. **Journal of Climate**, v. 12, n. 3, p. 829-856, Mar.1999.

Poveda, G.; Mesa, O.J. Feedbacks between hydrological processes in tropical South America and large-scale ocean-atmospheric phenomena. **Journal of Climate**, v. 10, n. 10, p. 2690-2702 , Oct.1997.

Ropelewski, C.F.; Halpert, M.S Global and Regional scale Precipitation Patterns Associated with the El Niño/Southern Oscillation. **Monthly Weather Review**, v. 115, n. , p. 1606-1626, Aug. 1987.

Woodruff, J. F. and Hewlett, J.D. Predicting and Mapping the average hydrological response in the eastern United States. **Water Resource Research**, v. 6, n.5, p.1312-1326, oct. 1970.

Zeng, N.; Seasonal cycle and interannual variability in the Amazon hydrologic cycle. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, n. D8, p. 9097-9106, Apr.1999.