

# INFLUÊNCIA DO FENÔMENO ENOS NA RESPOSTA HIDROLÓGICA ANUAL DA SUB-BACIA AMAZÔNICA/BRASIL (REGIÃO HIDROGRÁFICA DO XINGU/PARÁ)

E. W. M. Lucas<sup>(1)</sup>, F. A. S. Souza<sup>(2)</sup>, F. D. S. Silva<sup>(1)</sup>, A. M. Ramos<sup>(1,3)</sup>, F. C. Conde<sup>(1,3)</sup>

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Meteorologia. Eixo Monumental Via S-1, 70680-900, Brasília/DF.  
edmundo.lucas@inmet.gov.br

<sup>2</sup> Universidade Federal de Campina Grande - Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas.  
Av. Aprígio Veloso 882, 58109-970, Campina Grande/PB.

<sup>3</sup> Centro de Geofísica de Évora. Universidade de Évora. Rua Romão Ramalho, 59. 7000-671.  
Évora, Portugal.

## RESUMO

*A resposta hidrológica é a forma pela qual uma bacia responde com escoamento à precipitação que cai no solo, sendo definida como a razão entre o runoff e a precipitação. Há uma relação bastante evidente do regime de precipitação e vazões nos rios da Amazônia e a influência do fenômeno ENSO - El Niño/Oscilação Sul. O objetivo deste trabalho é analisar a possível influência do fenômeno ENSO - El Niño/Oscilação Sul, na vazão observada em uma sub-bacia Amazônica no estado do Pará/Brasil (Região Hidrográfica do Xingu), através da simulação da resposta hidrológica anual, analisada para cada estação selecionada na região. Para o cálculo da resposta hidrológica, estabeleceu-se um atraso (lag) de um mês para a vazão, em relação à precipitação, visto que os picos de vazão ocorrem, em média, um mês depois dos maiores eventos de precipitação. Foi verificado que para valores de resposta hidrológica anual, em alguns anos de evento La Nina (El Niño), as estações estudadas apresentaram com maior frequência valores abaixo (acima) da média climatológica observada, o padrão de resposta hidrológica anual encontrado não concorda com o regime de precipitação experimentado pela Bacia Amazônica em anos de La Niña e El Niño. Uma nova metodologia deve ser utilizada, para avaliar os padrões de resposta hidrológica na bacia, reduzindo a escala temporal para mensal e trimestral, para poder capturar melhor o sinal do ENSO na resposta hidrológica da região em estudo.*

**Palavras-chave:** vazão, precipitação, processos hidrológicos.

## INTRODUÇÃO

A Bacia Amazônica é afetada por variações climáticas globais. Desse modo, a previsão de acontecimentos hidrológicos extremos é de suma importância para o conhecimento hidrológico mais detalhado de suas bacias e sub-bacias hidrográficas e como consequência para o desenvolvimento regional. A relação da precipitação e das vazões nos rios da Amazônia e a influência do fenômeno ENOS - El Niño/Oscilação Sul é bastante evidente. Geralmente, ocorrem valores acima da média durante os episódios de La Niña, com chuvas abundantes no norte e leste da Amazônia. Já em anos de El Niño ocorrem valores de vazões abaixo da média histórica, quando a chuva diminui consideravelmente em toda a Amazônia. Na literatura especializada há estudos que descrevem detalhadamente os impactos que essas oscilações climáticas causam no Brasil e no mundo.

A influência do fenômeno ENOS na vazão nas estações da sub-bacia estudada será realizada pelos padrões de resposta hidrológica anual durante o período observado, verificando onde ocorre resposta hidrológica acima (abaixo) da média observada, ou

seja, anomalias positivas (negativas). A região em estudo destaca-se pelo alto potencial hidrelétrico devido seu grande volume de água e relevo acidentado, propiciando condições ideais para geração de energia, podendo citar o estudo da implantação da Usina Hidrelétrica de Belo Monte.

## FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### *Ciclo hidrológico*

Os processos físicos que controlam a distribuição e o movimento da água na superfície terrestre são melhores compreendidos quando descritos como parte integrante e inseparável do ciclo hidrológico. O ciclo hidrológico pode ser dividido em etapas: precipitação, interceptação, infiltração, escoamento superficial, escoamento subterrâneo, transpiração e evaporação. Tucci (1998) descreveu cada uma dessas etapas.

Segundo Peixoto e Oort (1992) a distribuição de água em varias fases no globo dá-se por três reservatórios principais: oceanos, continentes e atmosfera. Essa distribuição anual é mostrada na Figura 1. Cerca de 97% do volume total de água da

hidrosfera está contido nos oceanos, 2,4% nos continentes e 0,001% na atmosfera. Sobre os continentes a água é distribuída em reservatórios secundários: regiões glaciais, água subterrânea, lagos, rios e na biosfera. A água evapora dos oceanos e continentes (evapora e evapotranspira) para a atmosfera, sendo transportada na fase condensada em nuvens ou na fase de vapor d'água, voltando a precipitar sobre continentes e oceanos, infiltrando no solo ou escoando sobre a superfície para rios e lagos, refazendo seu trajeto de volta aos oceanos. Dada à dimensão dos oceanos, o volume de água evaporada e precipitada é muito maior do que nos continentes.

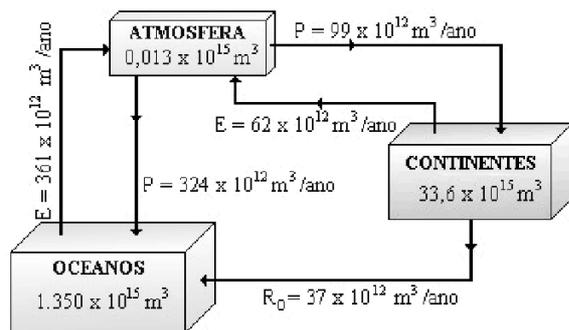


Figura 1. Quantidade anual de água estocada nos oceanos, continentes e atmosfera, e troca entre diferentes reservatórios por meio da evaporação (E), precipitação (P) e runoff ( $R_0$ ). Fonte: Modificada Peixoto e Oort (1992)

### Resposta Hidrológica

A resposta hidrológica é a forma pela qual uma bacia responde com escoamento à precipitação que cai no solo, sendo definida como a razão entre o runoff e a precipitação. Ela representa a produção de água de uma bacia em função da precipitação. A resposta hidrológica da bacia depende de certa forma, de suas características morfológicas (área, forma, topografia, geologia, solo, cobertura vegetal entre outros).

Calcular a quantidade de água que uma bacia produzirá, em forma de vazão, a partir de diferentes tipos de precipitação vem sendo tratada por hidrologistas como forma de prever e prevenir acidentes ao homem. Um dos modelos chuva-vazão mais antigos é descrito em Chow (1964). É um modelo antigo, mas eficiente para certas condições de contorno. Esse modelo vem sendo utilizado nos Estados Unidos e na Inglaterra desde o século XVIII até hoje. Trata-se do modelo denominado Fórmula Racional (Equação 1):

$$Q = C \times P \times A \quad (1)$$

Em que Q é o pico de vazão em  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ , C é o coeficiente de runoff (adimensional), P é a taxa da precipitação em  $\text{mm h}^{-1}$  e A é a área da bacia hidrográfica estudada em  $\text{m}^2$ . Sendo C a resposta hidrológica da bacia, é importante conhecer como a

bacia responde à entrada de água, nas diversas formas de precipitação. Nem toda precipitação que cai numa bacia se transforma em deflúvio diretamente. Parte dela flui como escoamento direto, parte permanece armazenada na bacia por algum tempo, compondo o aquífero, e parte evapora do solo para a atmosfera.

### El Niño/Oscilação Sul (ENOS)

Fenômeno representado pela interação oceano - atmosfera, onde o aquecimento das águas da bacia do Pacífico equatorial interage com as circulações atmosféricas, alterando os padrões desta circulação a nível global (Trenberth, 1997). O ENOS ou El Niño Oscilação Sul representa de forma mais genérica um fenômeno de interação atmosfera - oceano, associado às alterações dos padrões normais da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) e dos ventos alísios na região do Pacífico Equatorial, entre a Costa Peruana e Pacífico oeste próximo à Austrália. Além de índices baseados nos valores da temperatura da superfície do mar no Oceano Pacífico equatorial, o fenômeno ENOS pode ser também quantificado pelo Índice de Oscilação Sul (IOS). Este índice representa a diferença entre a pressão ao nível do mar entre o Pacífico Central (Taiti) e o Pacífico do Oeste (Darwin/Austrália). Esse índice está relacionado com as mudanças na circulação atmosférica nos níveis baixos, consequência do aquecimento/resfriamento das águas superficiais na região. Valores negativos e positivos da IOS são indicadores da ocorrência do El Niño e La Niña respectivamente (INPE/CPTEC, 2008).

No Brasil os principais efeitos relacionados ao episódio El Niño são: diminuição das chuvas no leste da Amazônia e nordeste do Brasil, causando severas secas no nordeste brasileiro e altas taxas de precipitação no Sul e sudeste do Brasil. Com relação ao fenômeno La Niña este causa em geral chuvas abundantes no norte e leste da Amazônia e no Nordeste, podendo ocorrer chuvas acima da média na região do semi-árido do nordeste brasileiro, e secas severas no sul do país. Marengo *et al.* (2004), pesquisando a influência do ENOS na Amazônia, constatou que, na porção norte da bacia predominam condições mais secas durante eventos de El Niño e nas regiões sul e centro da Amazônia prevalecem condições mais úmidas. Zeng (1999), estudando a influência de um evento ENOS sobre o runoff na bacia Amazônica, mostra que a mesma pode ocorrer até sete meses após o início do evento, ocorrendo dentro do ano hidrológico em estudo ou no ano seguinte.

Existe uma grande variedade de condições para eventos de El Niño e La Niña, na maioria os eventos são classificados como forte, moderados ou fracos. Vários centros no Brasil e no mundo monitoram a evolução desses fenômenos, com o objetivo de evitar ou minimizar os prejuízos causados pelos

fenômenos naturais. Na Tabela 2, é apresentado um histórico dos fenômenos El Niño e La Niña a partir de 1970, com suas respectivas intensidade.

El Niño	La Niña
1972 - 1973***	1970 - 1971**
1976 - 1977*	1973 - 1976***
1977 - 1978*	1983 - 1984*
1979 - 1980*	1984 - 1985*
1982 - 1983***	1988 - 1989***
1986 - 1988**	1995 - 1996*
1990 - 1993***	1998 - 2001**
1994 - 1995**	-
1997 - 1998***	-
2002 - 2003**	-
2004 - 2005*	-
2006 - 2007*	-

\*Fraco, \*\* Moderado e \*\*\*Forte

Tabela 2. Anos de eventos de El Niño e La Niña. Fonte: Modificada INPE/CPTEC (2008)

Carrielo (2004), analisando a variabilidade espaço-temporal da resposta hidrológica, para o período de 1970 a 2000, em oito grandes bacias hidrográficas brasileiras, destaca a influência do fenômeno ENOS na resposta hidrológica dessas bacias. Ele observou que na Amazônia central os anos com resposta hidrológica mais elevada que a climatologia foi: 1976-77; 1977-78; 1982-83; 1987-88; 1991-92 (anos de El Niño); 1978-79; 1981-82; 1996-97 (neutros); 1984-85 (La Niña); e os anos com respostas hidrológicas mais baixas foram: 1972-73 (El Niño); 1970-71; 1971-72; 1973-74; 1974-75; 1975-76; 1995-96 (La Niña) e 1998-99 (neutro). O autor observou ainda que na Bacia Amazônica, em períodos de El Niño, as sub-bacias do centro sul apresentam tendência a anomalias positivas, enquanto as sub-bacias do norte tendem a apresentar anomalias negativas de resposta hidrológica.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Local de estudo, dados utilizados e metodologia

A bacia hidrográfica do Xingu possui área de 531.250 km<sup>2</sup>, sendo que 216.823 km<sup>2</sup> (40,8%) pertencem ao estado do Mato Grosso (MT), onde está localizada a nascente do rio principal, o Xingu, na serra do Roncador. A área restante 59,2% pertence ao estado do Pará (PA), que ocupa uma área de aproximadamente 314.427 km<sup>2</sup>, correspondente a 25,1% da área do estado. Na Região do Xingu estão localizados os municípios de Altamira, São Félix do Xingu, Senador José Porfírio, Vitória do Xingu, Brasil Novo, parte de Medicilândia, Placas e a parte oeste do município de Anapú. Os principais cursos d'água formadores dessa bacia, no Pará são os rios Xingu, Iriri, Curuá, Fresco, Bacajá, Caeté, Ximxim e Chiche.

Foram selecionados para este trabalho, oito estações com dados consistidos mensais de chuvas e vazões, localizadas na sub-bacia em estudo (Figura 2) a partir do Inventário das Estações Fluviométricas e Pluviométricas da Agência Nacional de Águas (ANA, 2006). Informações sobre a área de drenagem e período de dados estão descritos na Tabela 1.

Estações	Área (Km <sup>2</sup> )	Período de Dados
Altamira	446203	01/1975 à 12/2005
Arapari	17072	06/1972 à 12/2005
Belo Horizonte	277265	05/1976 à 12/1997
Boa Esperança	42275	09/1976 à 12/2002
Cajueiro	34693	01/1976 à 12/2002
Pedra do Ó	123827	09/1976 à 12/1992
São F. do Xingu	250269	07/1975 à 12/1996
Uruara	2628	01/1978 à 12/2005

Tabela 1. Dados das estações fluviométricas e Pluviométricas da sub-bacia estudada

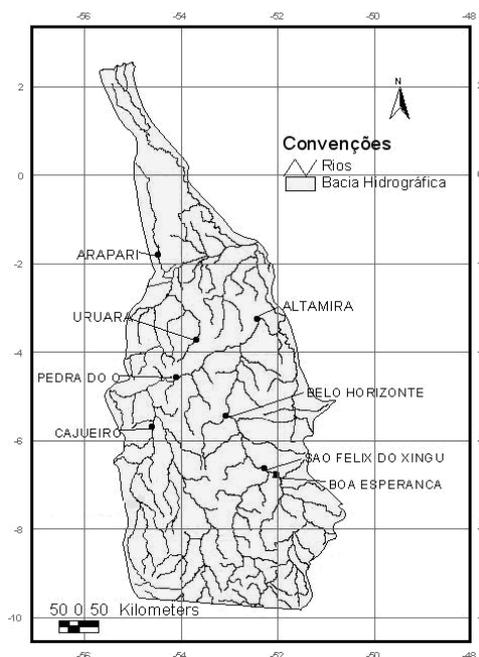
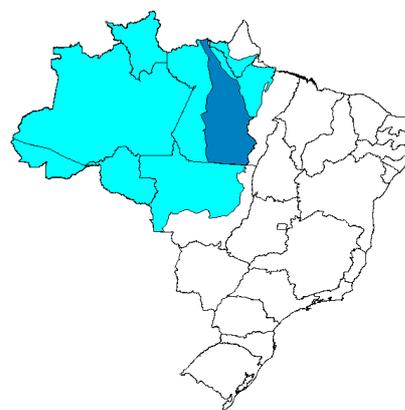


Figura 2. Localização geográfica das estações na sub-bacia estudada

Com base nos dados de vazões, precipitações e área de drenagem, foi estimada a resposta hidrológica anual para todas as estações, utilizando a equação 1. Para o cálculo, estabeleceu-se um atraso (*lag*) de um mês para a vazão, em relação à precipitação, visto que os picos de vazão ocorrem, em média, um mês depois dos maiores eventos de precipitação.

Lucas *et al.* (2006), estudaram a regionalização e distribuição espacial e temporal da precipitação na bacia hidrográfica do Xingu/PA verificaram que a precipitação varia de 1500 a 2500 mm ano<sup>-1</sup>, aproximadamente, sendo que nas partes norte e sudoeste da bacia, ocorrem as maiores magnitudes de chuvas, principalmente causadas pela atuação dos sistemas atmosféricos conhecidos como Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) respectivamente. A bacia em estudo apresenta três estações de chuvas distintas e bem definidas. A estação chuvosa, de dezembro a maio, a estação seca, de junho a setembro e uma de transição seca-chuva, em outubro e novembro.



Figura 2 - Variação anual da precipitação no Estado do Pará. Fonte: Moraes et al. (2005)

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

A ocorrência do evento vazão de uma bacia hidrográfica depende fortemente da variabilidade espaço-temporal da precipitação e pode contribuir com o aumento ou diminuição de seus valores observados na exutória estudada. A forma pela qual a vazão responde a dado estímulo da precipitação na bacia é denominada de resposta hidrológica. Essa resposta representa a produção de água em determinada seção transversal do rio de uma bacia hidrográfica em função da precipitação.

O comportamento dos padrões da resposta hidrológica anual para algumas estações se repete principalmente para anos de evento La Niña, com resposta mais baixas do que a média histórica, destacando-se os anos de 1984, 1988, 1998, 1999, 2000 e os 1983, 1995, anteriores a anos de eventos El Niño forte e moderado respectivamente. Algumas estações em anos de La Niña, apresentaram resposta acima da média climatológica. Em anos de El Niño a variabilidade da resposta hidrológica, nos anos estudados, é maior e não apresenta um padrão definido, principalmente em anos de eventos El

Niño fraco e moderado, algumas estações apresentam resposta hidrológica acima da média climatológica nos anos de 1976, 1977, 1979 e 1990, destacando-se os anos de 1982, 1986, 1991, 1992 e 1997, com resposta hidrológica positivas em quase todas as estações. Já os anos de 1987 e 1994, anteriores a eventos de La Niña forte e fraco respectivamente, apresentaram resposta hidrológica negativa para quase todas as estações.

Na Figura 4 e apresentada a resposta hidrológica média anual para os anos de 1984 e 1982, anos de La Niña e El Niño respectivamente, comparados como média da série, onde o padrão de resposta encontrado ficou evidente para o ano de La Niña e El Niño, exceto para a estação de Uruara. Foram encontrados valores extremos máximos para as estações de Altamira, Belo Horizonte e Cajueiro.

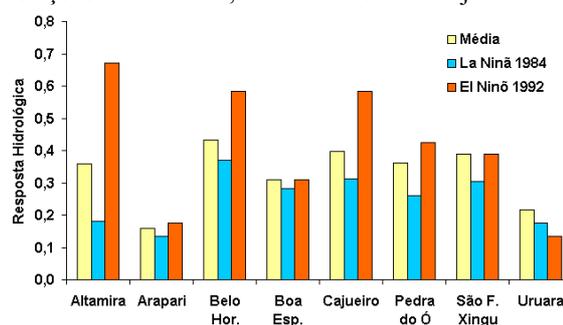


Figura 3. Resposta Hidrológica média anual das estações em estudo

A resposta hidrológica anual média, em anos de El Niño, La Niña e para a série no período estudado, são apresentadas na Figura 3, mostrando assim que de um modo geral a resposta hidrológica em anos de La Niña (El Niño) é menor (maior), que a média anual observada.

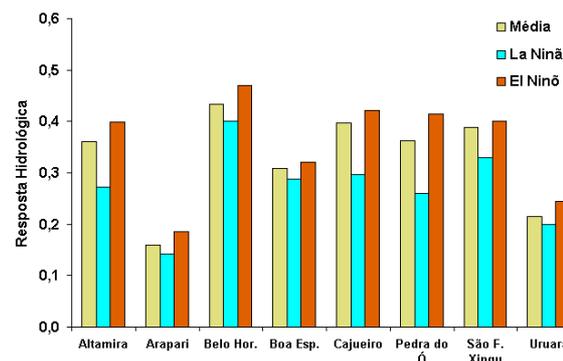


Figura 3. Resposta Hidrológica média anual das estações em estudo

A influência do fenômeno ENOS na resposta hidrológica depende bastante da intensidade desse fenômeno e da característica do ano e meses anteriores ao fenômeno. Esse fato condiciona também o padrão de resposta hidrológica para anos considerados neutros.

Na Figura 5, é mostrada a distribuição espacial da resposta hidrológica anual média na região estudada,

onde podemos verificar na Figura 5a um aproveitamento hidrológico médio maior, na parte Centro e Sul da região estudada e menor na parte Norte. Para anos de La Niña, Figura 5b e El Niño, Figura 5c, apesar da redução e aumento na resposta hidrológica respectivamente, o mesmo padrão foi encontrado e que de um modo geral, a região estudada apresenta um aproveitamento hidrológico anual médio maior, na parte Centro e Sul e menor na parte Norte, em todas as estações e para todo o período estudado.

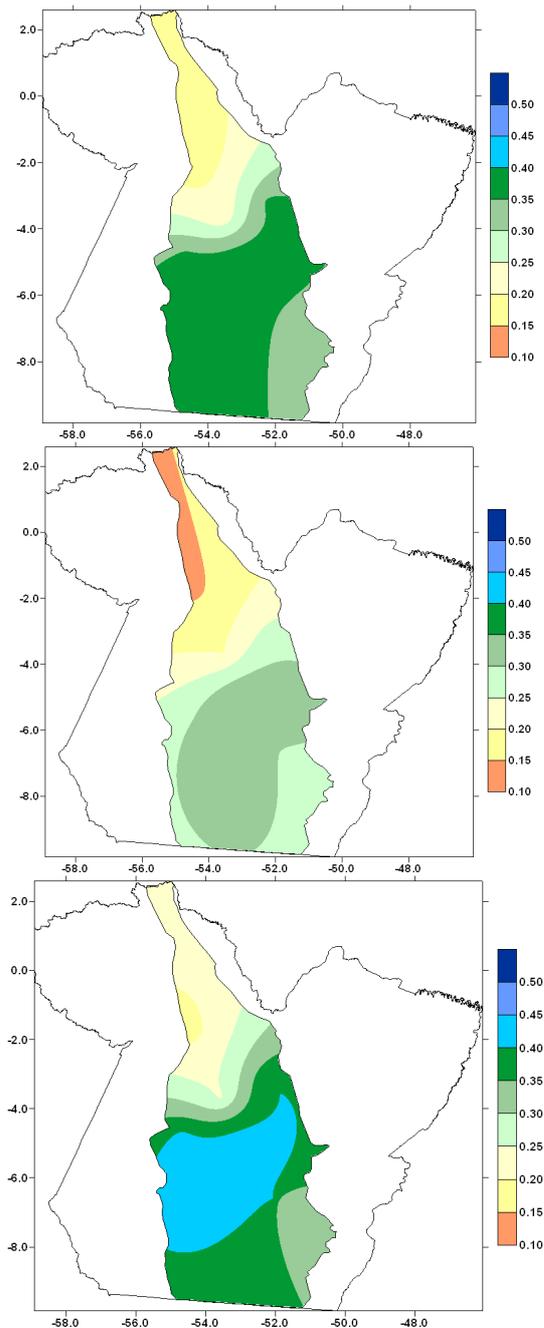


Figura 5. Distribuição espacial da Resposta hidrológica média anual: a) Série, b) La Niña e c) El Niño

Os resultados aqui encontrados da influencia do fenômeno ENOS na resposta hidrológica anual, principalmente em anos de La Niña, são bastante contraditórios com o regime de precipitação da Bacia Amazônica em anos de La Niña, onde esperase que com aumento considerável do volume de precipitação sobre a bacia, a resposta hidrológica anual apresenta-se valores maiores que a média histórica observada e vice-versa para anos de El Niño. É importante considerar que outros fatores como topografia, geologia, tipo de solo e cobertura vegetal também afetam esses resultados.

### CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Embora os resultados aqui obtidos corroboram com os de Cariello (2004), e reforçam afirmações anteriores de que a resposta hidrológica da bacia é muito influenciada pelo regime de precipitações associadas aos fenômenos ENOS, o padrão de resposta hidrológica anual encontrado não concorda com o regime de precipitação experimentado na Bacia Amazônica em anos de La Niña e El Niño. Uma nova metodologia deve ser utilizada, para avaliar os padrões de reposta hidrológica na bacia, reduzindo a escala temporal para mensal e trimestral, para capturar melhor o sinal do ENSO na reposta hidrológica da região em estudo.

Para trabalhos futuros sugere-se analisar as anomalias mensais das temperaturas da superfície do mar (TSM) do Pacífico e relacioná-las com as vazões mensais observadas na bacia hidrográfica do Xingu.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Inventario das estações fluviométricas e pluviométricas. Disponível em: <[www.ana.gov.br](http://www.ana.gov.br)>. Acesso em abril 2006.

CARRIELO, Felix. Estimativas da resposta hidrológica das sub-bacias brasileiras. Tese (Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004.

CHOW, V.T. Runoff. In: Chow, V.T. Handbook of applied hydrology. New York: Mc-Graw Hill May. Cap. 14, p. 141-149, 1964.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS/ CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMATICOS (INPE/CPTEC). EL NIÑO E LA NIÑA. Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br/enos>>. Acesso em janeiro 2008.

LUCAS, E. W. M.; *et al.* Variação espacial e temporal da precipitação na bacia hidrográfica do Xingu, Pará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE

METEOROLOGIA, XIII, 2006, Florianópolis/SC: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2006.

LUCAS, E. W. M.; *et al.* Regionalização da precipitação na bacia hidrográfica do Xingu, Pará, Pará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, XIII, 2006, Florianópolis/SC: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2006.

MARENGO, J.A.; NOBRE, C.A.; SAMPAIO, G. On the associations between hydrometeorological conditions in Amazonia and the extremes of the southern oscillation. Disponível em: <<http://www.unesco.org.uy/phi/libros/enso/marengo.pdf>> Acesso em março de 2004.

MORAES, B. C., et al., Variação espacial e temporal da precipitação no estado do Pará. Acta Amazônica. Vol. 35(2), 207-214, 2005.

PEIXOTO, J.P.; OORT, A.H., Physics of climate. New York: American Institute of physics, 1992. 250p.

TRENBERTH, K.E. The definition of El Niño. Bulletin of the American Meteorological Society, v.78, n12, p.2771-2777, 1997.

TUCCI, C.E.M., Modelos Hidrológicos, Editora Universitária UFRGS, Porto Alegre, 1998.

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