

A influência do evento El Niño – Oscilação Sul e Atlântico Equatorial na precipitação sobre as regiões norte e nordeste da América do Sul

Rosimeire ARAÚJO Gonzalez¹, Rita Valéria ANDREOLI², Luiz Antonio CANDIDO³, Mary Toshie KAYANO⁴, Rodrigo Augusto Ferreira de SOUZA⁵

RESUMO

Os impactos de eventos anômalos no oceano Pacífico associados ao El Niño-Oscilação Sul (ENOS) na precipitação da região norte e nordeste da América do Sul foram avaliados para o período de 1900 a 2007, fazendo-se uso de análise de composições. Os eventos El Niño (La Niña) no Pacífico que juntamente com um Modo Equatorial no Atlântico (MEA) frio (quente) formam um gradiente interbacias entre o Pacífico e Atlântico foram analisados considerando, separadamente, aqueles para os quais o gradiente se forma na fase inicial do ENOS daqueles em que o gradiente se forma na fase de decaimento do ENOS. Os resultados mostram que o padrão de precipitação na região norte e nordeste da América do Sul é reforçado mediante a configuração do gradiente interbacias durante a fase inicial do ENOS. Nesse caso, uma possível explicação é que o MEA de sinal contrário ao ENOS durante sua fase inicial cria condições favoráveis para o desenvolvimento de um gradiente inter-hemisférico no Atlântico Tropical atuando no mesmo sentido do gradiente interbacias, e colaborando para fortalecer o efeito do El Niño (La Niña) na precipitação. Por outro lado, para os eventos ENOS em que o gradiente se forma em sua fase de decaimento, o impacto na precipitação é mais significativo na região norte e centro-oeste da bacia. Uma possível explicação para essas diferenças está associada às mudanças que ocorrem na circulação atmosférica leste-oeste associada ao gradiente leste-oeste de anomalias da TSM. Os resultados deste estudo podem ser úteis, principalmente, para fins de monitoramento climático.

PALAVRAS-CHAVE: Temperatura da Superfície do Mar, chuva, Amazônia, gradiente interbacias

Influence of El Niño-Southern Oscillation and Equatorial Atlantic on rainfall over northern and northeastern regions of South America.

ABSTRACT

The impacts of anomalous events in the Pacific Ocean associated with the El Niño - Southern Oscillation (ENSO) on rainfall over northern and northeastern regions of South America were evaluated for the period from 1900 to 2007 using composite analyses. The El Niño (La Niña) events in the Pacific, that together with a cold (warm) Atlantic Equatorial Mode (AEM) form an interbasin gradient between the Pacific and Atlantic were analyzed considering separately those for which the gradient forms during the ENSO onset phase from those for which the gradient forms during the ENSO demise phase. The results show that the rainfall pattern over the northern and northeastern region of South America is reinforced under an interbasin gradient during the initial phase of the ENSO event. In this case, a possible explanation is that the AEM with opposite sign of the ENSO event in its onset stage creates favorable conditions for the development of an interhemispheric gradient in the Tropical Atlantic acting in the same direction of the interbasin gradient, and collaborating to reinforce the El Niño (La Niña) effect on the precipitation. On the other hand, for ENSO events for which the interbasin gradient forms in the demise stage, the impact on the precipitation is more significant in the northern and central-western regions of the basin. A possible explanation for these differences is linked to the alterations in the east-west atmospheric circulation associated with the east-west gradient of the SST anomalies. The result of this study might be useful mainly for climate monitoring purposes.

KEYWORDS: Sea Surface Temperature, rainfall, Amazon, interbasin gradient

¹ Programa de Pós-Graduação em Clima e Ambiente (CLIAMB, INPA/UEA). Av. André Araújo, 2936, Campus II, Aleixo, 69060-001, Manaus, AM, Brasil. projetorose@gmail.com

^{2,5} Universidade do Estado do Amazonas, Escola Superior de Tecnologia, Coordenação de Meteorologia. Av. Darcy Vargas, 1200, Parque 10 de Novembro, 69065-020, Manaus, AM, Brasil. ²rasouza@uea.edu.br, ⁵rafsouza@uea.edu.br

³ Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia-INPA, Coordenação de Dinâmica Ambiental. Av. André Araújo, 2936, Campus II, Aleixo, 69060-001, Manaus, AM, Brasil. lcandido@inpa.gov.br

⁴ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos, Divisão de Modelagem e Desenvolvimento. Av. dos Astronautas, 1758, 12227-010, São José dos Campos, SP, Brasil. mary.kayano@cptec.inpe.br

INTRODUÇÃO

Estudos com enfoque na variabilidade interanual da precipitação nas regiões norte e nordeste da América do Sul têm associado essa variabilidade ao fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS) (Kayano e Moura 1986; Marengo 1992; entre outros). Anomalias positivas (negativas) da temperatura da superfície do mar (TSM) no Oceano Pacífico associadas aos episódios El Niño (La Niña) produzem circulações anômalas de grande escala na atmosfera, gerando impactos significativos no clima da região do Atlântico e da América do Sul (Aceituno 1988; Grimm *et al.* 2000; Grimm 2004). Neste mesmo contexto, Marengo (2006) observou, para o período de 1979-2000, reduções na precipitação, no escoamento e na convergência de umidade em anos de El Niño, e aumentos destas variáveis em anos de La Niña.

Por outro lado, (Yoon e Zeng 2010) constataram que apenas uma fração da variabilidade da precipitação na Amazônia pode ser explicada pelo ENOS, e que esta relação é mais atuante somente durante a estação chuvosa. Os autores sugerem que a influência do Atlântico Tropical (AT) Norte (ATN) na variabilidade climática na região Amazônica pode ser comparável às mais conhecidas teleconexões com o ENOS do oceano Pacífico, concordando com estudos anteriores que mostraram que as variações de precipitação da Amazônia também estão relacionadas às TSM no AT (Liebmann e Marengo 2001; Marengo *et al.* 2008).

Assim, estudos que examinam a variabilidade interanual de precipitação nas regiões norte e nordeste da América do Sul devem levar em conta as variações interanuais de TSM associadas ao fenômeno ENOS e as que ocorrem no AT, bem como suas relações. Objeto de vários estudos têm sido os efeitos das variações da TSM do Pacífico tropical em outras regiões oceânicas (Curtis e Hastenrath 1995; Enfield e Mayer 1997; Giannini *et al.* 2001). Nesses estudos está claro que o ENOS influencia tanto o ATN quanto o AT sul (ATS). Porém, a influência do ENOS no Atlântico Equatorial é menos clara (Zebiak 1993; Enfield e Mayer 1997), e pode ocorrer no sentido oposto.

De fato, mudanças na teleconexão entre os oceanos Atlântico e Pacífico vêm sendo notadas. Rodríguez-Fonseca *et al.* (2009) encontraram evidências que desde o final da década de 60 os eventos de ENOS no Pacífico são precedidos por eventos de sinal oposto nas anomalias TSM (ATSM) do Atlântico Equatorial. O mecanismo proposto para essa relação é que um evento de anomalia positiva (negativa) no Atlântico Equatorial intensifica uma circulação de Walker anômala com movimentos ascendentes (descendentes) sobre o Atlântico Equatorial e descendente (ascendente) sobre o Pacífico equatorial leste (Wang 2006; Rodríguez-Fonseca *et al.* 2009; Kayano *et al.* 2011). Esse mecanismo induz processos oceânicos que favorecem o afloramento

(afundamento) da termoclina, o que contribui para que a região do Pacífico equatorial leste se torne ainda mais fria (quente), intensificando-se a La Niña (o El Niño) existente.

Kayano *et al.* (2011), analisaram a evolução temporal das ATSM relacionadas ao ENOS que ocorreram após eventos quentes/frios no Atlântico Equatorial e aqueles que ocorrem independentemente das condições do Atlântico Equatorial. Seus resultados mostram diferentes padrões de evolução das anomalias de TSM e de pressão ao nível do mar (PNM), principalmente em relação às teleconexões associadas ao ENOS com efeitos na precipitação.

Do acima exposto, os resultados anteriores sugerem a existência da relação interbacias. No entanto há discrepâncias sobre a questão da precedência. Alguns autores sugerem que o Pacífico Tropical tem uma significativa influência no AT (Enfield e Mayer 1997; Latif e Grotzer 2000), enquanto recentes estudos têm mostrado uma associação reversa, de modo que um evento quente (frio) no Atlântico Equatorial pode ser seguido de um evento frio (quente) no Pacífico Tropical (Melice Servain 2003; Rodríguez-Fonseca *et al.* 2009; Kayano *et al.* 2011). O presente trabalho re-examina a relação entre o ENOS e evento quente (frio) no Atlântico Equatorial estabelecendo as sequências de padrões anômalos de TSM e precipitação no norte da América do Sul considerando que casos de ENOS podem preceder ou suceder eventos anômalos e de sinais contrários no Atlântico Equatorial. Vale ressaltar que a abordagem aqui é similar a de Kayano *et al.* (2011). Porém, na presente análise, um índice mais simples foi usado para definir os eventos quentes e frios do AT, os eventos selecionados de ENOS foram os mais fortes, e o enfoque na precipitação é para as estações seca e chuvosa da região Amazônica. Estes aspectos facilitam a aplicação dos resultados para monitoramento climático, bem como para simulações climáticas futuras.

MATERIAL E MÉTODOS

Os dados utilizados para definir os padrões dominantes de variabilidade de TSM nos oceanos Pacífico e Atlântico são os campos globais de TSM mensais, que consistem de séries temporais reconstruídas por Smith *et al.* (2008) para o período de 1900 a 2008 numa grade com uma resolução espacial de 2° de latitude por 2° de longitude. Em adição são usadas séries mensais de Pressão ao Nível do Mar (PNM) em uma resolução espacial de 5° de latitude por 5° de longitude, para o período de 1901 a 2004 obtidas a partir do site do “Met Office Hadley Center” (Allan e Ansell 2006), e séries de precipitações mensais em uma resolução espacial de 1° de latitude por 1° de longitude derivadas do “Global Precipitation Climatology Center (GPCC)” (Beck *et al.* 2005; Rudolf e Rubel 2005). As séries de precipitação são selecionadas para o período de 1901-2007 na área delimitada por 5°N, 20°S,

90 °W e 30 °W, a qual engloba as regiões norte e nordeste da América do Sul. Estes dados foram gerados por um sistema de análises operacional o qual inclui: integração de dados a partir de diferentes fontes, controle de qualidade, e o cálculo da precipitação média em área em cada grade de 1° por 1° (Rudolf e Rubel 2005). Embora erros possam existir neste conjunto de dados devido a deficiências no processo de medição ou a representatividade espacial, o mesmo contém dados de precipitação em pontos de grade com grande fidelidade às medidas locais, e já foi usado em diversos estudos anteriores, que avaliaram a variabilidade de precipitação sobre a região de estudo, dentre eles: Jury (2009) e Kayano *et al.* (2011).

As ATSM mensais foram calculadas removendo-se o ciclo anual usando como base a climatologia mensal do período de 1901 a 2007. Em seguida a tendência linear de longo prazo foi excluída em cada ponto de grade. Os eventos ENOS são selecionados através do índice da região do Niño-3, definida por Trenberth *et al.* (1997), como sendo a média espacial das ATSM sobre a região delimitada por 4 °N, 4 °S, 150 °W e 90 °W. Valores trimestrais do Niño-3 para DJF (dezembro-janeiro-fevereiro) maiores que 0,9 °C (menores que -0,7 °C) identificam o ano que corresponde a dezembro como sendo o ano inicial [ano (0)] do evento quente (frio) do ENOS. O ano seguinte [ano (+1)] se refere à fase madura do evento. O limiar para os eventos frios é menor para refletir a assimetria na distribuição do aquecimento/resfriamento da região do Niño-3. Esta metodologia é similar à utilizada por Andreoli e Kayano (2006), e seleciona eventos mais intensos.

O índice mensal que descreve as variações de TSM no setor equatorial do AT, que representa a região do Modo Equatorial do Atlântico (MEA), é obtido calculando-se a média das ATSMs na região definida por Zebiak (1993) delimitada em 4 °S, 4 °N, 20 °W e 0 °W. Valores do índice do MEA médios para JJA maiores que 0,4 °C (menores que -0,4 °C) identificam os eventos MEA positivos (negativos) no Atlântico Equatorial, para os anos correspondentes às fases inicial (0) e de decaimento (+1) do ENOS.

Para separar, dentre os eventos que ocorrem no Pacífico aqueles que estiveram associados ao MEA, adota-se o seguinte procedimento:

1. fase inicial de evento quente (frio) no Pacífico associado ao evento MEA frio (quente), ou seja, índice do MEA inferiores a -0,4 °C (superiores a 0,4 °C) ocorrendo no ano (0) de um evento ENOS. Estes eventos são definidos pelas siglas ATLN_EN e ATLP_LN.

2. fase madura do evento quente (frio) no Pacífico precedendo um evento frio (quente) no Atlântico Equatorial, ou seja, índice do MEA inferiores a -0,4 °C (superiores a 0,4 °C) ocorrendo no ano (+1) do evento ENOS. Estes eventos são definidos pelas siglas EN_ATLN e LN_ATLP.

Em seguida, a análise de composição é utilizada para obter os campos espaciais trimestrais de ATSM e de anomalias de PNM a fim de ilustrar a evolução temporal dos eventos. O trimestre inicial do padrão de evolução corresponde a MAM(0) e o trimestre final, a JJA(+1). No caso da precipitação, as análises são realizadas para os períodos de DJF(0), MAM(+1) e JJA(+1). Anomalias mensais de PNM e precipitação foram obtidas considerando a climatologia para o período de 1901 a 2004 e 1901 a 2007, respectivamente. As séries de anomalias, em cada ponto de grade, são normalizadas pelo desvio padrão correspondentes às séries temporais de anomalias. Para obter a significância estatística desses campos aplicou-se o teste t de Student considerando o número de graus de liberdade como número de eventos selecionados.

RESULTADOS

A Tabela 1 lista os anos classificados como eventos El Niño/La Niña no Oceano Pacífico e aqueles que configuram um gradiente interbacias ocorrendo na fase inicial (de decaimento) de eventos de El Niño denotados por ATLN_EN (EN_ATLN), e eventos que configuram um gradiente interbacias ocorrendo na fase inicial (de decaimento) de eventos La Niña são denotados por ATLP_LN (LN_ATLP). Nesta Tabela, cada evento ENOS é indicado pelo ano que corresponde à fase inicial do evento. Análises da Tabela em termos de porcentagens mostram que 33%, ou seja, sete dos 21 eventos de El Niño foram precedidos por um evento frio no Atlântico Equatorial (ATLN_EN). A mesma quantidade em termos percentuais foi encontrada para o caso de um evento frio no Atlântico equatorial ocorrendo após um El Niño (EN_ATLN). Em relação aos eventos de La Niña, dos 26 eventos selecionados, seis foram precedidos por um evento quente no Atlântico Equatorial (ATLP_LN), totalizando 23% dos eventos, enquanto que sete eventos, ou ainda, 26% dos eventos precederam um evento quente no Atlântico Equatorial (LN_ATLP). Esses resultados são consistentes com os encontrados por Kayano *et al.* (2011), em relação aos eventos ENOS que são precedidos por eventos no Atlântico Equatorial. Ainda, em concordância com os resultados de Rodríguez-Fonseca *et al.* (2009), a conexão entre evento quente (frio) no Atlântico equatorial precedendo evento frio (quente) no Pacífico é mais evidente a partir do final da década de 60, quando se analisa o período de 1950 a 2000.

A fim de examinarmos as diferenças nos padrões de anomalias de TSM e PNM e suas relações com precipitação nas regiões norte e nordeste da América, para os eventos selecionados na Tabela 1, as composições para essas variáveis foram obtidas e suas análises são apresentadas a seguir.

Tabela 1 - Anos selecionados como eventos El Niño/La Niña no Oceano Pacífico. Anos que configuram um gradiente interbacias ocorrendo na fase inicial (de decaimento) de eventos de El Niño são denotados por ATLN_EN (EN_ATLN), e eventos que configuram um gradiente interbacias ocorrendo na fase inicial (de decaimento) de eventos La Niña são denotados por ATLP_LN (LN_ATLP).

| EL NIÑO | ATLN_EN 7 Eventos (33%) | EN_ATLN 7 Eventos (33%) | LA NIÑA | ATLP_LN 6 Eventos (23%) | LN_ATLP 7 Eventos (26%) |
|---------|-------------------------------|-------------------------------|---------|-------------------------------|----------------------------|
| 1902 | 1902 | | 1903 | | |
| 1904 | 1904 | | 1908 | | 1908 |
| 1905 | | 1905 | 1909 | 1909 | |
| 1911 | 1911 | | 1910 | | |
| 1913 | | 1913 | 1916 | | 1916 |
| 1914 | 1914 | | 1917 | | |
| 1918 | | 1918 | 1922 | | |
| 1925 | | | 1924 | 1924 | 1924 |
| 1930 | | | 1933 | | 1933 |
| 1940 | | | 1938 | | 1938 |
| 1957 | | 1957 | 1942 | | |
| 1963 | | 1963 | 1944 | | |
| 1965 | 1965 | | 1949 | | |
| 1968 | | 1968 | 1950 | | |
| 1972 | | | 1954 | | |
| 1982 | 1982 | | 1955 | | |
| 1986 | | | 1967 | | 1967 |
| 1991 | | 1991 | 1970 | | |
| 1994 | | | 1971 | | |
| 1997 | 1997 | | 1973 | 1973 | |
| 2002 | | | 1975 | | |
| | | | 1984 | 1984 | |
| | | | 1988 | 1988 | |
| | | | 1998 | | 1998 |
| | | | 1999 | 1999 | |
| | | | 2005 | | |

Fase positiva do ENOS e suas relações com a precipitação nas regiões norte e nordeste da América do Sul

As Figuras 1 e 2 (painéis à esquerda, ATLN_EN) mostram os padrões espaciais de ATSM e anomalias de PNM associados ao desenvolvimento do gradiente interbacias, com a configuração de um evento frio no Atlântico equatorial ocorrendo na fase inicial de um evento de El Niño no Pacífico. Esse padrão mostra o fortalecimento de um evento El Niño com início em JJA(0). Nesse mesmo tempo, o gradiente interbacias de ATSM entre os oceanos Pacífico e Atlântico equatorial, está bem estabelecido. Anomalias negativas menos intensas persistem no Atlântico equatorial até DJF(0) quando o El Niño atinge sua fase madura. A partir de DJF(0) o El Niño começa a se enfraquecer, apesar de as ATSM positivas próximas à costa oeste da América do Sul persistirem até JJA(+1). No AT, o aquecimento no ATN, em resposta ao El Niño, como mostrado em estudos anteriores (por ex. Enfield e Mayer 1997), não se estabelece por muito tempo. No ATSM,

negativas voltam a se intensificar a partir de MAM(+1) e em JJA(+1) atingem a região equatorial, quando o gradiente interbacias é novamente estabelecido. Também, são notáveis no AT indicações de um fraco (anomalias não significativas) dipolo inter-hemisférico positivo em MAM(+1) e em JJA(+1).

Consistente com o padrão de ATSM durante o desenvolvimento do El Niño em JJA(0), o padrão de anomalias de PNM caracteriza-se por um gradiente leste-oeste com anomalias positivas (negativas) significativas no Pacífico tropical oeste (leste) (Figura 2, painéis à esquerda). Anomalias positivas significativas de PNM também são notadas no Atlântico equatorial e ATN. O centro de anomalias positivas no AT intensifica nos passos de tempo seguinte e em DJF(0), estende-se desde a América do Sul até a África. Em MAM(+1), embora anomalias de TSM permaneçam na parte central e leste do Pacífico, o padrão de PNM se enfraquece. Pode-se inferir que associado a esse padrão anômalo de PNM uma circulação de Walker anômala se estabelece com subsidência de ar no Atlântico equatorial e parte leste da América do

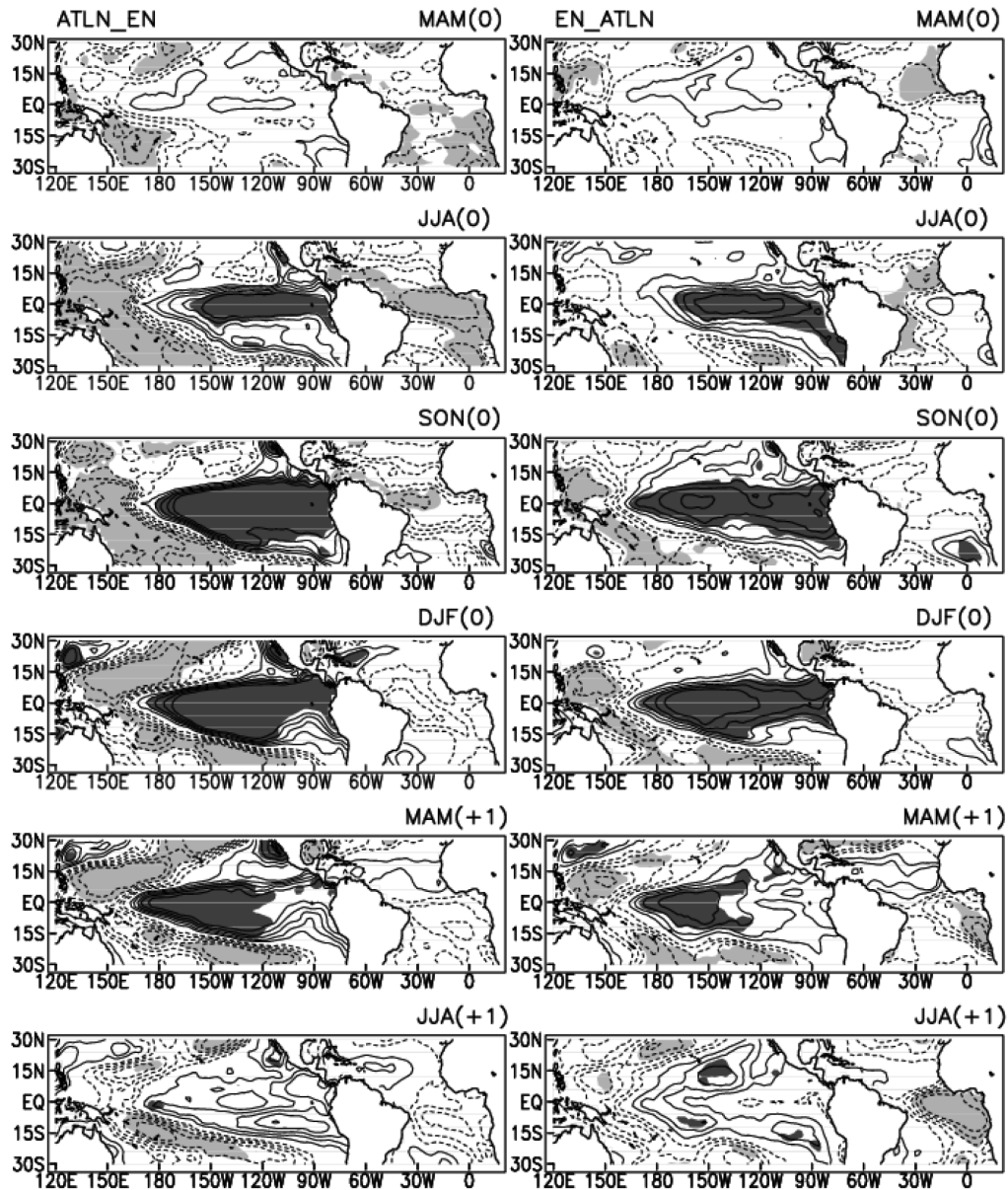


Figura 1 - Composições trimestrais de anomalias de TSM normalizadas a partir de MAM (0) a JJA (+1) para os eventos ATLN_EN e EN_ATLN. Contornos contínuos (pontilhados) correspondem aos valores positivos (negativos). Intervalo de contorno é 0.2. Sombreados em escala de cinza claro (escuro) definem regiões com valores negativos (positivos) significativos ao nível de confiança de 95%.

Sul e ascendência no Pacífico central e leste e costa oeste da América do Sul. No AT, consistente com o padrão de ATSM em MAM(+1) e JJA(+1), se estabelece um fraco dipolo inter-hemisférico negativo de anomalias de PNM.

Para o caso de MEA frio se estabelecendo na fase de decaimento do El Niño (Figura 1, painéis à direita), o evento El Niño inicia-se em JJA(0) e atinge máxima intensificação em DJF(0). Porém neste caso, as ATSM no Pacífico tropical estão equatorialmente mais confinadas do que no caso descrito acima, em particular em SON(0). No AT, ATSM negativas

no ATN e próximas à costa sudeste da América do Sul são notadas em JJA(0). Estas anomalias praticamente desaparecem a partir de SON(0). Vale notar que em SON(0) e DJF(0), há indicações de ATSM positivas no ATS ao sul de 10°S. Por outro lado, surgem ATSM positivas no ATN e negativas no ATS em resposta ao aquecimento do Pacífico em MAM(+1) concordando com estudos anteriores. Por exemplo, Enfield e Mayer (1997) mencionam a formação desta estrutura dipolar no padrão de ATSM no AT durante o período de março a maio após um evento El Niño no Pacífico. As anomalias negativas

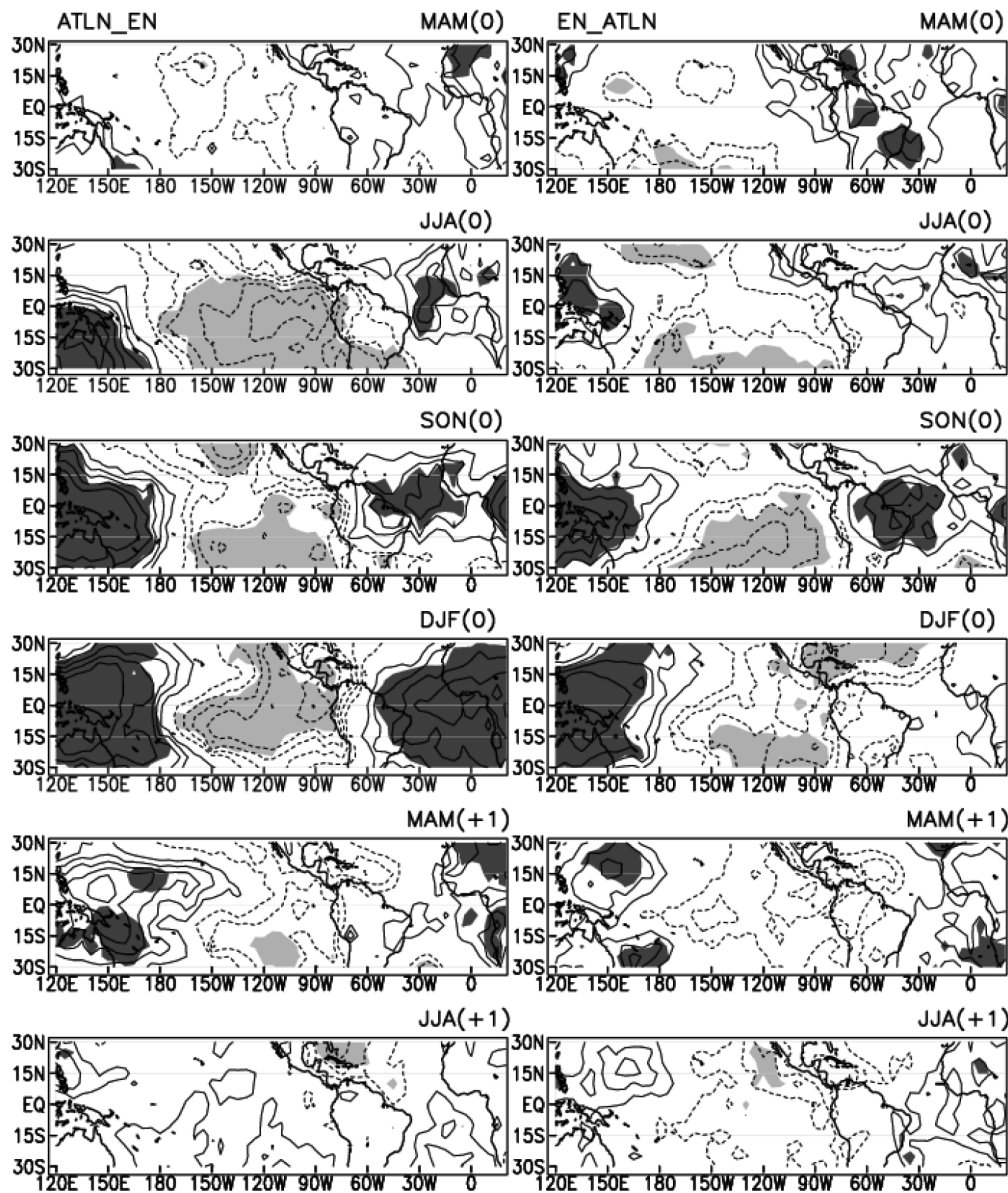


Figura 2 - Composições trimestrais de anomalias de PNM normalizadas a partir de MAM(0) a JJA(+1) para os eventos ATLN_EN e EN_ATLN. Contornos contínuos (pontilhados) correspondem aos valores positivos (negativos). Intervalo de contorno é 0.2. Sombreados em escala de cinza claro (escuro) definem regiões com valores negativos (positivos) significativos ao nível de confiança de 95%.

no ATS e o El Niño no Pacífico leste formam o gradiente interbacias em MAM(+1), que desaparece em JJA(+1). Salientam-se em JJA(+1) as indicações de ATSM positivas no ATN contornando o noroeste da América do Sul e no ATS próximas à costa leste do nordeste do Brasil.

Em relação aos padrões de anomalias de PNM, um gradiente leste-oeste anômalo com anomalias positivas na região da Austrália e negativas no Pacífico tropical leste é estabelecido em SON(0) e persiste até DJF(0) quando o El Niño atinge máxima intensificação (Figura 2, painéis à

direita). Em SON(0), anomalias positivas de PNM são notadas sobre a região norte da América do Sul e oceano Atlântico adjacente. Esse centro de anomalias positivas praticamente desaparece em DJF(0), quando anomalias negativas de PNM são estabelecidas no ATN. O enfraquecimento das anomalias positivas de PNM é resultado da resposta atmosférica ao El Niño, conforme discutido por Enfield e Mayer (1997). Estes autores sugerem que a estrutura dipolar de TSM (PNM) no AT desenvolve-se durante a primavera boreal, seguida de um evento de El Niño no Pacífico, conforme mostrado em

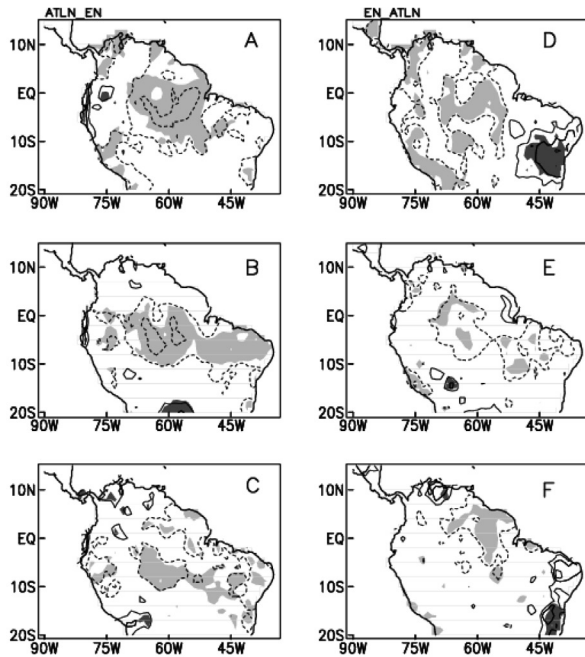


Figura 3 - Composições de anomalias normalizadas de precipitação para o período de: a) DJF (0), b) MAM (+1) e c) JJA (+1) para eventos ATLN_EN e d) DJF (0), e) MAM (+1) e f) JJA (+1) para eventos EN_ATLN. Contornos contínuos (pontilhados) correspondem aos valores positivos (negativos). Intervalo de contorno é de 0.2. Sombreados em escala de cinza claro (escuro) definem regiões com valores negativos (positivos) significativos ao nível de confiança de 95%.

nossas análises. Em MAM(+1), embora as ATSM persistam na parte central do Pacífico, o padrão de anomalias de PNM não caracteriza o padrão de El Niño. Por outro lado, associado ao resfriamento da TSM no Atlântico equatorial um gradiente leste-oeste em PNM é estabelecido entre o Pacífico e Atlântico. No AT, consistente com os padrões de ATSM em MAM(+1) e JJA(+1), há sinais de um fraco dipolo inter-hemisférico negativo de anomalias de PNM.

Os campos correspondentes de anomalias de precipitação são apresentados na Figura 3 para os trimestres DJF(0), MAM(+1) e JJA(+1). As composições do caso ATLN_EN são mostradas nas Figuras 3 a-c. Anomalias negativas significativas são encontradas em DJF(0) na região nordeste do Brasil (NEB), na parte central da bacia Amazônica estendendo-se para leste e sobre as regiões da Venezuela, Guiana e Suriname. Anomalias negativas significativas também são notadas sobre o norte da Colômbia e sobre o sul do Peru. Para o trimestre MAM(+1) (Figura 3b), anomalias negativas significativas ainda persistem desde o norte do NEB até a região central da América do Sul e entre a linha do equador e 10°S. Para o trimestre JJA(+1) (Figura 3c), anomalias negativas significativas aparecem por toda a região sul da bacia Amazônica e em pequenas áreas das regiões sudeste da Amazônia, nordeste e costeira da América do Sul.

Em relação ao caso descrito acima, diferenças marcantes são notadas na composição da precipitação para o padrão EN_ATLN (Figuras 3 d-f). Para o período de DJF(0) (Figura 3d), são observadas anomalias negativas significativas nas regiões da Venezuela e Colômbia, nas partes central e sul da Bacia Amazônica, e anomalias positivas no sul do NEB, enquanto o centro de anomalia positiva sobre o Equador observado para o mesmo trimestre para o caso ATLN_EN desaparece totalmente. Para o período de MAM(+1) (Figura 3 e) o padrão de anomalias é similar ao padrão de MAM(+1) para o caso anterior, no entanto, anomalias significativas são notadas em pequenas áreas.

Para o caso EN_ATLN no trimestre JJA (+1) (Figura 3f), anomalias positivas de precipitação são notadas sobre o leste do NEB e norte da América do Sul, e anomalias negativas significativas, no nordeste e leste da bacia Amazônica, entre aproximadamente 10°S e 10°N, que formam um corredor zonal bastante seco e tornam a estação seca ainda mais intensa nestas regiões.

Fase negativa do ENOS e suas relações com a precipitação nas regiões norte e nordeste da América do Sul

Os padrões espaciais de ATSM associados ao desenvolvimento do gradiente interbacias na fase inicial do evento La Niña no Pacífico, ou seja, um aquecimento no Atlântico Equatorial na fase inicial do evento frio no Pacífico são apresentados na Figura 4 (painéis à esquerda). Esses padrões mostram o fortalecimento de um evento La Niña com início em JJA(0). Nesse mesmo tempo, ATSM positivas estendem-se por toda a região do Atlântico equatorial, definindo um gradiente interbacias de ATSM entre os oceanos Pacífico e Atlântico equatorial. Consistente com o padrão de TSM, um gradiente leste-oeste de anomalias de PNM (Figura 5, painéis à esquerda), com anomalias positivas no Pacífico tropical leste e negativas no Atlântico Equatorial, está bem estabelecido, favorecendo a intensificação da La Niña. Esse gradiente leste-oeste em PNM persiste até JJA(+1), quando se enfraquece. Infere-se através deste padrão anômalo de PNM que se forma uma circulação de Walker, com subsidência no Pacífico central e leste e costa oeste da América do Sul e ascendência no restante da faixa tropical. A partir de DJF(0) anomalias negativas de TSM no Pacífico associadas à La Niña restringem-se a parte central da bacia. No AT, o resfriamento no ATN, em resposta à La Niña, como mostrado em estudos anteriores (Enfield e Mayer 1997), ocorre no trimestre MAM(+1), e embora fraco, persiste até JJA (+1).

O desenvolvimento do evento La Niña com gradiente interbacias notado durante a fase de decaimento do evento é apresentado na Figura 4 (painéis à direita, LN_ATLP). O evento La Niña no Pacífico tem início a partir de JJA(0) e

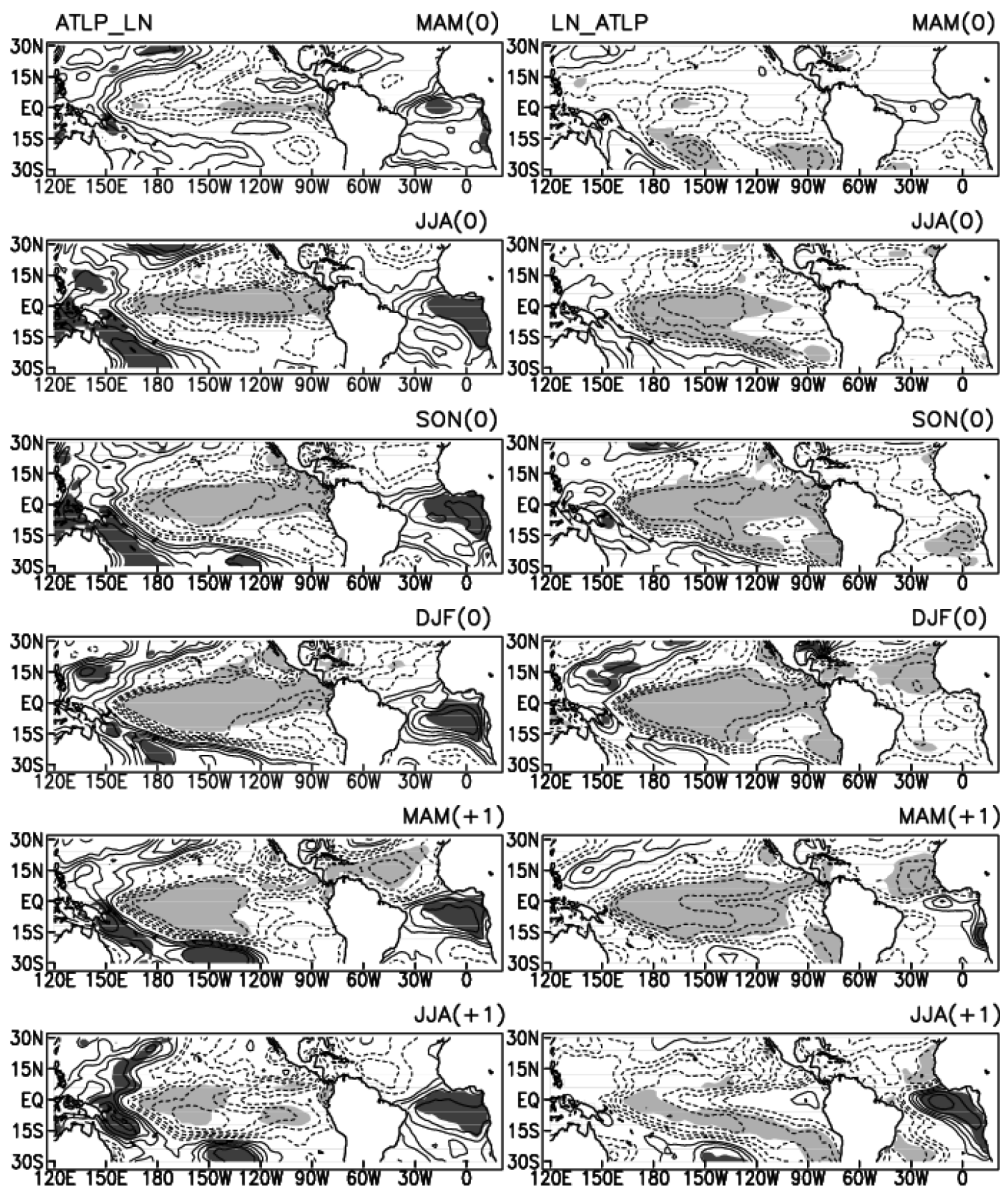


Figura 4 - Idem Figura 1, exceto para os eventos ATLP_LN e LN_ATLP.

atinge a máxima intensificação em DJF(0). Diferentemente do caso anterior, o gradiente leste-oeste de PNM entre o Pacífico e Atlântico equatorial não é notado nesse período (Figura 5, painéis à direita). ATSM negativas no ATN surgem em resposta ao resfriamento do Pacífico na fase madura do evento de La Niña em DJF(0). No ATS, ATSM positivas são observadas ao longo da costa oeste da África a partir de MAM(+1), quando se forma o gradiente zonal interbacias, com anomalias de sinais opostos no Pacífico central e Atlântico equatorial. Em resposta ao gradiente de ATSM, um gradiente leste-oeste de anomalias de PNM entre o Pacífico e Atlântico se estabelece em MAM(+1). O gradiente interbacias não

persiste em JJA(+1) devido à presença de ATSM fracas, mas positivas, no Pacífico leste equatorial. Vale notar que fracas ATSM negativas são notadas ao longo da costa leste do NEB em MAM(+1), que se intensificam em JJA(+1).

Composições das anomalias de precipitação referentes aos eventos La Niña mostrados na Figura 4 para os trimestres DJF(0), MAM(+1) e JJA(+1) são apresentados nas Figuras 6 (a-c) e 6 (d-f), respectivamente. Para o caso ATLP_LN (Figuras 6 a-c), anomalias positivas significativas são encontradas no trimestre DJF(0) no NEB (Figura 6a). Outros dois centros anômalos, porém, com pequenas áreas significativas também compõem esse campo, um positivo na região de fronteira

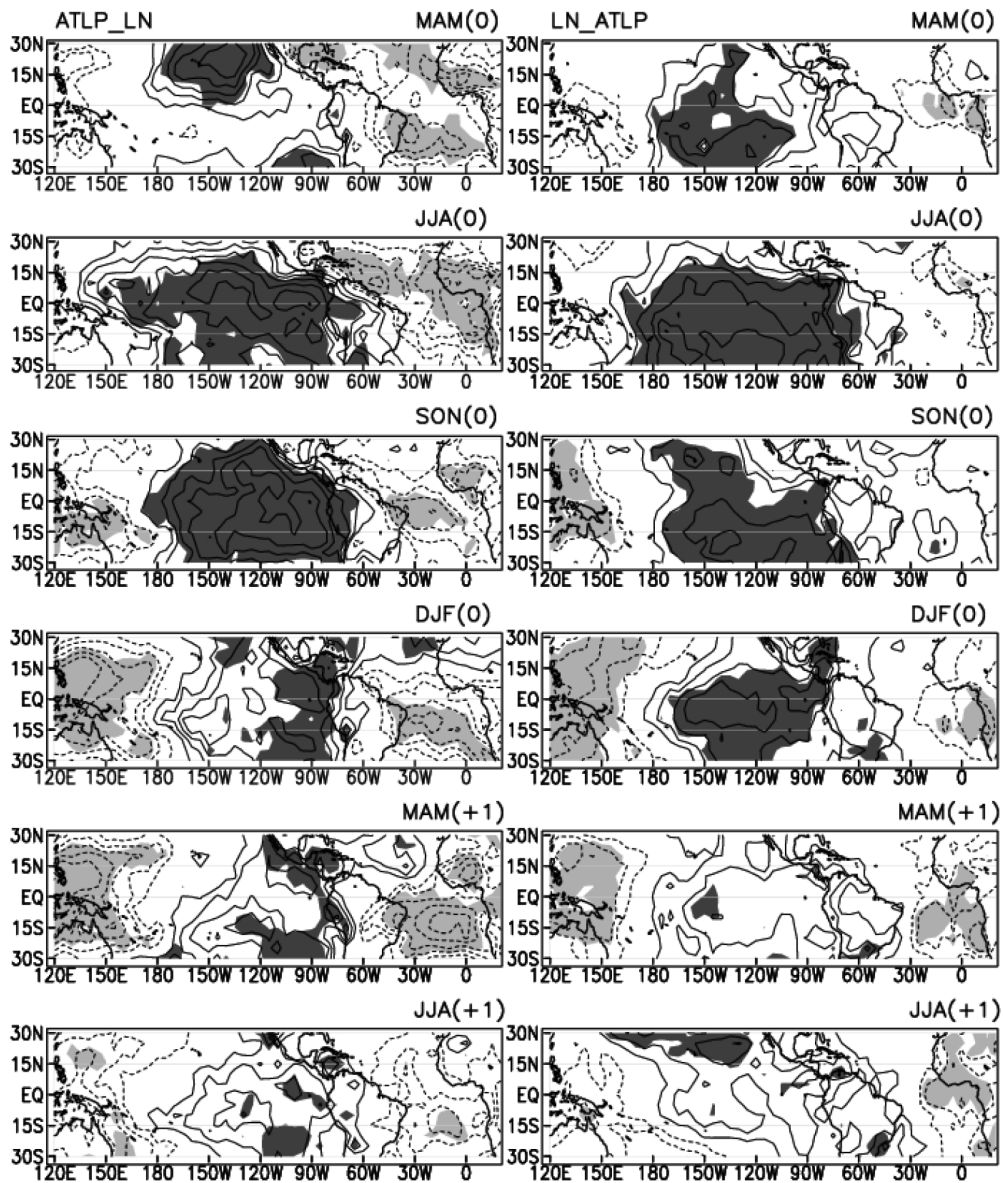


Figura 5 - Idem Figura 2, exceto para os eventos ATLP_LN e LN_ATLP.

entre Brasil, Colômbia e Venezuela e outro negativo no Sul do Equador e Leste do Peru. Para o trimestre MAM(+1) (Figura 6b), anomalias positivas significativas englobam a maior parte do NEB, e as no norte da América do Sul desaparecem e são substituídas por anomalias negativas, principalmente na região da fronteira da Colômbia com a Venezuela. Essas anomalias negativas contribuem para que a região norte da América do Sul se torne uma região seca nesse período.

No trimestre JJA(+1) (Figura 6c) as anomalias positivas persistem em parte do NEB e também se expandem em direção à região central da América do Sul definindo um centro de anomalias positivas sob as regiões centrais, leste e sul da bacia

Amazônica, porém com as áreas com anomalias significativas mais espalhadas do que nos trimestres anteriores. No extremo norte e oeste ainda são observadas anomalias negativas, porém, as anomalias significativas se limitam à porção norte da bacia Amazônica.

Para eventos LN_ATLP em DJF(0), anomalias positivas de precipitação típicas de eventos de La Niña aparecem em pequenas áreas espalhadas desde a região costeira no norte do NEB ao longo da costa litorânea até extremo noroeste da Bacia Amazônica, porém as áreas com anomalias positivas significativas se limitam ao noroeste da América do Sul (Figura 6d). Para o trimestre MAM(+1) (Figura 6e), há quase uma

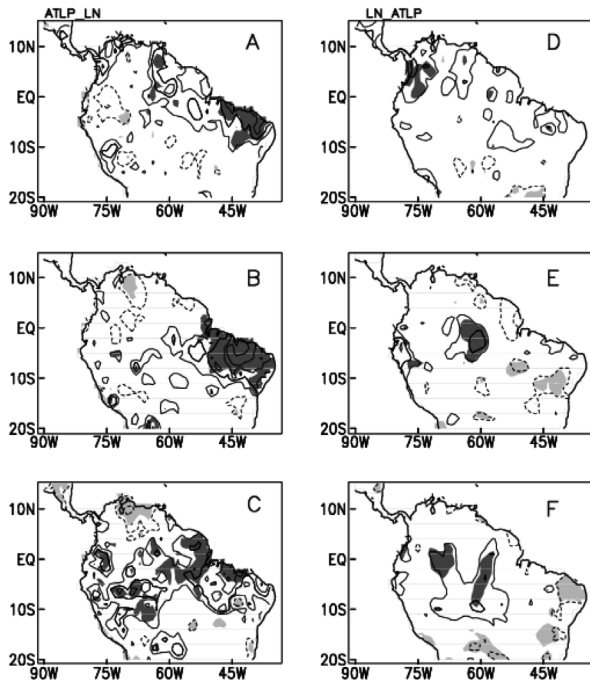


Figura 6 - Idem Figura 3, exceto para os eventos ATLP_LN e LN_ATLP.

reversão no sinal das anomalias por quase toda a região de estudo, de forma que anomalias positivas (negativas) surgem nas regiões oeste, central e sul (norte e nordeste) da Bacia Amazônica. Também, anomalias negativas significativas são observadas no sul e leste do NEB. No trimestre JJA(+1) (Figura 6f), todos os centros anômalos significativos descritos no trimestre anterior se intensificam.

DISCUSSÃO

Diferenças marcantes são notadas na composição da precipitação para os padrões EN_ATLN e ATLN_EN. Para o período de DJF(0) o padrão de precipitação para o caso ATLN_EN é modulado por variações que ocorrem nos oceanos Pacífico e Atlântico equatorial desde JJA(0) associadas à circulação de Walker anômala inferida pelo campo de anomalias de PNM (Figura 2, painéis à esquerda) com ascendência na região do Pacífico leste e subsidência sobre a região da América do Sul e Atlântico adjacente. Por outro lado, para o caso EN_ATLN as anomalias negativas de precipitação são principalmente pelas ATSM que ocorrem na região do Pacífico associadas ao El Niño, consistente com estudos anteriores dentre eles o de Marengo (1992), enquanto que as anomalias positivas de precipitação no NEB podem estar associadas à presença de ATSM positivas no ATS que persistem de SON(0) a JJA(+1).

Para os trimestres de MAM(+1) e JJA(+1) os padrões anômalos de precipitação podem estar associadas ao gradiente

interbacias que persiste por todos os trimestres da evolução do padrão de anomalias ATLN_EN e também ao fraco gradiente inter-hemisférico positivo (negativo) de ATSM (de anomalias de PNM) (Figuras 1 e 2, painéis à esquerda). Por outro lado, o enfraquecimento das anomalias de precipitação para o período de MAM(+1) durante o eventos EN_ATLN pode ser resultado do deslocamento das anomalias negativas de PNM para leste, que passam a ocupar a maior parte da região norte da América do Sul, como pode ser visto na Figura 2 (painéis à direita). Em JJA(+1) para o caso EN_ATLN condições secas na parte nordeste e leste da bacia estão relacionadas às variações de TSM no AT, com valores negativos no Atlântico equatorial e ATS e positivos mas não significativos no ATN. Esse padrão anômalo de TSM no AT modula a posição e intensidade da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e, por conseguinte, a precipitação na América do Sul (Ronchail *et al.* 2002), enquanto que, as anomalias positivas de precipitação no leste do NEB podem ser justificadas pela presença de ATSM positivas notadas ao longo da costa leste do NEB em JJA(+1).

Considerando os eventos La Niña, os padrões de precipitação durante eventos ATLP_LN para o período de DJF(0), podem estar relacionadas à variabilidade do Pacífico e Atlântico tropicais através dos gradientes interbacias e inter-hemisférico, ambos atuando no mesmo sentido. Por outro lado, para eventos LN_ATLP em DJF(0), anomalias positivas de precipitação típicas de eventos de La Niña aparecem em pequenas áreas espalhadas desde a região costeira no norte do NEB ao longo da costa litorânea até extremo noroeste da Bacia Amazônica, porém as áreas com anomalias positivas significativas se limitam ao noroeste da América do Sul (Figura 6d). Consistente com esses resultados, Grimm *et al.* (1998) mostraram que a maior influência dos eventos de La Niña ocorre nas regiões nordeste da bacia Amazônica, porém, esses autores não descartaram a hipótese de existirem outras regiões com anomalias positivas também consistentes, uma vez que o número de estações meteorológicas e a série de eventos de La Niña utilizado limitam a abrangência de seus resultados. Além disso, ressalta-se que o fato de as anomalias significativas serem restritas a pequenas áreas pode ser decorrente da variabilidade espacial das anomalias de precipitação para os diferentes eventos selecionados na análise de composição. Em MAM(+1) e JJA(+1) anomalias positivas de precipitação notadas na região central e sul da bacia Amazônica estão relacionadas à La Niña. No entanto, as anomalias negativas de precipitação no NEB estão associadas às ATSM negativas que persistem ao longo da costa leste do NEB em MAM(+1) e JJA(+1). Consistente com resultados anteriores, a predominância de condições anômalas no Atlântico equatorial e sul de mesmo sinal às do Pacífico, pode reverter o sinal da La Niña na precipitação na região nordeste da América do Sul (Giannini *et al.* 2004, Kayano e Andreoli 2006 e Andreoli e Kayano 2006).

CONCLUSÃO

Os padrões de precipitação para os eventos ENOS para os quais o gradiente interbacias se forma em sua fase inicial apresentam anomalias mais acentuadas do que os eventos ENOS com o gradiente interbacias na sua fase de decaimento. Um aspecto que pode justificar é que no caso do MEA frio (ou quente) na fase inicial do El Niño (ou La Niña), um gradiente inter-hemisférico positivo (ou negativo) que se forma em MAM(+) e persiste até JJA(+1), colabora para fortalecer o efeito do El Niño (ou La Niña) na precipitação. Portanto ambos o gradiente interbacias formado pelo El Niño (ou La Niña) no Pacífico e MEA frio (ou quente) no Atlântico Equatorial, e o gradiente inter-hemisférico positivo (ou negativo) contribuem para o padrão seco (ou chuvoso) na maior parte do norte e nordeste da América do Sul do caso ATLN_EN (ou ATLP_LN).

Além disso, para os eventos ENOS que se desenvolvem sob condições de normalidade ou mesmo sinal no AT, o impacto na precipitação é mais significativo na região norte e centro-oeste da bacia, associado ao fato de que nesses casos, o gradiente leste-oeste de PNM entre o Pacífico e Atlântico é menos intenso e deslocado para leste.

Portanto, um aspecto importante mostrado nessas análises é o papel do gradiente interbacias atuando juntamente com o gradiente inter-hemisférico para reforçar o padrão de precipitação. Esses resultados têm aplicabilidade para propósitos de monitoramento climático.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq/Processo 569749/2008-5) e a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP/Projeto REMCLAM), pelo apoio financeiro à pesquisa e aos três revisores anônimos pelos seus comentários e sugestões.

BIBLIOGRAFIA CITADA

- Aceituno, P. 1988. On the functioning of the Southern Oscillation in the South American sector: Part I. surface climate. *Monthly Weather Review*, 166: 505–524.
- Allan, R.; Ansell, T. 2006. A new globally completed monthly historical gridded mean sea level pressure dataset (HadSLP2): 1850–2004. *Journal of Climate*, 19: 5816–5842.
- Andreoli, R.V.; Kayano, M.T. 2006. Tropical Pacific and South Atlantic effects on rainfall variability over northeastern Brazil. *International Journal of Climatology*, 26: 1895–1912.
- Andreoli, R.V.; Souza, R.A.F.; Kayano, M.T.; Candido, L.A. 2012. Seasonal anomalous rainfall in the central and eastern Amazon and associated anomalous oceanic and atmospheric patterns. *International Journal of Climatology*, 32: 1193–1205, DOI: 10.1002/joc.2345.
- Beck, C.; Grieser, J.; Rudolf, B. 2005. A new monthly precipitation climatology for the global land areas for the period 1951 to 2000. Climate Status Report, Ger. Weather Serv., Offenbach, Germany.
- Curtis, S.; Hastenrath, S. 1995. Forcing of anomalous sea surface temperature evolution in the tropical Atlantic during Pacific warm events. *Journal of Geophysical Research*, 100: 15835–15847.
- Enfield, D.B.; Mayer, D.A. 1997. Tropical Atlantic sea surface temperature variability and its relation to El Niño–Southern Oscillation. *Journal of Geophysical Research*, 102: 929–945.
- Giannini, A.; Chiang, J.C.H.; Cane, M.A.; Kushnir, Y.; Seager, R. 2001. The ENSO teleconnection to the tropical Atlantic Ocean: contributions of the remote and local SSTs to rainfall variability in the tropical Americas. *Journal of Climate*, 14: 4530–4544.
- Giannini, A.; Saravanan, R.; Chang, P. 2004. The preconditioning role of Tropical Atlantic variability in the development of the ENSO teleconnection: implications for the prediction of Nordeste rainfall. *Climate Dynamics*, 22: 839–855, DOI: 10.1007/s00382-004-0420-2.
- Grimm, A.M.; Ferraz, S.E.T.; Gomes, J. 1998. Precipitation anomalies in southern Brazil associated with El Niño and La Niña events. *Journal of Climate*, 11: 2863–2880.
- Grimm, A.M.; Barros, V.R.; Doyle, M.E. 2000. Climate variability in southern South America associated with El Niño and La Niña events. *Journal of Climate*, 13: 35–58.
- Grimm, A.M. 2004. How do La Niña events disturb the summer monsoon system in Brazil? *Climate Dynamics*, 22: 123–138.
- Jury, M.R. 2009. An interdecadal American rainfall mode. *Journal of Geophysical Research*, 114: D08123.
- Kayano, M.T.; Moura, A.D. 1986. O El Niño de 1982–83 e a precipitação sobre a América do Sul. *Revista Brasileira de Geofísica*, 4: 201–214.
- Kayano, M.T.; Andreoli, R.V. 2006. Relationships between rainfall anomalies over northeastern Brazil and the El Niño Southern Oscillation. *Journal of Geophysical Research*, 111: D13101.
- Kayano, M.T.; Andreoli, R.V.; Souza, R.A.F. 2011. Evolving anomalous SST patterns leading to ENSO extremes: relations between the tropical Pacific and Atlantic Oceans and the influence on the South American rainfall. *International Journal of Climatology*, 31: 1119–1134.
- Latif, M.; Grötzner, A. 2000. On the equatorial Atlantic oscillation and its response to ENSO. *Climate Dynamics*, 16: 213–218.
- Liebmann, B.; Marengo, J.A. 2001. Interannual variability of the rainy season and rainfall in the Brazilian Amazon Basin. *Journal of Climate*, 14:4308–4318
- Melice, J.L.; Servain, J. 2003. The tropical Atlantic meridional SST gradient index and its relationships with the SOI, NAO and Southern Ocean. *Climate Dynamics*, 20: 447–464.
- Marengo, J.A. 1992. Interannual variability of surface climate in the Amazon basin. *International Journal of Climatology*, 12: 853–863.
- Marengo, J.A. 2006. On the hydrological cycle of the Amazon basin: a historical review and current state-of-the-art. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 21: 1–19.
- Marengo, J.A.; Nobre, C.A.; Tomasella, J.; Oyama, M.D.; Sampaio, G.; Camargo, H.; Alves, L.M. 2008. The drought of Amazonia in 2005. *Journal of Climate*, 21: 495–516.

- Ronchail, J.; Cochonneau, G.; Molinier, M.; Guyot, J.L.; Chaves, A.G.D.; Guimaraes, V.; de Oliveira, E. 2002. Interannual rainfall variability in the Amazon basin and sea-surface temperatures in the equatorial Pacific and the tropical Atlantic Oceans. *International Journal of Climatology*, 22: 1663–1686.
- Rodríguez-Fonseca, B.; Polo, I.; Garcia-Serrano, J.; Losada, T.; Mohino, E.; Mechoso, C.R.; Kucharski, F. 2009. Are Atlantic Niños enhancing Pacific ENSO events in recent decades? *Geophysical Research Letters*, 36: L20705, DOI: 10.1029/2009GL040048.
- Rudolf, B., Rubel, F. 2005. Global precipitation, in Observed Global Climate, New Series on Landolt-Bornstein: Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology, vol. 6, edited by M. Hantel, p. 11.1–11.24, Springer, Berlin.
- Smith, T.M.; Reynolds, R.W.; Peterson, T.C.; Lawrimore, J. 2008. Improvements to NOAA's historical merged land-ocean surface temperature analysis (1880-2006). *Journal of Climate* 21: 2283–2296, DOI: 10.1175/2007JCLI2100.1.
- Trenberth, K.E. 1997. The Definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78: 2771-2777.
- Wang, C. 2006. An overlooked feature of tropical climate: Inter-Pacific-Atlantic variability. *Geophysical Research Letters*, 33: L12702, DOI: 10.1029/2006GL026324.
- Yoon, J.-H.; Zeng, N. 2010. An Atlantic influence on Amazon rainfall. *Climate Dynamics* 34: 249-264. DOI 10.1007/s00382-009-0551-6.
- Zebiak, S.E. 1993. Air–sea interaction in the equatorial Atlantic region. *Journal of Climate*, 6: 1567–1586.

Recebido em: 19/07/2012

Aceito em: 04/04/2013