

Associação da variabilidade da precipitação pluvial em Santa Maria com a Oscilação Decadal do Pacífico

Nereu Augusto Streck⁽¹⁾, Galileo Adeli Buriol⁽²⁾, Arno Bernardo Heldwein⁽¹⁾, Luana Fernandes Gabriel⁽¹⁾ e Gizelli Moiano de Paula⁽¹⁾

⁽¹⁾Universidade Federal de Santa Maria, Avenida Roraima, nº 1.000, CEP 97105-900, Santa Maria, RS. E-mail: nstreck2@yahoo.com.br, heldwein@ccr.ufsm.br, lhuanyinha@yahoo.com.br, gizellidepaula@gmail.com ⁽²⁾Centro Universitário Franciscano, Rua dos Andradas, nº 1.614, CEP 97010-032, Santa Maria, RS. E-mail: galileoburiol@yahoo.com.br

Resumo – O objetivo deste trabalho foi verificar a associação da variabilidade interdecadal da chuva em Santa Maria, RS, com a Oscilação Decadal do Pacífico. Parte da variabilidade interanual da precipitação pluvial é explicada pelo fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS), que acontece no Oceano Pacífico. Na segunda metade da década de 1990, foi relatada outra oscilação na temperatura do Oceano Pacífico, de duração maior que o ENOS, denominada Oscilação Decadal do Pacífico (ODP). Foram usados os dados mensais acumulados de precipitação do período 1912–2008, da Estação Climatológica principal de Santa Maria, e os valores mensais do índice ODP do mesmo período. A análise foi realizada em nível anual, semestral (primeiro e segundo semestre), sazonal (verão, outono, inverno e primavera) e mensal. Existe associação entre a chuva e a ODP, de modo que décadas com chuvas acima da normal são associadas à fase quente da ODP, intercaladas com décadas com chuva abaixo da normal associadas à fase fria da ODP, o que indica oscilações periódicas de médio e longo prazo na precipitação pluvial em Santa Maria, RS.

Termos para indexação: chuva, clima, El Niño, La Niña, temperatura da superfície do mar.

Linking rainfall variability in Santa Maria with the Pacific Decadal Oscillation

Abstract –The objective of this work was to verify the association of the interdecadal variability of rainfall in Santa Maria, Rio Grande do Sul state, Brazil, with the Pacific Decadal Oscillation. Part of the interannual variation in rainfall is explained by the El Niño Southern Oscillation (ENSO) in the Pacific Ocean. In the second half of the 1990s, another oscillation in the surface temperature of the Pacific Ocean was reported, with greater duration than ENSO, named the Pacific Decadal Oscillation (PDO). Monthly precipitation data collected at the Meteorological Station of Santa Maria of the 1912–2008 period and monthly PDO indices of the same period were used. The analyses were performed on an annual, semestral (first and second semester), seasonal (Summer, Fall, Winter, and Spring), and monthly basis. There is a link between rainfall and PDO, because decades with precipitation higher than normal are associated with a warm phase of PDO, followed by decades with below-normal rainfall associated with a cool phase of PDO, which indicate mid and long-term periodic oscillations of rainfall in Santa Maria.

Index terms: rainfall, climate, El Niño, La Niña, sea surface temperature.

Introdução

No Estado do Rio Grande do Sul (RS), as chuvas são bem distribuídas ao longo das quatro estações do ano, com médias climatológicas da precipitação pluvial mensal que caracterizam um regime pluviométrico isoígro (Machado, 1950; Buriol et al., 1977; Instituto de Pesquisas Agronômicas, 1989). Em Santa Maria, localizada na Depressão Central do RS, a média dos totais mensais de precipitação pluvial entre 1912 e 2004 variou de 120,2 mm em novembro e 159,8 mm em setembro, o que confirma que não há uma estação

seca definida (Buriol et al., 2006). Esta mesma série histórica não mostrou tendência de aumento ou diminuição, porém houve grande variabilidade, desde um mês sem chuva (fevereiro de 1989) até um mês com elevada precipitação (abril de 1941, com 615,3 mm) (Buriol et al., 2006).

A grande variabilidade interanual das chuvas em Santa Maria, também verificada no restante do Rio Grande do Sul (Buriol et al., 1977; Instituto de Pesquisas Agronômicas, 1989), foi associada com o El Niño Oscilação Sul (ENOS), um fenômeno

atmosférico-oceânico de grande escala, caracterizado por anomalias na temperatura da superfície (TSM) do Oceano Pacífico Equatorial em que, na fase negativa (La Niña), as chuvas são geralmente abaixo da normal climatológica e, na fase positiva, (El Niño) são geralmente acima da normal (Grimm et al., 1998, 2000; Berlato & Fontana, 2003). Exemplos dessa associação, para os dois meses citados acima, são La Niña de 1988/1989 e El Niño de 1940/1941, respectivamente. Esta variabilidade na precipitação devido ao ENOS tem sido a causa principal de perdas na agricultura e pecuária no RS ao longo das últimas décadas (Fontana & Berlato, 1996; Berlato & Fontana, 1999, 2003; Berlato et al., 2005). Recentemente, nos sete verões consecutivos de 2002/2003 a 2008/2009, no RS ocorreram estiagens em todos os anos, com perdas no setor primário do estado, que estão entre as maiores do século 20, especialmente no verão 2004/2005, quando foram perdidas nove milhões de toneladas de grãos de milho e soja (Aguiar, 2005; Companhia Nacional de Abastecimento, 2009a, 2009b). Nesse período, foram classificados como La Niña os anos 2007/2008 e 2008/2009; como El Niño, 2002/2003, 2004/2005 e 2006/2007; e como neutros, 2003/2004 e 2005/2006 (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2009). Como em anos neutros e de El Niño a precipitação pluvial esperada é próxima ou superior à normal (Grimm et al., 1998; Berlato & Fontana, 2003), os sete anos consecutivos com deficiência hídrica no RS não podem ser explicados somente pelo ENOS, já que, desses sete anos, em cinco não se esperava deficiência hídrica, o que indica problemas nos sistemas de previsão atuais, que não foram suficientes para prever ou evitar prejuízos na agricultura do estado. Este exemplo recente indica que outros fenômenos, além do ENOS, afetam as chuvas no RS, e que a identificação deles poderá beneficiar a agricultura e a pecuária da região.

Na segunda metade da década de 1990, foi identificada outra oscilação na temperatura do Oceano Pacífico, diferente em escala espacial e temporal do ENOS (Mantua et al., 1997) – com duração maior que o ENOS (de 20 a 30 anos) – e, por isso, foi denominada de Oscilação Decadal do Pacífico (ODP). Nas décadas de 1940 a 1970, vários estudos sobre variações interdecadais foram feitos em relação à produção de salmão, principalmente na região do Alasca. Mais tarde, na década de 1990, a pesquisa da variação interdecadal focalizou a variabilidade oceânica. Assim, estudos

posteriores vieram a caracterizar as fases quentes e frias no Oceano Pacífico Norte como “Oscilação Decadal do Pacífico (ODP)”, descoberta a partir de trabalhos feitos sobre a variação das populações dos peixes no Pacífico Norte (Mantua et al., 1997). Os dados mensais do índice da ODP (IODP) foram calculados inicialmente por Mantua et al. (1997), obtidos por meio da primeira componente principal das anomalias de TSM do Pacífico Norte acima de 20° N, disponíveis em Joint Institute for the Study of the Atmosphere and Ocean (2010). Estes valores do IODP levam em conta as anomalias de TSM do Oceano Pacífico Norte, onde a média mensal global das anomalias de TSM é removida, para separar este padrão de variabilidade de qualquer sinal de “aquecimento global” que possa estar presente nos dados. A Oscilação Decadal do Pacífico ocorre com duas fases (fria e quente), em uma grande área da Bacia do Pacífico. Na fase fria, ocorrem anomalias negativas da TSM no Pacífico Tropical e positivas no Pacífico Extratropical, nos dois hemisférios, enquanto, na fase quente, as alterações da TSM são opostas, com anomalias positivas no Pacífico Tropical e negativas nas duas regiões do Pacífico Extratropical (Mantua et al., 1997). Durante o século 20, foi identificada uma fase fria (1947–1976) que separou duas fases quentes (1925–1946 e 1977–1998) da ODP (Mantua & Hare, 2002). O período anterior a 1925 não está bem definido quanto à ODP (Mantua & Hare, 2002), e o período após 1998 ainda é curto para ser caracterizado quanto à ODP, mas há uma expectativa crescente de que possa ser uma nova fase fria (Joint Institute for the Study of the Atmosphere and Ocean, 2009; Molion, 2009). Como a ODP e o ENOS caracterizam anomalias da TSM do mesmo oceano, e como o sinal do ENOS sobre as chuvas no Sul do Brasil se dá por alterações na circulação geral da atmosfera, pelo deslocamento das células de circulação de Walker e de Hadley (Grimm et al., 1998, 2000; Cunha, 1999; Garcia & Kayano, 2008), a hipótese deste trabalho é a de que a ODP pode explicar parte da variabilidade interdecadal da precipitação em locais onde o ENOS explica parte da variabilidade interanual da chuva.

As oscilações naturais de médio e longo prazo, que o planeta experimenta com alguma periodicidade, não devem ser desconsideradas em análises de tendência secular e na reconstrução do clima. Esta constatação adiciona mais um ingrediente de incertezas à análise de tendência secular associadas às possíveis mudanças

no clima global. Até o final da década de 1990, a ênfase para determinar as causas da variabilidade interanual da precipitação no Sul do Brasil foi feita na tentativa de associar a precipitação com o ENOS (Grimm et al., 1998, 2000; Cunha, 1999; Berlato & Fontana, 2003). Com a intensificação de estudos e com séries históricas de precipitação e do índice ODP mais longas, a ODP vem se somando ao ENOS para explicar a variabilidade interanual e interdecadal da precipitação, em locais do globo onde esses dois fenômenos naturais se manifestam (Mantua & Hare, 2002). Por exemplo, Hidalgo & Dracup (2003) mostraram que a precipitação na Bacia do Rio Colorado (EUA), região onde a chuva é afetada pelo ENOS, é afetada pela fase em que a ODP se encontra, de modo que a precipitação foi menor entre 1946-1976 (fase fria da ODP) do que entre 1977-1998 (fase quente da ODP), especialmente durante o período mais frio do ano (outubro a março). A modificação no regime decadal de chuvas alterou a vazão decadal do Rio Colorado durante o verão, pelo derretimento da neve precipitada no inverno, e afetou também o crescimento dos anéis das árvores (Hidalgo & Dracup, 2003). Kayano & Andreoli (2006) mostraram que a precipitação de verão (novembro a abril) na América do Sul é afetada pelo ENOS e pela ODP, e que o sinal do ENOS sobre a precipitação é fortalecido quando o ENOS e a ODP estão na mesma fase e enfraquecido quando estão em fases opostas. Molion (2009) mostrou que as cotas mais baixas do Rio Paraguai, durante o século 20, foram baixas durante o período 1947–1976 (fase fria da ODP) e altas no período 1977–1998 (fase quente da ODP). Esses três exemplos de relação entre variáveis hidroclimáticas, em nível de bacia hidrográfica (precipitação e vazão do rio) (Hidalgo & Dracup, 2003; Molion, 2009) e precipitação com a ODP (Kayano & Andreoli, 2006), também proporcionam bases para explicar variações decadais em setores da sociedade como, por exemplo, as perdas na produção de grãos que aconteceram no RS nos últimos dez anos (Companhia Nacional de Abastecimento, 2009a, 2009b). À medida que têm sido identificados as forçantes (Schneider & Cornuelle, 2005) e os mecanismos atmosféricos associados à ODP no Hemisfério Norte (Alexander et al., 2008) e no Hemisfério Sul (Garcia & Kayano, 2008), têm melhorado o entendimento do fenômeno e sua previsibilidade (Alexander et al., 2008), bem

como a previsibilidade da precipitação, por modelos numéricos que consideram o efeito combinado do IOS e da ODP (Whoolhiser, 2008). As modificações nos modos de circulação atmosférica, associadas à ODP na América do Sul, se caracterizam pelo fortalecimento da circulação de Walker durante a fase fria da ODP e pelo seu enfraquecimento durante a fase quente, enquanto nas circulações de Hadley e de monções sobre a América do Sul, apenas pequenas alterações foram identificadas durante as fases fria e quente da ODP (Garcia & Kayano, 2008).

Apesar de indicarem que existe sinal da ODP na precipitação do RS, trabalhos anteriores (Kayano & Andreoli, 2006; Cera et al., 2009; Molion, 2009) usaram apenas a precipitação estimada da estação das monções (verão), extraídas de pontos de grades com resolução espacial muito baixa (2,5° de latitude x 3,75° de longitude) de 1912 até 1998 e não incluíram locais da Região Central do RS, onde está localizada Santa Maria (Kayano & Andreoli, 2006), ou usaram dados de um período curto a partir de 1950 (Molion, 2009) ou 1960 (Cera et al., 2009).

O objetivo deste trabalho foi verificar a associação da variabilidade interdecadal da precipitação em Santa Maria, RS, com a ODP.

Material e Métodos

Foram usados os valores mensais de precipitação pluvial de janeiro de 1912 a dezembro de 2008, medidos na Estação Climatológica Principal de Santa Maria (ECPSM), pertencente ao 8º Distrito de Meteorologia do Instituto Nacional de Meteorologia. Até 1967, a ECPSM estava localizada em área que atualmente é área urbana da cidade de Santa Maria (29°41'S, 53°48'W, altitude de 138 m) e, desde julho de 1968, está localizada no Campo Experimental do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Santa Maria (29°43'S e 53°43'W, à altitude de 95 m). Em termos de regiões com homogeneidade de precipitação no Brasil e no RS, Santa Maria está localizada na área homogênea 2 e é representativa das seis zonas pluviométricas homogêneas quanto à precipitação no Rio Grande do Sul (Keller Filho et al., 2005). O preenchimento das falhas e a análise de consistência da série 1912–2004 foram realizados anteriormente por Buriol et al. (2006), e indicaram

que a série é homogênea. Os dados de 2005 a 2008 foram copiados dos registros da ECPSM.

Os valores mensais do índice da ODP do período de 1912 a 2008, usados neste estudo, foram retirados do Joint Institute for the Study of the Atmosphere and Ocean (2009). Com os valores mensais, agruparam-se os dados de precipitação (acumulados) e o índice ODP (média) em valores anual, semestral (primeiro e segundo semestres) e sazonal (verão, outono, inverno e primavera).

Para cada um dos agrupamentos (mensal, sazonal, semestral e anual), calcularam-se a média para o período 1912–2008 – aqui denominada de normal – e os respectivos desvios, subtraindo-se o valor de cada ano do valor da normal. Desse modo, desvios negativos e positivos representam valores de precipitação abaixo e acima da normal, respectivamente. Posteriormente, realizou-se a análise de frequência, pelo cálculo da percentagem de anos com desvios negativos e positivos, em cada agrupamento, em quatro períodos: 1925–1946 (primeira fase quente da ODP), 1947–1976 (fase fria da ODP), 1977–1998 (segunda fase quente da ODP) e 1999–2008. O último período foi incluído na análise por ter-se a expectativa de que a ODP está entrando em uma nova fase fria (Joint Institute for the Study of the Atmosphere and Ocean, 2009; Molion, 2009), mas, pelo pequeno número de anos (dez), ainda não pode ser definido como tal. O período anterior a 1925 não foi incluído nas análises de frequência, pois não é claro em que fase estava a ODP (Mantua & Hare, 2002) e, também, pelo pequeno número de anos com dados pluviométricos. Para detectar periodicidade (oscilações e suas frequências) na série temporal de precipitação de 1912–2008, relacionadas à ODP, usou-se a função densidade espectral de potências, calculada com base no teorema de Wiener sobre os totais anuais, semestrais, sazonais e mensais usando-se “lags” de 10 e 50 anos, para detectar ciclos anuais relacionados ao ENOS e ciclos decadais relacionados à ODP, respectivamente (Souza et al., 2009). Para ambos os “lags”, a densidade espectral foi calculada após aplicar-se um filtro passa-banda de 30 anos à série histórica. Os harmônicos, que representam o ciclo ou frequência das oscilações, são considerados significativos quando os valores da densidade espectral são superiores aos de probabilidade de 95%, pelo teste do qui-quadrado (Souza et al., 2009).

Resultados e Discussão

Na Figura 1, estão representados os totais anual, semestral e sazonal de precipitação e o respectivo índice ODP médio de cada ano da série histórica 1912–2008. Para o totais anuais (Figura 1 A), observa-se alta variabilidade interanual ao longo da série histórica, com a menor precipitação (640,2 mm) em 1917 e a maior (2.956,7 mm) em 1941. A grande seca de 1917 está associada com La Niña de 1916/18, e a grande enchente de 1941 com o forte El Niño de 1940/41 (Berlato & Fontana, 2003). Observa-se também, na Figura 1 A, uma tendência de valores acima da média do período (normal = 1.700 mm), concentraram-se entre 1918 e a metade da década de 1940 (Figura 1 A). A partir de então, são mais frequentes os valores abaixo da média, até o final da década de 1970, quando novamente predominam valores acima da média do período. As médias de precipitação nos períodos 1925–1946 (primeira fase quente da ODP), 1947–1976 (fase fria da ODP), 1977–1998 (segunda fase quente da ODP) e 1999–2008 são de 1.760 mm, 1.581 mm, 1.805 mm e 1.759 mm, respectivamente. Essa variação interdecadal da precipitação está em fase com a variação do índice ODP que, quando suavizada (média móvel de dez anos), é ainda mais nítida (Figura 1 B), em que são evidentes os valores acima da média nos dois períodos quentes da ODP e abaixo da média no período frio, intercalado entre os dois períodos quentes. Esta variação em fase da chuva com a ODP, após 1918, também aconteceu em escala semestral (Figura 1 C e D) e sazonal (Figura 1 E, F, G e H).

A precipitação no primeiro (Figura 1 C) e no segundo (Figura 1 D) semestres também está em fase com a ODP. No primeiro semestre, se destacam dois picos de precipitação, nas duas fases quentes da ODP (1925–1946 e 1977–1998): os anos de 1941 e 1982, que correspondem a dois dos três maiores eventos El Niño do século 20. O El Niño de 1997/98, o outro dos três maiores do século 20, foi caracterizado por elevada quantidade de chuva no final da primavera e início de verão (dezembro) e, por isso, não se destaca nos totais anual, semestral e estacional da Figura 1, pois as chuvas ficaram diluídas nos agrupamentos, diferentemente do El Niño de 1940/41 e 1982/83, com chuvas elevadas em abril e maio (Berlato & Fontana, 2003). Entre as quatro estações do ano, é no outono (Figura 1 F) que se destacam os grandes eventos do El Niño de 1941 e 1983. Nesses dois anos, a fase

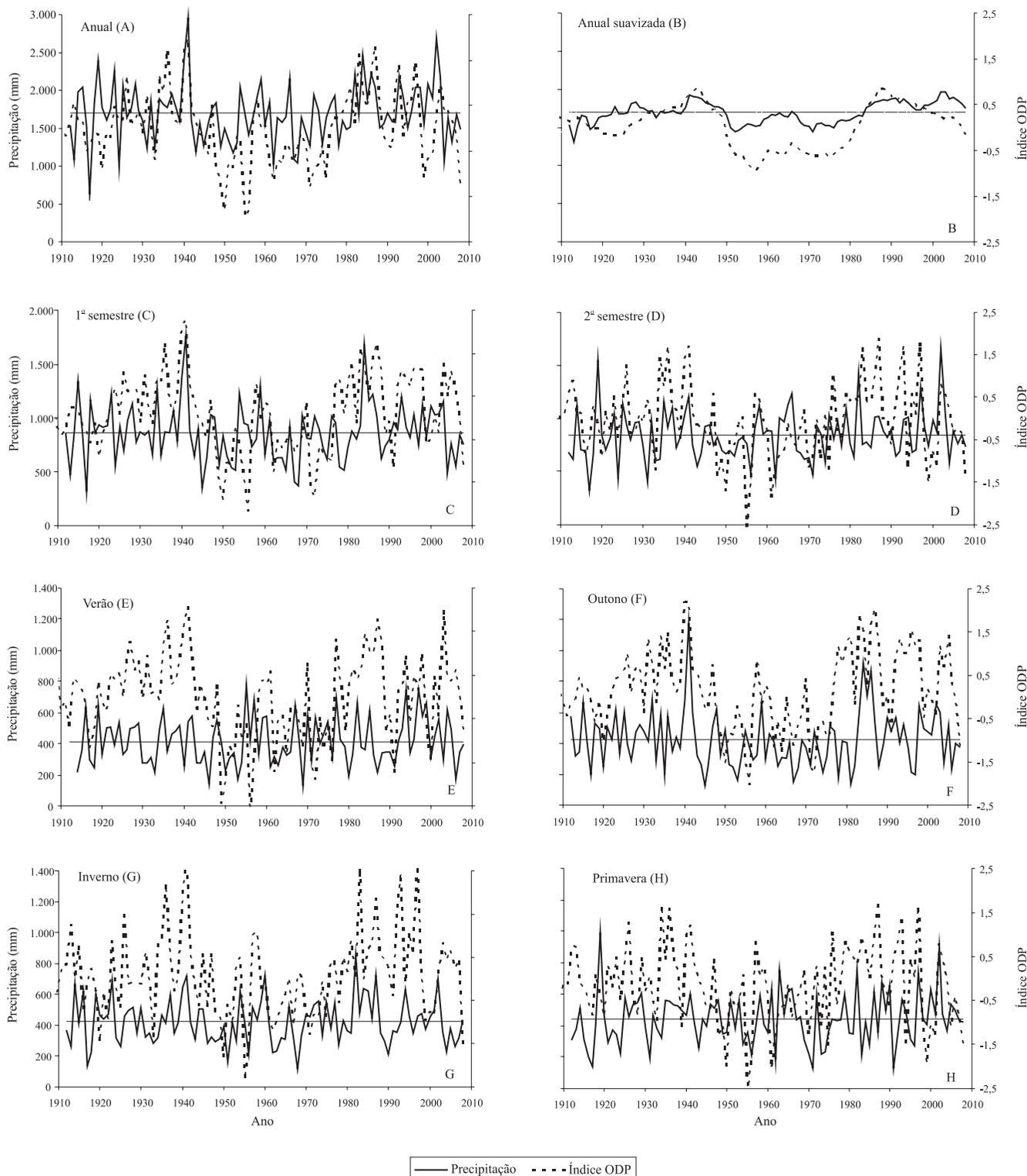


Figura 1. Total de precipitação em Santa Maria, RS: anual (A); anual suavizada (média móvel) de dez anos (B); semestral – primeiro semestre (C) e segundo semestre (D); e sazonal – verão (E), outono (F), inverno (G) e primavera (H). ODP, índice Oscilação Decadal do Pacífico. A linha horizontal representa a média de chuvas do período 1912–2008. Verão – dezembro, janeiro e fevereiro; outono – março, abril e maio; inverno – junho, julho e agosto; primavera – setembro, outubro e novembro; primeiro semestre – janeiro a junho; segundo semestre – julho a dezembro.

de maior intensidade do El Niño foi tardia em relação aos outros anos, o que explica os elevados índices de precipitação no outono. Durante as duas fases quentes da ODP, justamente pela precipitação elevada em abril e maio daqueles anos, e nas outras estações – verão (Figura 1 E), inverno (Figura 1 G) e primavera (Figura 1 H) –, a associação visual entre a precipitação e a ODP também é evidente.

A frequência dos desvios positivos e negativos de precipitação, nos quatro períodos da série histórica, está apresentada na Tabela 1. Para o total anual de precipitação, os desvios positivos são maiores (54,55%) entre 1925–1946, e iguais aos negativos (50%) entre 1977–1998 (as duas fases quentes da ODP), enquanto os desvios negativos são maiores (63,34%) entre 1947–1976 (fase fria da ODP) e no período 1999–2008 (60%). Constata-se, assim, que a maior frequência de total anual de precipitação acima da normal está associada à fase quente da ODP, enquanto a maior frequência de total anual de precipitação abaixo da normal está associada à fase fria da ODP. Considerando-se a precipitação acumulada em cada um dos dois semestres, sua variação segue a tendência anual, com maiores

desvios positivos (59,09%) no primeiro semestre do período 1977–1998 e menores desvios negativos (40%) no segundo semestre do período 1999–2008.

Entre as estações do ano, nas duas fases quentes da ODP, os desvios de precipitação foram: similares no outono (50%); e os desvios positivos foram maiores na primavera do período 1925–1946 (68,18%) e no inverno do período 1977–1998 (54,55%), e menores no verão do período 1977–1998 (40,91%) (Tabela 1). Na fase fria da ODP (1947–1976), os desvios negativos de precipitação foram maiores no outono e no inverno do que no verão e na primavera. Esses resultados concordam com os de Hidalgo & Dracup (2003), que observaram que na Bacia do Rio Colorado (EUA) a precipitação está mais associada à ODP durante a estação mais fria (outubro a março) do que na estação mais quente (abril a setembro) do Hemisfério Norte. No período 1999–2008, com anomalias negativas do ODP, a tendência de sinal da fase fria da ODP se confirmou apenas no inverno. Isso pode ser atribuído ao El Niño de 2002/2003, que causou elevada precipitação na primavera de 2002, verão de 2002/2003 e outono 2003 e, assim, apenas no inverno o sinal da ODP foi evidente.

Tabela 1. Frequência, em percentagem, de anos com desvio positivo (Dp) e desvio negativo (Dn) de chuva em relação à média do período 1912–2008, durante as duas fases quentes (1925–1946 e 1977–1998) e a fase fria (1947–1976) da Oscilação Decadal do Pacífico e durante os últimos dez anos (1999–2008), em Santa Maria, RS.

Mês ou período do ano ⁽¹⁾	1925–1946 (Quente)		1947–1976 (Fria)		1977–1998 (Quente)		1999–2008 (*)	
	Dp	Dn	Dp	Dn	Dp	Dn	Dp	Dn
Janeiro	45,45	54,54	40,00	60,00	40,91	59,09	50,00	50,00
Fevereiro	40,91	59,09	40,60	60,00	50,00	50,00	20,00	80,00
Março	40,91	59,09	40,00	60,00	50,00	50,00	50,00	50,00
Abril	31,82	68,18	30,00	70,00	54,55	45,45	50,00	50,00
Mai	63,64	36,36	23,33	76,67	40,91	59,09	30,00	70,00
Junho	45,45	54,55	43,33	56,67	45,45	54,55	50,00	50,00
Julho	36,36	63,64	30,00	70,00	59,09	40,91	40,00	60,00
Agosto	50,00	50,00	43,33	56,67	50,00	50,00	20,00	80,00
Setembro	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
Outubro	54,55	45,45	40,00	60,00	36,36	63,64	70,00	30,00
Novembro	45,45	54,55	36,67	63,33	50,00	50,00	50,00	50,00
Dezembro	31,82	68,18	40,00	60,00	40,91	59,09	40,00	60,00
Verão	50,00	50,00	43,33	56,67	40,91	59,09	50,00	50,00
Outono	50,00	50,00	26,67	73,33	50,00	50,00	60,00	40,00
Inverno	45,45	54,55	36,67	63,33	54,55	45,45	40,00	60,00
Primavera	68,18	31,82	43,33	56,67	45,45	54,55	60,00	40,00
1 ^o Semestre	54,55	45,45	40,00	60,00	59,09	40,91	40,00	60,00
2 ^o Semestre	54,55	45,45	40,00	60,00	50,00	50,00	60,00	40,00
Anual	54,55	45,45	36,66	63,34	50,00	50,00	40,00	60,00

⁽¹⁾Período do ano: verão – dezembro, janeiro e fevereiro; outono – março, abril e maio; inverno – junho, julho e agosto; primavera – setembro, outubro e novembro; primeiro semestre – janeiro a junho; segundo semestre – julho a dezembro. ^(*)A fase desse período ainda está indefinida em razão do pequeno número de anos de observação.

Entre os meses do ano (Tabela 1), durante as duas fases quentes da ODP, destacam-se, com maiores desvios positivos de precipitação, maio (63,64%) e outubro (54,55%) no período 1925–1946 e abril (54,55%) e julho (59,09%) de 1977 a 1998, que coincidiram com as épocas do ano de maior influência do ENOS sobre a precipitação no RS, que são outubro-novembro, e o “repique” no outono e início do inverno do ano seguinte (Berlato & Fontana, 2003). Durante a fase fria da ODP (1947–1976), os desvios negativos de precipitação foram maiores que os positivos em 11 meses, com destaque para maio (76,67%), abril e julho (ambos com 70%) e, apenas em setembro, a proporção de anos com desvios negativos foi igual à daqueles com desvios positivos (50%), o que indica forte sinal da ODP sobre anomalias negativas mensais de precipitação ao longo do ano. Setembro é o mês que apresenta maior normal de precipitação mensal em Santa Maria, RS (Buriol et al., 2006). Nesse mês de transição entre o inverno e a primavera, as frentes frias são bastante ativas, em razão do grande contraste entre as massas de ar polar que atingem o RS, que ainda são bastante frias, e a massa Tropical Atlântica, que está em processo de aquecimento em consequência do aumento de radiação solar incidente no Hemisfério Sul, em função do equinócio de primavera e aproximação do solstício de verão, o que gera grande instabilidade, com forte ascensão de ar ao longo da descontinuidade frontal (Heldwein et al., 2003). Assim, essas fortes perturbações atmosféricas locais e regionais certamente são mais fortes que o sinal da ODP, o que pode explicar a menor associação das anomalias de precipitação com a ODP em setembro. No período 1999–2008, os desvios negativos mensais de precipitação superaram os positivos em menos meses (fevereiro, maio, agosto e dezembro), mas de forma mais frequente e mais intensa, tendo alcançado 80% do período, em fevereiro e agosto, o que confirma forte sinal da fase negativa da ODP sobre anomalias negativas de precipitação pluvial nos últimos dez anos, em Santa Maria.

A densidade espectral para periodicidade na ODP (oscilações e suas frequências) de 1912 a 2008, considerando-se os totais de precipitação anual, semestral, sazonal e mensal com os “lags” de 10 e 50 anos e após o filtro passa-banda de 30 anos, está na Tabela 2. Para o total anual de precipitação, os ciclos significativos foram 2 a 4 anos, no “lag” de 10 anos,

e de 12 a 19 anos no “lag” de 50 anos, relacionados ao ENOS e à ODP, respectivamente. Para o total de precipitação no primeiro e no segundo semestres, os ciclos significativos foram 2 a 4 e 3 a 4 anos, nos “lags” 10 e 13 a 17 e 13 a 18 anos no “lag” 50, respectivamente, o que indica sinal do ENOS e da ODP nos dois semestres. Para a precipitação nas quatro estações (Tabela 2), os ciclos significativos no “lag” 10 foram de 2 a 4 anos no verão, outono e primavera, e de 3 a 5 anos no inverno, enquanto no “lag” 50 os ciclos foram 11 a 18 anos no verão, 11 a 17 anos no outono, 15 a 19 anos no inverno e 13 a 20 anos na primavera, o que indica sinal do ENOS e da ODP nas quatro estações do ano. Para os totais mensais de precipitação, os resultados também indicam eventos de frequência anual e decadal em todos os meses do ano (Tabela 2), que são, em geral, os ciclos significativos de 2 a 4 anos relacionados ao ENOS, e de 11 a 20 anos relacionados à ODP, com destaque para os meses de fevereiro, março, junho, novembro e dezembro, nos quais o limite superior da faixa de ciclos significativos é de

Tabela 2. Duração dos ciclos de precipitação, significativos pelo teste qui-quadrado, estimados pela análise de densidade espectral de potências para dois “lags” (10 e 50 anos) na série histórica de precipitação de 1912 a 2008, em Santa Maria, RS.

Mês ou período do ano ⁽¹⁾	Ciclos de precipitação (anos)	
	“Lag 10”	“Lag 50”
Janeiro	2–4	11–17
Fevereiro	3–4	14–16 e 19–20
Março	3–4	15–20
Abril	2–4	11–17
Maio	2–4	13–19
Junho	3–4	13–20
Julho	3–4	16–19
Agosto	3–4	14–19
Setembro	2–4	13–18
Outubro	3–4	15–18
Novembro	3–4	16–20
Dezembro	3–4	11–20
Verão	2–4	11–18
Outono	2–4	11–17
Inverno	3–5	15–19
Primavera	2–4	13–20
1ª Semestre	2–4	13–17
2ª Semestre	3–4	13–18
Anual	2–4	12–19

⁽¹⁾Período do ano: verão – dezembro, janeiro e fevereiro; outono – março, abril e maio; inverno – junho, julho e agosto; primavera – setembro, outubro e novembro; primeiro semestre – janeiro a junho; segundo semestre – julho a dezembro.

20 anos. Os resultados do sinal do ENOS no espectro de precipitação do presente trabalho concordam com os resultados de Souza et al. (2009), que obtiveram os maiores picos no espectro de precipitação do período 1970–2006, da região centro-leste do RS, entre 2 e 5 anos. Os resultados do sinal da ODP no espectro de precipitação de Santa Maria concordam com os resultados de Molion (2009), que encontrou correlação positiva de 0,2 a 0,4 entre precipitação e índice ODP para o período 1950–1999, na região central do RS.

Durante as fases quente e fria da ODP, o ENOS também se manifesta, ou seja, as anomalias da temperatura da superfície do mar (TSM) do ENOS são flutuações anuais dentro da ODP. Durante a fase fria da ODP, os eventos de La Niña são mais fortes e os de El Niño, mais fracos, enquanto na fase quente da ODP os eventos de La Niña são mais fracos e os de El Niño são mais fortes, ou seja, quando o ENOS e a ODP estão em fase, acentuam-se as anomalias de precipitação (Silva, 2006; Kayano & Andreoli, 2006). Isso caracteriza a não linearidade da relação do ENOS com a precipitação no Rio Grande do Sul (Kayano & Andreoli, 2006). Para o caso do Rio Grande do Sul, isto ocorreu com os três eventos do El Niño mais fortes do século 20 (1940/1941, 1982/1983 e 1997/1998), que causaram fortes enchentes no estado (Berlato & Fontana, 2003). Esses fenômenos aconteceram nas duas fases quentes da ODP, e com os dois períodos mais longos de anomalias negativas da TSM (La Niña), de abril de 1954 a fevereiro de 1957 (35 meses de La Niña) e de julho de 1973 a maio de 1976 (37 meses de La Niña) (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2009), que aconteceram durante a fase fria da ODP. As modificações na circulação de Walker explicam porque eventos de El Niño são mais frequentes e mais intensos do que os de La Niña durante a fase quente da ODP, e o inverso ocorre durante a fase fria da ODP (Silva, 2006; Garcia & Kayano, 2008).

Nos últimos dez anos (1998–2008), o Rio Grande do Sul tem sofrido com estiagens mais frequentes do que nas duas décadas anteriores, o que pode ser confirmado pela chuva abaixo da normal (o período de 1912 a 2008) nos últimos cinco anos, em escala anual (Figura 1 A), semestral (Figura 1 C e D) e sazonal (Figura 1 F e G), e pela recente estiagem no primeiro semestre de 2009, em que, nos meses de abril, maio e junho de 2009, a precipitação em Santa Maria foi de apenas 25,6, 96,5 e 76,8 mm, respectivamente, quando a normal do período 1912–2008 nesses três meses é 141,8, 148,8 e 156,43 mm, respectivamente. A recente estiagem

de 2009 está associada com um evento de La Niña que durou de fevereiro a junho de 2009 (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2009). Caso se confirme que está se iniciando uma nova fase fria da ODP (Figura 1 B), é de se esperar que nas duas próximas décadas os desvios negativos de precipitação pluvial predominarão sobre os positivos em Santa Maria e, certamente, no restante do RS, pois as anomalias negativas de ODP e o ENOS estarão em fase. Se essa projeção se confirmar, são esperados grandes prejuízos nas próximas duas décadas, em diferentes setores da economia da sociedade gaúcha, principalmente na agricultura. Assim, medidas para minimizar os possíveis impactos negativos, a serem tomadas pelos setores públicos e privados, são necessárias para o Rio Grande do Sul. Os resultados deste estudo indicam que a ODP é mais um fenômeno responsável pela variabilidade interanual, sazonal e mensal de precipitação em Santa Maria, RS.

Conclusões

1. A Oscilação Decadal do Pacífico em escala decadal é responsável pela variabilidade interanual, sazonal e mensal de precipitação em Santa Maria, RS, e, juntamente com o fenômeno El Niño Oscilação Sul em escala anual, explica grandes anomalias de precipitação nesse local durante o século 20.

2. Tanto em nível anual, como semestral, estacional e mensal, décadas com chuva acima da normal, associadas à fase quente da Oscilação Decadal do Pacífico, são intercaladas com décadas com chuva abaixo da normal, associadas à fase fria da Oscilação Decadal do Pacífico.

Referências

- AGUIAR, R. Estiagem: como conviver com este fenômeno? **Extensão Rural e Desenvolvimento Sustentável**, v.1, p.11-12, 2005.
- ALEXANDER, M.A.; MATROSOVA, L.; PENLAND, C.; SCOTT, J.D.; CHANG, P. Forecasting Pacific SSTs: linear inverse model prediction of the PDO. **Journal of Climate**, v.21, p.385-402, 2008.
- BERLATO, M.A.; FARENZENA, H.; FONTANA, D.C. Associação entre El Niño Oscilação Sul e a produtividade de milho no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.40, p.423-432, 2005.
- BERLATO, M.A.; FONTANA, D.C. **El Niño e La Niña**: impactos no clima, na vegetação e na agricultura do Rio Grande do Sul: aplicações de previsões climáticas na agricultura. Porto Alegre: UFRGS, 2003. 110p.
- BERLATO, M.A.; FONTANA, D.C. Variabilidade interanual da precipitação pluvial e rendimento da soja no Estado do Rio

- Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.7, p.119-125, 1999.
- BURIOL, G.A.; ESTEFANEL, V.; FERREIRA, M. Cartas mensais e anual das chuvas do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista do Centro de Ciências Rurais**, v.7, p.55-82, 1977.
- BURIOL, G.A.; ESTEFANEL, V.; SWAROWSKY, A.; D'AVILA, R.F. Homogeneidade e estatísticas descritivas dos totais mensais e anuais de chuva de Santa Maria, Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.11, p.89- 97, 2006.
- CERA, J.C.; FERRAZ, S.E.T.; BENDER, F.D. Influência da Oscilação Decadal do Pacífico e as mudanças no regime de chuva do Rio Grande do Sul. **Ciência e Natura**, v.2, p.317-320, 2009.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Milho total**: 1ª e 2ª safra: série histórica de área plantada: safras 1976/77 a 2009/10. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento, 2009a. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/MilhoTotalSerieHist.xls>>. Acesso em: 10 jul. 2009.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Soja**: série histórica de área plantada: safras 1976/77 a 2009/10. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento, 2009b. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/SojaSerieHist.xls>>. Acesso em: 10 jul. 2009.
- CUNHA, G.R. da. El Niño – Oscilação do Sul e perspectivas climáticas aplicadas no manejo de culturas no Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.7, p.277-284, 1999.
- FONTANA, D.C.; BERLATO, M.A. Relação entre El Niño Oscilação Sul (ENOS), precipitação e rendimento de milho no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v.2, p.39-46, 1996.
- GARCIA, S.R.; KAYANO, M.T. Climatological aspects of Hadley, Walker and monsoon circulations in two phases of the Pacific Decadal Oscillation. **Theoretical and Applied Climatology**, v.91, p.117-127, 2008.
- GRIMM, A.M.; BARROS, V.R.; DOYLE, M.E. Climate variability in Southern South America associated with El Niño and La Niña events. **Journal of Climate**, v.13, p.35-58, 2000.
- GRIMM, A.M.; FERRAZ, S.E.T.; GOMES, J. Precipitation anomalies in Southern Brazil associated with El Niño and La Niña events. **Journal of Climate**, v.11, p.2863-2880, 1998.
- HELDWEIN, A.B.; STRECK, N.A.; BURIOL, G.A.; SANDRI, M.A.; TRENTIN, G.; SPOHR, R.B.; SILVA, J.C. da; ALBERTO, C.M.; FARIA, N.S. Freqüência de ventos fortes em Santa Maria, RS. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.11, p.285-291, 2003.
- HIDALGO, H.G.; DRACUP, J.A. ENSO and PDO effects on hydroclimatic variations of the upper Colorado River basin. **Journal of Hydrometeorology**, v.4, p.5-23, 2003.
- INSTITUTO DE PESQUISAS AGRONÔMICAS. **Atlas agroclimático do Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura e Abastecimento, 1989. v.1, 102p.
- JOINT INSTITUTE FOR THE STUDY OF THE ATMOSPHERE AND OCEAN. **Extended reconstructed sea surface temperature (ERSST)**: 1854 – present. Version 3b (no satellite data). Disponível em: <<http://www.jisao.washington.edu/datasets/ersst/#data>>. Acesso em: 22 jan. 2010.
- JOINT INSTITUTE FOR THE STUDY OF THE ATMOSPHERE AND OCEAN. **The Pacific Decadal Oscillation**: PDO index monthly values 1900 - present. Washington: JISAO, 2009. 163p. (JISAO. Annual report). Disponível em: <<http://jisao.washington.edu/pdo/>>. Acesso em: 18 maio 2009.
- KAYANO, M.T.; ANDREOLI, R.V. Relations of South American summer rainfall interannual variations with the Pacific Decadal Oscillation. **International Journal of Climatology**, v.27, p.531-540, 2006.
- KELLER FILHO, T.; ASSAD, E.D.; LIMA, P.R.S. de R. Regiões pluviometricamente homogêneas no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.40, p.311-322, 2005.
- MACHADO, F.P. **Contribuição ao estudo do clima do Rio Grande do Sul**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1950. 91p.
- MANTUA, N.J.; HARE S.R. The Pacific Decadal Oscillation. **Journal of Oceanography**, v.58, p.35-44, 2002.
- MANTUA, N.J.; HARE, S.R.; ZHANG, Y.; WALLACE, J.M.; FRANCIS, R.C. A Pacific Interdecadal Climate Oscillation with impacts on salmon production. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.78, p.1069-1079, 1997.
- MOLION, L.C.B. Perspectivas climáticas para os próximos 20 anos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 6., 2009, Porto Alegre. **Estresses e sustentabilidade**: desafios para a lavoura arrozeira: anais. Porto Alegre: Palotti, 2009. p.540-548.
- NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **ENSO**: cold and warm episodes by season. Washington: NOAA, 2009. Disponível em: <http://www.cpc.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml>. Acesso em: 20 jun. 2009.
- SCHNEIDER, N.; CORNUELLE, B.D. The forcing of the Pacific Decadal Oscillation. **Journal of Climate**, v.18, p.4355-4373, 2005.
- SILVA, L.F. **Precipitação do norte do Nordeste Brasileiro e padrões de temperatura da superfície e pressão ao nível do mar**: relações com as fases do El Niño Oscilação Sul e Oscilação Decadal do Pacífico. 2006. 95p. Dissertação (Mestrado) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- SOUZA, A.M.; GEORGEN, R.; FERRAZ, S.E.T. Previsão de precipitação e temperatura em Santa Maria por meio de um modelo estatístico. **Ciência e Natura**, v.31, p.49-64, 2009.
- WHOOHLISER, D.A. Combined effects of Southern Oscillation Index and the Pacific Decadal Oscillation on a stochastic daily precipitation model. **Journal of Climate**, v.21, p.1139-1152, 2008.