

VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO NO ESTADO DE SÃO PAULO E SUA RELAÇÃO COM ENOS ENTRE 1947 E 1997

Luciana Figueiredo Prado¹; Augusto José Pereira Filho²; Gré de Araújo Lobo³ & Ricardo Hallak⁴

RESUMO --- Os objetivos deste trabalho são elaborar uma climatologia de precipitação para o Estado de São Paulo, analisar a distribuição espaço-temporal da precipitação neste estado e avaliar sua distribuição durante eventos El Niño, La Niña e neutros. Foram utilizados totais acumulados diários de chuva medidos por 1122 postos entre 1947 e 1997. Mapas de precipitação anual e análises de correlação espacial isotrópica foram obtidos a partir destes dados. Os resultados indicam que anos secos e úmidos ocorrem em episódios de El Niño/La Niña. O Estado de São Paulo está numa região de transição para impactos do El Niño/La Niña sobre a precipitação. Outrossim, anomalias positivas e negativas de precipitação anual possuem quase a mesma frequência quando classificados em anos de El Niño, La Niña e neutros. A análise da correlação espacial isotrópica da precipitação anual indica decréscimo de $\rho=1,0$ em 0 km para $\rho=0,8$ em 25 km e para $\rho=0,7$ em 160 km. Além desta distância, a correlação decresce lentamente para $\rho=0,64$ até 500 km. Estas distâncias são compatíveis com as áreas de influência de sistemas precipitantes e sugerem que os totais de precipitação anual são modulados pela grande escala, meso-escala e escala de nuvens, nesta ordem decrescente de influência.

ABSTRACT --- The objective of this study is to elaborate the climatology of precipitation in São Paulo State, analyze the spatial-temporal distribution of precipitation in this state and its relationship to El Niño, La Niña and neutral episodes. It was used daily rainfall totals measured by 1122 raingauges distributed throughout the state between 1947 and 1997. Maps of yearly precipitation accumulation and isotropic spatial correlation were estimated from these data sets. The results indicate that dry and humid years occurred with El Niño/La Niña episodes. The State of São Paulo is within a transition region to the impacts of El Niño. Furthermore, positive and negative anomalies of precipitation have almost the same frequency when classified as El Niño, La Niña and neutral episodes. The isotropic correlation analysis of yearly precipitation totals shows a decrease from $\rho=1,0$ at 0 km to $\rho=0,8$ at 25 km and to $\rho=0,7$ at 160 km. Beyond this distance, the correlation decreases slowly down to 0,64 at 500 km. These characteristics distances are compatible with the local scale, mesoscale and large scale precipitating systems and, suggest that the yearly precipitation totals are modulated by the large scale, mesoscale and the cloud scale in this decreasing order of influence.

Palavras-chave: precipitação, climatologia, El Niño

1) Estudante de graduação de Meteorologia do IAG-USP, Rua do Matão, 1226, 05508-090 São Paulo – SP. E-mail lfrado@model.iag.usp.br
2) Professor Doutor do IAG-USP, Rua do Matão, 1226, 05508-090 São Paulo – SP. E-mail apereira@model.iag.usp.br
3) Engenheiro civil hidrólogo do CTH/Poli-USP, Av. Prof. Lucio M. Rodrigues, 120, 05508-090 São Paulo – SP. E-mail: gre@cth.usp.br
4) Estudante de doutorado do IAG-USP, Rua do Matão, 1226, 05508-090 São Paulo – SP. E-mail hallak@model.iag.usp.br

1. INTRODUÇÃO

O Estado de São Paulo possui uma área de 247.898 km² e é caracterizado por ser uma região de transição entre o clima meso-térmico de tipo temperado de latitudes médias, e o clima quente de latitudes baixas. Desta forma, tanto sistemas sinóticos comuns ao sul do Brasil, quanto fenômenos convectivos são responsáveis pela precipitação nesta região, diferenciados pela intensidade e sazonalidade destes sistemas [GRUPO DE RECURSOS HÍDRICOS (1984)]. A climatologia da precipitação é importante para o gerenciamento de recursos hídricos por ser determinante na quantificação do abastecimento de água, irrigação de culturas entre tantas outras atividades humanas. Diferentes sistemas precipitantes modulam a distribuição espacial da precipitação sobre o Estado de São Paulo [Pereira Filho et al (2006)].

Os episódios de El Niño e La Niña, que são as fases positiva e negativa do fenômeno El Niño/Oscilação do Sul (ENOS), são atribuídos à resposta do oceano ao enfraquecimento ou fortalecimento dos ventos alísios que sopram próximo à linha do Equador e que causam o aquecimento ou resfriamento da temperatura da superfície do mar (TSM) no Pacífico Sul [Kousky et al. (1984)]. A relação entre episódios de El Niño e precipitação é muito bem definida em regiões tropicais [Ropelewski e Halpert (1987)], como no Nordeste brasileiro, onde há relação entre a intensidade do El Niño e a ocorrência de secas, e na região Sul, onde há uma tendência de aumento na precipitação durante esses eventos, ligados ao fortalecimento do jato subtropical na alta atmosfera.

O estudo aqui apresentado visa estabelecer uma climatologia de precipitação para o Estado de São Paulo, assim como examinar a influência dos fenômenos El Niño e La Niña nesta climatologia por meio das análises de totais de precipitação anual, além de analisar a variabilidade espacial da precipitação anual entre pluviômetros da Rede Hidrológica do Estado de São Paulo.

2. METODOLOGIA

Os dados de precipitação utilizados neste estudo foram fornecidos pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE), gerido pelo Centro Tecnológico de Hidráulica (CTH). Os dados consistem de precipitação acumulada diária medida por 1122 postos pluviométricos no Estado de São Paulo (Fig. 1) no período de 01 de janeiro de 1947 a 31 de dezembro de 1997. Estas séries temporais apresentam extensões diferentes, sendo alguns postos instalados depois de 1947 e, outros, desativados antes de 1997. As séries de dados de precipitação com falhas não foram utilizadas nas análises aqui apresentadas.

Distribuição de postos pluviométricos da Rede DAEE

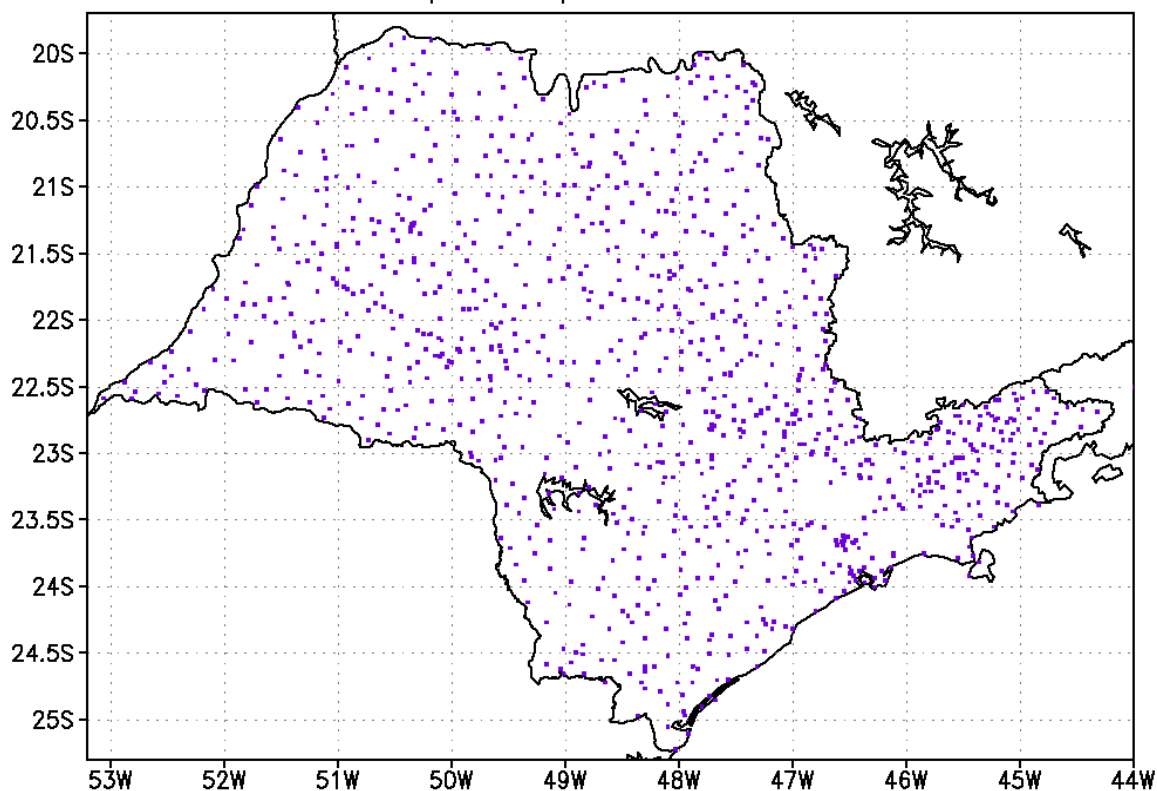


Figura 1 – Distribuição de postos pluviométricos da Rede DAEE no Estado de São Paulo.

Obtiveram-se séries diárias de precipitação para os 1122 postos num total de 18628 dias de dados. Estes dados foram utilizadas no cálculo de médias anuais climatológicas, respectivos desvios padrão, frequência de dias chuvosos e totais médios anuais. Apenas séries com mais de 30 anos de dados foram utilizadas no cálculo das médias climatológicas. Os valores obtidos foram interpolados no espaço por meio da análise objetiva de Cressman [Cressman (1959)]. Foram produzidos 51 mapas de precipitação anual no Estado de São Paulo. Apresentam-se neste estudo apenas o ano mais seco (1963) e o mais úmido (1983), além dos mapas da média climatológica, desvio padrão correspondente e quantidade de dias chuvosos.

A análise objetiva de Cressman consiste de um método de correções sucessivas, determinadas a partir da comparação entre observações e valores interpolados em cada ponto de grade do campo inicial. O método de Cressman realiza várias iterações a fim de recuperar detalhes do campo analisado em escalas menores por meio da diminuição do raio de influência, que é a distância entre o ponto de grade e o valor referente ao valor interpolado anteriormente. Neste estudo, utilizou-se campo de precipitação com raios de influência de 10, 7, 4, 2 e 1 comprimento de grade da análise, totalizando cinco iterações.

A correlação de Pearson [Wilks (1995)] em função da distância entre pluviômetros (ρ) foi utilizada para se determinar a variação isotrópica desta no Estado de São Paulo. As distâncias entre pluviômetros foram obtidas por meio do método de trigonometria esférica [Boczko (1984)]. A partir de cada série anual de cada posto pluviométrico, obteve-se ρ para cada par de estações. As correlações assim obtidas foram grafadas em função da distância e ajustada uma curva logarítmica.

3. RESULTADOS

3.1 Análise Climatológica

Calculou-se o total médio climatológico, seu desvio padrão e frequência de dias chuvosos a partir dos totais diários [Prado et al. (2006)]. Elaboraram-se mapas destas variáveis através do método de Cressman. O campo da precipitação média climatológica é mostrado na Fig. 2, onde se pode observar o significativo efeito topográfico na Serra do Mar, Serra de Paranapiacaba, Serra da Mantiqueira, Serra dos Agudos e Serra de Botucatu, já que os índices pluviométricos nestas regiões tendem a serem maiores do que em regiões com topografia menos acentuada. Os altos índices registrados nestas regiões se devem ao efeito da brisa marítima e circulação vale montanha, provocados pela proximidade do Oceano Atlântico e orientação da costa paulista [Barros et al. (1987)]. Há um gradiente negativo na direção do interior do estado, devido à queda da altitude.

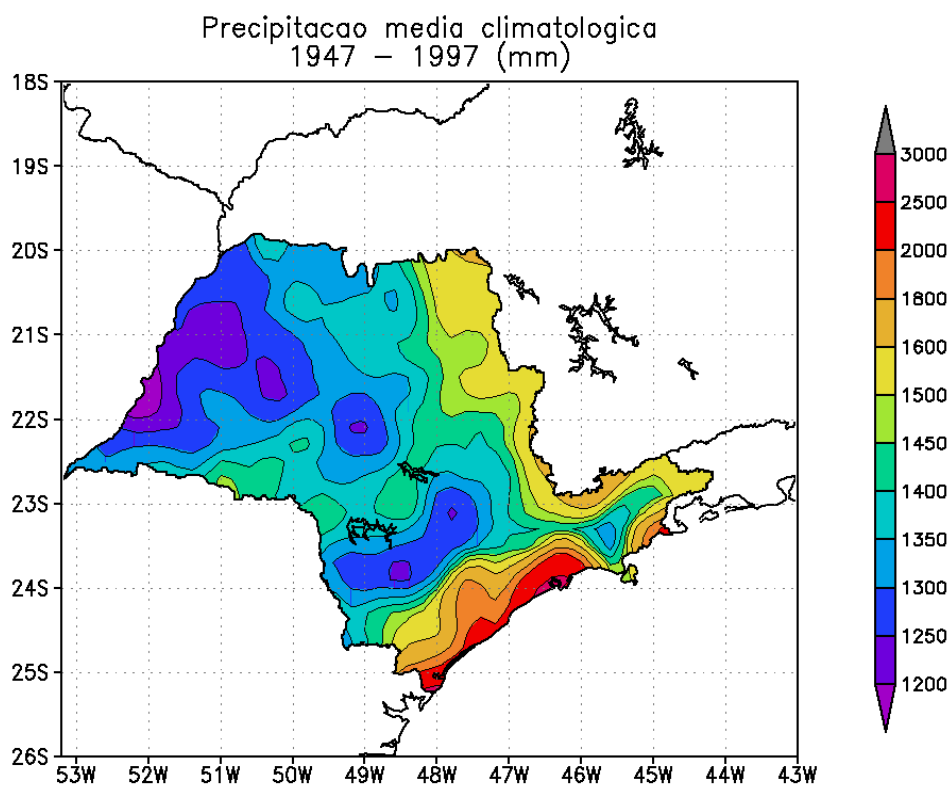


Figura 2 – Distribuição espacial da chuva média anual no Estado de São Paulo no período de 1947 a 1997. Escala de cores indica acumulação (mm).

O desvio padrão climatológico é mostrado na Fig. 3. A distribuição espacial desta variável está diretamente correlacionada com o total de chuvas, indicando que áreas com maior índice pluviométrico apresentam maior desvio padrão [Pereira Filho et al. (2003)]. A frequência de dias chuvosos é mostrada na Fig. 4. A faixa litorânea apresenta mais dias chuvosos que o interior do estado, com máximos na região de Ilha Comprida e Registro. Sugere-se que uma faixa do litoral com direção ao interior do estado, de cerca de 100 km de profundidade esteja sob o efeito da brisa marítima. Destacam-se as regiões de Jales, Fernandópolis e Jaú, no norte e noroeste do estado, por possuírem menor frequência de dias chuvosos.

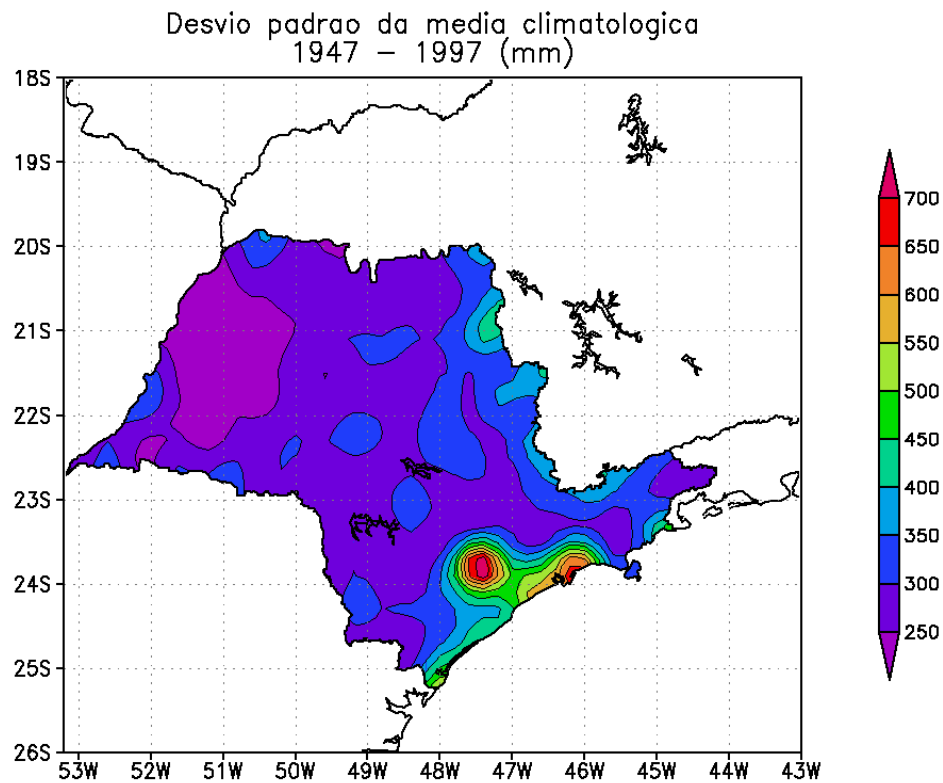


Figura 3 – Distribuição espacial do desvio padrão da precipitação média anual no Estado de São Paulo no período de 1947 a 1997. Escala de cores indica desvio padrão (mm).

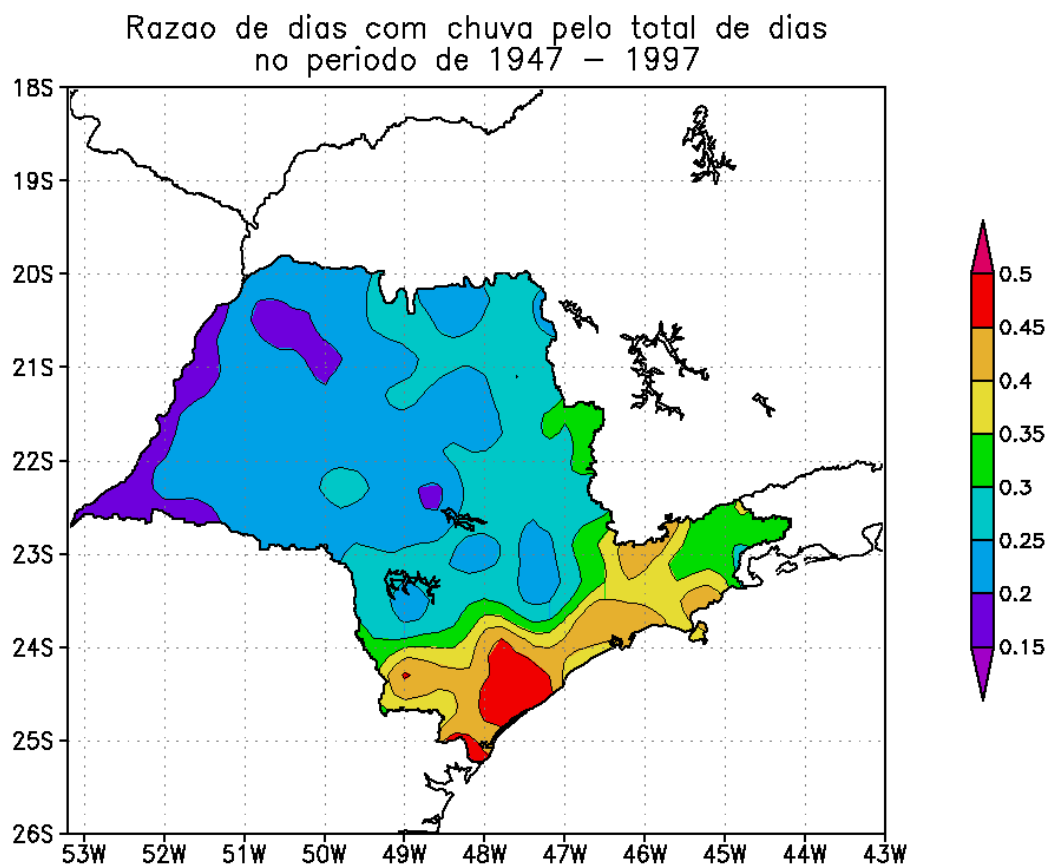


Figura 4 – Distribuição espacial da frequência do número de dias de chuva anual para o Estado de São Paulo no período de 1947 a 1997. Escala de cores indica frequência (%).

3.2 Influência do El Niño/La Niña no regime de precipitação

3.2.1 El Niño

As Figuras 5 mostram a distribuição da precipitação média dos anos mais seco (1963) e mais úmido (1983). Os mapas foram obtidos por meio dos totais anuais de precipitação de cada posto pluviométrico e interpolados pelo método de Cressman [Cressman (1959)]. O ano de 1963 foi o mais seco do período, com precipitação média espacial de 1002 mm e desvio padrão espacial de 361 mm. Sugahara (1991) indica que o ano de 1963 foi o mais seco no período de 1940 a 1984. O ano mais úmido foi 1983 com precipitação média espacial de 2138 mm e desvio padrão de 445 mm.

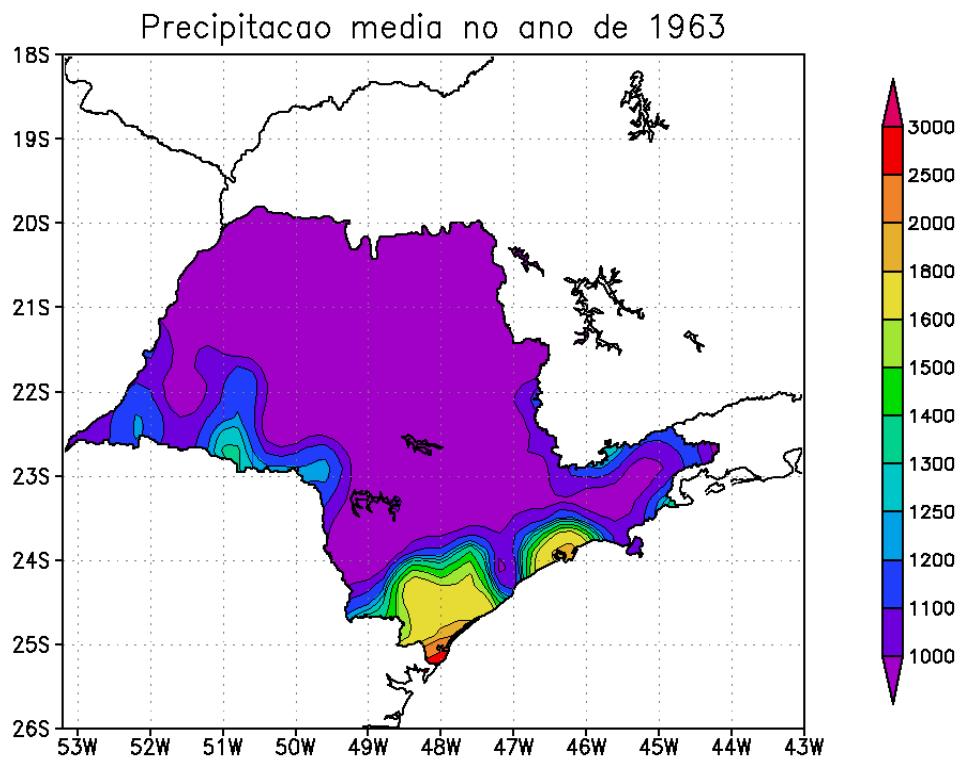


Figura 5 – Distribuição espacial de precipitação média anual no Estado de São Paulo para os anos de 1963 (acima) e 1983 (abaixo). Contornos e coordenadas geográficas estão indicadas. Escala de cores indica precipitação acumulada anual (mm).

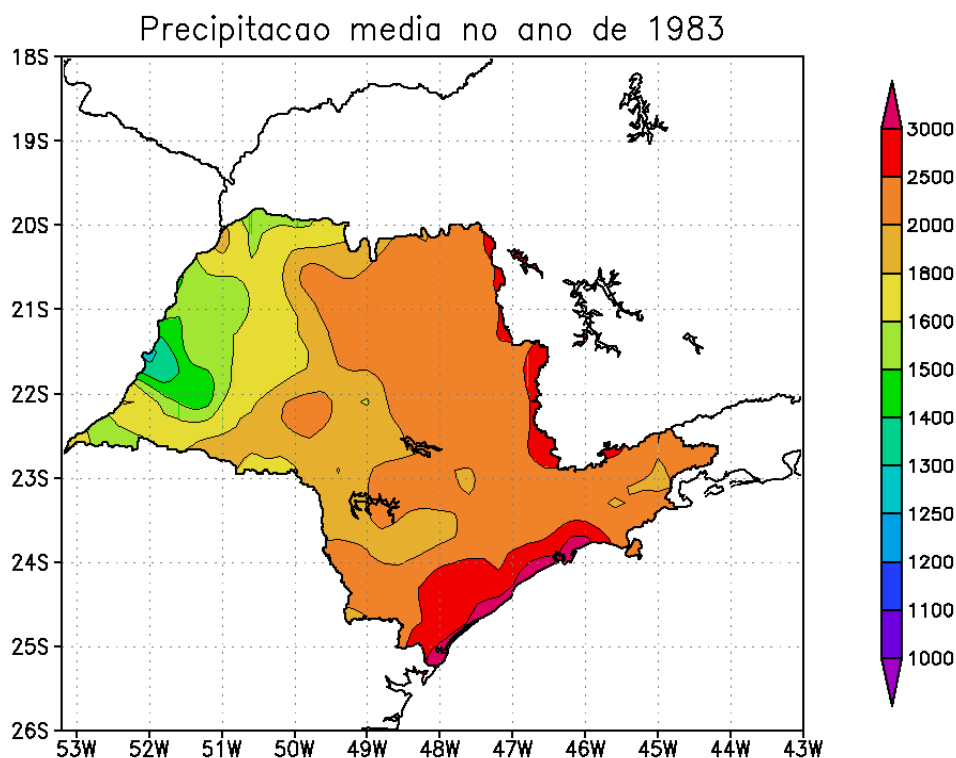


Figura 5 – Continuação.

Ao observar os extremos anuais de precipitação, notou-se que, no período de 1947 a 1997, tanto o ano mais seco (1963) quanto o mais úmido (1983) foram anos de El Niño. A Tabela 1 mostra a ocorrência de El Niño, La Niña e anos neutros no período analisado. Coelho et al. (2002) definem uma faixa de transição em torno de 22,5°S, com anomalias positivas de precipitação para o sul do Estado, comuns ao Sul do Brasil, e anomalias negativas para o norte do Estado, características do Nordeste do Brasil, para anos de El Niño (EN). No entanto, o sinal do EN depende da posição dessa linha de transição, que pode se deslocar mais para norte ou para o sul.

Segundo Kousky et al. (1984), o enfraquecimento da circulação de Walker no Pacífico é resultado das anomalias positivas de TSM no centro e leste deste oceano. A água mais quente que o normal no Pacífico equatorial fortalece a circulação de Hadley, intensificando o jato subtropical, nos dois hemisférios, onde o hemisfério de inverno possui o jato mais intenso. A presença desse jato pode ser responsável, em parte, por chuvas acima do normal durante o outono e inverno no Sul do Brasil.

Além disso, de acordo com Sugahara (1991), com o aumento de convecção tropical no Pacífico central, causado por um desvio da Zona de Convergência do Pacífico Sul (ZCPS), pode haver uma intensificação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), o que aumentaria as chuvas nas regiões Sul e Sudeste do Brasil. O ENOS também pode ser responsável por um aumento na frequência de sistemas frontais.

Tabela 1 – Eventos El Niño e La Niña considerados no período de 1947 a 1997.

El Niño	1952, 1953, 1958, 1963, 1966, 1968, 1969, 1972, 1976, 1983, 1986, 1987, 1992, 1993, 1994, 1997
La Niña	1947, 1950, 1955, 1956, 1961, 1962, 1964, 1971, 1973, 1974, 1988

(Fonte: Western Regional Climate Center (2007), COAPS (2007), Xavier (2001)).

Grimm e Ferraz (1998a) atribuem as anomalias de precipitação na região Sudeste às variações na TSM do Oceano Atlântico. Tal anomalia seria um anticiclone sobre o sudeste, que em baixos níveis resulta numa faixa de baixas pressões na faixa noroeste-sudeste, combinada em altos níveis com o fortalecimento do jato subtropical e uma curvatura ciclônica, o que favorece o excesso de chuvas no sul e falta no norte da região Sudeste.

Atribui-se o paradoxo da alternância do sinal do EN nos eventos destacados (1963 e 1983) à possível alternância da posição do jato subtropical, ou ao acoplamento do EN a algum outro sistema. No caso do ano mais seco, o jato estaria deslocado ao sul do estado, com predomínio de anomalias negativas, características do Nordeste do Brasil. No ano mais úmido, a posição do jato seria mais ao norte do estado, com predomínio de anomalias positivas comuns ao Sul do Brasil.

3.2.2 *La Niña*

A Fig. 6 mostra os eventos extremos de La Niña, onde 1955 foi o ano mais seco, com precipitação média anual de 1228 mm e desvio padrão de 383 mm e, 1947, o ano mais úmido com média de 1626 mm e desvio padrão de 639 mm. No entanto, os resultados para os anos mostrados na Fig. 6 não correspondem aos extremos do período, mas sim aos eventos extremos de La Niña.

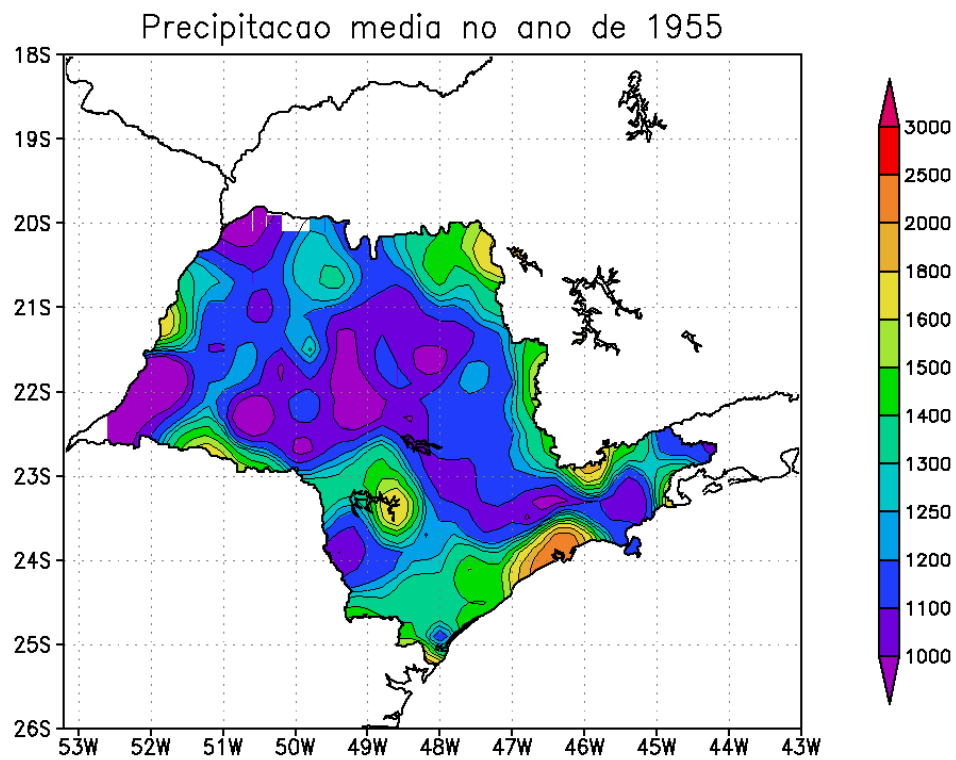


Figura 6 – Distribuição espacial de precipitação média anual no Estado de São Paulo para os anos de 1955 (acima) e 1947 (abaixo). Contornos e coordenadas geográficas estão indicadas. Escala de cores indica precipitação acumulada anual (mm).

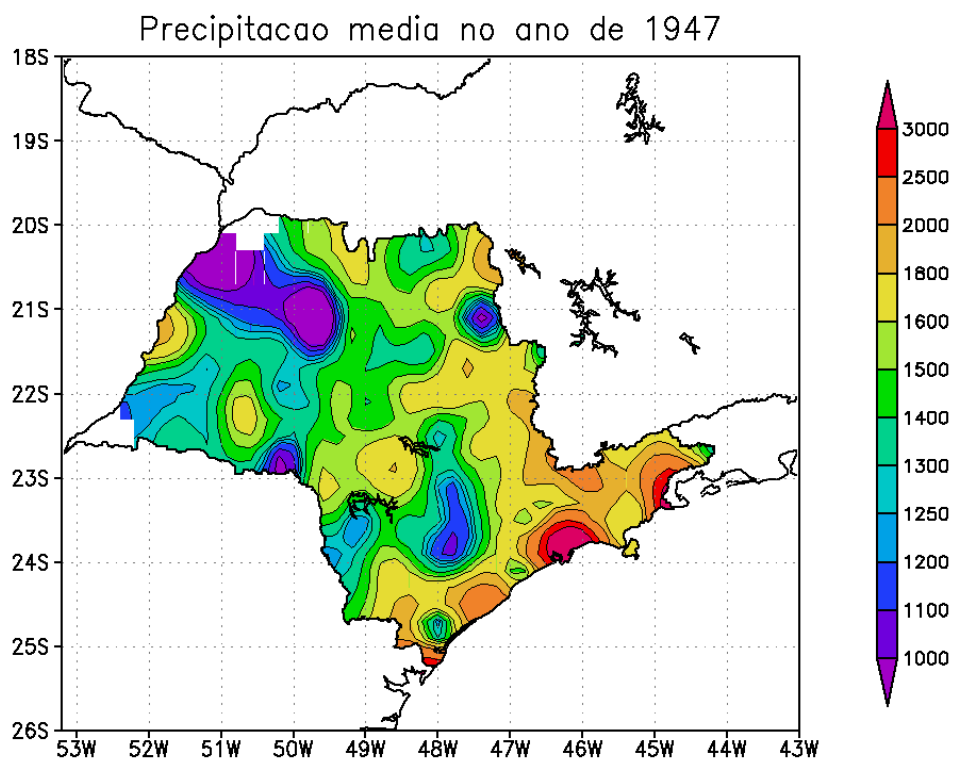


Figura 6 – Continuação.

Os valores extremos de precipitação anual em eventos La Niña se mostraram mais próximos que em eventos El Niño, com menor variabilidade espacial da chuva no primeiro caso. Da mesma forma que para eventos extremos de El Niño, Coelho et al. (2002) citam a região de transição em torno de 22,5°S para anomalias de La Niña. No entanto, durante anos de La Niña, o enfraquecimento da circulação sobre a América do Sul (jato subtropical no nível de 200 hPa) deve ser o responsável pelos padrões de precipitação, fortalecendo os jatos de baixos níveis e as posições dos ciclones e anticiclones. Ainda, anomalias negativas de TSM no oceano Pacífico durante anos de La Niña podem estar associadas com anomalias positivas de precipitação no sul da região Sudeste do Brasil. Sugahara (1991) indica que em anos de La Niña não houve nenhuma anomalia forte para os totais anuais de precipitação. De acordo com Grimm e Ferraz (1998b), há maior variabilidade espacial para anos La Niña do que para El Niño, e grandes áreas da região Sudeste não são coerentes para esse evento.

3.3 Análise de anomalias

Calcularam-se as médias espaciais de precipitação, as quais foram subtraídas da média para obter-se uma série temporal de anomalias de precipitação anual, mostrada na Fig. 7. Valores positivos e negativos correspondem a anomalias positivas e negativas, respectivamente. A Tabela 2

mostra a distribuição destas anomalias de precipitação espacial anual para episódios de El Niño, La Niña e neutro. Observa-se um maior número de episódios neutros no período analisado, com anomalias igualmente positivas e negativas. Há ainda uma leve tendência de anomalias positivas durante os anos de El Niño e, de anomalias negativas, em anos de La Niña, desprezíveis quanto comparadas ao número de episódios neutros.

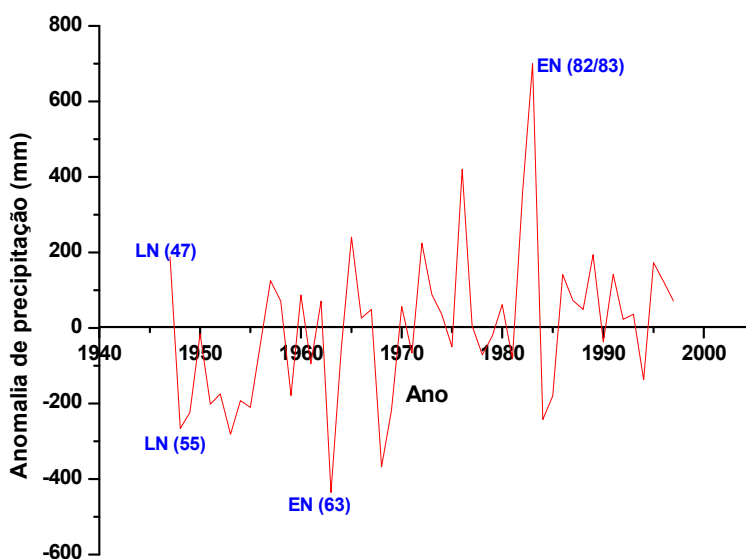


Figura 7 – Anomalias da precipitação média espacial no Estado de São Paulo de 1947 a 1997.

Tabela 2 – Porcentagem de anomalias da precipitação média espacial em anos de El Niño, La Niña e neutros no período de 1947 a 1997.

Anomalias	Evento		
	El Niño	La Niña	Neutro
Positivas	19,6%	9,8%	23,5%
Negativas	11,8%	11,8%	23,5%

3.4 Correlação espacial isotrópica

A correlação da chuva anual entre dois postos de medição é mostrada na Fig. 7. Observou-se um decréscimo logarítmico de ρ com a distância. Este resultado indica que há significativa dependência entre totais anuais de precipitação medidos numa distância relativamente grande. Nesta análise, não foi considerado o efeito topográfico ao longo no litoral e Serra da Mantiqueira [Barros et al. (1987)]. A análise da correlação espacial isotrópica da precipitação anual indica um decréscimo de $\rho=1,0$ em 0 km para $\rho=0,8$ em 25 km e para $\rho=0,7$ em 160 km. Além desta distância, a correlação decresce lentamente $\rho=0,64$ em 500 km. Estas distâncias são compatíveis com as distâncias de influência de sistemas precipitantes isolados, de pequena, meso-escala e de grande escala.

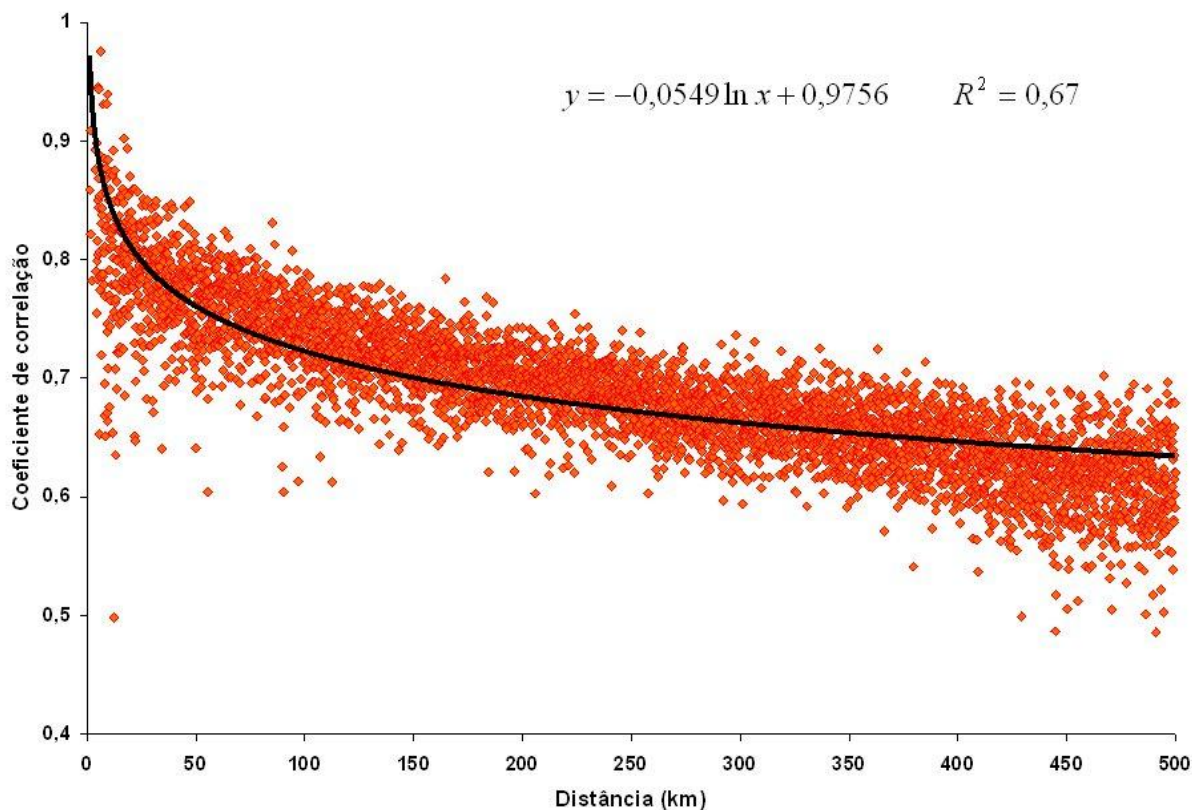


Figura 7 – Correlação espacial isotrópica da precipitação no Estado de São Paulo. A equação mostrada corresponde à curva ajustada (linha preta).

4. CONCLUSÕES

Anos de episódios de El Niño, La Niña e neutro podem produzir tanto anomalias positivas quanto negativas sobre o Estado de São Paulo, o que corrobora com os resultados de Coelho et al. (2002). No caso dos eventos extremos do período analisado, sugere-se que a posição do jato subtropical nos anos dos extremos climáticos de 1963 e 1983 seja um fator importante para a ocorrência destes eventos.

Também, segundo Sugahara (1991), se uma condição mais ou menos chuvosa estiver estabelecida no Estado de São Paulo, ela tende a persistir durante o ENOS; portanto, as anomalias variam em intensidade, e não no sinal. Ainda, um El Niño/La Niña não é igual ao outro. As condições atmosféricas variam de um evento para outro, como fontes e sumidouros de calor, intensidade da ZCAS, disponibilidade de umidade, circulações locais, dentre outros, além de a variável precipitação ser ruidosa.

A curva logarítmica obtida para a correlação espacial da precipitação anual indica que para distâncias abaixo de 25 km entre um posto e outro, a ocorrência de tempestades tem grande influência sobre o valor medido pelos postos próximos. Esse raio de influência é maior do que a

distância média entre postos no Estado de São Paulo, que é da ordem de 15 km. Assim, a densidade de posto é muito adequada para a análise de precipitação anual. Finalmente, sugere-se que os totais de precipitação anual são modulados pela grande escala, meso-escala e escala de nuvens, nesta ordem crescente de influência.

AGRADECIMENTOS

A primeira autora agradece à FUNDAP/DAEE pela bolsa de estudos e, o segundo, ao CNPq (Proc. Nº. 300456/2005-0) e à FAPESP (Proc. Nº. 01/13952-2) pelo apoio às pesquisas realizadas pelo Laboratório de Hidrometeorologia – *LabHidro*.

BIBLIOGRAFIA

BARROS, M. T. L.; BRAGA JR., B. P. F.; PEREIRA FILHO, A. J. (1987). “*Climatologia de precipitação na área de abrangência do radar de Ponte Nova – SP*” in Anais do VII Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, Salvador, 1987, 2, pp. 1 – 16.

BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M. (2000). “*Precipitação*”, in Hidrologia: ciência e aplicação. Org. por Tucci, C. E. M., ABRH, Ed. Universidade/UFRGS, Porto Alegre – RS, pp.177 – 241.

BOCZKO, R. (1984). “*Triângulos esféricos*”, in Conceitos de Astronomia. Ed. Edgard Blücher, São Paulo – SP, p. 77.

COAPS – CENTER FOR OCEAN-ATMOSPHERICS PREDICTION STUDIES (2007). <http://coaps.fsu.edu/jma.shtml>

COELHO, C. A. S.; UVO, C. B.; AMBRIZZI, T. (2002). “*Exploring the impacts of the tropical Pacific SST on the precipitation patterns over South América during ENSO periods*”. Theoretical Applied Climatology 71, pp. 185 – 197.

CRESSMAN, G. P. (1959). “*An operational objective analysis system*”. Monthly Weather Review 87, pp. 367 – 374.

GRIMM, A. M.; FERRAZ, S. E. T. (1998a). “*Sudeste do Brasil: Uma região de transição no impacto de eventos extremos da oscilação sul, parte I: El Niño*” in CD-ROM dos Anais do X Congresso Brasileiro de Meteorologia, Brasília.

GRIMM, A. M.; FERRAZ, S. E. T. (1998b). “*Sudeste do Brasil: Uma região de transição no impacto de eventos extremos da oscilação sul, parte II: La Niña*” in CD-ROM dos Anais do X Congresso Brasileiro de Meteorologia, Brasília.

GRUPO DE RECURSOS HÍDRICOS (1984). “*Caracterização dos recursos hídricos no Estado de São Paulo*”. Coordenadoria de Planejamento, Avaliação e Controle, Departamento de Águas e Energia Elétrica, São Paulo.

KOUSKY, V. E.; KAGANO, M. T.; CAVALCANTI, I. F. A. (1984). “*A review of the Southern Oscillation: oceanic-atmospheric circulation changes and related rainfall anomalies*”. Tellus 36A, pp. 490 – 503.

- PEREIRA FILHO, A. J.; CRAWFORD, K. C.; HARTZELL, C. L. (1998). “*Improving WSR-88D hourly rainfall estimates*”. *Weather and Forecasting* 13, pp. 1016 – 1028.
- PEREIRA FILHO, A. J.; CARBONE, R. E.; JANOWIAK, J. E.; ARKIN, P.; TUTTLE, HALLAK, J.; R.; KARAM, H. A. (2006). “*A CMORPH analysis of the convective regime over Brazil*”. Third Workshop of the International Precipitation Working Group, Melbourne, Australia. 9 pp.
- PRADO, L. F.; PEREIRA FILHO, A. J.; HALLAK, R.; LOBO, G. A. (2006). “*Climatologia de precipitação no Estado de São Paulo no período de 1947 a 1997*” in CD-Rom dos Anais do XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, Florianópolis, 5 pp.
- ROPELEWSKI, C. F.; HALPERT, M. S. (1987). “*Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation*”. *Monthly Weather Review* 115, pp. 1606 – 1626.
- SUGAHARA, S. (1991). “*Flutuações interanuais, sazonais e intrasazonais da precipitação no Estado de São Paulo*”. Tese de doutoramento, Departamento de Ciências Atmosféricas, IAG-USP, 137 pp.
- WESTERN REGIONAL CLIMATE CENTER (2007). <http://www.wrcc.dri.edu/enso>
- WILKS, D. S. (1995). “*Empirical distributions and exploratory data analysis*” in *Statistical methods in the atmospheric sciences: an introduction*. Academic Press, San Diego – CA, pp. 45 – 50.
- XAVIER, T. M. B. S. (2001). “*Tempo de Chuva - Estudos Climáticos e de Previsão para o Ceará e Nordeste Setentrional*”. ABC Editora, Fortaleza - CE, 478 pp.