



MUDANÇAS TEMPORAIS E ESPACIAIS NOS PADRÕES DE DISTRIBUIÇÃO PLUVIOMÉTRICA NO ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL

GUILHERME HENRIQUE GABRIEL¹
LUCÍ HIDALGO NUNES²

Resumo: Em um contexto mundial de alerta em relação a possíveis mudanças climáticas, cabe observar como os regimes climáticos regionais evoluíram nos últimos anos e se/como, respondem à tais mudanças globais. Nesse sentido, buscou-se identificar e avaliar possíveis mudanças no regime pluviométrico do estado de São Paulo, região Sudeste do Brasil. Para isso, foram utilizadas técnicas de estatística paramétrica e quantílica aliadas à espacialização dos resultados com uso das ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica. As análises revelam que os padrões de distribuição da pluviosidade no estado de São Paulo, como um todo, mostram sinais de evolução rumo ao aumento da irregularidade da distribuição das chuvas e da ocorrência de eventos extremos nos últimos anos.

Palavras chave: pluviosidade, distribuição gama, eventos extremos.

Abstract: In a global context regarding possible climate change, it is worth noting how the regional climate has evolved in recent years and if/how it responded to these global changes. Accordingly, we sought to identify and assess possible changes in the rainfall pattern of the state of São Paulo, southeastern Brazil. For this, parametric and percentile statistics were used, combined with spatial analysis of the results by the use of GIS tools. The results reveal that the distribution patterns of rainfall in the state of São Paulo, as a whole, show signs of evolution towards increased irregularity of rainfall distribution and occurrence of extreme events in recent years.

Key words: rainfall, gamma distribution, extreme events.

1 – Introdução

O aquecimento global, resultado da constante elevação das concentrações dos gases de efeito estufa na atmosfera, como aponta o IPCC (2014), pode impactar significativamente o ciclo hidrológico da Terra. Um dos prováveis impactos das mudanças climáticas globais seria o aumento da frequência de eventos extremos de pluviosidade.

Analisar a dinâmica da pluviosidade é essencial para diversas atividades, como o gerenciamento de recursos hídricos, previsão de eventos extremos causadores de desastres naturais, modelagem hidrológica e de umidade do solo e planejamento agrícola. No entanto, a variabilidade temporal e espacial das chuvas se coloca como fator limitante na precisão de tais modelos, aumentando os riscos do planejamento.

¹ Mestrando em Geografia, UNICAMP. guihg@hotmail.com.

² Doutora em Geografia, UNICAMP. luci@ige.unicamp.br.



Assim, o estudo da pluviosidade, sobretudo de sua variabilidade, torna-se fundamental para, a partir do entendimento dos mecanismos responsáveis pelos eventos extremos, permitir uma avaliação adequada da sua evolução e fornecer bases para ações futuras, mitigando impactos negativos, ainda mais fortes considerado o contexto de mudanças climáticas.

Nesse sentido, pretende-se avaliar a variabilidade espacial e temporal da pluviosidade no estado de São Paulo utilizando parâmetros de distribuição estatística – no caso, a distribuição gama.

O uso de distribuições estatísticas no estudo da climatologia permite reduzir toda a informação essencial dos valores observados em apenas alguns parâmetros da distribuição (JURAS, 1994). Entretanto, não existe um consenso sobre a distribuição estatística ideal para o estudo da pluviosidade, pois dada a variabilidade do clima ao longo do globo, cada distribuição vai se ajustar melhor às características de determinadas áreas (JURAS *op. cit.*; HUSAK *et al.*, 2007).

A distribuição gama é particularmente interessante na climatologia, pois, por característica própria, é uma distribuição limitada à esquerda por zero, isto é, não admite valores negativos – o que é importante no estudo da precipitação, já que um evento negativo de chuva é impossível. Porém, o mais importante é que trata-se de uma distribuição com parâmetros – forma (α) e escala (β) – bastante flexíveis, o que permite que ela se ajuste de maneira adequada a uma grande diversidade de regimes pluviais (WILKS, 1995).

O estado de São Paulo, foco da análise, está inserido em um meio tropical úmido a sub-úmido em que diversos domínios climáticos regionais e locais, influenciados pela presença de diferentes sistemas de ar, atuam de maneira variável ao longo do ano e da posição geográfica, o que confere ao estado contrastes climáticos consideráveis (NUNES, 2000).

Com uma área que se estende por 208km², cerca de 2,9% do território brasileiro, São Paulo se destaca no cenário nacional pela sua grande concentração populacional e econômica. De acordo com estimativas disponibilizadas pela Fundação SEADE, em 2012, o estado abrigava cerca de 41 milhões de pessoas, ou seja, 22% da população brasileira e 33,5% do PIB. Tais características, aliadas à dinâmica atmosférica regional, conferem à população do estado grande vulnerabilidade à distribuição das chuvas - todos os anos os



prejuízos econômicos e a população afetada, inclusive com óbitos, é expressiva, especialmente no período mais chuvoso.

Por apresentar uma forte concentração urbana e industrial e uma agricultura comercial altamente modernizada – especialmente no caso da cana-de-açúcar e da soja – que demanda grande e regular abastecimento de água, o estado de São Paulo é altamente dependente de distribuição pluvial adequada.

2 – Discussão

Para a análise estatística da pluviosidade, foram selecionados 79 postos pluviométricos ao longo do estado de São Paulo. Os dados foram obtidos junto ao Sistema de Informações para Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo, mantido pela Secretaria de Saneamento e Recursos Hídricos do estado, para um período total de quarenta anos – 1973 a 2012.

O período foi selecionado de maneira que fosse o mais estendido possível, com o menor número de falhas e que ainda tivesse boa representatividade espacial, cobrindo os diferentes domínios climáticos e orografias. Os postos escolhidos (79), no território do estado, estão representados na Figura 01.

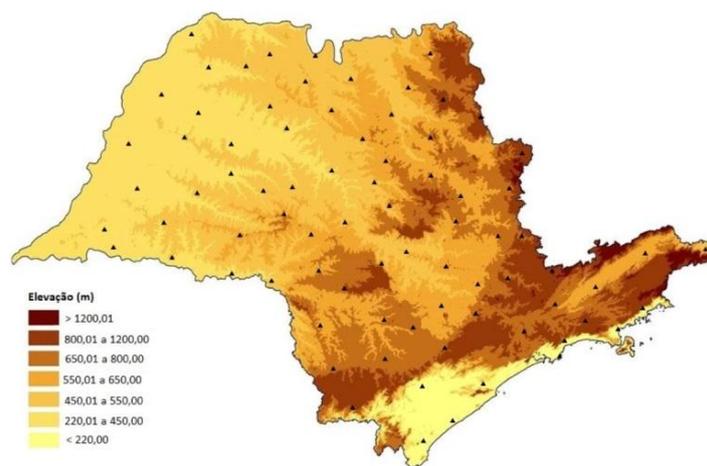


Figura 01. Postos pluviométricos do estudo espalhados pelo território de São Paulo.



Um dos maiores problemas relativos ao uso de dados históricos de pluviosidade no estudo da climatologia é o considerável montante de eventos não registrados. Para isso, foram utilizados os postos que apresentassem a série histórica mais extensa e com menor número de falhas, a fim de preservar a consistência dos resultados.

Eventuais falhas nas séries foram corrigidas mediante aplicação de métodos de regressão linear – conforme proposto pela Agência Nacional de Águas (ANA, 2012): “a condição espacial da precipitação sugere sempre a necessidade de analisar os dados de conjuntos de estações de medição pluviométricas próximas para permitir o preenchimento de lacunas nos registros ou a substituição de dados observados e considerados errôneos” (p. 12) – com dados de postos pluviométricos vizinhos e que apresentassem índice de correlação mínimo maior ou igual a 0,70.

Para a compreensão da evolução dos parâmetros da distribuição gama, bem como a evolução dos eventos extremos, representados pelos percentis 0,05 e 0,95, o período de estudo foi subdividido em duas partes: o primeiro, de 1973 a 1992 e o segundo, de 1993 a 2012. Ben-Gai *et al.* (1998) afirmam que parâmetros estatísticos representativos podem ser extraídos de séries pluviométricas relativamente curtas, como 10 anos.

Alguns autores como Thom (1958) e Wilks (1995), abordaram teoricamente a distribuição gama, o modo de como estimar seus parâmetros e sua aplicação em climatologia. Para Wilks (*op. cit.*), essa distribuição permite uma representação das características pluviais bastante flexível e envolvendo apenas dois parâmetros: forma (α) e escala (β).

O parâmetro de forma expressa o grau de assimetria da distribuição dos dados, enquanto o parâmetro de escala representa a abrangência dos valores. Em outras palavras, o parâmetro α descreve a forma da curva da distribuição: quanto menor o seu valor, mais distorcida a distribuição, quanto maior o seu valor, mais ela se aproxima da curva normal, ou seja, mais simétrica e igualmente distribuída é a pluviosidade. Quanto ao parâmetro β , que representa a probabilidade de ocorrência de um valor específico na distribuição, quanto maior seu valor, maior a probabilidade de ocorrência de eventos extremos e maior a variância dos dados de chuva.

Os eventos extremos de chuva, considerados como aqueles que se encontram nos limites das caudas, inferiores e superiores, da distribuição de probabilidades, foram analisados por meio da técnica dos quantis.



Conforme apontam Xavier *et al.* (2007), os quantis são medidas separatrizes, isto é, separam os valres em classes ou categorias de probabilidades/frequências determinadas. Para este estudo, serão utilizados os percentis 0,05, para eventos extremos de seca, e 0,95 para eventos extremos de acumulados chuvosos. Os dados serão computados mensalmente e os percentis calculados para cada estação pluviométrica do estudo.

A fim de comparar os resultados no contexto geral do estado, não é realizada a relativização estatística (XAVIER *et al.*, *op. cit.*), ou seja, a comparação não é realizada estação a estação. Ao contrário, são estipulados os limites 0,05 e 0,95 para todo o estado, de maneira que um único limite se aplique a todas as estações. Esse limite é alcançado através das médias dos percentis 0,05 e 0,95 de todas as estações, conforme proposto por Rodrigo (2010).

Por fim, os resultados das análises derivadas da aplicação da distribuição gama e da separação dos eventos extremos serão mapeados a fim de se conhecer a distribuição espacial dos fenômenos.

Os mapas de isolinhas serão interpolados, isto é, terão os dados ajustados à pontos não amostrados com base em valores de pontos amostrados, pelo método da krigagem. Este, “permite que os dados obtidos por amostragem de certos pontos possam ser usados para parametrizar a estimação de pontos onde o valor da variável seja desconhecido” (LANDIM, 2000:12).

De acordo com Landim (*op. cit.*), o método da krigagem, dentre os métodos apresentados em seu estudo, é o que apresenta o maior nível de precisão geral, desde que tomados alguns cuidados matemáticos antes de sua realização. Nesse sentido, será utilizado o software Surfer 11, que automatiza a geração das matrizes necessárias para a realização da interpolação e possibilita que o processamento pela krigagem se dê de forma mais precisa.

3 – Resultados

O estado de São Paulo é caracterizado pela intensa variabilidade pluvial apresentada ao longo do seu território. Essa variabilidade se realiza tanto temporal como espacialmente. Da análise da pluviosidade anual média para o todo da série histórica em



estudo (1973 a 2012), torna-se possível a identificação de duas áreas principais distintas, em termos de totais pluviométricos, no estado (Figura 02).

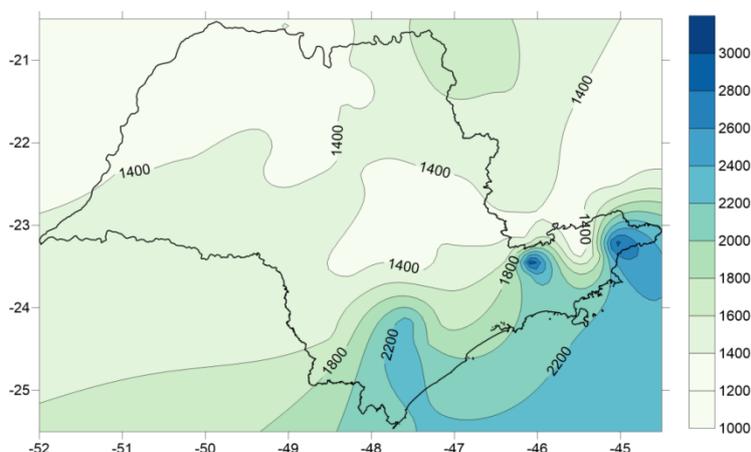


Figura 02. Representação da pluviosidade média (em mm) do estado de São Paulo para a série de 1973 a 2012.

Uma dessas áreas é representada pelo litoral de São Paulo, caracterizado por totais pluviométricos que beiram os 3000mm – bastante acima da média do estado, que é de cerca de 1500mm anuais, considerando os 79 postos em análise. Por outro lado, o oeste do estado é dominado por um tipo de clima notadamente mais seco, com totais anuais que podem chegar a apenas 1000mm.

Seguramente, os controles climáticos regionais, notadamente as massas de ar carregadas de umidade vindas do Oceano Atlântico, que não adentram o território paulista com toda a força como fazem no litoral, têm parcela importante de responsabilidade sobre a disparidade do regime pluvial ao longo do território. Outros fatores, como o relevo (ver Figura 01), também desempenham papel fundamental nesse contexto.

A distribuição dos eventos extremos também apresenta esse gradiente interior-litoral observado na pluviosidade média. Tanto os eventos correspondentes ao percentil 0,05 (Figura 3), quanto os eventos do percentil 0,95, mostram uma diminuição gradativa da intensidade da chuva extrema na medida em que se avança do litoral paulista para as porções interioranas, em direção à divisa do estado com a região Centro-Oeste do Brasil.

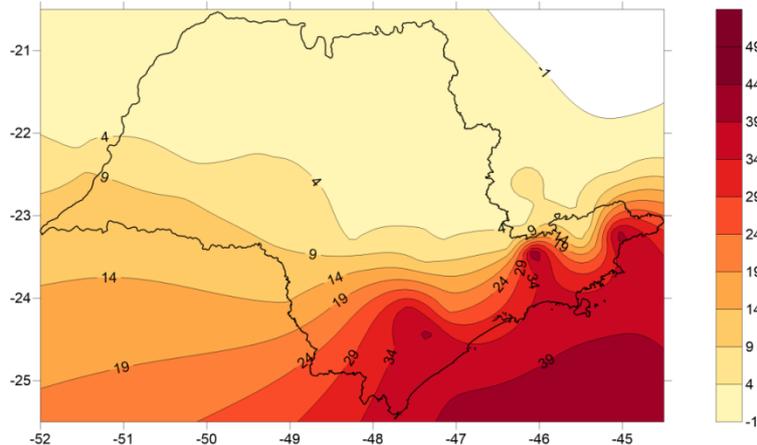


Figura 03. Representação dos valores do percentil 0,05 (em mm) de cada estação pluviométrica de 1973 a 2012.

Por ser uma distribuição estatística de dois parâmetros, a distribuição gama requer que os parâmetros de forma e escala sejam interpretados conjuntamente. Na Figura 04, é apresentado o gráfico de dispersão dos postos do estudo em relação aos parâmetros α e β , primeiro, para o período de 1973 a 1992, segundo para 1993 a 2012.

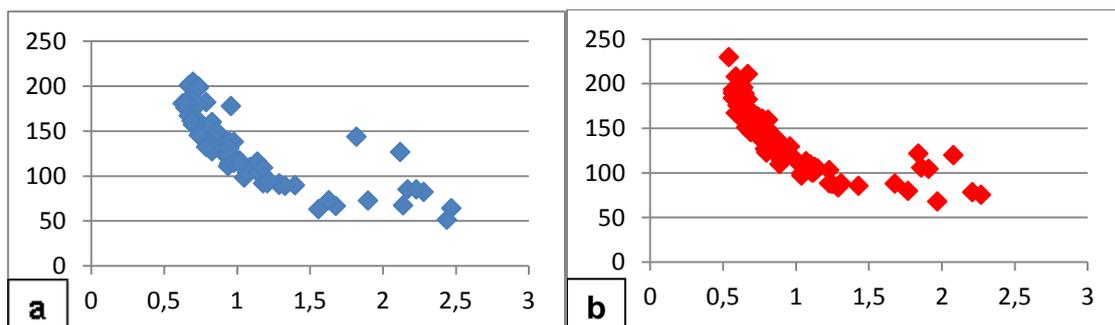


Figura 4. Gráfico de dispersão dos postos estudados em relação aos parâmetros de forma (eixo x) e de escala (eixo y), para os períodos de 1973-1992 (a) e 1993 a 2012 (b).

De maneira geral, observa-se que o estado de São Paulo apresenta uma variedade elevada em relação aos regimes de chuva. Compreende postos pluviométricos com parâmetros de forma bastante baixos, como 0,5 até mais elevados, como 2,5. Essa diferença indica, respectivamente, que existem postos pluviométricos onde a chuva é bastante irregular e outros onde a chuva é mais bem distribuída. Em relação ao parâmetro de escala, o mesmo fenômeno se observa, com dados que variam desde pouco menos de 50, até dados que beiram o valor 250.

Husak *et al.* (2007) trazem uma contribuição interessante, ao dizer que, via de regra, os postos pluviométricos submetidos à distribuição gama respondem de três maneiras distintas: (1) postos dominados pelo parâmetro de escala, onde a variabilidade é maior, (2)



postos dominados pelo parâmetro de forma, onde a chuva é constante, e (3) áreas onde a pluviosidade é muito baixa, com dificuldades em sustentar agricultura.

No estado de São Paulo é possível observar, pelo menos, dois dos grupos apontados pelo autor, os postos dominados pelo parâmetro de forma e os dominados pelo parâmetro de escala. Por característica própria do clima da região, não são encontrados postos na terceira categoria, já que os que apresentam valores de α muito baixos, apresentam, ao mesmo tempo, valores de β elevados, garantindo, ainda que irregularmente, pluviosidade suficiente para manter as atividades agrícolas.

A comparação entre os períodos também possibilita algumas observações sobre as mudanças pelo qual passaram os regimes pluviais do estado. Nota-se de maneira geral, um recuo do parâmetro de forma, ao passo que se elevam os valores do parâmetro de escala – o que indica uma mudança, ainda que leve, dos regimes climáticos em direção à características de maior irregularidade e variabilidade das chuvas.

Essa comparação é facilitada pela espacialização dos fenômenos (Figuras 05 e 06).

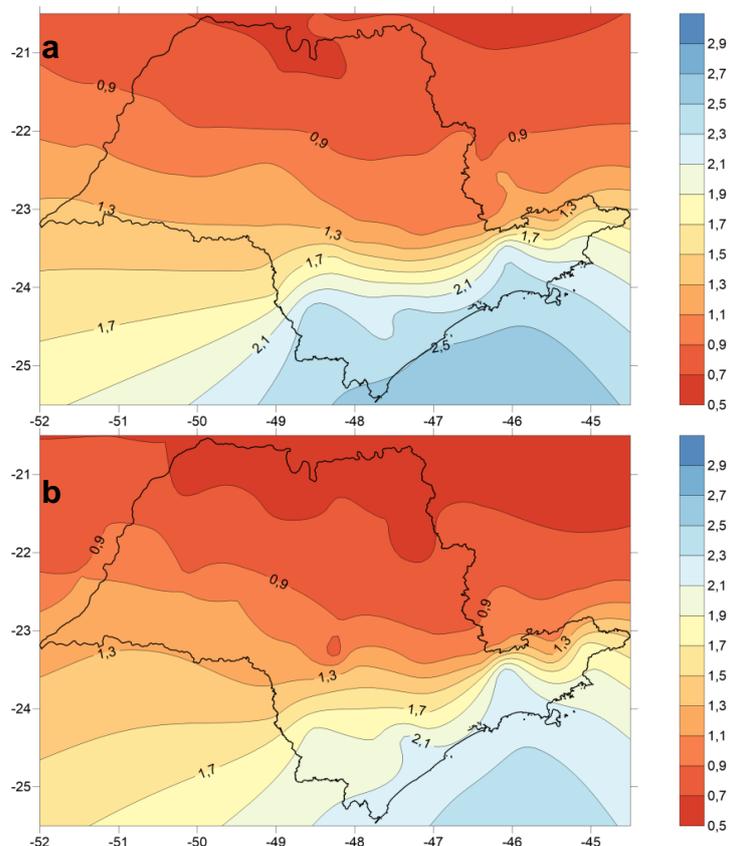


Figura 05. Evolução do parâmetro de forma no estado de São Paulo, para dois períodos: 1973 a 1992 (a) e 1993 a 2012 (b).



Aqui, repete-se o gradiente interior-litoral apontado em relação às chuvas totais anuais, ou seja, considerando o parâmetro α , entende-se que o interior do estado é dominado por um regime pluvial muito mais irregular – e que tende a ser mais seco, no geral – do que o litoral do estado, que apresenta valores mais elevados do parâmetro. É possível observar, também, o avanço das linhas de menor valor do parâmetro de forma na direção do litoral do estado, vindas do interior. Na verdade, há uma redução geral, ainda que pequena, nos valores do parâmetro de forma, indicando o aumento da irregularidade das chuvas para todo o estado de São Paulo.

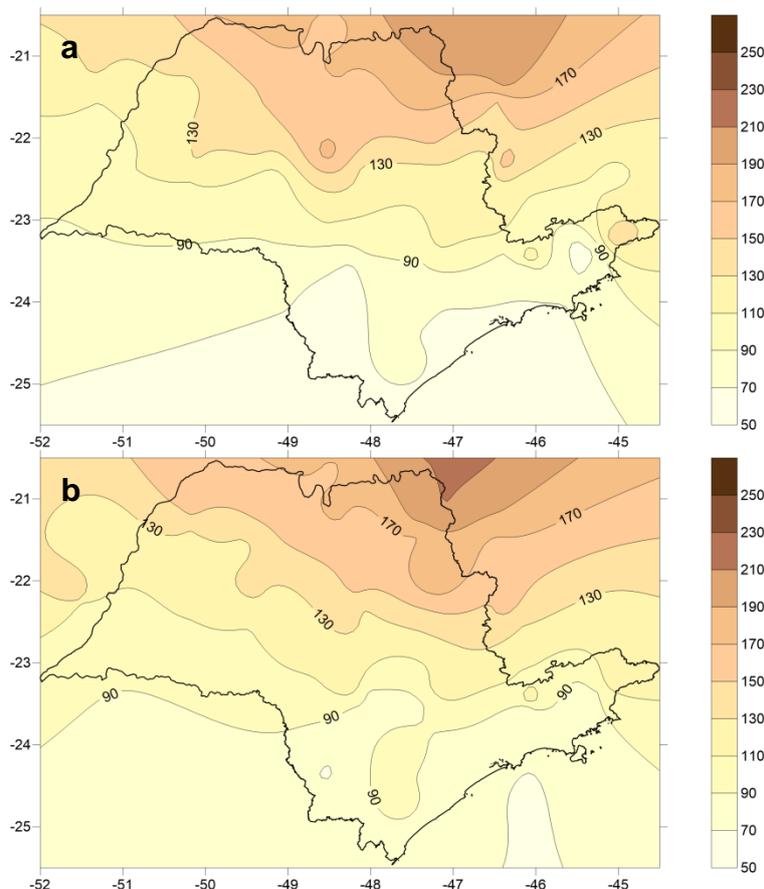


Figura 06. Evolução do parâmetro de escala no estado de São Paulo, para dois períodos: 1973 a 1992 (a) e 1993 a 2012 (b).

O parâmetro de escala, especialmente, responde de maneira semelhante: há uma tendência geral de aumento do parâmetro no sentido do interior para o litoral. O parâmetro β é indicativo da abrangência da função estatística, isto é, seu aumento implica em uma maior probabilidade de ocorrência de eventos, no caso a chuva, nas caudas da distribuição – o que significa um aumento na probabilidade de ocorrência de eventos extremos, tanto secos como acumulados chuvosos. Nota-se que os valores encontrados para o estado de São Paulo são bastante superiores a valores obtidos para outras regiões



por outros autores que utilizaram abordagem semelhante (Ben-Gai *et al.*, 1998; Michaelides *et al.*, 2009), o que demonstra a expressiva variabilidade interna das chuvas do estado. Complementando os resultados obtidos pela aplicação da distribuição gama às chuvas do estado, cabe a separação – e comparação de sua evolução – dos eventos extremos de acordo com percentis de intensidade. Isso se faz necessário para confirmar a hipótese de que o regime de chuvas no estado sofreu mudanças recentes: aumento da irregularidade da pluviosidade e do número de eventos extremos.

Para eventos extremos chuvosos, foi utilizado o percentil 0,95, para os eventos extremos secos, o percentil 0,05 – os limites utilizados para determinação dos percentis foram, respectivamente, 319,7 mm e 6,1 mm. Na comparação entre os períodos de 1973-1992 e 1993-2012, é possível observar o aumento dos números de eventos extremos (Figura 07), o que condiz com a evolução temporal do parâmetro de escala da distribuição gama. Um aumento de cerca de 10%, para cada caso, em um período de apenas vinte anos.

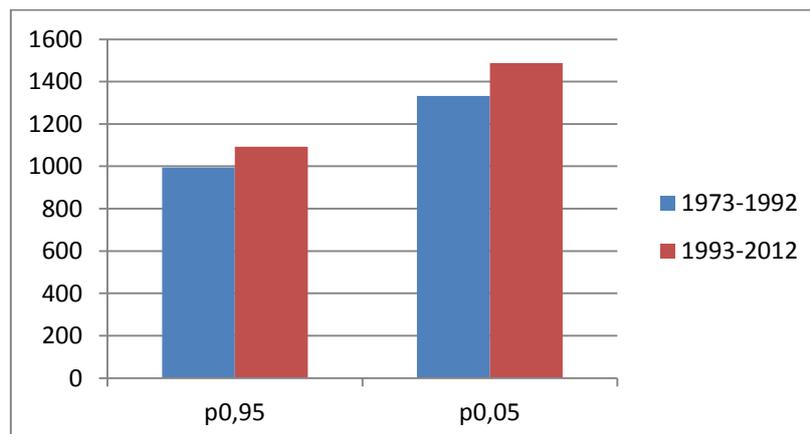


Figura 07. Número de eventos extremos para o conjunto dos postos pluviométricos do estado de São Paulo, para dois períodos.

Por fim, nota-se que o número de eventos extremos correspondentes ao percentil 0,05 é mais elevado do que o número de eventos extremamente chuvosos. O que também está de acordo com o apontado pela distribuição estatística aplicada anteriormente, uma vez que o estado, como um todo, é dominado por valores do parâmetro α próximos a 1 – indicador de forte irregularidade no regime de chuvas e distorção positiva na curva da distribuição, isto é, importância maior dos eventos de menor intensidade em comparação aos eventos da cauda superior da distribuição.



4 – Conclusões

Os resultados do estudo permitem concluir que, de fato, nos últimos anos, houve uma alteração significativa dos padrões de distribuição das chuvas no estado de São Paulo. As alterações observadas tanto nos parâmetros da distribuição gama, quanto no número de eventos extremos são indícios sólidos dessas mudanças. Fenômeno que a análise apenas dos totais pluviométricos não permite constatar.

Os padrões atuais (1993 a 2012) da pluviosidade em São Paulo, em comparação com o período anterior (1973 a 1992), evoluíram no sentido de um aumento da irregularidade da distribuição das chuvas, aumentando, conseqüentemente, a incerteza relacionada ao regime pluvial, com importantes implicações nas atividades humanas, como gestão de recursos hídricos e planejamento agrícola, e no crescimento do número de eventos extremos, tanto muito como pouco chuvosos, o que traz implicações, além das citadas, para as atividades de prevenção de desastres naturais.

O fato dessas alterações terem se dado simultaneamente sobre todo o território de São Paulo, ou seja, não serem espacialmente pontuais, abre novas possibilidades de interpretação dessas mudanças, além de condicionantes locais e regionais, sobretudo num contexto de mudanças climáticas globais.

Contudo, para que se chegue a uma afirmação dessa magnitude, estudos posteriores se fazem necessários. A análise da precipitação a nível diário, bem como o estudo da relação entre as mudanças observadas e os padrões de teleconexão podem complementar as conclusões atingidas neste estudo – permitindo a avaliação apropriada sobre as causas das mudanças que estão em curso.

5 - Referências Bibliográficas

BEN-GAI, T.; BITAN, A.; MANES, A.; ALPERT, P.; RUBIN, S. *Spatial and temporal changes in rainfall frequency distribution patterns in Israel*. **Theor. Appl. Climatol**, 61, 177-190, 1998.

BRASIL. Agência Nacional de Águas – ANA. Superintendência da Gestão da Rede Hidrometeorológica. **Orientações para consistência de dados pluviométricos**. Brasília: ANA, SGH, 2012.

HUSAK, G. J.; MICHAELSEN, J.; FUNK, C. *Use of the gamma distribution to represent monthly rainfall in Africa for drought monitoring applications*. **International Journal of Climatology**, 27, 935-944, 2007.



IPCC. **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability**. Online:
www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/

JURAS, J. *Some common features of probability distributions for precipitation*. **Theor. Appl. Climatol.**, 49, 69-76, 1994.

LANDIM, P. M. B. **Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas**. Rio Claro: UNESP, 2000.

MICHAELIDES, S. C.; TYMVIOS, F. S.; MICHAELIDOU, T. *Spatial and temporal characteristics of the annual rainfall frequency distribution in Cyprus*. **Atmospheric Research**, 94, 606-615, 2000.

NUNES, L. H. *Seasonal changes in the rainfall pattern in São Paulo state, Brazil*. In: **INTERNATIONAL FORUM ON CLIMATE PREDICTION, AGRICULTURE AND DEVELOPMENT**, 2000, Palisades: New York. *Proceedings...* New York: IRI, 129-137, 2000.

RODRIGO, F. S. *Changes in the probability of extreme daily precipitation observed from 1951 to 2002 in the Iberian Peninsula*. **International Journal of Climatology**, 30, 1512-1525, 2010.

THOM, H.C. **A note on the gamma distribution**. *Monthly Weather Review*, 86, 117-122, 1958.

XAVIER, T. M. B. S.; XAVIER, A. F. S.; ALVES, J. M. B. **Quantis e eventos extremos: aplicações em ciências da terra e ambientais**. Fortaleza: RDS, 2007.

WILKS, D. S. **Statistical methods in the atmospheric sciences: and introduction**. Academic Press: San Diego, CA, 1995.