ANÁLISE DAS TENDÊNCIAS DE CHUVA NO BRASIL, DE 1980 A 2015

Vinícius B. P. Chagas [1] & Pedro L. B. Chaffe [2]

RESUMO – As mudanças que ocorreram no regime de chuvas do Brasil ainda são incertas e precisam ser melhor exploradas. O objetivo deste trabalho foi quantificar tendências na chuva média, na sazonalidade, na frequência de eventos extremos, e na duração dos períodos sem chuva no Brasil, de 1980 a 2015. Analisou-se tendências lineares nos dados de 2323 estações de medição de chuva. As regiões com tendências semelhantes foram classificadas com a análise de agrupamentos. Os resultados mostram que nas últimas décadas houve um aumento do gradiente da chuva média no Brasil. Houve significativa redução na chuva média e aumento na duração dos eventos sem chuva em grande parte do país, particularmente no Sudeste do Brasil e no Cerrado. As mudanças mais críticas ocorreram nas bacias do São Francisco e do Tocantins-Araguaia. A chuva média e a frequência de eventos extremos aumentaram em parte do Sul do Brasil e da Amazônia. Houve aumento da sazonalidade no Sudeste e próximo ao estado de Goiás. As tendências encontradas neste trabalho divergem da bibliografia nas áreas com baixa densidade de estações de medição. Nota-se a importância de investigar a fonte original dos dados (i.e., pluviômetros) e de quantificar a incerteza das tendências de chuvas interpoladas.

ABSTRACT– Changes in the rainfall regime across Brazil are still uncertain and need to be better explored. The objective of this work was to quantify trends in average rainfall, seasonality, the number of extreme events, and the duration of dry days. We analyzed linear trends in rainfall data from 2323 gauges. Cluster analysis was used to identify regions with similar trends. In the recent decades, there was an increase in the gradient of average rainfall in Brazil. There was a significant reduction in average rainfall and an increase in the duration of dry days in a large part of the country, particularly in the Southeastern region and in the Cerrado. Most critical changes occurred in the São Francisco and the Tocantins-Araguaia basins. Average rainfall and the number of extreme events increased in part of Southern Brazil and of the Amazon. There was an increase in the seasonality in the Southeastern region and in the Goiás state. Some trends found in this paper diverge from those reported in the literature, specifically in areas with a low density of gauges. Therefore, we reiterate the importance to use not only interpolated rainfall products, but the original data (i.e., rainfall gauges) when analyzing trends.

Palavras-Chave – Chuvas. Tendências. Brasil.

1. INTRODUÇÃO

A série temporal de chuva é fundamental para definir o potencial de produção agrícola, a geração de energia hidrelétrica, a disponibilidade hídrica, a integridade ecológica, e a suscetibilidade da sociedade a eventos extremos. Com a ocorrência de mudanças no padrão da chuva nas últimas décadas (SUN et al., 2012), não se espera mais a estacionariedade dos regimes de chuva pelo mundo (MILLY et al., 2008).

No Brasil, desde a década de 1950 tem-se registrado aumentos da chuva média no Sul do Brasil (SUN et al., 2012; SOARES et al., 2017), reduções da chuva média e aumentos das secas em partes

1) Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina. E-mail: vbchagas@gmail.com.
2) Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina.

do Cerrado e sul da Amazônia (SPINONI et al., 2014; SUN et al., 2012, SOARES et al., 2017). Entretanto, os estudos que avaliam tendências de chuva no Brasil são geralmente discordantes entre si, pois os resultados variam segundo as metodologias adotadas, fontes de dados, e períodos de análise. Em particular, diversos estudos (e.g, SUN et al., 2012; RAO et al., 2016) investigaram tendências em dados de chuvas interpolados, o que dificulta identificar quais regiões do país têm menores quantidades de dados disponíveis e consequentemente maiores incertezas dos resultados.

O objetivo deste trabalho é quantificar tendências na chuva média, na sazonalidade, na frequência de eventos extremos, e na duração dos períodos sem chuva no Brasil. As tendências são investigadas utilizando as fontes originais de dados, i.e., das medições em pluviógrafos, do período de 1980 a 2015. Com isso, é possível analisar a concordância espacial das tendências, além de quais regiões possuem diferentes densidades de medição de dados e maiores incertezas dos resultados.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Seleção e controle de qualidade dos dados de chuva

A Agência Nacional de Águas (ANA), responsável por disponibilizar dados de chuva do Brasil, possui dados de mais de 11 mil estações de medição (ANA, 2018). Estes dados são medições diárias a partir de pluviógrafos. Neste trabalho, foram selecionadas para análise apenas 2323 estações de medição de chuva no Brasil, de 1980 a 2015 (Figura 1). Há uma maior densidade de estações de

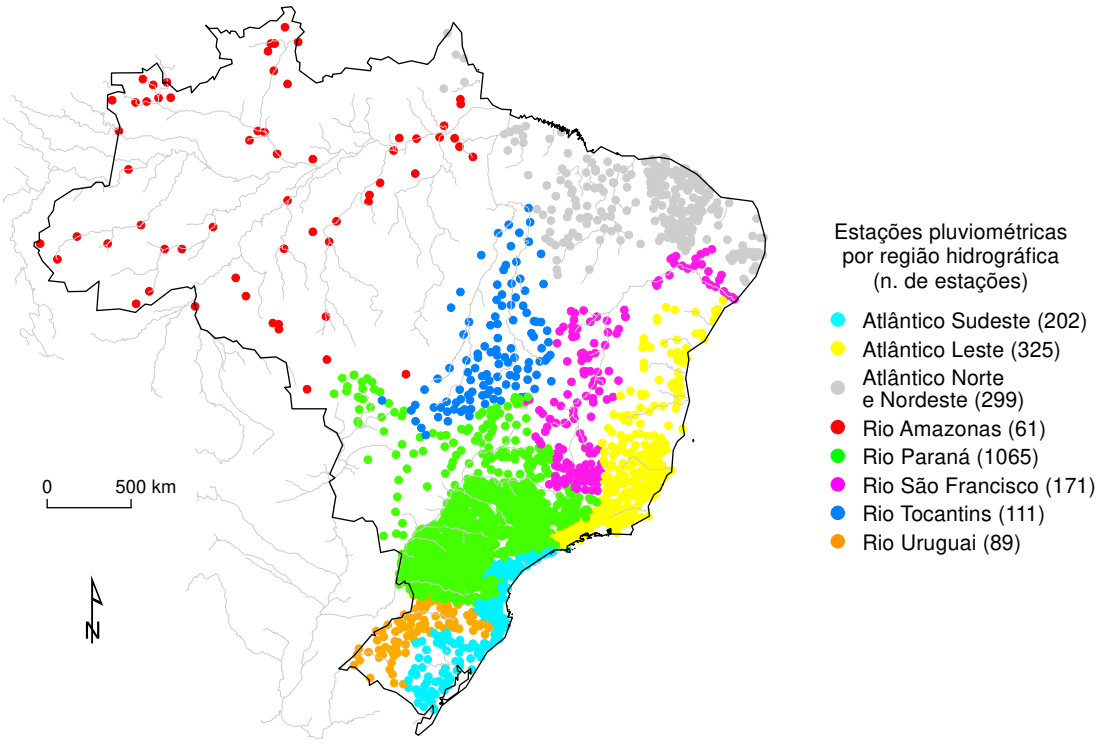

Figura 1 – Localização das 2323 estações de medição de chuva usadas neste trabalho, classificadas por região hidrográfica. As linhas pretas indicam o limite territorial do Brasil e as linhas cinza os cursos da água.

medição no Sudeste e no Sul do Brasil (Figura 1). A região hidrográfica da bacia do Paraná possui a maior parte das estações de medição de chuva (i.e., 45,8% do total) e do Amazonas a menor parte (2,6% do total). Foi escolhido o período de 1980 a 2015 porque na década de 1970 houve grande aumento no número de estações de medição (ANA, 2018). Além disso, a análise de tendências após o salto climático da década de 1970, onde houve grandes mudanças nos regimes de chuva no mundo (JACQUES-COPER; GARREAUD, 2015), permite capturar valores mais estáveis da série.

A seleção das 2323 a partir das mais de 11 mil estações de medição se deu com dois critérios: (i) apenas estações com pelo menos 25 anos de dados completos (i.e., sem quaisquer dados ausentes ou falhas) entre 1980 e 2015; (ii) apenas estações aprovadas no controle de qualidade dos dados. O controle de qualidade foi feito comparando visualmente a série temporal de cada estação de medição com a média das três estações vizinhas mais próximas. Para isso, foram usadas somas móveis de 7, 15, e 60 dias. O controle de qualidade é exemplificado na Figura 2, em que um trecho de uma série de chuva foi considerado inconsistente com as medições vizinhas e seus dados foram descartados.

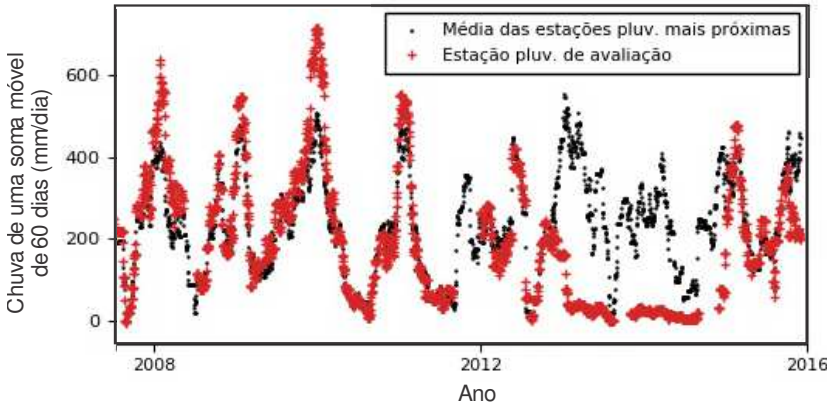

Figura 2 – Exemplo do controle de qualidade dos dados de chuva a partir da soma móvel de 60 dias das medições das três estações vizinhas mais próximas. A série é da estação pluviométrica 2349005, localizada no estado de São Paulo. A série é identificada como inconsistente após 2012 e foi descartada da análise.

2.2 Índices de chuva

Após a seleção e controle de qualidade dos dados, calcularam-se as tendências nos índices de chuva. Para cada estação de medição foi gerado uma série temporal, na escala anual, para cada índice calculado. Para considerar ambas as condições médias e extremas da chuva, adotou-se quatro índices, descritos na Tabela 1: chuva média anual, sazonalidade da chuva média, frequência anual de chuva intensas, e duração média anual dos eventos sem chuva. Para aumentar a independência da série dos três primeiros índices, utilizou-se o ano iniciando no mês seguinte ao mais seco da série, i.e., de Setembro-Agosto. No caso do último índice, utilizou-se o ano iniciando após o mês mais úmido da série, i.e., de Março-Fevereiro.

Tabela 1 – Índices usados para avaliar as mudanças de chuva no Brasil.

Sigla	Nome	Descrição (unidade)	Ano
Pmed	Chuva média anual	Chuva média anual (mm ano^{-1})	Set-Ago
Psaz	Sazonalidade da chuva média	Índice de Sazonalidade de Markham das chuvas mensais (-)	Set-Ago
Pfreq_ext	Frequência anual de chuvas intensas	Nº de eventos no ano com chuva acima do percentil 90 de longo prazo (eventos ano^{-1})	Set-Ago
Pdur_sec	Duração média anual dos eventos sem chuva	Duração média dos eventos no ano com chuva abaixo de 1 mm (dias evento^{-1})	Mar-Fev

A sazonalidade da chuva foi avaliada com o Índice de Sazonalidade de Markham – MSI (MARKHAM, 1970). O índice varia de zero a um, sendo zero o valor da menor sazonalidade (i.e., quando a média anual está igualmente dividida nos meses ou quando a sazonalidade não é unimodal) e o valor um o de maior sazonalidade (i.e., quando está todo concentrado em apenas um mês). Este índice é uma estatística circular, tendo início no primeiro dia do ano hidrológico (i.e., 1º de setembro) e sentido horário. A variável (neste caso, chuva mensal) é representada por vetores, com magnitude igual ao total mensal e direção igual ao ângulo em função do mês. É calculado com o vetor resultante:

$$R = (R_Y^2 + R_X^2)^{1/2} \quad (1)$$

onde R_Y e R_X são as somas das projeções de dois eixos ortogonais:

$$R_Y = \sum_{m=1}^{12} P_m \text{sen}(\phi_m) \quad (2)$$

$$R_X = \sum_{m=1}^{12} P_m \cos(\phi_m) \quad (3)$$

onde *m* é o mês; P_m é a chuva total do respectivo mês; ϕ_m é o ângulo calculado a partir do dia médio do mês, considerando que o ano completo possui um total de 360 graus. Com isso, o Índice de Sazonalidade de Markham (MSI) para a chuva é:

$$MSI_P = \frac{R}{\sum_{m=1}^{12} P_m} \quad (4)$$

2.3 Cálculo das tendências

Tendências lineares foram calculadas para a série anual de cada índice, e para cada estação de medição. Tendências em todos os índices, com exceção da frequência de chuvas intensas, foram calculadas com a declividade de Theil-Sen (THEIL, 1950; SEN, 1968). Ao contrário da regressão linear tradicional (i.e., dos mínimos quadrados), a regressão de Theil-Sen não exige distribuição normal dos resíduos e é pouco afetada por outliers.

A estimativa das tendências pela regressão de Poisson foi aplicada à frequência anual de chuvas intensas. Essa escolha se deu uma vez que variáveis representadas por valores inteiros não negativos, particularmente de baixa contagem, são melhor analisadas a partir da distribuição e da regressão de Poisson (WILKS, 2011). Na regressão de Poisson, a taxa de ocorrência λ dos eventos é definida em função do tempo *t* (WILKS, 2011):

$$\lambda = \exp(\beta_0 + \beta_1 t_i) \quad (5)$$

onde os parâmetros β_0 e β_1 são estimados usando a máxima verossimilhança, e caso o coeficiente β_1 for significativo para um nível de significância $\propto$, rejeita-se a hipótese nula de que não há tendência na série. A variável dependente da regressão assume a distribuição de Poisson (WILKS, 2011), cujo único parâmetro λ da função de probabilidade é estimado com:

$$Pr\{X = x\} = \frac{\lambda^x e^{-\lambda}}{x!} \quad (6)$$

onde *e* é a base do logaritmo natural (*e* = 2.718...), e *x* é o número inteiro não negativo de ocorrências (x = 0, 1, 2, ...).

A declividade de Theil-Sen e a regressão de Poisson usadas para verificar tendências assumem que a série temporal é independente. Para ser considerada independente, a série anual dos índices deve ter autocorrelação não significativa e próxima de zero. Portanto, as séries de todos os índices tiveram sua autocorrelação verificada e removida quando identificada como significativa. Esta remoção se deu com o *trend-free pre-whitening* (YUE et al., 2002).

Os métodos para verificação de tendências citados são eficazes mesmo em séries que não seguem distribuição normal e possuem outliers. Porém, uma técnica robusta para identificar o nível de significância de um teste estatístico é a reamostragem usando *bootstrap* (EFRON; TIBSCHIRANI, 1998). O *bootstrap* é a geração de séries aleatórias e de mesmo tamanho, geradas a partir da série original com reposição de seus elementos. Neste trabalho calculou-se a significância das tendências

com *bootstrap* com 2000 reamostragens, segundo sugestão de Efron e Tibschirani (1998) para um intervalo de confiança entre 90 e 95%.

2.4 Análise de agrupamento

Após analisar as tendências, foi investigado quais regiões do país tiveram tendências semelhantes. Para isto, utilizou-se a análise de agrupamentos para dividir as estações de medição em grupos. A análise de agrupamento maximiza a homogeneidade das observações dentro dos grupos, enquanto maximiza a heterogeneidade entre grupos. Portanto, cada grupo é caracterizado por tendências semelhantes nos quatro índices de chuva. No agrupamento, a medida de similaridade entre as observações foi a distância euclidiana. O procedimento do agrupamento foi feito com o método da ligação completa, baseado na distância máxima entre as observações de cada agrupamento.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Tendências

As tendências foram divididas pela mediana da respectiva série anual, a fim de representá-las em porcentagem por ano (Figura 3). Os resultados mostram que, nas últimas décadas, houve predominante redução da chuva média no Cerrado e no Semiárido (Figura 3a). Estas são justamente as regiões com as menores chuvas médias anuais no Brasil. Por outro lado, houve tendências de aumentos em parte do Sul do Brasil e da Amazônia, que são as regiões de maiores chuvas médias anuais. Portanto, nota-se que houve aumento das diferenças entre as regiões com maiores e menores chuvas médias no Brasil nas últimas décadas.

Ocorreram mudanças na sazonalidade da chuva de todo o Brasil (Figura 3b). Houve um aumento significativo da sazonalidade principalmente no Sudeste do Brasil e próximo ao estado de Goiás. Como estas regiões também tiveram redução da chuva média anual, nota-se que a redução da chuva foi maior no período mais seco do ano. Por outro lado, reduções da sazonalidade ocorreram no Sul e no Nordeste do Brasil.

As reduções na frequência de eventos extremos foram mais comuns que os aumentos (Figura 3c). Aumentos na frequência de eventos extremos ocorreram principalmente nos estados do Paraná e Santa Catarina. Partes da Amazônia também tiveram aumentos neste índice, porém a baixa densidade de estações de medição dificulta a interpretação destes resultados.

Dentre os quatro índices analisados, a duração média anual dos eventos sem chuva foi o que mais teve tendências significativas no Brasil (Figura 3d). Além da chuva média ter diminuído em grande parte do país, o período de dias sem chuva entre eventos aumentou. As regiões hidrográficas do Atlântico Leste, bacia do Paraná, do São Francisco, e do Tocantins-Araguaia foram as mais

críticas, onde mais de 75% das estações de medição tiveram aumentos neste índice. Parte do estado de Goiás teve aumento cumulativo de mais de 30% nos últimos 35 anos, indicando que as chuvas após 2015 ocorrem com intervalos entre si em média 3,5 dias a mais que em 1980.

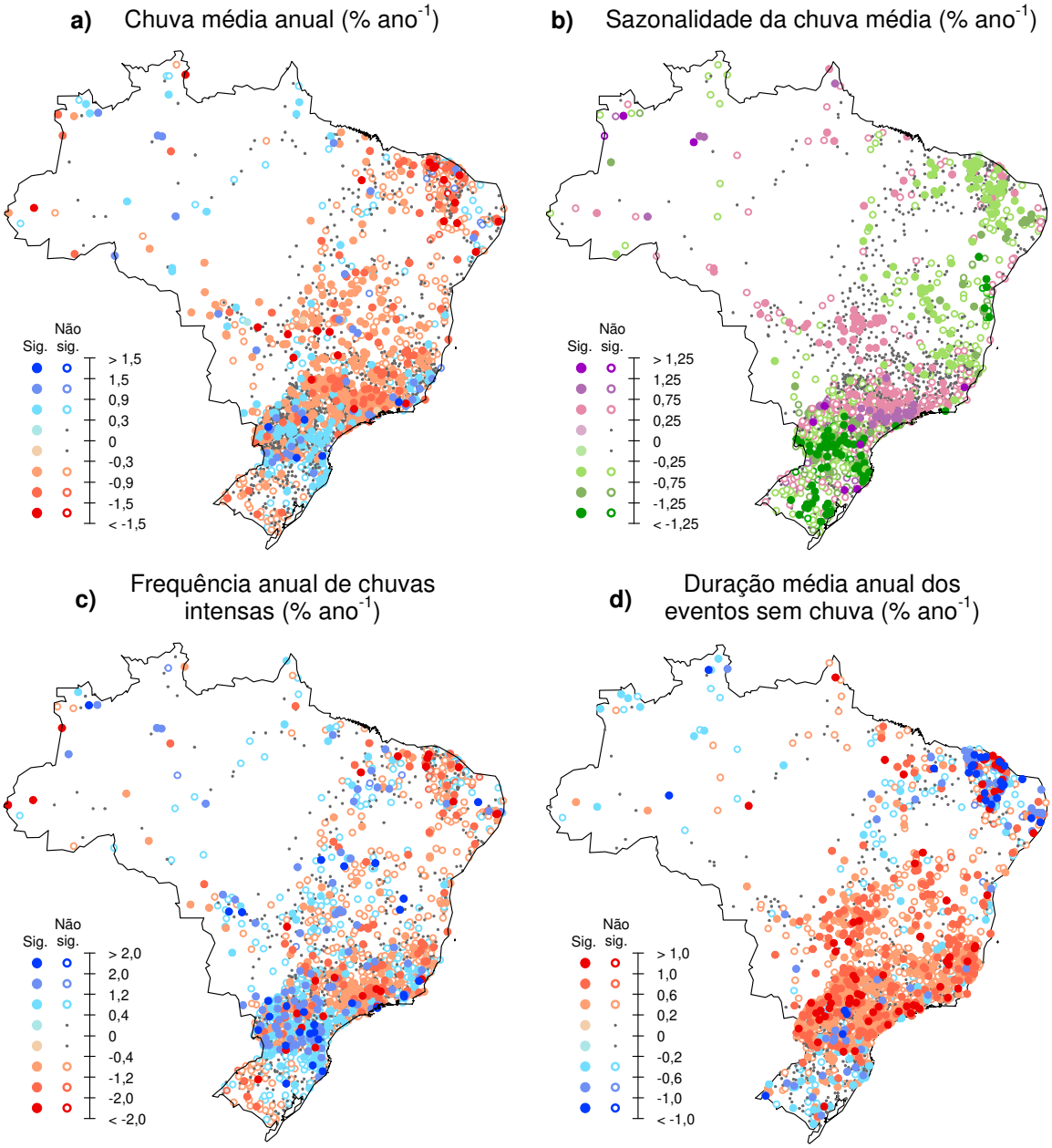

Figura 3 – Tendências de 1980 a 2015 nos quatro índices de chuva. Símbolos preenchidos são tendências de Theil-Sen (**a, b, d**) ou da regressão de Poisson (**c**) significativas para o nível de 5%.

3.2 Análise de agrupamento

A análise de agrupamento objetivou identificar estações de medição e regiões com tendências semelhantes. Com o dendrograma foi definido o agrupamento das estações de medição em seis classes (Figura 4). Uma parte substancial do Brasil foi agrupado na classe 4. Isto inclui praticamente todo o Sudeste do Brasil e grande parte do Cerrado (Figura 5). Segundo o agrupamento, esta região possui

tendências semelhantes, caracterizada por diminuição da chuva média anual, aumento da duração dos eventos sem chuva, e redução da frequência anual de eventos extremos.

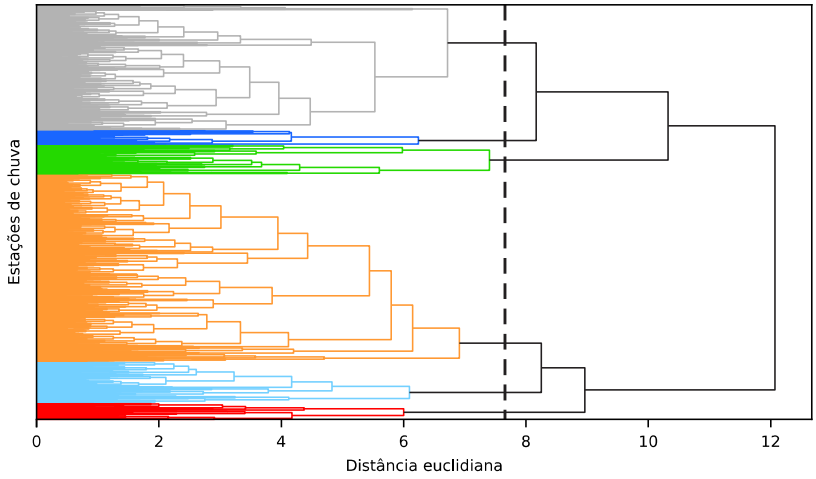

Figura 4 – Dendrograma usado para definir o número de classes da análise de agrupamento. A linha tracejada indica a divisão em seis classes. As cores das classes são as mesmas das cores da Figura 5.

A maior parte do Sul do Brasil foi inserida na classe 1. Esta classe caracterizou-se por aumentos da chuva média e grande redução da sazonalidade, indicando que o aumento da chuva ocorreu principalmente na estação mais seca do ano. Além disto, o Sul do Brasil também teve aumento do intervalo entre chuvas, i.e., as chuvas ficaram mais concentradas no tempo e com maiores intensidades.

Partes do Rio Grande do Sul e do Nordeste do Brasil tiveram tendências semelhantes e foram agrupadas na classe 2. Nestas regiões, predominaram tendências negativas nos quatro índices. A redução da chuva média anual e da sazonalidade indica que a chuva diminuiu principalmente na época mais úmida do ano.

Grande parte do Norte do Brasil foi definida na classe 3. Esta região, que abrange o sul do Piauí, norte da Rondônia, e Sudeste do Amazonas, e o estado do Pará, é caracterizada por mudanças pouco claras. Dentre todo o Brasil, esta foi a classe com as menores e mais incertas mudanças no regime de chuvas.

As tendências encontradas neste trabalho divergem com a bibliografia nas áreas com baixa densidade de estações de medição. Rao et al. (2016), que investigaram tendências em chuvas interpoladas, encontraram tendências significativas na chuva média em parte do Semiárido, do sul da Amazônia, e do Mato Grosso do Sul. Neste trabalho, notou-se que estas são justamente as regiões do país com menores quantidades de dados, onde as tendências encontradas são incertas. Portanto, nota-se a importância de investigar também a fonte original dos dados (i.e., pluviômetros) e de quantificar a incerteza das tendências de chuvas interpoladas.

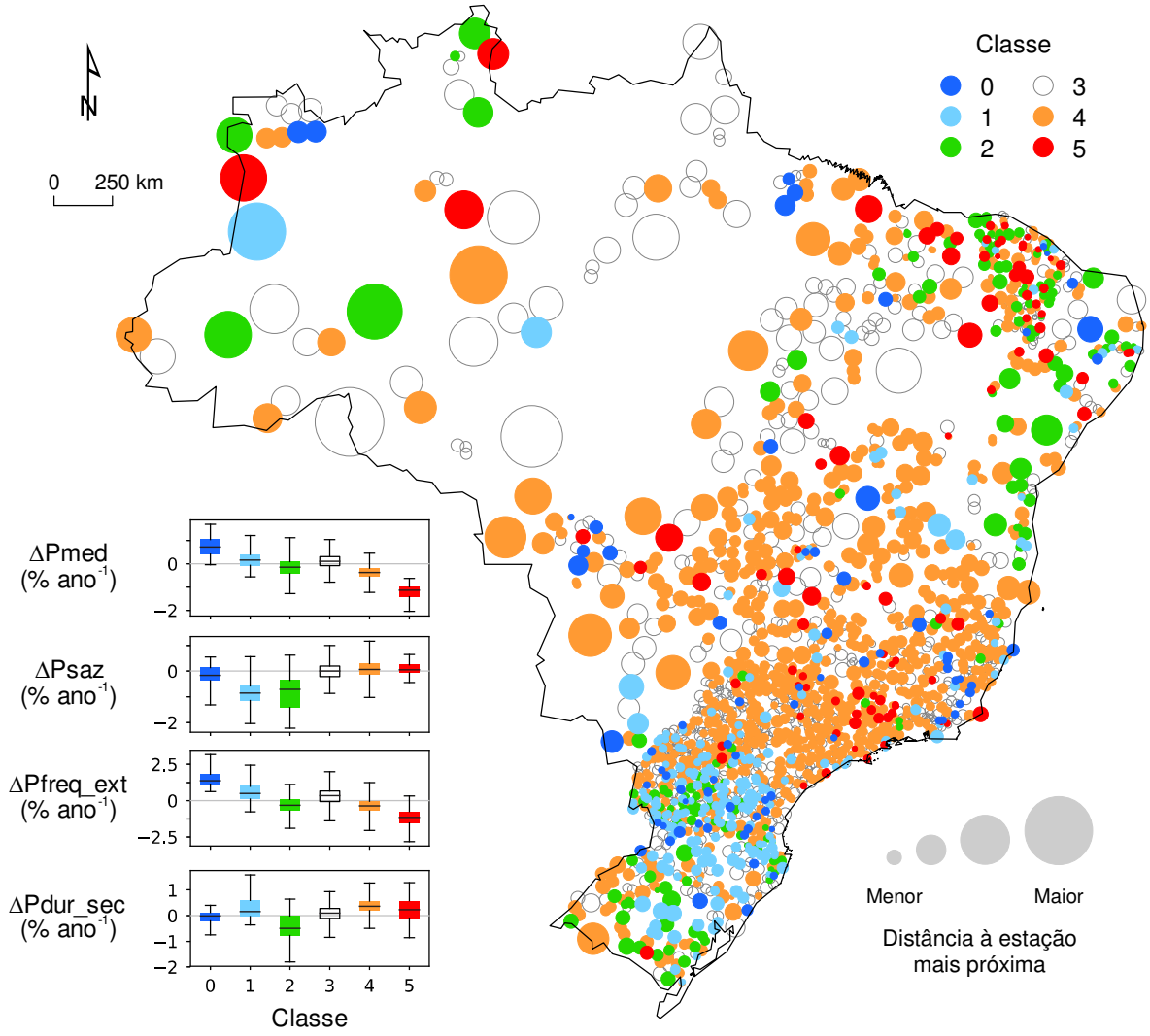

Figura 5 – Distribuição espacial da classificação das tendências de chuva. O tamanho do círculo é proporcional à distância até a estação de medição mais próxima. Os boxplots indicam as tendências em cada índice de chuva para cada classe. A linha intermediária do boxplot indica a mediana, as caixas indicam o primeiro e terceiro quartis, e os bigodes um limite de duas vezes o intervalo entre quartis. Os outliers não foram representados nos boxplots.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho analisou padrões espaciais das tendências nas condições médias e extremas de chuva no Brasil, entre 1980 e 2015. As mudanças mais frequentes do Brasil foram na duração dos períodos sem chuvas. A maior parte do país, principalmente o Sudeste e o Cerrado, tiveram grandes reduções das chuvas médias e aumentos da duração dos períodos sem chuvas. O gradiente da chuva média aumentou na última década, com redução da chuva nas áreas mais secas (i.e., no Cerrado) e aumentos nas áreas mais úmidas (i.e., no Sul do Brasil e em parte da Amazônia). As regiões com as tendências mais inconclusivas foram em partes da Amazônia e do Semiárido. Com este trabalho, argumenta-se que a investigação de tendências de dados diretamente de pluviômetros é fundamental para investigar incertezas e inconsistências espaciais das mudanças na chuva.

AGRADECIMENTOS - O primeiro autor agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de estudos.

REFERÊNCIAS

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. HidroWeb: Sistema de Informações Hidrológicas. 2018. Disponível em: <http://hidroweb.ana.gov.br/>. Acesso em 15 jan. 2018.

EFRON, B.; TIBSHIRANI, R. J. An introduction to the bootstrap. CRC press, 1994.

JACQUES-COPER, M.; GARREAUD, R. D. Characterization of the 1970s climate shift in South America. International Journal of Climatology, v. 35, p. 2164–2179, 2015.

MARKHAM, C. G. Seasonality of Precipitation in the United States. Annals of the Association of American Geographers, v. 60, n. 3, p. 593–597, 1970.

MILLY, P. C. D.; BETANCOURT, J.; FALKENMARK, M.; et al. Climate change. Stationarity is dead: whither water management? Science (New York, N.Y.), v. 319, n. 5863, p. 573–574, 2008.

RAO, V. B.; FRANCHITO, S. H.; SANTO, C. M. E.; GAN, M. A. An update on the rainfall characteristics of Brazil: Seasonal variations and trends in 1979-2011. International Journal of Climatology, v. 36, n. 1, p. 291–302, 2016.

SEN, P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. J. Am. Statist. Assoc., v. 63, p. 1379–1389, 1968.

SOARES, D. B.; LEE, H.; LOIKITH, P. C.; BARKHORDARIAN, A.; MECHOSO, C. R. Can significant trends be detected in surface air temperature and precipitation over South America in recent decades? International Journal of Climatology, v. 37, n. 3, p. 1483–1493, 2017.

SPINONI, J.; NAUMANN, G.; CARRAO, H.; BARBOSA, P.; VOGT, J. World drought frequency, duration, and severity for 1951-2010. International Journal of Climatology, v. 34, n. 8, p. 2792–2804, 2014.

SUN, F.; RODERICK, M. L.; FARQUHAR, G. D. Changes in the variability of global land precipitation. Geophysical Research Letters, v. 39, n. 18, p. 1–6, 2012.

THEIL, H. A rank-invariant method of linear and polynomial regres- sion analysis, I. Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Academie van Wetenschappen, v. 53, n. 1950, p. 386–392, 1950.

WILKS, Daniel S. Statistical methods in the atmospheric sciences. Academic press, 2011.

YUE, S.; PILON, P.; PHINNEY, B.; CAVADIAS, G. The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. Hydrological Processes, v. 16, n. 9, p. 1807–1829, 2002.