TENDÊNCIAS NAS CHUVAS E VAZÕES DE SECA, MÉDIAS E DE CHEIA NO SUL DO BRASIL ENTRE 1975 E 2010

Vinícius Bogo Portal Chagas [1] & Pedro Luiz Borges Chaffe[2]*

Resumo – No século XX e principalmente após a década de 1970, o Sul do Brasil passou por uma das maiores mudanças no regime de chuvas e de vazão no mundo. Neste trabalho são quantificadas as tendências das médias anuais, frequência de eventos extremos, e duração das secas para chuva e vazão, no sul do Brasil, entre 1975 e 2010. É avaliada a hipótese de que as tendências de chuva e de vazão são semelhantes. São usadas 674 estações de medição de chuva e 142 de vazão. O estado de Santa Catarina, o leste e o sudoeste do estado do Paraná tiveram substanciais aumentos na chuva e vazão média, como também na frequência de eventos extremos. As bacias hidrográficas no centro-norte do Paraná tiveram grande aumento na duração das secas, ambos para a chuva e vazão. A bacia do Uruguai e seus tributários tiveram substancial redução na duração das secas. É observado que as maiores tendências na frequência de eventos extremos estão em bacias com área menor que cerca de 6000 km². Diversas bacias hidrográficas tiveram tendências de chuva e de vazão média de sinais opostos. Isto indica que mudanças nas variáveis de chuva não devem ser diretamente atribuídas à vazão.

Palavras-Chave – Tendências de chuva; Tendências de vazão; Sul do Brasil.

TRENDS IN AVERAGE, EXTREME AND DROUGHT RAINFALL AND STREAMFLOW IN SOUTHERN BRAZIL FROM 1975 TO 2010

Abstract – Through the 20th century and mainly after the 1970s, Southern Brazil went through one of the major changes in the rainfall and streamflow regime in the world. In this work we quantify the trends in annual means, frequency of extreme events, and duration of droughts for rainfall and streamflow in Southern Brazil between 1975 and 2010. We evaluate the hypothesis that the rainfall and streamflow trends are similar. We used 674 rainfall gauges and 142 streamflow gauges. There was a substantial increase in average rainfall and streamflow, as well as in the frequency of extreme events in Santa Catarina state, the east and southwest of Paraná state. The catchments in the center-north of Paraná suffered increases in the drought duration, both for rainfall and streamflow. The Uruguay catchment and its tributaries had substantial reduction in the drought duration. The major trends in the frequency of extreme events are in catchments with area smaller than around 6000 km². Many catchments had average rainfall and streamflow trends of opposed signals. That indicates that changes in the rainfall variables should not be directly attributed to streamflow.

Keywords – Rainfall trends; Streamflow trends; Southern Brazil.

[1] Mestrando 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. E-mail: pedro.chaffe@ufsc.br

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas foram observadas mudanças climáticas globais, incluindo mudanças no regime de precipitação. Passaram por mudanças características do regime de chuvas como a média, variabilidade, extremos, secas, e sazonalidade. Apesar disso, os últimos 70 anos não tiveram mudanças significativas na precipitação média global (Sun *et al*, 2012). As maiores mudanças no regime de precipitação ocorreram apenas regionalmente. O Sul do Brasil foi uma das regiões do mundo com as maiores mudanças na precipitação média observada nas últimas décadas (Sun *et al*, 2012) e previstas para o século XXI (Chadwick *et al*, 2015). Em particular, após a década de 1970 o regime de chuvas no Sul do Brasil passou por mudanças substanciais (Jacques-Coper e Garreaud, 2015). O fenômeno El Niño passou a ser mais frequente, consequência da variabilidade nos oceanos Pacífico e Atlântico, levando ao maior aporte de umidade para o sudeste da América do Sul (Kayano e Capistrano, 2014). Como consequência das mudanças nas chuvas, o século XX passou grande aumento na vazão média das maiores bacias do Sul do Brasil (Pasquini e Depetris, 2007; Doyle e Barros, 2011).

Com as mudanças no regime de chuvas são esperados impactos no regime de vazão. Entretanto, as mudanças no regime de vazão não têm como causas apenas as mudanças nas chuvas. Outras causas também podem ser observadas, sendo agrupadas em: (i) mudanças climáticas, como mudanças no regime de chuvas ou de evaporação; (ii) mudanças não-climáticas, como nas funções internas da bacia (ex. partição, armazenamento, transmissão) a partir de mudanças no uso do solo, ou regulações diretas do ciclo hidrológico (ex. estruturas hidráulicas) (Kundzewicz e Gerten, 2014).

Por mais que se saiba que as mudanças no regime de chuvas foram substanciais no Sul do Brasil, seus impactos na vazão ainda não são inteiramente conhecidos. Em particular, os impactos na vazão das menores bacias hidrográficas foram pouco explorados. Neste trabalho, é buscado quantificar as tendências na chuva e na vazão do Sul do Brasil, entre 1975 e 2010. Três características do regime de chuva e vazão são avaliadas: médias anuais, frequência de extremos, e duração média das secas. Diversas regiões do globo tiveram maiores mudanças na frequência que na magnitude dos extremos (ex. Mallakpour e Villarini, 2015), por isso esta característica é escolhida. No caso das secas, a duração é escolhida porque é a característica que indica impactos mais severos na sociedade (Vicente-Serrano *et al*, 2004). Adicionalmente, são avaliados possíveis relações e impactos que as mudanças na chuva causaram na vazão. Para isso, baseou-se na hipótese de que as maiores causas das mudanças na vazão no Sul do Brasil foram mudanças na chuva.

MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizados dados de 674 estações pluviométricas e 142 estações fluviométricas no Sul do Brasil (Figura 1), cuja fonte foi o HidroWeb (ANA, 2017). Os anos analisados foram de 1975 a 2010 porque é o período após a década de 1970 com o maior número de estações distribuídas pelo Sul do Brasil. De todas as estações pluviométricas disponíveis na HidroWeb, utilizou-se apenas aquelas com menos de 10% de falhas nos dados para o período analisado. No caso das estações fluviométricas, foram utilizadas apenas estações com um mínimo de 29 anos com menos de 20% de falhas no período analisado. Foram consideradas apenas as estações com a bacia hidrográfica situada inteiramente no Sul do Brasil. A delimitação das bacias foi feita com dados topográficos do SRTM (USGS, 2006) com resolução horizontal de 1 arco-segundo, ou 30 metros. As bacias hidrográficas delimitadas foram verificadas com as bacias observadas na HidroWeb (ANA, 2017), quando disponíveis.

Após o critério de seleção das estações de medição a partir de falhas nos dados foi feita a análise exploratória dos dados. Cada estação de medição teve as médias, máximas, e mínimas anuais visualizadas em gráficos. Foram removidas as estações com dados preenchidos iguais à zero no lugar das falhas; e com máximas diárias acima de três ordens de grandeza. Os dias com falhas nos dados pluviométricos foram preenchidos usando a chuva média das três estações mais próximas. As falhas nos dados de vazão não foram preenchidas.

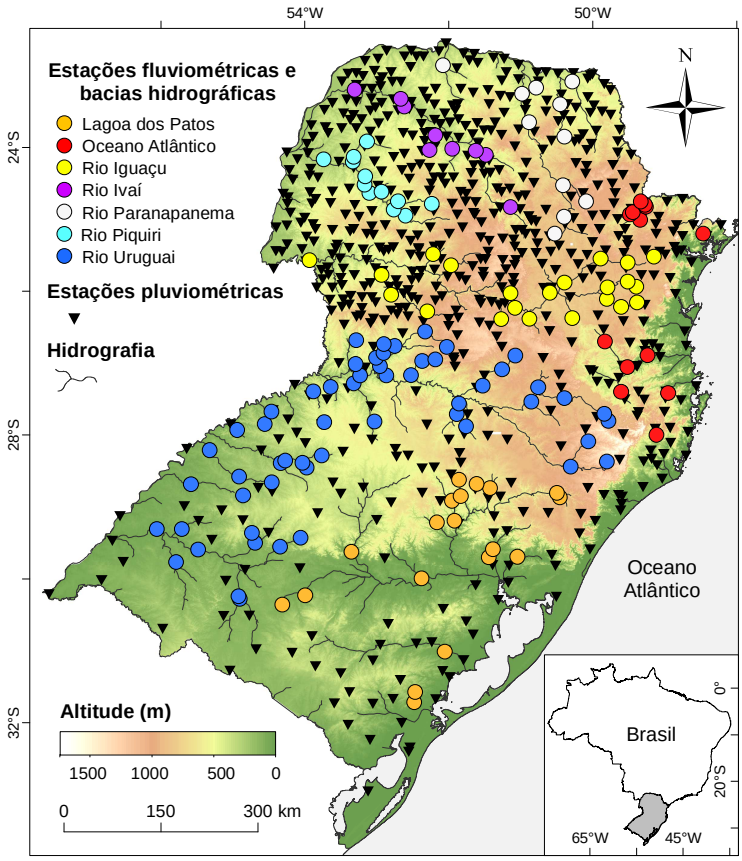

Figura 1 – distribuição das 674 estações pluviométricas e 142 estações fluviométricas analisadas no Sul do Brasil

Foram usados três índices para avaliar as tendências de chuva e de vazão: médias, frequência de extremos, e duração das secas. No caso da chuva, os índices usados foram: (i) chuva média anual; (ii) frequência anual de eventos acima do percentil 90 de longo prazo; (iii) duração média anual dos períodos consecutivos sem chuva, onde foi considerado dias com menos de 1 mm de medição como dia sem chuva. No caso da vazão, foram considerados: (i) vazão média anual; (ii) frequência anual de eventos acima do percentil 90 de longo prazo; (iii) duração média anual dos eventos abaixo do percentil 10 de longo prazo. Os dias consecutivos acima do percentil 90 ou abaixo do percentil 10 foram considerados apenas como um evento. Para determinar o percentil de longo prazo calculou-se o percentil de cada ano individualmente, entre 1975 e 2010, e usou-se a mediana destes valores.

Os três índices de chuva e de vazão foram calculados para cada estação de medição e para cada ano de 1975 a 2010. Para quantificar a tendência destes índices foi utilizada a regressão linear de Sen (1968). Essa é uma regressão largamente usada na quantificação de tendências de recursos hídricos, uma vez que não exige distribuição normal e é pouco afetada por outliers. Foi usado o teste não paramétrico de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975) para avaliar a significância

estatística das tendências. O teste avalia mudanças monotônicas na série e também é pouco afetado por outliers. Avaliou-se para o nível de significância de 95%. Porém, a autocorrelação das séries não foi avaliada ou removida, portanto o erro tipo I do teste de Mann-Kendall pode ser maior que o estabelecido de 5% (Yue *et al*, 2002)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tendências na chuva e na vazão

A chuva média anual teve tendência positiva em grande parte do Sul do Brasil, principalmente no norte do Rio Grande do Sul (RS), em Santa Catarina (SC), e na bacia do rio Iguaçu (Figura 2a). Apesar de parte do estado do Paraná (PR) ter tido tendências positivas na chuva média entre 1940 e 2010 (Sun *et al*, 2012), entre 1975 e 2010 estas tendências foram negativas (figura 2a). Resultado semelhante foi encontrado em Rao *et al* (2016). Isto indica que, em comparação com o restante do século XX, nas últimas três décadas a tendência de chuva no PR foi revertida. No caso das vazões médias anuais, as tendências foram positivas na maior parte das bacias analisadas (Figura 2b). Os menores tributários seguiram tendência semelhante às encontradas para as grandes bacias.

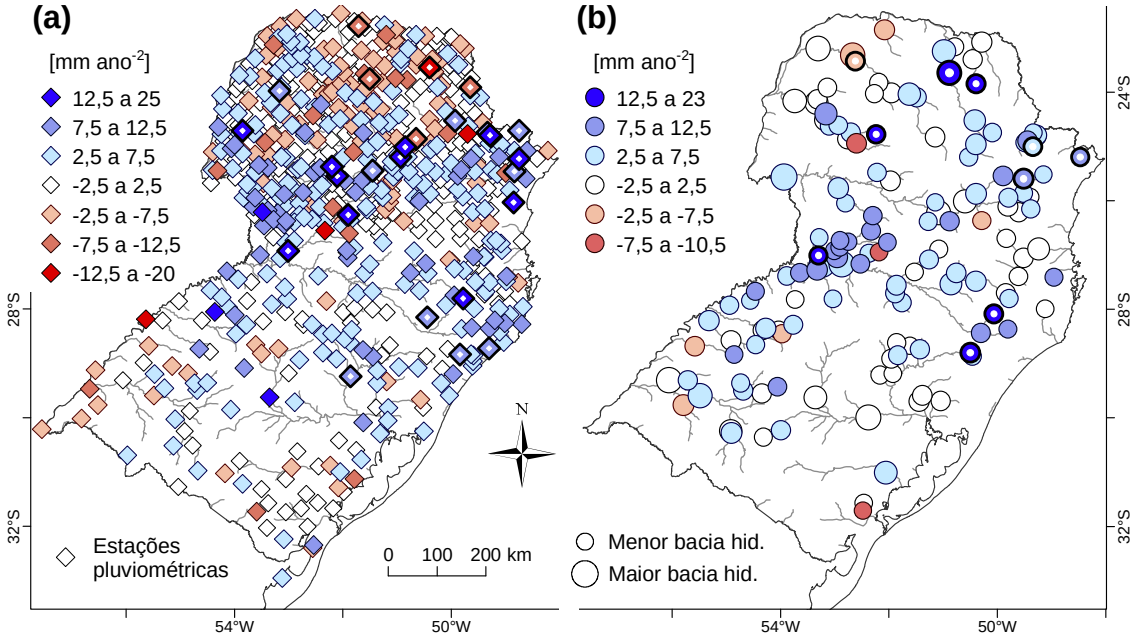

Figura 2 – (a) Tendência da chuva média anual. (b) Tendência da vazão média anual. O tamanho do círculo nas estações fluviométricas está relacionado ao tamanho da respectiva bacia hidrográfica. As estações de medição com borda negrita e com um símbolo branco no centro são significativas para o teste de Mann-Kendall, ao nível de significância de 95%.

A distribuição espacial das tendências da frequência de eventos extremos de chuva é muito semelhante ao das chuvas médias (Figura 3a). Em particular, a costa leste do PR, o sudoeste do PR, e a bacia do Iguaçu estiveram particularmente vulneráveis a maiores mudanças na frequência de extremos. Re e Barros (2009), apesar de ter analisado para o período de 1960 a 2000, também encontrou tendências positivas na maior parte do Sul do Brasil. No caso das vazões, as tendências na frequência anual de extremos também foram majoritariamente positivas (Figura 3b). Entretanto, nem todas as bacias tiveram tendências de mesmo sinal em todas as suas sub-bacias.

A duração média anual dos dias consecutivos sem chuva aumentou consideravelmente no norte do PR (Figura 3c). Mesmo no leste e no sudoeste do PR, onde as tendências da chuva média e

da frequência de extremos foram positivas, o período entre chuvas também aumentou. Portanto, as chuvas nestas regiões estão acumuladas em um menor período de tempo, sendo que sua intensidade média esteve se intensificando. Resultado semelhante foi encontrado por Haylock *et al* (2006), que apesar de ter analisado um período mais longo, também encontrou a intensificação da chuva no estado do PR. As tendências da duração das secas de vazão foram negativas principalmente em SC e no RS; e positivas principalmente no centro-norte do PR (Figura 3d). Algumas regiões tiveram tendências de secas de sinais opostos entre chuva e vazão, como é o caso da bacia do rio Iguaçu.

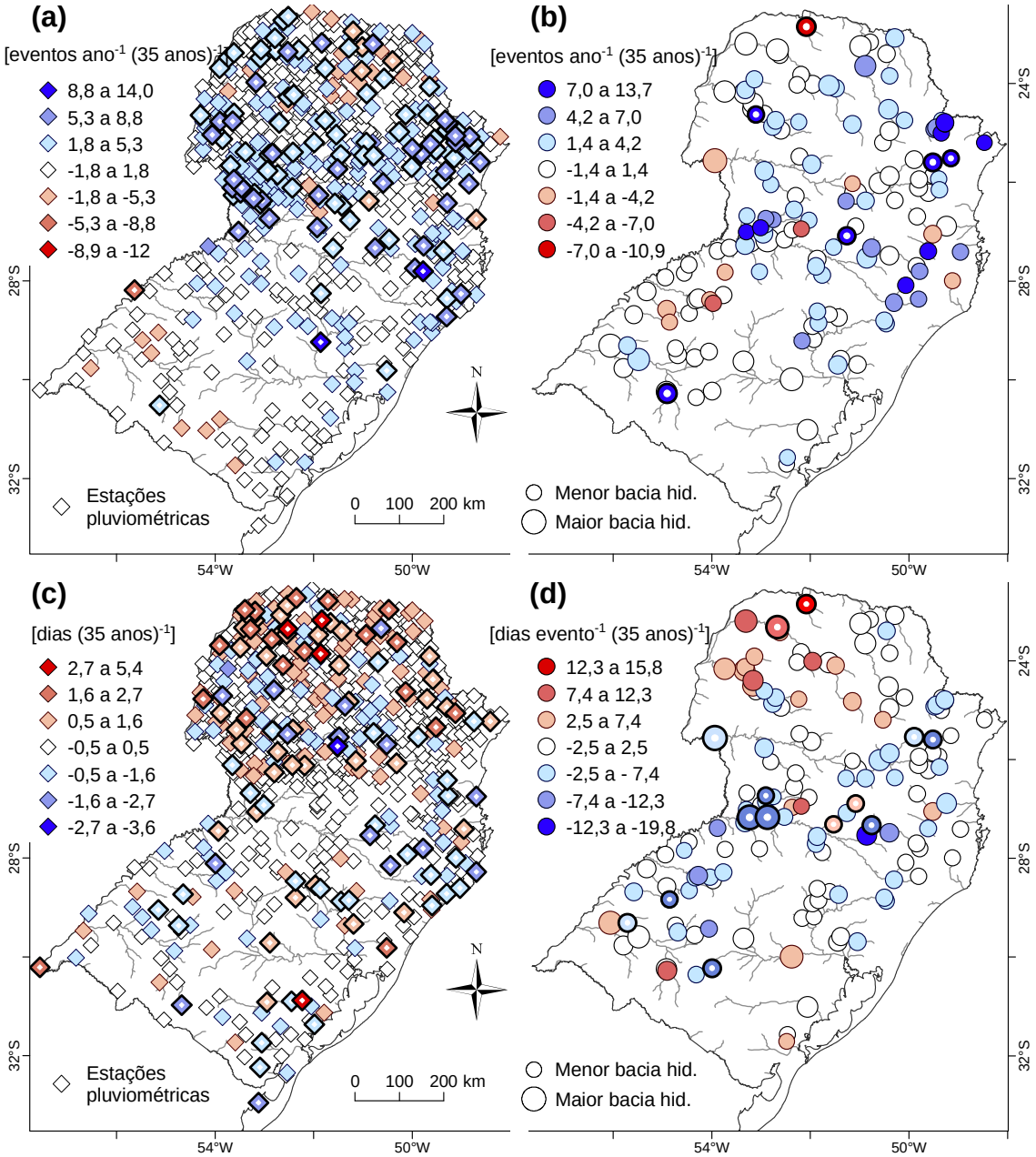

Figura 3 – Tendência na: frequência anual de eventos acima do percentil 90 de (a) chuva e (b) vazão; (c) duração média anual dos dias consecutivos sem chuva; e (d) duração média anual dos eventos abaixo do percentil 10. Dias com menos que 1 mm de medição foram considerados como dia sem chuva. As tendências estão acumuladas para os 35 anos analisados. Demais observações iguais aos da figura 2.

Relações entre as tendências na chuva e na vazão

A fim de melhor analisar a relação entre tendências de chuva e de vazão, para cada bacia hidrográfica foi calculada a média das tendências das estações pluviométricas situadas até 30 km de distância da bacia. Foi encontrado que os maiores aumentos na frequência de extremos de chuva são observados nas menores bacias hidrográficas (Figura 4a). Isso pode ocorrer porque quanto maior a área de uma bacia, menor é a homogeneidade regional das tendências de chuva. Uma relação semelhante pode ser observada no caso das vazões. Os maiores aumentos na frequência de vazões extremas ocorreram nas bacias com área menor que cerca de 6000 km² (Figura 4b). Isto gera a hipótese que as mudanças nos eventos extremos causam maiores impactos no regime de vazão de bacias menores que cerca de 6000 km². Além da homogeneidade regional das tendências de chuva, outro fator que contribui com esta hipótese é que os maiores impactos causados pelas mudanças de uso do solo ocorrem nas menores bacias hidrográficas (Blöschl *et al*, 2007).

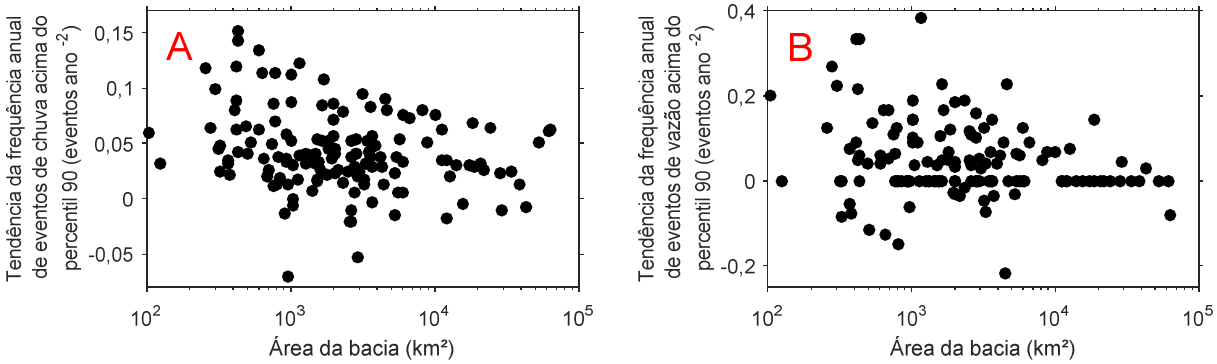

Figura 4 – Relação entre a área das bacias hidrográficas e as tendências da frequência anual de eventos acima do percentil 90 de (a) chuva e (b) vazão.

As tendências de chuva e vazão das bacias nem sempre têm o mesmo sinal (Figura 5a). Diversas bacias, distribuídas por todo o Sul do Brasil, tiveram um aumento na chuva média anual, mas uma redução na vazão média anual ou vice-versa (figura 5b). Estas bacias são não consistentes com a hipótese de que a maior causa das mudanças no regime de vazão são as mudanças na chuva. Portanto, as mudanças nas variáveis da precipitação nem sempre se traduzem de maneira linear em mudanças na vazão.

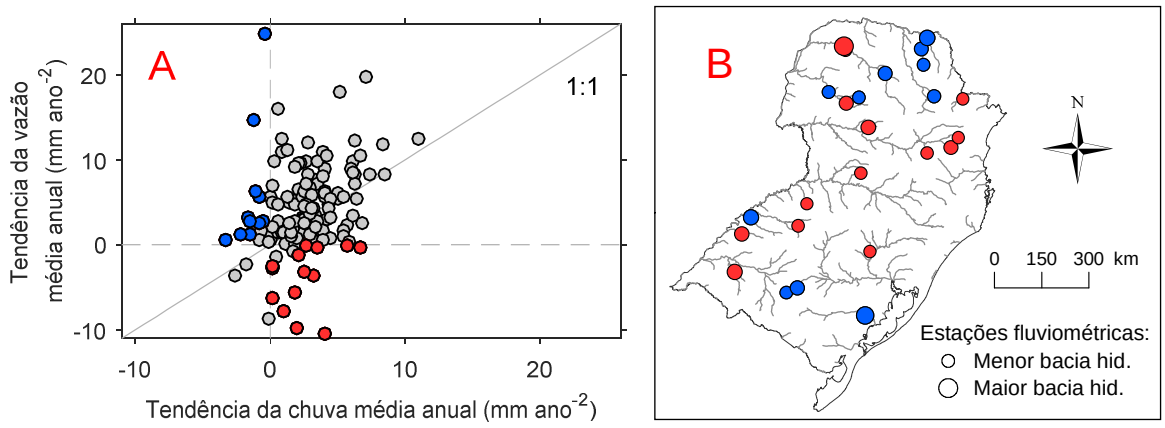

Figura 5 – (a) Relação entre tendências de chuva e vazão média anual de cada bacia hidrográfica. Os pontos ressaltados em vermelho e azul são as tendências de chuva e vazão de sinais opostos e com diferença entre elas de pelo menos 2,5 mm ano^{-2}, indicando bacias com evidência de não consistência. (b) Distribuição espacial das bacias ressaltadas em (a).

CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram quantificadas as tendências anuais na série temporal de 142 estações fluviométricas e 674 estações pluviométricas, no Sul do Brasil, entre os anos de 1975 e 2010. Buscou-se relações entre estas tendências, a fim de avaliar os possíveis impactos das mudanças nos regimes de chuvas nos regime de vazões. Três características das séries temporais foram avaliadas: (i) médias anuais, (ii) frequência de eventos extremos, e (iii) duração média das secas.

As tendências nas séries de chuva tiveram grande variabilidade regional. A chuva média anual aumentou na maior parte do Sul do Brasil, mas diminuiu no norte do estado do Paraná (PR) e no oeste do Rio Grande do Sul (RS). As regiões com substanciais aumentos na frequência anual de extremos de chuva foram Santa Catarina (SC), oeste do PR, e ao longo da bacia do Iguaçu. Apesar do PR ter tido os maiores aumentos na chuva anual e na frequência de extremos, teve também o maior aumento na duração média das secas. Isto indica que, principalmente na bacia do Iguaçu e no oeste do PR, as chuvas estão mais intensas e concentradas em um menor intervalo de tempo.

A vazão média anual aumentou na maior parte do Sul do Brasil, indicando uma maior disponibilidade hídrica. O aumento na frequência de extremos também foi observado em grande parte da região, em particular na bacia do Uruguai. A duração dos eventos de seca aumentou principalmente na bacia dos rios Piquiri e Ivaí, no centro-oeste do PR. Em todas as três características avaliadas nas séries de vazão, observou-se que diversos tributários das maiores bacias tiveram tendências de magnitude opostas. Isto indica que as tendências de vazão são espacialmente heterogêneas dentro de uma mesma bacia, ressaltando a necessidade de uma análise também de seus tributários.

As maiores tendências na frequência de extremos de chuva e de vazão foram encontradas em bacias com área menor que cerca de 6000 km². Portanto, estas podem ser as bacias mais vulneráveis às mudanças de eventos extremos. Adicionalmente, diversas bacias tiveram tendências de sinais opostas entre chuva e vazão. Isto ressalta que diversas bacias são inconsistentes com a hipótese de que a maior causa das mudanças no regime de vazão é causada por mudanças na chuva. Outras causas também podem estar levando às mudanças na vazão, como mudanças no uso do solo, estruturas hidráulicas, entre outros. Portanto, as mudanças no regime de precipitação não devem ser diretamente atribuídas na vazão.

AGRADECIMENTOS

V.B.P. Chagas 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. Disponível em: http://hidroweb.ana.gov.br. Acesso em 15 jul. 2017.

BLÖSCHL, G., ARDOIN-BARDIN, S., BONELL, M., DORNINGER, M., GOODRICH, D., GUTKNECHT, D., *et al*. (2007). At what scales do climate variability and land cover change impact on flooding and low flows? *Hydrological Processes*, *21*(9), pp. 1241-1247.

CHADWICK, R., GOOD, P., MARTIN, G., ROWELL, D. P. (2015). Large rainfall changes consistently projected over substantial areas of tropical land. *Nature Climate Change*, pp. 1–6.

DOYLE, M. E., BARROS, V. R. (2011). Attribution of the river flow growth in the Plata Basin. *International Journal of Climatology*, *31*(15), pp. 2234-2248.

HAYLOCK, M. R.; PETERSON, T. C.; ALVES, L. M. *et al*. (2006) Trends in Total and Extreme South American Rainfall in 1960-2000 and Links with Sea Surface Temperature. *Journal of Climate*, 19(8), pp. 1490-1512.

JACQUES-COPER, M., GARREAUD, R. D. (2015). Characterization of the 1970s climate shift in South America. *International journal of climatology*, *35*(8), pp. 2164-2179.

KAYANO, M. T., CAPISTRANO, V. B. (2014). How the Atlantic multidecadal oscillation (AMO) modifies the ENSO influence on the South American rainfall. *International Journal of Climatology*, *34*(1), pp. 162-178.

KENDALL, M. G. *Rank Correlation Methods.* 4 ed. London: Charles Griffin, 1975.

KUNDZEWICZ, Z. W., GERTEN, D. (2014) Grand Challenges Related to the Assessment of Climate Change Impacts on Freshwater Resources. *Journal of Hydrologic Engineering*, 20(1), pp. 1–10.

MALLAKPOUR, I., VILLARINI, G. (2015). The changing nature of flooding across the central United States. *Nature Climate Change*, *5*(3), pp. 250-254.

MANN, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, pp. 245-259.

PASQUINI, A. I., DEPETRIS, P. J. (2007). Discharge trends and flow dynamics of South American rivers draining the southern Atlantic seaboard: An overview. *Journal of Hydrology*, *333*(2), pp. 385-399.

RAO, V. B., FRANCHITO, S. H., SANTO, C. M., GAN, M. A. (2016). An update on the rainfall characteristics of Brazil: seasonal variations and trends in 1979–2011. *International Journal of Climatology*, *36*(1), pp. 291-302.

RE, M., BARROS, V. R. (2009). Extreme rainfalls in SE South America. *Climatic Change*, *96*(1), pp. 119-136.

SEN, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, *63*(324), pp. 1379-1389.

SUN, F., RODERICK, M. L., FARQUHAR, G. D. (2012). Changes in the variability of global land precipitation. *Geophysical Research Letters*, *39*(19).

USGS - U.S. GEOLOGICAL SURVEY. Shuttle Radar Topography Mission 1 Arc Second scene. Disponível em: http://earthexplorer.usgs.gov. Acesso em 10 out. 2015.

VICENTE-SERRANO, S. M., GONZÁLEZ-HIDALGO, J. C., DE LUIS, M., & RAVENTÓS, J. (2004). Drought patterns in the Mediterranean area: the Valencia region (eastern Spain). *Climate Research*, *26*(1), pp. 5-15.

YUE, S., PILON, P., PHINNEY, B., CAVADIAS, G. (2002). The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. *Hydrological Processes*, *16*(9), pp. 1807-1829.