

SAZONALIDADE DE VAZÕES MÁXIMAS NO SUL DO BRASIL

Daniel Bartiko^{1}; Debora Yumi de Oliveira¹; Gustavo Andrei Speckhann¹; Vinícius Bogo Portal Chagas¹; Nadia Bernardi Bonumá²; Pedro Luiz Borges Chaffe²*

Resumo - A avaliação das características de eventos fluviométricos extremos, como sua sazonalidade e tendência, é fundamental na gestão de recursos hídricos, na análise de riscos de cheias e no entendimento de como mudanças no clima podem alterá-los. Neste trabalho foi analisada a sazonalidade de eventos fluviométricos extremos no sul do Brasil, buscando identificar padrões espaciais e temporais para a mesma e possíveis fatores relacionados à sua ocorrência. Para isso, aplicaram-se técnicas de estatística direcional em séries históricas de vazão máxima diária anual e de vazão máxima média mensal referentes às estações fluviométricas localizadas na região de estudo. Foi identificada sazonalidade significativa em parte das séries, com a manifestação de dois padrões espaciais distintos: o primeiro refere-se à concentração de eventos extremos nos meses correspondentes ao inverno/primavera em maiores latitudes; o segundo refere-se à concentração de eventos extremos no verão, registrados principalmente no norte do Paraná. Na maior parte do estado do Paraná não foi observada sazonalidade significativa para os índices avaliados. Há semelhança entre as sazonalidades das vazões máximas e da precipitação média mensal em grande parte da região. Levanta-se a hipótese de que o processo de evapotranspiração influencia a sazonalidade de vazões na região sul do Brasil.

Palavras-Chave – cheias, padrão espacial, precipitação.

SEASONALITY OF MAXIMUM DISCHARGES IN SOUTHERN BRAZIL

Abstract - The evaluation of the fluvimetric extreme events characteristics, such as their seasonality and trend, is fundamental for water management, floods risk analysis and understanding how climate change can modify them. In this work it was analyzed the seasonality of extreme fluvimetric events in Southern Brazil, trying to identify spatial and temporal patterns and possible factors related to their occurrence. Directional statistics methods were applied to maximum daily annual discharge and monthly maximum average discharge time series corresponding to fluvimetric gauges located in study area. Significant seasonality was identified in part of the series, with two distinct spatial patterns: the first one refers to the concentration of extreme events in the months corresponding to winter/spring at higher latitudes; the second one refers to the concentration of extreme events in summer, registered mainly in the north of Parana. In most of the state of Parana, no significant seasonality was identified in the evaluated indices. There are similarities between seasonality of maximum discharge and monthly mean precipitation in most part of the region. It is hypothesized that the evapotranspiration process influences the seasonality of maximum discharges in Southern Brazil.

Keywords – floods, spatial pattern, precipitation.

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental – Universidade Federal de Santa Catarina: *danielbartiko@hotmail.com

² Docente do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – Universidade Federal de Santa Catarina

INTRODUÇÃO

Eventos fluviométricos extremos estão tornando-se mais frequentes e/ou intensos em decorrência de mudanças em processos relacionados à atmosfera, às bacias hidrográficas e ao sistema de drenagem (VIGLIONE *et al.*, 2016). Alguns desses eventos extremos são característicos de períodos específicos do ano e o estudo da sazonalidade dos mesmos pode auxiliar na busca do processo dominante para a sua geração (BEURTON; THIEKEN, 2009). Além disso, o entendimento da sazonalidade é peça fundamental para um grande número de aplicações na gestão de recursos hídricos e na avaliação de mudanças climáticas e de riscos de cheias (VILLARINI, 2016). Koutrolis, Tsanis e Dalliakopoulos (2010) destacam que entender ‘como’ e ‘quando’ eventos extremos ocorrem é fundamental na avaliação das consequências trazidas pelos mesmos.

A análise da sazonalidade a nível regional pode auxiliar na identificação de áreas com comportamento hidrológico semelhante e no entendimento das forçantes meteorológicas que são predominantes em cada região (KOUTROULIS; TSANIS; DALIAKOPOULOS, 2010). Análises deste tipo, que buscam encontrar algum padrão espacial e temporal na ocorrência de cheias tem sido feitas inclusive em escalas continentais, como por exemplo o trabalho de Mediero *et al.* (2015) na Europa e de Saharia *et al.* (2017) nos Estados Unidos. Mediero *et al.* (2015) estudaram a sazonalidade de vazões máximas de 102 séries fluviométricas de 25 países da Europa e encontraram períodos distintos de maior probabilidade de ocorrência de cheias. Essa sazonalidade pode ser atribuída a fenômenos distintos, como a presença de sistemas frontais e ciclones, o derretimento do gelo acumulado durante o inverno ou à combinação de fenômenos (MEDIERO *et al.*, 2015; VILLARINI *et al.*, 2011). Saharia *et al.* (2017) ao avaliar a sazonalidade dos eventos de cheias nos EUA concluíram que a sazonalidade varia de acordo com a região avaliada e é atribuída à diversidade dos mecanismos predominantes de geração de precipitação.

Existem fortes evidências de alterações nos regimes de precipitação e de vazão no sul do Brasil em decorrência de mudanças climáticas e/ou no uso e ocupação do solo (DETZEL; MINE, 2014; DOYLE; BARROS, 2011; GENTA; PEREZ-IRIBARREN; MECHOSO, 1998; MÜLLER; KRUGER; KRAVISKI, 1998; SAURRAL; BARROS; LETTENMAIER, 2008). O entendimento da sazonalidade dos eventos de cheia no sul do Brasil pode auxiliar na compreensão dos mecanismos dominantes de geração dos mesmos e ainda de como mudanças no clima podem alterar o regime de cheias e os efeitos que tais alterações podem trazer à sociedade. O objetivo deste trabalho foi analisar a sazonalidade de eventos de cheia no sul do Brasil. Foram analisadas as seguintes questões:

- i. Existe sazonalidade nos eventos de vazão máxima diária e de vazão máxima média mensal no sul do Brasil?
- ii. Há algum padrão espacial e/ou temporal destes eventos?
- iii. Quais são os possíveis fatores relacionados à sazonalidade de eventos fluviométricos extremos no sul do Brasil?

MATERIAL E MÉTODOS

Área de Estudo

Neste trabalho foram utilizadas séries históricas cujas estações fluviométricas estão localizadas na região sul do Brasil (Figura 1), a qual tem área total de 576.774 km². A precipitação anual nesta região varia entre 1200 e 1900 mm. O clima é caracterizado por elevado contraste nos regimes de precipitação e de temperatura (GRIMM, 2009).

Dados Fluviométricos

As séries históricas foram obtidas a partir do portal Hidroweb da Agência Nacional de Águas (ANA) – total de 765 séries – e do website do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) – total de 38 séries. As vazões correspondentes a ONS referem-se a vazões naturais. A vazão diária máxima de cada ano presente na série original e também a maior vazão média mensal de cada ano foi selecionada para a aplicação do modelo de identificação de sazonalidade. As séries fluviométricas originais referem-se ao máximo período disponível para cada estação, sendo que somente aquelas que apresentam no mínimo 30 anos de dados foram utilizadas, semelhante à metodologia adotada por Villarini (2016). Além do tamanho mínimo das séries históricas, também foi avaliada a presença de falhas nas mesmas utilizando a metodologia proposta por Papalexiou e Koutsoyiannis (2013), na qual é levantada a porcentagem de falhas registradas em cada um dos anos correspondentes aos 40% menores valores de vazão diária máxima anual. Se em qualquer um destes anos o percentual de falhas for igual ou superior a 30%, a série foi descartada. Ao total, 157 séries fluviométricas foram utilizadas.

Estatística Direcional

As análises de identificação da sazonalidade de vazões máximas referentes às estações fluviométricas do sul do Brasil foram feitas com o auxílio de estatística direcional, metodologia também adotada em outros estudos de sazonalidade (e.g. por VILLARINI, 2016; PARAJKA; 2010; KOUTROULIS; TSANI; DALIAKOPOULOS, 2010; BLACK e WERRITTY, 1997). Na estatística direcional, cada dia do ano é representado por um ponto em uma circunferência, para cada data de ocorrência de um evento extremo há um vetor de módulo igual ao raio da circunferência (com origem no seu centro) que tem direção proporcional à data de ocorrência do evento. O vetor resultante indica a data média de ocorrência do valor máximo de vazão (dada pela direção do vetor), enquanto que a variância das datas de ocorrência é dada pelo comprimento do vetor resultante (BEURTON; THIEKEN, 2009). Uma breve descrição da estatística direcional aplicada neste trabalho é dada abaixo, de acordo com Parajka *et al.* (2010).

A data de ocorrência D de um determinado evento no ano i é transformada em um ângulo θ , em coordenadas polares:

$$\theta = 2\pi D/365 \quad (1)$$

onde $D=1$ representa a data 1 de janeiro e $D=365$ a data 31 de dezembro. Na transformação do mês de ocorrência da máxima média mensal em um ângulo θ foi adotado valor de D correspondente ao 15º dia do mês em que foi registrado o valor máximo.

Para o cálculo do vetor resultante $\bar{\theta}$ é necessário calcular suas componentes \bar{x} e \bar{y} , dadas pela soma dos valores do seno e cosseno de cada ângulo θ , respectivamente:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \cos(\theta_i) / n \quad (2)$$

$$\bar{y} = \sum_{i=1}^n \text{sen}(\theta_i) / n \quad (3)$$

O vetor resultante $\bar{\theta}$ é:

$$\bar{\theta} = \tan^{-1}(\bar{y}/\bar{x}) \quad (4)$$

A variabilidade da data de ocorrência é caracterizada pelo parâmetro r , módulo do vetor resultante, dado por:

$$R = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2}/n \quad (5)$$

O valor de r varia de 0 (eventos extremos uniformemente distribuídos ao longo do ano) a 1 (todos os eventos extremos da referida estação ocorrem no mesmo dia).

Teste de Significância da Direção Média

Tendo-se obtido um conjunto de vetores a partir dos dados da data de ocorrência da vazão máxima anual, é necessário conhecer se os mesmos possuem uma direção predominante. Um teste estatístico que pode ser utilizado para este fim é o Rayleigh (MARDIA; JUPP, 1999). A hipótese nula (H_0) é que a distribuição dos valores dos ângulos dos vetores é uniforme e a hipótese alternativa (H_1) é que a distribuição é unimodal (VILLARINI, 2016). O teste avalia se o valor do módulo do vetor R , calculado na Equação 5, é maior que um valor limite para um dado nível de significância α , levando à rejeição ou não da hipótese nula de uniformidade. Neste trabalho foi adotado nível de significância $\alpha=0,05$.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1 estão representadas as estações fluviométricas cujas séries de vazão máxima diária anual atenderam aos critérios de tamanho mínimo e número máximo de falhas. Os pontos destacados referem-se às estações em que a sazonalidade é significativa. Pode ser constatado na Figura 1a, a qual representa a estação do ano para qual foi registrada maior ocorrência de vazões diárias extremas, que há dois padrões distintos. O primeiro refere-se à predominância de valores extremos no inverno e início da primavera, registrada em maiores latitudes (referentes aos estados de Santa Catarina e do Rio Grande do Sul). O segundo refere-se à ocorrência de tais eventos nos meses do verão, principalmente observada em menores latitudes (norte do Paraná).

O comportamento encontrado para a sazonalidade de vazões máximas diárias neste trabalho é coerente com aquele descrito por Grimm (2009) para a precipitação na região sul do Brasil. Segundo a autora, o regime de precipitação nesta região apresenta transição clara. No norte a estação chuvosa inicia-se na primavera e termina no início do outono, com grande diferença entre os valores precipitados quando comparados ao verão e ao inverno. No sul da região há distribuição aproximadamente uniforme da chuva ao longo do ano, com altura relativamente maior no inverno.

O fato da precipitação ser quase que uniformemente distribuída ao longo do ano na parte sul da área de estudo faz levantar a hipótese de que o regime fluviométrico não deveria apresentar sazonalidade nesta região. No entanto, deve-se considerar que no inverno (quando são registrados valores de precipitação ligeiramente maiores) também é a época do ano em que são observadas as menores temperaturas e que é justamente nesta região que se registra as maiores amplitudes térmicas quando comparados meses de verão com meses de inverno (GRIMM, 2009). Tal fato traz à tona a hipótese que o fenômeno de evapotranspiração (o qual apresenta menores taxas no inverno em decorrência da menor radiação solar incidente e menores temperaturas) exerce influência sobre a presença da sazonalidade fluviométrica identificada nesta região, ou ainda que precipitações decorrentes da presença de sistemas frontais (que possuem elevada duração) são aquelas que têm maior potencial para gerar cheias.

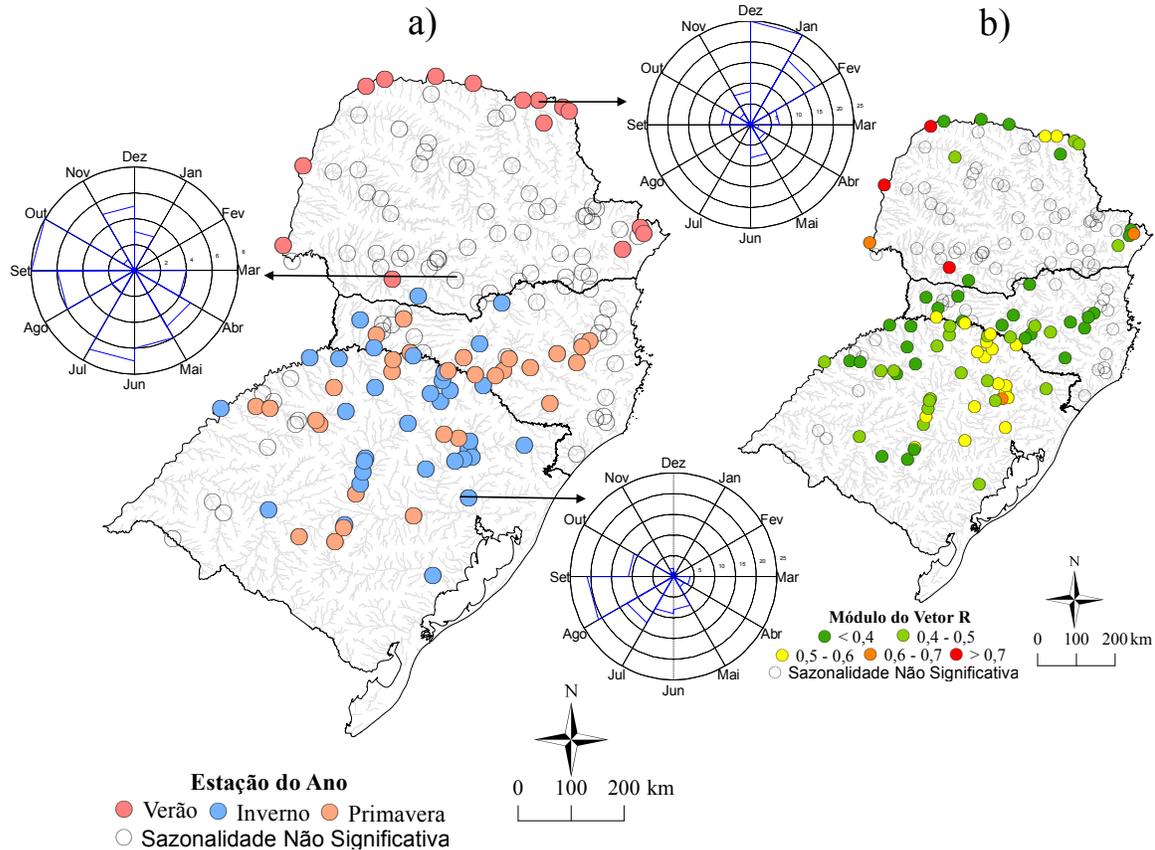


Figura 1 – Localização das estações fluviométricas cujas séries de vazão máxima diária anual foram utilizadas neste trabalho. O preenchimento sólido representa aquelas com sazonalidade significativa. a) Estação do ano em que é registrada maior ocorrência dos valores extremos. b) Magnitude da sazonalidade. Os três diagramas circulares representam a distribuição do mês de ocorrência da vazão máxima diária anual para as séries históricas correspondentes às aflúncias das usinas hidrelétricas de Castro Alves (inferior), Foz de Areia (esquerdo) e Canoas II (superior).

É possível identificar na Figura 1b que o módulo do vetor resultante, indicativo da magnitude da sazonalidade, é maior para estações localizadas no Rio Paraná, bacia que se estende muito além da região sul e que está sob um regime de precipitação muito mais complexo que o abordado neste trabalho. Das estações correspondentes às bacias localizadas exclusivamente ou em maior parte do sul do Brasil, pode observar-se que a magnitude da sazonalidade é maior na região centro-norte do Rio Grande do Sul. Na maior parte do Paraná não é observada sazonalidade significativa (com exceção do norte do estado, que possui um regime pluviométrico bastante peculiar em relação ao restante da região).

O Paraná possui registro de precipitação mais elevada nos meses da primavera e do verão. No entanto, tais valores não são tão distantes dos registrados no inverno (com exceção da parte norte do estado). A hipótese é que os maiores valores de precipitação registrados nos meses mais quentes acabam sendo contrabalanceados pelas maiores taxas de evapotranspiração comuns neste período, configuração que faz com que não seja registrada sazonalidade significativa em nenhuma época do ano.

Na Figura 1 também são ilustrados diagramas circulares que representam a distribuição da data de ocorrência da vazão máxima diária anual para as séries históricas correspondentes às aflúncias das usinas hidrelétricas de Castro Alves (lado inferior direito), Foz de Areia (lado esquerdo) e Canoas

II (lado superior direito). Pode ser visualmente constatada a sazonalidade dos eventos de vazão máxima diária anual para as séries de Castro Alves e Canoas II, que se concentram nos meses correspondentes ao inverno e verão, respectivamente. Também é possível verificar pelo diagrama correspondente à série de Foz de Areia que não há um período tão definido em que ocorrem as vazões máximas diárias.

Observa-se que há dois padrões distintos predominantes na sazonalidade de médias mensais (Figura 2a). O primeiro refere-se à ocorrência de valores máximos na primavera, registrada em maiores latitudes (referentes aos estados de Santa Catarina e do Rio Grande do Sul), com exceção do extremo leste do estado de Santa Catarina. Nessa região, próxima ao oceano Atlântico, da mesma forma que no norte do estado Paraná, identifica-se o segundo padrão, com a ocorrência predominante dos eventos de máximas médias mensais nos meses correspondentes ao verão.

De maneira geral, com exceção da parte leste do estado de Santa Catarina, o comportamento encontrado para a vazão média mensal é semelhante ao obtido para a vazão máxima anual, com os eventos levemente atrasados em relação ao mês de ocorrência da vazão máxima anual.

Em relação ao comportamento diferenciado na região leste de Santa Catarina, Grimm (2009) salienta que há significativa contribuição de efeito orográfico para a precipitação. Notadamente, a região em que foi identificada sazonalidade na vazão média no verão apresenta um elevado gradiente de altitude próximo à costa. Assim, a hipótese é que os processos convectivos intensificados durante os meses mais quentes do ano fazem com que maiores níveis de umidade encontrem a barreira topográfica, gerando maior precipitação e conseqüentemente maiores vazões médias. O fato da sazonalidade não ter sido registrada para a vazão máxima diária pode estar relacionada com a distribuição da chuva no tempo, como por exemplo, registro de precipitações em boa parte dos dias do verão (levando a valores médios elevados durante este período) mas sem a ocorrência de valores extremos de precipitação que tenham como resposta vazões extremas para o passo de tempo diário.

Embora os resultados obtidos neste trabalho tenham sido discutidos com base em dados de precipitação média mensal (o mais coerente para o caso da vazão máxima diária anual seria o uso também de dados de sazonalidade de precipitação máxima), acredita-se que este índice possa ser capaz de indicar o comportamento fluviométrico de uma bacia, uma vez que a característica da frequência de cheias é influenciada de duas maneiras, a primeira através das características dos eventos extremos de precipitação e segundo devido às características de precipitações regulares e da evapotranspiração, as quais afetam as condições antecedentes da bacia e sua resposta para eventos isolados (SIVAPALAN *et al.*, 2005).

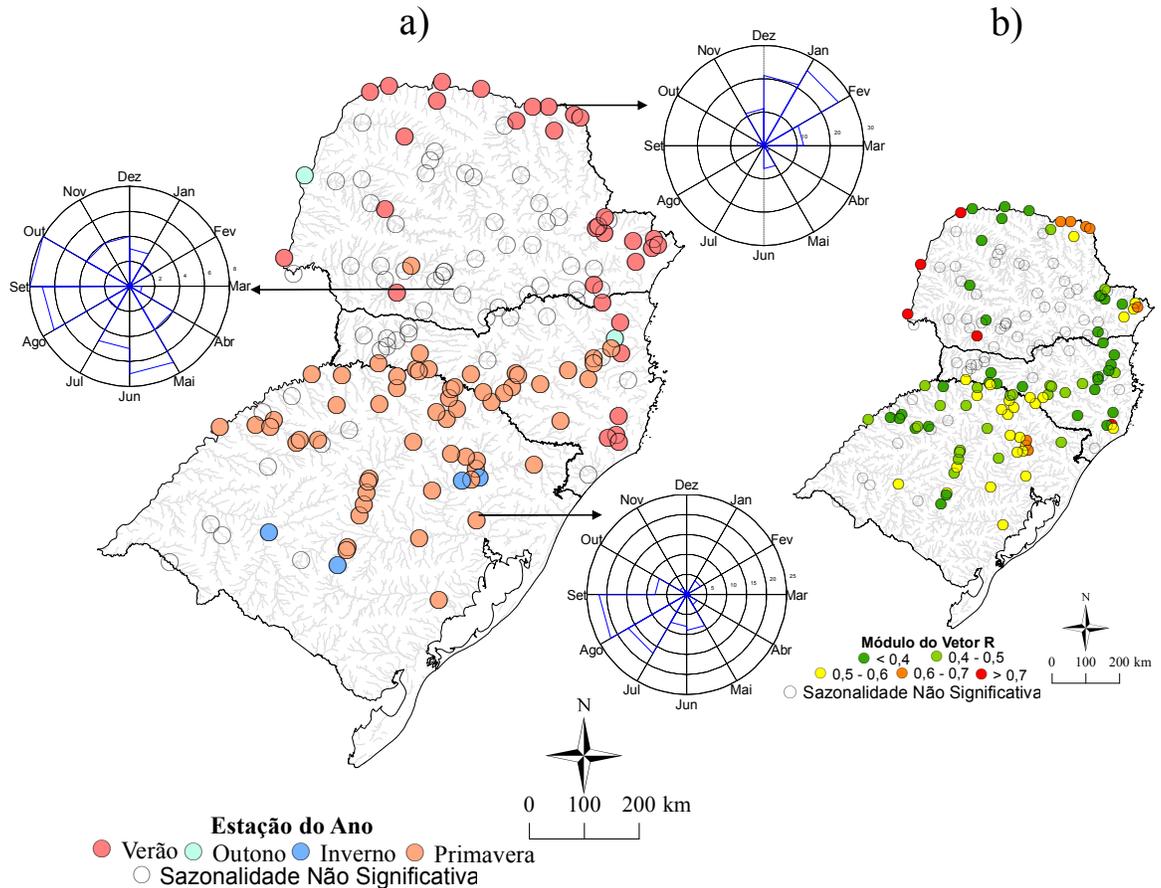


Figura 2 – Localização das estações fluviométricas cujas séries de vazão máxima média mensal foram utilizadas neste trabalho. O preenchimento sólido representa aquelas com sazonalidade significativa. a) Estação do ano em que é registrada maior ocorrência dos valores extremos. b) Magnitude da sazonalidade. Os três diagramas circulares representam a distribuição dos meses de ocorrência da maior vazão média mensal para as séries históricas correspondentes às afluentes das usinas hidrelétricas de Castro Alves (inferior), Itaipu (esquerdo) e Canoas II (superior).

CONCLUSÕES

Há sazonalidade significativa em parte das séries de vazão máxima diária anual e de vazão média mensal anual referente às estações fluviométricas localizadas no sul do Brasil. Dois padrões espaciais distintos se manifestam: o primeiro refere-se à concentração de eventos extremos nos meses correspondentes ao inverno/primavera em maiores latitudes; o segundo refere-se à concentração de eventos extremos no verão principalmente no norte do Paraná. Na maior parte do estado do Paraná não foi observada sazonalidade significativa para os índices avaliados. Há semelhança entre a sazonalidade das vazões máximas e da precipitação média mensal em grande parte da região. Levanta-se a hipótese de que o processo de evapotranspiração exerce influência sobre a presença de sazonalidade de vazões na região sul do Brasil.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsas de mestrado e doutorado aos autores.

REFERÊNCIAS

- BEURTON, S.; THIEKEN, A. H. Seasonality of floods in Germany. *Hydrological Sciences Journal*, 2009.
- BLACK, A.; WERRITTY, A. Seasonality of flooding: a case study of North Britain. *Journal of Hydrology*, v. 195, p. 1–25, 1997.
- DETZEL, D. H. M.; MINE, M. R. M. Trends in Hydrological Series: Methods and Application. *Iche 2014*, n. i, p. 765–772, 2014.
- DOYLE, M. E.; BARROS, V. R. Attribution of the river flow growth in the Plata Basin. *International Journal of Climatology*, v. 31, n. 15, p. 2234–2248, 2011.
- GENTA, J. L.; PEREZ-IRIBARREN, G.; MECHOSO, C. R. A Recent Increasing Trend in the Stream flow of Rivers in Southeastern South America. *Journal of Climate*, v. 11, p. 2858–2862, 1998.
- GRIMM, A. Clima da região sul do Brasil. In *Tempo e Clima no Brasil*. Org. por CAVALCANTI, I. F. DE A.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. A. J.; DIAS, M. A. F. DA S. São Paulo. Oficina de Textos, 2009.
- KOUTROULIS, A. G.; TSANIS, I. K.; DALIAKOPOULOS, I. N. Seasonality of floods and their hydrometeorologic characteristics in the island of Crete. *Journal of Hydrology*, 2010.
- MARDIA, K, V; JUPP, P. E. *Directional Statistics*. John Wiley & Sons, 1999.
- MEDIERO, L.; KJELDSSEN, T. R.; MACDONALD, N.; KOHNOVA, S.; MERZ, B.; VOROGUSHYN, S.; WILSON, D.; PERDIGÃO, R. A. P.; ROALD, L. A.; SALINAS, J. L.; TOUMAZIS, A. D.; LANG, M.; MADSEN, H.; ONUS, G. Identification of coherent flood regions across Europe by using the longest streamflow records. *Journal of Hydrology*, v. 528, p. 341–360, 2015.
- MÜLLER, I. I.; KRUGER, C. M.; KAVISKI, E. Análise de estacionariedade de séries hidrológicas na bacia incremental de Itaipu. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 3, n. 4, p. 51–71, 1998
- PAPALEXIOU, S. M.; KOUTSOYIANNIS, D. Battle of extreme value distributions : A global survey on extreme daily rainfall. *Water Resources Research*, v. 49, n. 1, p. 187–201, 2013.
- PARAJKA, J.; KOHNOVÁ, S.; BÁLINT, G.; BARBUC, M.; BORGA, M.; CLAPS, P.; CHEVAL, S.; DUMITRESCU, A. Seasonal characteristics of flood regimes across the Alpine – Carpathian range. *Journal of Hydrology*. v. 394, p. 78–89, 2010.
- SAHARIA, M.; KIRSTETTER, P.; VERGARA, H.; GOURLEY, J. J. Characterization of floods in the United States. *Journal of Hydrology*, v. 548, p. 524–535, 2017.
- SAURRAL, R. I.; BARROS, V. R.; LETTENMAIER, D. P. Land use impact on the Uruguay River discharge. *Geophysical Research Letters*, v. 35, n. 12, 2008.
- SIVAPALAN, M.; BLO, G.; MERZ, R.; GUTKNECHT, D. Linking flood frequency to long-term water balance : Incorporating effects of seasonality. *Water Resources Research*, v. 41, p. 1–17, 2005.
- VILLARINI, G. On the seasonality of flooding across the continental United States. *Advances in Water Resources*, v. 87, p. 80–91, 2016.
- VILLARINI, G.; SMITH, J. A.; SERINALDI, F.; NTELEKOS, A. A. Analyses of seasonal and annual maximum daily discharge records for central Europe. *Journal of Hydrology*, v. 399, n. 3–4, p. 299–312, 2011.