

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

ANÁLISE DE TENDÊNCIAS DE VAZÕES EM RESERVATÓRIOS DE USINAS HIDRELÉTRICAS NO BRASIL

Júlia Mella Massing¹; Daniel Bartiko²; Vinícius Bogo Portal Chagas³ & Pedro Luiz Borges Chaffe⁴

RESUMO – Reservatórios são de extrema importância para a produção de energia elétrica no Brasil. O país possui um sistema composto de 159 usinas que têm cerca de 74 GW de capacidade instalada, 71% da energia consumida no país (ANEEL, 2008). O objetivo deste trabalho foi avaliar as tendências nas séries de vazões afluentes, vazões defluentes e geração elétrica de reservatórios de hidrelétricas brasileiras. Foram analisadas séries históricas de vazões afluentes, vazões defluentes e geração de energia de 62 reservatórios do período de 1999 até 2018 disponíveis pelo site do ONS. Utilizou-se os testes de Mann-Kendall e Theil-Sen para verificar a existência de tendências de diminuição ou aumento para vazões máximas, médias e mínimas anuais, bem como para quantificar sua magnitude. Foram identificadas duas regiões distintas no Brasil em relação ao tipo de tendência predominante, uma abrangendo o Nordeste e pequena parte do Sudeste, que consta uma diminuição das vazões, e outra abrangendo o Sul, Sudeste e parte do Centro Oeste, que apresenta um aumento nas vazões. Quando comparadas as magnitudes de entrada e saída dos reservatórios percebe-se uma maior diferença para máximas e mínimas do que para vazões médias.

ABSTRACT – Reservoirs are of extreme importance for the production of electricity in Brazil. The Brazilian hydroelectric system is composed of 159 power plants that have about 74 GW of installed capacity, 71% of the energy consumed in the country (ANEEL, 2008). The objective of this paper was to analyze trends in the streamflow and hydropower generation in the Brazilian hydropower plants. We analyzed inflow and outflow data of 62 reservoirs from the period of 1999 to 2018, available through the ONS website. Mann-Kendall and Theil-Sen tests were used to verify the existence of trends for maximum, average and minimum annual flows, as well as to quantify their magnitude. Two distinct regions were identified in Brazil in relation to the predominant trend type, one covering the Northeast and some part of the Southeast, which includes a decrease in streamflow, and another one covering the South, Southeast and part of the Midwest, which shows an increase in streamflow. When comparing the input and output magnitudes of the reservoirs, a greater difference is observed for maximum and minimum than for average flows.

Palavras-Chave – Reservatórios, tendências, energia elétrica

1) Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, E-mail: juliamassing@gmail.com

2) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental - PPGEA, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, danielbartiko@hotmail.com

3) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental - PPGEA, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, vbchagas@gmail.com

4) Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, pedro.chaffe@ufsc.br

INTRODUÇÃO

Reservatórios são construídos para inúmeras finalidades, desde a geração de energia e combate a secas até para fins recreativos. O Brasil, devido ao seu elevado potencial hídrico, conta com 71% da produção elétrica proveniente de centrais hidrelétricas atualmente em operação, com uma capacidade instalada de cerca de 74 GW (ANEEL, 2008). Ainda, existem cerca de 21 empreendimentos sendo construídos e 15 outorgados que não iniciaram sua construção e juntos possuem uma potência de 13 GW. Devido a importância econômica e aos possíveis impactos ambientais, o estudo dos reservatórios tem merecido cada vez mais destaque no Brasil (Melo *et al.*, 2016). Ainda, 42% do potencial hidrelétrico está contido na bacia do rio Amazonas (ANEEL, 2008).

A sustentabilidade dos reservatórios e os possíveis impactos dos mesmos estão diretamente ligados com a operação e também com controles climáticos (e.g regime de chuvas). Há um sinal de mudança no regime de precipitação brasileiro, encontrando-se um aumento da chuvas no Norte, uma diminuição no Sudeste e no Sul, a parte oeste está aumentando a precipitação e a parte leste está diminuindo (Rao *et al.*, 2016). Portanto, é esperada uma mudança nas vazões e, conseqüentemente, uma alteração na dinâmica dos inúmeros setores que dependem de reservatórios, como o hidrelétrico e o agrícola. Se considerarmos o cenário previsto de escassez de recursos hídricos para os próximos anos (Postel, 2000) faz-se necessário a avaliação do regime de vazão afluente aos reservatórios assim como os possíveis impactos dos mesmos na vazão defluente.

O objetivo deste trabalho foi avaliar as tendências nas séries de vazões afluentes, vazões defluentes e geração elétrica de reservatórios de hidrelétricas brasileiras. Foram analisados valores de mínimos, médios e máximos destas séries. Verificou-se a existência de tendências significativas dentre as séries de dados de vazões e de geração, bem como a magnitude e padrões espaciais das mesmas em cada região do país.

MATERIAIS E MÉTODOS

Dados

Para este trabalho foram selecionados dados de 62 reservatórios de todas as regiões brasileiras (Figura 1), retirando estas informações do site do Operador Nacional do Sistema Hidrelétrico (ONS, 2019) de séries que variam de um período de 1999 até 2018, aproximadamente, com variações entre elas. Assim, estes consistem em dados de vazões afluentes ao reservatório (m^3/s), defluentes ao reservatório (m^3/s) e dados de geração elétrica (MWh), como pode ser visto esquematizado na Figura

2. Foram excluídos da análise reservatórios que continham possíveis erros ou incertezas na série de dados, os quais não puderam ser justificados com clareza por falta de maiores informações. Séries que se iniciam após 2005 também foram removidas por serem consideradas demasiadamente curtas para as análises estatísticas propostas, pois para o teste de Mann-Kendall o ideal seriam dados com pelo menos 30 anos. Como não há registros de séries históricas antes de 1999 foi estabelecido um período mínimo de 14 anos. Foram analisadas tendências para vazões afluentes, vazões defluentes e geração com valores máximos anuais, médios anuais e mínimos médios de 7 dias.

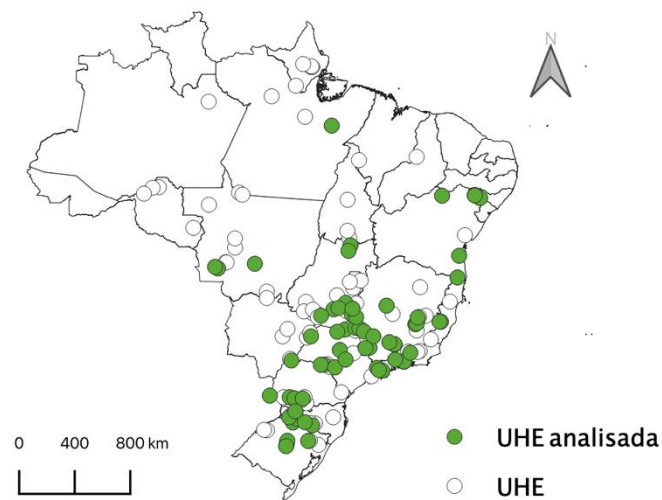


Figura 1 - Figura de localização das UHEs, onde os círculos simbolizam os reservatórios com informações disponíveis no site da ONS e em verde as usinas escolhidas para este trabalho com base nos critérios de seleção apresentados.

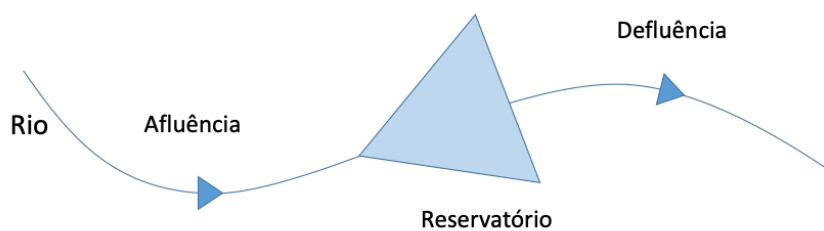


Figura 2 – Figura esquemática do funcionamento de um reservatório, onde as flechas menores indicam o sentido do escoamento do rio e o triângulo maior indica o reservatório.

Teste de Mann-Kendall

O teste de Mann-Kendall (Kendall, 1975; Mann, 1945) é amplamente utilizada para avaliar a presença de tendências estatisticamente significativas em séries de dados. Por ser uma análise não paramétrica não necessita de uma distribuição normal dos dados, ou seja, este teste se apresenta extremamente versátil. Aplicando-o, podemos calcular a variável estatística S da seguinte maneira:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(x_j - x_i) \quad (1)$$

Onde x_i e x_j são os parâmetros observados, n o número de observações

$$\text{sgn}(X) = \begin{cases} 1, & \text{se } X > 0 \\ 0, & \text{se } X = 0 \\ -1, & \text{se } X < 0 \end{cases} \quad (2)$$

A variância pode ser obtida através da Equação 3, onde t_i simboliza o número de repetições de extensão n .

$$\sigma = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \quad (3)$$

Assim, com o cálculo da variável Z , podemos obter a informação se a tendência segue um padrão crescente ou decrescente através da Equação 4.

$$Z = \begin{cases} \left(\frac{S-1}{\sqrt{\sigma}}\right), & \text{se } S > 0 \\ 0, & \text{se } S = 0 \\ \left(\frac{S+1}{\sqrt{\sigma}}\right), & \text{se } S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

O teste consiste em rejeitar a hipótese não nula (H_0), comparando com um nível de significância adotado (α), o qual representa a probabilidade de erro ao se rejeitar H_0 se este for verdadeiro. Para este caso foi escolhido um $\alpha = 0,05$.

Estimador de declividade

Tendo em vista a facilitação da análise e maior precisão, foi utilizado o método de Theil-Sen (Sen, 1968; Theil, 1950) quantificar a magnitude. Aplicando-se esta ferramenta é obtida uma

declividade, servindo como quantificação da magnitude, como mostra a Eq. 5. Para todo um $i < j < n$, onde n representa o número de anos e i e j os anos considerados consecutivos.

$$\beta = \text{mediana} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right) \quad (5)$$

Além disso, foi utilizada a mediana dos valores máximos, médios e mínimos anuais para calcular a magnitude em porcentagem de cada reservatório para uma melhor análise da tendência, visto que estes são de diferentes capacidades e tamanhos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tendências nas Vazões

Podem ser vistas claramente duas regiões distintas na Figura 3, uma que abrange o Sul e certa parte do Sudoeste do Centro-oeste em cores frias, com tendências predominantemente positivas; já outra que abrange Nordeste e Sudeste em cores quentes, com tendências predominantemente negativas. No entanto, muitas usinas do Nordeste e Norte foram excluídas devido aos critérios de seleção de dados, o que impede uma melhor análise de como estariam se comportando os reservatórios dessas regiões. É importante destacar usinas onde a vazão de entrada diminui em todos os casos, o que pode indicar problemas de níveis d'água muito baixos no futuro, fator prejudicial às suas atividades. Ainda para a Figura 3, valores positivos são um indicativo de que o reservatório está contribuindo para o aumento da tendência da vazão defluente, e valores negativos indicam que há contribuição do reservatório para a diminuição da tendência de vazão defluente. O efeito do reservatório é nulo caso não haja grande diferença.

De acordo com Gudmundsson *et al* (2019), há uma grande predisposição à redução de vazões máximas no Nordeste e Sudeste do Brasil nos últimos 40 anos, o que justifica a grande quantidade de tendências negativas nesta região e afeta claramente na geração de energia, que também está diminuindo seus níveis médios e principalmente mínimos. Apesar disso, seriam necessárias pesquisas mais a fundo e a possibilidade da inclusão de mais dados de outras hidrelétricas da região para conclusões mais concretas.

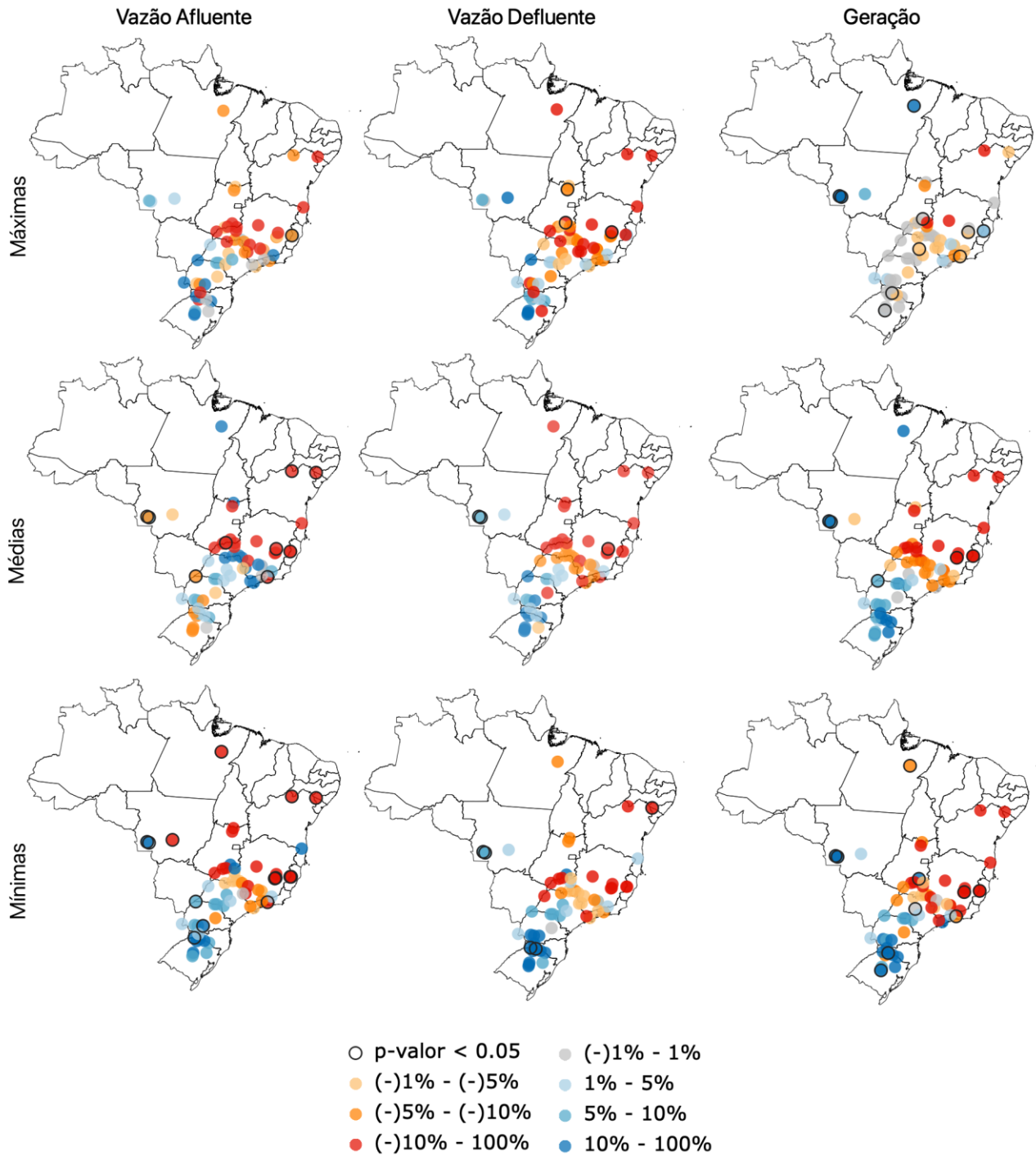


Figura 3 – Tendências na magnitude de vazões máximas, médias e mínimas anuais para as vazões afluyente, defluente e geração de energia, utilizando Theil-Sen. Juntamente, está representado o teste de Mann-Kendall para os reservatórios os quais sua série de dados possui p-valor significativos (menor do que 0,05) com a borda destacada em preto.

De acordo com a Figura 4, vazões médias não sofrem muitos impactos e tendem a permanecer numa pequena faixa de variação (de 0 a 5% de aumento ou diminuição). Diferentemente, as máximas e as mínimas estão sofrendo maiores distúrbios. Caso a magnitude da vazão afluyente seja maior que a defluyente o valor de porcentagem será positivo, caso contrário, negativo. Assim, observa-se que a vazão defluyente para máximas aumenta nas regiões Sul e Sudeste, principalmente nas bacias do Uruguai e Iguaçu, indicando uma absorção da vazão de cheia pelo reservatório.

Já para as vazões mínimas, a maior parte dos reservatórios possuem tendências maiores para a vazão afluyente, um indicativo de que a água está sendo retida pelo reservatório. Em outras palavras, esta vazão está sendo utilizada para a regularização do próprio reservatório, sendo liberada de acordo com a necessidade de geração de energia ou como um meio de controlar os níveis de água.

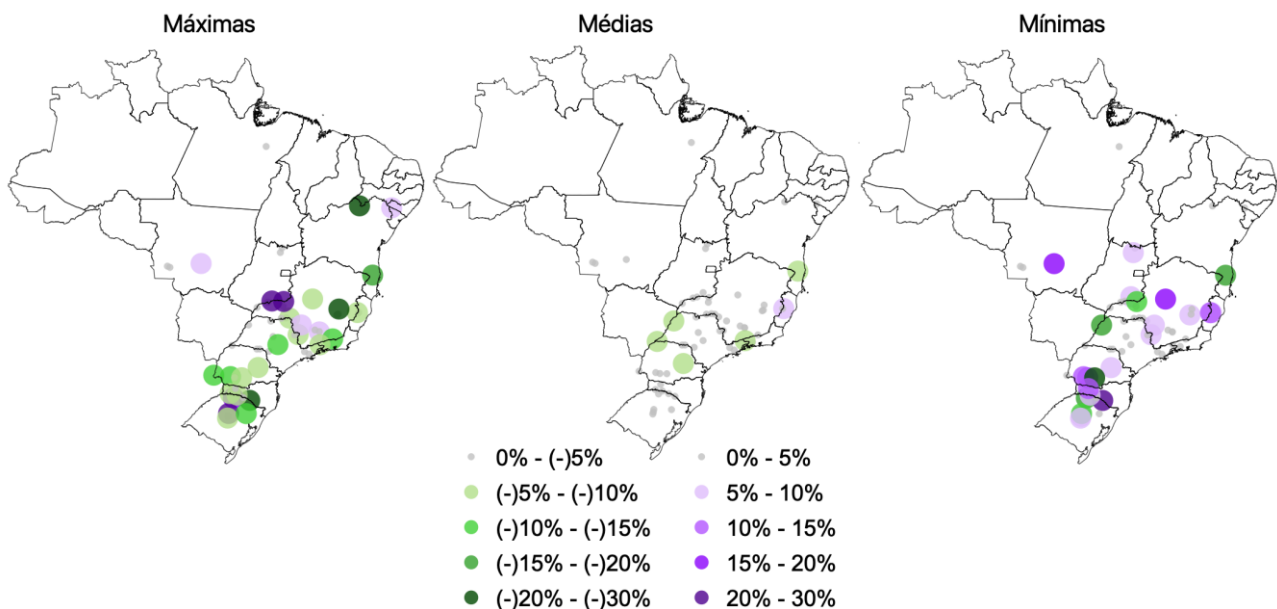


Figura 4 – Diferença nas magnitudes encontradas com Theil-Sen da vazão defluyente menos a vazão afluyente, em porcentagem, sendo em tons de verde para resultados negativos, onde a vazão defluyente é maior e tons de roxo para resultados positivos, onde a vazão afluyente é maior.

A Figura 5 apresenta a distribuição das regiões no quesito quantidade de reservatórios, um fator que nos auxilia a confirmar o que está acontecendo com a respectiva região, cada quadrado na sua posição representando um aproveitamento hidroelétrico. Predominantemente, vazões afluentes estão aumentando na região Sul e diminuindo na região Sudeste. Para os casos de diminuição-aumento ou vice-versa, há a influência do reservatório na regularização da vazão.

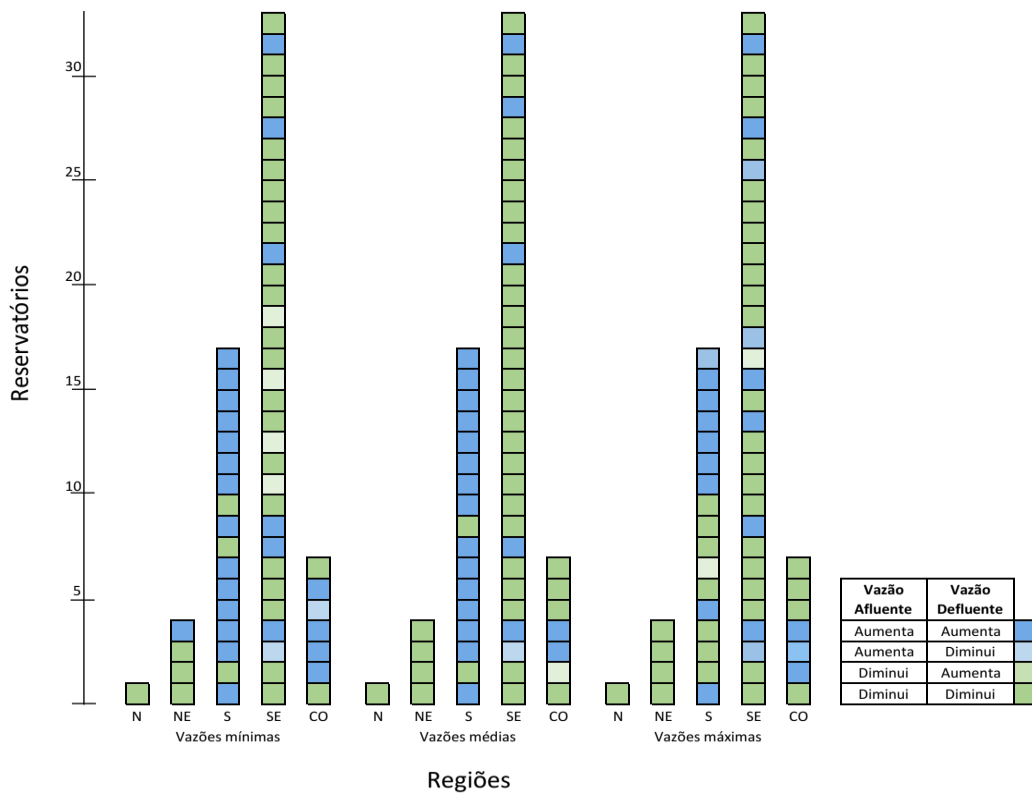


Figura 5 – Figura demonstrando a avaliação das vazões de entrada e saída dos reservatórios em estudo por região. Cada quadrado está representando uma UHE na sua respectiva região. Para cada vazão, a posição do quadrado representa uma mesma usina para cada vazão (mínima, média ou máxima).

Tendências na Geração

Quando chegamos ao quesito tendências na geração de energia, é válido lembrar as mudanças que podem ser feitas ao longo do tempo nas usinas hidrelétricas, como a instalação de novas turbinas e a inativação de outras. Portanto, é natural que varie durante o tempo. Apesar disso, as variações na geração consequentemente acompanham a quantidade e o nível d'água disponível no reservatório, possuindo tendências parecidas para mínimas e médias anuais. Já para máximas, muitas mantêm o mesmo índice durante o tempo, principalmente na região Nordeste. Portanto a diminuição das vazões nesta região não está necessariamente afetando a geração, o que pode mudar em alguns anos caso o nível nos reservatórios diminua como vemos na tendência de alguns. É possível que as vazões mínimas estejam sendo reduzidas a jusante para que se possa manter um nível de geração elétrica, enquanto a vazão a montante está elevada.

CONCLUSÕES

Existem tendências significativas dentre os reservatórios analisados, com uma separação do território em duas regiões distintas, o que reforça um aumento das vazões ao Sul e Sudeste do Brasil, enquanto no Norte e Nordeste e parte do Centro Oeste há uma diminuição geral de todas as vazões. Entretanto, para estas últimas três regiões não há dados suficientes de reservatórios para uma melhor análise do que está ocorrendo de fato. Foi possível identificar uma grande diferença entre as magnitudes de vazões afluente e defluente para vazões máximas e mínimas, porém para vazões médias não houve grande diferença. Na região Sul e Sudeste vazões defluentes máximas estão aumentando de magnitude, já as mínimas estão diminuindo e as afluentes mínimas aumentam. As vazões médias não possuem diferença entre magnitudes muito alta, e grande parte fica na faixa do 0% a 5%. A influência dos reservatórios para as vazões se mostra mais clara quando avaliado-se que a saída aumenta para vazões máximas e a entrada diminui para vazões mínimas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsas aos autores.

REFERÊNCIAS

ANEEL. **Brasília, 2008**. [s.l.: s.n.].

GUDMUNDSSON, LUKAS; LEONARD, MICHAEL; DO, HONG X.; WESTRA, SETH;
SENEVIRATNE, Sonia I. Observed Trends in Global Indicators of Mean and Extreme Streamflow. [s. l.], v. 46, n. 2, 2019.

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

MANN, H. B. Nonparametric tests against trend. **Econometrica: Journal of the Econometric Society**, [s. l.], p. 245–259, 1945.

MELO, Davi de C. D. et al. Reservoir storage and hydrologic responses to droughts in the Paraná River basin, south-eastern Brazil. [s. l.], p. 16, 2016.

ONS. **Histórico da Operação**. 2019. Disponível em: <<http://ons.org.br/paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao>>. Acesso em: 1 out. 2019.

POSTEL, Sandra L. Entering an Era Of Water Scarcity: The Challenges Ahead. [s. l.], v. 10, n. August, p. 941–948, 2000.

RAO, V. Brahmananda et al. An update on the rainfall characteristics of Brazil: Seasonal variations and trends in 1979-2011. **International Journal of Climatology**, [s. l.], v. 36, n. 1, p. 291–302, 2016.

SEN, P. K. Estimates of the regression coefficients based on Kendall's tau. **Journal of American Statistical Association**, [s. l.], v. 63, p. 1379–1389, 1968.

THEIL, H. A rank-invariant method of linear and polynomial analysis, part 3. **Nederlandse Akademie van Wetenschappen Proceedings**, [s. l.], v. 53, p. 1397–1412, 1950.