

## XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

### **PREVISÃO HIDROLOGICA SUB SAZONAL PARA A BARRAGEM DE ITAPÚ, BRASIL.**

*Erik Schmitt Quedi<sup>1</sup> ; Fernando Mainardi Fan<sup>1</sup>*

**RESUMO** – O horizonte de previsão sub sazonal, com prazos de antecedência de até 7 semanas, dá origem a muitas oportunidades de pesquisa e aplicações operacionais. Este trabalho é uma das primeiras avaliações de previsões meteorológicas sub sazonais por conjunto, aplicadas para modelagem hidrológica de grandes bacias em clima tropical na América do Sul - onde se poderia potencialmente explorar as previsões para fins de geração de energia hidrelétrica. Os dados de previsão quantitativa de precipitação (em inglês, QPF) foram fornecidos pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (em inglês, ECMWF), dentro do contexto do projeto *sub sazonal-to-sazonal* (S2S). Para avaliar a qualidade das previsões, foram realizadas avaliações estatísticas, incluindo uma comparação com a tradicional técnica *Extended Streamflow Prediction* (ESP). Os resultados permitiram uma estimativa das magnitudes de erros e potencial benefício das previsões por conjunto sobre a previsão determinística de referência, bem como sobre a abordagem ESP.

**Palavras-Chave** – Previsão Sub Sazonal, Subseasonal-to-Seasonal, MGB-IPH.

### **SUB SEASONAL HYDROLOGICAL FORECASTING FOR ITAIPÚ DAM IN PARANÁ RIVER BASIN, SOUTHERN BRAZIL**

**ABSTRACT**– The sub seasonal forecast horizon, with lead-times up to 7 weeks, gives rise to many opportunities for research and operational applications. This work is one of the first assessments of ensemble sub seasonal meteorological inputs to large-scale basin hydrological modelling within a tropical climate in South America – where one could potentially explore the forecasts for hydropower generation purposes. The quantitative precipitation forecast (QPF) data were provided by the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), within the sub seasonal-to-seasonal (S2S) project’s context. To assess the quality of the forecasts, a statistical evaluation was performed, including a comparison with the traditional extended streamflow prediction (ESP) technique. Results allowed for an estimation of the error magnitudes and the potential to the benefit of the ensemble over the deterministic reference forecast and the ESP approach.

**Keywords** – Sub Seasonal Forecasting, Subseasonal-to-Seasonal, MGB-IPH.

### **INTRODUÇÃO**

As previsões quantitativas de precipitação (em inglês, *Quantitative Precipitation Forecasts*, ou QPF), oriundas de modelos numéricos do tempo (MNT), vem sendo utilizada como informação de entrada à modelagem hidrológica, especialmente para aplicações objetivando a estimativa futura de vazões em cursos d’água (Fan *et al.*, 2014; Fan *et al.*, 2015; Schwanenberg *et al.*, 2015; Fan *et al.*, 2016). A técnica de previsão por conjunto (*ensembles*) garante uma abordagem probabilística à previsão, permitindo a representação de incertezas dos resultados, a partir da avaliação da distribuição

1) Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 950. erik.quedi@gmail.com

de probabilidades entre os membros do conjunto (Krzysztofowicz, 2001; Schaake *et al.*, 2007; Bauer *et al.*, 2015).

Recentemente, a comunidade científica está incentivando, a pesquisa e aplicações, de previsões feitas para prazos de antecedência máximo entre 3 até 7 semanas, inseridas no horizonte sub sazonal. Este horizonte é frequentemente considerado impraticável, devido ao seu alto grau de incertezas e baixa predictabilidade atmosférica e hidrológica – uma vez que seu prazo de antecedência é mais longo que a previsão de curto-prazo ou do tempo (natureza determinística) e mais curto que a previsão de longo-prazo ou sazonal (natureza probabilística) (Vitart e Robertson, 2018). Todavia, a previsão hidrológica sub sazonal apresenta-se como uma ferramenta para o auxílio em tomadas de decisão em diversos setores socio-econômicos, públicos e privados, como na gestão e gerenciamento de recursos hídricos, abastecimento urbano e sistemas de alertas antecipados para secas e cheias; otimização da geração de energia elétrica e navegação fluvial (White *et al.*, 2017).

A modelagem de vazões futuras, associadas a conjuntos (*ensembles*) de QPF, dá origem ao sistema de previsão hidrológica por conjunto (ou *Hydrologic Ensemble Prediction System*, H-EPS). Estes sistemas apresentam potencialmente maior qualidade nas previsões, assim como menor inconsistência estatística, do que previsões hidrológicas determinísticas (Cloke e Pappenberger, 2009). Um H-EPS sub sazonal pode trazer benefícios potenciais, especialmente para o setor hidroelétrico, onde as previsões de vazões podem ser aplicadas para o planejamento e ajustes necessários entre o longo-prazo e o curto-prazo, à medida que novas informações são geradas, por exemplo, estimativas de volumes em reservatórios e períodos de seca ou chuvosos.

É neste contexto que este artigo traz luz a previsão em horizonte sub sazonal, utilizando como ferramenta a modelagem hidrológica. Enfatiza-se a potencialidade destas previsões, especialmente para o setor hidroelétrico, a partir de avaliações estatísticas tipicamente aplicadas a previsão por conjunto.

## ÁREA DE ESTUDO

A Bacia do Rio Paraná (BRP), abrange áreas do território brasileiro desde regiões do Centro-Sul do País até a barragem da usina hidroelétrica binacional de Itaipú (confluência do Rio Paraná com o Rio Iguaçu), ilustrado na figura 1. A BRP é um dos sistemas hidráulicos mais importantes da América do Sul, responsável por mais de 50% da produção hidroelétrica do Brasil (Adam *et al.*, 2015). A usina hidroelétrica Itaipú é uma usina binacional, cujos países Brasil e Paraguai compartilham a produção de energia elétrica, possuindo uma capacidade instalada de aproximadamente 14.000 MW, com uma área alagada de 1.350 km<sup>2</sup>.

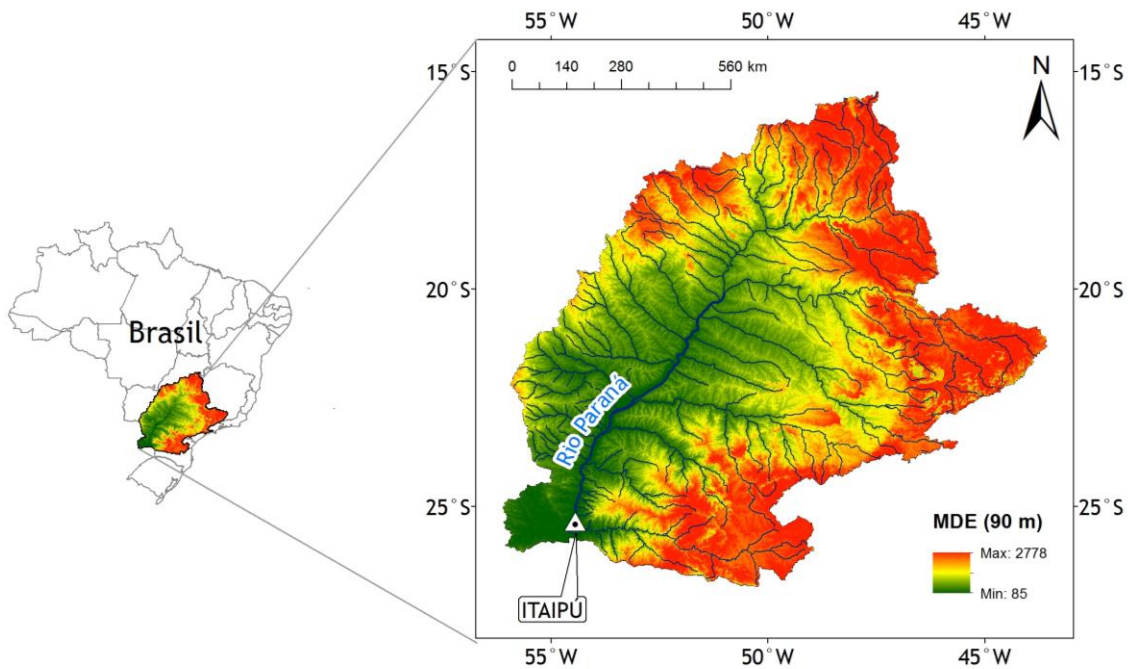


Figura 1. Localização da Bacia do Rio Paraná e a usina hidroelétrica binacional Itaipú.

## METODOLOGIA

### dados meteorológicos

Os dados meteorológicos são oriundos do modelo *Integrated Forecast System* (IFS), versão CY43R3, do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECWMF), contidos na base de dados *Sub seasonal – to – Seasonal* (S2S) (Vitart e Robertson, 2018). Este modelo realiza a cada previsão, a integração de um conjunto (*ensemble*) de 51 membros, incluindo um não perturbado (membro de controle). A frequência de emissão destas previsões ocorre duas vezes por semana (as terças e quintas, UTC 00), com um prazo de antecedência máximo de 46 dias. Foram obtidos as previsões disponíveis para os anos de 2015 e 2016, com a resolução da grade de  $0.125^\circ$  e acumulados diariamente (ECMWF, 2017). Estes dados estão disponíveis em <https://apps.ecmwf.int/datasets/>, em tempo *quasi-real*, com um atraso de 3 semanas da data atual.

As observações de precipitação foram obtidas a partir da base global *Multi Source Weighted Ensemble Precipitation* (MSWEP), versão 2.1 (Beck *et al.*, 2017; Beck *et al.*, 2018). Esta base dispõe de séries de dados abrangendo os anos desde 1979 até 2016, com resolução de grade de  $0.1^\circ$ , acumulados de 3 horas, que posteriormente foram acumulados diariamente.

### modelo MGB-IPH

O modelo hidrológico utilizado é o Modelo de Grandes Bacias (MGB-IPH) descrito por Collischonn *et al.*, (2007). O modelo hidrológico discretiza a bacia hidrográfica em unidades elementares, denominadas de mini-bacias; a variabilidade do solo e vegetação é representada pelas Unidades de Resposta Hidrológica (URH); o cálculo da evapotranspiração é baseado na equação de

Penman-Monteith; e o escoamento superficial e balanço de água no solo segue a abordagem do modelo Arno; a propagação da vazão é realizada a partir do método Muskingum-Cunge (embora exista a alternativa das equações de Saint-Venant completas). A figura 2 ilustra o esquema conceitual do modelo.

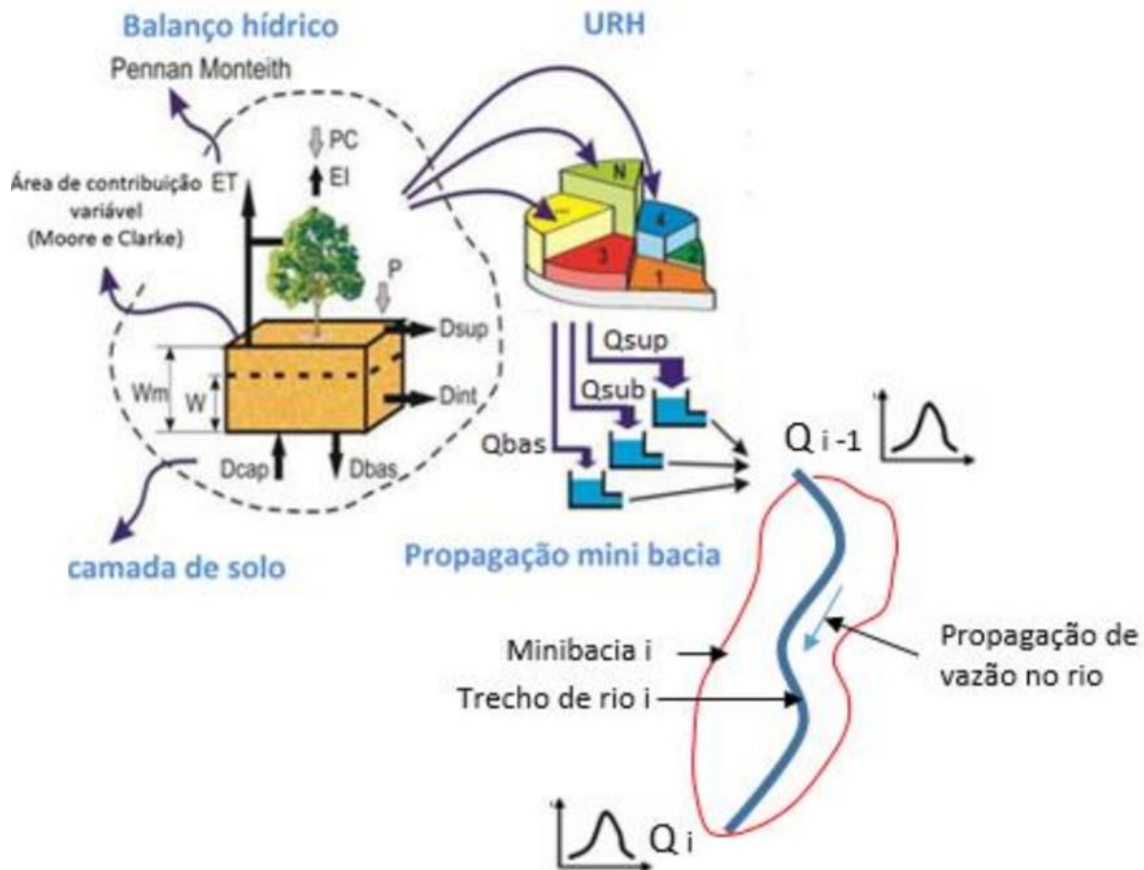


Figura 2. Esquema conceitual do MGB-IPH (Adaptado de Paiva, (2009)). Onde P é a precipitação, EI é a interceptação, ET é a evapotranspiração e  $W_m$ ,  $D_{sup}$ ,  $D_{bas}$ ,  $D_{int}$  e  $D_{cap}$  são parâmetros das URH.

### experimentos de previsão hidrológica sub sazonal

Os experimentos consistiram em forçar o modelo MGB-IPH com previsões sub sazonais de precipitação. Como a bacia hidrográfica foi discretizada em 1424 mini-bacias, a coordenada do centróide de cada uma foi utilizada para interpolar as séries de precipitação das bases de dados em grade, tomando o pixel da grade mais próxima ao centróide como valor representativo da precipitação.

Foi utilizada a técnica Extended Streamflow Prediction (ESP, Day, 1985) para geração de previsões hidrológicas por conjunto baseadas nas séries históricas de precipitação observada. Cada membro do conjunto ESP considerou o mesmo período (dia e mês) da previsão meteorológica sub sazonal, considerando 20 anos do passado (isto é, número de membros do conjunto ESP).

Ainda, a simulação de referência para as verificações estatísticas considerou a “chuva perfeita” como dado de entrada ao modelo hidrológico, desta maneira, assume-se como precipitação futura



aquela equivalente a observada. Assim, pode-se avaliar apenas as incertezas associadas aos dados meteorológicos.

A avaliação estatística foi realizada com o software *Ensemble Verification System*, descrito por Brown *et al.*, (2010). Foram empregados métricas típicas a verificação de previsão por conjunto, como o *Mean Absolute Error (MAE)*, *Root Mean Squared Error (RMSE)*, *Continuous Ranked Probability Score (CRPS)*, *Continuous Ranked Probability Skill Score (CRPSS)*, e *Rank Histograms*. Estes escores são usualmente empregados neste tipo de abordagem e amplamente documentada na literatura (Wilks, 2006; Jolliffe e Stephenson, 2012). As métricas de erros (MAE, RMSE e CRPS) foram avaliadas após a normalização do valor resultante da estatística pela a média de longo prazo da simulação de vazão com a “chuva perfeita”, para os anos de 2015 e 2016.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura 3 exemplifica uma previsão de vazão por conjunto, gerada pelos dados meteorológicos oriundos da base S2S e aquelas pela técnica ESP. É ilustrado um evento de cheia em Itaipú, no qual as figuras superiores são as previsões sub sazonais emitidas a duas semanas antes do pico do hidrograma e as inferiores mostram a previsão iniciada mais próxima ao início do evento.

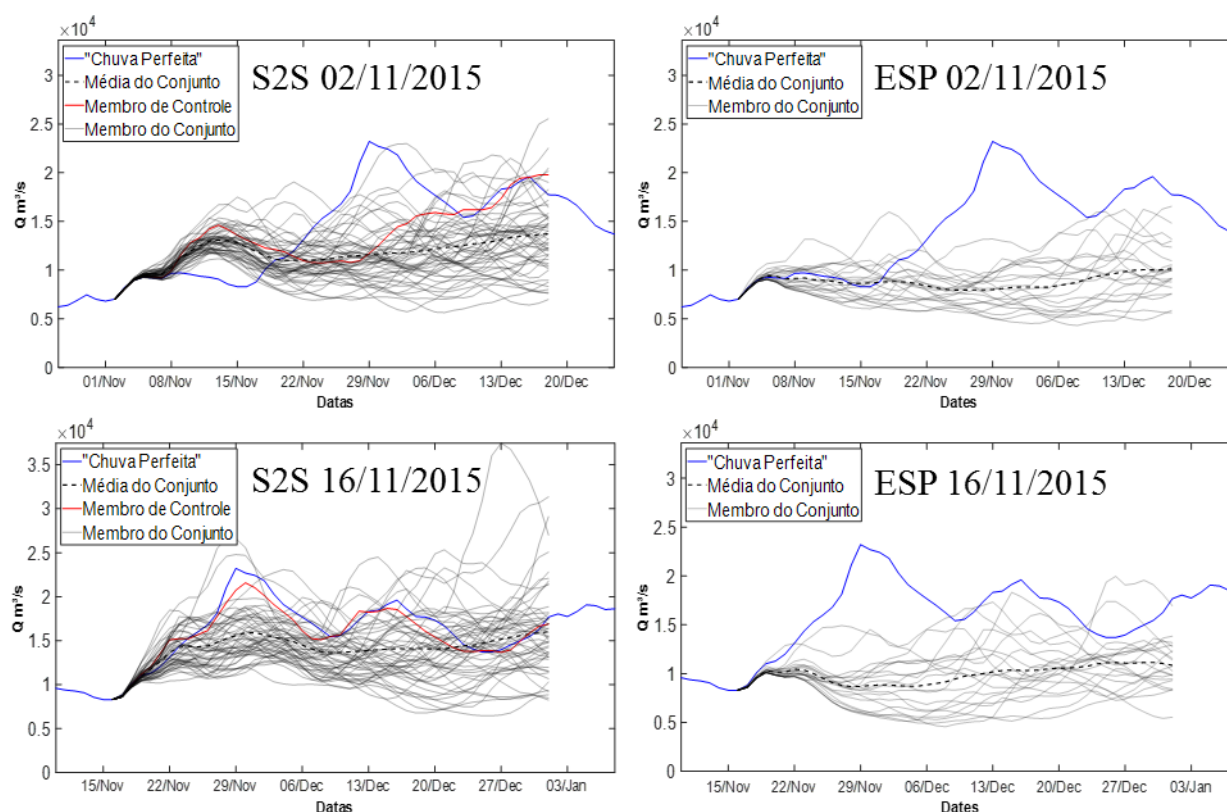


Figura 3. Análise visual das previsões de vazões sub-sazonais amostradas em Itaipú. Note-se que as previsões baseadas em S2S seguiram em mais conformidade com a simulação “chuva perfeita” do que as baseadas em ESP, fornecendo informações mais precisas sobre as afluências. À esquerda, o baseado em S2S; à direita, o baseado em ESP. Linha azul refere-se à simulação “chuva perfeita”, linha vermelha é o membro de controle do conjunto, linha cinza é um membro do conjunto e linha preta tracejada é a média do conjunto.

A figura 4 mostra os resultados do MAE, RMSE, CRPS e CPRSS. As métricas MAE e CRPS apresentaram, respectivamente, magnitudes em torno de 0.20 e 0.15 vezes a vazão média. Ao passo que o erro do membro de controle apresentou valores similares ao da média do conjunto, e após o dia 8 do horizonte, acerca de 0.3 vezes a vazão média.

Nota-se uma melhor previsibilidade ou qualidade de previsão quando se considera o conjunto (*ensemble*), uma vez que o score CRPS, que considera a distribuição de probabilidade entre os membros do conjunto e equivalente ao erro médio absoluto para previsões determinísticas, é sempre inferior ao MAE da média do conjunto meteorológico, bem como ao membro de controle. Ainda, percebe-se que o MAE da média do conjunto obteve valores inferiores ao membro de controle, sugerindo que a consideração da média de múltiplos cenários de vazão se torna mais representativo que a referencia deterministica do conjunto (isto é, o membro de controle).

Quanto ao CRPSS, que representa a comparação da qualidade das previsões baseadas do conjunto meteorológico S2S em relação ao ESP, demonstra-se que há maior previsibilidade ou qualidade nas previsões S2S após o dia 3 do horizonte, até o fim do prazo de antecedência. Nos dias iniciais da previsão, a técnica ESP obteve melhores previsões possivelmente pela maior influencia da memoria inercial das condições hidrologicas iniciais na Bacia do Rio Paraná.

Os resultados do CRPSS sugerem que a previsão baseada nos dados S2S podem fornecer informações potenciais a tomada de decisão e com maior confiabilidade do que aquelas baseadas em series históricas. Ainda, atividades como a estimativa de afluencias, gestão e gerenciamento de reservatorios podem se beneficiar da estrutura de modelagem aplicada neste estudo, visto que foram destacados erros associados ao longo do horizonte da previsão, bem como vazões afluentes previstas com antecedencia de várias semanas.

A partir da analise dos *Rank Histograms*, ilustrada na figura 5 para os dias 1, 15, 20 e 46 do horizonte, percebe-se uma baixa dispersão entre os membros do conjunto, bem como uma leve tendencia a superestimativa de vazões (viés positivo). Todavia, com o decorrer da previsão, ocorre um maior espalhamento das observações entre os membros do conjunto, de modo que os histogramas tendem a uma forma plana.

A respeito dos *Rank Histograms*, nota-se que nos dias iniciais da previsão, os resultados possuem maior dependencia das condições iniciais observadas na bacia que da qualidade dos dados de entrada (previsões meteorologicas), conforme é indicado pela falta de espalhamento. Além disso, foi indicada uma superestimação sistemática da vazão, sugerindo que alguma técnica de remoção de viés possa ser aplicada.

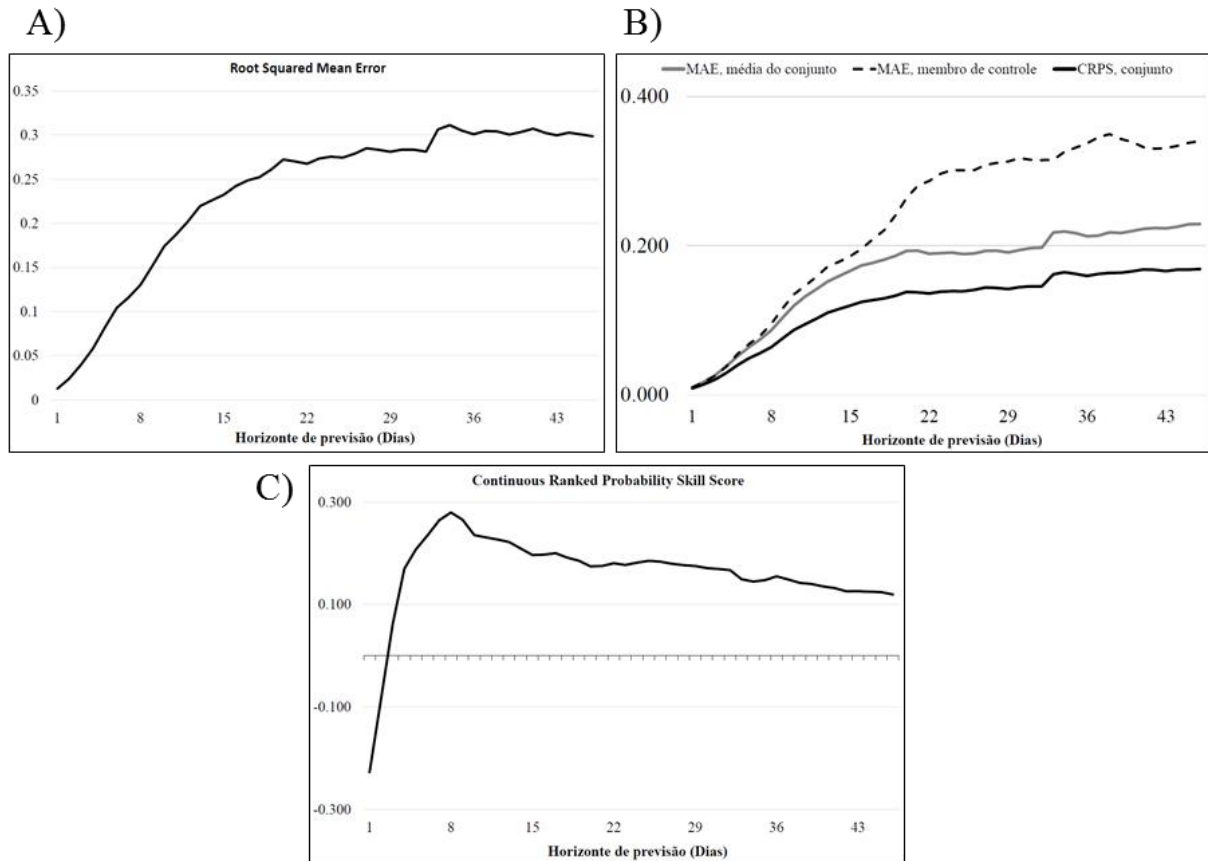


Figura 4. Resultados das métricas avaliadas. A) O *Mean Squared Error* (MAE) da média do conjunto (linha cinza cheia); do membro de controle (linha tracejada preta); e ao CRPS dos membros do conjunto (linha preta cheia). B) O *Root Mean Squared Error* (RMSE); C) O CRPS, demonstrando a qualidade da previsão baseada nos dados S2S em relação ao ESP.

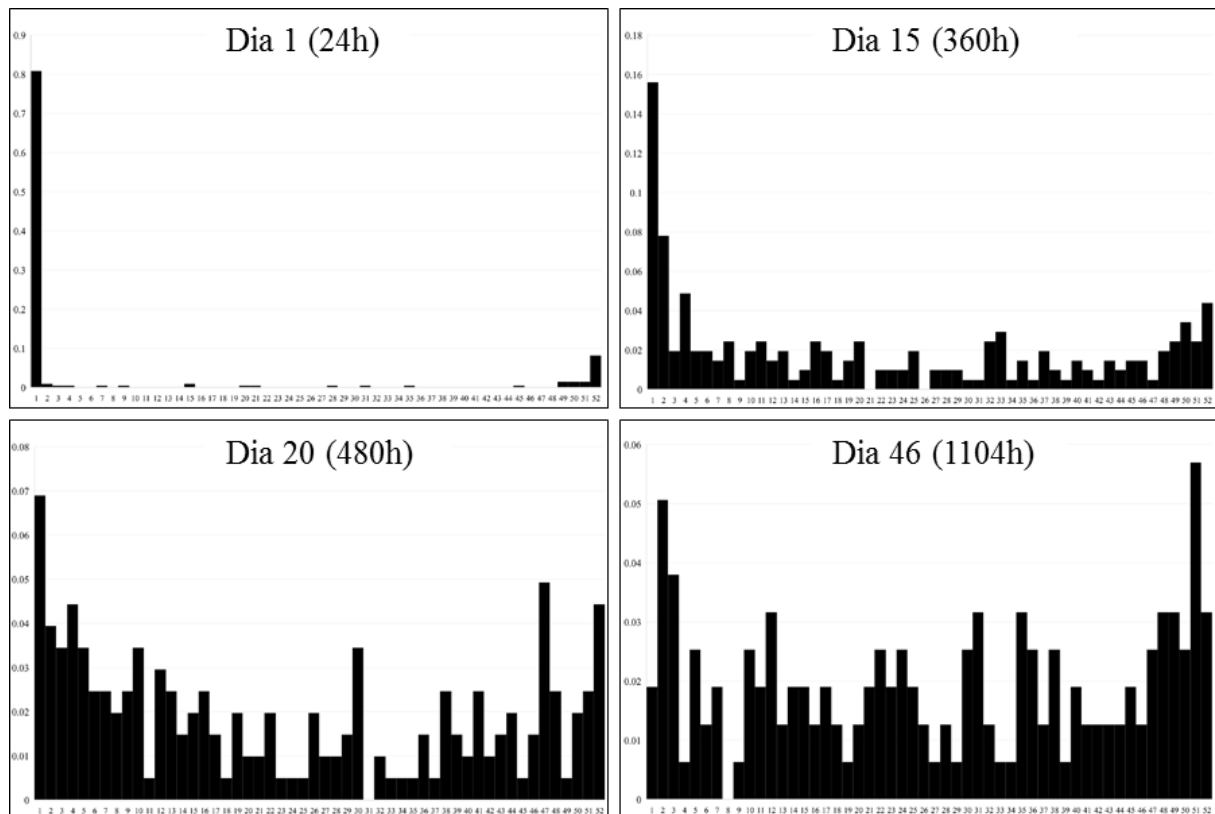


Figura 5. Os *Rank Histograms*, avaliados no dia 1, 15, 20 e 46 de previsão, demonstrando o comportamento da distribuição das ocorrências observadas, entre os membros do conjunto ordenados.

## CONCLUSÕES

Os resultados apresentados neste trabalho são uma das primeiras avaliações de previsões de vazões sub sazonais no continente sul-americano. Em geral, nossos resultados concordam com os resultados usuais de outras avaliações de H-EPS contra referências determinísticas.

Foi demonstrado que o desempenho das previsões por conjunto (S2S) possui vantagens, em termos de escores estatísticos, quando comparado ao determinístico (membro de controle) e a uma referência climatológica (ESP).

Por fim, esperamos que nossos resultados contribuam para o uso de previsões de horizonte sub sazonal e seus benefícios para a previsão hidrológica, consolidando também experimentos de previsão de ensemble em grandes bacias da América do Sul. Para fins de geração de energia hidroelétrica em bacias de grande escala, as previsões de vazões sub sazonais provaram ser promissoras, com melhor qualidade do que as previsões geradas usando a precipitação histórica. Além disso, os esforços abordaram algumas questões relacionadas aos principais incentivos do projeto sazonal (S2S) (Vitart *et al.*, 2017).

Em relação a trabalhos futuros, acreditamos que mais casos de teste podem ser úteis, considerando os insumos meteorológicos originados de diferentes centros de pesquisa, pois eles estão disponíveis gratuitamente a partir do banco de dados S2S - potencialmente fornecendo um *grand ensemble* com resultados estatisticamente mais confiáveis. Da mesma forma, sucedendo esforços recentes na modelagem integrada de sistemas hidráulicos complexos na América do Sul (por exemplo, Siqueira *et al.*, 2018), espera-se extrair valor desses modelos para o uso de previsões sub sazonais (precipitação e outros variáveis) em previsões hidrológicas, especialmente quando comparado com técnicas que empregam apenas informações históricas.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES – Brasil pelo apoio financeiro concedido para realização desta publicação.

## REFERÊNCIAS

- ADAM, K. N.; FAN, F. M.; PONTES, P. R. M.; BRAVO, J. M.; COLLISCHONN, W. (2015). “*Mudanças climáticas e vazões extremas na Bacia do Rio Paraná / Climate Change and Extreme Streamflows in Paraná River Basin*”. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 20, p. 999-1007, 2015.
- BAUER, P.; THORPE, A.; BRUNET, G. (2015). “*The quiet revolution of numerical weather prediction (NWP)*”. Nature. Vol. 525. 47-55. doi:10.1038/nature14956.
- BECK, H. E., VERGOPOLAN, N., PAN, M., LEVIZZANI, V., DIJK, A. I., & WEEDON, G. P. (2017). “*Global-scale evaluation of 22 precipitation datasets using gauge observations and hydrological modeling*”. Hydrology and Earth System Science, 6201-6217.



BECK, H., E. WOOD, M. PAN, C. FISHER, D. MIRALLES, A. VAN DIJK, T. MCVICAR, AND R. ADLER, (2018). “*MSWEP V2 global 3-hourly 0.1° precipitation: methodology and quantitative assessment*”. Bull. Amer. Meteor. Soc. doi:10.1175/BAMS-D-17- 0138.1, in press.

BROWN, J.D., DEMARGNE, J., SEO, D.-J., LIU, Y., 2010. “*THE ENSEMBLE VERIFICATION SYSTEM (EVS): A SOFTWARE TOOL FOR VERIFYING ENSEMBLE FORECASTS OF HYDROMETEOROLOGICAL AND HYDROLOGIC VARIABLES AT DISCRETE LOCATIONS*”. ENVIRON. MODEL. SOFTW. 25 (7), 854–872.

CLOKE, H. L., & PAPPENBERGER, F. (2009). “*Ensemble flood forecasting: A review*”. Journal of Hydrology, Volume 375, Issues 3–4, 15 September, Pages 613-626. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.005>

COLLISCHONN, W., TUCCI, C. E., CLARKE, R. T., CORBO, M. D., SILVA, B. C., COLLISCHONN, B., . . . PAZ, A. R. (2007). “*Modelo Hidrológico Distribuído para Previsão de Vazões Incrementais na Bacia do Rio Paranaíba entre Itumbiara e São Simão*”. RBRH — Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 43-55.

ECMWF, E. C.-R. (2017). “*IFS DOCUMENTATION - Cy43r3. PART V: ENSEMBLE PREDICTION SYSTEM*”.

FAN, F. M., COLLISCHONN, W., MELLER, A., & BOTELHO, L. C. (2014). “*Ensemble streamflow forecasting experiments in a tropical basin: The São Francisco river case study*”. Journal of Hydrology, Volume 519, Part D, 27 November 2014, Pages 2906-2919. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.038>

FAN, F. M., SCHWANENBERG, D., COLLISCHONN, W., & WEERTS, A. (2015). “*Verification of inflow into hydropower reservoirs using ensemble forecasts of the TIGGE database for large scale basins in Brazil*”. Journal of Hydrology Volume 4, Part B, September 2015, Pages 196-227. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.05.012>

FAN, F. M.; SCHWANENBERG, D.; ALVARADO, R. ; REIS, A. A. ; COLLISCHONN, W. ; NAUMANN, S. (2016). “*Performance of Deterministic and Probabilistic Hydrological Forecasts for the Short-Term Optimization of a Tropical Hydropower Reservoir*”. Water Resources Management, p. 1-17.

JOLLIFFE, I. T; STEPHENSON, D. B. (2012). “*Forecast Verification: A practioner’s Guide in Atmospheric Science*”. John Wiley & Sons Ltd. 2012, p. 247.

KRZYSZTOFOWICZ, R. (2001). “*The case for probabilistic forecasting in hydrology*”. Journal of Hydrology. Volume 249, Issues 1–4, 1 August 2001, Pages 2-9. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00420-6](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00420-6)

SCHAAKE, J.; FRANZ, K.; BRADLEY, A.; BUIZZA, R. (2006). “*The Hydrologic Ensemble Prediction Experiment (HEPEX)*”. Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., v. 3, p.3321–3332, 2006.

SCHWANENBERG, DIRK., FAN, FERNANDO MAINARDI., NAUMANN, STEFFI., KUWAJIMA, JULIO ISSAO., MONTERO, RODOLFO ALVARADO., ASSIS DOS REIS, ALBERTO. (2015). “*Short-Term Reservoir Optimization for Flood Mitigation under Meteorological and Hydrological Forecast Uncertainty*”. Water Resources Management, 0920-4741, 1-17, <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-014-0899-1>.

SIQUEIRA, V. A., PAIVA, R. C. D., FLEISCHMANN, A. S., FAN, F. M., RUHOFF, A. L., PONTES, P., R., M., PARIS, A., CALMANT, S., COLLISCHONN, W. (2018). “*Toward continental hydrologic–hydrodynamic modeling in South America*”. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22, 4815-4842, 2018. <https://doi.org/10.5194/hess-22-4815-2018>

VITART, F., C. ARDILOUZE, A. BONET, A. BROOKSHAW, M. CHEN, C. CODOREAN, M. DÉQUÉ, L. FERRANTI, E. FUCILE, M. FUENTES, H. HENDON, J. HODGSON, H. KANG, A. KUMAR, H. LIN, G. LIU, X. LIU, P. MALGUZZI, I. MALLAS, M. MANOUSSAKIS, D. MASTRANGELO, C. MACLACHLAN, P. MCLEAN, A. MINAMI, R. MLADEK, T. NAKAZAWA, S. NAJM, Y. NIE, M. RIXEN, A.W. ROBERTSON, P. RUTI, C. SUN, Y. TAKAYA, M. TOLSTYKH, F. VENUTI, D. WALISER, S. WOOLNOUGH, T. WU, D. WON, H. XIAO, R. ZARIPOV, AND L. ZHANG. (2017). “*The Subseasonal to Seasonal (S2S) Prediction Project Database*”. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 98, 163–173. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0017.1>.

VITART, F.; ROBERTSON, A. W. (2018). “*The sub seasonal to seasonal prediction project (S2S) and the prediction of extreme events*”. *Climate and Atmospheric Science*, 1-7.

WHITE, C. J., CARLSEN, H., ROBERTSON, A. W., KLEIN, R. J. T., LAZO, J. K., KUMAR, A., VITART, F., COUGHLAN DE PEREZ, E., RAY, A. J., MURRAY, V., BHARWANI, S., MACLEOD, D., JAMES, R., FLEMING, L., MORSE, A. P., EGGEN, B., GRAHAM, R., KJELLSTRÖM, E., BECKER, E., PEGION, K. V., HOLBROOK, N. J., MCEVOY, D., DEPLEDGE, M., PERKINS-KIRKPATRICK, S., BROWN, T. J., STREET, R., JONES, L., REMENYI, T. A., HODGSON-JOHNSTON, I., BUONTEMPO, C., LAMB, R., MEINKE, H., ARHEIMER, B., AND ZEBIAK, S. E. (2017). “*Potential applications of subseasonal-to-seasonal (S2S) predictions*”, *Meteorol. Appl.*, 24, 315 325. <https://doi.org/10.1002/met.1654>.

WILKS, D. (2006). “*Statistical Methods in The Atmospheric Sciences*”. London, UK: Elsevier.