



É POSSÍVEL INCLUIR O EFEITO DO VENTO EM UM MODELO HIDROLÓGICO PARA MELHORAR A REPRESENTAÇÃO DE AMBIENTES LAGUNARES?

Vitória Ache Rocha Lopes¹ & Fernando Mainardi Fan^{1} & Walter Collischonn¹ & Paulo Rógenes Monteiro Pontes² & David da Motta Marques¹*

Resumo – Tradicionalmente a modelagem do escoamento e da vazão nos rios de grandes bacias hidrográficas é feita para a obtenção das informações de entrada para a modelagem de lagos, lagoas e estuários. Esta abordagem exige a preparação de dados e compatibilização de dois modelos, sendo onerosa quando usada para estudos hidrológicos ou operacionalizada em sistemas de previsão de níveis. Estudos recentes têm demonstrado que é possível utilizar a estrutura de um único modelo hidrológico para a representação destas variáveis em ambientes lagunares. Todavia os modelos hidrológicos de bacia geralmente não incluem a consideração do efeito do atrito do vento, o que faz da representação incompleta. No presente trabalho este assunto é investigado, onde procurou-se responder a questão: é possível incluir o efeito do vento em um modelo hidrológico para melhorar a representação do nível de água em ambientes lagunares? O estudo de caso utilizado foi a bacia da Laguna dos Patos (RS, Brasil) e o modelo usado foi o MGB-IPH Inercial.

Palavras-Chave – Laguna dos Patos, Modelagem Hidrológica, MGB-IPH.

IS IT POSSIBLE TO INCLUDE THE EFFECT OF THE WIND IN A HYDROLOGICAL MODEL TO IMPROVE THE REPRESENTATION OF LAGUNAR ENVIRONMENTS?

Abstract – Traditionally, the modeling of large watersheds for the estimation of runoff and discharges in rivers is done to obtain the input information for the modeling of lakes, lagoons and estuaries. This approach requires the preparation of data and compatibility of two models, being costly when used for hydrological studies or operationalized in water level prediction systems. Recent studies have demonstrated that it is possible to use the structure of a single hydrological model to represent these variables in lagoon environments. However hydrological models of basins generally do not include the consideration of wind shear stress effect, which makes the representation incomplete. In the present work this subject is investigated, where it was aimed to answer the following question: is it possible to include the wind effect in a hydrological model to improve the representation of lagoon environments water levels? The case study used was the Laguna dos Patos basin (RS, Brazil) and the model used was the MGB-IPH Inertial.

Keywords – Laguna dos Patos, Hydrological Modelling, MGB-IPH.

¹ Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) – Porto Alegre, RS, Brasil.

² Universidade do Vale dos Sinos (UNISINOS) – São Leopoldo, RS, Brasil.

* Autor Correspondente: fernando.fan@ufrgs.br

INTRODUÇÃO

A modelagem hidrológica é uma ferramenta muito útil no planejamento e na gestão de recursos hídricos, podendo ser utilizada tanto para a previsão de vazões, como para diversas outras finalidades, incluindo análises de impacto de mudanças de uso do solo e climáticas, e apoio para a gestão de recursos hídricos.

Quando a bacia hidrográfica estudada contém, além de rios, também lagos, lagoas e estuários, a forma mais comum de simular estes sistemas de grande escala com hidrodinâmica complexa é por meio do acoplamento externo entre modelos hidrológicos e modelos hidrodinâmicos (Dargahi e Setegn, 2011; Li et al., 2014). Esta abordagem consiste em utilizar um modelo hidrológico para gerar as vazões de entrada, que são então utilizadas como condições de contorno para o modelo de simulação dos lagos.

Este acoplamento externo entre dois tipos de modelos, no entanto, possui limitações que dificultam, por exemplo, a representação de efeitos de remanso nas condições de contorno entre os dois modelos, ou o estabelecimento de um sistema operacional de previsão de cheias com assimilação de dados em ambos os modelos. Além de serem onerosos de serem desenvolvidos, já que exigem tempo e corpo técnico capacitado para tais tarefas.

Simulações hidrológicas e hidráulicas de grandes bacias hidrográficas com sistemas hidrodinâmicos complexos que contenham rios, lagos e lagoas de forma integrada, usando a estrutura de um único modelo, foram raramente realizadas na literatura. Embora esta abordagem com um único modelo seja mais simples quando o objetivo é a previsão de níveis ou áreas alagadas. Um dos poucos trabalhos nesta linha foram os de Lopes (2015) e Lopes et al. (2015), que apresentaram uma calibração preliminar do modelo hidrológico MGB-IPH com propagação hidrodinâmica capaz de representar sistemas de rios e também lagunares para a simulação de níveis de água e áreas alagadas.

No presente trabalho é dada continuidade na investigação deste tema, usando o mesmo modelo de Lopes et al. (2015) e tendo como estudo de caso a bacia hidrográfica da Laguna dos Patos, um grande sistema que inclui rios, lagos, lagoas e estuários (Figura 01). A bacia localiza-se no estado do Rio Grande do Sul, Brasil, e no Uruguai. A bacia possui grande importância econômica, ambiental e social para o estado do Rio Grande do Sul. A importância econômica se dá em função de conter as maiores cidades do estado, além da própria Laguna conter um importante curso navegável de 258 km que escoar mercadorias entre o porto internacional de Rio Grande e a capital do estado, Porto Alegre. No que diz respeito à sua importância ambiental pode-se citar a existência de muitas unidades de conservação importantes, como a Estação Ecológica do Taim e o Parque nacional da Ilha do Peixe, consideradas Reservas da Biosfera pela UNESCO. Com relação a sua importância social, cabe ressaltar a ocorrência frequente de enchentes na bacia, fato que culminou na construção de um sistema de proteção contra cheias da região metropolitana de Porto Alegre e que motiva a busca pela elaboração de sistemas de previsão de cheias na região.

Em ambientes lagunares a influência do vento usualmente não pode ser desprezada. No sistema da Laguna dos Patos a importância desse fator foi analisada e reportada na literatura (Möller et al., 2001). Considerando que o vento é o principal fator que modela a variação dos níveis d'água na Laguna, é possível constatar que um sistema de previsão para a mesma não seria possível sem a inclusão da influência do vento no módulo hidráulico do modelo hidrológico.

Dadas as considerações citadas, o presente estudo buscou desenvolver um método para a consideração do vento nas simulações com o modelo MGB-IPH e avaliar seus benefícios para a simulação da bacia hidrográfica da Laguna dos Patos, principalmente nos níveis de água na laguna.

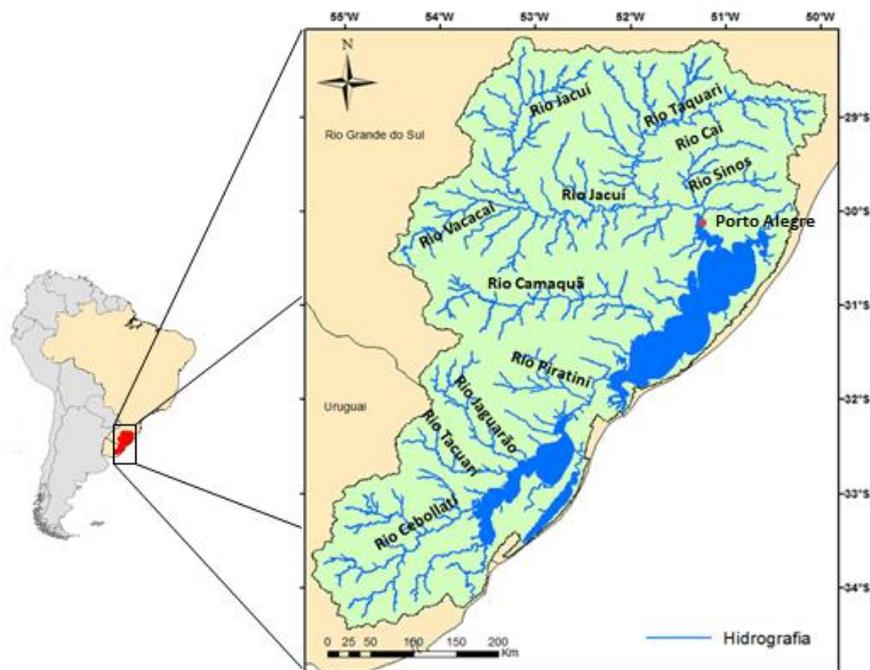


Figura 1. Localização da bacia hidrográfica da Laguna dos Patos e de suas principais afluentes.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para cumprir com os objetivos propostos partiu-se de uma versão inicial do modelo hidrológico MGB-IPH aplicado para a bacia da Laguna da Laguna dos Patos por Lopes (2015) e Lopes et al. (2015). Este modelo foi modificado com a inclusão do efeito do vento nas simulações, e foram rodadas simulações comparadas com a versão original do modelo sem vento, e checadas com dados observados. A seguir, detalhes desta metodologia são explicados.

Modelagem Hidrológica com o MGB-IPH

O modelo MGB-IPH é um modelo hidrológico de grande escala, semi-distribuído, onde os parâmetros do modelo são definidos em função de unidades de resposta hidrológica (URH) e atrelados a sub-bacias definidas pelo usuário. Cada sub-bacia é dividida em diversas minibacias, que são as unidades de cálculo do modelo. Cada minibacia portanto funciona como um pequeno modelo concentrado com dadas URH, onde é feita a transformação de chuva em vazão e a propagação de vazão no trecho de rio. A Figura 2 exemplifica de forma esquemática o funcionamento do modelo.

A versão do modelo MGB-IPH utilizada, que pode ser chamada de MGB-IPH Inercial, foi inicialmente apresentada por Pontes et al. (2015), que adaptaram o esquema numérico inercial unidimensional testado por Fan et al. (2014) na propagação de vazões nos trechos de rio do modelo hidrológico. O método inercial de propagação se baseia em uma versão simplificada das equações de Saint-Venant em que apenas o termo que representa a inércia advectiva é desprezado. Com esta simplificação, a equação dinâmica para cálculo de vazões é dada pela equação 1. E a equação de conservação de massa é dada pela equação 2. Mais detalhes podem ser encontrados em Fan et al. (2014) e em Pontes et al. (2015), incluindo as descrições detalhadas dos métodos e modelos.

$$Q_{i+\frac{1}{2}}^{k+1} = \frac{\left(\left(Q_{i+\frac{1}{2}}^k \right) - g \cdot B \cdot \Delta t \cdot \left(h_{i+\frac{1}{2}}^k \right) \frac{(y_{i+1}^k - y_i^k)}{\Delta x} \right)}{\left(1 + \frac{g \cdot \Delta t \cdot \left(q_{i+\frac{1}{2}}^k \right) \cdot n^2}{B \left(h_{i+\frac{1}{2}}^k \right)^{7/3}} \right)} \quad (1)$$

em que y_i^k é a cota do nível da água no subtrecho i pertencente à minibacia i ; y_{i+1}^k é a cota do nível da água no subtrecho $i+1$ pertencente a minibacia $i+1$; z_i é a cota do fundo do rio no subtrecho i ; z_{i+1} é a cota do fundo do rio no subtrecho $i+1$; e Q é a vazão que entra ou sai do trecho.

$$\frac{V_i^{k+1} - V_i^k}{\Delta t} = \sum Q_{in}^{k+1} - \sum Q_{out}^{k+1} \quad (2)$$

na qual V se refere ao volume, Q à vazão, e os subscritos *in* e *out* se referem à vazão de entrada e saída, respectivamente. O índice k é referente ao momento no tempo e o índice i à posição no espaço, sendo que i é definido no centro de cada subtrecho; Δt representa o intervalo de tempo.

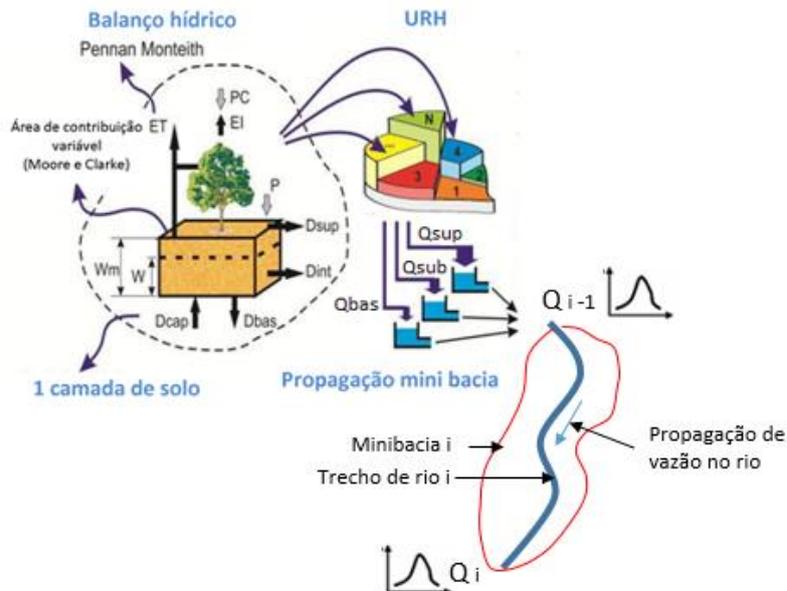


Figura 2. Esquema do funcionamento conceitual do modelo MGB-IPH Inercial (Adaptado de Paiva, 2009) onde W_m , D_{sup} , D_{bas} , D_{int} e D_{cap} são parâmetros das URH de modelagem da água na camada de solo, P é a precipitação que atinge o solo, EI é a interceptação, e ET é a evapotranspiração.

O modelo descrito desta forma foi aplicado com relativo sucesso para a simulação dos rios que drenam para a Laguna dos Patos nos trabalhos de Lopes (2015) e Lopes et al. (2015). Porém para a simulação dos níveis no complexo lagunar o modelo mostrou algumas limitações, já que não representava efeitos do vento.

Inclusão do vento no modelo

Em grandes corpos d'água inseridos em locais planos, como lagos, lagoas e estuários, a influência do vento usualmente não pode ser desprezada. A inclusão da influência do vento em um modelo hidrodinâmico pode ser feita por meio do acréscimo de um termo que representa a força de atrito do vento à equação dinâmica das equações de Saint-Venant. A equação 3 é geralmente usada para considerar a tensão causada pelo vento no escoamento (Abbott & Price, 1994).

$$\tau = d_{ar} \cdot C_D \cdot |U| \cdot U \quad (3)$$

em que τ é a tensão causada pelo vento no escoamento, U é valor da componente do vetor da velocidade do vento na direção do escoamento, ρ é a densidade do ar (massa específica do ar dividida pela massa específica da água), C_D é o coeficiente adimensional de arraste do vento ou coeficiente de resistência ar-água. Cabe ressaltar que a velocidade do vento U multiplica o módulo da mesma para que o sentido dessa velocidade seja preservado (contra ou a favor do escoamento). No presente trabalho o valor usado de C_D foi de 20×10^{-6} , definido com base em ensaios preliminares.

A partir desta consideração, foi feita a dedução da equação dinâmica do modelo inercial com a introdução do termo de vento. A mesma é representada pela Equação 4, já com a inclusão do termo que representa a força de atrito provocada pelo vento conforme.

$$Q_{i+\frac{1}{2}}^{k+1} = \frac{\left(\left(Q_{i+\frac{1}{2}}^k \right) - g \cdot B \cdot \Delta t \cdot \left(h_{i+\frac{1}{2}}^k \right) \frac{(\gamma_{i+1}^k - \gamma_i^k)}{\Delta x} - \Delta t \cdot B \cdot d_{ar} \cdot C_D \cdot |U| \cdot U \right)}{\left(\frac{g \cdot \Delta t \cdot \left(q_{i+\frac{1}{2}}^k \right) \cdot n^2}{1 + \frac{B \cdot \left(h_{i+\frac{1}{2}}^k \right)^{7/3}}{7}} \right)} \quad (4)$$

A equação 4 é aplicada da mesma forma que a equação 2.

Avaliação do modelo com inclusão do vento

O modelo hidrológico MGB-IPH da bacia da laguna dos patos foi rodado incluído os termos de vento. Os dados de entrada incluíram a introdução de um novo conjunto de dados com as séries de direção e velocidade do vento. Na Figura 3A estão representados os postos com dados de vento utilizados, obtidos por meio do portal BDMEP (<http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/>) do INMET. Os dados são diários, com três medições ao dia.

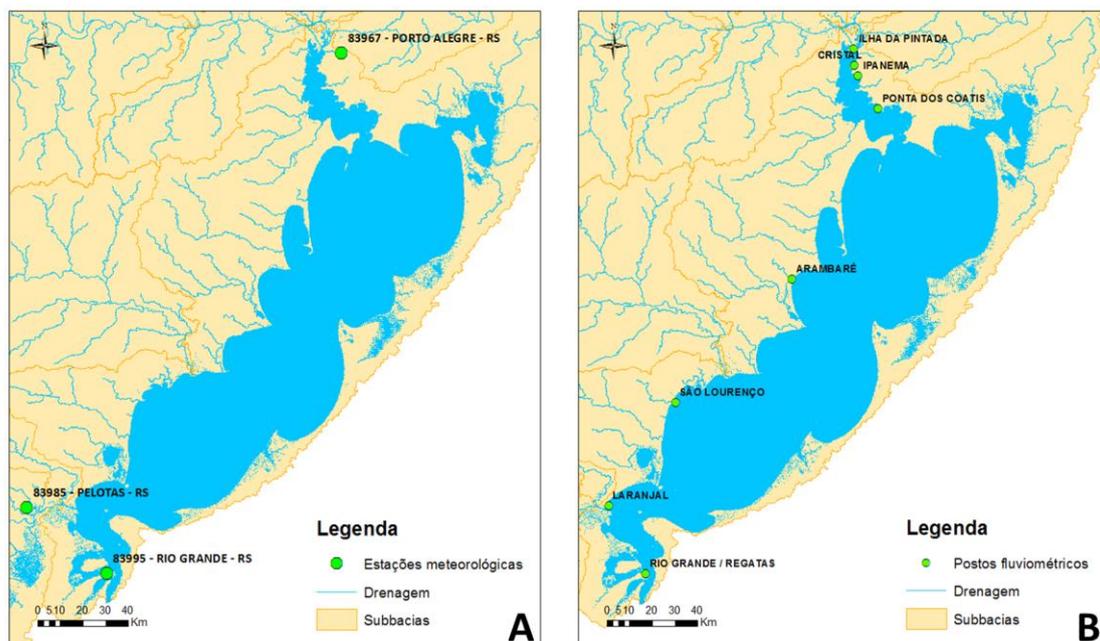


Figura 3. A) Localização dos postos meteorológicos mais próximos da laguna. B) Localização dos postos de medição de nível usados.

Os dados de vento foram interpolados para cada unidade de cálculo do modelo por meio do método do vizinho mais próximo. Para considerar as componentes do vento, tanto a direção do escoamento quanto a direção do vento são computadas considerando o azimute correspondente.

Posteriormente é feito o cálculo do cosseno da subtração entre os dois azimutes, e este é usado como multiplicador do termo de vento, para decompor o vetor da velocidade do vento na direção do escoamento.

Os resultados da modelagem foram comparados em locais com medições de nível de água na Laguna dos Patos, que são apresentados na Figura 3B. Os resultados do desempenho dos modelos foram comparados aos dados observados visualmente e utilizando o coeficiente de eficiência de Nash Sutcliffe – ENS (Nash e Sutcliffe, 1970). Para este coeficiente, valores próximos da unidade indicam melhor desempenho. A seguir, as comparações são mostradas nos resultados.

RESULTADOS

As Figuras 4 a 6 apresentam cotogramas de anomalias dos níveis de água com resultados obtidos para alguns pontos de comparação. A linha azul mostra os dados observados, a linha preta os resultados da simulação sem vento, e a linha vermelha os resultados da simulação com vento. Observa-se nos cotogramas que a inclusão do vento, em geral, aproxima mais os dados simulados (vermelhos) dos dados observados (linhas azuis), pois a oscilação de alta frequência, ocasionada na laguna pelo vento é captada nas simulações. Nas simulações sem o vento (linha preta) nota-se que os valores de níveis são mais constantes, e distintos das observações.

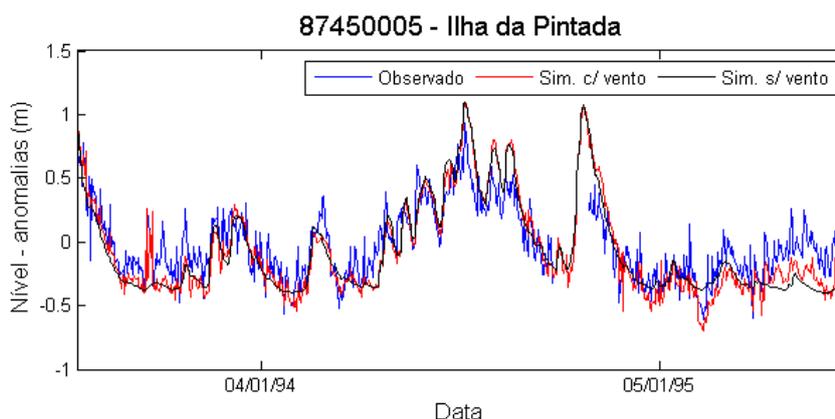


Figura 4. Anomalia dos níveis no posto de nível Ilha da Pintada (linha azul - dados observados; linha preta - simulação sem vento; linha vermelha - resultados da simulação com vento).

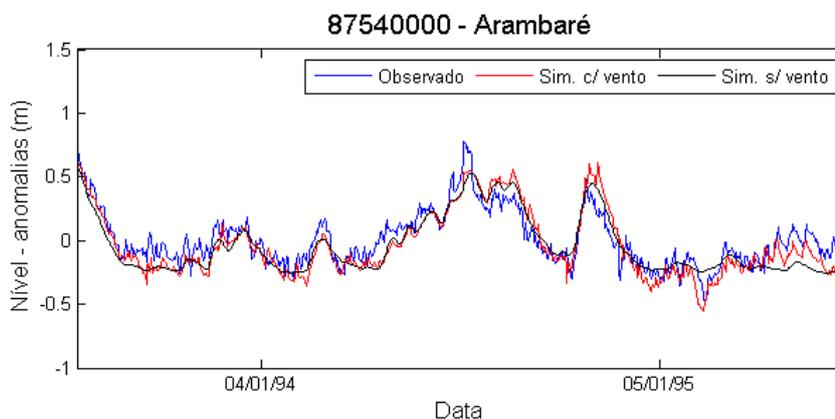


Figura 5. Anomalia dos níveis no posto de nível Arambaré (linha azul - dados observados; linha preta - simulação sem vento; linha vermelha - resultados da simulação com vento).

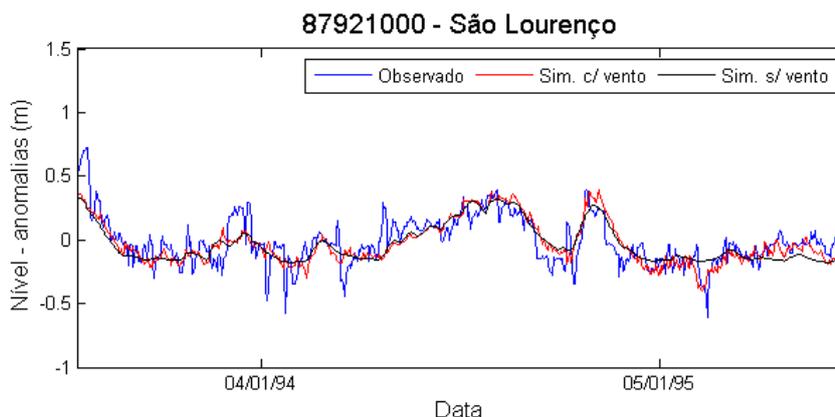


Figura 6. Anomalia dos níveis no posto de nível São Lourenço (linha azul - dados observados; linha verde - simulação sem vento; linha vermelha - resultados da simulação com vento).

Os resultados obtidos para o coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe (ENS) para os oito postos de nível são apresentados na Figura 7. A partir da Figura 7 observa-se que em todos os postos, com exceção de Rio Grande Regatas, houve um benefício na inclusão dos dados de vento na simulação, pois os valores da medida de desempenho foram mais próximos da unidade nas simulações com vento do que nas simulações sem vento.

Ressalta-se que no posto Rio Grande Regatas os valores de ENS foram menores, isso pode ter ocorrido em função da influência da maré, que não é computada atualmente pelo modelo. Ainda, acredita-se que, como os resultados nesse posto não foram influenciados positivamente pela adição do vento, o seu efeito não é mais importante do que o efeito das marés nessa localidade.

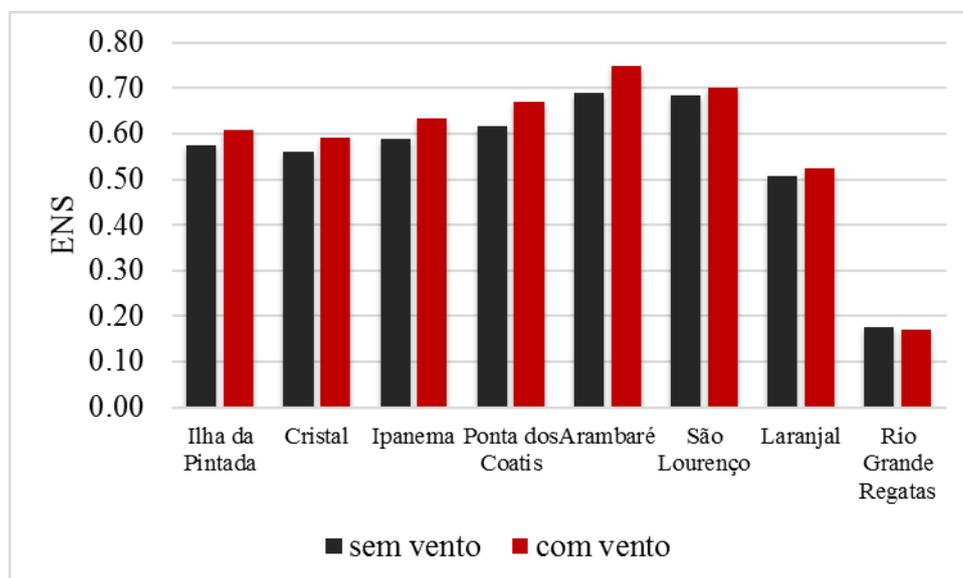


Figura 7. Coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe (ENS) para os oito postos de medição de nível.

CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, analisados visualmente e através do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe, é possível afirmar que a inclusão do efeito do vento foi benéfica para a representação dos níveis de água do sistema lagunar da bacia hidrográfica da Laguna dos Patos utilizando o modelo MGB-IPH. O benefício se deu pela representação das oscilações de alta frequência nos resultados, que não são representadas nas simulações sem a influência hidrodinâmica do vento.

Adicionalmente, o esquema testado, que nunca tinha sido testado para este tipo de abordagem, se mostrou estável para as simulações com o modelo MGB-IPH.

Os próximos trabalhos a serem realizados deverão se concentrar em testar a sensibilidade do método aos parâmetros do modelo (por exemplo, outros valores de C_D), e a testar outros dados de entrada, como dados de maré e dados horários de vento. Além da simulação de eventos extremos de cheias na região, que dependem da influência do vento.

REFERÊNCIAS

- ABBOTT, M. B.; PRICE, W. A. (1994). *Coastal Estuarial and Harbour Engineer's Reference Book*. London: E & FN Spon. p. 35.
- DARGAHI, B.; SETEGN, S. G. (2011). Combined 3D hydrodynamic and watershed modelling of Lake Tana, Ethiopia. *Journal of Hydrology*, V. 398, p. 44–64.
- FAN, F. M.; PONTES, P. R.; PAIVA, R. C.; COLLISCHONN, W. (2014). Avaliação de um método de propagação de cheias em rios com aproximação inercial das equações de Saint-Venant. *RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Volume 19, n. 4, 137-147.
- LI, Y., ZHANG, Q.; YAO, J.; WERNER, A. D.; LI, X. (2014). Hydrodynamic and Hydrological Modeling of the Poyang Lake Catchment System in China. *Journal of Hydrologic Engineering*, V. 19, p. 607-616.
- LOPES, V. A. (2015). *Modelagem hidrológica e hidráulica da bacia completa da Laguna dos Patos e de seus complexos lagunares*. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul. Orientador: Fernando Mainardi Fan.
- LOPES, V. A.; FAN, F. M.; COLLISCHONN, W.; PONTES, P. R. M.; SIQUEIRA, V. A. (2015). Aplicação preliminar do modelo mgb - iph para a bacia hidrográfica completa da laguna dos patos. In: XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2015, Brasília-DF. *Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Porto Alegre - RS: ABRH, 2015. p. PAP020142.
- MÖLLER, O. O.; CASTAING, P.; SALOMON, J.; LAZURE, P. (2001). The Influence of Local and Non-Local Forcing Effects on the Subtidal Circulation of Patos Lagoon. *Estuaries* Vol. 24, No. 2, 297-311.
- NASH, J. E.; J. V. SUTCLIFFE (1970), River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, 10 (3), 282–290.
- PONTES, P. R.; COLLISCHONN, W.; FAN, F. M.; PAIVA, R. C.; BUARQUE, D. C. (2015). Modelagem Hidrológica e Hidráulica de Grande Escala com Propagação Inercial de Vazões. *RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos*.