

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

INVESTIGAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE ESTRUTURAS DE MODELOS CONCEITUAIS E CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS

Paula Cunha David¹; Debora Yumi de Oliveira²; Vinícius Bogo Portal Chagas³ & Pedro Luiz Borges Chaffe⁴

RESUMO – O uso de múltiplos modelos hidrológicos como hipóteses do funcionamento de uma bacia pode ajudar a compreender melhor as bacias hidrográficas. Estudos de larga escala utilizam normalmente apenas um modelo conceitual para representar todas as bacias. Além disso, não existe orientação sobre qual modelo ou estrutura de modelo é melhor, tampouco quais são os processos e mecanismos dominantes para cada tipo específico de bacia. O objetivo deste trabalho é investigar a relação entre o desempenho de diferentes estruturas de modelos conceituais e as características hidrológicas em bacias localizadas na região Sul do Brasil. Foram utilizadas sete estruturas do SUPERFLEX, que consiste em uma ferramenta que permite aumentar sistematicamente a complexidade de modelos hidrológicos. A relação entre a estrutura do modelo e as características hidrológicas foi verificada através de sete assinaturas. Foi possível encontrar os principais componentes das estruturas que melhoraram a simulação. Com exceção de uma bacia, estruturas com um reservatório da zona não saturada seguido de reservatórios em paralelo foram as que melhor representaram as bacias. Apesar de ser uma área extensa, é possível que os processos hidrológicos das bacias analisadas neste trabalho sejam semelhantes. Para os próximos trabalhos, recomenda-se usar bacias hidrográficas de regiões diferentes do país, para se obter um conjunto de bacias com características físicas, climáticas e hidrológicas mais abrangentes.

ABSTRACT – The use of multiple hydrological models as hypotheses of catchment behavior can help to better understand these systems. Large scale studies usually use only one conceptual model to represent all catchments. Furthermore, there is no guidance for which model or model structure is best, nor which are the dominant processes and mechanisms for each specific type of catchment. The objective of this study is to investigate the relation between the performance of different structures of conceptual models and the hydrological characteristics of catchments located in the southern region of Brazil. Seven SUPERFLEX structures were used. The relationship between the model structure and the hydrological characteristics was verified through seven signatures. It was possible to find the main components of the structures that improved the simulation. With the exception of one basin, structures with a unsaturated zone reservoir followed by reservoirs in parallel were the ones that best represented the basins. Although that it is an extensive area, it is possible that the hydrological processes of the catchments analyzed in this study are similar. For the next studies, it is recommended to use catchments from different regions of the country, to obtain a set of catchments with more heterogeneous physical, climatic and hydrological characteristics.

Palavras-Chave – SUPERFLEX, Sul do Brasil, similaridade hidrológica.

1) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental - PPGA, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, paulacunhadavid@gmail.com

2) Department of Civil and Environmental Engineering, University of California Irvine, Irvine, California, USA, debora.ydo@gmail.com

3) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental - PPGA, 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

O uso de estruturas fixas de modelos hidrológicos conceituais pode ser uma importante fonte de incerteza na simulação do processo chuva-vazão (Butts *et al.*, 2004). Mesmo bacias fisiograficamente semelhantes podem apresentar diferentes mecanismos de geração de escoamento dominantes, e uma estrutura fixa de modelo pode ser limitada em representar adequadamente o funcionamento de diferentes bacias (Kavetski e Fenicia, 2011). Algumas limitações da estrutura fixa podem ser resolvidas com o uso de estruturas de modelos flexíveis. Esse tipo de estrutura flexível já se mostrou benéfico no contexto de teste de hipóteses de comportamento de bacias (Clark *et al.*, 2011). Fenicia *et al.* (2011) e Kavetski e Fenicia (2011) propuseram uma estrutura de modelagem flexível chamada SUPERFLEX, que é baseada em blocos genéricos, como reservatórios, juntas e funções de propagação, que podem ser combinados de diferentes maneiras.

Diferentes estudos já indicaram que há uma conexão entre as propriedades da bacia e o uso adequado de estruturas de modelos, e que bacias com dinâmicas hidrológicas distintas são melhor representadas por diferentes estruturas de modelos conceituais (Fenicia *et al.*, 2014; Van Esse *et al.*, 2013). A utilização de um *framework* de múltiplas hipóteses (modelos) fornece flexibilidade para formular diferentes representações tanto dos processos individuais quanto do sistema geral (Clark *et al.*, 2011). A compreensão das relações entre o comportamento funcional – por meio das estruturas do modelo - e as características das bacias pode auxiliar na escolha da melhor representação para cada tipo de bacia (Gupta *et al.*, 2014).

Assim como o uso de múltiplos modelos como hipóteses do funcionamento da bacia, o uso de múltiplas bacias hidrográficas pode ajudar a compreender melhor estes sistemas. A consideração de um grande conjunto de bacias pode ajudar a melhor entender o ciclo hidrológico, uma vez que permite: (i) a realização de generalizações sobre o sistema; (ii) o estabelecimento do grau de aplicabilidade de métodos e modelos; e (iii) a obtenção de informações suficientes para estabelecer relações estatísticas (Gupta *et al.*, 2014).

O presente trabalho investigou a relação entre diferentes estruturas de modelos conceituais e as características hidrológicas em bacias localizadas na região Sul do Brasil. Foram utilizados sete modelos desenvolvidos seguindo a estrutura proposta do SUPERFLEX. A existência de relação entre o desempenho das estruturas do modelo e as características hidrológicas das bacias foi verificada através de sete assinaturas hidrológicas. Além disso, foram utilizadas três métricas para avaliar a qualidade da incerteza associada aos resultados dos modelos e um critério de informação para determinar qual a melhor estrutura para cada bacia.

MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo deste trabalho é a região Sul do Brasil. Esta região é composta pelos estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul e possui uma área de 570.000 km². A região pode ser dividida em três regiões hidrográficas: bacia do Atlântico Sul; bacia do Paraná; e bacia do Uruguai.

De acordo com a classificação de Köppen-Geiger, o clima da região é subtropical úmido com verões quentes em altitude mais baixas e verões temperados em altitudes mais elevadas. A precipitação anual varia entre aproximadamente 1.200 mm nas extremidades norte e sul e 2.500 mm na costa norte (Chagas e Chaffe, 2018). A delimitação bacias e os dados de vazão, precipitação e evapotranspiração potencial foram obtidos a partir do banco de dados construído por Chagas e Chaffe (2018). As bacias foram delimitadas a partir das estações fluviométricas e dados altimétricos do STRM. Os dados de vazão foram obtidos da Agência Nacional de Águas (ANA, 2017), consistindo em dados diários estimados a partir de curva-chaves. Os dados de precipitação foram obtidos de Xavier *et al.* (2016), no qual os dados da ANA, Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e Departamento de Águas e Energia Elétrica de São Paulo (DAEE) foram utilizados para desenvolver grids de alta resolução ($0,25^\circ \times 0,25^\circ$) de precipitação diária. Os dados de evapotranspiração potencial foram obtidos do *Global Land Evaporation Amsterdam Model* (GLEAM) (Martens *et al.*, 2017; Miralles *et al.*, 2011). Foram escolhidas bacias com área entre 1.500 e 30.000 km², resultando em 61 bacias.

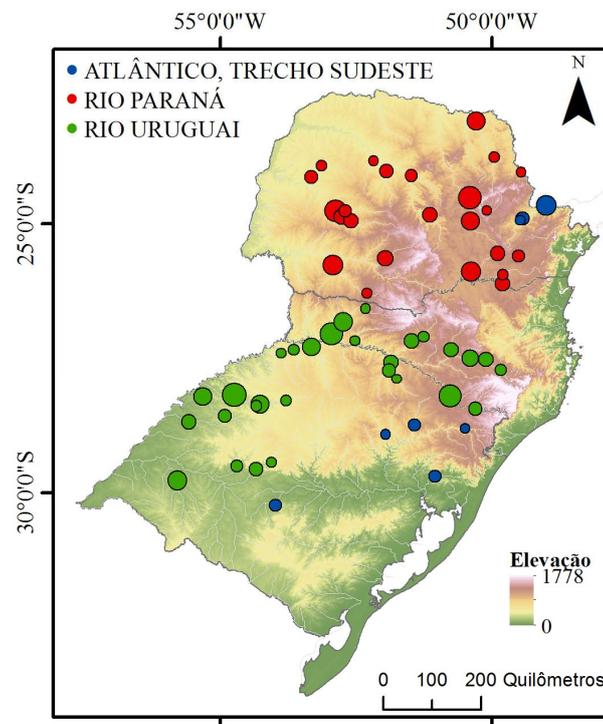


Figura 1 – Localização das 61 bacias hidrográficas utilizadas neste trabalho, na região Sul do Brasil. O tamanho do símbolo é proporcional à área da bacia.

Foram utilizadas sete estruturas de modelos construídas a partir do método SUPERFLEX (Figura 2): seis foram as mesmas que em Fenicia *et al.* (2014) – M03, M04, M07, M08, M09 e M11 – e uma foi uma nova combinação entre as estruturas M07 e M09, que chamamos de M13. A construção dos modelos de forma controlada permite atribuir as diferenças do desempenho às diferenças na estrutura do modelo. Pode-se testar a influência da utilização de conexões em série versus em paralelo, e a linearidade dos processos, por exemplo.

As estruturas M03 e M04 possuem uma estrutura em série. A M03 tem dois reservatórios. A precipitação entra no reservatório da zona não saturada e o armazenamento que excede um limiar

especificado transborda e entra no reservatório rápido. A estrutura M04 difere da M03 porque a vazão do reservatório da zona não saturada ocorre de acordo com uma função exponencial, ao invés de um limiar.

As estruturas M07, M08, M09, M11 e M13 possuem uma estrutura em paralelo. A M07 tem um reservatório da zona ripária, que recebe uma fração constante da precipitação total. Na M08 a precipitação é dividida em reservatórios lineares rápido e lento. A estrutura M09 difere da M08 pela inclusão de um reservatório de zona não saturada cuja saída é dividida em reservatórios rápido e lento, ambos lineares. A M11 difere da M09 incluindo uma função não linear no fluxo de saída do reservatório da zona não saturada. A M13 é semelhante à M09 com a inclusão de um reservatório da zona ripária.

A calibração das estruturas de modelo e a análise de incerteza foram realizadas usando o algoritmo de calibração automática *Differential Evolution Adaptive Metropolis* (DREAM_(ZS)) proposto por Laloy e Vrugt (2012). O DREAM usa a inferência Bayesiana para a estimativa conjunta dos valores dos parâmetros do modelo e sua incerteza. Os parâmetros do DREAM_(ZS) foram configurados para que o número de cadeias de Markov fosse $N = 3$ e o número de gerações $T = 15.000$. Em alguns casos, o T foi aumentado para garantir a convergência para uma distribuição estacionária. O período de calibração foi de 1985 a 1994 (10 anos) e a validação de 1995 a 2004 (10 anos). Em ambos os casos, foi considerado um período de *burnin* igual a um ano.

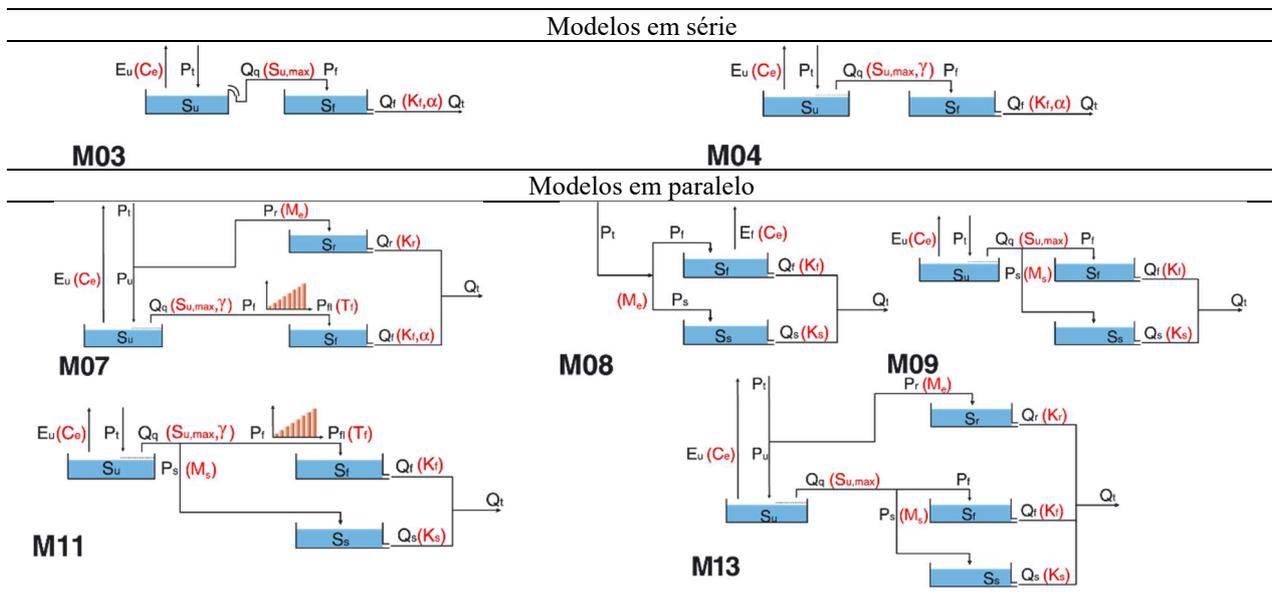


Figura 2 –Estruturas do SUPERFLEX consideradas neste estudo. Os parâmetros são apresentados em vermelho.

Neste trabalho, a *Generalized Likelihood function* (GL) proposta por Schoups e Vrugt (2010) foi utilizada como função de verossimilhança para a inferência dos parâmetros dos modelos hidrológicos. Testou-se diferentes modelos de erros a fim de encontrar o que melhor atendia às premissas consideradas a priori. O melhor encontrado foi aquele que considerava a heteroscedasticidade e a não normalidade dos resíduos. A heteroscedasticidade dos resíduos foi considerada assumindo que o desvio padrão do erro aumenta linearmente com a vazão simulada (e.g.

Evin *et al.*, 2014; Schoups e Vrugt, 2010; Westra *et al.*, 2014). A consideração da não normalidade foi feita com o uso da distribuição *Skewed Exponential Power* (SEP). O uso de um modelo AR(1) não foi suficiente para lidar com a autocorrelação dos resíduos, e para evitar os problemas encontrados quando o modelo AR(1) é empregado (como incerteza ruim e alta correlação com o parâmetro σ_1 , como apresentado em Evin *et al.* (2013)), decidiu-se considerar apenas uma decimação das séries de dados, como feito em outros estudos hidrológicos (e.g. Westra *et al.*, 2014). Os modelos foram recalibrados usando um conjunto de dados composto por um valor de vazão a cada k dias. Valores de k iguais a 2, 4, 5, 6 e 10 foram testados em algumas bacias, resultando em intervalos de 2, 4, 5, 6 e 10 dias, respectivamente. A partir de 4 dias não houve uma redução significativa da correlação. Foi escolhido um k de 5 dias. Os parâmetros do modelo de resíduos foram inferidos em conjunto com os parâmetros do modelo hidrológico. Foi utilizada uma distribuição a priori uniforme para cada parâmetro com intervalos especificados na Tabela 1.

Os últimos 5.000 conjuntos de parâmetros amostrados com o algoritmo DREAM_(ZS) foram usados para determinar a distribuição a posteriori dos parâmetros e para criar as a faixa de incerteza associada aos resultados das simulações. O desempenho de cada modelo foi avaliado usando três métricas: a confiabilidade da faixa de incerteza; a precisão, que está relacionada com a espessura da faixa de incerteza; e o viés volumétrico, que avalia a capacidade do modelo em simular o balanço hídrico. Para todas as métricas consideradas, o valor zero indica um desempenho perfeito. Detalhes das métricas estão em David *et al.* (2019). Para determinar qual estrutura de modelo é a melhor para cada bacia, foi utilizado o critério de informação de Bayes (BIC). Este critério avalia qual hipótese (i.e. qual modelo) é melhor suportada pelos dados e é calculado a partir do valor da função de verossimilhança associado ao conjunto ótimo de parâmetros, do número de parâmetros e do número de observações utilizadas na inferência.

Tabela 1 – Descrição dos parâmetros dos modelos hidrológicos e do erro e intervalos mínimo e máximo utilizados como limites da distribuição uniforme (distribuição a priori) utilizada na calibração.

Parâmetro	Descrição	Mín	Máx	Unidade
Modelo Hidrológico				
C_e	Eficiência de evaporação	0,01	2	-
$S_{u,max}$	Capacidade de armazenamento da zona não saturada	0,1	700	mm
γ	Parâmetro de não linearidade do reservatório da zona não saturada	0,001	20	-
M_e	Coefficiente de repartição da entrada entre reservatórios	0,01	0,99	-
M_s	Proporção do fluxo direcionado para o reservatório lento	0,01	0,99	-
α	Parâmetro de não linearidade do reservatório rápido	1,0	20	-
K_r	Coefficiente de recessão do reservatório da zona ripária	0,01	10	h ⁻¹
K_f	Constante de recessão do reservatório rápido	0,001	1	mm ^{1-α} h ⁻¹
K_s	Constante de recessão do reservatório lento	0	1	h ⁻¹
Modelo do erro				
σ_0	Coefficiente linear do modelo heteroscedástico	0	1	mm h ⁻¹
σ_1	Coefficiente angular do modelo heteroscedástico	0	1	-
β	Parâmetro de curtose	-1	1	-
ξ	Parâmetro de assimetria	0	10	-

Para relacionar as estruturas dos modelos com os processos hidrológicos dominantes foram utilizadas sete assinaturas hidrológicas, buscando-se representar diferentes processos. Para o cálculo destas assinaturas foi utilizado o período de 1985 a 2004. As seguintes assinaturas foram consideradas: elasticidade da vazão (EQP); índice de aridez (AI); taxa de escoamento (RR); índice de escoamento de base (BFI); inclinação da curva de permanência (SFDC); vazão que é excedida 10% do tempo (Q_{10}); e vazão que é excedida 90% do tempo (Q_{90}). Com elas as bacias foram agrupadas em *clusters* utilizando o método de agrupamento *k-means*, com o objetivo de verificar se bacias do mesmo grupo são melhor representadas pela mesma estrutura de modelo. Foram ainda consideradas as seguintes características físicas e climáticas para verificar sua influência no desempenho dos modelos: precipitação média anual (P.média); número de dias com chuva (DC); índice de sazonalidade da precipitação (PSI); porcentagens de argila e areia; declividade média; e razão do relevo (*relief*). Detalhes de cálculos e definições das assinaturas e características podem ser encontrados em Sawicz *et al.* (2014).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A melhor estrutura para cada bacia, determinada a partir do critério de informação BIC, é apresentada na Figura 3, junto com os grupos formados com as assinaturas hidrológicas e a distribuição dos valores das assinaturas separadas de acordo com o melhor modelo. Em apenas uma bacia uma estrutura em série, a M04, foi a melhor. No restante, estruturas que possuem um reservatório da zona não saturada seguido de reservatórios em paralelo foram as melhores. A M03 e a M08 não foram melhores para nenhuma bacia. Quando comparadas com os grupos, não foi possível encontrar uma estrutura que represente as bacias de cada um, sendo que para os grupos 3 e 5 uma estrutura foi a melhor para a maioria das bacias, a M13 (Tabela 2).

Tabela 2 – Grupos encontrados com o cluster e número de bacias que tiveram cada estrutura como melhor.

Grupo/Modelos	M04	M07	M09	M11	M13	Total
1		1	5	3	3	12
2	1	1	1	2	2	7
3		3		3	10	16
4			1	2	2	5
5		2	2	5	12	21
Total	1	7	9	15	29	61

Quando as assinaturas são vistas separadas pela melhor estrutura, não há uma diferença significativa entre elas na maioria dos casos (Figura 3). Observa-se que as bacias cuja melhor estrutura foi a M07 ou a M13 possuem menores índices de aridez (AI), enquanto as medianas para as outras estruturas são próximas. Os modelos M09 e M11 diferem entre si pela não linearidade do reservatório da zona não saturada do M11. Observa-se que na maioria das assinaturas a mediana desses dois modelos foi bastante semelhante, mostrando que esse parâmetro pode não estar relacionado com nenhuma dessas características hidrológicas. O mesmo acontece entre a M07 e a M13, que diferem

pela inclusão de um reservatório lento. Já entre a M09 e a M13 as assinaturas de taxa de escoamento (RR) e índice de aridez (AI) tiveram uma maior diferença. As bacias que tiveram como melhor estrutura a M09 e a M11 são mais áridas que as que tiveram como melhor estrutura a M07 e a M13. Ou seja, o reservatório da zona ripária pode estar relacionado com a aridez e umidade da bacia. As bacias do M07 possuem um índice de escoamento de base (BFI) menor. Esta estrutura não apresenta um reservatório lento, que representa o escoamento subterrâneo.

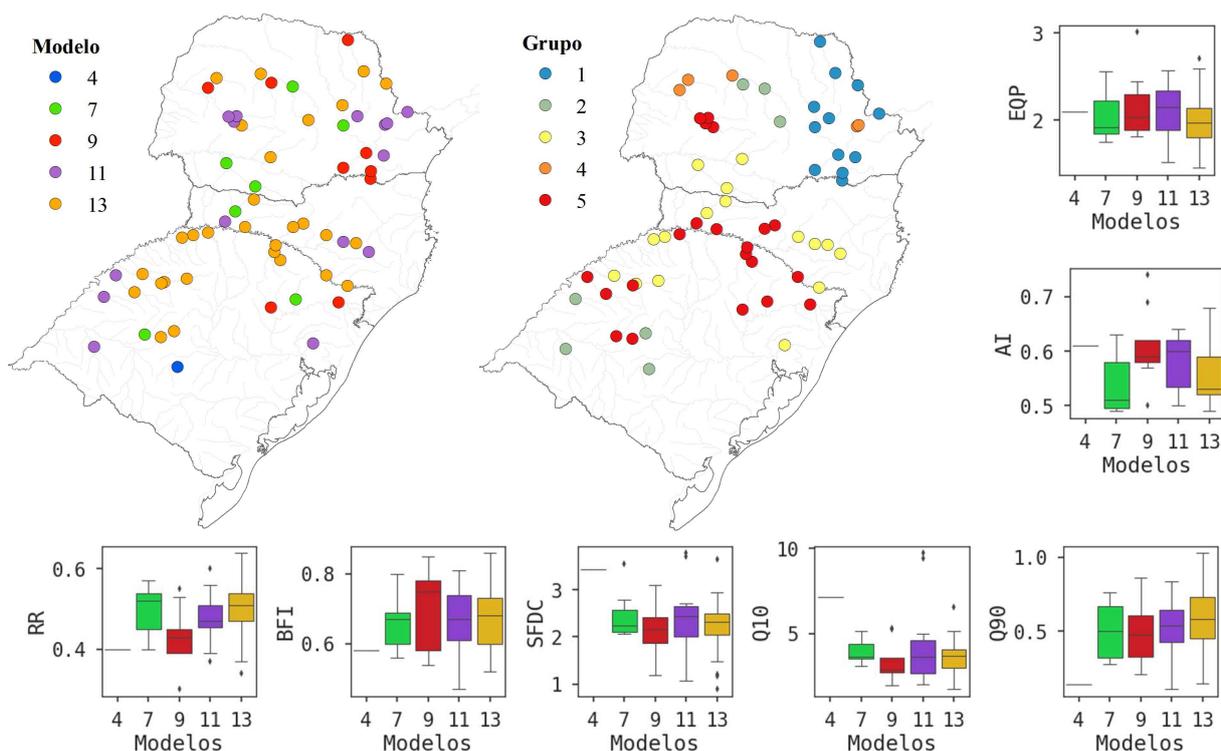


Figura 3 – Melhor modelo para cada bacia, grupos encontrados com o cluster e a distribuição dos valores das assinaturas separadas de acordo com o melhor modelo.

As métricas consideradas foram avaliadas espacialmente para todas as estruturas de modelo. O período de validação foi utilizado para a análise, uma vez que é um período independente daquele utilizado na calibração. A Figura 4 apresenta o resultado para a precisão (resultados para as métricas de viés volumétrico e confiabilidade não apresentados). Apesar da M13 ser a mais complexa - com 8 parâmetros - ela teve um bom resultado, quando consideradas as três métricas. É possível observar que algumas bacias sempre apresentam um resultado inferior às demais (para as três métricas), como por exemplo no sul do Rio Grande do Sul, mostrando que elas são mais difíceis de simular que as outras. Por outro lado, algumas bacias no Paraná apresentam resultados superiores em quase todas as estruturas; ou seja, elas são mais fáceis de simular.

As métricas foram analisadas separadamente para cada grupo de bacias formado com as assinaturas hidrológicas (resultados não apresentados). Para cada grupo, não foi possível observar uma estrutura que apresente um desempenho melhor que as outras. As bacias dos grupos 3 e 5 foram as que apresentaram a melhor confiabilidade para todas as estruturas. Estas bacias são as mais úmidas

(menor índice de aridez e alta taxa de escoamento), que, assim como já foi encontrado em outros trabalhos, são mais fáceis de simular. Já as bacias com maior índice de aridez (grupos 1 e 4) apresentam viés volumétrico e confiabilidade um pouco piores.

Para a maioria das bacias não há uma grande diferença entre as métricas das estruturas M07, M09, M11 e M13, tanto na calibração quanto na validação, e todas com bons resultados. As estruturas M03, M04 e M08 apresentam resultados piores do que as outras estruturas. Na maioria das vezes não é possível escolher a melhor estrutura a partir delas, uma vez que os valores são próximos e nenhuma estrutura tem as três métricas melhores ao mesmo tempo. Essas estruturas têm em comum um reservatório da zona não saturada e reservatórios em paralelo independentes com diferentes coeficientes de recessão. Não foi possível observar uma melhora da precisão e viés volumétrico com a inclusão da não linearidade do reservatório da zona não saturada (M09 vs. M11), ou a inclusão do reservatório da zona ripária (M09 vs. M13). A inclusão de um reservatório lento (M07 vs. M13) melhorou a métrica de confiabilidade. Dentre as estruturas em paralelo, a que teve pior desempenho foi o M08, que não possui um reservatório da zona não saturada.

Apesar de algumas estruturas possuírem o mesmo número de parâmetros – por exemplo M04 e M09, com 5 cada - o desempenho delas foi bastante diferente. A principal diferença entre elas é a inclusão de um reservatório lento em paralelo com o rápido na M09. Já entre a M07 e a M11, ambas com 7 parâmetros, o desempenho não foi tão diferente, quando consideradas todas as métricas. A saída das duas estruturas é composta por reservatórios em paralelo.

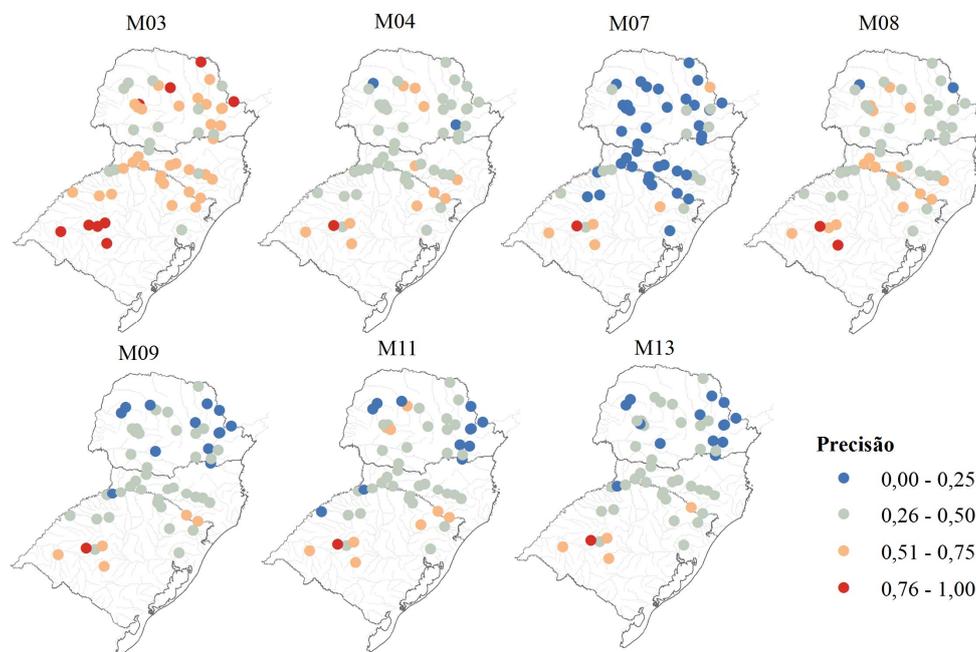


Figura 4 – Distribuição espacial da métrica de precisão para as estruturas consideradas.

As características físicas e climáticas apresentaram alguns padrões com as estruturas (Figura 5). O teste de Kruskal-Wallis foi aplicado para verificar se pelo menos uma estrutura possui a distribuição das características diferente das outras. A porcentagem de areia, argila e razão de relevo

apresentaram pelo menos uma das estruturas com uma distribuição diferente das demais. Isso é um indicativo que estas características têm maior influência no processo chuva-vazão do que as demais. As bacias cuja melhor estrutura foram M07 ou M13 apresentam maior porcentagem de argila, precipitação média anual e razão de relevo. Essas bacias são as mais úmidas e possuem menor permeabilidade do solo. Isto pode ser um indicativo da menor importância do reservatório lento (não existente no M07) e da importância do reservatório da zona ripária.

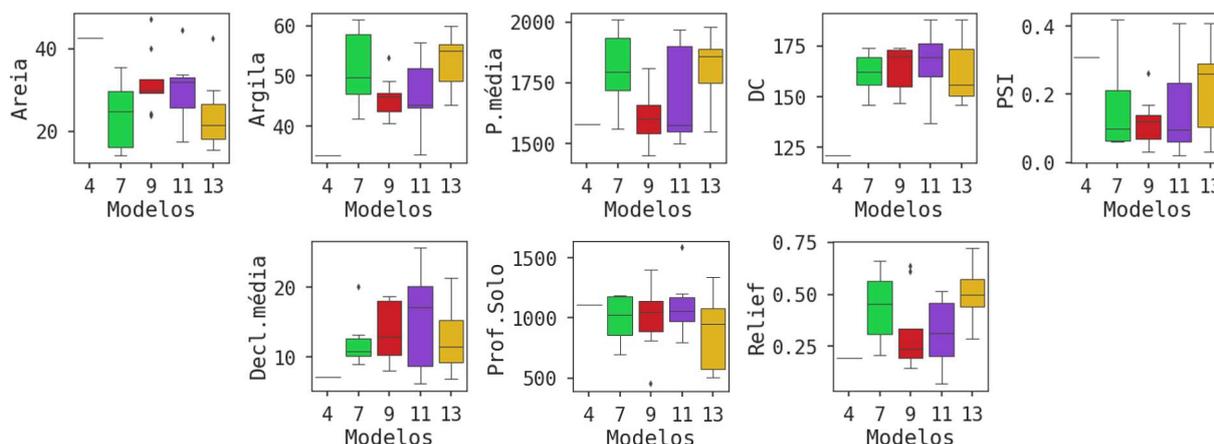


Figura 5 – Distribuição das características físicas e climáticas separadas de acordo com o melhor modelo.

CONCLUSÕES

Este trabalho buscou analisar a relação entre estruturas de modelos hidrológicos conceituais e características hidrológicas das bacias. Para isso, sete estruturas do SUPERFLEX, sete assinaturas hidrológicas e nove características físicas e climáticas foram usadas. Quando analisadas as métricas de viés volumétrico, precisão e confiabilidade, estruturas que apresentam um reservatório da zona não saturada seguido de reservatórios em paralelo obtiveram resultados semelhantes entre si para cada bacia.

Para quase metade das bacias analisadas a mesma estrutura foi considerada a melhor, a M13, e as restantes possuem estruturas que não diferem muito entre si. As bacias foram agrupadas em cinco grupos de acordo com as assinaturas hidrológicas com o objetivo de avaliar se bacias hidrológicamente semelhantes são melhor simuladas pela mesma estrutura. Em dois dos cinco grupos uma estrutura foi a melhor para a maioria das bacias, a M13. Para os outros grupos, a melhor estrutura variou principalmente entre as estruturas M07, M09, M11 e M13. Essas estruturas têm em comum a presença de um reservatório da zona não saturada e dois reservatórios em paralelo.

Apesar de ser uma área extensa, é possível que os processos hidrológicos dominantes das bacias analisadas neste trabalho sejam semelhantes, por isso as melhores estruturas foram semelhantes. Outro fator a ser levado em conta é a área das bacias, que varia entre 1.500 e 10.000 km². Bacias maiores são mais heterogêneas, e por isso pode ser mais difícil identificar os processos dominantes quando são tratadas de maneira concentrada pelos modelos. Para os próximos trabalhos, recomenda-

se usar bacias hidrográficas de regiões diferentes do país, para se obter um conjunto de bacias com características físicas, climáticas e hidrológicas mais abrangentes.

AGRADECIMENTOS - O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 88881146046201701. A segunda autora agradece a CAPES pela bolsa de Doutorado Pleno no Exterior - processo nº 88881.174456/2018-01. O terceiro autor agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de estudos.

REFERÊNCIAS

- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. (2017). *HidroWeb: Sistema de Informações Hidrológicas*. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/>>.
- BUTTS, M. B. et al. (2004). *An evaluation of the impact of model structure on hydrological modelling uncertainty for streamflow simulation*. Journal of Hydrology, v. 298, n. 1–4, p. 242–266.
- CHAGAS, V. B. P.; CHAFFE, P. L. B. (2018). *The Role of Land Cover in the Propagation of Rainfall Into Streamflow Trends*. Water Resources Research, p. 5986–6004.
- CLARK, M. P. et al. (2008). *Framework for Understanding Structural Errors (FUSE): A modular framework to diagnose differences between hydrological models*. Water Resources Research, v. 44, n. 12, p. 1–14.
- CLARK, M. P.; KAVETSKI, D.; FENICIA, F. (2011). *Pursuing the method of multiple working hypotheses for hydrological modeling*. Water Resources Research, v. 47, n. 9, p. 1–16.
- DAVID, P. C. et al. (2019). *Systematic increase in model complexity helps to identify dominant streamflow mechanisms in two small forested basins*, Hydrological Sciences Journal.
- EVIN, G. et al. (2013). *Pitfalls and improvements in the joint inference of heteroscedasticity and autocorrelation in hydrological model calibration*. Water Resources Research, v. 49, n. 7, p. 4518–4524.
- EVIN, G. et al. (2014). *Comparison of joint versus postprocessor approaches for hydrological uncertainty estimation accounting for error autocorrelation and heteroscedasticity*. Water Resources Research, v. 50, n. 3, p. 2350–2375.
- FENICIA, F.; KAVETSKI, D.; SAVENIJE, H. H. G. (2011). *Elements of a flexible approach for conceptual hydrological modeling: 1. Motivation and theoretical development*. Water Resources Research, v. 47, n. 11, p. 1–13.
- FENICIA, F. et al. (2014). *Catchment properties, function, and conceptual model representation: Is there a correspondence?* Hydrological Processes, v. 28, n. 4, p. 2451–2467.
- GUPTA, H. V. et al. (2014). *Large-sample hydrology: A need to balance depth with breadth*. Hydrology and Earth System Sciences, v. 18, n. 2, p. 463–477.
- KAVETSKI, D.; FENICIA, F. (2011). *Elements of a flexible approach for conceptual hydrological modeling: 2. Application and experimental insights*. Water Resources Research, v. 47, n. 11, p. 1–19.
- LALOY, E.; VRUGT, J. A. (2012). *High-dimensional posterior exploration of hydrologic models using multiple-try DREAM (ZS) and high-performance computing*. Water Resources Research, v. 48, n. 1, p. 1–18.
- MARTENS, B. et al. (2017). *GLEAM v3: Satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture*. Geoscientific Model Development, v. 10, n. 5, p. 1903–1925.
- MIRALLES, D. G. et al. (2011). *Global land-surface evaporation estimated from satellite-based observations*. Hydrology and Earth System Sciences, v. 15, n. 2, p. 453–469.
- SAWICZ, K. A. et al. (2014). *Characterizing hydrologic change through catchment classification*. Hydrology and Earth System Sciences, v. 18, n. 1, p. 273–285.
- SCHOUPS, G.; VRUGT, J. A. (2010). *A formal likelihood function for parameter and predictive inference of hydrologic models with correlated, heteroscedastic, and non-Gaussian errors*. Water Resources Research, v. 46, n. 10, p. 1–17.
- VAN ESSE, W. R. et al. (2013). *The influence of conceptual model structure on model performance: A comparative study for 237 French catchments*. Hydrology and Earth System Sciences, v. 17, n. 10, p. 4227–4239.
- WESTRA, S. et al. (2014). *A strategy for diagnosing and interpreting hydrological model nonstationarity*. Water Resources Research, p. 1–24.
- XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. (2016). *Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013)*. International Journal of Climatology, v. 36, n. 6, p. 2644–2659.