

## XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

# APLICAÇÃO DE UM NOVO CRITÉRIO DE PARADA PARA ALGORITMOS EVOLUCIONÁRIOS DE OTIMIZAÇÃO MULTI-OBJETIVO NA CALIBRAÇÃO AUTOMÁTICA DE MODELOS HIDROLÓGICOS

*Juan Carlos Ticona Gutierrez<sup>1</sup>; Franciele Maria Vanelli<sup>1</sup> & Juan Martin Bravo<sup>2</sup>*

**RESUMO** – Os algoritmos evolucionários multi-objetivo são utilizados na calibração automática de modelos hidrológicos. O critério de parada tradicional comumente utilizado é um número máximo de gerações. Entretanto, uma recente proposta se baseia no número máximo de vezes consecutivas que o tamanho da população é mantido após ultrapassar um número mínimo de gerações durante o processo iterativo. Dessa forma, o presente estudo objetivou comparar o desempenho de dois critérios de parada em três algoritmos evolucionários multi-objetivo (NSGA-II, NSGA-III e SPEA-II) na calibração automática do modelo hidrológico IPH II em duas bacias hidrográficas com características morfológicas distintas. Os valores dos parâmetros da melhor solução do conjunto ótimo de Pareto encontrada pelos algoritmos e utilizando ambos os critérios de paradas foram similares. Os resultados indicam que o critério de parada recentemente proposto apresenta desempenho aproximado ao do critério de parada tradicional em termos dos valores dos parâmetros encontrados, mas com grande ganho em eficiência pela redução do tempo computacional em 70% aproximadamente. Esses resultados foram observados em ambas as bacias hidrográficas.

**ABSTRACT**– Multi-objective evolutionary algorithms are used in the automatic calibration of hydrological models. The traditional stopping criterion commonly used is a maximum number of generations. However, a recent proposal is based on the maximum number of consecutive times that population size is maintained after exceeding a minimum number of generations during the iterative process. Thus, the present study aimed to compare the performance of two stopping criteria in three multi-objective evolutionary algorithms (NSGA-II, NSGA-III and SPEA-II) in the automatic calibration of the IPH II hydrological model in two basins with different morphological characteristics. The values of the best solution parameters of the optimal Pareto set found by algorithm and using both stop criteria were similar. The results indicate that the recently proposed stopping criterion presents an approximate performance of the traditional stopping criterion in terms of the parameter values found, but with a great improvement in efficiency due to the reduction of computational time by 70%, approximately. These results were observed in both basins.

**Palavras-Chave** – IPH II; Otimização Multiobjetivo.

---

1) Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental - IPH/UFRGS

2) Professor – IPH/UFRGS

E-mail: juan.ticona@ufrgs.br

## 1. INTRODUÇÃO

Os modelos hidrológicos são representações do ciclo hidrológico pela aplicação de um conjunto de equações matemáticas com parâmetros e variáveis que caracterizam o comportamento hidrológico de bacia. Existem diferentes combinações de parâmetros capazes de representar os dados observados. Isso se deve às incertezas inerentes aos dados, às simplificações do modelo e da representatividade dos parâmetros (Collischon e Tucci, 2003). Nesse sentido, métodos de calibração utilizando algoritmos de otimização mono-objetivo ou multi-objetivo têm sido utilizados. Enquanto a otimização mono-objetivo encontra um máximo global ou mínimo global, a otimização multi-objetivo resulta em um conjunto de soluções, conhecido como região de Pareto, ou região de soluções não inferiores ou não dominadas (Yapo *et al.*, 1998).

Algoritmos evolucionários simulam os princípios básicos do processo evolutivo em um conjunto de indivíduos (soluções), através dos chamados operadores evolutivos, que incluem: atributos de aptidão, seleção, *crossover*, mutação e elitismo (Coello *et al.*, 2007). A maioria dos algoritmos evolucionários multi-objetivos (MOEAs) emprega o conceito de Pareto para diferenciar soluções e orientar a busca no espaço (Coello *et al.*, 2007). No entanto, a otimização multiobjetivo pode gerar uma perda do desempenho do algoritmo à medida que o tamanho da população e as funções objetivas aumentam. Dessa forma, deve ser indicado um critério de parada para analisar quando as soluções atingidas são aceitáveis e o cálculo adicional não é justificado.

Para aplicação da calibração automática em modelos hidrológicos é necessário definir os seguintes elementos dos algoritmos evolucionários: (1) funções objetivo, (2) algoritmo de otimização, (3) critério de parada (Bravo *et al.* 2007). Nesse sentido, o presente artigo realizou a calibração automática assumindo duas funções objetivo em três diferentes MOEAs (NSGA-II, NSGA-III e SPEA-II) testando dois critérios de parada: o tradicional (baseado em atingir um determinado número de gerações) e o proposto por Ticona *et al.* (2019) em duas bacias hidrográficas com características morfológicas distintas.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Dados bacia hidrográfica do Rio Ijuí

A bacia do Rio Ijuí está localizada na região noroeste do Rio Grande do Sul e apresenta a área de drenagem de 5.414 km<sup>2</sup>. O relevo é composto de colinas em regiões de campos com declividades suaves que variam entre 3 a 15%. O tempo de concentração estimado pela fórmula de Kirpich é de 2 dias. O levantamento de dados hidrológicos foi realizado na base de dados do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) da Agência Nacional de Águas (ANA) no período de 01/01/2003 a 31/12/2018. A Tabela 1 apresenta a identificação das estações de monitoramento utilizadas. A Figura 1 apresenta o hietograma e o hidrograma para as simulações na

bacia Ijuí, sendo o período de calibração entre 2010 a 2018 e de validação 2003 a 2005. O período entre 2006 a 2009 não foi utilizado devido às falhas nas séries.

Tabela 1 - Informações meteorológicas e hidrológicas para a bacia do rio Ijuí

Código	Tipo	Nome	Latitude	Longitude	Período
75230000	Fluviométrica	Santo Ângelo	-28,36	-54,27	01/01/2003 a 31/12/2018
2853003	Pluviométrica	Conceição	-28,46	-53,97	
2853010		Passo Faxinal	-28,29	-53,78	
2853023		Condor	-28,23	-53,47	
2853034		Panambi	-28,34	-53,54	
2853035		Nova Ramada	-28,07	-53,68	
83912	Climatológica	Cruz Alta	-28,63	53,60	Normal climatológica

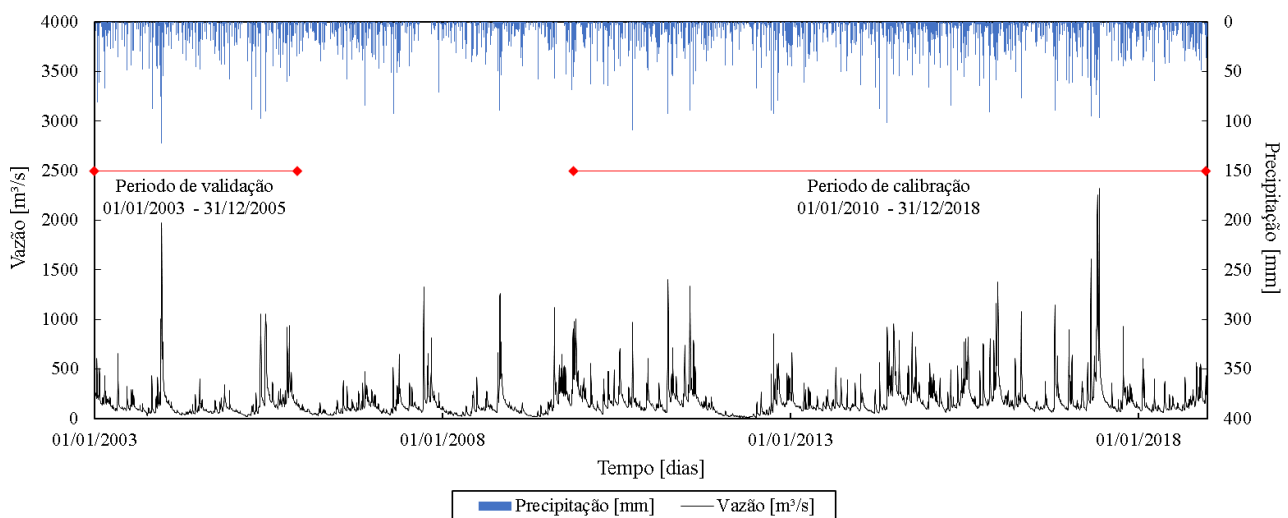


Figura 1 - Períodos de calibração e validação escolhidos, para as simulações na bacia Ijuí.

## 2.2. Dados bacia hidrográfica Vila Canoas

A bacia hidrográfica Vila Canoas se localiza em Santa Catarina e sua área de drenagem é de 989 km<sup>2</sup>. Diferentemente da bacia descrita anteriormente, a bacia Vila Canoas se localiza em uma região montanhosa, de solos altamente rasos sobre rochas basálticas e porções de arenitos, com predominância de campos, florestas esparsas em áreas de maior declividade, e algumas áreas de cultivo e reflorestamento. O tempo de concentração foi estimado em 2 dias pela fórmula de Kirpich.

O levantamento de dados hidrológicos foi realizado na base de dados do SNIRH/ANA. A Tabela 2 apresenta a identificação das estações de monitoramento utilizadas e a Figura 2 ilustra o hietograma e o hidrograma para as simulações na bacia Vila Canoas, sendo o período de calibração entre 1977 a 1990 e de validação 1996 a 2001. O período de 1991 a 1995 não foi utilizado devido às falhas nas séries.

## 2.3. Modelo Hidrológico

O modelo hidrológico denominado IPH II é um modelo concentrado, descrito por equações que representam: perdas por evaporação e interceptação, separação do escoamento e propagação

dos escoamentos superficial e subterrâneo (Tucci, 1998; Tassi *et al.* 2006). Os dados de entrada são dados de precipitação e evaporação. Também devem ser informadas as características da bacia hidrográfica: área ( $A$ , km<sup>2</sup>), percentual de área impermeável ( $AIMP$ , %), fator de forma da bacia ( $n$ ) e tempo de concentração ( $t_c$ ). Além disso, a condição inicial de algumas variáveis também deve ser definida. Informações mais detalhadas podem ser obtidas em Bravo *et al.* (2006a, b).

Tabela 2 – Informações meteorológicas e hidrológicas para a bacia do rio Vila Canoas

Código	Tipo	Nome	Latitude	Longitude	Período
71200000	Fluviométrica	Vila Canoas	-27,80	-49,78	01/01/1977 a 31/12/2014
02849023	Pluviométrica	Despraiado	-28,37	-49,81	
02849021		Urubici	-28,01	-49,59	
02749031		Vila Canoas	-27,80	-49,78	
83912	Climatológica	Urubici	-27,94	-49,86	Normal climatológica

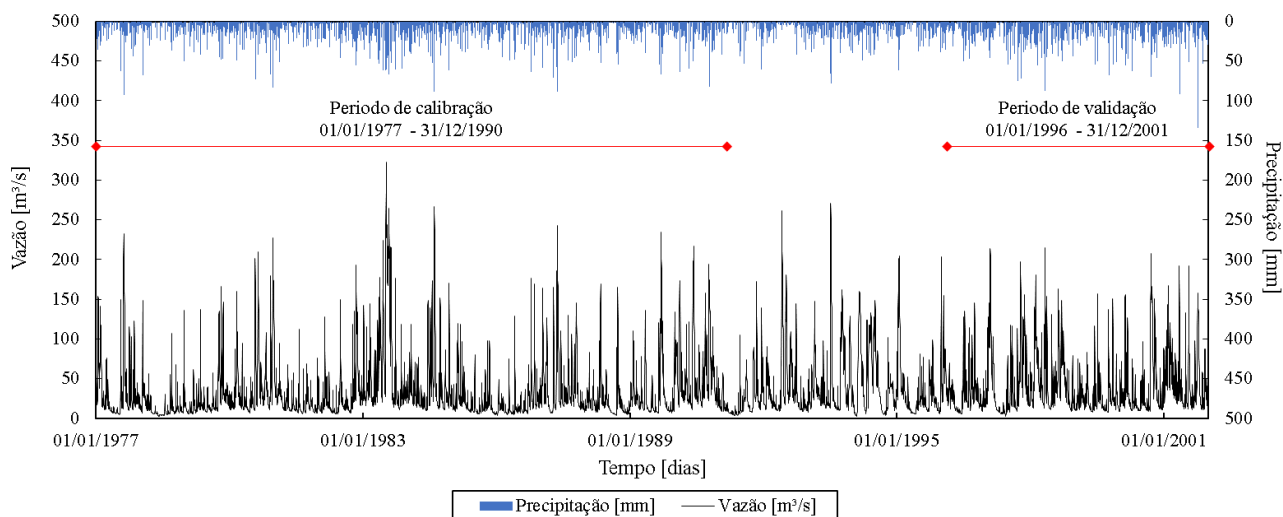


Figura 2 - Períodos de calibração e validação escolhidos, para as simulações na bacia Vila Canoas.

## 2.4. Funções objetivo

A calibração do modelo hidrológico considerou duas funções objetivo: a raiz quadrada do erro médio quadrático das inversas das vazões ( $RMSE_{inv}$ ) e o coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe (NS). O uso dessas duas funções objetivo tende a resultar melhor representação do hidrograma, pois o NS tende a priorizar a representação das vazões máximas (Legates *et al.* 1999, Moussa *et al.* 2008), enquanto o  $RMSE_{inv}$ , as vazões mínimas (Pushpalatha *et al.* 2012, Garcia *et al.* 2017). O valor de  $RMSE_{inv}$  varia de 0 a  $+\infty$ , onde 0 é o valor ótimo, indicando total compatibilidade entre os dados observados e simulados. Enquanto que o NS varia de  $-\infty$  até 1, sendo 1 o valor ótimo. Em modelos hidrológicos, os resultados do NS podem ser classificados como: insatisfatório para  $NS < 0,5$ ; satisfatório para  $0,5 < NS < 0,65$ ; bom para  $0,65 < NS < 0,75$ ; e muito bom para  $0,75 < NS < 1$  (Moriassi *et al.* 2007; Lin *et al.* 2017).

## 2.5. Calibração multi-objetivo usando algoritmos genéticos

No presente estudo foram utilizados três MOEAs:

- NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II), desenvolvido por Deb *et al.* (2002), é um MOEA cuja formulação incorpora os conceitos de elitismo, visando a conservação das melhores soluções, e de dominância, através da hierarquização baseada na não-dominância. A diversidade é preservada pela aplicação da comparação de distância de aglomeração, que corresponde a uma medida da proximidade de uma solução com sua vizinhança. A distância de aglomeração é calculada como a soma dos valores individuais de distância para cada objetivo.
- NSGA-III (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm III) é similar ao algoritmo original NSGA-II exceto pela substituição do operador de distância de aglomeração.
- SPEA-II (Strength Pareto Evolutionary Algorithm II), desenvolvido inicialmente por Zitzler *et al.* (1999) foi aprimorado por Zitzler *et al.* (2001). Este algoritmo possui uma estratégia de atribuição de aptidão refinada, uma técnica de estimativa de densidade e um método de truncamento de arquivo aprimorado.

## 2.6. Critério de parada

No presente estudo, o critério de parada tradicional adotado foi o número de gerações ( $N_{Gen}$ ). Enquanto no critério de parada proposto por Ticona *et al.* (2019) leva em consideração o tamanho da população ( $N_p$ ), número mínimo de gerações ( $I_{min}$ ) e o número máximo de vezes consecutivas que o  $N_p$  é mantido depois de ultrapassar o  $I_{min}$ , durante o processo iterativo ( $Count_{Max}$ ). A Figura 3 apresenta o fluxograma do algoritmo genético com critério de parada tradicional e com o critério de parada proposto por Ticona *et al.* (2019).

## 2.7. Valores dos parâmetros dos critérios de parada

As simulações foram realizadas utilizando o MATLAB R2010a versão 7.10.0.499, no PC com processador Intel Core i7 operando a 2,40 GHz com 16 GB de RAM. Durante a calibração do modelo hidrológico, adotou-se para o critério de parada tradicional,  $N_p = 100$  e  $N_{gen} = 500$  como sugerido por Pushpalatha *et al.* (2012) e Yapó *et al.* (1998). Para o critério de parada proposto, utilizaram-se  $N_p = 100$ ,  $I_{min} = 110$  e  $Count_{max} = 10$  como sugeridos por Ticona *et al.* (2019).

## 2.8. Seleção dos parâmetros para o modelo hidrológico

O procedimento de calibração automática foi iniciado 20 vezes com cada algoritmo e utilizando cada critério de parada. Como é possível obter diferentes Frentes de Pareto (FP) do mesmo MOEA, para seleção da melhor solução, primeiramente seleciona-se a melhor Frente de Pareto e, em seguida, a melhor solução dentre as soluções da FP.

Assim, o critério utilizado para escolher o melhor FP é o menor valor correspondente a Distância Média Euclidiana ( $D_{i,w}$ ) quando o critério de parada é satisfeito.

$$D_{i,w} = \left[ \frac{1}{ND_i} \sum_{j=1}^{ND_i} (OF_{1(i,j)} - OF_{1rel})^2 + (OF_{2(i,j)} - OF_{2rel})^2 \right]^{0.5} \quad (1)$$

A partir da FP escolhida, é feita a seleção da melhor solução a partir das duas funções objetivo:

$$R_s = [(OF_{1(s)} - OF_{1rel})^2 + (OF_{2(s)} - OF_{2rel})^2]^{0.5} \quad (2)$$

$$D_{min} = \min \{R_1, R_2, R_3, \dots, R_{N_p}\} \quad (3)$$

onde:  $OF_{1(i,j)}$  e  $OF_{2(i,j)}$  é o  $j$ -ésima solução não-dominada do FP na geração  $i$  da tentativa  $w$ ;  $ND_i$  é o número de soluções não-dominadas para geração  $i$ ;  $OF_{1(s)}$  and  $OF_{2(s)}$  é a  $s$ -ésima solução não-dominada da FP na geração final;  $OF_{1rel}$  e  $OF_{2rel}$  é um ponto ótimo relativo (i.e.  $OF_{1rel} = 0$  e  $OF_{2rel} = 1$ );  $N_p$  é o número de soluções da FP na geração final.

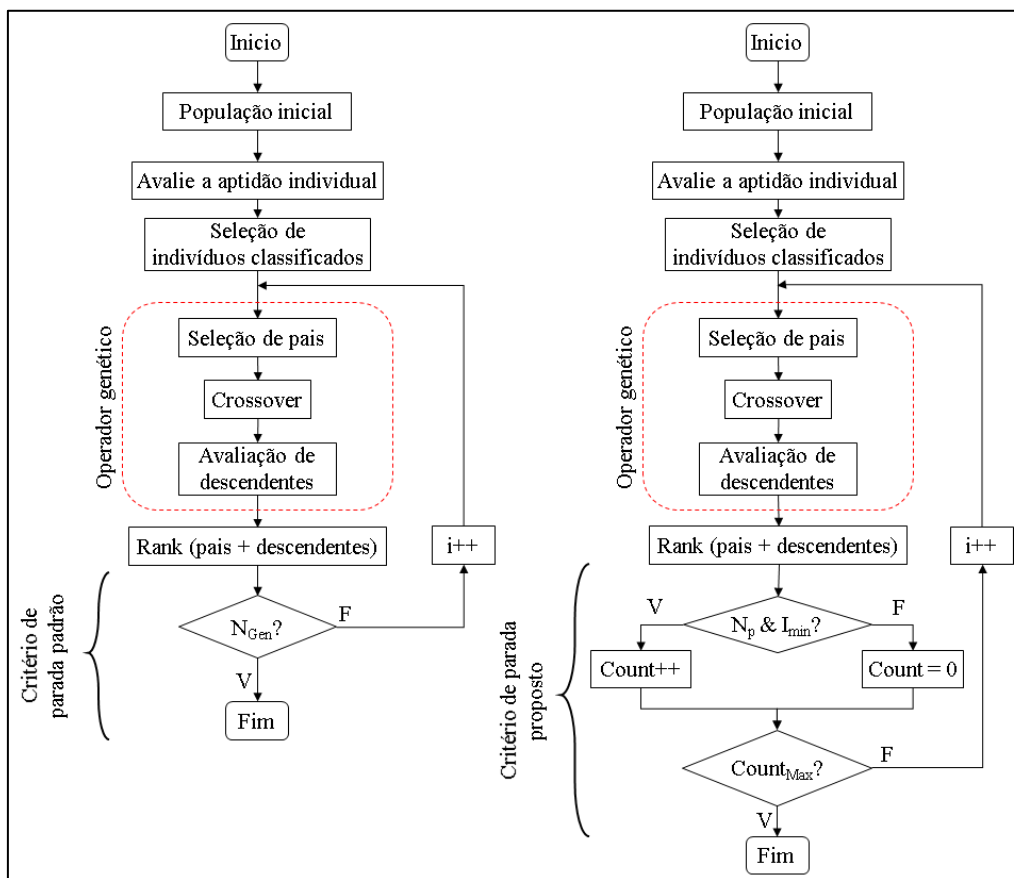


Figura 3 - Fluxograma do AG com critério de parada tradicional e o critério de parada proposto.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Critério de parada tradicional vs Critério de parada proposto: métricas de desempenho e melhores resultados de PF

A melhor solução, aquela com a menor distância média ( $D_{i,w}$ ), foi selecionada a partir das vinte tentativas de calibração ( $w = 1, \dots, 20$ ) realizadas com cada algoritmo evolucionário (Tabela 3). O valor da menor distância média obtida pelo uso do critério de parada proposto por Ticona *et*



al. (2019) se aproximou à menor distância média obtida na aplicação do critério tradicional ( $D_{500, w}$ ).

Tabela 3 - Valores da menor distância média obtida para as frentes de Pareto com cada algoritmo, com o critério de parada tradicional ( $D_{500, w}$ ) e o proposto ( $D_i, w$ ).

Algoritmo	Bacia Ijuí			Bacia Vila Canoas		
	$D_{500, w}$	i	$D_i, w$	$D_{500, w}$	i	$D_i, w$
NSGA-II	0,1930	132	0,2079	0,1721	168	0,1727
NSGA-III	0,1937	121	0,1949	0,1736	168	0,1781
SPEA-II	0,1960	121	0,2054	0,1745	123	0,1831

No processo de calibração do IPH-II para a bacia Ijuí (Figura 4 a), NSGA-II e NSGA-III precisaram similar tempo computacional, de 10 min, enquanto o SPEA-II levou 9 min para o critério de parada tradicional. Nas simulações utilizando o critério de parada proposto Ticona *et al.* (2019), o tempo computacional médio do NSGA-II, NSGA-III e SPEA-II foi de 3, 3 e 2 min, respectivamente. Enquanto que no caso da bacia Vila Canoas (Figura 4 b), o tempo computacional médio foi de 15, 16 e 11 min, respectivamente, para NSGA-II, NSGA-III e SPEA-II aplicando o critério de parada tradicional, e utilizando o critério de parada proposto por Ticona *et al.* (2019), foi de 4, 4 e 3 min, respectivamente. A redução no tempo computacional é de aproximadamente 70% do tempo requerido pelo critério de parada tradicional.

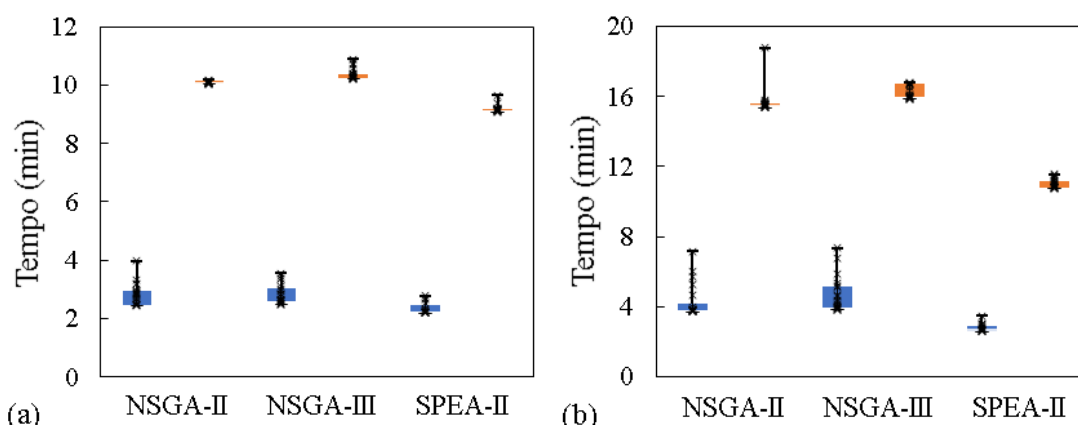


Figura 4 - Boxplot do tempo de calibração na bacia Ijuí (a) e Vila Canoas (b) para cada MOEA, NSGA-II, NSGA-III e SPEA-II; aplicando o critério de parada proposto (azul) e usando o critério de parada tradicional (laranja)

### 3.2. Critério de Parada Tradicional vs Critério de Parada Proposto: Resultados da calibração e validação do modelo hidrológico multi-objetivo

O processo de calibração foi realizado considerando a maximização do NS e a minimização do  $RMSE_{inv}$ . Utilizando o critério de parada tradicional e critério de parada proposto, os três MOEAs mostraram resultados similares entre si, tanto na bacia Ijuí (Tabela 4) quanto na bacia Vila Canoas (Tabela 5).

Tabela 4 - Intervalo inicial dos parâmetros calibrados do modelo IPH II e valores dos parâmetros da melhor solução do conjunto ótimo de Pareto encontrado por cada MOEA, nas simulações na bacia Ijuí.

Parâmetro	Faixa		Parâmetros calibrados**			Parâmetros calibrados*		
	Min	Max	NSGA-II	NSGA-III	SPEA-II	NSGA-II	NSGA-III	SPEA-II
I <sub>o</sub>	10	300	177,038	177,401	147,716	173,402	177,459	146,533
I <sub>b</sub>	0.1	10	2,840	2,809	3,127	2,821	2,807	3,124
H	0.01	1	0,424	0,422	0,469	0,427	0,422	0,469
K <sub>s</sub>	0.01	10	3,937	3,955	3,752	3,936	3,937	3,754
K <sub>sub</sub>	10	500	47,758	43,022	20,337	40,091	44,354	16,023
R <sub>max</sub>	0.0	9	7,886	8,361	8,935	8,975	8,558	8,936
A	0.01	20	16,994	18,386	13,181	19,368	19,154	13,197

(\*) critério de parada tradicional; (\*\*) critério de parada proposto.

Tabela 5 - Intervalo inicial dos parâmetros calibrados do modelo IPH II e valores dos parâmetros da melhor solução do conjunto ótimo de Pareto encontrado por cada algoritmo evolutivo, nas simulações na bacia Vila Canoas.

Parâmetro	Faixa		Parâmetros calibrados**			Parâmetros calibrados*		
	Min	Max	NSGA-II	NSGA-III	SPEA-II	NSGA-II	NSGA-III	SPEA-II
I <sub>o</sub>	10	300	29,474	20,627	29,222	29,482	20,556	24,316
I <sub>b</sub>	0.1	10	2,067	2,268	1,538	2,065	2,287	2,145
H	0.01	1	0,022	0,105	0,105	0,022	0,108	0,123
K <sub>s</sub>	0.01	10	5,544	5,489	5,660	5,532	5,433	5,431
K <sub>sub</sub>	10	500	45,881	44,044	62,891	50,050	42,404	57,727
R <sub>max</sub>	0.0	9	2,277	2,369	0,611	2,279	2,342	1,118
A	0.01	20	1,486	18,674	14,171	1,422	19,494	14,603

(\*) critério de parada tradicional; (\*\*) critério de parada proposto.

Os hidrogramas foram gerados usando os parâmetros da solução indicada com a métrica  $D_{min}$  para cada MOEA. Os hidrogramas obtidos com os valores dos parâmetros definidos pelos três algoritmos, usando o critério de parada tradicional e o critério proposto por Ticona *et al.* (2019) são muito similares para os períodos de calibração e validação. Pequenas diferenças podem ser observadas nos valores do NS e  $RMSE_{inv}$  (Tabela 6 e Tabela 7), entretanto em ambos se obteve valores que indicam desempenho muito bom ( $NS \geq 0,75$ ), exceto na validação para a bacia Ijuí que ambos obtiveram desempenho bom ( $NS \geq 0,70$ ). Na Figura 5 e na Figura 6 nota-se a similaridade dos correlogramas entre as vazões observadas e simuladas com os parâmetros calibrados com os MOEAs, para as bacias Ijuí e Vila Canoas, respectivamente.

Tabela 6 - Métricas calculadas para diferentes métodos de calibração multi-objetivo e funções objetivo durante os períodos de calibração e validação para a bacia Ijuí.

MOEA	Calibração**		Calibração*		Validação**		Validação*	
	NS	$RMSE_{inv}$	NS	$RMSE_{inv}$	NS	$RMSE_{inv}$	NS	$RMSE_{inv}$
NSGA-II	0,808	$7,03 \times 10^{-3}$	0,809	$7,46 \times 10^{-3}$	0,704	$6,56 \times 10^{-3}$	0,711	$6,29 \times 10^{-3}$
NSGA-III	0,808	$7,24 \times 10^{-3}$	0,808	$7,23 \times 10^{-3}$	0,708	$6,41 \times 10^{-3}$	0,707	$6,42 \times 10^{-3}$
SPEA-II	0,805	$6,24 \times 10^{-3}$	0,807	$6,39 \times 10^{-3}$	0,715	$5,74 \times 10^{-3}$	0,709	$5,54 \times 10^{-3}$

(\*) critério de parada tradicional; (\*\*) critério de parada proposto.



Tabela 7 - Métricas calculadas para diferentes métodos de calibração multi-objetivo e funções objetivo durante os períodos de calibração e validação para a bacia Vila Canoas.

MOEA	Calibração**		Calibração*		Validação**		Validação*	
	NS	RMSE <sub>inv</sub>	NS	RMSE <sub>inv</sub>	NS	RMSE <sub>inv</sub>	NS	RMSE <sub>inv</sub>
NSGA-II	0,831	3,36 x 10 <sup>-2</sup>	0,831	3,28 x 10 <sup>-2</sup>	0,774	3,46 x 10 <sup>-2</sup>	0,773	3,41 x 10 <sup>-2</sup>
NSGA-III	0,830	3,30 x 10 <sup>-2</sup>	0,830	3,32 x 10 <sup>-2</sup>	0,774	3,42 x 10 <sup>-2</sup>	0,774	3,43 x 10 <sup>-2</sup>
SPEA-II	0,830	3,34 x 10 <sup>-2</sup>	0,830	3,19 x 10 <sup>-2</sup>	0,775	3,44 x 10 <sup>-2</sup>	0,775	3,40 x 10 <sup>-2</sup>

(\*) critério de parada tradicional; (\*\*) critério de parada proposto.

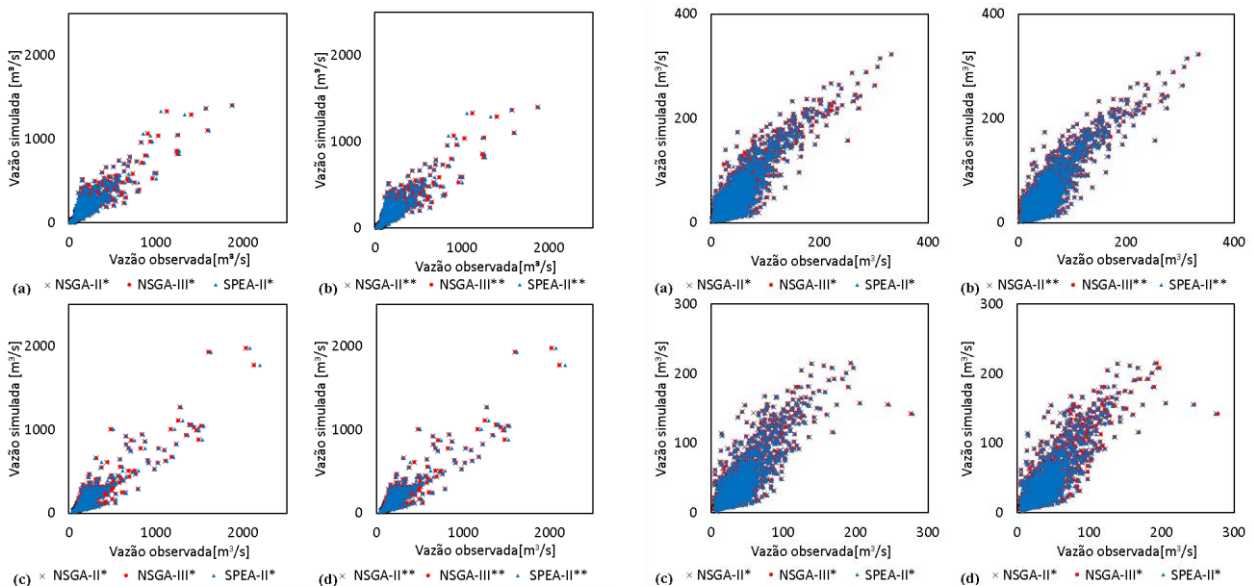


Figura 5 - Correlograma observado e calculado bacia Ijuí, utilizando o melhor conjunto de parâmetros que geraram uma solução não dominada, para cada algoritmo, durante o período de calibração (a, b) e o período de validação (c, d): (\*) critério de parada tradicional; (\*\*) critério de parada proposto.

Figura 6 - Correlograma observado e calculado bacia Vila Canoas, utilizando o melhor conjunto de parâmetros que geraram uma solução não dominada, para cada algoritmo, durante o período de calibração (a, b) e o período de validação (c, d): (\*) critério de parada tradicional; (\*\*) critério de parada proposto.

#### 4. CONCLUSÕES

Os três MOEAs testados resultaram em valores de parâmetros cujo emprego no modelo hidrológico apresentou desempenho acima do satisfatório em ambos critérios de parada testados. Destaca-se que o critério de parada recentemente proposto, requer menor tempo computacional, cerca de 70% inferior ao requerido pelo critério de parada tradicional. O presente estudo demonstrou que mesmo considerando áreas de estudo com características morfológicas distintas, a modificação no critério de parada do MOEA apresenta redução do tempo computacional e manutenção da qualidade dos resultados, sendo sempre menor o tempo requerido pelo SPEA-II em relação aos demais MOEAs. Portanto, sugere-se a aplicação do critério de parada proposto por Ticona *et al.* (2019) para calibração automática de parâmetros hidrológicos empregando qualquer um dos MOEAs (NSGA-II, NSGA-III, SPEA-II) testados no presente estudo.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, a CAPES pelo apoio financeiro ao desenvolvimento da pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- BRAVO, J. M.; ALLASI, D. G.; COLLISCHONN, W.; TASSI, R.; MELLER, A.; TUCCI, C. E. M. (2007). “Avaliação visual e numérica da calibração do modelo hidrológico IPH II com fins educacionais” in Anais XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, São Paulo.
- BRAVO, J.M.; ALLASIA, D.G.P.; COLLISCHONN, W.; TASSI, R.; MELLER, A.; TUCCI, C.E.M. (2006a). *Manual de usuário do WIN\_IPH2*. Versão 1.0. Editora: Rutinéia Tassi, Porto Alegre, 62 p.
- BRAVO, J.M.; ALLASIA, D.G.P.; COLLISCHONN, W.; TASSI, R.; MELLER, A.; TUCCI, C.E.M. (2006b). *Manual de conceitos do WIN\_IPH2*. Versão 1.0. Editora: Rutinéia Tassi, Porto Alegre, 27 p.
- COELLO, C. A. C., LAMONT, G. B., VAN VELDHUIZEN, D. A. (2007). *Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems*. Springer, New York.
- DEB, K., PRATAP, A., AGARWAL, S., MEYARIVAN, T.A.M.T. (2002). “A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II”. *IEEE Trans. Evol. Comput.* 6(2), pp. 182–197.
- GARCIA, F., FOLTON, N., OUDIN, L. (2017). “Which objective function to calibrate rainfall-runoff models for low-flow index simulations?”. *Hydrological sciences journal*, 62(7), pp. 1149-1166.
- LEGATES, D.R.; MCCABE JR, G.J. (1999). “Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation”. *Water resources research*. 35(1), pp. 233-241.
- LIN, F., CHEN, X., YAO, H. (2017). “Evaluating the use of Nash-Sutcliffe efficiency coefficient in goodness-of-fit measures for daily runoff simulation with SWAT”. *Journal of Hydrologic Engineering*. 22(11).
- MORIASI, D. N., ARNOLD, J. G., VAN LIEW, M. W., BINGER, R. L., HARMEL, R. D., VEITH, T. L. (2007). “Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations”. *Trans. ASABE*. 50(3), pp. 885-900.
- MOUSSA, R., CHAHINIAN, N. (2008). “Comparison of different multi-objective calibration criteria using a conceptual rainfall-runoff model of flood events”. *Hydrology and Earth System Sciences*. 13(4), pp. 519-535.
- PUSHPALATHA, R., PERRIN, C., LE MOINE, N., ANDRÉASSIAN, V. (2012). “A review of efficiency criteria suitable for evaluating low-flow simulations”. *Journal of Hydrology*. 420, 171-182.
- TASSI, R.; BRAVO, J.M.; MELLER, A.; COLLISCHONN, W. (2006) “Avaliação do impacto de diferentes funções-objetivo na calibração automática multiobjetivo do modelo IPH II”. XXII Congresso Latinoamericano de Hidráulica, Guayana, Venezuela.
- TICONA, J. C.G.; ADAMATI, D. S.; BRAVO, J.M. (2019). “A new stopping criterion for multi-objective evolutionary algorithms: Application in the calibration of a hydrologic model” *Computational Geosciences*. doi: 10.1007/s10596-019-09870-3
- TUCCI, C. E. M. (1998). *Modelos hidrológicos*. ABRH Editora da UFRGS. Porto Alegre. 669 pp.
- YAPO, P. O.; GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S. (1998). “Multiobjective global optimization for hydrologic models”. *Journal of Hydrology*, Vol. 204. pp. 83-97.
- ZITZLER, E., THIELE, L. (1999) “Multiobjective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength pareto approach”. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 3(4), pp. 257-270.
- ZITZLER, E., LAUMANN, M., THIELE, L. (2001). “SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm”. *TIK-report*. 103