

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO
AMBIENTAL

Juan Carlos Ticona Gutierrez

Título: Um Novo critério de parada para Algoritmos Evolucionários Multi-Objetivo:
Aplicado na calibração de Modelos Hidrológicos

Porto Alegre

2023

Juan Carlos Ticona Gutierrez

Título: Um Novo critério de parada para Algoritmos Evolucionários Multi-Objetivo:
Aplicado na calibração de Modelos Hidrológicos

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de doutor.

Orientador: Prof. Dr. Juan Martín Bravo

Coorientador: Prof. Dra. Lúcia Helena Ribeiro Rodrigues

Porto Alegre

2023

CIP - Catalogação na Publicação

Ticona Gutierrez, Juan Carlos
Um Novo Critério de Parada para Algoritmos
Evolucionários Multi-Objetivo: Aplicado na calibração
de Modelos Hidrológicos / Juan Carlos Ticona
Gutierrez. -- 2023.
186 f.
Orientador: Juan Martin Bravo.

Coorientadora: Lúcia Helena Ribeiro Rodrigues.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas,
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e
Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2023.

1. algoritmo evolutivo multiobjetivo. 2. modelo
hidrológico concentrado. 3. critério de parada . 4.
NSGA II. 5. SPEA II. I. Bravo, Juan Martin, orient.
II. Ribeiro Rodrigues, Lúcia Helena, coorient. III.
Título.

Juan Carlos Ticona Gutierrez

Título: Um Novo critério de parada para Algoritmos Evolucionários Multi-Objetivo:
Aplicado na calibração de Modelos Hidrológicos

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de doutor.

Aprovado em: Porto Alegre, 18 de outubro de 2023.

Prof. Dr. Juan Martín Bravo– PPGRHSA/UFRGS
Orientadora

Prof. Dr. Fernando Mainardi Fan – PPGRHSA/UFRGS
Examinador

Prof. Dr. Adriano Rolim da Paz – UFPB
Examinador

Prof. Dr. Carlos de Oliveira Galvão – UFCG
Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço principalmente a minha mãe que acreditou que conseguiria terminar, mas que não conseguiu viver para ver finalizada minha pesquisa.

Ao meu professor orientador Dr. Juan Martin Bravo, pela confiança para assumir minha orientação, pela amizade, ensinamentos e suporte emocional durante os anos de doutorado. Também pela motivação transmitida na decisão do tema de pesquisa e durante as dificuldades nas diferentes fases do projeto.

Agradeço especialmente:

A minha namorada Viviana Matesco por toda a paciência, motivação, compreensão e suporte ao longo destes anos e a sua família pelo carinho durante estes anos;

Aos meus amigos e colegas do IPH (Fran Vanelli, Cassia, Sofia, Bibiana, Virgílio, Henrique, Juliana, Fernanda, Daniela e Glaucia) sem os/as quais esta tese não se desenvolveria;

À Universidade Federal de Rio Grande do Sul (UFRGS), ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (PPGRHSA) do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) pela infraestrutura cedida e aos meus professores pela formação acadêmica e profissional oferecida durante o período de doutorado.

À Divisão de Alimentação da UFRGS através do restaurante universitário pela alimentação de qualidade.

Por último e não menos importante, esta tese foi possível pelo amparo no fornecimento da bolsa de estudos da CNPq durante o período de formação acadêmica de doutorado e apoio na participação de congressos realizados no Brasil.

RESUMO

TICONA GUTIERREZ, Juan Carlos. Um Novo critério de parada para Algoritmos Evolucionários Multi-Objetivo: Aplicado na calibração de Modelos Hidrológicos. 2023. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) — Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande Sul, Porto Alegre, 2023.

Os Algoritmos Genéticos Multi-objetivo (MOEA) têm sido aplicados com sucesso em uma ampla variedade de problemas de otimização. Embora amplamente utilizados, existem poucas orientações teóricas para determinar quando o procedimento de otimização deve ser parado. Muitos usuários comumente usam regras como parar quando não há melhora significativa durante as últimas gerações ou quando um certo número de gerações é atingido. Neste trabalho foi apresentada uma nova abordagem de critério de parada e foi avaliado o seu desempenho com três algoritmos evolucionários amplamente utilizados na calibração multi-objetivo de modelos hidrológicos. O critério de parada é baseado na convergência do número de soluções não dominadas na Frente de Pareto, mantido por um número de gerações consecutivos e que pode ser combinado com qualquer MOEA. O novo critério de parada foi testado na calibração dos modelos hidrológicos concentrados GR4J, GR5J, IPH-II, HyMOD, Tank-Model 3 e Tank-Model 4, utilizando os algoritmos genéticos NSGA-II, NSGA-III e SPEA-II e três funções objetivo. As métricas de espaçamento e dispersão máxima foram utilizadas para avaliar o desempenho do critério de parada proposto em comparação com o critério padrão e o critério de distância geracional. Os resultados associados ao critério de parada proposto mostram que não houve perda significativa na qualidade do ajuste, tanto no período de calibração como no período de validação. As métricas de desempenho do modelo hidrológico apresentaram valores semelhantes quando utilizados os valores dos parâmetros obtidos com o critério de parada padrão, e com o critério de parada proposto. No entanto, o tempo computacional médio do processo de calibração foi reduzido em até 57% quando o critério de parada proposto foi utilizado. Assim, pode-se concluir que o novo critério de parada aumenta a eficiência dos algoritmos evolucionários reduzindo o esforço computacional, sem comprometer a precisão dos conjuntos de soluções.

Palavras-chave: algoritmo evolutivo multiobjetivo · modelo hidrológico concentrado · critério de parada · NSGA II · NSGA III · SPEA II.

ABSTRACT

TICONA GUTIERREZ, Juan Carlos. A New Stopping Criteria for Multi-Objective Evolutionary Algorithms: Applied in the Calibration of Hydrological Models. 2023. Doctoral dissertation (Water Resources and Environmental Engineering) — Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2023.

Multi-objective Genetic Algorithms (MOEA) have been successfully applied in a wide variety of problems. Although widely used, there are few theoretical guidelines for determining when to stop the search. Many users commonly use rules like stopping when there is no significant improvement during the last generations or when a certain number of generations is reached. In this work, a new stopping criterion approach was presented and its performance was evaluated with three evolutionary algorithms widely used in multi-objective calibration of hydrological models. The stopping criterion is based on the convergence of the number of non-dominated solutions in the Pareto Front, maintained for a number of consecutive generations and which can be combined with any MOEA. The new stopping criterion was tested in the calibration of the concentrated hydrological models GR4J, GR5J, IPH-II, HyMOD, Tank-Model 3 and Tank-Model 4, using the genetic algorithms NSGA-II, NSGA-III and SPEA-II and three objective functions. Spacing and maximum spread metrics were used to assess the performance of the proposed stopping criterion in comparison to the standard criterion and the criterion of generational distance. The results associated with the proposed stopping criterion show that there was no significant loss in the quality of adjustment, both in calibration and validations periods. Performance metrics of the hydrological model have shown similar values when using the parameter values obtained with the standard stopping criterion and with the proposed stopping criterion. However, the average computing time of the calibration process was reduced up to 57% when the proposed stopping criterion was used. Thus, it can be concluded that the new stopping criterion increases the efficiency of evolutionary algorithms by reducing computational effort, without compromising the accuracy of the solution sets.

Keywords: multi-objective evolutionary algorithm; lumped hydrologic model; stopping criterion; NSGA II; NSGA III; SPEA II.

PUBLICAÇÕES ASSOCIADAS A ESSA TESE

As principais publicações referentes a esta tese estão listadas a seguir:

GUTIERREZ, J. C. T.; BRAVO, J. M. Comparing Multi-objective calibration of multiple hydrological models using different genetic algorithms and stopping criteria. *Computational Geosciences*, 2023.

GUTIERREZ, J. C. T. et al. Multi-objective calibration of Tank model using multiple genetic algorithms and stopping criteria. *Brazilian Journal of Water Resources*, v. 27, p. 1-14, 2022. [Doi.org/10.1590/2318-0331.272220220046](https://doi.org/10.1590/2318-0331.272220220046).

GUTIERREZ, J. C. T.; ADAMATTI, D. S.; BRAVO, J. M. A new stopping criterion for multi-objective evolutionary algorithms: application in the calibration of a hydrologic model. *Computational Geosciences*, v. 23, p. 1219–1235, 2019. [Doi.org/10.1007/s10596-019-09870-3](https://doi.org/10.1007/s10596-019-09870-3).

GUTIERREZ, J. C. T.; VANELLI, F. M.; BRAVO, J. M. Aplicação de um novo critério de parada para algoritmos evolucionários de otimização multi-objetivo na calibração automática de modelos hidrológicos. Em XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Foz do Iguaçu-PR, ISSN: 2318-0358, p. 1-10, 2019.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Conjunto de soluções factíveis em um problema de minimização com dois objetivos: (a) no espaço de decisões e (b) no espaço objetivo.	28
Figura 2 – Esquema das métricas (a)GD e (b)IGD entre um Frente de Pareto A e um Frente de Pareto ótimo B; (c) GD um Frente de Pareto A e uma solução não dominada Z e (d) Evolução da convergência do GD	35
Figura 3 – Esquema do (a)indicador R2 num espaço objetivo 2D e (b) o vetor de pesos W num espaço 2D.....	35
Figura 4 – Esquema de (a) distância de aglomeração d_i num espaço objetivo 2D e (b) a convergência do MCD ao longo de 500 gerações.	36
Figura 5 – Esquema da representação do HV num espaço objetivo 2D (a)para um problema de minimização e (b) maximização.	36
Figura 6 – Ilustração da evolução do critério I_{mdr} (linha azul) e com Filtro de Kalman (linha vermelha)	37
Figura 7 – Ilustração num espaço objetivo 2D (a) dos elementos de FP_t , dominados pelos elementos FP_{t-1} e (b) dos elementos de FP_{t-1} , dominados pelos elementos FP_t	38
Figura 8 – Localização das Bacias Hidrográficas	39
Figura 9 – Localização da Bacia do rio Tesouras.....	41
Figura 10 – Bacia do rio Tesouras - Período dos dados utilizados para calibração (01/09/1982 - 31/12/1986) e validação (01/01/1982 - 31/08/1982) dos modelos	42
Figura 11 – Bacia Santo Ângelo - período dos dados utilizados para calibração (01/01/2012 - 31/12/2018) e validação (15/01/2008 - 31/12/2011) dos modelos	43
Figura 12 – Localização da Bacia Santo Ângelo.....	43
Figura 13 – Localização da Bacia do rio Vila Canoas	44
Figura 14 – Bacia do rio Vila Canoas - período dos dados utilizados para calibração (01/01/1980 - 31/12/1984) e validação (01/01/1985 - 31/03/1987) dos modelos.....	45
Figura 15 – Gráficos de convergência em termos de (a) Número de soluções não dominadas e (b) GD ou distancia euclidiana media	47
Figura 16 – Esquema do critério proposto. a) Soluções não dominadas no espaço Objetivo; b) Variação do N_p em cada geração	48
Figura 17 – Esquema do modelo GR4J e GR5J	50
Figura 18 – Esquema do modelo HyMOD.....	51
Figura 19 – Esquema do modelo IPH II.....	52

Figura 20 – Esquema do a) TankModel 3, e b) TankModel 4.....	54
Figura 21 – Esquema do SCE-UA.....	55
Figura 22 – Ilustração das etapas de evolução percorridas por cada complexo	56
Figura 23 – Fluxograma do AG.....	58
Figura 24 – Ilustrações a) Esquema da métrica MS e b) Métrica MS para um FP hipotético .	65
Figura 25 – Ilustrações a) Esquema da métrica MS e b) Variação de MS no espaço objetivo	67
Figura 26 – Esquema dos testes de calibração Mono-objetivo aplicado em cada bacia	69
Figura 27 – Esquema dos experimentos realizados para a análise dos parâmetros do critério CP1	71
Figura 28 – Esquema das FPs esperadas, nos testes de calibração a) Teste T1 e b) Teste T2 .	73
Figura 29 – Esquema dos testes de calibração Multi-Objetivo aplicado para cada modelo hidrológico em cada bacia	73
Figura 30 – Funções Objetivo de cada modelo aplicado em cada bacia	74
Figura 31 – CP da calibração Mono-Objetivo, na bacia do rio Tesouras.....	75
Figura 32 – CP da calibração Mono-Objetivo, na bacia Santo Ângelo.....	76
Figura 33 – CP da calibração Mono-Objetivo, na bacia Vila Canoas.....	77
Figura 34 – Box-Plot da calibração Mono-Objetivo na bacia rio Tesouras com seis modelos com seis Funções Objetivo	78
Figura 35 – Box-Plot da calibração Mono-Objetivo na bacia Santo Ângelo e seis modelos com seis Funções Objetivo	78
Figura 36 – Box-Plot da calibração Mono-Objetivo na bacia Vila Canoas e seis modelos com seis Funções Objetivo	79
Figura 37 – Hidrogramas da calibração Mono-Objetivo dos modelos GR5J, IPH II e TankModel 4, para as seis Funções Objetivo, na bacia rio Tesouras no período 26/10/1982- 22/8/1983	81
Figura 38 – Hidrogramas da calibração Mono-Objetivo dos modelos GR5J, IPH II e TankModel 4, para as seis Funções Objetivo, na bacia Santo Ângelo no período 26/11/2016- 22/9/2017	82
Figura 39 – Hidrogramas da calibração Mono-Objetivo dos modelos GR5J, IPH II e TankModel 4, para as seis Funções Objetivo, na bacia Vila Canoas no período 25/8/1983-19/1/1984	83
Figura 40 – Evolução do Np, para problema de calibração a) T1 e b) T2, do modelo GR5J ..	85
Figura 41 – Evolução do Np, para problema de calibração a) T1 e b) T2, do modelo IPH II .	85

Figura 42 – Evolução do Np, para problema de calibração a) T1 e b) T2, do modelo TankModel 4	86
Figura 43 – Probabilidade de Np atingir o máximo de 50 por primeira vez, para os testes a) T1 e b) T2.....	87
Figura 44 – Box-Plots da Geração Máxima de término, observado no modelo GR5J, para os testes a)T1 e b)T2	88
Figura 45 – Box-Plots da Geração Máxima de término, observado no modelo IPHII, para os testes a)T1 e b)T2	89
Figura 46 – Box-Plots da Geração Máxima de término, observado no modelo TankModel 4, para os testes a)T1 e b)T2.....	90
Figura 47 – Probabilidade de não terminar o algoritmo, em 300 gerações, para os testes a)T1 e b)T2.....	91
Figura 48 – Esforço computacional, dos testes de calibração automática multi-objetivo na bacia do rio Tesouras	96
Figura 49 – Esforço computacional, dos testes de calibração automática multi-objetivo na bacia Santo Ângelo	97
Figura 50 – Esforço computacional, dos testes de calibração automática multi-objetivo na bacia Vila Canoas.....	98
Figura 51 – Esforço computacional, na calibração dos modelos com os critérios de parada	100
Figura 52 – Variação de GD no problema de calibração teste T1 para o modelo TankModel 4	101
Figura 53 – FP problema de calibração teste T1 para o modelo TankModel 4, após 300 gerações	101
Figura 54 – FP dos critérios de parada na bacia rio Tesouras, para os testes de calibração multi-objetivo a) T1, esquerda e b) T2, direita.....	102
Figura 55 – FP dos critérios de parada na bacia Santo Ângelo, para os testes de calibração multi-objetivo a) T1, esquerda e b) T2, direita.....	103
Figura 56 – FP dos critérios de parada na bacia vila Canoas, para os testes de calibração multi-objetivo a) T1, esquerda e b) T2, direita.....	104
Figura 57 – Estatísticas das métricas MS e SP, nos FP analisados	107
Figura 58 – FP mais próxima do ótimo global, obtidas nos testes de calibração multi-objetivo	109

Figura 59 – Curva de Permanência (CP) dos testes de calibração Multi-Objetivo, T1 e T2, do modelo GR5J, aplicando os critérios de parada (CP1, CP2 e CP3), na bacia rio Tesouras	110
Figura 60 – Curva de Permanência (CP) dos testes de calibração Multi-Objetivo, T1 e T2, do modelo IPH II, aplicando os critérios de parada (CP1, CP2 e CP3), na bacia rio Tesouras	111
Figura 61 – Curva de Permanência (CP) dos testes de calibração Multi-Objetivo, T1 e T2, do modelo TankModel 4, aplicando os critérios de parada (CP1, CP2 e CP3), na bacia rio Tesouras	112
Figura 62 – Curva de Permanência (CP) dos testes de calibração Multi-Objetivo, T1 e T2, do modelo GR5J, aplicando os critérios de parada (CP1, CP2 e CP3), na bacia Santo Ângelo.....	113
Figura 63 – Curva de Permanência (CP) dos testes de calibração Multi-Objetivo, T1 e T2, do modelo IPH II, aplicando os critérios de parada (CP1, CP2 e CP3), na bacia Santo Ângelo.....	114
Figura 64 – Curva de Permanência (CP) dos testes de calibração Multi-Objetivo, T1 e T2, do modelo TankModel 4, aplicando os critérios de parada (CP1, CP2 e CP3), na bacia Santo Ângelo.....	115
Figura 65 – Curva de Permanência (CP) dos testes de calibração Multi-Objetivo, T1 e T2, do modelo GR5J, aplicando os critérios de parada (CP1, CP2 e CP3), na bacia Vila Canoas	116
Figura 66 – Curva de Permanência (CP) dos testes de calibração Multi-Objetivo, T1 e T2, do modelo IPH II, aplicando os critérios de parada (CP1, CP2 e CP3), na bacia Vila Canoas	117
Figura 67 – Curva de Permanência (CP) dos testes de calibração Multi-Objetivo, T1 e T2, do modelo TankModel 4, aplicando os critérios de parada (CP1, CP2 e CP3), na bacia Vila Canoas.....	118
Figura 68 – Box-Plots das vazões Q10 [m ³ /s], obtidas com os critérios de parada, para os testes a)T1 e b)T2, na bacia rio Tesouras	120
Figura 69 – Box-Plots das vazões Q90[m ³ /s], obtidas com os critérios de parada, para os testes a)T1 e b)T2, na bacia rio Tesouras	120
Figura 70 – Box-Plots das vazões Q10 [m ³ /s], obtidas com os critérios de parada, para os testes a)T1 e b)T2, na bacia Santo Ângelo	121

Figura 71 – Box-Plots das vazões Q90 [m ³ /s], obtidas com os critérios de parada, para os testes a)T1 e b)T2, na bacia Santo Ângelo	122
Figura 72 – Box-Plots das vazões Q10 [m ³ /s], obtidas com os critérios de parada, para os testes a)T1 e b)T2, na bacia Vila Canoas	123
Figura 73 – Box-Plots das vazões Q90 [m ³ /s], obtidas com os critérios de parada, para os testes a)T1 e b)T2, na bacia Vila Canoas	123
Figura 74 – FP dos MOEAS que tiveram soluções mais próximas do ótimo global com o Modelo IPH II.....	126
Figura 75 – GD dos MOEAS nas bacias de estudo.....	127
Figura 76 – Hidrogramas dos testes de calibração Multi-Objetivo, T1 e T2, do modelo IPH II, aplicando os critérios de parada, na bacia rio Tesouras no período 26/10/1982-22/8/1983	128
Figura 77 – Hidrogramas dos testes de calibração Multi-Objetivo, T1 e T2, do modelo IPH II, aplicando os critérios de parada, na bacia Santo Ângelo no período 26/11/2016-22/9/2017	129
Figura 78 – Hidrogramas dos testes de calibração Multi-Objetivo, T1 e T2, do modelo IPH II, aplicando os critérios de parada, na bacia Vila Canoas no período 22/8/1983-19/1/1984	130
Figura A 1 - Parâmetros normalizados, para as Funções Objetivo da calibração Mono-Objetivo dos modelos GR5J, IPH II e TankModel 4.....	147
Figura A 2 - Hidrogramas dos modelos GR5J, IPH II e TankModel 4, para três Funções Objetivo NSE, na bacia do rio Tesouras no período de calibração Mono-Objetivo, 01/09/1982 - 31/12/1986.....	148
Figura A 3 - Hidrogramas dos modelos GR5J, IPH II e TankModel 4, para três Funções Objetivo RMSE, na bacia do rio Tesouras no período de calibração Mono-Objetivo, 01/09/1982 - 31/12/1986.....	149
Figura A 4 - Hidrogramas dos modelos GR5J, IPH II e TankModel 4, para três Funções Objetivo NSE, na bacia do rio Tesouras no período de validação 01/01/1982 - 31/08/1986.....	150
Figura A 5 - Hidrogramas dos modelos GR5J, IPH II e TankModel 4, para três Funções Objetivo RMSE, na bacia do rio Tesouras no período de validação, 01/01/1982 - 31/08/1986	151

Figura A 6 - Hidrogramas dos modelos GR5J, IPH II e TankModel 4, para três Funções Objetivo NSE, na bacia Santo Ângelo no período de calibração Mono-Objetivo, 01/01/1912 - 31/12/1918.....	152
Figura A 7 - Hidrogramas dos modelos GR5J, IPH II e TankModel 4, para três Funções Objetivo RMSE, na bacia Santo Ângelo no período de calibração Mono-Objetivo, 01/01/1912 - 31/12/1918.....	153
Figura A 8 - Hidrogramas dos modelos GR5J, IPH II e TankModel 4, para três Funções Objetivo NSE, na bacia Santo Ângelo no período de validação, 15/01/2008 - 31/12/2011	154
Figura A 9 - Hidrogramas dos modelos GR5J, IPH II e TankModel 4, para três Funções Objetivo RMSE, na bacia Santo Ângelo no período de validação, 15/01/2008 - 31/12/2011	155
Figura A 10 - Hidrogramas dos modelos GR5J, IPH II e TankModel 4, para três Funções Objetivo NSE, na bacia Vila Canoas no período de calibração Mono-Objetivo, 01/01/1980 - 31/12/1984.....	156
Figura A 11 - Hidrogramas dos modelos GR5J, IPH II e TankModel 4, para três Funções Objetivo RMSE, na bacia Vila Canoas no período de calibração Mono-Objetivo, 01/01/1980 - 31/12/1984.....	157
Figura A 12 - Hidrogramas dos modelos GR5J, IPH II e TankModel 4, para três Funções Objetivo NSE, na bacia Vila Canoas no período de validação, 01/01/1985 - 31/03/1987	158
Figura A 13 - Hidrogramas dos modelos GR5J, IPH II e TankModel 4, para três Funções Objetivo RMSE, na bacia Vila Canoas no período de validação, 01/01/1985 - 31/03/1987	159
Figura B 1 - Parâmetros normalizados do teste de calibração Multi-Objetivo T1, na bacia a) rio Tesouras, b)Santo Ângelo e c)Vila Canoas	160
Figura B 2 - Parâmetros normalizados do teste de calibração Multi-Objetivo T2, na bacia a) rio Tesouras, b)Santo Ângelo e c)Vila Canoas	160
Figura B 3 - Parâmetros normalizados do teste de calibração Multi-Objetivo T1, na bacia a) rio Tesouras, b)Santo Ângelo e c)Vila Canoas	161
Figura B 4 - Parâmetros normalizados do teste de calibração Multi-Objetivo T2, na bacia a) rio Tesouras, b)Santo Ângelo e c)Vila Canoas	161

Figura B 5 - Parâmetros normalizados do teste de calibração Multi-Objetivo T1, na bacia a) rio Tesouras, b) Santo Ângelo e c) Vila Canoas	162
Figura B 6 - Parâmetros normalizados do teste de calibração Multi-Objetivo T2, na bacia a) rio Tesouras, b) Santo Ângelo e c) Vila Canoas	162
Figura B 7 - Hidrogramas do teste T1, aplicando os critérios de parada, na bacia rio Tesouras no período de calibração para o modelo GR5J, 01/09/1982 - 31/12/1986	163
Figura B 8 - Hidrogramas do teste T2, aplicando os critérios de parada, na bacia rio Tesouras no período de calibração para o modelo GR5J, 01/09/1982 - 31/12/1986	164
Figura B 9 - Hidrogramas de todos os parâmetros do FP no teste T1, aplicando os critérios de parada, na bacia Rio Tesouras no período de calibração para o modelo IPH II, 01/09/1982 - 31/12/1986.....	165
Figura B 10 - Hidrogramas de todos os parâmetros do FP no teste T2, aplicando os critérios de parada, na bacia Rio Tesouras no período de calibração para o modelo IPH II, 01/09/1982 - 31/12/1986.....	166
Figura B 11 - Hidrogramas do teste T1, aplicando os critérios de parada, na bacia rio Tesouras no período de calibração para o modelo TankModel 4, 01/09/1982 - 31/12/1986.....	167
Figura B 12 - Hidrogramas do teste T2, aplicando os critérios de parada, na bacia rio Tesouras no período de calibração para o modelo TankModel 4, 01/09/1982 - 31/12/1986.....	168
Figura B 13 - Hidrogramas do teste T1, aplicando os critérios de parada, na bacia Santo Ângelo no período de calibração para o modelo GR5J, 01/01/1912 - 31/12/1918	169
Figura B 14 - Hidrogramas do teste T2, aplicando os critérios de parada, na bacia Santo Ângelo no período de calibração para o modelo GR5J, 01/01/1912 - 31/12/1918	170
Figura B 15 - Hidrogramas de todos os parâmetros do FP no teste T1, aplicando os critérios de parada, na bacia Santo Ângelo no período de calibração para o modelo IPH II, 01/01/1912 - 31/12/1918.....	171
Figura B 16 - Hidrogramas de todos os parâmetros do FP no teste T2, aplicando os critérios de parada, na bacia Santo Ângelo no período de calibração para o modelo IPH II, 01/01/1912 - 31/12/1918.....	172
Figura B 17 - Hidrogramas do teste T1, aplicando os critérios de parada, na bacia Santo Ângelo no período de calibração para o modelo TankModel 4, 01/01/1912 - 31/12/1918.....	173
Figura B 18 - Hidrogramas do teste T2, aplicando os critérios de parada, na bacia Santo Ângelo no período de calibração para o modelo TankModel 4, 01/01/1912 - 31/12/1918.....	174
Figura B 19 - Hidrogramas do teste T1, aplicando os critérios de parada, na bacia Vila Canoas no período de calibração para o modelo GR5J, 01/01/1980 - 31/12/1984	175

Figura B 20 - Hidrogramas do teste T2, aplicando os critérios de parada, na bacia Vila Canoas no período de calibração para o modelo GR5J, 01/01/1980 - 31/12/1984	176
Figura B 21 - Hidrogramas de todos os parâmetros do FP no teste T1, aplicando os critérios de parada, na bacia Vila Canoas no período de calibração para o modelo IPH II, 01/01/1980 - 31/12/1984.....	177
Figura B 22 - Hidrogramas de todos os parâmetros do FP no teste T2, aplicando os critérios de parada, na bacia Vila Canoas no período de calibração para o modelo IPH II, 01/01/1980 - 31/12/1984.....	178
Figura B 23 - Hidrogramas do teste T1, aplicando os critérios de parada, na bacia Vila Canoas no período de calibração para o modelo TankModel 4, 01/01/1980 - 31/12/1984.....	179
Figura B 24 - Hidrogramas do teste T2, aplicando os critérios de parada, na bacia Vila Canoas no período de calibração para o modelo TankModel 4, 01/01/1980 - 31/12/1984.....	180
Figura C1 - Hidrogramas dos testes T1 e T2, aplicando os critérios de parada, na bacia rio Tesouras no período de validação para o modelo IPH II, 01/01/1982 - 31/08/1982..	181
Figura C2 - Hidrogramas do teste T1, aplicando os critérios de parada, na bacia Santo Ângelo no período de validação para o modelo IPH II, 15/01/2008 - 31/12/2011	182
Figura C3 - Hidrogramas do teste T2, aplicando os critérios de parada, na bacia Santo Ângelo no período de validação para o modelo IPH II, 15/01/2008 - 31/12/2011	183
Figura C4 - Hidrogramas do teste T1, aplicando os critérios de parada, na bacia Vila Canoas no período de validação para o modelo IPH II, 01/01/1985 - 31/03/1987	184
Figura C5 - Hidrogramas do teste T2, aplicando os critérios de parada, na bacia Vila Canoas no período de validação para o modelo IPH II, 01/01/1985 - 31/03/1987	185

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Características de aplicações da calibração multi-objetivo de modelos hidrológicos	28
Quadro 2 – Dados meteorológicos e hidrológicos da bacia do rio Tesouras, 01/01/1982 - 31/12/1986	41
Quadro 3 – Dados meteorológicos e hidrológicos da bacia Santo Ângelo, 01/01/2008 - 31/12/2018	42
Quadro 4 – Dados meteorológicos e hidrológicos da bacia do rio Vila Canoas, 01/01/1980 - 31/12/1987	44
Quadro 5 – Parâmetros testados do critério de parada proposto (CP1) e (CP3)	47
Quadro 6 – Valores de tamanho populacional (NP) em estudos que realizam a calibração de modelos hidrológicos usando algoritmos evolutivos multi-objetivos	48
Quadro 7 – Características dos modelos hidrológicos.....	48
Quadro 8 – Intervalo dos valores dos parâmetros de calibração do modelo GR4J e GR5J	49
Quadro 9 – Intervalo dos valores dos parâmetros de calibração do modelo HyMOD	51
Quadro 10 – Intervalo dos valores dos parâmetros de calibração do modelo IPH II	52
Quadro 11 – Características dos parâmetros de calibração do TankModel 3 e TankModel 4	53
Quadro 12 – Funções Objetivo usadas como critérios de calibração	62
Quadro 13 – Métricas de calibração	68
Quadro 14 – Parâmetros do algoritmo SCE-UA	69
Quadro 15 – Configuração dos parâmetros dos MOEA's	70
Quadro 16 – Testes de calibração Multi-Objetivo	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Esforço computacional do critério CP1 [%], respeito ao critério CP3	95
Tabela 2 – Esforço computacional do critério CP2 [%], respeito ao critério CP3	95
Tabela 3 – Geração atingida com o critério CP1, nos testes T1 e T2.....	99
Tabela 4 – Geração atingida com o critério CP2, nos testes T1 e T2.....	99
Tabela 5 – Métrica de desempenho MS dos MOEA's, na calibração dos modelos.....	105
Tabela 6 – Métrica de desempenho SP dos MOEA's, na calibração dos modelos	106
Tabela 7 – MOEAs que geraram a FP mais próxima do ótimo global.....	108
Tabela 8 – FO da solução mais próxima do ótimo global	124

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional das Aguas
CC	Correlation Coefficient
CD	Coefficient of Determination
EMA	Error Mean percentage Absolute
EPMODE	Enhanced Pareto Multi-Objective Differential Evolution
FP	Frente de Pareto
GD	Generational Distance
GIS	Sistema de Informação Geográfica
GR4J	Génie Rural à 4 paramètres Journalier
GR5J	Génie Rural à 5 paramètres Journalier
HMLE	Heteroscedastic Maximum Likelihood Error
HyMOD	Hydrological Model
HV	Hypervolume
IGD	Inverted Generational Distance
M4E	Mean Fourth-Power Error
MCD	Maximum Crowding Distance
MODE-ACM	Multi-Objective Differential Evolution with Adaptive Cauchy Mutation
MOEA	Multi-objective Evolutionary Algorithm
MS	Maximum Spread
MSDE	Mean Squared Derivative Error
MSE	Mean Squared Error
MSLE	Mean Squared Logarithmic Error
M4E	Mean Fourth-power Error
NSE	Nash-Sutcliffe Efficiency
NSGA	Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm
RMSE	Root Mean Square Error
SCE	Shuffled Complex Evolution
SP	Spacing
SPEA	Strength Pareto Evolutionary Algorithm
TMDL	Total Maximum Daily Load

SUMÁRIO

Capítulo 1. Introdução	22
1.1 Objetivos.....	24
1.2 Organização da Tese.....	25
Capítulo 2. Revisão bibliográfica	26
2.1 Calibração Manual.....	26
2.2 Calibração Automática	26
2.2.1 Calibração Multi-objetivo.....	27
2.2.2 Critérios de Parada.....	31
Capítulo 3. Estudos de Caso	39
3.1 Bacia hidrográfica do rio Tesouras.....	40
3.2 Bacia hidrográfica do Santo Ângelo.....	42
3.3 Bacia hidrográfica do rio Vila Canoas	43
Capítulo 4. Métodos.....	46
4.1 Novo Critério de Parada baseado no número das soluções não dominadas.....	46
4.2 Modelos Hidrológicos	48
4.2.1 Modelo GR4J e GR5J.....	49
4.2.2 Modelo HyMOD.....	50
4.2.3 Modelo IPH II.....	51
4.2.4 TankModel 3 e 4.....	53
4.3 Calibração Mono-objetivo: algoritmo SCE-UA.....	54
4.4 Calibração multi-objetivo de modelos hidrológicos usando algoritmos genéticos ..	56
4.4.1 NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II).....	58
4.4.2 NSGA-III (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm III)	59
4.4.3 SPEA-II (Strength Pareto Evolutionary Algorithm II).....	60
4.4.4 Funções Objetivo	60
4.4.5 Métricas de desempenho dos MOEA's	63
Capítulo 5. Descrição dos Experimentos	68
5.1 Testes de calibração automática Mono-Objetivo de modelos hidrológicos	68
5.2 Testes de calibração automática Multi-Objetivo de modelos hidrológicos.....	70
5.2.1 Análise dos parâmetros do critério de parada proposto (CP1)	70
5.2.2 Problemas de calibração automática multi-objetivo.....	72
Capítulo 6. Resultados e Discussão	74

6.1	Resultados da Calibração automática Mono-Objetivo de modelos hidrológicos.....	74
6.2	Resultados para análise dos parâmetros do critério de parada proposto (CP1).....	84
6.2.1	Resultados da medida Monitorada Np.....	84
6.2.2	Parâmetros do critério de parada proposto (CP1).....	91
6.3	Resultados da Calibração Multi-Objetivo com os Critérios de Parada CP1, CP2 e CP3	93
6.3.1	Esforço computacional de Calibração Multi-Objetivo.....	94
6.3.2	Métricas de desempenho dos MOEA's	101
6.3.3	Series de vazões calculadas a partir da Calibração Multi-Objetivo	107
6.3.4	Series de vazões calculadas com o melhor modelo da Calibração Multi-Objetivo	127
Capítulo 7. Conclusões e Recomendações		131
7.1	Conclusões.....	131
7.2	Recomendações	133
REFERÊNCIAS		134
ANEXO A – CALIBRAÇÃO mono-objetivo.....		147
ANEXO B – CALIBRAÇÃO Multi-OBJETIVO		160
ANEXO C – Melhor modelo da CALIBRAÇÃO Multi-OBJETIVO.....		181
ANEXO D – Rotinas usadas dos algoritmos mono-objetivo e modelos hidroLÓGICOS		

Capítulo 1. Introdução

A modelagem de bacias hidrográficas tem evoluído ao longo da história, nos EUA ([116]), na década de 1960, foram desenvolvidos modelos de bacias hidrográficas, na década de 1970, os modelos de qualidade da água foram desenvolvidos, na década de 1980, o transporte de sedimentos e poluentes foi integrado aos modelos de bacias hidrográficas, a década de 1990 testemunhou a inclusão de zonas húmidas e florestais, TMDL, sistemas especialistas, software gráfico, GIS e sistemas de gestão de bases de dados em modelos de bacias hidrográficas. Na década de 2000, as águas superficiais e subterrâneas e suas interações foram integradas. Recentemente, o interesse em aplicações de previsão de vazões e mudança climática tem aumentado.

Assim o desenvolvimento de modelos com o objetivo de representar o funcionamento das bacias hidrográficas e simular diferentes cenários, para sua utilização em diversas aplicações que envolvem a tomada de decisão no âmbito dos recursos hídricos, tem tornado os modelos cada vez mais complexos, incorporando módulos na sua configuração, que precisam de um maior número de variáveis ou parâmetros que precisam ser ajustados/calibrados, para sua correta aplicação.

A resposta da bacia hidrográfica é comumente representada por séries temporais de vazões observadas. Na calibração dos modelos hidrológicos a comparação entre vazões observadas e calculadas predomina como a abordagem mais utilizada ([41]). As estratégias de calibração mono-objetivo e multi-objetivo têm sido amplamente utilizadas na calibração de modelos hidrológicos ([14, 94, 138]).

O progresso na representação integrada de processos hidrológicos, por meio de ferramentas de modelagem detalhadas, destacou as fraquezas das abordagens automáticas de calibração mono-objetivo como avaliador geral do desempenho do modelo. Fraquezas tais como: representação inadequada da variabilidade espacial e temporal dos dados, uso de critérios de ajuste estatisticamente inconsistente ou assumir parâmetros como constantes no tempo enquanto a área de estudo está mudando ([10]; [34]; [38]; [132]).

Ao mesmo tempo, à medida que os modelos se tornam mais complexos (semi-distribuído e totalmente distribuído), as estratégias multi-objetivo para estimativa de parâmetros têm exibido vários pontos fortes [35]. Por exemplo, a avaliação de mais de uma variável externa no processo de calibração (diferentes tipos de fluxos, pontos de medição diferentes), permitir incluir múltiplos objetivos contraditórios característicos de problemas do mundo real, ou poder gerar em uma única calibração mais de um conjunto aceitável de parâmetros.

A calibração multi-objetivo de modelos hidrológicos pode ser apresentada como um problema de otimização, *Minimização ou Maximização* $F(\theta) = \{f_1(\theta), \dots, f_m(\theta)\}$ onde $f_1(\theta), \dots, f_m(\theta)$ são as m-funções objetivo simultaneamente minimizadas ou maximizadas em relação aos parâmetros θ do modelo. Ao contrário da otimização mono-objetivo, onde é encontrado o máximo global ou o mínimo global de uma única função objetivo, em um problema de otimização considerando múltiplos objetivos, um conjunto de soluções é obtido. Este conjunto de soluções é conhecido como soluções de Pareto-ótimo, ou soluções não dominadas, e são consideradas superiores às demais soluções do espaço de busca, quando todas as funções objetivo são consideradas. Qualquer solução Pareto-ótimo é considerada aceitável dado que nenhuma delas é absolutamente melhor que as outras [119]. O interesse nestes problemas levou a que, segundo [35], na primeira década do século 21 progressos significativos foram feitos na ciência da computação em relação a diferentes componentes do problema de calibração multi-objetivo, incluindo: (a) a manipulação algorítmica; (b) a formulação de objetivos; (c) a interpretação de soluções não dominadas e a orientação para uma escolha de melhor compromisso, e (d) a ligação com abordagens de avaliação de incerteza. No entanto, sua disseminação em aplicações hidrológicas do mundo real é relativamente fraca e, portanto, há muita pesquisa a ser feita em testes comparativos em problemas desafiadores de calibração.

Os algoritmos evolucionários lidam com problemas multi-objetivos, aplicando os princípios básicos do processo evolutivo em um conjunto de indivíduos (soluções candidatas), mediante os chamados operadores evolutivos, que incluem: atribuição de aptidão, seleção, cruzamento, mutação e elitismo ([22]). De acordo com [22], em geral, algoritmos evolutivos multi-objetivos diferem no método de atribuição de aptidão, mas a maioria usa o conceito de Pareto para discriminar soluções e guiar a busca dentro do espaço de busca. Os algoritmos utilizados neste trabalho (NSGA-II, NSGA-III e SPEA-II) são baseados na seleção elitista. Os algoritmos SPEA2 e NSGA-II são dois dos MOEA's mais proeminentes usados quando é comparado um MOEA recém-projetado e sua formulação depende fortemente de seus mecanismos estimadores de densidade ([78]).

Geralmente, a principal crítica da otimização multi-objetivo está relacionada com a degradação do desempenho dos algoritmos, quando o tamanho da população e as funções objetivo aumentam. Por esta razão, é necessário usar um critério para analisar quando soluções aceitáveis são alcançadas e cálculos adicionais não são justificados. [54], descreveram vários métodos para determinar quando parar o processo iterativo de algoritmo genético. Os métodos incluem: verificar se a melhor solução alcançada é a resposta ou se é uma resposta aceitável;

verificar se as soluções não mudam em um determinado número de iterações; e caso o algoritmo não pare devido a algum dos casos citados, deve-se definir um limite de iteração máxima.

Alguns critérios de parada propostos na literatura [106, 126, 134] consistem em monitorar métricas de desempenho da Frente de Pareto ótima (i.e., distância geracional, inversa da distância geracional ou hipervolume), eles medem a diferença entre a métrica atual e uma referência predefinida ou valor ideal e então decidem quando estão suficientemente próximos. Estes tipos de critério tem a deficiência óbvia e paradoxal de exigir um conhecimento a priori do valor ótimo desejado da solução [81].

O conjunto de soluções da Frente de Pareto ótimo, depende das funções objetivo aplicadas no modelo hidrológico, pelo que um problema que deve ser avaliado é a escolha das funções objetivo adequadas. [51], observou que as soluções extremas do Frente de Pareto ótimo (obtidas com os algoritmos NSGA-II, SPEA2, MODE-ACM e EPMODE) favorecem a qualidade da simulação nas vazões máximas ou mínimas, quando aplicou certas funções objetivo (MSLE, MSDE, M4E). Algo parecido foi observado por [100], testando a calibração mono-objetivo dos modelos GR4J e MORD, em um conjunto de 940 bacias hidrográficas, identificou que para avaliar a simulação de vazões baixas, a métrica NSE calculada com a inversa da vazão, é mais adequada para a avaliação em condições de vazões muito baixas do que o clássico NSE aplicado aos logaritmos das vazões. Por este motivo é testado o uso de estes critérios entre as funções objetivo aplicadas neste trabalho.

Neste trabalho, é apresentado um critério de parada novo baseado na convergência do número de soluções não dominadas na Frente de Pareto, geradas no processo de otimização multi-objetivo, mantido por um número de gerações consecutivos e que pode ser combinado com qualquer MOEA, a fim de evitar o desperdício de esforço computacional.

1.1 Objetivos

O objetivo principal foi desenvolver um novo critério de parada que garanta a conservação da qualidade das soluções do algoritmo de calibração multi-objetivo evitando o desperdício de recursos computacionais consideráveis. Esta abordagem visa encontrar um conjunto representativo de soluções, suficientemente próximo daquele que seria obtido utilizando o critério de parada padrão.

Como objetivos específicos foram considerados:

- Verificar a aplicabilidade de algoritmos evolutivos multi-objetivos (NSGA II, NSGA III e SGA2) na calibração automática de modelos hidrológicos (GR4J, IPH II, TankModel 4).
- Analisar o comportamento de diferentes critérios de parada, para os algoritmos multi-objetivo mencionados, identificando as possíveis limitações destes;
- Testar as funções objetivo cuja otimização resulte em conjuntos de parâmetros que permitam ao modelo hidrológico representar melhor as series de vazões, tanto para vazões altas quanto para vazões baixas.

1.2 Organização da Tese

Os tópicos deste trabalho estão organizados da seguinte forma:

- Na primeira seção foi apresentada a introdução;
- Na segunda seção foi apresentada a revisão bibliográfica sobre métodos de calibração e critérios de parada utilizados atualmente;
- A continuação, na seção 3, é apresentado o estudo de caso;
- Na seção 4, é apresentado um novo critério de parada, os modelos hidrológicos, os algoritmos genéticos de calibração automática usados nas calibrações mono e multi-objetivo dos modelos hidrológicos;
- Na seção 5, são explicados os experimentos utilizados na calibração dos modelos hidrológicos;
- Na Seção 6, são apresentados os resultados e a discussão dos experimentos.
- Finalmente, na Seção 7 são apresentadas as conclusões e recomendações.

Capítulo 2. Revisão bibliográfica

Nesta seção, é apresentada a análise da literatura recente relacionada como as ferramentas e métodos empregados nesta pesquisa e relacionados a calibração automática de modelos hidrológicos utilizando algoritmos evolucionários.

2.1 Calibração Manual

A calibração de modelos hidrológicos tem como objetivo encontrar os parâmetros do modelo que permitam uma boa representação do comportamento hidrológico da bacia. Geralmente a vazão no exutório da bacia é utilizada na avaliação do processo de calibração, espera-se que uma boa representação do comportamento hidrológico da bacia seja encontrada quando as vazões calculadas pelo modelo reproduzam, com boa precisão, às vazões observadas.

Uma das técnicas pioneiras de calibração é a calibração manual por tentativa e erro, onde o usuário do modelo altera os valores dos parâmetros em cada simulação, até que o usuário decida que o resultado encontrado é satisfatório na comparação entre as vazões calculadas e observadas ([14]).

Uma das grandes vantagens desse procedimento é permitir que o usuário agregue ao processo sua experiência e conhecimento sobre o modelo. Porém, a calibração manual pode ser um processo muito lento, repetitivo e tedioso, especialmente quando o modelo utilizado tem um grande número de parâmetros e o usuário é inexperiente ([23]). Isto acontece porque muitas vezes é difícil deduzir a lógica pela qual os parâmetros deveriam ser ajustados para melhorar a representação ([118]).

2.2 Calibração Automática

Com o avanço das ferramentas computacionais e a necessidade de tornar mais rápido e eficiente o processo de calibração, foram desenvolvidas técnicas de otimização que se baseiam na utilização intensiva de computadores para a calibração automática de modelos hidrológicos. Para avaliar os resultados do processo de calibração foram propostas diferentes medidas de desempenho (funções objetivo) baseadas, geralmente, nos erros entre as vazões calculadas e observadas.

Uma primeira abordagem, são os métodos de calibração Mono-objetivo que buscam o ótimo de uma função objetivo específica e são definidos como a minimização (ou maximização) de uma função objetivo escalar. Este tipo de otimização é uma ferramenta útil para explorar a

natureza dos problemas, mas não é capaz de fornecer um conjunto de soluções alternativas que contrastem objetivos diferentes entre si.

. Na modelagem hidrológica não existe um único conjunto de parâmetros capaz de representar todos os processos hidrológicos, devido às incertezas: nos dados, nas simplificações do modelo e na representatividade dos valores dos parâmetros ([14]). [10] introduz o conceito de equifinalidade, que estabelece a possibilidade de existência de vários conjuntos de parâmetros que de forma apropriada resultarão na resposta desejada. Isto fica mais evidente quando com um determinado conjunto de parâmetros é obtido um bom ajuste dos picos dos hidrogramas em detrimento do ajuste nos períodos de estiagens, enquanto com outro conjunto de parâmetros obtém-se um bom ajuste dos períodos de estiagens, em detrimento do ajuste no período de cheias.

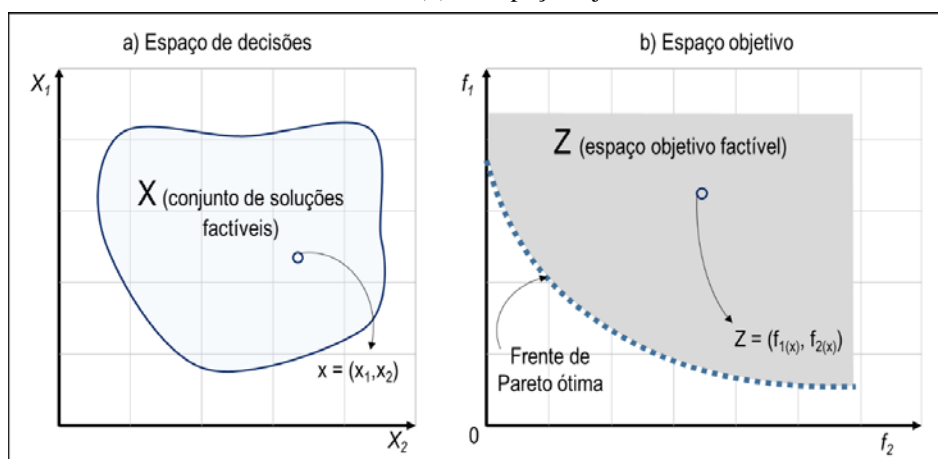
2.2.1 Calibração Multi-objetivo

Os métodos de otimização em geral podem ser usados na formulação de um problema multi-objetivo. O objetivo é encontrar um conjunto de soluções que otimizem simultaneamente mais de uma função objetivo (conflitante). A interação entre diferentes objetivos leva a um conjunto de soluções de compromisso, amplamente conhecidas como soluções trade-off, não dominadas, não inferiores ou ótimas de Pareto ([109]). De acordo com [72], a calibração do modelo pode ser realizada com base em medições de múltiplas variáveis (por exemplo, nível do lençol freático, escoamento do rio ou conteúdo de água), medições multilocais (ou seja, vários locais de medição da mesma variável distribuídos dentro da bacia hidrográfica) e modos de resposta múltipla (ou seja, projetar funções objetivo que medem várias respostas de processos hidrológicos, como balanço hídrico geral, vazões de pico e vazões baixas). O problema de calibração multi-objetivo pode ser formulado como:

$$\text{minimizar or maximizar } Z = [f_{1(x)}, f_{2(x)}, \dots, f_{m(x)}], x \in X \quad (1)$$

Onde X são os limites do espaço de decisões ou soluções x_i ; os valores de x estão limitados de acordo com restrições físicas e matemáticas, informações sobre características físicas do sistema e experimentos de simulação; $f_{v(x)}$, $v = 1, 2, \dots, m$ são diferentes funções objetivo que definem o espaço objetivo fatíveis. Na Figura 1, é ilustrada o problema de minimização com dois objetivos.

Figura 1 – Conjunto de soluções factíveis em um problema de minimização com dois objetivos: (a) no espaço de decisões e (b) no espaço objetivo.



Fonte: elaborado pelo autor

Desde a aparição dos primeiros métodos de otimização multi-objetivo nos anos 90, diversos tipos de métodos têm sido desenvolvidos e aplicados na calibração de modelos hidrológicos conforme indicado no Quadro 1.

É observado um número crescente de estudos recentes sobre esquemas semi-distribuídos e distribuídos. A escala espacial das aplicações varia desde bacias experimentais de alguns hectares até bacias muito grandes de milhares de quilômetros quadrados. A maioria das aplicações utiliza dois ou três objetivos, e apenas algumas exploram mais critérios. Muitas aplicações incluem o uso de algoritmos evolutivos multi-objetivos (NSGA-II, SPEA-II, e-NSGA) que tem se provado eficientes em diferentes tipos de modelos, com um grande número de parâmetros e múltiplas funções objetivo.

Quadro 1 – Características de aplicações da calibração multi-objetivo de modelos hidrológicos

Ano (referência)	País	Modelo hidrológico	Parâmetros	Objetivos	Método
1998 ([138])	EUA	SAC-SMA	13	2 (RMSE, HMLE)	MOCOM-UA
2000 ([113])	Suécia	HBV	10	2 (medições fuzzy combinando vazões e níveis de fluxo subterrâneo)	Algoritmo genético modificado
2000 ([72])	Dinamarca	MIKE 11/NAM	9	4 (erro de volume, RMSE, RMSE de vazões altas e baixas)	SCE-UA ponderado
2000 ([141])	Taiwan	HBV	9	3 (RMSE, MPE, função fuzzy para 11 pontos de vazão)	SCE-UA
2001 ([69])	Cingapura	HydroWorks	8	2 (erro de volume, erro de vazão de pico)	VEGA, MOGA, NSGA, ACGA com NN
2002 ([9])	Noruega	Modelo de chuva-vazão com base física	11	3 (NSE das vazões e duas series de níveis de fluxo subterrâneo)	MOCOM-UA

Ano (referência)	País	Modelo hidrológico	Parâmetros	Objetivos	Método
2002 ([114])	Nova Zelândia	Modelo conceitual concentrado de 3 caixas	16	3 (funções fuzzy, uma baseada no escoamento superficial e duas séries de níveis de águas subterrâneas)	Algoritmo genético modificado
2002 ([19])	China	Xinjiang	16	3 (valor de pico, horário de pico, volume de escoamento total)	AG de múltiplos objetivos
2002 ([80])	EUA	Alpine Hydrochemical Model (AHM)	15	4 (subgrupos de 21 critérios químicos e hidrológicos)	MOCOM-UA, combinado com análise de sensibilidade
2003 ([73])	Dinamarca	MIKE-SHE	12	2 (RMSE do escoamento, média RMSE de 17 séries de níveis de águas subterrâneas)	SCE-UA ponderado
2003 ([130])	EUA	SAC-SMA	13	2 (RMSE para partes acionadas e não acionadas do hidrograma)	MOCOM-UA, MOSCEM-UA
2004 ([2])	EUA	Múltiplas estruturas de SAC-SMA	13	2 (RMSE e Log-RMSE para ajuste em vazões altas e baixas)	Calibração multietapa com SCE-UA
2005 ([111])	EUA	MOD-HMS	10	3 (RMSE do lençol freático, bombeamento anual e drenagem subterrânea)	SCEM-UA, MOSCEM-UA
2005 ([84])	EUA	SWAT	16	2 (RMSE de escoamento superficial e produção de sedimentos)	Análise de sensibilidade, AG, GLUE
2005 ([112])	México	Modelo integrado de águas superficiais e subterrâneas	10	4 (RMSE do lençol freático, altura do aquífero, volume de drenagem e volume de infiltração do canal)	MOSCEM-UA
2005 ([18])	China	Xinjiang	16	3 (valor de pico, horário de pico, volume total de escoamento)	AGs em serie e paralelo
[37] (2006)	França	Ecomag	10	7(NSE de 7 pontos de vazão)	MOCOM-UA
2006 ([124])	EUA	SAC-SMA	13	2 (RMSE e RMSE com transformação Box-Cox)	NSGA-II, SPEA-II, MOSCEM-UA
2006 ([66])	Alemanha	WaSiM (modelo distribuído)	37	8 (NSE em 8 medidores de vazão, usando vazões transformadas)	PEST (abordagem em duas etapas)
2007 ([103])	Bélgica	SWAT	10	5 (RMSE para fluxo total e lento, máximos de fluxo rápido e mínimos de fluxo lento)	Calibração manual
2007 ([26])	Bélgica	HBV	10	3 (RMSE, log-RMSE e MSDE)	NSGA-II
2007 ([8])	EUA	SWAT	16	2 (RMSE e log-RMSE do escoamento; RMSE e log-RMSE da produção de sedimentos; RMSE do escoamento e produção de sedimentos)	NSGA-II
2007 ([123])	EUA	SAC-SMA	13	2 (RMSE e RMSE com transformação Box-Cox)	Implementações serial e paralela do e-NSGA-II
2007 ([24])	EUA	SWAT	139	2 (RMSE e MAE dos fluxos diários)	NSGA-II (24 computadores paralelos)
2007 ([93])	Alemanha	HBV modificado	14	2 (função ponderada de EF e viés de escoamento superficial, relação de tempo com	SCE-UA ponderado, MOSCEM-UA

Ano (referência)	País	Modelo hidrológico	Parâmetros	Objetivos	Método
2007 ([61])	Virgínia	HSPF	11	simulação de cobertura de neve ruim) 6 (MSE dos fluxos diários, 50% dos fluxos mais baixos excedem, 10% dos fluxos mais altos excedem, picos de tempestade, volume sazonal, volume de tempestade)	Calibração manual e automática, utilizando o software PEST
2007 ([39])	Luxemburgo	HBV-96	9	2 (porções baixa e alta dos hidrogramas)	MOSCEM-UA
2008 ([59])	Dinamarca	MIKE-SHE	11	9 (RMSE do escoamento superficial, média RMSE e desvio padrão dos resíduos para séries piezométricas)	Preference ordering genetic algorithm (POGA)
2008 ([42])	Áustria, República Checa e República Eslovaca.	LISFLOOD	9	3 (bias, NSE e CD) com fluxos transformados	SCEM-UA
2009 ([14])	Brasil	IPH II	7	3(RMSE, NSE, desvio padrão, desvio padrão da inversa das vazões)	MOCOM-UA, MOSCEM-UA
2013 ([143])	EUA	SWAT	15	2(NSE em dois postos)	AMALGAM
2013 ([119])	Brasil	MGB-IPH	7	3(erro de volume, NSE, log-NSE)	MOSCEM-UA
2014 ([145])	México	HYMOD	5	2(log-RMSE, M4E)	MOSCEM-UA
2017 ([68])	China	Conceptual rainfall-runoff model (CRRM)	16	3(porcentagem de proficiência em relação ao pico de vazão, horário de pico e volume total de escoamento)	Multicore parallel genetic algorithm (MCPGA)
2020 ([1])	África	GR5J	6	3(RMSE, NSE e KG)	Seis métodos diferentes de otimização multi-objetivo
2022 ([43])	África	MGB-IPH	8	3(erro de volume, NSE, log-NSE)	MOCOM-UA
2023 ([136])	China	SWAT	20	3 (R2, NSE e PBIAS)	NSGA-II

RMSE: root mean square error; log-RMSE: RMSE dos dados transformados logaritmicamente; HMLE: heteroscedastic maximum likelihood error; M4E: mean fourth-power error; NSE: Nash-Sutcliffe efficiency; CD: coefficient of determination; CC: coeficiente de correlação; EMA: error mean percentage absolute; MSE: mean squared error; MSDE: mean squared derivative error.

Nos últimos vinte anos foi observado que à avaliação de um grande número de parâmetros durante a calibração multi-objetivo com duas ou mais funções objetivo, acrescentam uma complexidade considerável ao processo e causa uma carga computacional significativa ([6]; [35]; [63]).

Para diminuir está carga computacional, pesquisadores têm proposto diferentes soluções, entre elas:

- Diminuir o número de parâmetros, realizando uma análise de sensibilidade antes da calibração do modelo para identificar e remover parâmetros insensíveis da calibração

([84]; [70]; [135]; [117]). Porém, esta solução pode levar à perda de parâmetros importantes na calibração do modelo e conseqüentemente à degradação da precisão do modelo.

- Desenvolver modelos substitutos ou metamodelos (Redes Neurais Artificiais) para simplificar modelos hidrológicos com menos parâmetros ([17]; [79]; [47]; [137]). Esta solução pode ter como desvantagem que o modelo substituto não alcance o desempenho do modelo original.
- Alguns pesquisadores ([7]; [102]; [104]; [142]; [60]; [140]; [6]) têm aplicado a computação paralela, que liga vários computadores/processadores, ajudando a reduzir o tempo total de computação, sendo dominada de calibração automática paralela. Esta solução tem como desvantagem a necessidade de adaptar ou reescrever os códigos computacionais de modelos e métodos de otimização utilizados, para que sejam executados em paralelo.
- Alternativamente, a escolha do critério de parada do método de calibração automática também pode ajudar a diminuir o tempo computacional, podendo ser incorporado também na calibração automática paralela.

2.2.2 Critérios de Parada

Em alguns problemas de calibração multi-objetivo de engenharia, o processo de obtenção do FP pode ser extremamente caro do ponto de vista computacional ([144]). Segundo [64], alguns problemas comuns observados em cenários de calibração que surgem nas ciências experimentais podem ser: o problema tem objetivos múltiplos, possivelmente incomensuráveis; o tempo necessário para realizar uma avaliação é da ordem de minutos ou horas; apenas a avaliação de um conjunto de parâmetros pode ser realizada por vez (não é possível paralelismo); o número total de avaliações a serem realizadas é limitado por restrições financeiras, de tempo ou de recursos; nenhum simulador realista ou outro método de aproximação da avaliação completa está prontamente disponível; o ruído é baixo (avaliações repetidas produzem resultados muito semelhantes); a dimensionalidade do espaço de busca é baixa a média. Estes problemas evidenciam a necessidade de critérios de parada que poupem o esforço ou custo computacional desnecessário.

Alguns tipos de critérios de parada apresentados por [40, 99], são: se o usuário cancela manualmente, se um determinado número de simulações é alcançado, se nenhuma melhoria significativa na qualidade do conjunto de soluções puder ser obtida por meio de gerações

adicionais, um tempo decorrido especificado é excedido ou se um valor especificado da função objetivo é atingido. Embora esses critérios são normalmente aplicados para problemas mono-objetivo, a detecção de convergência de indicadores de desempenho multi-objetivo permite a redução de um problema de calibração multi-objetivo a um problema de objetivo único ([121]).

Alguns tipos de critérios de parada que possuem um ou dois parâmetros (baseados na melhoria, a diversidade, a distribuição dos membros da população do algoritmo evolutivo) são descritos a seguir.

- a) Métricas de execução [29] (Figura 2, Figura 3): são critérios que propõem a convergência de métricas de desempenho (GD, IGD, R2, MCD ou HV) do MOEA durante a execução, finalizando quando a métrica atinge um valor limite definido pelo usuário (d_{lim}). Algumas métricas que medem a diversidade das soluções, são:
- GD (Generational Distance, [129]): métrica que calcula a média da menor distância euclidiana normalizada de cada indivíduo do FP analisado (A) para um FP ótimo (B) pré-computado, assim como na eq 2.

$$GD(A, B) = \frac{1}{N} (\sum_{i=1}^N d_i^2)^{1/2} \quad (2)$$

Onde: N, indica o número de soluções não dominadas do FP analisado; d_i , é a distância euclidiana mínima entre a solução “i” e a solução do Frente de Pareto ótimo. Um exemplo desta métrica para um espaço objetivo com duas funções objetivo, é mostrado na Figura 2 a, assim como a convergência ao longo do processo de otimização Figura 2 d (figura de [129]). Neste caso o critério é atingido quando para duas gerações consecutivas t-1 e t, $|GD_t - GD_{t-1}| < d_{lim}$. Assumindo que o FP ótimo seja conhecido, este índice é uma medida que representa o quão 'distante' o FP está do FP ótimo.

Considerando que são conhecidos os ótimos globais teóricos do problema de otimização, a métrica GD pode ser medida entre o FP analisado (A) e um ponto ótimo global (Z), como representado no esquema, em um espaço objetivo de duas funções objetivo, mostrado na Figura 2 c.

- IGD (Inverted Generational Distance, [56]): como uma inversão de GD, no IGD é calculando a média da menor distância euclidiana normalizada de cada indivíduo do FP ótimo (B) pré-computado e o FP analisado (A).

$$IGD(A, B) = GD(B, A) = \frac{1}{M} \left(\sum_{j=1}^M d_j^2 \right)^{1/2} \quad (3)$$

Onde: M, indica o número de soluções do FP ótimo; d_j , é a distância euclidiana mínima entre a solução “i” e a solução do Frente de Pareto ótimo (um exemplo do espaço objetivo com duas funções objetivo, é mostrado na Figura 2 b). Neste caso o critério é atingido quando para duas gerações consecutivas t-1 e t, $|IGD_t - IGD_{t-1}| < d_{lim}$.

- R2 ([97]): o indicador R2, avalia a qualidade de um FP (A) contra um ponto de referência particular z,

$$R2(A, W, z) = \frac{1}{W} \sum_{w \in W} \min_{x \in A} \left\{ \max_{i=1,2} \{w_i (FO_i(x) - z_i)\} \right\} \quad (4)$$

Onde: W, indica um conjunto de vetores de pesos uniformemente distribuídos no espaço objetivo, $w = (w_1, w_2) \in W$; z é um ponto que nunca é dominado por quaisquer soluções viáveis no espaço objetivo, por exemplo (0,0) em um espaço objetivo de duas funções objetivo. Um exemplo do indicador R2 num espaço objetivo com duas funções objetivo, é mostrado na Figura 3. Neste caso o critério é atingido quando para duas gerações consecutivas t-1 e t, $|R2_t - R2_{t-1}| < d_{lim}$.

- MCD (Maximum Crowding Distance, [106]): A máxima distância de aglomeração calculada na geração i, é denotada por d_i (Figura 4 a). Uma maneira possível de medir sua estabilidade ao longo de L gerações, é simplesmente calcular a diferença.

$$d_L = \max_{i=1}^L d_i - \min_{i=1}^L d_i \quad (5)$$

Onde: d_{lim} , é um limite estabelecido; d_i é calculado como:

$$d_i = (FO1_{i+1} - FO1_{i-1}) + (FO2_{i+1} - FO2_{i-1}) \quad (6)$$

Neste caso a condição de parada é definido como $d_L < d_{lim}$.

[105] observou que pelas oscilações que apresenta este critério, propôs o uso do desvio padrão das d_L .

$$\sigma_L = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{i=1}^L (d_i - \bar{d}_L)^2} \quad (7)$$

Onde \bar{d}_L é a média de d_i ao longo de L gerações. Neste caso a condição de parada é definido como $\sigma_L < d_{lim}$.

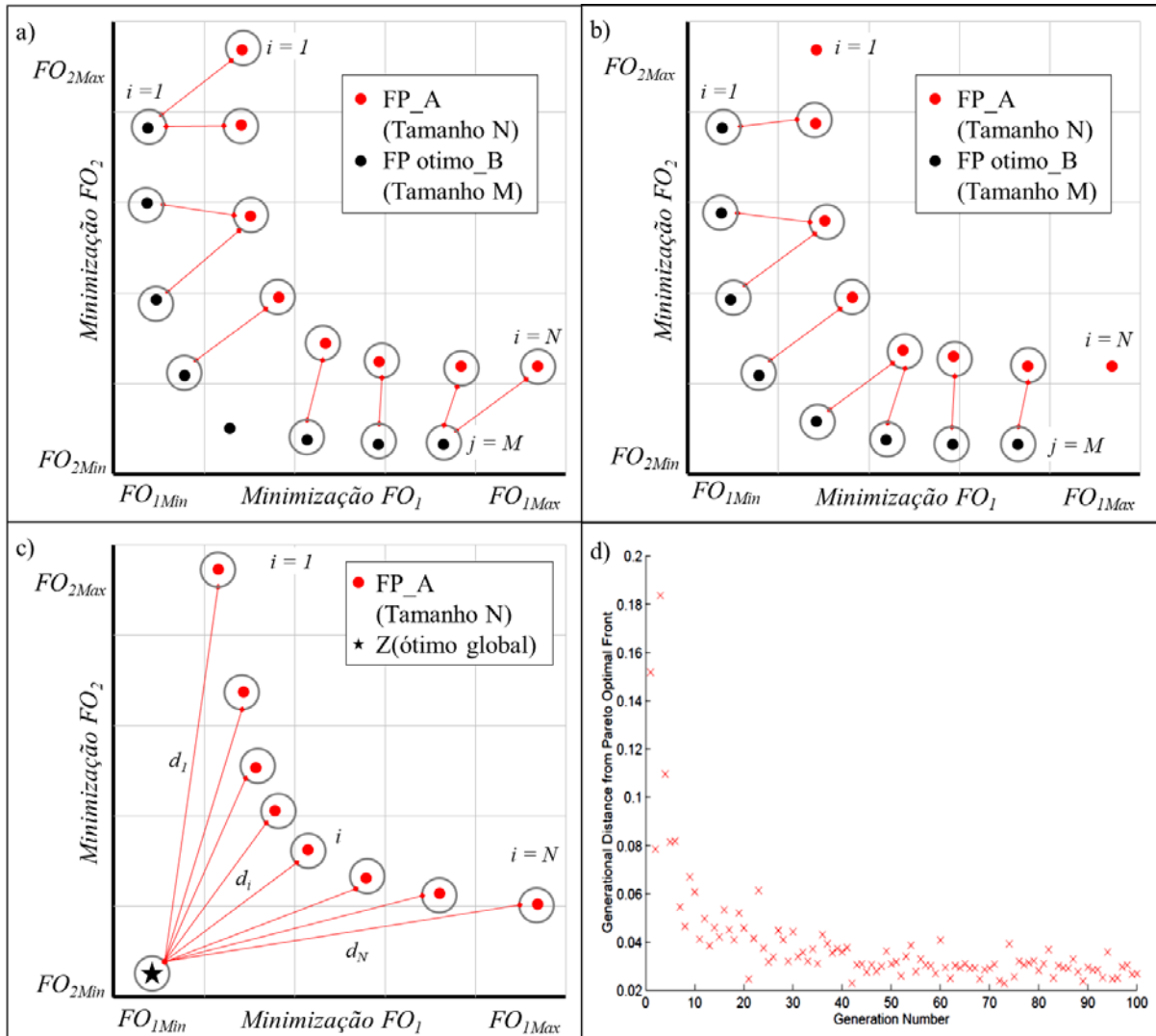
Um exemplo da evolução do σ_L num espaço objetivo com duas funções objetivo, obtido da simulação com o NSGA II e um $d_{lim} < 0,02$, é mostrado na Figura 4 b.

- HV (Hypervolume, [133, 134]): A métrica de hipervolume calcula o volume do espaço objetivo coberto pelos membros de um conjunto de Pareto obtido limitado por um ponto de referência “r”. O ponto de referência “r” cuja coordenada consiste nos valores máximos das funções objetivos. Matematicamente o HV é descrito da seguinte forma:

$$HV = volume(U_{i=1}^A v_p) \quad (8)$$

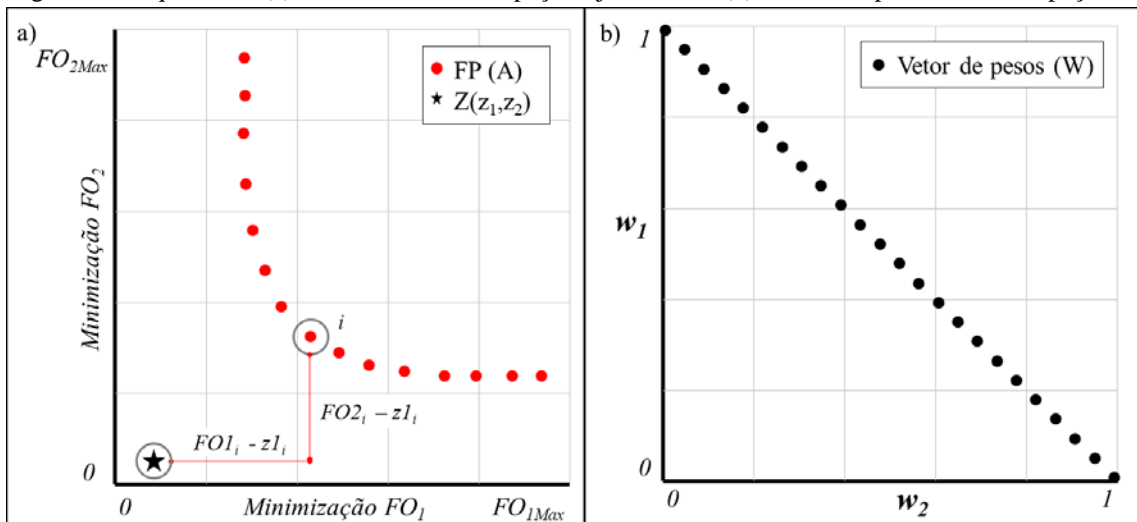
Onde: A, indica o número de soluções do FP analisado; v_i , é o hipercubo da solução “i” em relação ao ponto de referência “r”. Um exemplo num espaço objetivo com duas funções objetivo, é mostrado na Figura 5. Neste caso o critério é atingido quando para duas gerações consecutivas t-1 e t, $|HV_t - HV_{t-1}| < d_{lim}$.

Figura 2 – Esquema das métricas (a)GD e (b)IGD entre um Frente de Pareto A e um Frente de Pareto ótimo B; (c) GD um Frente de Pareto A e uma solução não dominada Z e (d) Evolução da convergência do GD



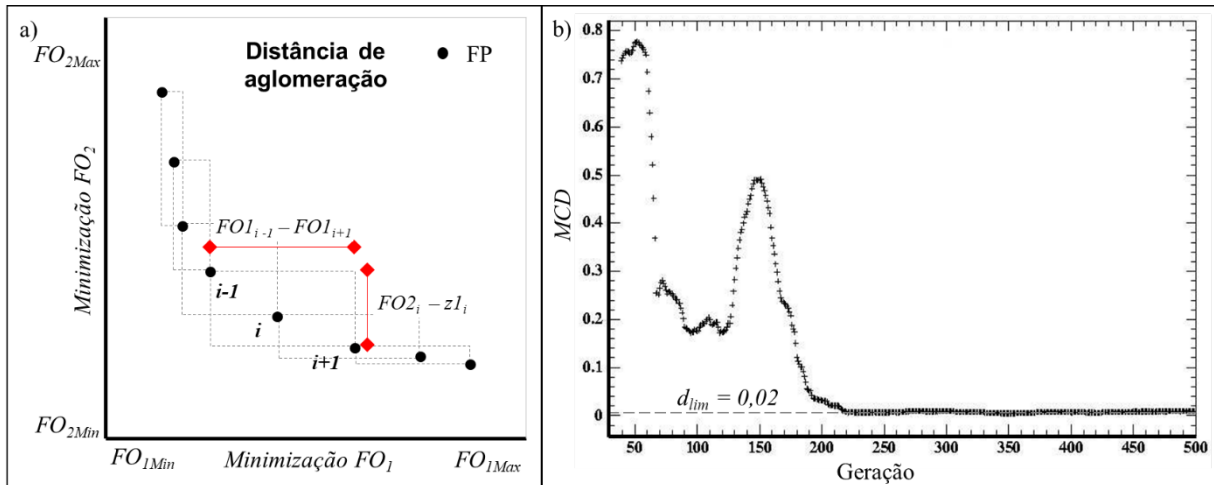
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 3 – Esquema do (a) indicador R2 num espaço objetivo 2D e (b) o vetor de pesos W num espaço 2D



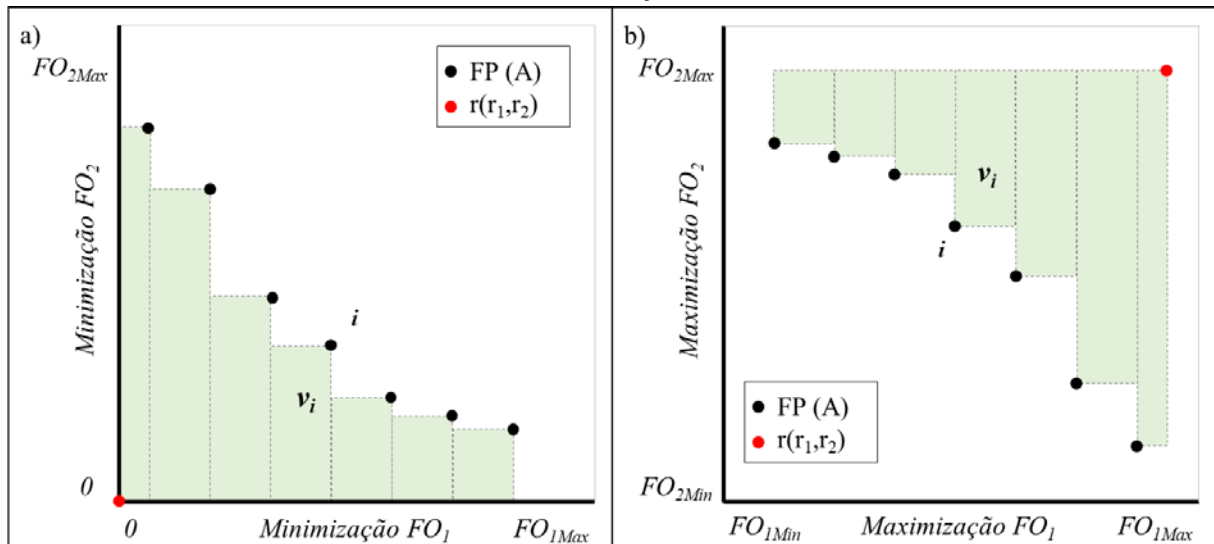
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 4 – Esquema de (a) distância de aglomeração d_i num espaço objetivo 2D e (b) a convergência do MCD ao longo de 500 gerações.



Fonte: adaptado de [99]

Figura 5 – Esquema da representação do HV num espaço objetivo 2D (a) para um problema de minimização e (b) maximização.



Fonte: adaptado de [71]

- b) Critério baseado nas soluções não dominadas de duas gerações consecutivas: Proposto por [76], se consideradas duas frentes FP_{t-1} e FP_t, gerados em duas gerações consecutivas t-1 e t, foi proposta a função $\Delta(\text{FP}_t, \text{FP}_{t-1})$, que retorna o conjunto dos elementos do FP_t que são dominados por pelo menos um elemento de FP_{t-1} (ilustrado na Figura 7). Assim a métrica que mede o progresso da taxa de dominação mútua (I_{mdr} , [49]), matematicamente a métrica é representada como:

$$I_{mdr}(\text{FP}_t, \text{FP}_{t-1}) = \frac{|\Delta(\text{FP}_t, \text{FP}_{t-1})|}{|\text{FP}_t|} - \frac{|\Delta(\text{FP}_{t-1}, \text{FP}_t)|}{|\text{FP}_{t-1}|} \quad (9)$$

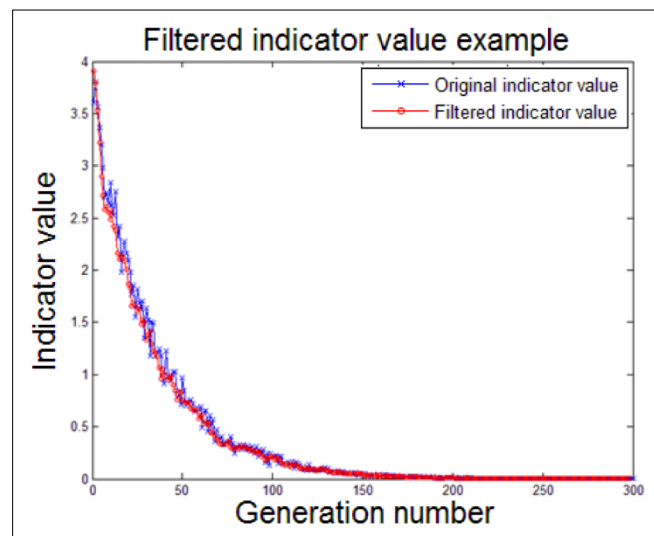
Onde: $|\text{FP}_t|$ é o número de elementos do FP_t ; $|\text{FP}_{t-1}|$ é o número de elementos do FP_{t-1} ; $|\Delta(\text{FP}_t, \text{FP}_{t-1})|$ é o número de elementos do FP_t que são dominados por algum elemento do FP_{t-1} ; $|\Delta(\text{FP}_{t-1}, \text{FP}_t)|$ é o número de elementos do FP_{t-1} que são dominados por algum elemento do FP_t .

O indicador I_{mdr} fornece diferentes tipos de informação, podendo variar entre $[-1, 1]$. Quando: $I_{mdr} = 1$, significa que a população do FP_t é completamente melhor que a população da FP_{t-1} ; $I_{mdr} = 0$, significa que não houve nenhum progresso substancial; $I_{mdr} = -1$, significa não melhorou nenhuma das soluções do FP_{t-1} .

Finalmente o critério de parada termina quando $0 < I_{mdr} < I_{min}$.

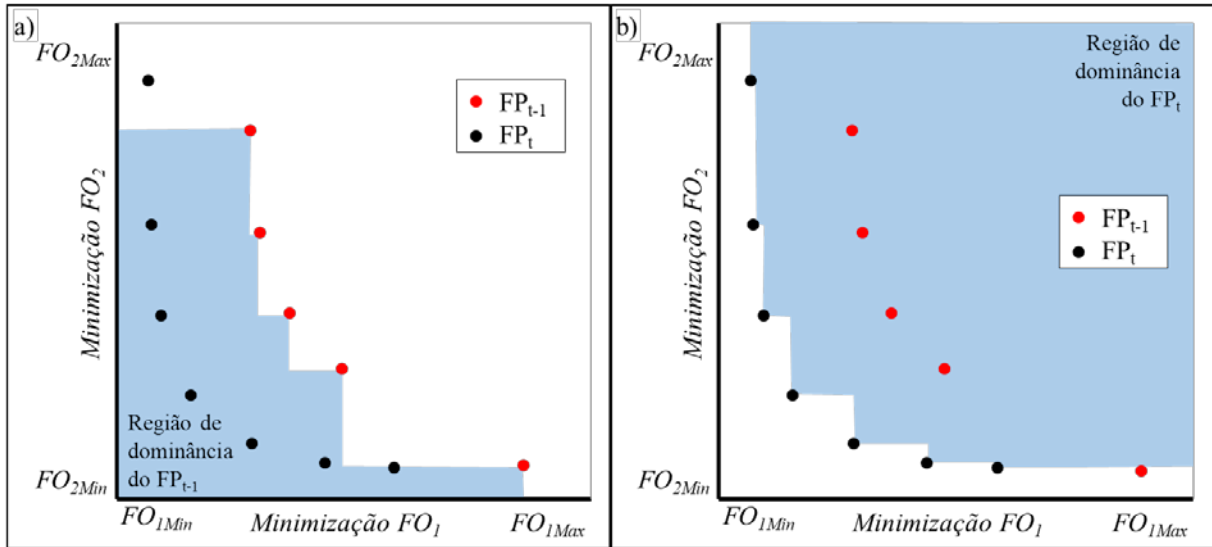
Uma variação deste critério com a adição do Filtro de Kalman [49], ajuda a estabilizar a convergência deste critério, como observado na Figura 6. Más o cálculo de $\Delta(\text{FP}_t, \text{FP}_{t-1})$ em cada geração pode demandar um custo computacional adicional ([75]), além de apresentar um resultado parecido, em termos de geração de término do algoritmo, com outros critérios como HV [49].

Figura 6 – Ilustração da evolução do critério I_{mdr} (linha azul) e com Filtro de Kalman (linha vermelha)



Fonte: adaptado de [49]

Figura 7 – Ilustração num espaço objetivo 2D (a) dos elementos de FP_t , dominados pelos elementos FP_{t-1} e (b) dos elementos de FP_{t-1} , dominados pelos elementos FP_t .



Fonte: adaptado de [44]

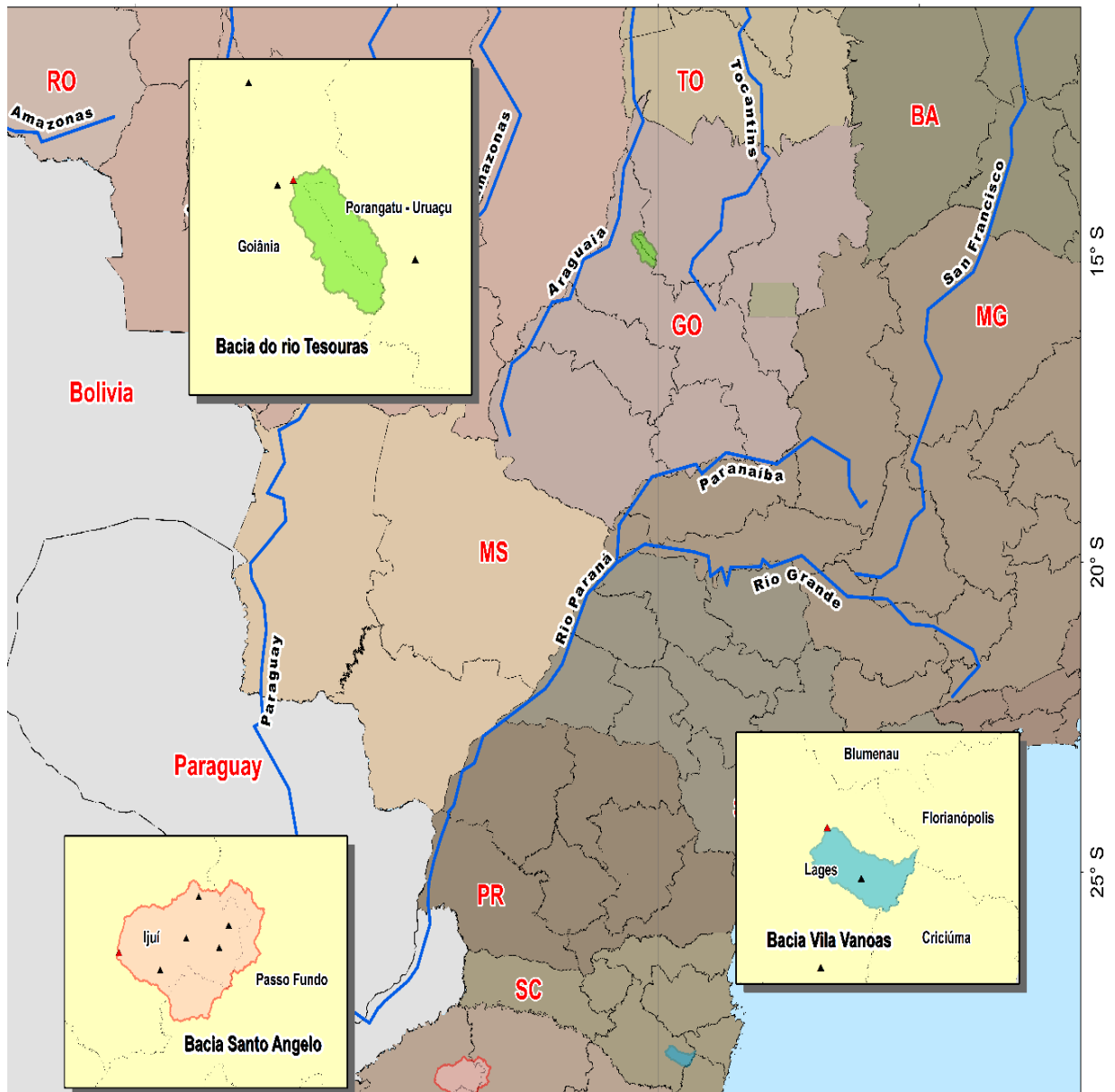
- c) Critério baseado no número máximo de iterações/gerações [4]: é o critério de parada mais comum, interrompe o algoritmo quando ele atinge um número predefinido de gerações ou iterações, mas tem a desvantagem de que métodos de tentativa e erro devem ser aplicados para determinar um número adequado de avaliações de função.

Nos critérios baseados em convergência de métricas, usar a métrica da última geração para decidir a finalização do algoritmo, nem sempre pode fornecer informações suficientes devido à natureza não determinista dos algoritmos evolucionários. Por isto, incorporar diferentes valores das métricas de gerações anteriores, e o uso de testes estatísticos e intervalos de confiança, ajuda a tornar o critério de término mais robusto. Portanto, devem ser aplicados critérios de parada que reagem de forma adaptativa ao estado da execução da otimização ([46]).

Capítulo 3. Estudos de Caso

As três bacias hidrográficas mostradas na Figura 8, rio Tesouras, Santo Ângelo e vila Canoas, apresentam diferentes características morfológicas e extensões de series de informação climática de diferente tamanho, foram selecionadas para realizar os experimentos descritos no Capítulo 5.

Figura 8 – Localização das Bacias Hidrográficas



Fonte: elaborado pelo autor

A bacia do rio Tesouras é uma bacia de cabeceira do rio Araguaia, escolhida porque, a diferença das outras bacias, tem um período chuvoso muito marcado, entre outubro-março e registros de vazões mínimas durante o mês de setembro inferiores a $1 \text{ m}^3/\text{s}$.

A escolha da bacia Santo Ângelo se deve ao fato de ter sido monitorada pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS), desde 1989 em sub-bacias da região, com disponibilidade de um banco de dados hidrológicos superior a 20 anos ([15]; [91]). Além disso, [11] consideraram a região representativa das características climáticas do Planalto Basáltico da Bacia Sedimentar Sul-americana, que possui mais de 1.200.000 km².

A bacia vila Canoas possui importância estratégica para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos a nível estadual, nacional e continental, uma vez que tem parte de seu território dentro da zona de recarga direta do Sistema Aquífero Guarani, representada pelos afloramentos do arenito Botucatu. Em seu território localizam-se as nascentes de dois importantes rios da bacia hidrográfica do rio Uruguai, o Pelotas e o Canoas.

As três bacias são descritas a seguir.

3.1 Bacia hidrográfica do rio Tesouras

Como primeiro caso de estudo foi selecionado um afluente do rio Araguaia, o rio Tesouras, localizado na região noroeste do estado de Goiás, Brasil. A bacia de 1.817 km² tem um tempo estimado de concentração de 4 dias e é predominantemente coberta por savana tropical e pastagens. O clima é caracterizado por uma estação chuvosa (outubro-março) e uma estação seca (abril-setembro). A precipitação média anual de 1982-1986 é de 1.659 mm ano⁻¹ e a evapotranspiração de 1.613,4 mm ano⁻¹.

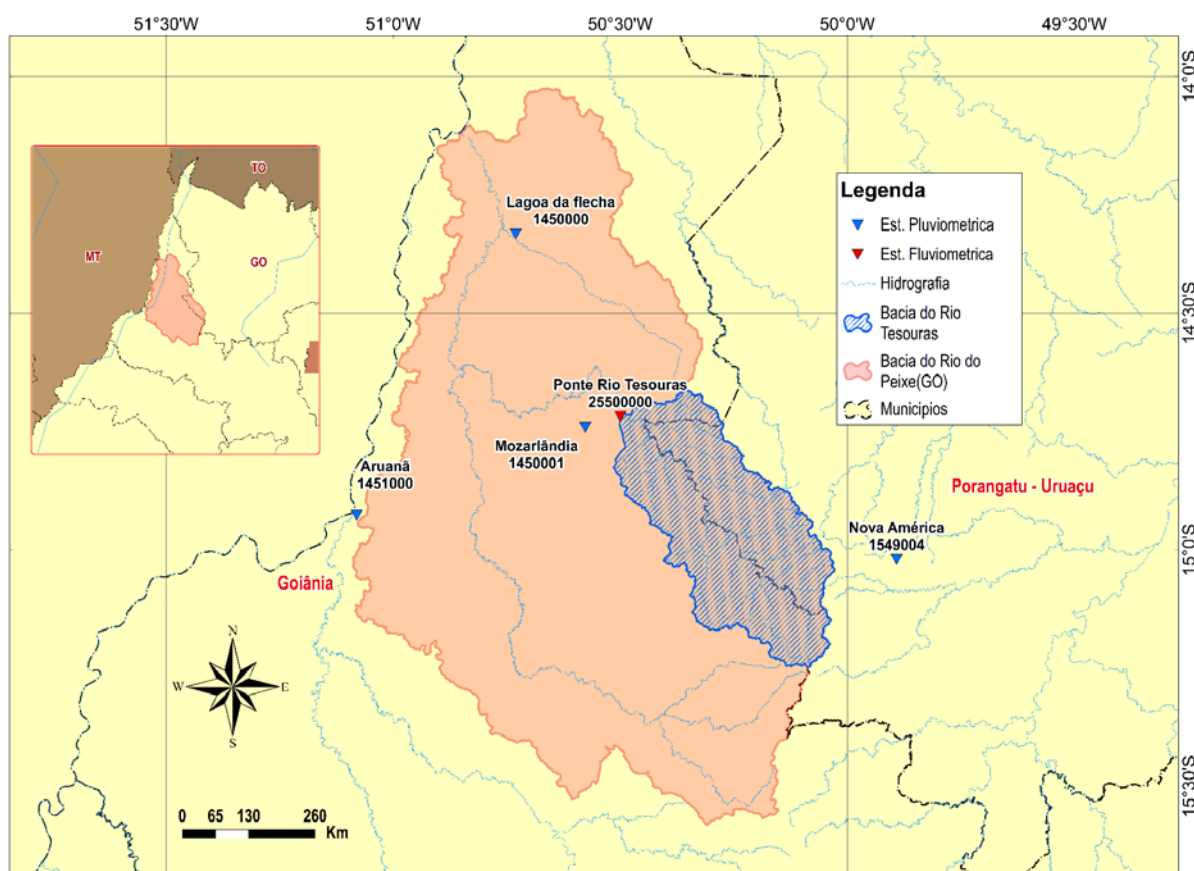
A precipitação diária estava disponível em quatro estações, localizadas perto da bacia, para o período de 1982 a 1986. Os dados diários de escoamento estavam disponíveis na estação hidrográfica Ponte Rio Tesouras. Ambos os dados foram obtidos do conjunto de dados da Agência Nacional de Águas (ANA, Brasil). A descrição e localização das estações são apresentadas na Quadro 2. Na Figura 10 são mostrados os períodos utilizados na calibração e validação.

Quadro 2 – Dados meteorológicos e hidrológicos da bacia do rio Tesouras, 01/01/1982 - 31/12/1986

Código	Tipo	Nome	Latitude (S)	Longitude (W)	Escala temporal
25500000	Fluviométrica	Ponte Rio Tesouras	14°43'7"	50°30'00"	Diário
1549004		Nova América	15°01'14"	49°53'30"	
1450001	Pluviométrica	Mozarlândia	14°44'29"	50°34'38"	
1450000		Lagoa da flecha	14°19'58"	50°43'49"	
1451000		Aruanã	14°55'38"	51°04'50"	

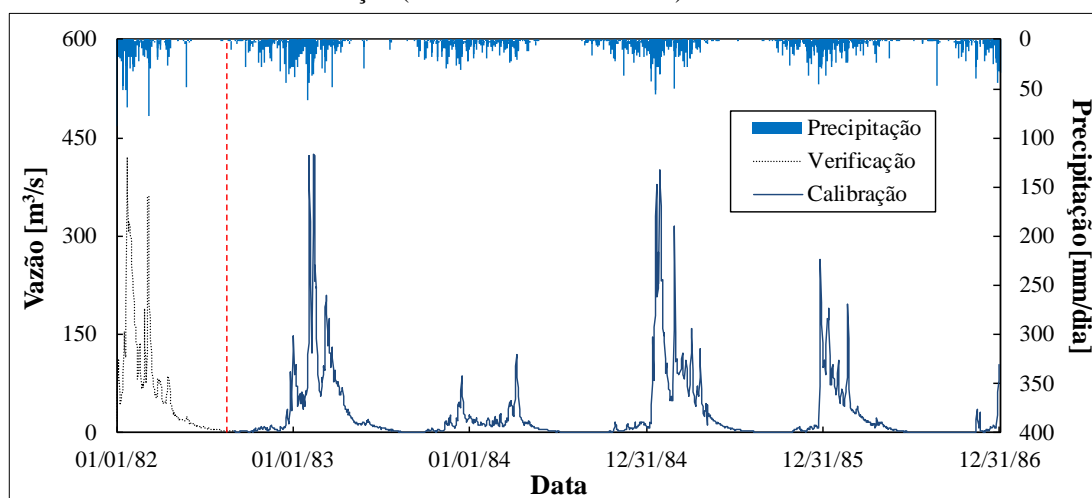
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 9 – Localização da Bacia do rio Tesouras



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 10 – Bacia do rio Tesouras - Período dos dados utilizados para calibração (01/09/1982 - 31/12/1986) e validação (01/01/1982 - 31/08/1982) dos modelos



Fonte: elaborado pelo autor

3.2 Bacia hidrográfica do Santo Ângelo

A bacia Santo Ângelo é uma sub-bacia do rio Ijuí, está localizada na região noroeste do estado do Rio Grande do Sul (sul do Brasil), a bacia possui uma área de drenagem de 5.414 km², a precipitação média anual de 2008-2018 é de 1.814,5 mm ano⁻¹ e a evapotranspiração de 1.231,6 mm ano⁻¹. O terreno é composto por morros em regiões de campos com declives suaves que variam entre 3 a 15%. O tempo de concentração estimado pela fórmula de Kirpich é de 2 dias. Os dados hidrológicos foram obtidos do conjunto de dados da Agência Nacional de Águas, Brasil (ANA, Brasil) no período de 01/01/2003 a 31/12/2018. As sete estações de monitoramento da bacia forneceram os dados utilizados neste estudo. A Figura 11 apresenta o hietograma e hidrograma diários utilizados nas simulações, com o período de calibração de 2012 a 2018 e o período de validação de 2008 a 2011.

Quadro 3 – Dados meteorológicos e hidrológicos da bacia Santo Ângelo, 01/01/2008 - 31/12/2018

Código	Tipo	Nome	Latitude (S)	Longitude (W)	Escala temporal
75230000	Fluviométrica	Santo Ângelo	28°21'19"	54°16'6"	
2853003		Conceição	28°27'22"	53°58'18"	
2853010		Passo Faxinal	28°17'22"	53°46'46"	
2853023	Pluviométrica	Condor	28°13'32"	53°28'13"	Diário
2853034		Panambi	28°20'40"	53°32'30"	
2853035		Nova Ramada	28°4'0"	53°41'0"	
2854019		Mauá	28°18'8"	54°8'3"	

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 11 – Bacia Santo Ângelo - período dos dados utilizados para calibração (01/01/2012 - 31/12/2018) e validação (15/01/2008 - 31/12/2011) dos modelos

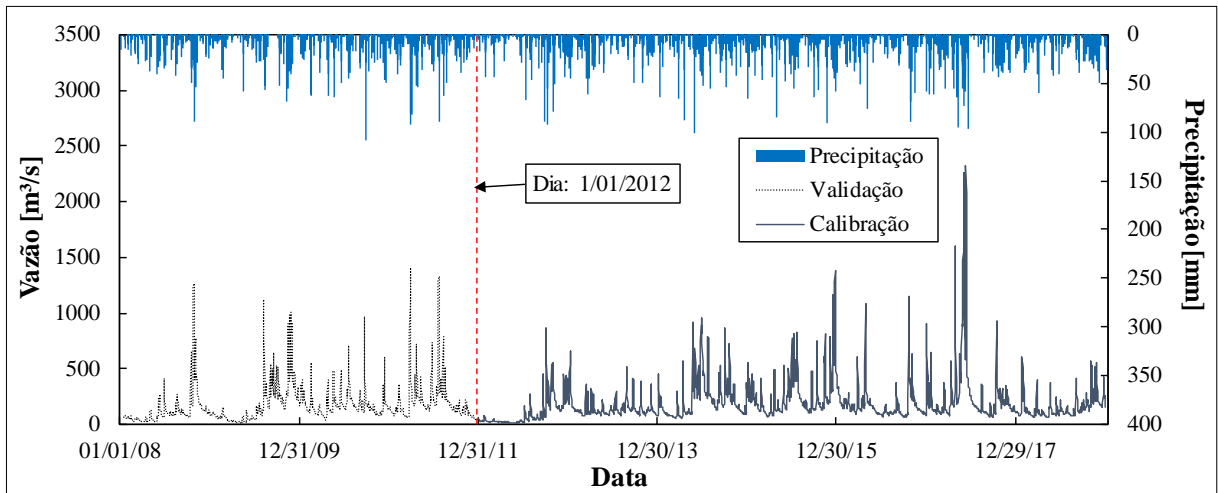
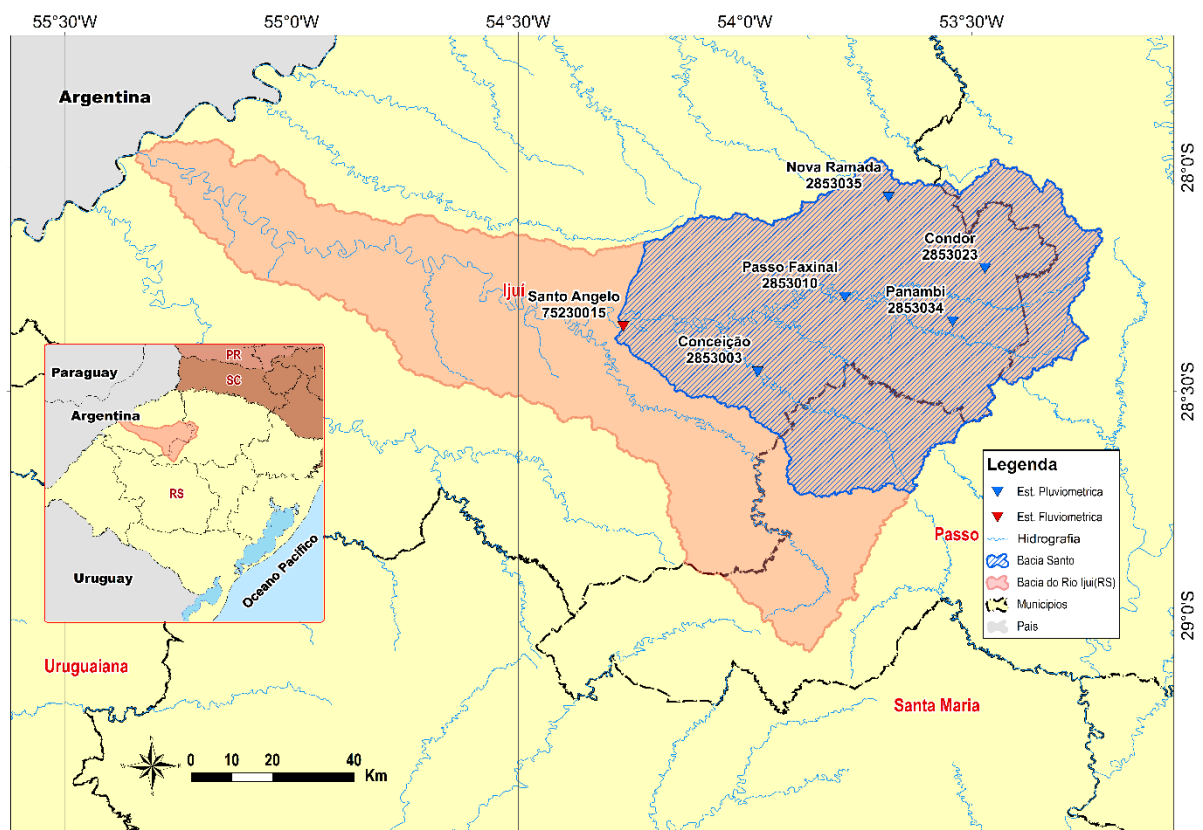


Figura 12 – Localização da Bacia Santo Ângelo



3.3 Bacia hidrográfica do rio Vila Canoas

A bacia do rio Vila Canoas está localizada no estado de Santa Catarina (sul do Brasil) com uma área de drenagem de 989 km². Ao contrário da bacia Santo Ângelo, a bacia de Vila Canoas está localizada em região montanhosa, com solos muito rasos sobre rochas basálticas e

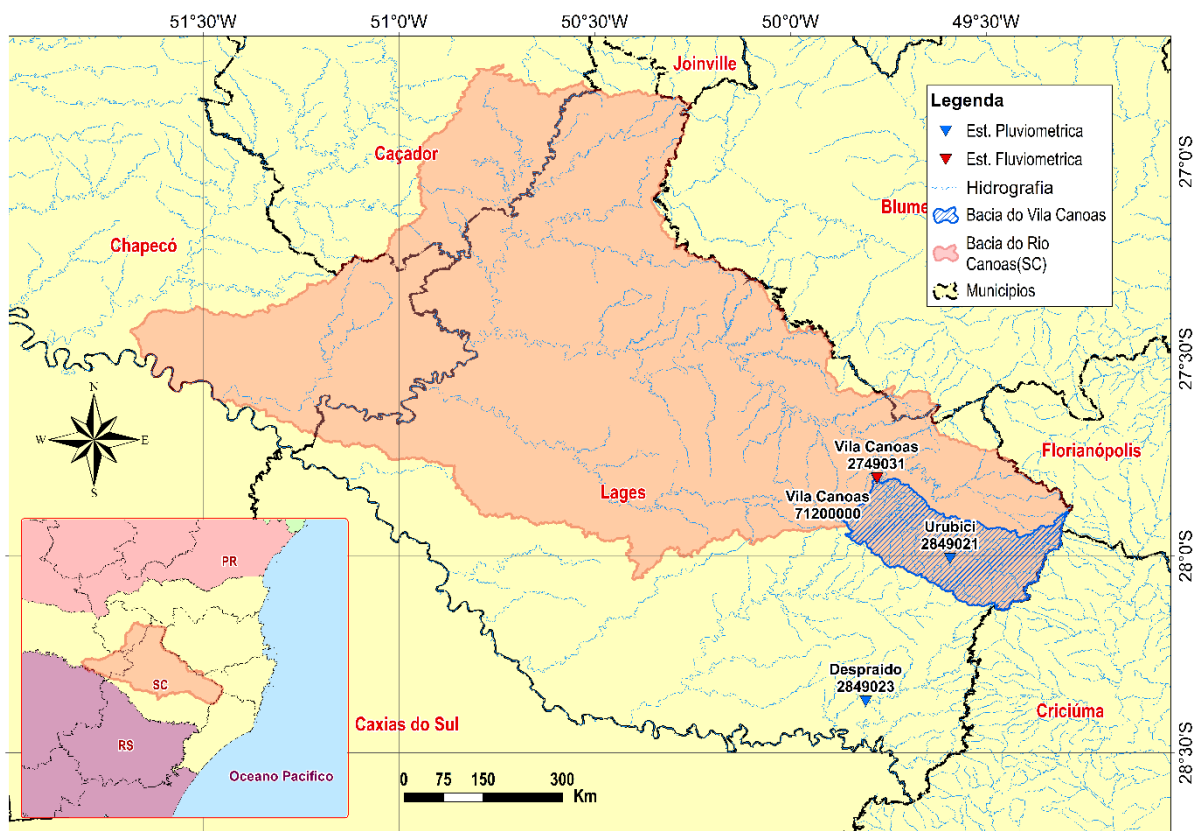
arenitos, com predominância de campos, matas esparsas em áreas de maior declividade e algumas áreas de cultivo e reflorestamento. O tempo de concentração foi estimado em 2 dias usando a fórmula de Kirpich. Os dados hidrológicos também foram obtidos a partir do conjunto de dados ANA. Cinco estações de monitoramento foram identificadas e utilizadas², a precipitação média anual de 1980-1987 é de 1.613,8 mm ano⁻¹ e a evapotranspiração de 924,2 mm ano⁻¹. A Figura 14 apresenta o hietograma e hidrograma diários para simulações, com período de calibração de 1980 a 1984 e período de validação de 1985 a 1987.

Quadro 4 – Dados meteorológicos e hidrológicos da bacia do rio Vila Canoas, 01/01/1980 - 31/12/1987

Código	Tipo	Nome	Latitude (S)	Longitude (W)	Escala temporal
71200000	Fluviométrica	Vila Canoas	27°48'14"	49°46'45"	Diário
02849023		Despraido	28°22'09"	49°48'28"	
02849021	Pluviométrica	Urubici	28°00'26"	49°35'32"	
02749031		Vila Canoas	27°48'15"	49°46'48"	

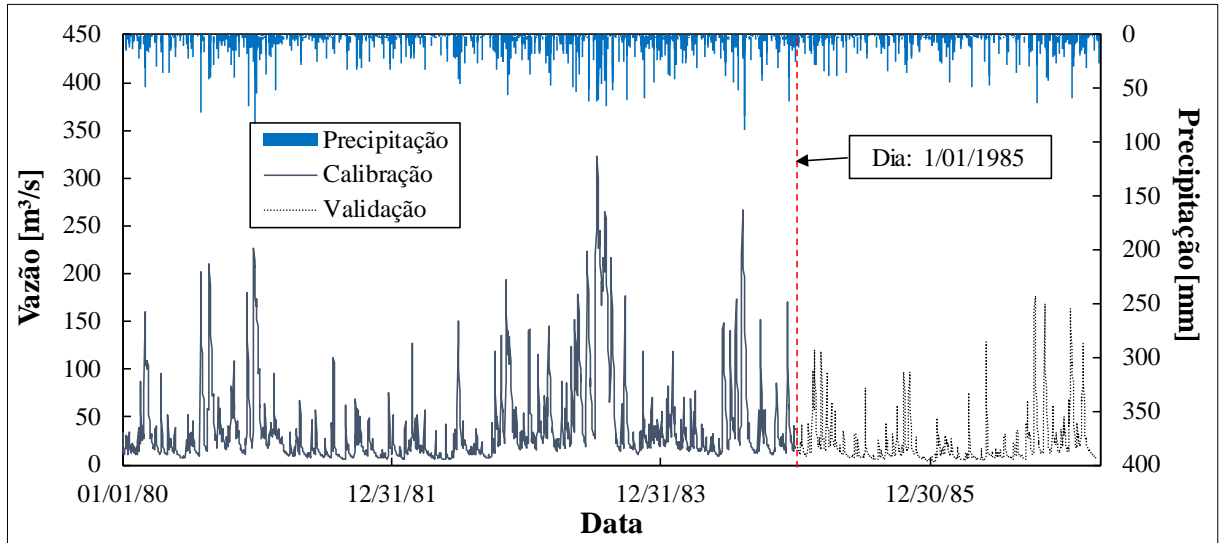
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 13 – Localização da Bacia do rio Vila Canoas



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 14 – Bacia do rio Vila Canoas - período dos dados utilizados para calibração (01/01/1980 - 31/12/1984) e validação (01/01/1985 - 31/03/1987) dos modelos



Fonte: elaborado pelo autor

Capítulo 4. Métodos

A metodologia da Tese está subdividida em três itens principais, sendo o primeiro destinado à descrição da instalação experimental e os outros dois subdivididos de acordo com parte dos objetivos específicos propostos, desse modo:

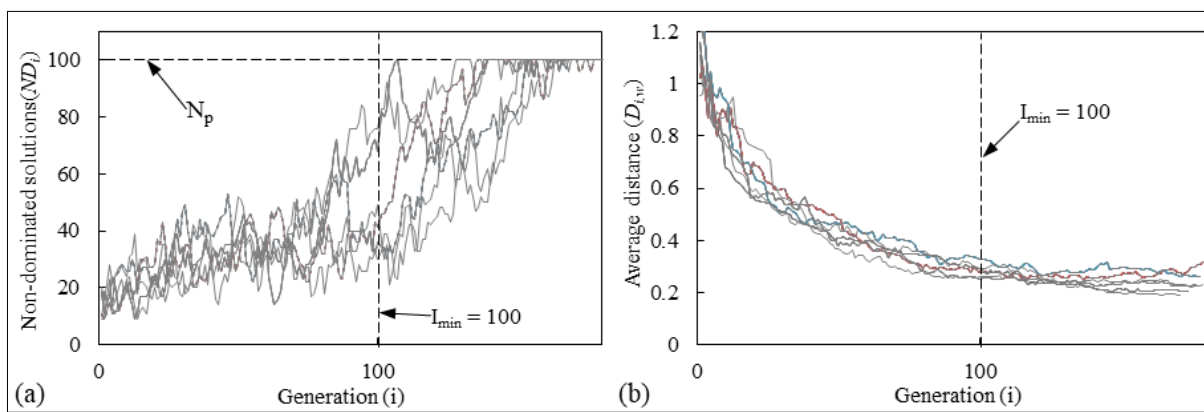
- a) Item 4.1: em primeiro lugar é descrito o novo critério de parada proposto neste trabalho.
- b) Item 4.2: na sequência foram descritos os seis modelos hidrológicos, que foram utilizados para representar as series de vazões das três bacias apresentadas no capítulo anterior.
- c) Item 4.3: antes de conduzir as experiências de calibração multi-objetivo, primeiro foram realizadas as experiências de calibração mono-objetivo, neste item é descrito o algoritmo SCE-UA.
- d) Item 4.4: Aqui são descritos os métodos envolvidos nos processos de calibração multi-objetivo (funções objetivos, algoritmos evolucionários multi-objetivo e duas métricas de desempenho dos conjuntos de soluções).

4.1 Novo Critério de Parada baseado no número das soluções não dominadas

Durante o processo de otimização dos MOEA's, foi observado que o número de soluções não dominadas (N_p) geradas em cada geração, varia nos primeiros estágios do processo de otimização. Na Figura 15, são mostrados os resultados durante os processos de otimização, com os algoritmos NSGAI, NSGAI e SPEA2, do modelo hidrológico IPH II, ao longo de 200 gerações. Do observado na Figura 15 (publicada em [52]), a convergência da Distância mínima media ao ótimo global (Figura 15 b), aconteceu aproximadamente, quando o N_p convergiu para o máximo número de soluções do FP (na Figura 15 a, nomeado de ND_i).

Desta observação, se propôs um novo critério de parada que analise o N_p como principal componente, sem cálculos adicionais ou armazenamento de resultados antecedentes, este novo critério é representado como “CP1” nessa pesquisa.

Figura 15 – Gráficos de convergência em termos de (a) Número de soluções não dominadas e (b) GD ou distancia euclidiana media



Fonte: [52]

Pelo observado em outros critérios de parada, é necessário estabelecer alguns parâmetros. Por exemplo, na métrica MDC, a aplicação de um limite adequado impede o critério de terminar o processo de otimização muito cedo, como observado na Figura 4 b. Assim pelo observado na Figura 15, o termo “ I_{min} ” (nomeado de G_{min} , nesta pesquisa) é um parâmetro que ajuda a garantir que o algoritmo não termine o processo de otimização muito cedo, mesmo que o número máximo de soluções não dominadas é atingido.

Também, o número máximo de soluções não dominadas, embora atingido pode diminuir em posteriores gerações indicando que ainda não convergiu, por isto o segundo parâmetro deve representar o número máximo de vezes consecutivas ($Count_{Max}$) que o número de membros é mantido após passar pelo “ G_{min} ”, a ilustração destes parâmetros aparecem na Figura 16.

Alguns valores testados de “ G_{min} ” e $Count_{Max}$ ” foram avaliados em [51] e [52], no Quadro 5 se apresenta um resume dos valores testados.

Quadro 5 – Parâmetros testados do critério de parada proposto (CP1) e (CP3)

Referência	MOEA	Modelo hidrológico	N_p	Numero de gerações	Funções objetivo		Parâmetros	
					FO1	FO2	G_{min}	$Count_{Max}$
[32]	NSGA-II, NSGA-III e SPEA2	IPH II	100	200	NSE_Q	$RMSE_i$	100	10
[31]	NSGA-II, NSGA-III e SPEA2	TankModel 4	100	500	NSE_Q	$RMSE_i$	110	10

*nomeado de I_{min} nas publicações [51] e [52]

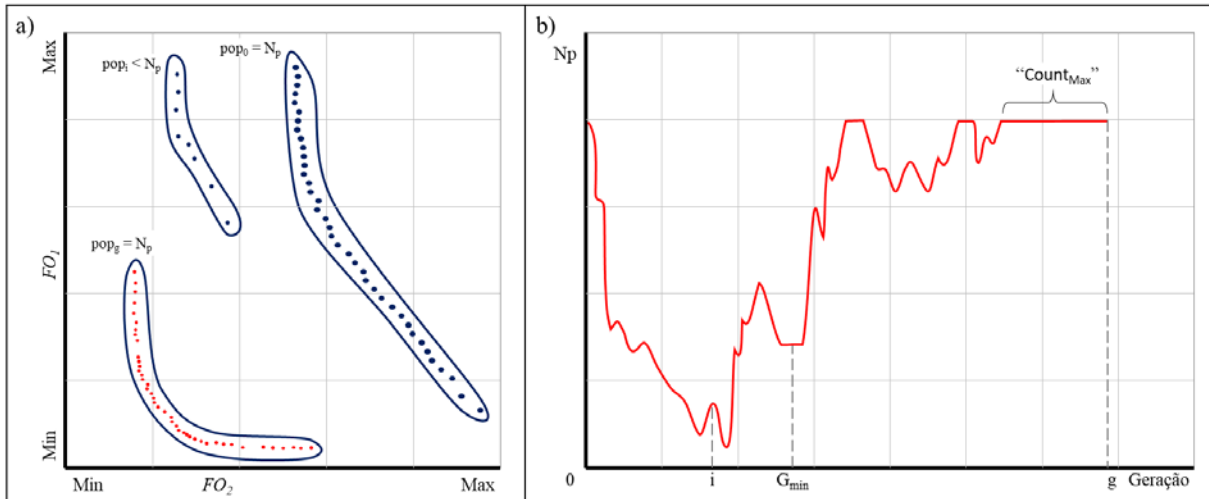
Alguns valores de N_p usados na calibração de modelos hidrológicos com diferentes números de parâmetros (NP) estão apresentados no Quadro 6. Para os testes de calibração desta pesquisa, foi usado o valor de N_p máximo de 50.

Quadro 6 – Valores de tamanho populacional (NP) em estudos que realizam a calibração de modelos hidrológicos usando algoritmos evolutivos multi-objetivos

N_p	NP	MOEA	Tipo de Modelo	Modelo hidrológico
50	6–12	NSGA-II	Conceitual	SWAT
100	7	NSGA-II, SPEA-II	Empírico	ANN Model
100	5	SPEA-II, MOSCDE, SCE-UA, SCEM-UA, MOSCEM-UA	Conceitual	HyMOD
80	6	NSGA-II	Conceitual	SWAT
50	4	NSGA-II, PESA-II, SPEA-II, MPSO	Conceitual	GR4J
50	7	NSGA-II, SCEM	Conceitual	PC-IHACRES
100	5	OCNSGA-II, NSGA-II, NSGA-III, SPEA-II, PESA-II	Conceitual	HYMOD
50	11	NSGA-II, PEST	Conceitual	WetSpa
128	9	ϵ -NSGA-II	Conceitual	MOBIDIC

Fonte: adaptado de [52] e [82]

Figura 16 – Esquema do critério proposto. a) Soluções não dominadas no espaço Objetivo; b) Variação do N_p em cada geração



Fonte: elaborado pelo autor

4.2 Modelos Hidrológicos

No Quadro 7, é apresentado de forma resumida algumas das características dos modelos hidrológicos aplicados nos experimentos e imediatamente a continuação foram descritos brevemente.

Quadro 7 – Características dos modelos hidrológicos

Modelo	Referencias	Parâmetros	Reservatórios Internos			
			Interceptação	Superficial	Umidade e do solo	Água subterrânea
GR4J	[4, 32, 44, 83, 95, 108]	6	1	0	1	0
GR5J	[1,25, 65]	7	1	0	1	0
HyMOD	[12, 101, 131]	10	0	0	1	0
IPH-II	[13, 52, 82]	7	1	1	0	1
TankModel 3	[51, 98, 121, 122]	12	0	1	0	2
TankModel 4	[16,17, 51, 58, 90, 121, 122]	16	0	1	0	3

4.2.1 Modelo GR4J e GR5J

O modelo GR4J é principalmente empírico ([95, 96]), foi amplamente testado em bacias na França, mas também em outros países ([3]). O modelo também foi comparado com outros modelos hidrológicos e forneceu resultados comparativamente bons (ver por exemplo, [95]). As principais etapas do desenvolvimento do modelo GR4J foram:

- a) Versão de 3 parâmetros proposta por [32, 33]. Isso forneceu as bases para o desenvolvimento de modelos adicionais por meio de testes e refinamento;
- b) Versão com 4 parâmetros proposta por [83] e detalhada por [95, 96];
- c) Versão de 5 parâmetros proposta por [67].

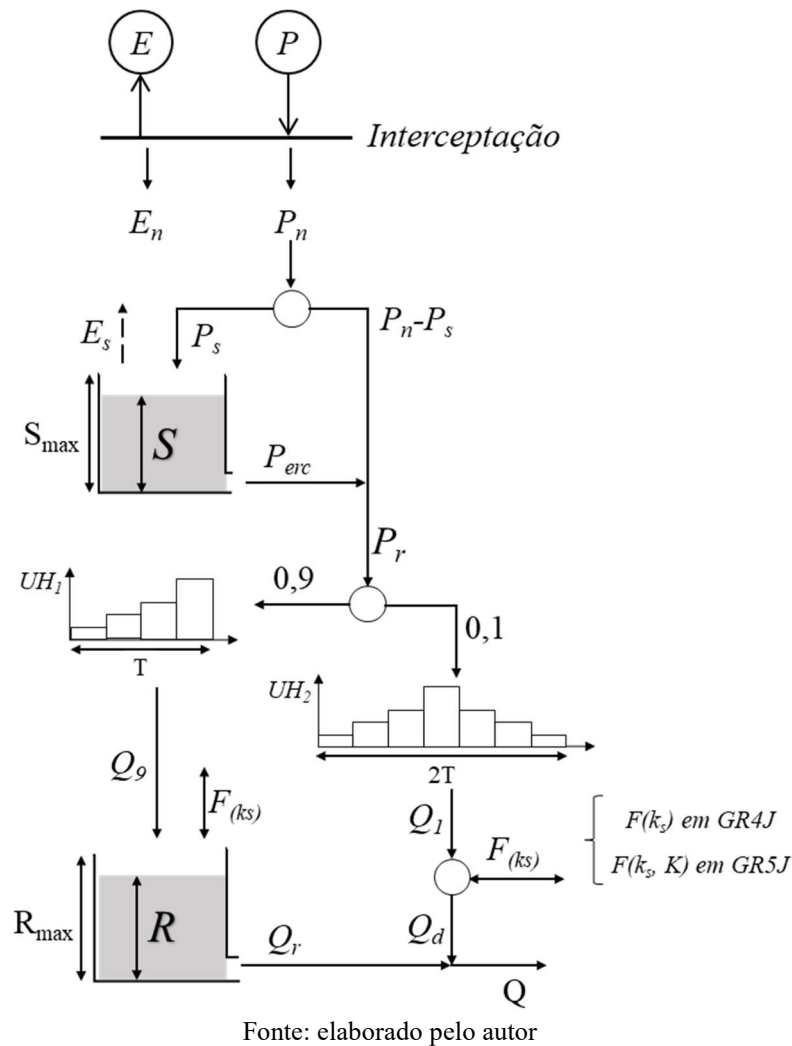
A versão de 4 e 5 parâmetros (Quadro 8) ([95] e [67], respectivamente), foram aplicados nos testes de este trabalho, a Figura 17 mostra um diagrama esquemático dos componentes representados pelo modelo GR4 e GR5J assim como os parâmetros descritos no Quadro 8. Adicionalmente a estes parâmetros, é necessário definir as condições iniciais dos dois reservatórios internos do modelo (S e R).

Quadro 8 – Intervalo dos valores dos parâmetros de calibração do modelo GR4J e GR5J

Parâmetros	Descrição	Unidade	Intervalo	
			Mínimo	Máximo
S_{max}	Máximo armazenamento do reservatório de umidade do solo	mm	1	2000
k_s	Coefficiente de troca da água subterrânea	mm/d	-10	5
R_{max}	Máximo armazenamento do reservatório de roteamento	mm	1	500
T	Tempo base do hidrograma unitário, UH1	d	0,5	4
K^*	Limite da troca de águas subterrâneas	-	0	1

(*) parâmetro exclusivo do modelo GR5J

Figura 17 – Esquema do modelo GR4J e GR5J



4.2.2 Modelo HyMOD

A estrutura do modelo HyMOD ([101, 131]), como visto na Figura 18, consiste em uma combinação de:

- Um modelo de contabilidade de umidade de solo para determinar a precipitação efetiva do solo (er_1 e er_2), que utiliza uma função de distribuição de capacidade armazenamento do solo (S_m) da bacia hidrográfica composto de dois parâmetros (S_{max} , b), descrito em detalhe por [81] e;
- Uma série de três reservatórios lineares em cascata (que simulam o fluxo rápido) e um único reservatório linear (destinado a simular o fluxo lento).

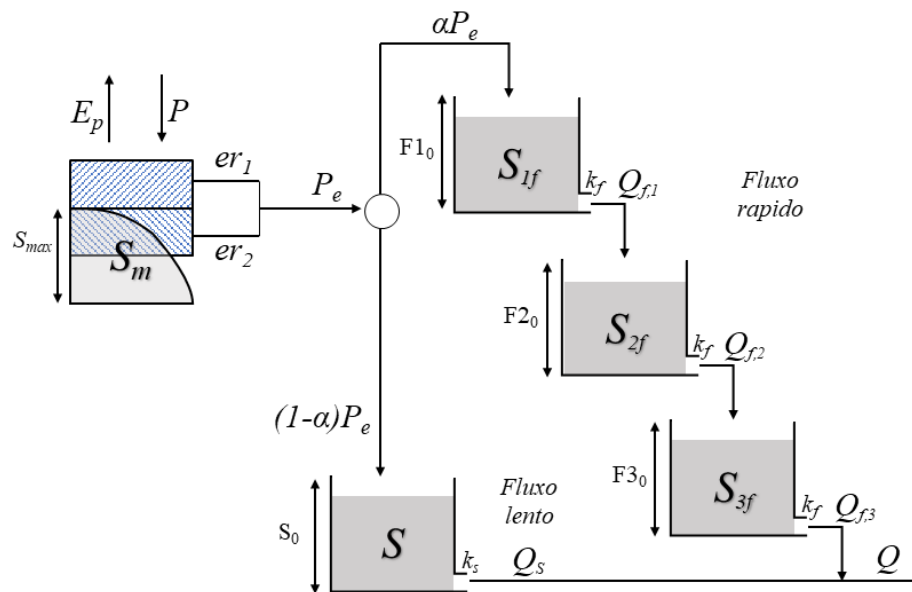
Os 5 parâmetros calibráveis do modelo (S_{max} , b , α , k_f e k_s), assim como os intervalos dos valores são mostrados no Quadro 9. Além destes parâmetros é necessário definir o armazenamento inicial dos 5 reservatórios (S_m , S , S_{f1} , S_{f2} , S_{f3}).

Quadro 9 – Intervalo dos valores dos parâmetros de calibração do modelo HyMOD

Parâmetros	Descrição	Unidade	Intervalo	
			Mínimo	Máximo
S_{max}	Máximo armazenamento do reservatório de umidade do solo	mm	0,0	2000
b	Parâmetro da distribuição da profundidade do solo	-	0,0	7,0
α	Fração da precipitação efetiva que é de fluxo rápido	-	0,0	1,0
k_r	Coefficiente de escoamento dos reservatórios de fluxo rápido	d^{-1}	0,15	1,0
k_s	Coefficiente de escoamento dos reservatórios de fluxo lento	d^{-1}	0,0	0,15

Fonte: adaptado de [64]

Figura 18 – Esquema do modelo HyMOD



Fonte: elaborado pelo autor

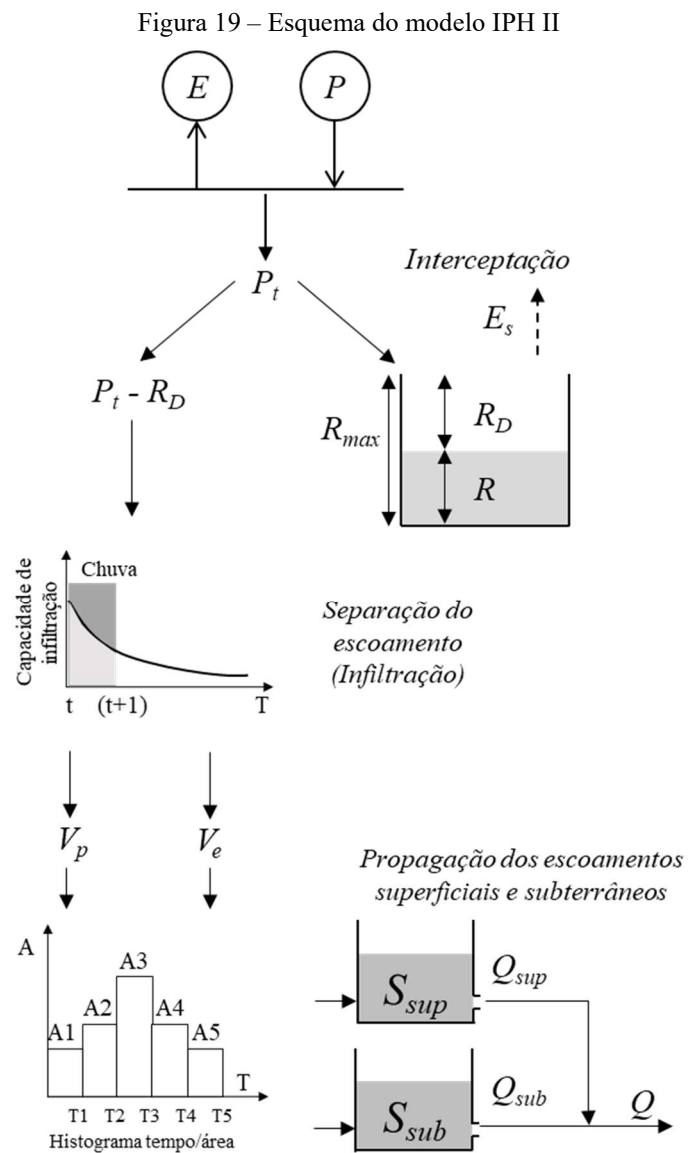
4.2.3 Modelo IPH II

O modelo IPH II ([13, 127, 128]) é um modelo conceitual concentrado chuva-vazão que simula a vazão do rio por meio de dados de precipitação e evaporação como dados de entrada e usando quatro rotinas diferentes. O modelo é amplamente utilizado no Brasil para modelar as respostas hidrológicas de pequenas bacias e normalmente funciona em intervalos de tempo diários ou horários. A estrutura do modelo (Figura 19) é composta basicamente pelos seguintes algoritmos: evaporação e interceptação, separação da drenagem e propagação da vazão superficial e subterrâneo ([45]). As características da bacia também são necessárias e estas são: área (A, km^2), porcentagem da área impermeável (AIMP, %), fator de forma da bacia (n) e tempo de concentração (t_c). Também precisam ser definidas as condições iniciais das variáveis de estado percolação (R_0), águas subterrâneas (S_{sub0}) e vazão superficial (S_{sup0}). Os 7 parâmetros calibráveis do modelo são principalmente baseados em física e sua descrição e intervalo de valores são mostrados na Tabela 2.

Quadro 10 – Intervalo dos valores dos parâmetros de calibração do modelo IPH II

Parâmetros	Descrição	Unidade	Intervalo	
			Mínimo	Máximo
I_o	Capacidade máxima de infiltração do solo	mm	10,0	300,0
I_b	Capacidade mínima de infiltração do solo	mm	0,1	10,0
h	Parâmetro que caracteriza o tipo de solo	-	0,01	0,99
k_{sup}	Parâmetro que caracteriza o tempo de atraso do fluxo superficial	dia ⁻¹	0,01	10
k_{sub}	Parâmetro que caracteriza o tempo de atraso do fluxo de águas subterrâneas (modelado como um reservatório linear simples)	dia ⁻¹	10,0	500,0
R_{max}	Armazenamento máxima do reservatório de interceptação	mm	0,0	9,0
α	Parâmetro que afeta a separação do fluxo, quando a precipitação é menor que a capacidade de infiltração	-	0,01	20,0

Fonte: elaborado pelo autor



Fonte: elaborado pelo autor

4.2.4 TankModel 3 e 4

O TankModel é um modelo hidrológico concentrado que simula o balanço hídrico de uma bacia, utilizando um conjunto de tanques/reservatórios, dispostos em série vertical. Onde o armazenamento do primeiro reservatório é determinado pela precipitação e o armazenamento dos demais tanques é determinado pela infiltração do tanque superior respectivo. O número adequado de tanques utilizados varia de acordo com as características geomorfológicas de cada bacia, além do intervalo de tempo e duração total da série de dados hidrológicos utilizados na simulação. As saídas laterais dos reservatórios são as vazões calculadas.

No reservatório superior da configuração de 3 tanques ([58]), as saídas laterais representam o escoamento superficial (q_{s1}) e o escoamento subterrâneo (q_{s2}), a saída lateral do segundo reservatório também representa outra fração do escoamento subterrâneo (q_{s3}), e a saída lateral do terceiro reservatório representa a vazão de base (q_{s4}), como representados na Figura 20 a.

No terceiro reservatório, da configuração de 4 tanques ([16]), possui outra fração da vazão subsuperficial (q_{s4}), sendo a saída lateral do último reservatório considerada como vazão de base (q_{s5}), como representados na Figura 20 b.

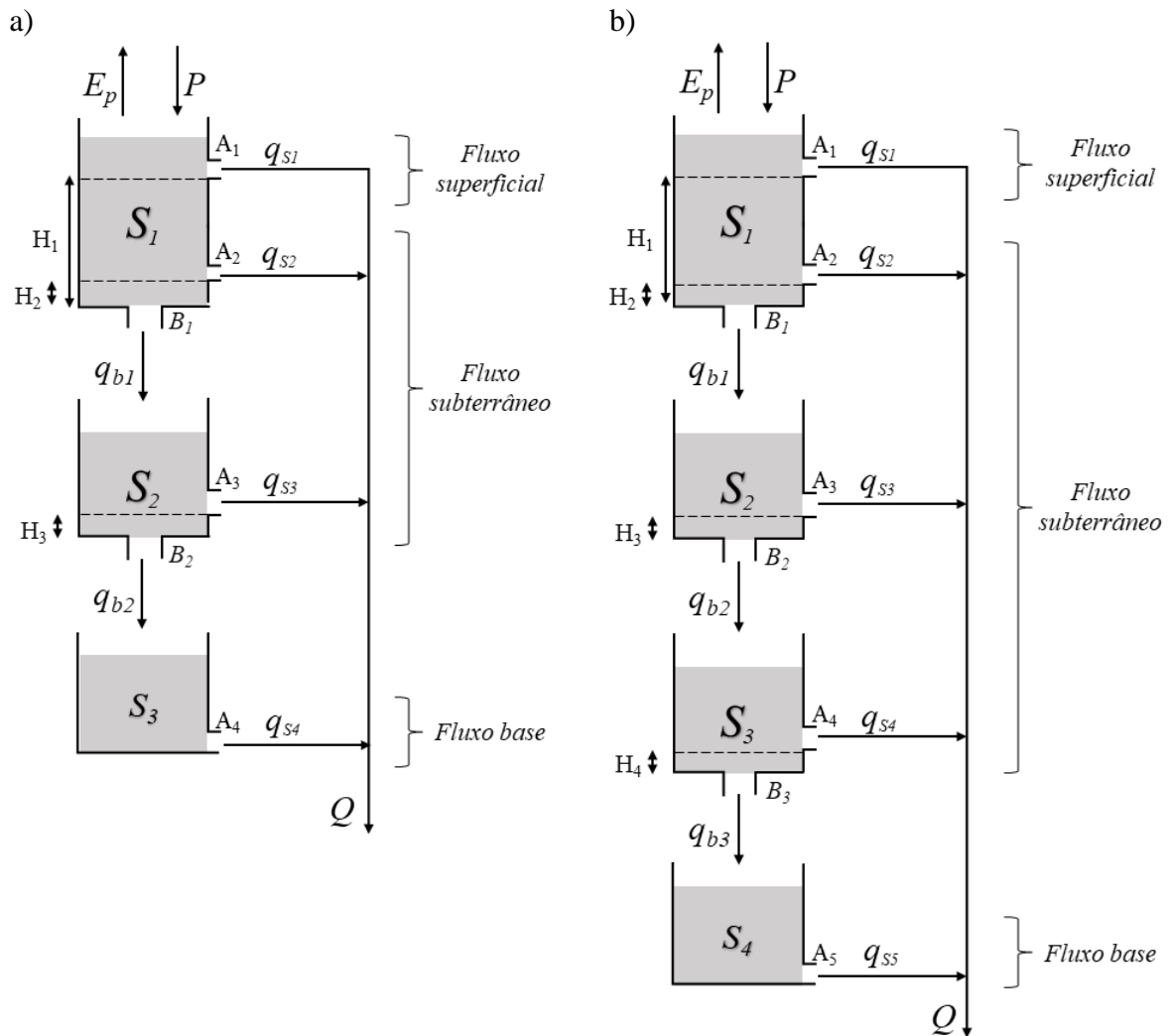
Os parâmetros que podem ser calibrados no TankModel são os coeficientes que determinam a capacidade de armazenamento (como a altura das saídas laterais), de escoamento (saídas laterais) e de infiltração e percolação (saídas de fundo) de cada reservatório do modelo ([53]). O Quadro 11, mostram os parâmetros e as faixas de valores para cada um dos parâmetros, do TankModel 3 e TankModel 4.

Quadro 11 – Características dos parâmetros de calibração do TankModel 3 e TankModel 4

Parâmetros	Descrição	Unidade	Intervalo	
			Mínimo	Máximo
H₁	Altura do primeiro orifício (A1) do reservatório 1	mm	10	70
H₂	Altura do segundo orifício (A2) do reservatório 1	mm	10	45
H₃	Altura do orifício (A3) do reservatório 2	mm	10	70
H₄*	Altura do orifício (A4) do reservatório 3	mm	10	70
A₁	Coefficiente de escoamento do primeiro orifício do reservatório 1	dia ⁻¹	0,09	0,5
A₂	Coefficiente de escoamento do segundo orifício do reservatório 1	dia ⁻¹	0,09	0,5
A₃	Coefficiente de escoamento do orifício do reservatório 2	dia ⁻¹	0,09	0,5
A₄	Coefficiente de escoamento do orifício do reservatório 3	dia ⁻¹	0,001	0,1
A₅*	Coefficiente de escoamento do orifício do reservatório 4	dia ⁻¹	0,01	0,01
B₁	Coefficiente de infiltração do reservatório 1 para o reservatório 2	dia ⁻¹	0,01	0,15
B₂	Coefficiente de infiltração do reservatório 2 para o reservatório 3	dia ⁻¹	0,01	0,1
B₃*	Coefficiente de infiltração do reservatório 3 para o reservatório 4	dia ⁻¹	0,001	0,1

(*) parâmetro exclusivo do modelo TankModel 4

Figura 20 – Esquema do a) TankModel 3, e b) TankModel 4

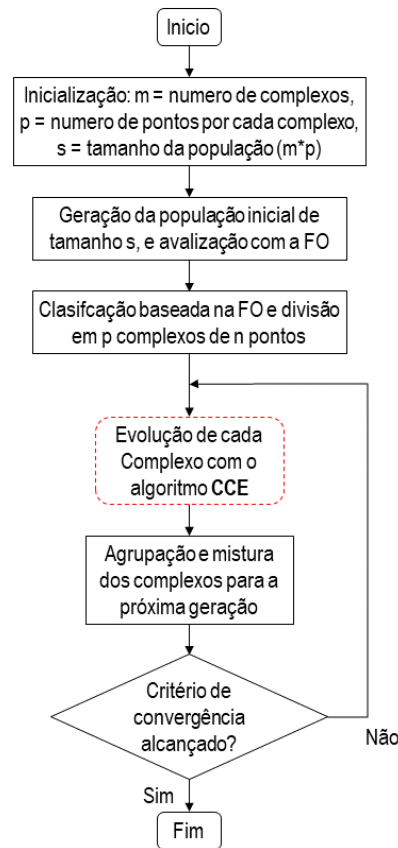


Fonte: elaborado pelo autor

4.3 Calibração Mono-objetivo: algoritmo SCE-UA

O algoritmo SCE-UA ([30]) é uma técnica de busca global que combina os conceitos de busca aleatória controlada, mistura de complexo e evolução competitiva para minimizar uma métrica ou função objetivo (FO). Utilizado com sucesso em diferentes áreas (recursos hídricos, engenharia, ecologia das ciências ambientais, geologia, biologia marinha de água doce, ciência da computação, ciências atmosféricas, agricultura, sensoriamento remoto e matemática), em mais de 2.400 documentos durante as últimas três décadas, sendo mais de 50% em aplicações de recursos hídricos ([85]). As etapas deste método são mostradas na Figura 21.

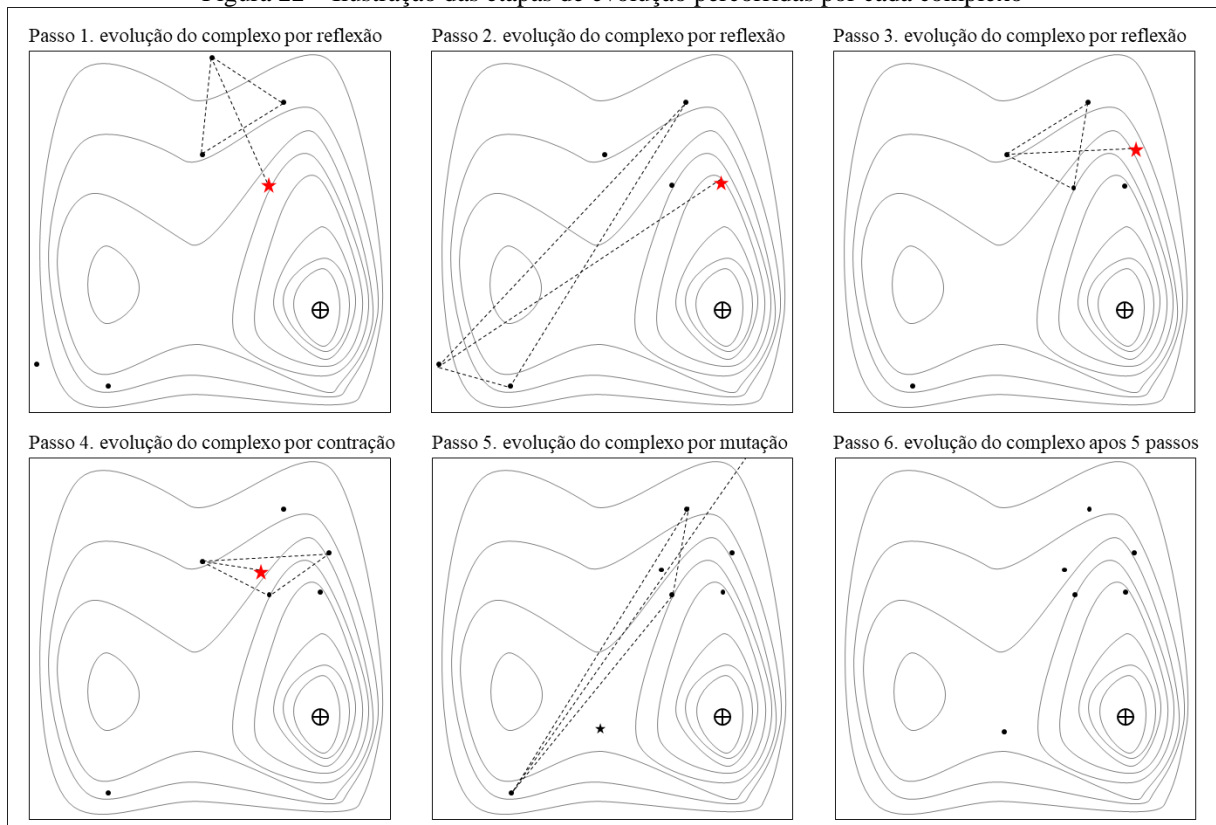
Figura 21 – Esquema do SCE-UA



Fonte: elaborado pelo autor

O algoritmo Evolução Complexa Competitiva (CCE) comentado na Figura 21, é baseado no método de otimização Simplex ([88]). A Figura 22 ilustra um exemplo do processo do algoritmo CCE para cada complexo ($n = 6$ pontos) durante 5 passos. Inicialmente 3 pontos do complexo são selecionados para formar um subcomplexo. Primeiramente o algoritmo calcula o centroide dos pontos do subcomplexo (\bullet), então novos pontos são avaliados ($*$) através de uma etapa de reflexão, uma etapa de contração ou uma etapa de mutação. Este processo é repetido t vezes ($t = 5$, no exemplo), seguido de uma mistura do complexo para a próxima geração. Para uma explicação mais detalhada do algoritmo SCE-UA, revisar [30].

Figura 22 – Ilustração das etapas de evolução percorridas por cada complexo



Fonte: adaptado de [31]

4.4 Calibração multi-objetivo de modelos hidrológicos usando algoritmos genéticos

A calibração automática multi-objetivo de modelos hidrológicos é um processo de otimização no qual algoritmos evolutivos, como algoritmos genéticos (AG), são comumente usados. Os AG's são uma classe particular de algoritmos evolutivos que aplicam técnicas inspiradas na biologia evolutiva, como hereditariedade, mutação, seleção natural e recombinação.

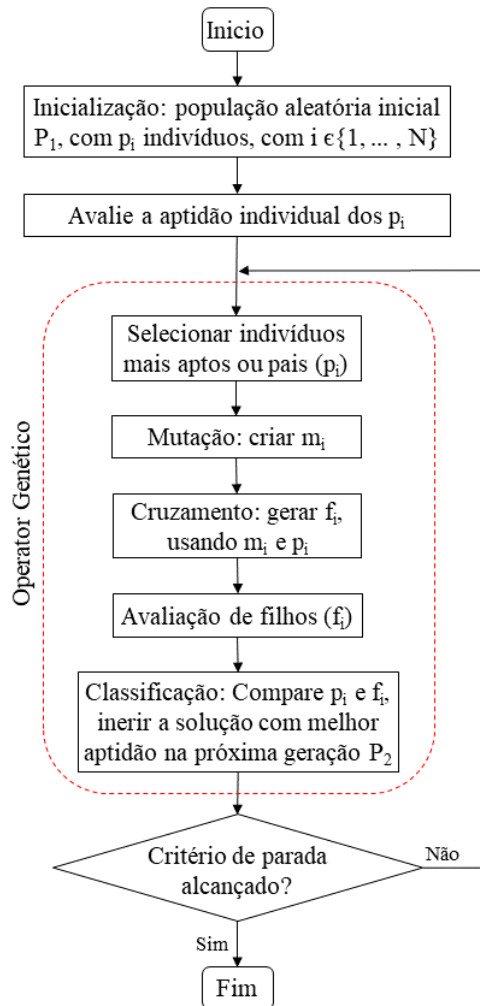
A primeira etapa da aplicação do AG multi-objetivo é a definição das funções objetivo a serem otimizadas (maximização ou minimização) e o espaço de busca. Em seguida, um conjunto de soluções/indivíduos candidatas iniciais é definido, denominado “população inicial”. O objetivo de um AG é modificar repetidamente essa população tentando emular o processo evolutivo biológico. Cada indivíduo representa uma única solução para o problema de otimização, chamados de cromossomos, que são formados por genes, que representam as variáveis de decisão ([83]) e que na calibração de modelos hidrológicos correspondem aos parâmetros do modelo.

Em cada etapa, as soluções candidatas são selecionadas da população atual para serem pais. Os pais produzem novas soluções candidatas (descendentes) para a próxima geração. Nesse processo, os indivíduos mais adaptados têm maior probabilidade de participar do

processo de reprodução, resultando em melhor desempenho para toda a população. Durante sucessivas gerações (iterações), as populações convergem para uma aproximação da frente de Pareto ([21, 36]). Os procedimentos envolvidos em um AG (Figura 23) com critério de parada padrão podem ser resumidos em 6 passos, que são as seguintes:

- Passo 1. Inicialização: O procedimento começa por definir o índice da iteração ou geração, i para 1, gerando N soluções aleatórias para formar a primeira população (P_1) e, posteriormente, avaliar a aptidão das soluções em P_1 . No caso da calibração de modelos hidrológicos, a população contém N conjuntos de parâmetros do modelo. Funções objetivo predefinidas são usadas para avaliar cada solução.
- Passo 2. Seleção: permite que os indivíduos mais aptos passem seus genes para a próxima geração e melhorem a aptidão geral. Alguns dos diferentes métodos de seleção incluem: seleção proporcional, seleção baseada em classificação, seleção de torneio e roleta.
- Passo 3. Cruzamento: Oferece a possibilidade de gerar novos indivíduos, combinando suas propriedades. Espera-se que isso ajude a alcançar uma solução ainda mais adequada do que a derivada pai.
- Passo 4. Mutação: Introduce uma propriedade aleatória nos genes da população e impede a geração de populações idênticas.
- Passo 5. Classificação: Avalia e atribui um valor de aptidão a cada solução com base na avaliação das funções objetivo.
- Passo 6. O procedimento termina se o critério de parada for atingido. Caso contrário, o índice da iteração ou geração aumenta um, e o algoritmo retorna ao Passo 2.

Figura 23 – Fluxograma do AG



Fonte: elaborado pelo autor

4.4.1 NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II)

O NSGA-II ([27]) é um algoritmo de otimização evolucionária multi-objetivo cuja formulação incorpora os conceitos de elitismo, para preservar as melhores soluções, e dominância, usando um esquema de ordenação não-dominante para avaliar a adequação das soluções. O NSGA-II preserva a diversidade usando o procedimento de comparação de distância de aglomeração que corresponde a uma medida de quão perto uma solução está de sua vizinhança. A distância de aglomeração é calculada como a soma dos valores de distância individuais para cada objetivo. Os principais passos do algoritmo são os seguintes:

Passo 1. Uma população pai aleatória P_0 , de tamanho N , é criada aleatoriamente, com base nas características do problema (ou seja, restrições, limites de parâmetros).

Passo 2. Um valor de aptidão (ou classificação) é atribuído de acordo com seu nível de dominação e a população é classificada com base na não dominação.

- Passo 3. Os operadores usuais de seleção de torneio binário, recombinação e mutação são usados para criar uma população descendente Q_0 de tamanho N .
- Passo 4. A população T_i de tamanho $2N$, é formada pela combinação de P_0 e Q_0 .
- Passo 5. A população T_i é ordenada de acordo com a não dominação, usando uma abordagem de ordenação rápida não dominada, originando frentes.
- Passo 6. Uma população combinada P_{i+1} de tamanho N é formada. As soluções pertencentes à primeira frente são as melhores e devem ser enfatizadas na população combinada. Se o tamanho da primeira frente for menor que N , todas as barras são escolhidas para P_{i+1} . Os membros restantes são escolhidos nas frentes não dominadas subsequentes em ordem de classificação. Este procedimento continua até que não haja mais conjuntos que possam ser acomodados. Para escolher exatamente N membros da população, as soluções da última frente analisada são classificadas usando o operador de comparação lotada, permitindo determinar as melhores soluções para preencher todos os novos slots da população.
- Passo 7. A nova população P_{i+1} de tamanho N é usada para seleção, cruzamento e mutação para criar uma nova população descendente Q_{i+1} de tamanho N .
- Passo 8. Se o critério de parada for atingido, pare o algoritmo.

4.4.2 NSGA-III (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm III)

A estrutura básica do algoritmo NSGA-III é semelhante ao NSGA-II original, exceto que [28] substituiu o operador de distância de aglomeração para a operação de associação (Etapa 8). O NSGA-III é baseado nas etapas descritas a seguir:

- Passo 1. Calcule o número de pontos de referência (H) para colocar no hiperplano.
- Passo 2. Gere a população inicial de forma aleatória P_0 , levando em consideração as restrições de alocação de recursos.
- Passo 3. A população é classificada de acordo com a não dominação. Um processo iterativo começa.
- Passo 4. Selecione dois pais P_1 e P_2 usando o método de torneio.
- Passo 5. Aplique o crossover entre P_1 e P_2 com uma probabilidade P_c .
- Passo 6. Execute a classificação da população não dominada. Normalize os membros da população.
- Passo 7. Associe o membro da população aos pontos de referência. Para isso, uma linha de referência correspondente a cada ponto de referência no hiperplano é definida unindo o ponto de referência com a origem.

- Passo 8. Um ponto de referência pode ser associado a um ou mais membros da solução, mas a solução deve ser mantida mais próxima do ponto.
- Passo 9. Manter as soluções de nicho obtidas para a próxima geração.
- Passo 10. Critério de parada: finaliza o processo iterativo, quando é atingido.

4.4.3 SPEA-II (Strength Pareto Evolutionary Algorithm II)

Embora o algoritmo SPEA, apresentado por [82, 146], tenha apresentado bom desempenho quando comparado a outros algoritmos, alguns problemas foram identificados. Para superá-lo, [147] propuseram uma versão melhorada, o SPEA-II, que incorpora, em contraste com seu antecessor, uma estratégia de atribuição de aptidão refinada, uma técnica de estimativa de densidade e um método de truncamento de arquivo aprimorado. O algoritmo geral é o seguinte:

- Passo 1. Gere a população inicial aleatoriamente P_0 de tamanho N e crie o arquivo vazio (conjunto externo) $P_0 = []$, de tamanho \hat{N} . Defina $i = 0$.
- Passo 2. Calcule os valores de aptidão dos indivíduos em P_i e \hat{P}_i .
- Passo 3. Copie todos os indivíduos não dominados em P_i e \hat{P}_i para \hat{P}_{i+1} .
- Passo 4. Se o tamanho de \hat{P}_{i+1} exceder N , reduza \hat{P}_{i+1} por meio do operador de truncamento, caso contrário, se o tamanho de \hat{P}_{i+1} for menor que N , preencha \hat{P}_{i+1} com indivíduos dominados em P_i e \hat{P}_i .
- Passo 5. Critério de parada: Se $i = N_{gen}$ for satisfeito então defina A para o conjunto de vetores de decisão representados pelos indivíduos não dominados em \hat{P}_{i+1} . Caso contrário continua.
- Passo 6. Realize a seleção de torneio binário com substituição em P_{i+1} para preencher o pool de acasalamento.
- Passo 7. Aplique os operadores de recombinação e mutação ao pool de acasalamento e defina P_{i+1} para a população resultante. Aumente o contador de geração ($i = i + 1$) e vá para a Etapa 2.

4.4.4 Funções Objetivo

Existem um grande número de funções objetivo utilizadas para quantificar a eficiência dos modelos hidrológicos, como apresentados em [41], [44] e [125]. A seleção da função

objetivo é condicionada a capacidade do modelo de reproduzir as propriedades estatísticas das funções, por exemplo, funções que podem assumir valores positivos e negativos ([125]).

Algumas funções objetivo, usadas na calibração mono-objetivo ou multi-objetivo dos modelos hidrológicos, focadas no desempenho do modelo hidrológico em vazões elevadas, vazões baixas ou volumes de escoamento superficial, são por exemplo: a eficiência de Kling-Gupta (KGE), a raiz do erro quadrático médio (RMSE) e a eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE).

No caso das vazões elevadas, as funções objetivo são calculados normalmente a partir das series de vazões observadas e simuladas. E para o caso das vazões baixas, podem ser calculados a partir de transformações das vazões. As transformações mais utilizadas para valores baixos de vazão ([41], [92], [100], [125]), são: A transformação da raiz quadrada, a transformação logarítmica ou a transformação inversa.

Relatado por [108], detectaram limitações em alguns tipos de transformações da vazão (inversa, logarítmica) quando aplicada na função KGE, especialmente no caso da transformação logarítmica, quando a média das vazões transformadas se aproxima de zero ou quando aparecerem valores nulos de vazão.

Devido a que uma das metas deste trabalho é identificar os modelos que conseguem reproduzir melhor as vazões elevadas e as baixas, algumas das funções objetivo observadas na literatura, que tem conseguido atingir esta meta, são apresentadas no Quadro 12.

Quadro 12 – Funções Objetivo usadas como critérios de calibração

Critério	Variável	Referencias	Fórmula	[Min, Max]	Ótimo global
NSE _Q	Vazão	[87]	$1 - \frac{\left[\sum_{t=1}^{NT} (Q_{Obs,t} - Q_{Calc,t})^2 \right]}{\left[\sum_{t=1}^{NT} (Q_{Obs,t} - \overline{Q_{Obs,t}})^2 \right]}$	[-∞, 1]	1
NSE _{sqrt}	Raiz quadrada da vazão	[92, 95]	$1 - \frac{\left[\sum_{t=1}^{NT} (\sqrt{Q_{Obs,t}} - \sqrt{Q_{Calc,t}})^2 \right]}{\left[\sum_{t=1}^{NT} (\sqrt{Q_{Obs,t}} - \sqrt{\overline{Q_{Obs,t}}})^2 \right]}$	[-∞, 1]	1
NSE _{ln}	Logaritmo da vazão	[90]	$1 - \frac{\left[\sum_{t=1}^{NT} (\ln(Q_{Obs,t}) - \ln(Q_{Calc,t}))^2 \right]}{\left[\sum_{t=1}^{NT} (\ln(Q_{Obs,t}) - \ln(\overline{Q_{Obs,t}}))^2 \right]}$	[-∞, 1]	1
NSE _i	Inversa da vazão	[67, 100]	$1 - \frac{\left[\sum_{t=1}^{NT} \left(\frac{1}{Q_{Obs,t}} - \frac{1}{Q_{Calc,t}} \right)^2 \right]}{\left[\sum_{t=1}^{NT} \left(\frac{1}{Q_{Obs,t}} - \frac{1}{\overline{Q_{Obs,t}}} \right)^2 \right]}$	[-∞, 1]	1
NSE _{uT}	Vazão limite abaixo da Q ₉₀	[65]	$1 - \frac{\left[\sum_{t=1, Q_{Obs,t} < Q_{90}}^{NT} (Q_{Obs,t} - Q_{Calc,t})^2 \right]}{\left[\sum_{t=1, Q_{Obs,t} < Q_{90}}^{NT} (Q_{Obs,t} - \overline{Q_{Obs,t}})^2 \right]}$	[-∞, 1]	1
RMSE _Q	Vazão	[20]	$\left[\frac{1}{NT} \sum_{t=1}^{NT} (Q_{Obs,t} - Q_{Calc,t})^2 \right]^{0.5}$	[0, +∞]	0
RMSE _i	Inversa da vazão	[51]	$\left[\frac{1}{NT} \sum_{t=1}^{NT} \left(\frac{1}{Q_{Obs,t}} - \frac{1}{Q_{Calc,t}} \right)^2 \right]^{0.5}$	[0, +∞]	0
RMSE _{ln}	Logaritmo da vazão	[55]	$\left[\frac{1}{NT} \sum_{t=1}^{NT} (\ln(Q_{Obs,t}) - \ln(Q_{Calc,t}))^2 \right]^{0.5}$	[0, +∞]	0
N _{HF}	Vazão	[39]	$\left[\frac{1}{NT} \sum_{t=1}^{NT} (Q_{Obs,t} - Q_{Calc,t})^2 * \left(\frac{Q_{Obs,t}}{Q_{Obs,max}} \right)^2 \right]^{0.5}$	[0, +∞]	0
N _{LF}	Vazão	[39]	$\left[\frac{1}{NT} \sum_{t=1}^{NT} (Q_{Obs,t} - Q_{Calc,t})^2 * \left(\frac{Q_{Obs,max} - Q_{Obs,t}}{Q_{Obs,max}} \right)^2 \right]^{0.5}$	[0, +∞]	0

Legenda: $Q_{Obs,t}$ e $Q_{Calc,t}$ são as vazões diárias observadas e simuladas no intervalo de tempo t, $\overline{Q_{Obs,t}}$ é a vazão média observada, $Q_{Obs,max}$ é a máxima vazão observada.

Fonte: adaptado de [100] e [41]

As cinco primeiras funções objetivo, no Quadro 12, representam diferentes eficiências de Nash-Sutcliffe calculadas com as vazões (NSE_Q), a raiz quadrada das vazões (NSE_{sqrt}), a transformada logarítmica da vazão (NSE_{ln}), a inversa da vazão (NSE_i) e vazões relativas (NSE_{rQ}).

O NSE_i não é comumente usado na literatura e foi sugerido por [67] e testada por [100] para múltiplas bacias, concluindo-se que NSE calculado a partir da transformada inversa da vazão, é mais adequado para a avaliação em condições de vazões muito baixas do que o NSE da transformação logarítmica da vazão, pois não mostra sensibilidade a valores de vazões alta. Contudo [41] e [92] recomendam o uso da métrica NSE para a transformada logarítmica da vazão por aumentar a sensibilidade às vazões baixas. NSE_{uT} é o NSE calculado sob um limite

tomado igual ao percentil 90 da curva de permanência das vazões observada do período de calibração.

Os últimos cinco critérios, no Quadro 12, são adaptações de RMSE, calculada com as vazões ($RMSE_Q$), a inversa da vazão ($RMSE_i$), a transformação logarítmica da vazão ($RMSE_{ln}$) e uma modificação do RMSE, proposta por [39], para vazões altas (N_{HF}) e modificação do RMSE para vazões baixas (N_{LF}).

4.4.5 Métricas de desempenho dos MOEA's

Diversas métricas para avaliar o desempenho de MOEA's foram propostas na bibliografia ([5, 89, 139]), estas métricas normalmente avaliam três critérios:

- Convergência: analisa a distância das soluções do PF obtido em relação às soluções FP ótima ou um ponto de referência, quanto mais próximas são as melhores;
- Uniformidade: as boas soluções devem ser distribuídas uniformemente ao longo da FP e;
- Distribuição: as soluções finais devem abranger toda a FP tanto quanto possível.

Considerando esses critérios, para avaliar o desempenho dos Frente de Pareto (FP) encontrados pelos MOEA's, são listados a seguir três métricas frequentemente usados na bibliografia ([89]). A primeira métrica de desempenho (GD) representa a acurácia, e as outras duas métricas (SP e MS) indicam a diversidade das soluções finais de cada algoritmo, e todas podem ser calculadas pelas seguintes equações:

- a) GD (Generational Distance, [129]): a distância geracional é uma métrica da distância média entre as soluções do FP gerado pelo MOEA e um FP ótimo, definido na eq (2). Assumindo que o FP ótimo seja conhecido, esta métrica é uma medida que representa o quão 'distante' o FP está do FP ótimo. Um valor GD mais baixo representa melhor desempenho. No entanto, segundo [91] em estudos comparativos, a distância por si só não é suficiente para avaliação de desempenho, uma vez que frentes distribuídas de forma extremamente diferente podem ter a mesma distância até a FP ótimo, também para aplicações reais o FP ótimo é desconhecido, por isto neste trabalho, o GD não foi considerado como métrica de desempenho do MOEA. Porém, a métrica GD pode ser medida em relação de um ponto ótimo global (Z), como mostrado na Figura 2 c.

- b) SP (Spacing, [110]), o espaçamento é uma distância relativa entre soluções adjacentes do FP gerado pelo MOEA.

$$SP = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{s=1}^N (d_s - \bar{d})^2} \quad (10)$$

Onde d_s e \bar{d} são calculadas como:

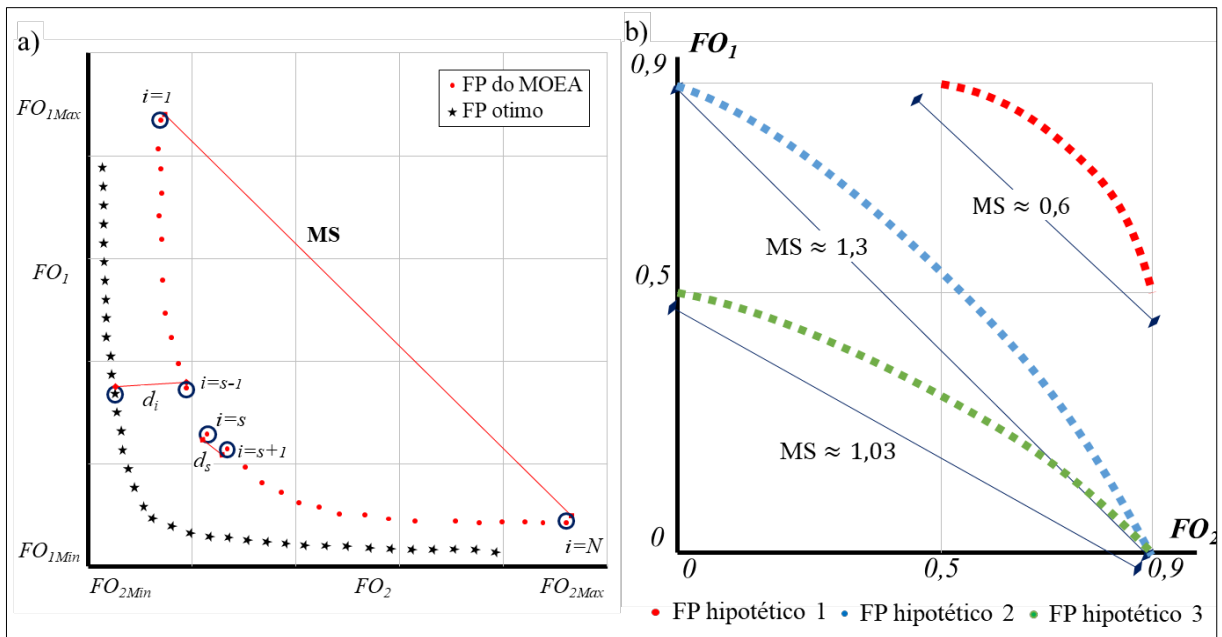
$$\bar{d} = \frac{1}{N} \sum_{s=1}^N d_s \quad (11)$$

Onde d_s é a mínima distância entre a solução “s” e as duas soluções adjacentes (“s-1”, “s+1” assim como na Figura 24 a).

Este índice estima a diversidade das soluções do FP, quando $SP = 0$, todas as soluções do PF são igualmente espaçadas, então, quanto mais baixo representa melhor desempenho. Para fins de comparação, foi considerado $SP < 0,01$, como “bom” para as análises dos resultados dos testes.

- c) MS (Maximum Spread, [146]): o espalhamento máximo mede o comprimento da diagonal de um hipercubo, no caso de duas funções objetivo, esta métrica corresponde à distância euclidiana entre as duas soluções extremas do FP, como mostrado na Figura 24 a. O MS mede a diversidade e a gama de valores abrangidos pelo conjunto de soluções finais dos MOEA’s, assim, valores maiores de MS indica um melhor desempenho. Contudo, devido a que o critério MS não tem um limite superior dificulta a comparação de múltiplas FP, como vai ser o caso deste trabalho.

Figura 24 – Ilustrações a) Esquema da métrica MS e b) Métrica MS para um FP hipotético



Fonte: elaborado pelo autor

Em aplicações hidrológicas como do presente trabalho, as funções objetivo maximizadas nos testes de calibração, variam de $-\infty$ até 1, pelo que a posição dos extremos das FP também pode variar de $-\infty$ até 1. Na prática, os membros do FP seriam considerados como satisfatórios, quando estão contidos no quadrante delimitado pelas coordenadas (0,5, 0,5) e (0,9, 0,9), representada na Figura 24 b (FP hipotético 3). Outras FP hipotéticas (1, 2) com MS maior que 1, como na Figura 24 b, segundo esta métrica teriam uma melhor diversidade de soluções, no entanto desde o ponto de vista hidrológico apresentariam soluções não satisfatórias ($FO < 0,5$). Isto foi também observado por [89], mesmo as soluções dominadas podem ser bem distribuídas, é possível que não existam boas soluções em determinadas áreas do espaço de soluções, razão pela qual as melhores soluções podem ter distâncias maiores ou mais desiguais.

Uma versão mais recente da métrica MS [115], mostra quão próximas os extremos da FP estão dos extremos de uma FP ótima, um maior o valor de MS refere-se a melhor expansão de soluções, esta métrica é calculada como:

$$MS = \frac{1}{m} \left(\sum_{i=1}^m \left[\frac{\min(f_i^{max}, F_i^{max}) - \max(f_i^{min}, F_i^{min})}{F_i^{max} - F_i^{min}} \right]^2 \right)^{1/2} \quad (12)$$

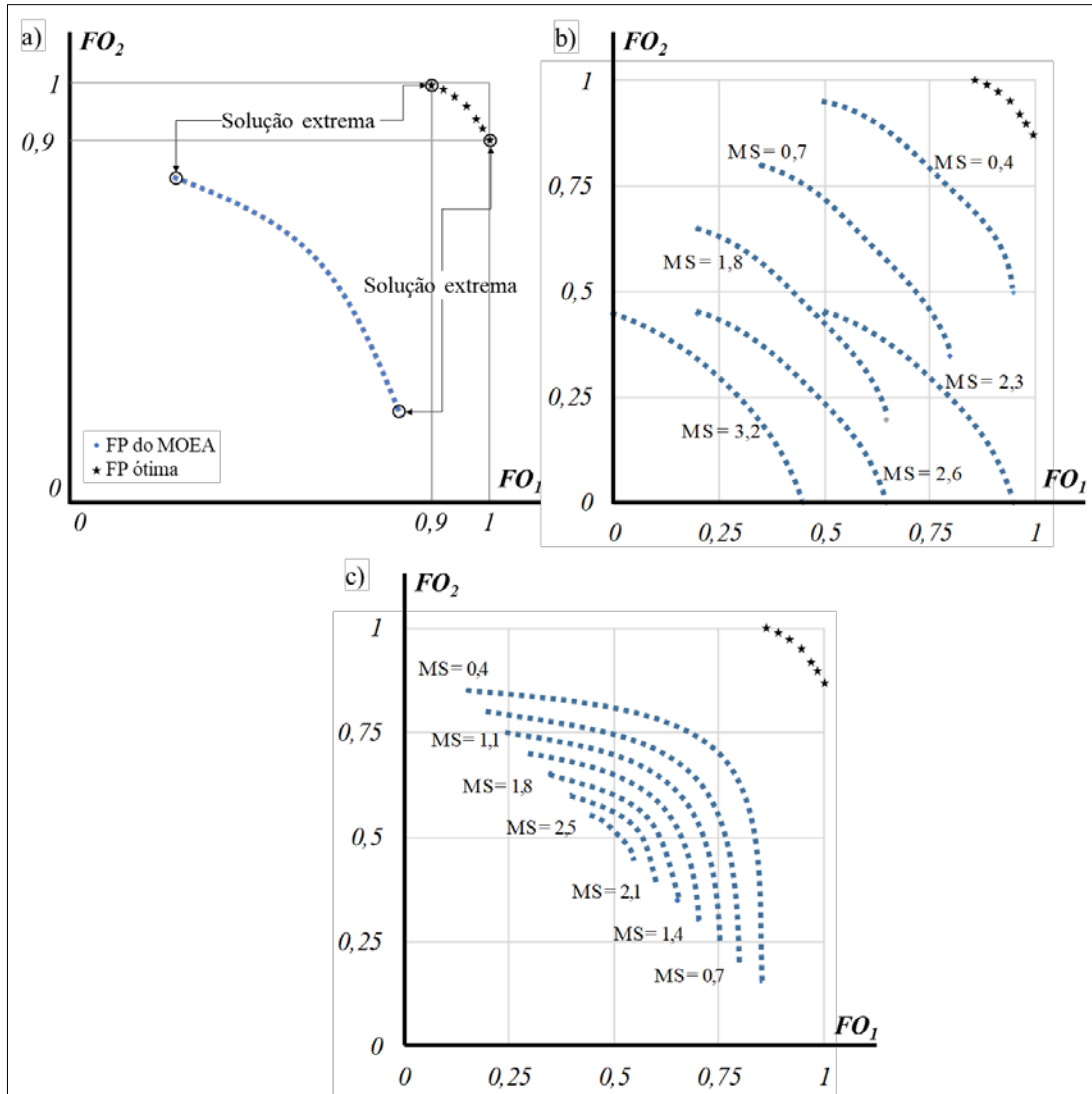
Onde: m , indica o número de funções objetivos; f_i^{min} e f_i^{max} , são os valores mínimo e máximo i -ésima função objetivo na FP obtida com o MOEA; F_i^{min} e F_i^{max} , são os valores mínimo e máximo i -ésima função objetivo, respetivamente.

Para as aplicações realizadas neste trabalho, o valor de $m = 2$, então a eq (12) é reescrita como:

$$MS = \frac{1}{2} \sqrt{\left[\frac{\min(f_1^{max}, F_1^{max}) - \max(f_1^{min}, F_1^{min})}{F_1^{max} - F_1^{min}} \right]^2 + \left[\frac{\min(f_2^{max}, F_2^{max}) - \max(f_2^{min}, F_2^{min})}{F_2^{max} - F_2^{min}} \right]^2} \quad (13)$$

O esquema da métrica MS e a FP ótima, adotada neste trabalho está ilustrada na Figura 25 a, onde as soluções extremas da FP ótima estão localizadas nos pontos (1, 0,9) e (0,9, 1). Uma análise da variação de MS, para uma FP em diferentes posições do espaço objetivo é mostrada na Figura 25 b, ressaltando-se que quanto mais próximo da PF ótima a métrica MS é menor. Também, para FP com extremos equidistantes da FP ótima, ilustrado na Figura 25 c, quanto maior o afastamento dos extremos a métrica MS é menor.

Figura 25 – Ilustrações a) Esquema da métrica MS e b) Variação de MS no espaço objetivo



Fonte: elaborado pelo autor

Capítulo 5. Descrição dos Experimentos

5.1 Testes de calibração automática Mono-Objetivo de modelos hidrológicos

Estes testes tiveram como objetivo avaliar a performance dos modelos hidrológicos descritos no item 4.2, nas bacias apresentadas no Capítulo 3, tanto em termos dos limites de variação dos parâmetros e da redundância das funções objetivos escolhidas.

Para isto foram testadas individualmente seis funções objetivo, apresentadas no Quadro 13, na calibração Mono-Objetivo dos modelos hidrológicos usando o algoritmo SCE-UA, descrito no item 4.3.

Quadro 13 – Métricas de calibração

Variável	Critério	Fórmula	Faixa de valores	Valor ótimo
FO1	NSE_Q	$1 - \frac{\sum_{t=1}^{NT} (Q_{Obs,t} - Q_{Sim,t})^2}{\sum_{t=1}^{NT} (Q_{Obs,t} - \overline{Q_{Obs,t}})^2}$	$[-\infty, 1]$	1
FO2	NSE_i	$1 - \frac{\sum_{t=1}^{NT} \left(\frac{1}{Q_{Obs,t}} - \frac{1}{Q_{Sim,t}} \right)^2}{\sum_{t=1}^{NT} \left(\frac{1}{Q_{Obs,t}} - \overline{\frac{1}{Q_{Obs,t}}} \right)^2}$	$[-\infty, 1]$	1
FO3	NSE_{ln}	$1 - \frac{\sum_{t=1}^{NT} \left(\ln(Q_{Obs,t}) - \ln(Q_{Sim,t}) \right)^2}{\sum_{t=1}^{NT} \left(\ln(Q_{Obs,t}) - \overline{\ln(Q_{Obs,t})} \right)^2}$	$[-\infty, 1]$	1
FO4	$RMSE_Q$	$\left[\frac{1}{NT} \sum_{t=1}^{NT} (Q_{Obs,t} - Q_{Sim,t})^2 \right]^{0.5}$	$[0, +\infty]$	0
FO5	$RMSE_i$	$\left[\frac{1}{NT} \sum_{t=1}^{NT} \left(\frac{1}{Q_{Obs,t}} - \frac{1}{Q_{Sim,t}} \right)^2 \right]^{0.5}$	$[0, +\infty]$	0
FO6	$RMSE_{ln}$	$\left[\frac{1}{NT} \sum_{t=1}^{NT} \left(\ln\left(\frac{1}{Q_{Obs,t}}\right) - \ln\left(\frac{1}{Q_{Sim,t}}\right) \right)^2 \right]^{0.5}$	$[0, +\infty]$	0

Onde: $Q_{obs,t}$ é a vazão observada no instante t; $Q_{cal,t}$ é a vazão simulada no instante t; NT é o tamanho da série observada.

A configuração dos parâmetros do algoritmo SCE-UA usado para a calibração Mono-Objetivo estão apresentados no Quadro 14, é importante lembrar que a medida que aumenta o número de complexos e o tamanho da população, o custo computacional também aumenta, para os testes foi usado um computador com processador Intel® Core(TM) i7-10700 CPU 2.90GHz, memória RAM 16GB, usados exclusivamente para rodar os códigos programados em Matlab R2010a, dos algoritmos de calibração automática e modelos hidrológicos.

Após realizados os testes foram selecionados os modelos hidrológicos com melhor performance, assim como também foram escolhidas as funções objetivo que não apresentaram

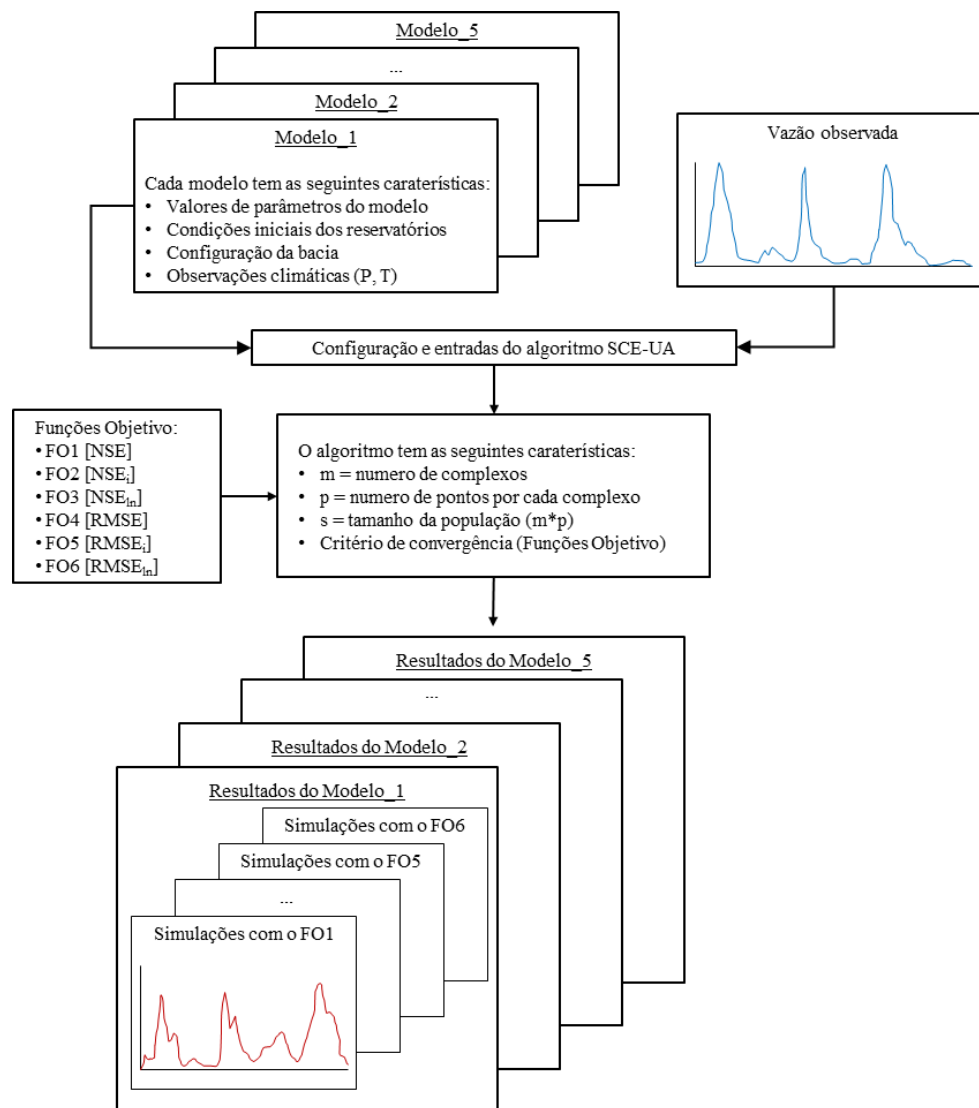
redundância com respeito às outras, e que finalmente serão incluídos nos processos de calibração automática Multi-Objetivo, descritos no próximo item.

Quadro 14 – Parâmetros do algoritmo SCE-UA

Parâmetro	Descrição	Valor
NGS	Número de complexos (subpopulações)	20
NPG	Número de membros por complexo	$2*N+1$
NPS	Número de membros em cada subcomplexo	$N+1$
NSPL	Número de etapas de evolução para cada complexo antes da mistura	$2*N+1$
MAXN	Número máximo de etapas de evolução, durante a otimização	10000
KSTOP	Número máximo de etapas de evolução, com variação do critério menor a PCENTO, antes da convergência	10
PCENTO	Variação percentual permitida nas etapas de evolução antes da convergência	0,01

Legenda: N é o número de parâmetros do modelo hidrológico

Figura 26 – Esquema dos testes de calibração Mono-objetivo aplicado em cada bacia



Fonte: elaborado pelo autor

5.2 Testes de calibração automática Multi-Objetivo de modelos hidrológicos

Os testes de calibração automática multi-objetivo visam responder os questionamentos expostos na introdução: verificar se o critério de parada proposto (CP1, apresentado no item 4.1) aplicado aos algoritmos genéticos multi-objetivo consegue gerar uma Frente de Pareto, com soluções com boa performance e melhor eficiência computacional; comparar o critério de parada proposto com outro critério observado na bibliografia (no caso o GD, CP2 e número máximo de gerações CP3); e finalmente revisar como influencia a combinação de diferentes métricas (Funções Objetivo) ao processo de calibração multi-objetivo.

Nas aplicações dos trabalhos apresentados no Quadro 5, com dois dos três modelos usados neste trabalho, o CP3 usado foi de 200 a 500 gerações. No entanto em [51], se observou que eram necessários menos de 300 gerações. Então, nos testes de este trabalho foi adotado o valor máximo de gerações CP3 igual a 300.

A configuração dos parâmetros dos MOEA's usados na calibração multi-objetivo, é apresentado no Quadro 15. Para os testes foi usado um computador com processador Intel® Core (TM) i7-10700 CPU 2.90GHz, memória RAM 16GB usados exclusivamente para rodar os códigos programados em Matlab R2010a, dos algoritmos de calibração automática e modelos hidrológicos.

Quadro 15 – Configuração dos parâmetros dos MOEA's

Parâmetro	Descrição	NSGAI I	NSGAI II	SPEA 2
nPop	Tamanho da população	50	50	50
pCrossover	Porcentagem de soluções obtidas do Cruzamento	0,9	0,9	0,7
pMutation	Porcentagem de soluções obtidas da Mutação	0,5	0,5	*
mu	Taxa de Mutação	0,02	0,02	*
nArchive	Tamanho do arquivo	*	*	50
MaxIt	Número Máximo de Iterações	300	300	300

* parâmetro não presente no algoritmo

5.2.1 Análise dos parâmetros do critério de parada proposto (CP1)

O critério proposto nesta pesquisa CP1 e descrito no item 4.1, depende de dois parâmetros (G_{\min} e $Count_{\max}$ ilustrados na Figura 16). Para conhecer os valores apropriados dos parâmetros dos critérios de parada CP1, foi proposto os seguintes passos de análise e esquematizados na Figura 27:

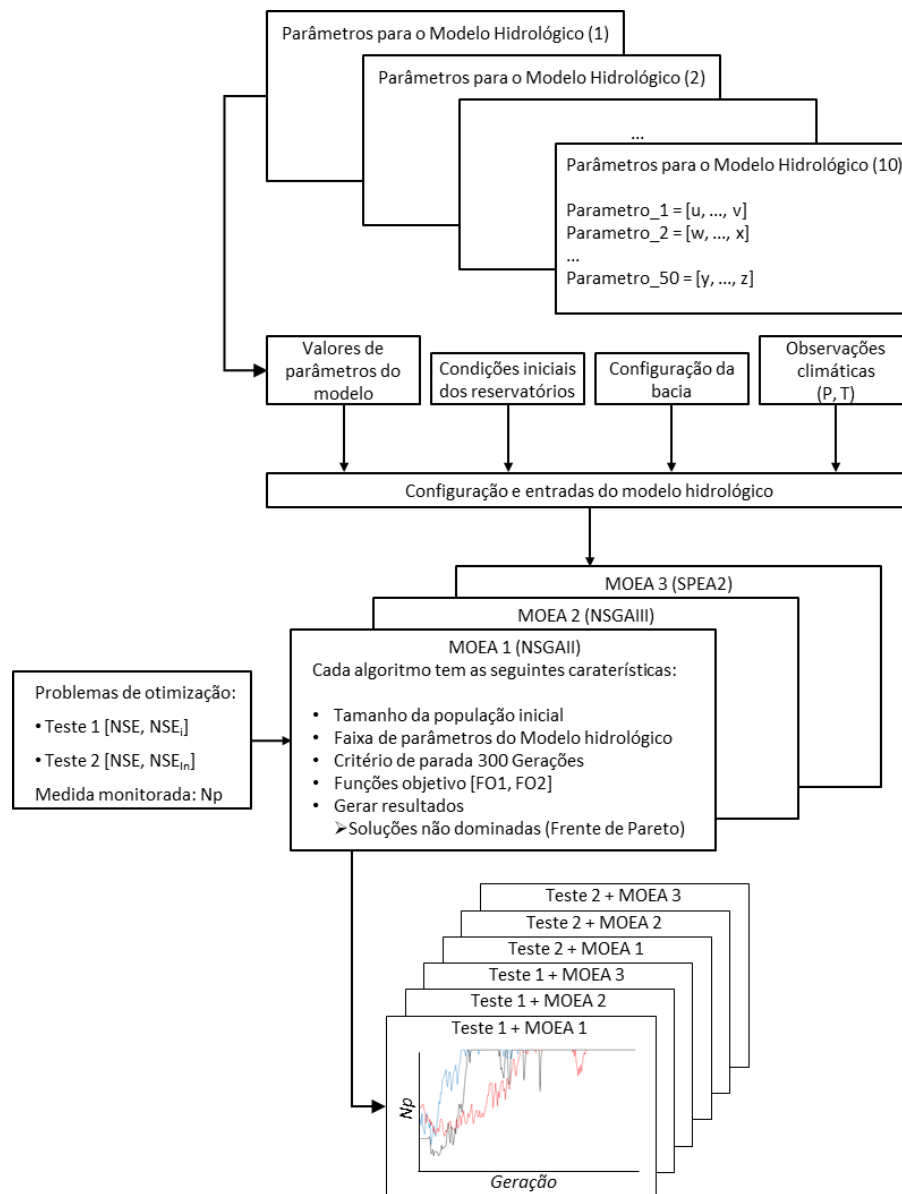
Passo 1. A partir de uma mesma população inicial (formada por 50 membros) foi monitorado o número de soluções não dominadas (N_p) em cada geração até as 300 gerações,

durante o processo de calibração multi-objetivo dos modelos hidrológicos (escolhidos dos testes do item 5.1, no caso o GR5J, IPH II e TankModel 4) para os problemas de calibração dos testes T1 e T2 (Quadro 16);

Passo 2. O Passo 1 foi repetido para 10 populações iniciais diferentes, usando os três MOEA's (NSGAI, NSGAIII e SPEA2), e as series de dados observadas das três bacias (Rio Tesouras, Santo Ângelo e Vila Canoas), totalizando 540 calibrações (3 modelos*10 pop. Iniciais*3 bacias*3 MOEA*2 testes*1 CP).

Passo 3. Dos 540 resultados, foram analisadas a evolução do número de soluções não dominadas (N_p) e os parâmetros G_{min} e $Count_{Max}$, do critério de parada proposto.

Figura 27 – Esquema dos experimentos realizados para a análise dos parâmetros do critério CP1



Fonte: elaborado pelo autor

5.2.2 Problemas de calibração automática multi-objetivo

Para os problemas de calibração multi-objetivo foram escolhidos os critérios de parada: o critério baseado no número das soluções não dominadas, descrito no item 4.1 e proposto nesta pesquisa CP1 (de parâmetros $\text{Count}_{\text{Max}} = 10$ e $G_{\text{min}} = 125$); o critério baseado numa métrica de execução, o critério GD (CP2); e finalmente o critério que termina o processo de calibração após 300 gerações (CP3). Espera-se que o critério CP3, é o mais demorado por ter mais gerações e o mais próximo do ótimo global, então os resultados deste critério foram usados como referência para avaliar os resultados dos outros critérios. Também, como cada critério de parada é independente dos outros, em cada tentativa de calibração quando atingidos cada critério, são armazenados os resultados (tempos, parâmetros, funções objetivo).

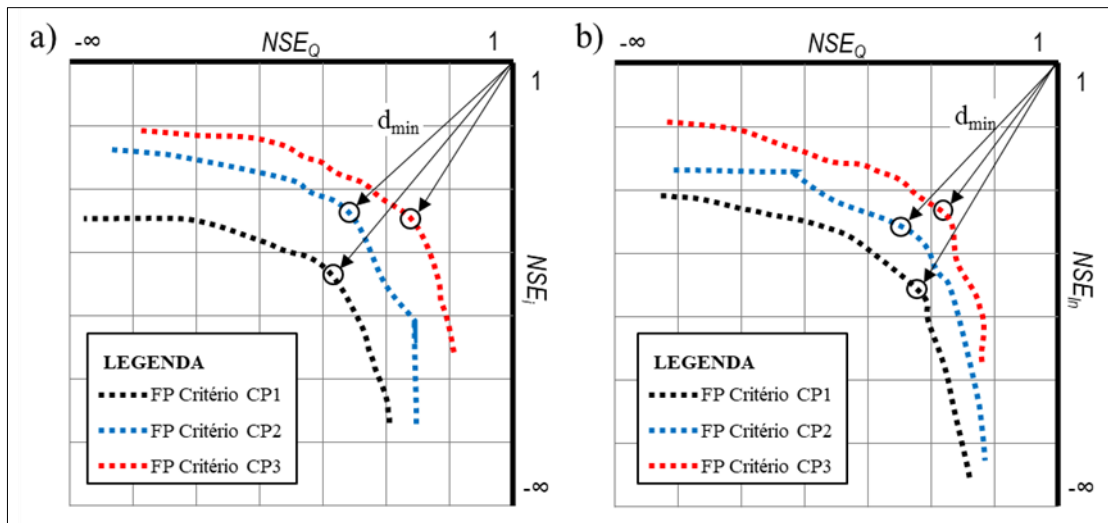
Como o objetivo da calibração foi obter um conjunto de parâmetros que permita ao modelo hidrológico ter uma boa representatividade das vazões no período de cheias e no período das estiagens, foram escolhidos os testes multi-objetivo T1 e T2 mostrados no Quadro 16. Propondo os seguintes passos de análise (esquematizados na Figura 29):

- Passo 1. A partir de uma mesma população inicial (formada por 50 membros) foi realizado os testes de calibração T1 e T2 mostrados no Quadro 16, para a calibração multi-objetivo com cada MOEA, de cada modelo hidrológico e em cada bacia hidrográfica;
- Passo 2. O Passo 1 foi repetido para 10 populações iniciais diferentes, salvando os resultados obtidos (tempos, parâmetros, funções objetivo) com os critérios de parada em cada tentativa, totalizando 1620 calibrações (3 modelos*10 pop. iniciais*3 bacias*3 MOEA*2 testes*3 CP);
- Passo 3. É selecionada a tentativa de Frente de Pareto obtida com o critério CP3, que apresentou o membro mais próximos dos ótimos globais teóricos (1,1), d_{min} ;
- Passo 4. Na tentativa selecionada do passo anterior, é selecionado a melhor solução, d_{min} (no caso do teste T1 e T2 como na Figura 28 a e Figura 28 b, respetivamente) das Frentes de Pareto (FP), obtidas com o critério CP3, CP2 e CP1.

Quadro 16 – Testes de calibração Multi-Objetivo

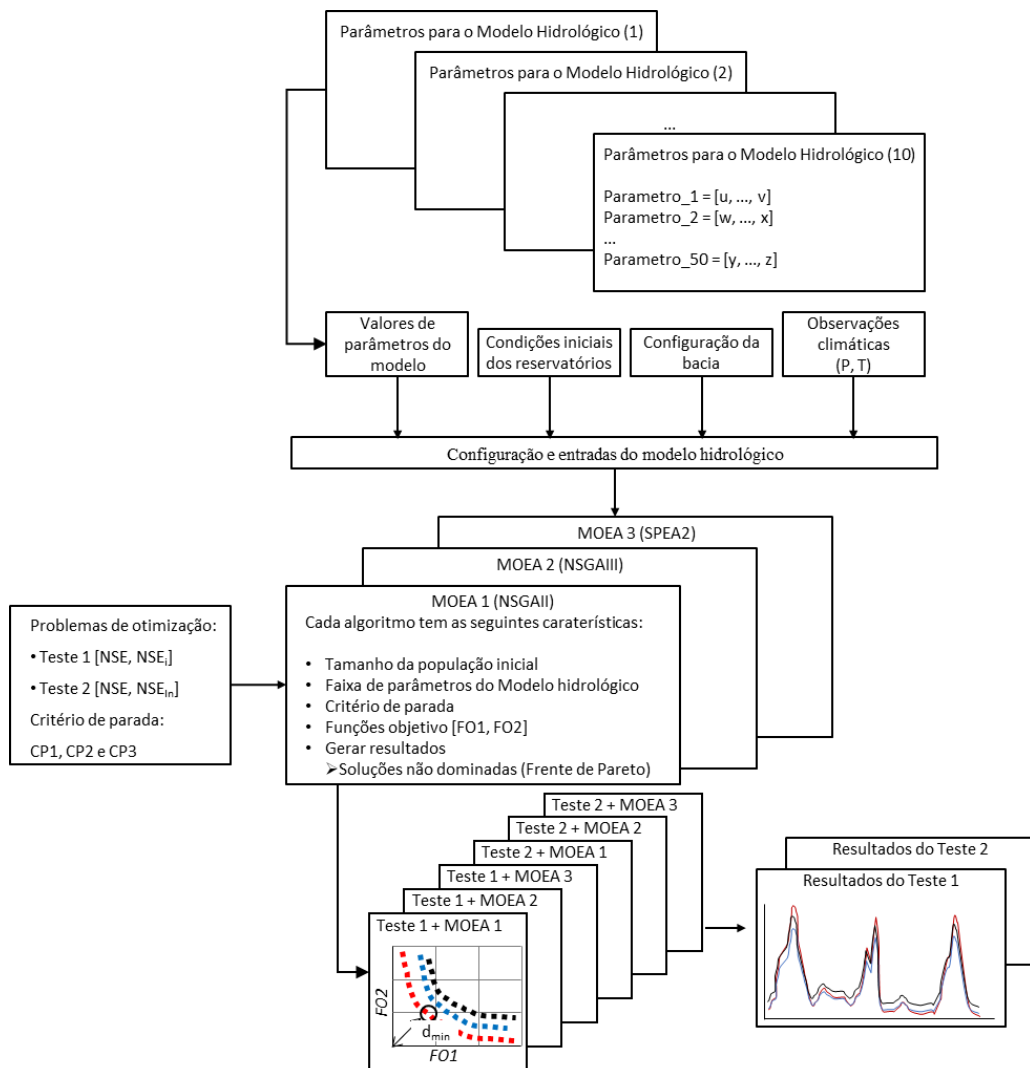
Teste	Problema de calibração (Maximização)		Critério de parada	MOEA	Modelo Hidrológico	Bacia Hidrográfica
	FO1	FO2				
T1	NSE_Q	NSE_i	CP1, CP2 e CP3	NSGA II	GR5J	Rio Tesouras
				NSGA III	IPH II	Santo Ângelo
T2	NSE_Q	NSE_{in}		SPEA2	TankModel 4	Vila Canoas

Figura 28 – Esquema das FPs esperadas, nos testes de calibração a) Teste T1 e b) Teste T2



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 29 – Esquema dos testes de calibração Multi-Objetivo aplicado para cada modelo hidrológico em cada bacia



Fonte: elaborado pelo autor

Capítulo 6. Resultados e Discussão

6.1 Resultados da Calibração automática Mono-Objetivo de modelos hidrológicos

Os resultados a seguir correspondem à calibração automática mono-objetivo dos seis modelos hidrológicos, descritos no item 4.2(M1, M2, M3, M4, M5 e M6), com o uso do algoritmo SCE-UA, usando as seis métricas de calibração apresentadas no item 5.1(FO1, FO2, FO3, FO4, FO5 e FO6), em cada uma das três bacias hidrográficas descritas no Capítulo 1. As métricas obtidas na calibração com cada modelo foram apresentados na Figura 30, enquanto que as Figura 31 a Figura 33 apresentam as Curvas de Permanência de Vazões Diárias (CP) e a Figura 34 a Figura 36 apresentam diagramas Box-Plot das series obtidas.

Figura 30 – Funções Objetivo de cada modelo aplicado em cada bacia

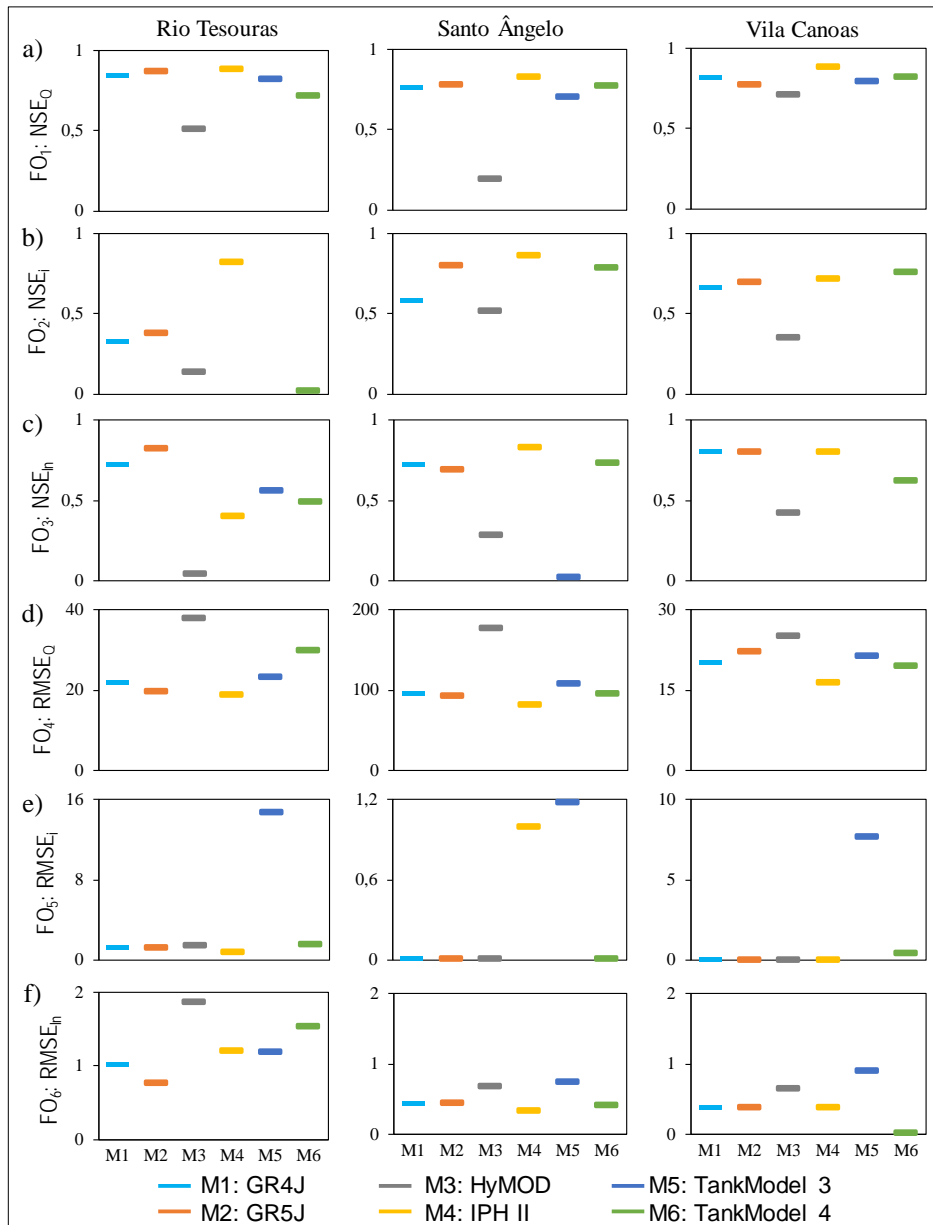


Figura 31 – CP da calibração Mono-Objetivo, na bacia do rio Tesouras

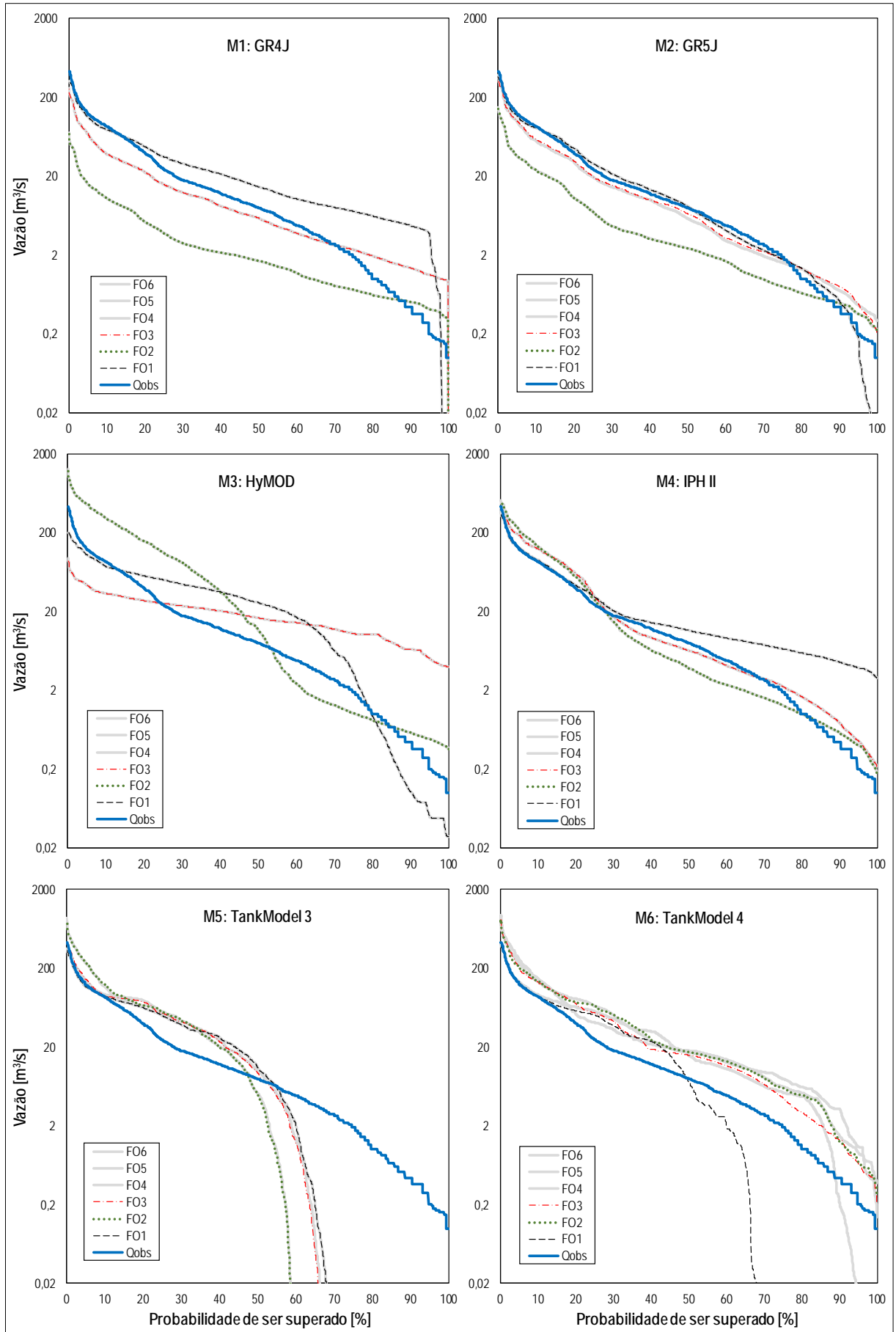


Figura 32 – CP da calibração Mono-Objetivo, na bacia Santo Ângelo

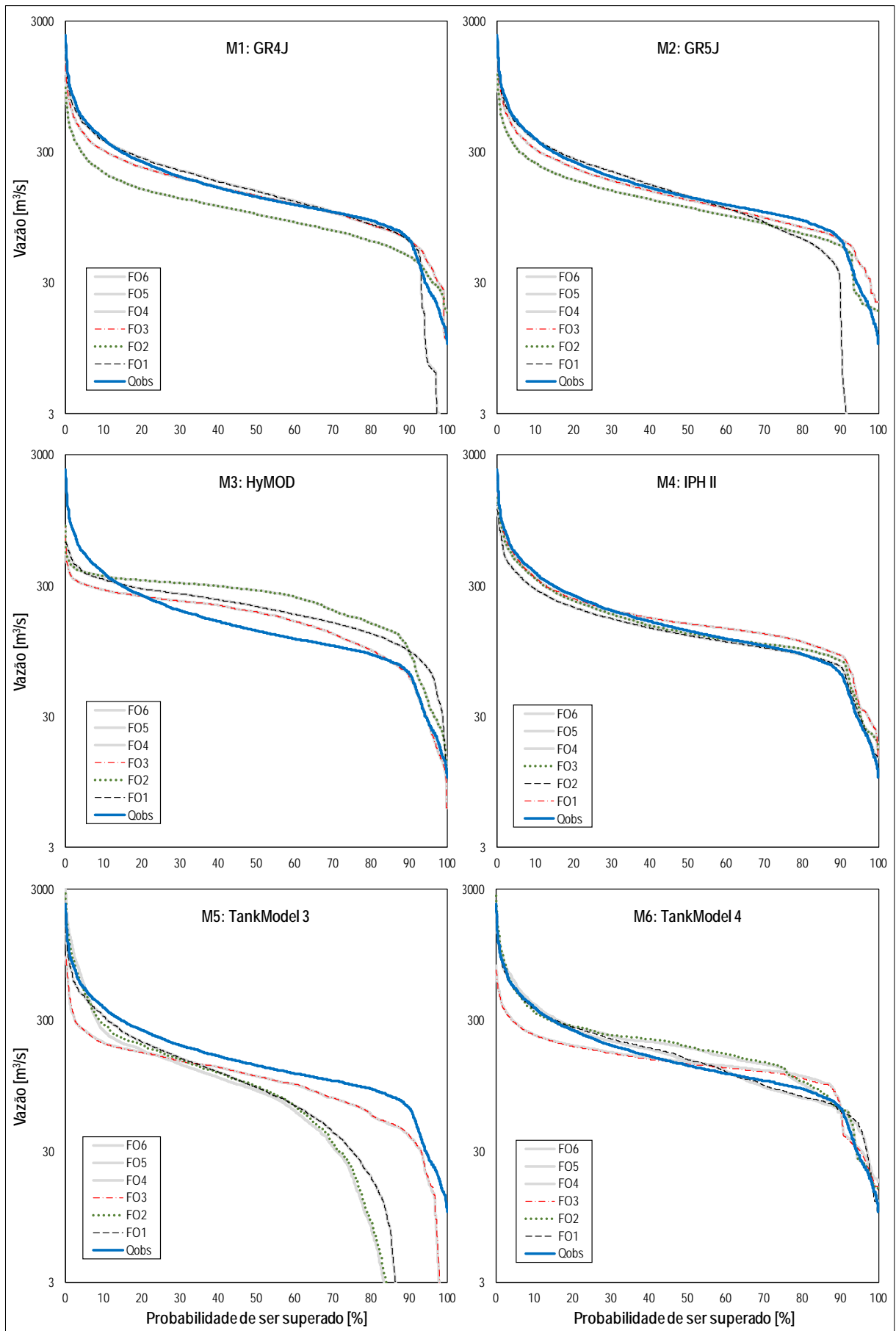


Figura 33 – CP da calibração Mono-Objetivo, na bacia Vila Canoas

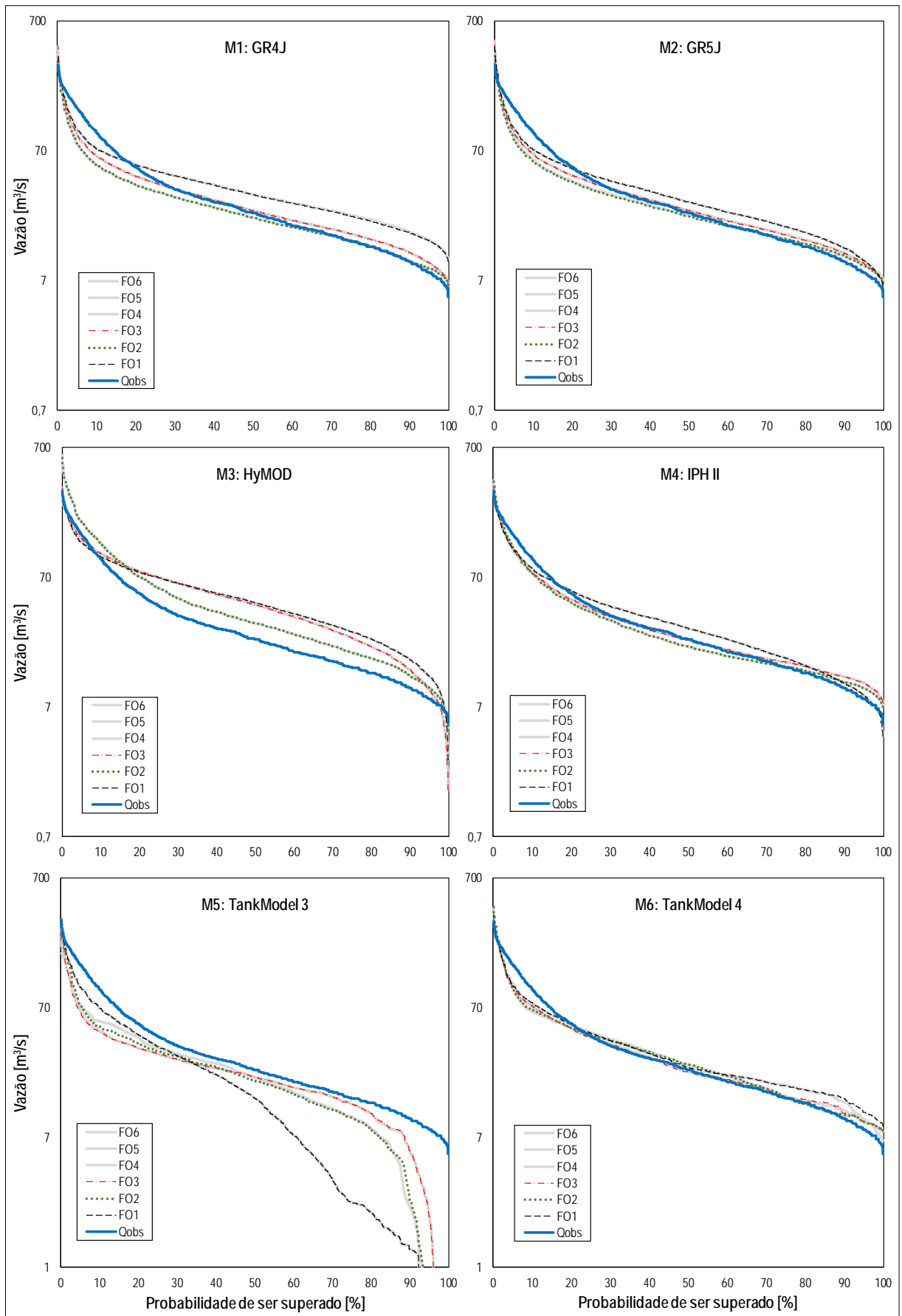


Figura 34 – Box-Plot da calibração Mono-Objetivo na bacia rio Tesouras com seis modelos com seis Funções Objetivo

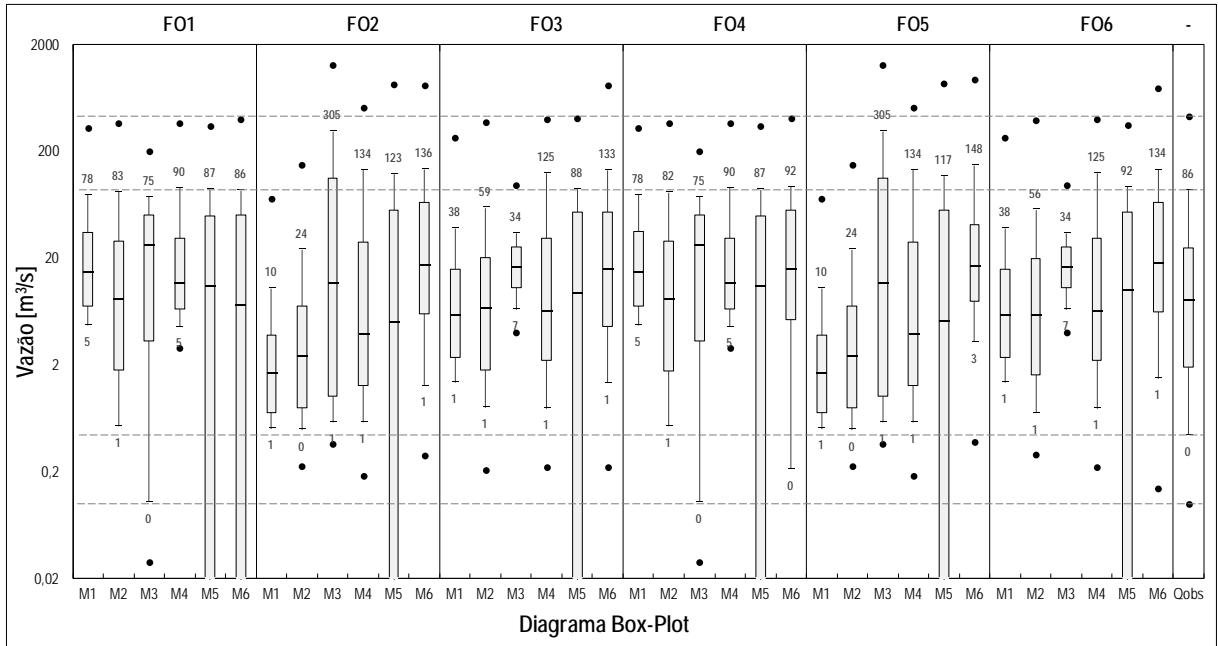


Figura 35 – Box-Plot da calibração Mono-Objetivo na bacia Santo Ângelo e seis modelos com seis Funções Objetivo

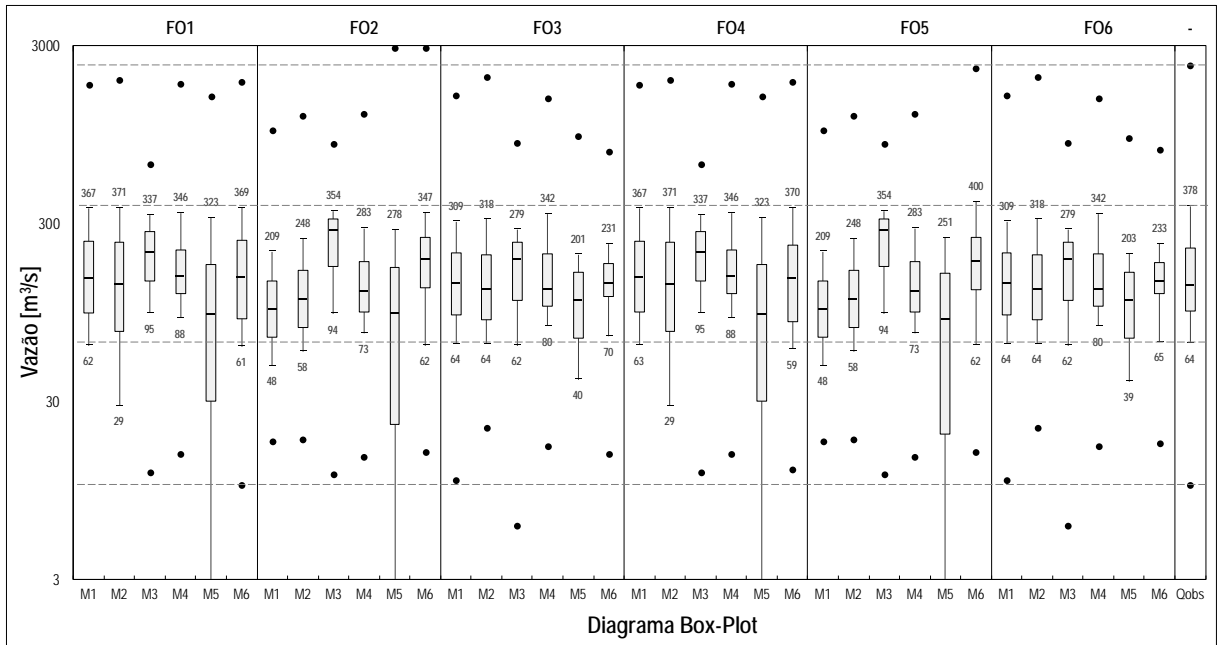
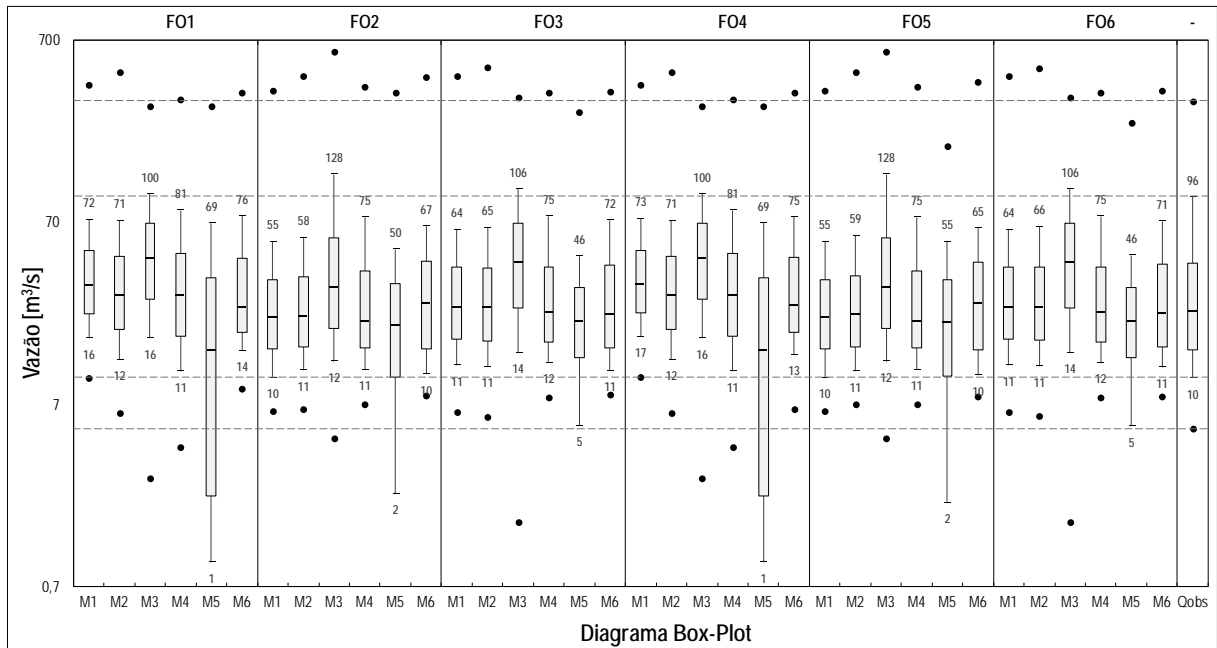


Figura 36 – Box-Plot da calibração Mono-Objetivo na bacia Vila Canoas e seis modelos com seis Funções Objetivo



Do resumo das métricas apresentados na Figura 30, foi observado que, segundo uma classificação da performance em termos do NSE feita por [82]:

- Os modelos GR4J e GR5J, tiveram uma performance parecidas, ambas exibem métricas boas ($>0,65$), de NSE_Q , NSE_i e NSE_{ln} , nas três bacias de estudo. Mas na bacia rio Tesouras, a métrica NSE_i , não foi satisfatória ($<0,50$).
- O modelo HyMOD unicamente apresentou uma performance boa na métrica NSE_Q na bacia Vila Canoas e na maioria dos outros casos, as métricas não foram satisfatórias ($<0,50$).
- O modelo IPH II, exibe métricas muito boas ($>0,75$), de NSE_Q , NSE_i e NSE_{ln} , nas três bacias de estudo. Mas na bacia do rio Tesouras, a métrica NSE_{ln} , não foi satisfatória ($<0,50$).
- O modelo TankModel 3 apenas mostraram uma performance boas ($>0,65$), na métrica NSE_Q nas 3 bacias. Mas para as outras métricas apresentou uma performance apenas satisfatória.
- O modelo TankModel 4, tem uma performance boa ($>0,65$), nas bacias Santo Ângelo e vila Canoas, com relação as métricas NSE_Q , NSE_i e NSE_{ln} , na bacia rio Tesouras só teve uma boa performance na métrica NSE_Q .

Em termos das métricas $RMSE_Q$, $RMSE_i$ e $RMSE_{ln}$, o modelo GR5J teve um desempenho melhor comparado com o modelo GR4J, na bacia rio Tesouras, para as outras bacias tiveram um desempenho muito parecido. Os modelos HyMOD e TankModel 3 tiveram desempenhos inferiores em comparação com os outros modelos.

Das curvas de Permanência de Vazões Diárias (Figura 31, Figura 32 e Figura 33) e nos diagramas Box-Plot (Figura 34, Figura 35 e Figura 36) pode-se observar o seguinte:

- As curvas de permanência das vazões calculadas com base no conjunto de parâmetros definido pelas métricas NSE_Q , NSE_i e NSE_{ln} , são quase idênticas quando comparadas com as curvas de permanência das métricas $RMSE_Q$, $RMSE_i$ e $RMSE_{ln}$, respectivamente. Com exceção do modelo TankModel 4 na bacia rio Tesouras.
- O que foi observado anteriormente nas métricas, se observa também nos diagramas Box-Plot, e pode ser visto nos valores correspondentes aos percentis 0,10 e 0,90.
- Um problema que foi observado nas curvas de permanência dos modelos TankModel 3, respeito as métricas NSE_Q , NSE_i , NSE_{ln} , $RMSE_Q$, $RMSE_i$ e $RMSE_{ln}$, é a subestimava das vazões baixas, corroborado nos diagramas Box-Plot.
- Na bacia do rio Tesouras, o modelo TankModel 4, para as métricas NSE_Q , $RMSE_Q$ ouve uma evidente subestimativa das vazões baixas, assim como uma superestimativa das vazões baixas com as outras métricas.
- Nas curvas de permanência das bacias Santo Ângelo e vila Canoas, os modelos GR5J, IPH II e TankModel 4, mostraram-se mais próximas dos valores observados. Isto foi também observado nos diagramas box-plot correspondentes.

O modelo GR5J superou em desempenho ao modelo GR4J, assim como o Tank Model 4 superou em desempenho ao modelo Tank Model 3; e o modelo IPH II manteve os maiores desempenhos entre os outros modelos.

Para a elaboração dos hidrogramas dos modelos calibrados, foram escolhidos só aqueles que tinham a melhor performance ao representar as vazões observadas na maioria das bacias, neste caso o GR5J, IPH II e TankModel 4. Para as figuras dos hidrograma calculados pelos três modelos (da Figura 37 à Figura 39), se escolheu um subperíodo de 150 dias que corresponde ao maior evento observado do período total usado na calibração, para cada bacia (o hidrograma do período de calibração completo encontra-se no Anexo A, assim como o

hidrograma do período de validação, resultantes do ajuste do modelo em cada bacia hidrográfica).

Figura 37 – Hidrogramas da calibração Mono-Objetivo dos modelos GR5J, IPH II e TankModel 4, para as seis Funções Objetivo, na bacia rio Tesouras no período 26/10/1982-22/8/1983

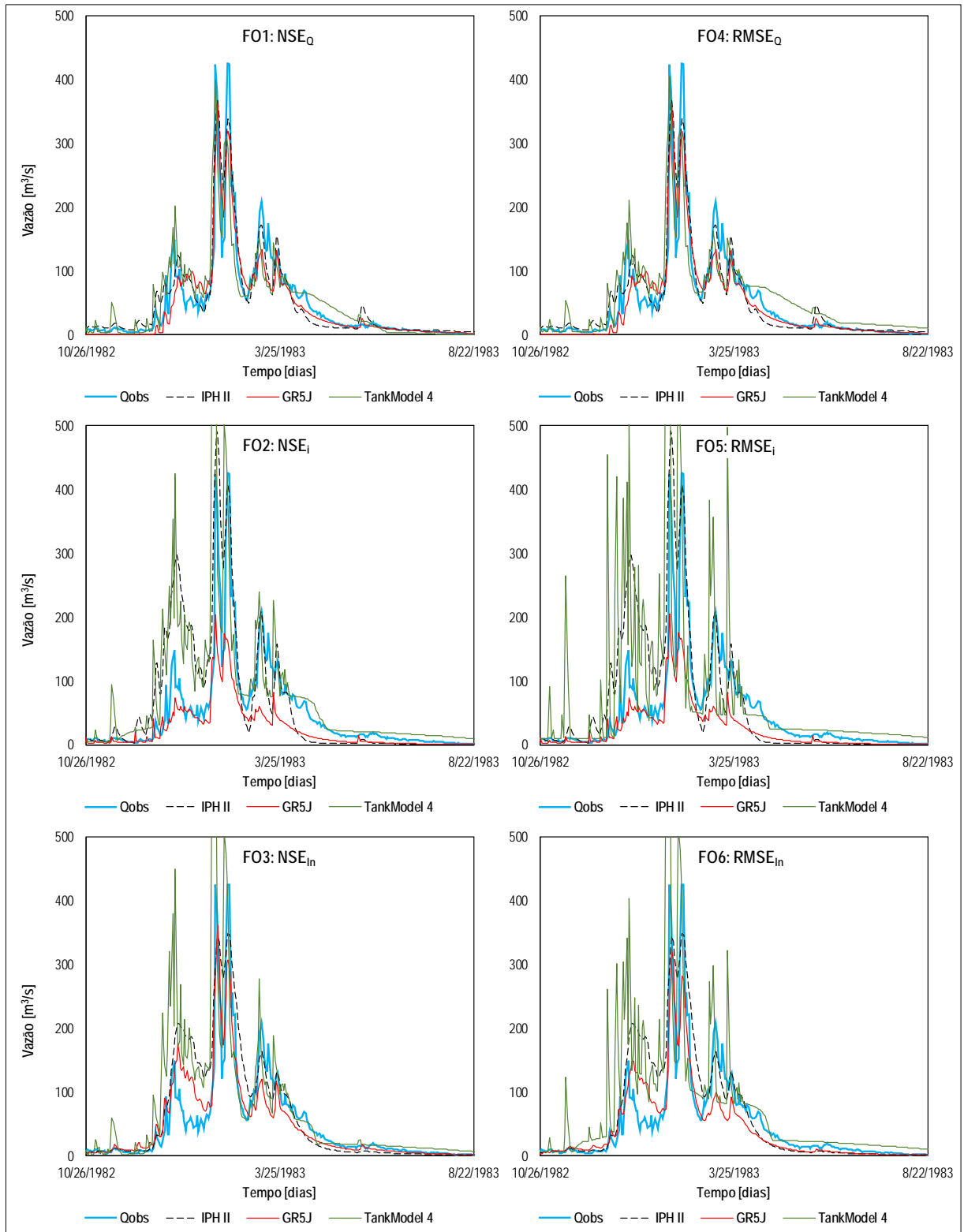


Figura 38 – Hidrogramas da calibração Mono-Objetivo dos modelos GR5J, IPH II e TankModel 4, para as seis Funções Objetivo, na bacia Santo Ângelo no período 26/11/2016-22/9/2017

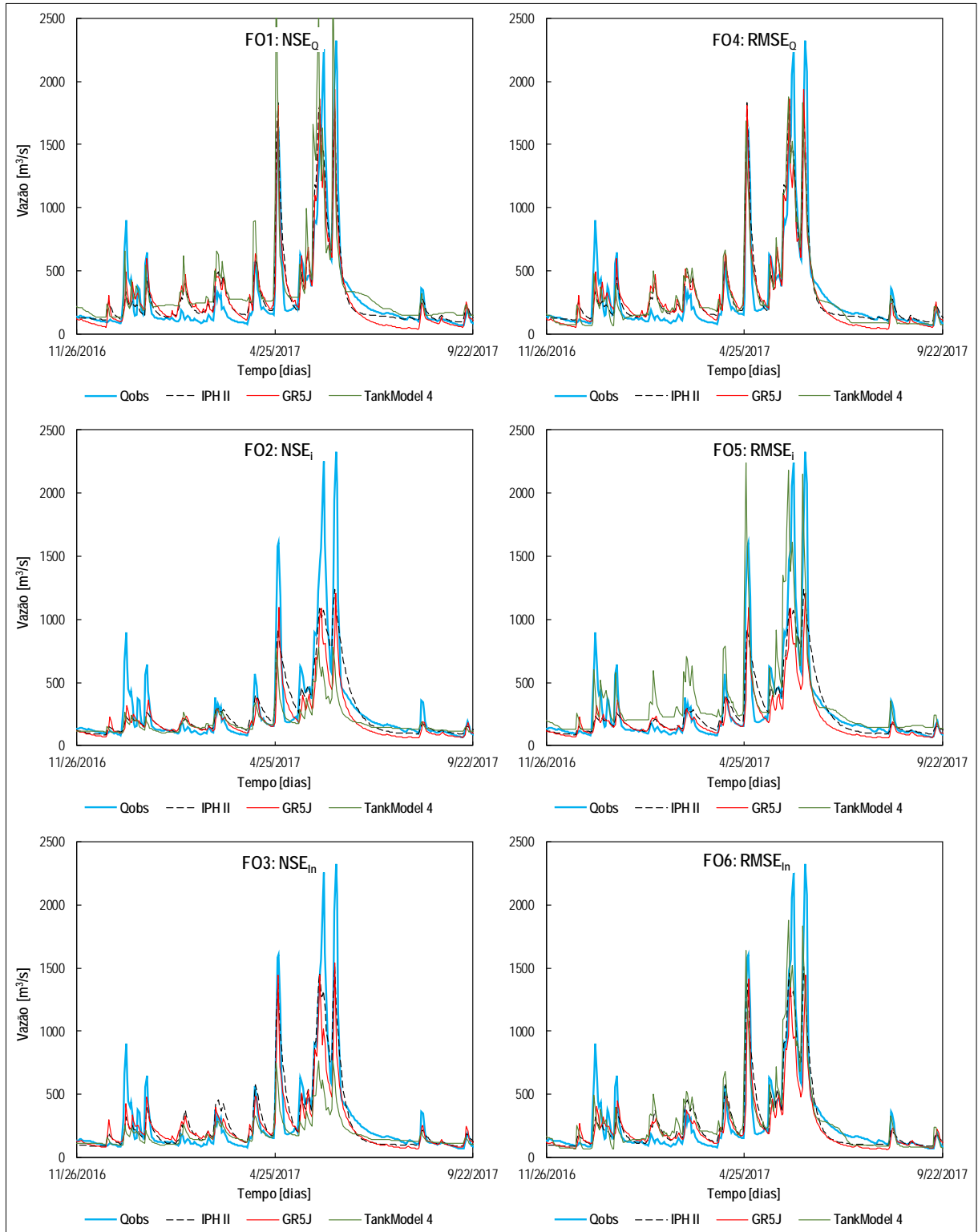
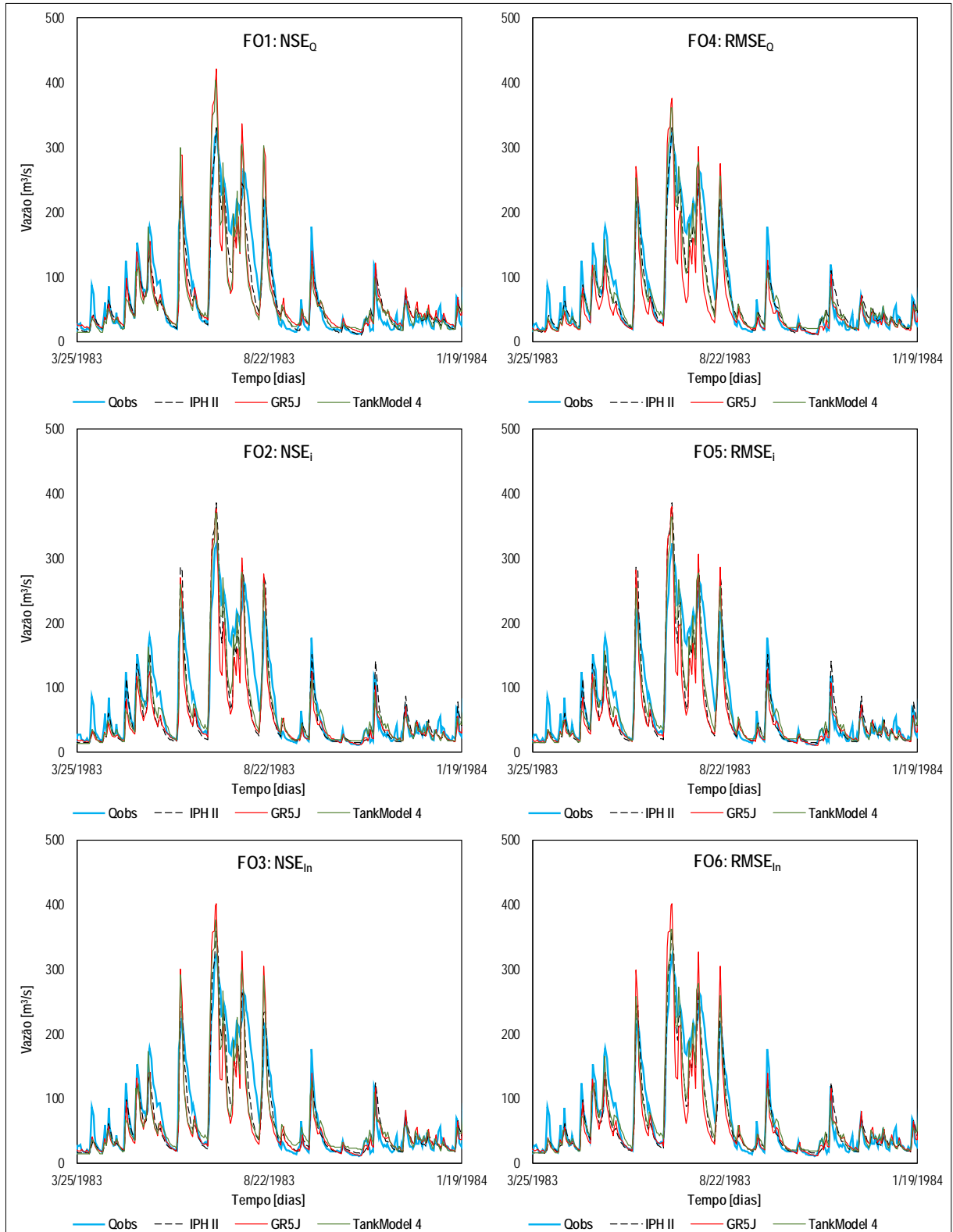


Figura 39 – Hidrogramas da calibração Mono-Objetivo dos modelos GR5J, IPH II e TankModel 4, para as seis Funções Objetivo, na bacia Vila Canoas no período 25/8/1983-19/1/1984



Nos hidrogramas dos períodos de calibração apresentados tanto da Figura 37 a Figura 39, assim como no Anexo A (na Figura A 2, Figura A 3, Figura A 6, Figura A 7, Figura A 10 e Figura A 11), pode observar-se que os modelos GR5J, IPH II e TankModel 4 conseguem

representar satisfatoriamente os eventos de pico das series observadas em cada bacia, com relação as métricas NSE_Q e $RMSE_Q$ (FO1 e FO4, respectivamente). E também representaram bem as vazões baixas das series observadas em cada bacia, com relação as métricas NSE_{ln} e $RMSE_{ln}$ (FO3 e FO6, respectivamente).

Nos hidrogramas dos períodos de validação, apresentados no Anexo A, na Figura A 4, Figura A 5, Figura A 8, Figura A 9, Figura A 12 e Figura A 13, pode observar-se que os modelos GR5J, IPH II e TankModel 4 conseguem representar satisfatoriamente os eventos de pico das series observadas em cada bacia, com relação as métricas NSE_Q e $RMSE_Q$ (FO1 e FO4, respectivamente). No caso das vazões baixas, a melhor representação das series observadas nas bacias rio Tesouras e vila Canoas, aconteceu com relação as métricas NSE_{ln} e $RMSE_{ln}$ (FO3 e FO6, respectivamente). E no caso da bacia Santo Ângelo, a melhor representação das series observadas baixas, aconteceu com relação a métrica NSE_i e $RMSE_i$ (FO2 e FO5, respectivamente).

Por tudo isto, apenas os modelos GR5J, IPH II e TankModel 4 foram utilizados nas análises posteriores. Também, devido a que os resultados da calibração mono-objetivo dos modelos com as métricas NSE_Q , NSE_i e NSE_{ln} teve um desempenho muito próximo com obtido para a calibração com as métricas $RMSE_Q$, $RMSE_i$ e $RMSE_{ln}$, respetivamente. Nos testes de calibração multi-objetivo se usaram somente os primeiros, não descartando seu analise em outros trabalhos.

6.2 Resultados para análise dos parâmetros do critério de parada proposto (CP1)

6.2.1 Resultados da medida Monitorada N_p

Os resultados mostrados a continuação, foram gerados da média de dez tentativas, após atingir as 300 gerações. Obtido da calibração Multi-Objetivo dos modelos hidrológicos (no caso: GR5J, IPH-II e TankModel 4) com os MOEA's (NSGAI, NSGAIII e SPEA2), as figuras mostram a evolução do número de soluções não dominadas (N_p), monitorados em 300 gerações, para o teste T1 (maximização de NSE_Q e NSE_i) e T2 (maximização de NSE_Q e NSE_{ln}).

Figura 40 – Evolução do N_p , para problema de calibração a) T1 e b) T2, do modelo GR5J

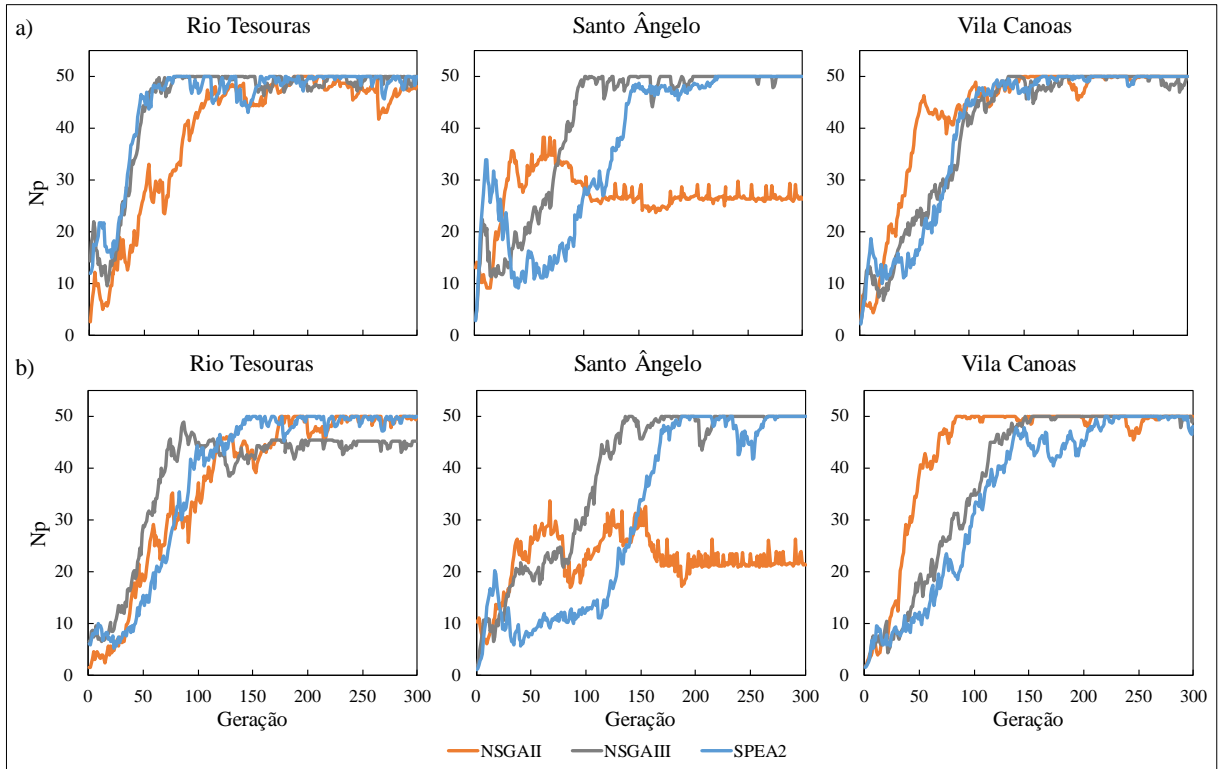


Figura 41 – Evolução do N_p , para problema de calibração a) T1 e b) T2, do modelo IPH II

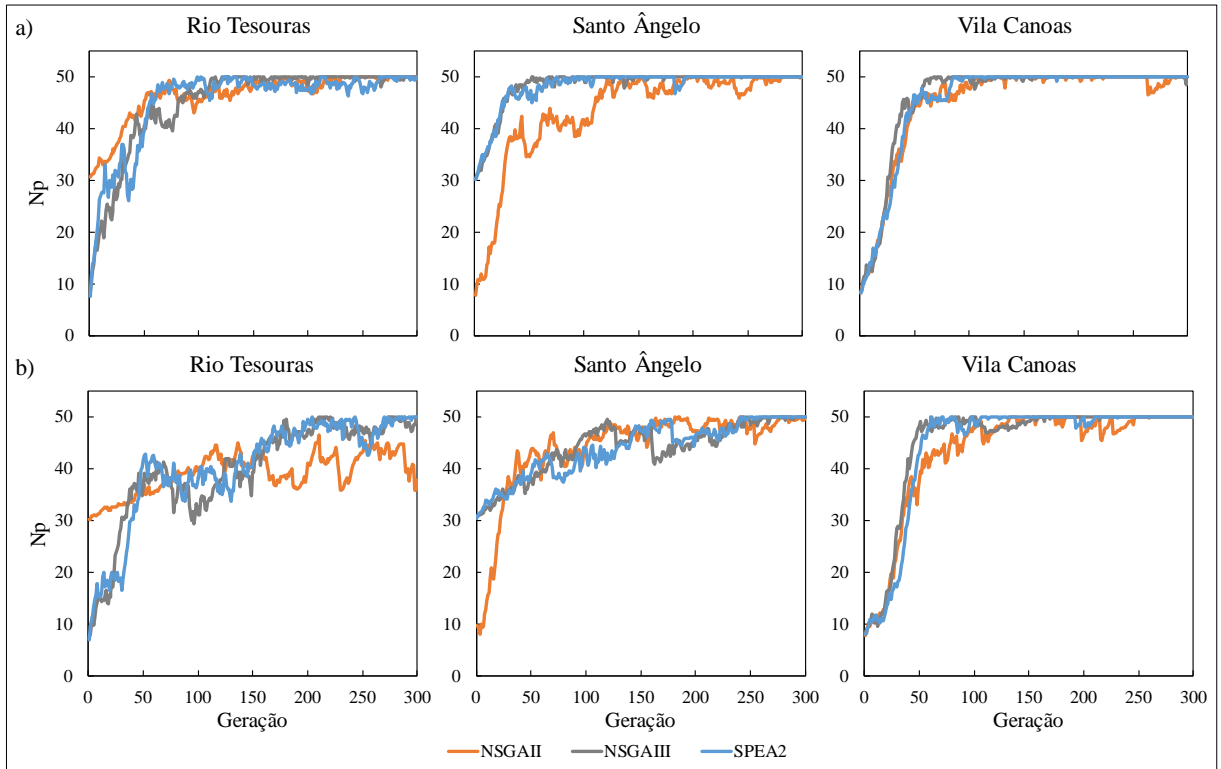
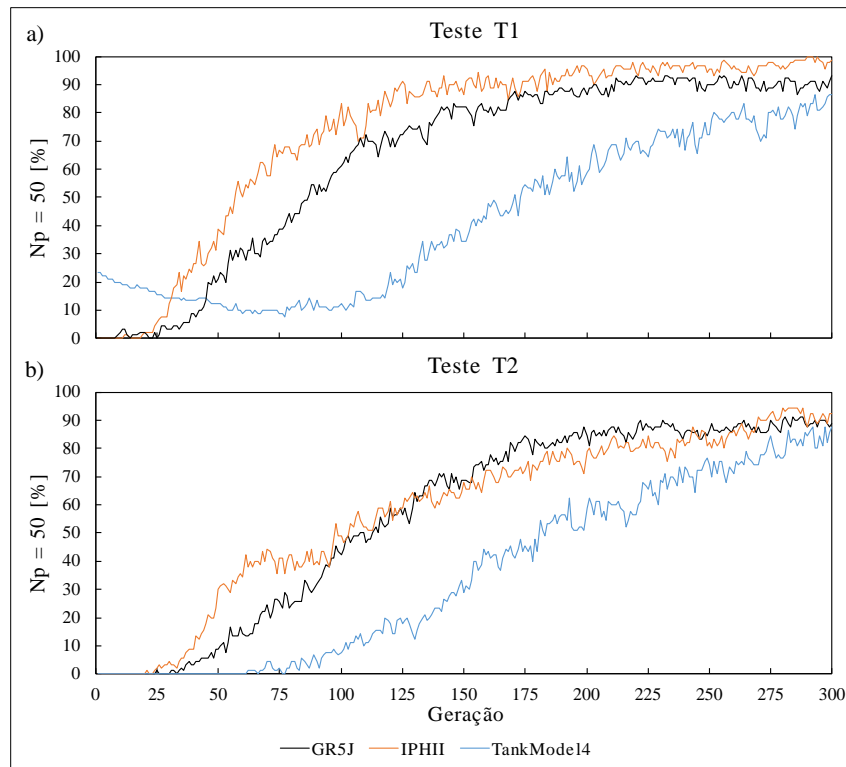


Figura 42 – Evolução do N_p , para problema de calibração a) T1 e b) T2, do modelo TankModel 4



A seguinte gráfica mostra a probabilidade de N_p atingir 50 por primeira vez, ao longo de 300 gerações, considerando todas as tentativas (90 em total), para cada teste (T1 e T2 na Figura 43a e Figura 43b respetivamente).

Figura 43 – Probabilidade de N_p atingir o máximo de 50 por primeira vez, para os testes a) T1 e b) T2



Considerando que após 75 gerações o modelo TankModel 4, como mínimo, teve uma probabilidade de 1% de $N_p = 50$, foram criadas as gráficas Box-Plot (Figura 44, Figura 45 e Figura 46) que mostram a geração onde o algoritmo terminaria, variando o parâmetro $Count_{Max}$, quando o parâmetro G_{min} se mantém fixo. Isto é, $Count_{Max}$ variando de 1 até 25, para $G_{min} = 75$, 100, 125, 150 e 175. Também, foi criada a gráfica, Figura 47, que mostram a probabilidade de não atingir o $N_p = 50$, nas 300 gerações, com $Count_{Max}$ variando de 1 até 25, para $G_{min} = 75$, 100, 125, 150 e 175, para cada modelo hidrológico.

Figura 44 – Box-Plots da Geração Máxima de término, observado no modelo GR5J, para os testes a)T1 e b)T2

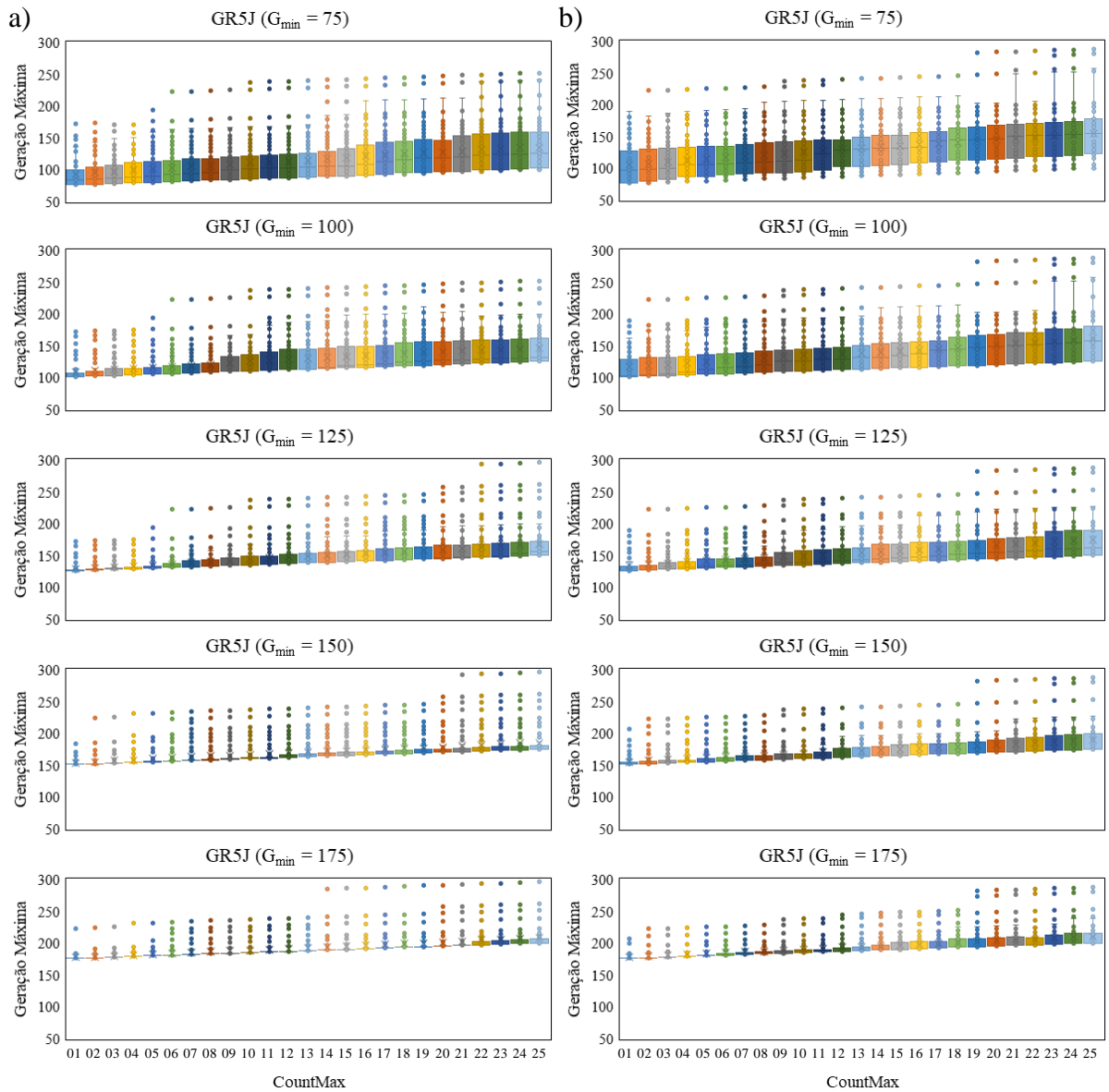


Figura 45 – Box-Plots da Geração Máxima de término, observado no modelo IPHII, para os testes a)T1 e b)T2

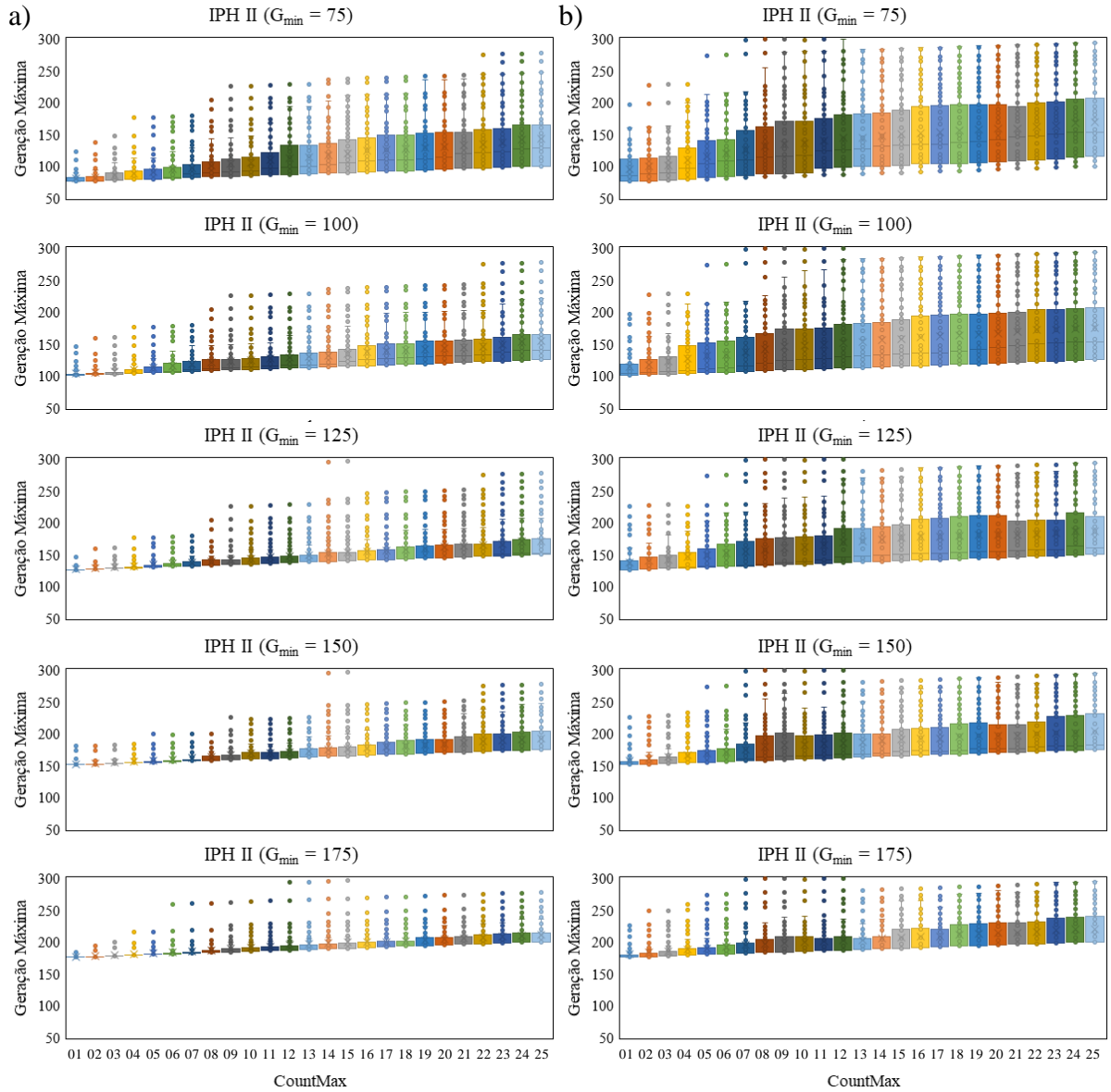


Figura 46 – Box-Plots da Geração Máxima de término, observado no modelo TankModel 4, para os testes a)T1 e b)T2

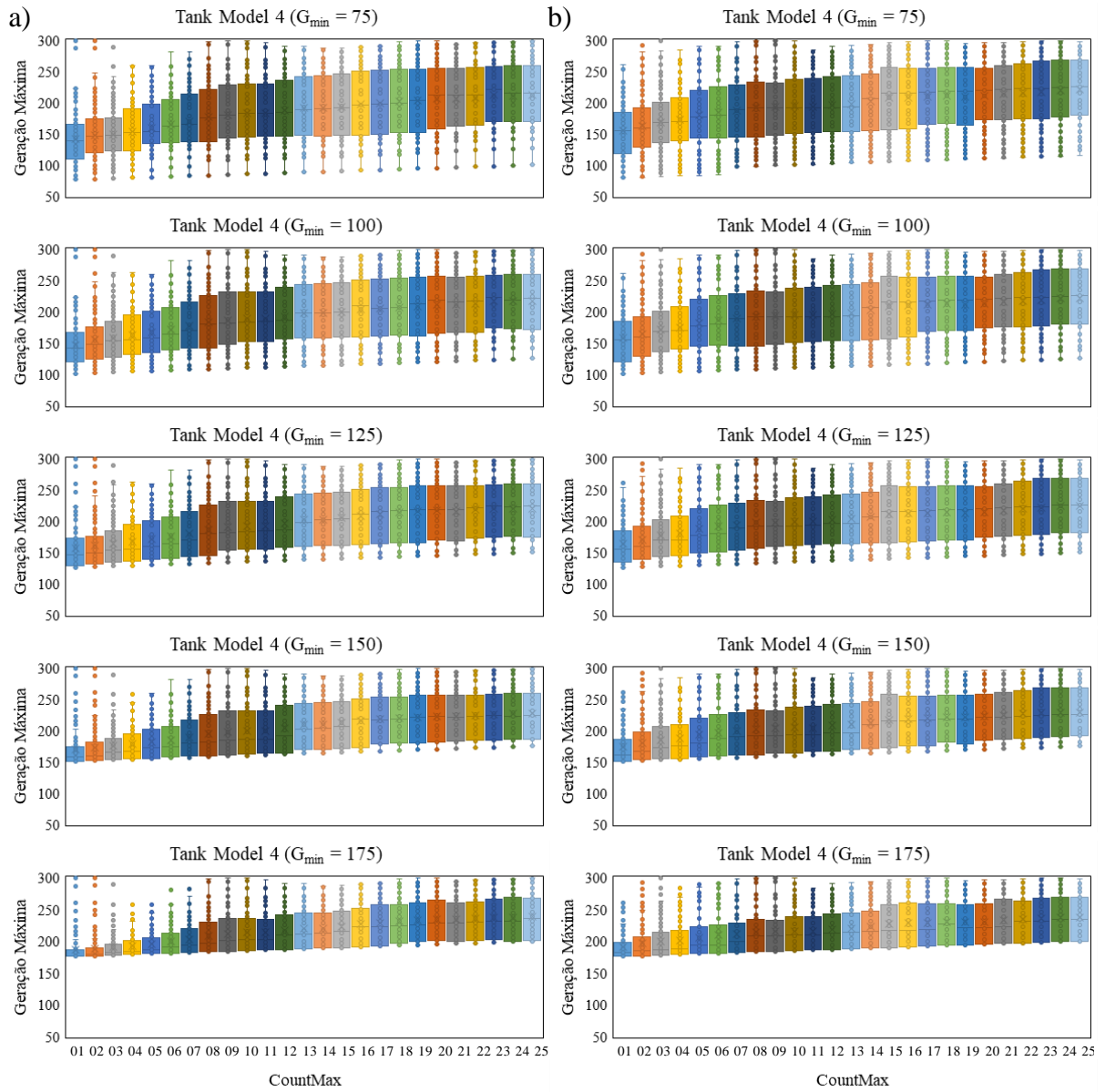
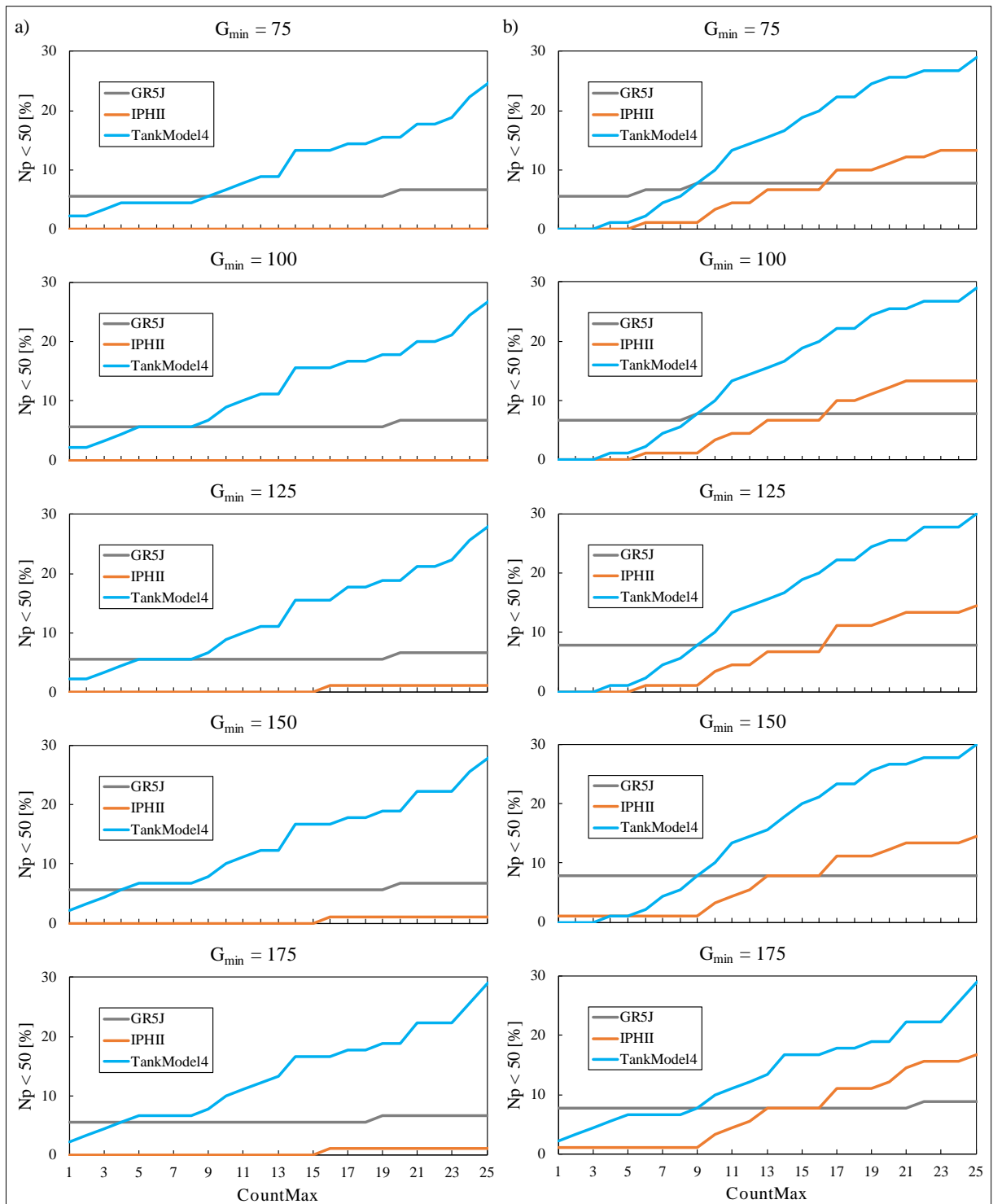


Figura 47 – Probabilidade de não terminar o algoritmo, em 300 gerações, para os testes a)T1 e b)T2



6.2.2 Parâmetros do critério de parada proposto (CP1)

Com o objetivo de analisar os valores adequados dos parâmetros do critério de parada proposto (CP1), foi monitorada a medida N_p (número de soluções não dominadas), para o problema de calibração multi-objetivo, conforme apresentado no item anterior. A análise desses resultados para cada parâmetro é apresentada a seguir:

a) Parâmetro G_{\min}

Nas Figura 40, Figura 41 e Figura 42, foi observado que as médias da medida monitorada N_p , para as tentativas testadas, observou-se valores baixos nas primeiras gerações, comparados aos correspondentes valores após as 100 gerações, aproximadamente. Mas para a maioria dos casos foi detectada a convergência para o valor máximo de N_p (50), até as 300 gerações da calibração.

Na Figura 43 foi observado que, considerando todos os casos testados em cada modelo, a probabilidade de atingir pela primeira vez $N_p = 50$:

- Na calibração automática multi-objetivo do modelo GR5J, a partir das 75 gerações a probabilidade é de 20-35%;
- Na calibração automática multi-objetivo do modelo GR5J, a partir das 100 gerações a probabilidade é de 50-60%;
- Na calibração automática multi-objetivo do modelo IPH II, a partir das 75 gerações a probabilidade é de 40-70%;
- Na calibração automática multi-objetivo do modelo IPH II, a partir das 100 gerações a probabilidade é de 40-60%;
- Na calibração automática multi-objetivo do modelo TankModel 4, a partir das 125 gerações a probabilidade ainda é inferior a 20%;
- Na calibração automática multi-objetivo do modelo TankModel 4, a partir das 175 gerações a probabilidade é de 50%;

Pelo observado o parâmetro G_{\min} , que estabelece a partir de qual geração é monitorado se o N_p atingiu o máximo (50 nos testes analisados), pode mudar dependendo do modelo hidrológico sendo calibrado. No entanto, pode ser usado um único valor para todos os modelos, dado que o G_{\min} , busca evitar a parada prematura, pelo que são aceitos valores acima de 75, tais como: 75, 100 ou 125, por exemplo.

b) Parâmetro $\text{Count}_{\text{Max}}$

Nos diagramas box-plot da Figura 44, Figura 45 e Figura 46, foram selecionados cinco valores de G_{\min} (75, 100, 125, 150 e 175), para os quais se analisou a geração em que terminaria a calibração automática multi-objetivo de cada modelo hidrológico com o novo critério de parada (CP1), variando o segundo parâmetro $\text{Count}_{\text{Max}}$, de 1 até 25. Das figuras foi observado:

- A medida que aumenta o $\text{Count}_{\text{Max}}$, a geração máxima em que o critério de parada foi atendido também aumenta de forma crescente, como esperado;
- Para o modelo GR5J, com os cinco valores de G_{min} , a condição do $\text{Count}_{\text{Max}}$, terminou a calibração antes das 200 gerações, na maioria dos casos;
- Também para o modelo IPH II, com os cinco valores de G_{min} , a condição do $\text{Count}_{\text{Max}}$, terminou a calibração antes das 230 gerações, na maioria dos casos;
- Para o modelo TankModel 4, com os cinco valores de G_{min} , a condição do $\text{Count}_{\text{Max}}$, terminou a calibração antes das 270 gerações, na maioria dos casos.

Na Figura 47, a probabilidade de não ser atingidas as condições dos parâmetros do critério CP1, dentro das 300 primeiras gerações, foram apresentados. Se observou que:

- Para o modelo GR5J, a probabilidade é menor de 8% em todos os casos;
- Para o modelo IPH II, a probabilidade é menor de 5%, quando $\text{Count}_{\text{Max}} < 10$;
- Para o modelo TankModel 4, a probabilidade é menor de 10%, quando $\text{Count}_{\text{Max}} < 10$.

Das análises apresentadas, foi adotado um valor igual a 125 para o parâmetro G_{min} garantindo evitar a parada prematura. No segundo parâmetro $\text{Count}_{\text{Max}}$, foi adotado o valor igual a 10, que garante que o critério de parada seja atendido no 90% dos casos, ainda dentro das primeiras 300 gerações.

6.3 Resultados da Calibração Multi-Objetivo com os Critérios de Parada CP1, CP2 e CP3

Como exposto nos 4 passos do item 5.2.2, foram realizados os problemas de calibração automática multi-objetivo. Os resultados da calibração multi-objetivo foram organizados da seguinte forma:

- Primeiro são apresentados os tempos de calibração multi-objetivo dos modelos hidrológicos GR5J, IPH II e TankModel 4 (como descritos nos passos 1 e 2, do item 5.2.2);

- Depois, os tempos computacionais das tentativas que geraram a FP mais próxima dos ótimos globais teóricos (1,1), assim como as gerações onde os critérios de parada foram atendidos (metodologia descrita no passo 3);
- Depois, são apresentadas as métricas de desempenho dos FP obtidos nos testes descritos no item 5.2 (T1 e T2) usando os critérios de parada CP1 (proposto neste trabalho), CP2 (baseado na métrica de desempenho GD) e CP3 (determinado pelo máximo número de gerações, adotado igual a 300 neste trabalho). No caso somente as que tiveram a FP do critério CP3 mais próxima dos ótimos globais teóricos em cada bacia (metodologia descrita no passo 3 do item 5.2.2);
- Também, assim como no passo 4 do item 5.2.2, considerando o melhor conjunto de parâmetros do FP, obtido do processo de calibração, foram elaboradas tabelas de resumo das principais estatísticas, figuras de Curvas de Permanência (CP) das vazões calculadas com base no conjunto de parâmetros definidos pelos testes T1 e T2, e os hidrogramas completos das vazões calculadas no período de calibração, encontra-se no Anexo B);
- Finalmente para o modelo que teve a melhor performance em cada bacia e teste, foram elaborados os hidrogramas das vazões calculadas, de um subperíodo de 150 dias que corresponde ao maior evento observado do período total usado na calibração (os hidrogramas completos encontra-se no Anexo B e os hidrógramas dos períodos de validação encontra-se no Anexa C).

6.3.1 Esforço computacional de Calibração Multi-Objetivo

O tempo computacional gasto em todas as tentativas de calibração multi-objetivo dos modelos nos testes T1 e T2, foram representadas em diagramas Box-Plot para cada bacia na Figura 48, Figura 49 e Figura 50. Também, foram representados em forma porcentual, os tempos computacionais mínimo e máximo dos critérios de parada CP1 e CP2, em relação ao critério CP3, na Tabela 1 e Tabela 2, respectivamente. Observa-se dos resultados:

- Independentemente do critério de parada (CP1, CP2 ou CP3) aplicado nos testes de calibração, dentre todos os MOEA's o SPEA2 foi o mais rápido, em todas as bacias;
- Entre os critérios CP1 e CP2, nenhum foi o mais rápido em todos os casos, mas sempre tiveram um esforço computacional menor com relação ao critério CP3.
- A ordem dos modelos hidrológicos, de menor a maior esforço computacional foi: GR5J, IPH II e finalmente TankModel 4, quando considerado o critério CP1 ou CP3;

- A calibração do modelo GR5J com o critério proposto CP1, teve um esforço computacional, entre 43% e 77%, como observado na Tabela 1;
- A calibração do modelo IPH II com o critério proposto CP1, teve um esforço computacional, entre 43% e 97%, como observado na Tabela 1;
- A calibração do modelo TankModel 4 com o critério proposto CP1, teve um esforço computacional, entre 45 e 99%, como observado na Tabela 1;
- A calibração do modelo GR5J com o critério proposto CP2, teve um esforço computacional, entre 8 e 78%, como observado na Tabela 2;
- A calibração do modelo IPH II com o critério proposto CP2, teve um esforço computacional, entre 1 e 25%, como observado na Tabela 2;
- A calibração do modelo TankModel 4 com o critério proposto CP2, teve um esforço computacional, entre 5 e 95%, como observado na Tabela 2;
- Ainda sobre o critério CP2, as porcentagens menores a 20% mencionados, correspondem a os casos em que o critério terminou a calibração dos modelos nas primeiras 10 gerações, como observado na Tabela 4.

Tabela 1 – Esforço computacional do critério CP1 [%], respeito ao critério CP3

Teste	MOEA	Rio Tesouras			Santo Ângelo			Vila Canoas		
		GR5J	IPH II	Tank Model 4	GR5J	IPH II	Tank Model 4	GR5J	IPH II	Tank Model 4
T1	NSGAI	[45-48]	[45-57]	[45-97]	[45-53]	[44-46]	[50-81]	[46-52]	[45-56]	[47-80]
	NSGAIII	[45-63]	[43-53]	[45-99]	[46-77]	[45-48]	[55-96]	[45-73]	[45-46]	[67-87]
	SPEA2	[45-51]	[45-68]	[45-80]	[44-60]	[48-74]	[45-61]	[46-53]	[45-51]	[45-81]
T2	NSGAI	[45-59]	[45-72]	[45-90]	[44-50]	[46-87]	[76-94]	[45-55]	[45-59]	[55-73]
	NSGAIII	[45-53]	[46-97]	[64-99]	[45-68]	[46-71]	[64-93]	[46-77]	[45-47]	[67-97]
	SPEA2	[43-47]	[46-62]	[45-90]	[46-68]	[46-92]	[45-61]	[45-55]	[45-53]	[45-60]

Legenda: [Mínimo – Máximo]

Tabela 2 – Esforço computacional do critério CP2 [%], respeito ao critério CP3

Teste	MOEA	Rio Tesouras			Santo Ângelo			Vila Canoas		
		GR5J	IPH II	Tank Model 4	GR5J	IPH II	Tank Model 4	GR5J	IPH II	Tank Model 4
T1	NSGAI	[13-41]	[14-24]	*	[21-57]	[1-3]	[20-38]	[14-28]	[2-5]	[13-91]
	NSGAIII	[13-26]	[11-25]	*	[25-78]	[1-2]	[24-56]	[13-41]	[1-8]	[21-77]
	SPEA2	[10-64]	[9-22]	*	[11-67]	[1-2]	[13-24]	[11-23]	[2-6]	[6-94]
T2	NSGAI	[9-18]	[8-23]	[32-54]	[21-50]	[1-2]	[24-39]	[12-29]	[1-4]	[9-78]
	NSGAIII	[13-23]	[8-16]	[34-82]	[18-43]	[1-4]	[45-71]	[14-33]	[2-4]	[8-95]
	SPEA2	[12-63]	[8-23]	[21-30]	[11-23]	[1-2]	[15-38]	[8-17]	[2-7]	[5-93]

Legenda: [Mínimo – Máximo]

(*) a medida GD não convergiu nas 300 gerações

Figura 48 – Esforço computacional, dos testes de calibração automática multi-objetivo na bacia do rio Tesouras

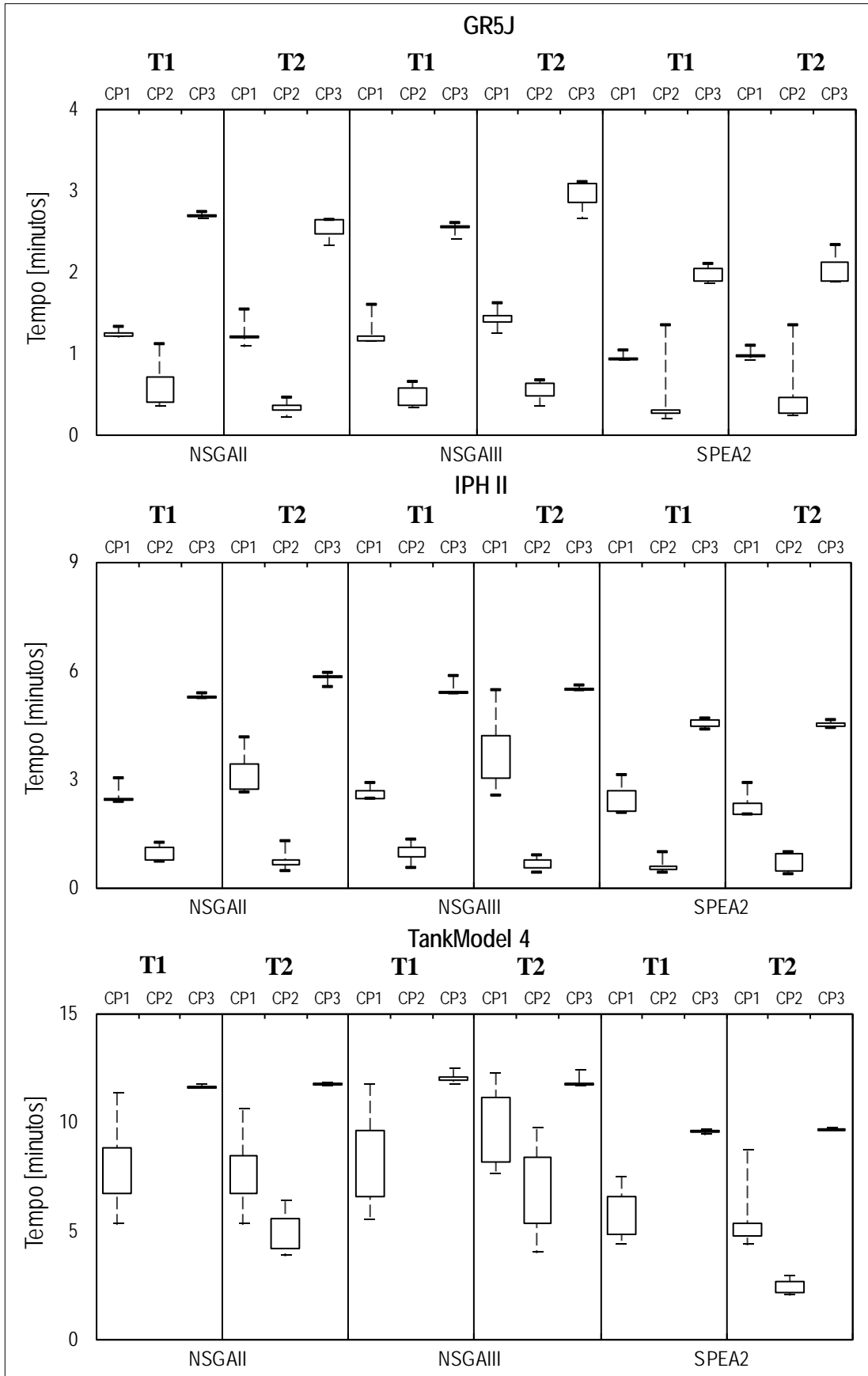


Figura 49 – Esforço computacional, dos testes de calibração automática multi-objetivo na bacia Santo Ângelo

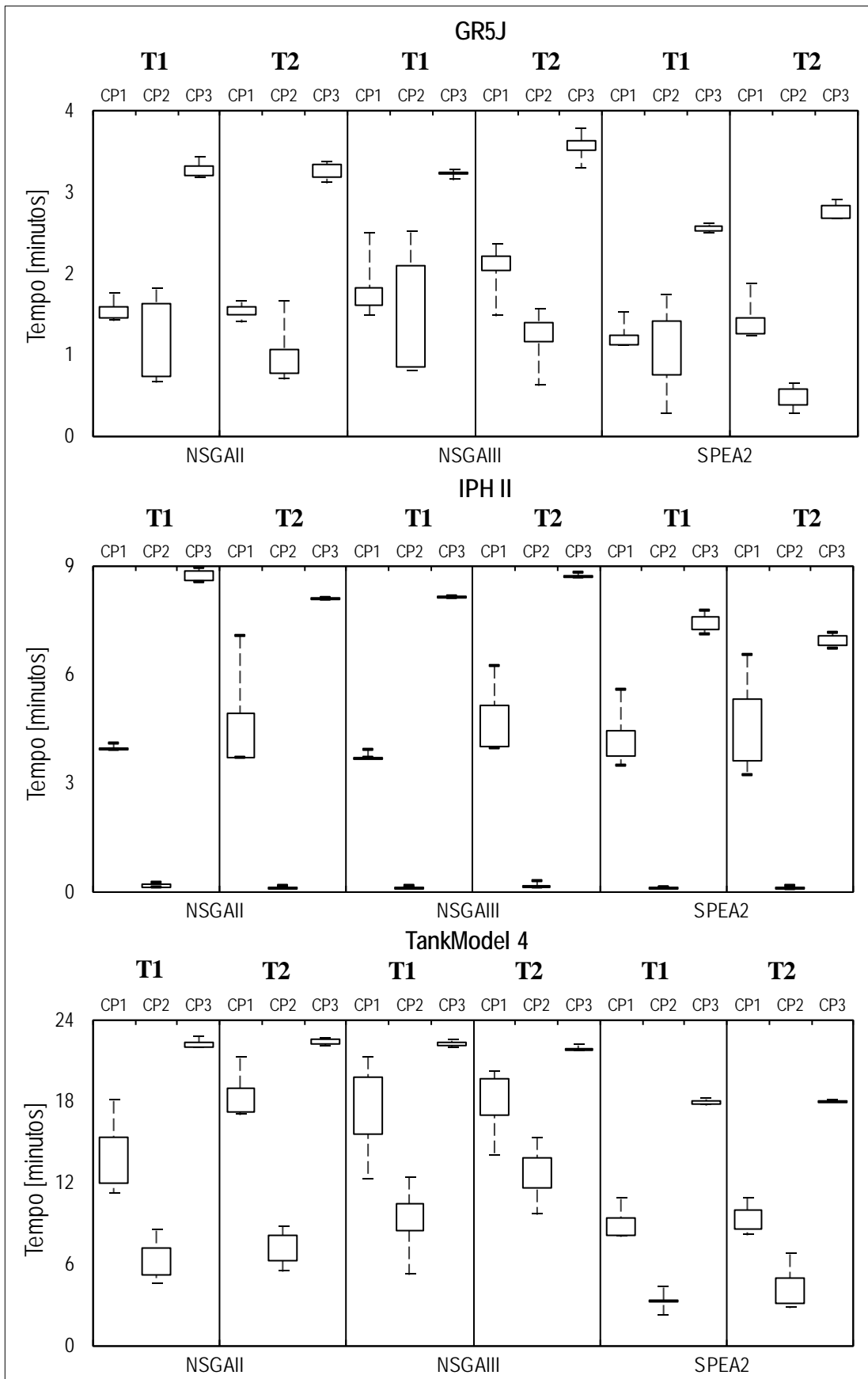
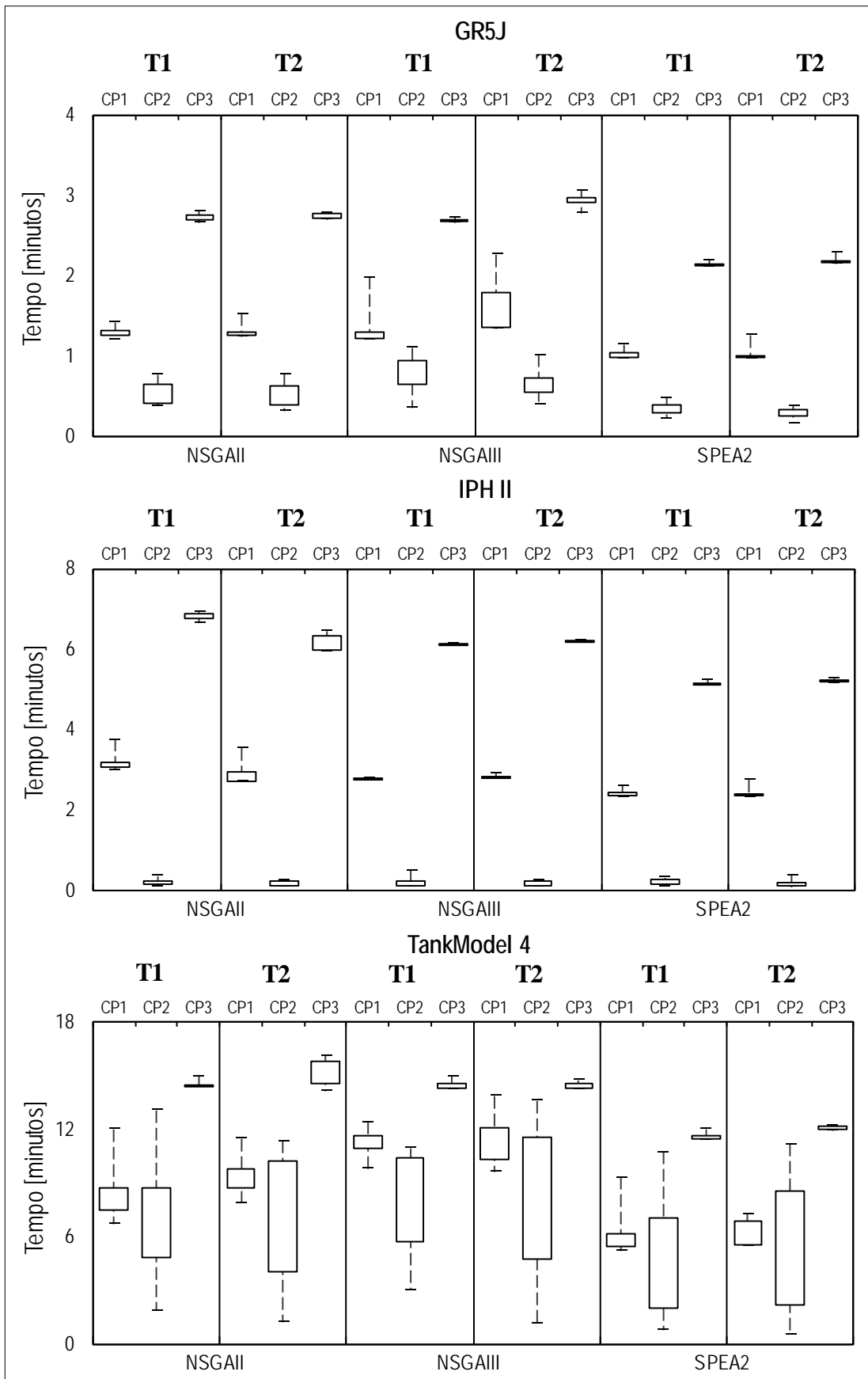


Figura 50 – Esforço computacional, dos testes de calibração automática multi-objetivo na bacia Vila Canoas



Para as tentativas que tiveram a FP do critério CP3 mais próxima do ótimo global (1,1), os esforços computacionais empregados nas tentativas de calibração dos modelos para os testes T1 e T2, estão apresentados na forma de diagramas de barras (cada barra representa o tempo até o critério de parada ser atingido, durante a mesma tentativa de calibração) na Figura 51. Na Tabela 3 e a Tabela 4, são mostradas as gerações em que cada algoritmo atingiu os critérios CP1 e CP2, respectivamente.

Dos resultados da Tabela 3, pode observar-se que na metade dos casos o critério CP1 parou a calibração na geração 136, isto é devido a que os parâmetros do critério de parada, $N_p = 50$, $G_{\min} = 125$ e $\text{Count}_{\text{Max}} = 10$, foram atingidos.

Tabela 3 – Geração atingida com o critério CP1, nos testes T1 e T2

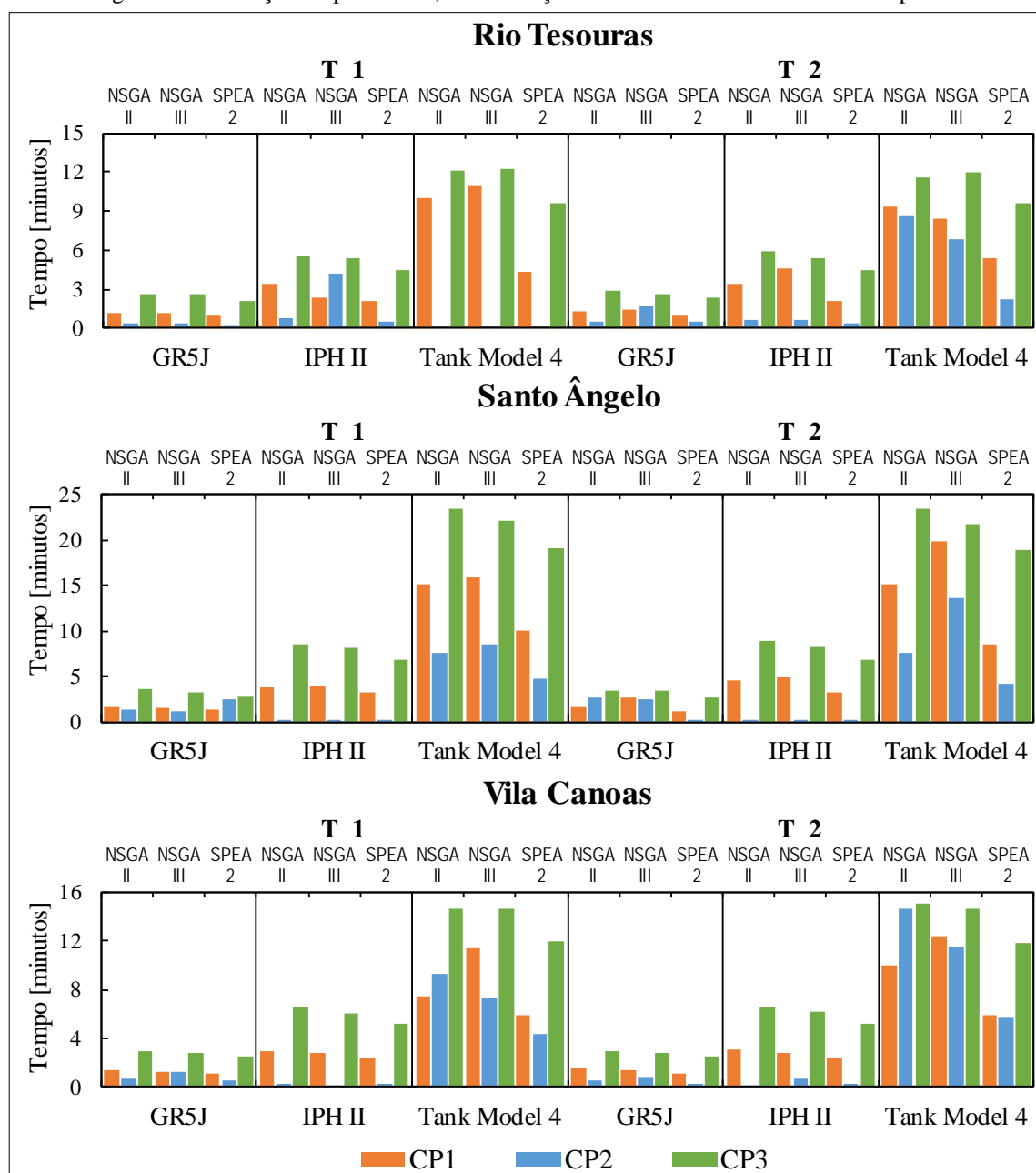
Teste	MOEA	Rio Tesouras			Santo Ângelo			Vila Canoas		
		GR5J	IPH II	Tank Model 4	GR5J	IPH II	Tank Model 4	GR5J	IPH II	Tank Model 4
T1	NSGAI	136	186	248	136	136	195	136	136	157
	NSGAIII	136	136	287	138	144	269	136	136	202
	SPEA2	144	141	137	165	140	161	136	136	157
T2	NSGAI	136	177	242	242	152	198	151	136	199
	NSGAIII	176	264	214	236	177	238	146	136	256
	SPEA2	140	136	167	136	140	136	136	136	152

Tabela 4 – Geração atingida com o critério CP2, nos testes T1 e T2

Teste	MOEA	Rio Tesouras			Santo Ângelo			Vila Canoas		
		GR5J	IPH II	Tank Model 4	GR5J	IPH II	Tank Model 4	GR5J	IPH II	Tank Model 4
T1	NSGAI	38	44	*	107	2	97	74	7	139
	NSGAIII	44	242	*	106	2	108	133	7	119
	SPEA2	32	28	*	281	7	77	57	9	139
T2	NSGAI	48	29	227	147	2	125	55	2	292
	NSGAIII	193	37	147	233	4	175	93	34	240
	SPEA2	58	26	67	63	2	66	21	9	148

(*) a medida GD não convergiu nas 300 gerações

Figura 51 – Esforço computacional, na calibração dos modelos com os critérios de parada



É importante ressaltar que na Tabela 4, o critério CP2, não conseguiu ser atingido na bacia do rio Tesouras, para o teste de calibração multi-objetivo T1 no modelo TankModel 4. Isto foi devido a não ter uma convergência da medida GD durante as 300 gerações em que foi realizada a calibração, isto pode ser visualizado na Figura 52. Também, neste caso, os três algoritmos (NSGA II, NSGA III e SPEA2) tenderam a procurar as soluções não dominadas do FP onde $NSE_i \ll 0$ (após 300 gerações), como ressaltado na Figura 53.

Figura 52 – Variação de GD no problema de calibração teste T1 para o modelo TankModel 4

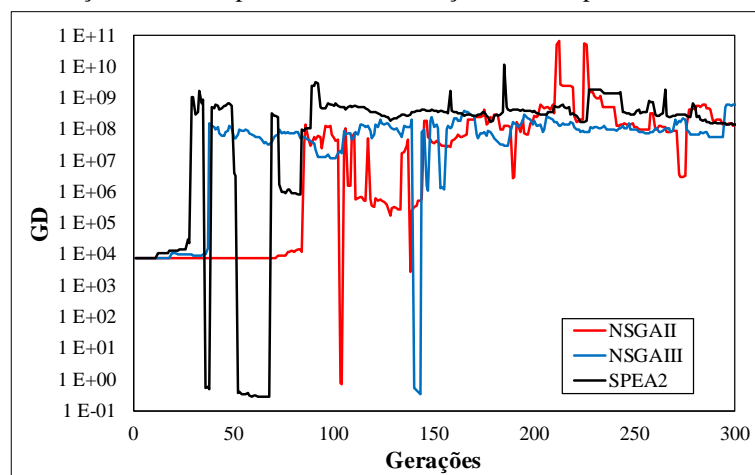
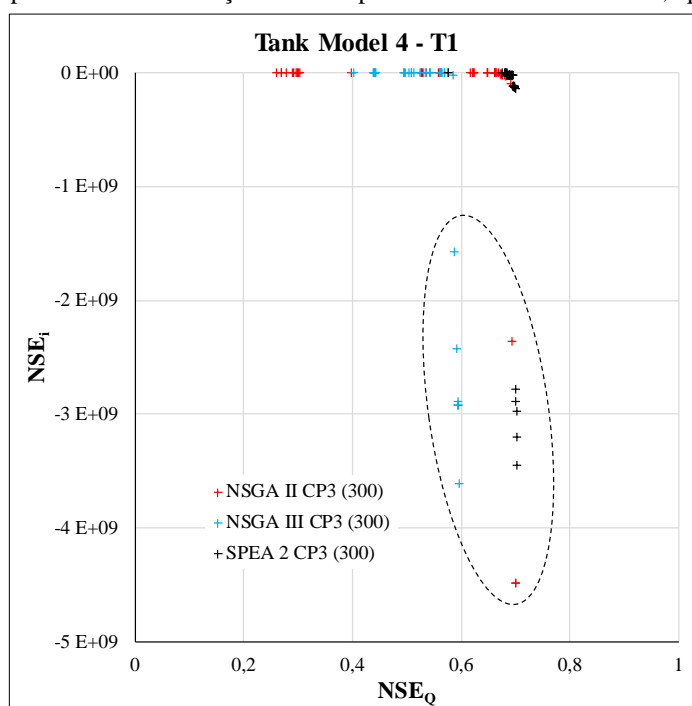


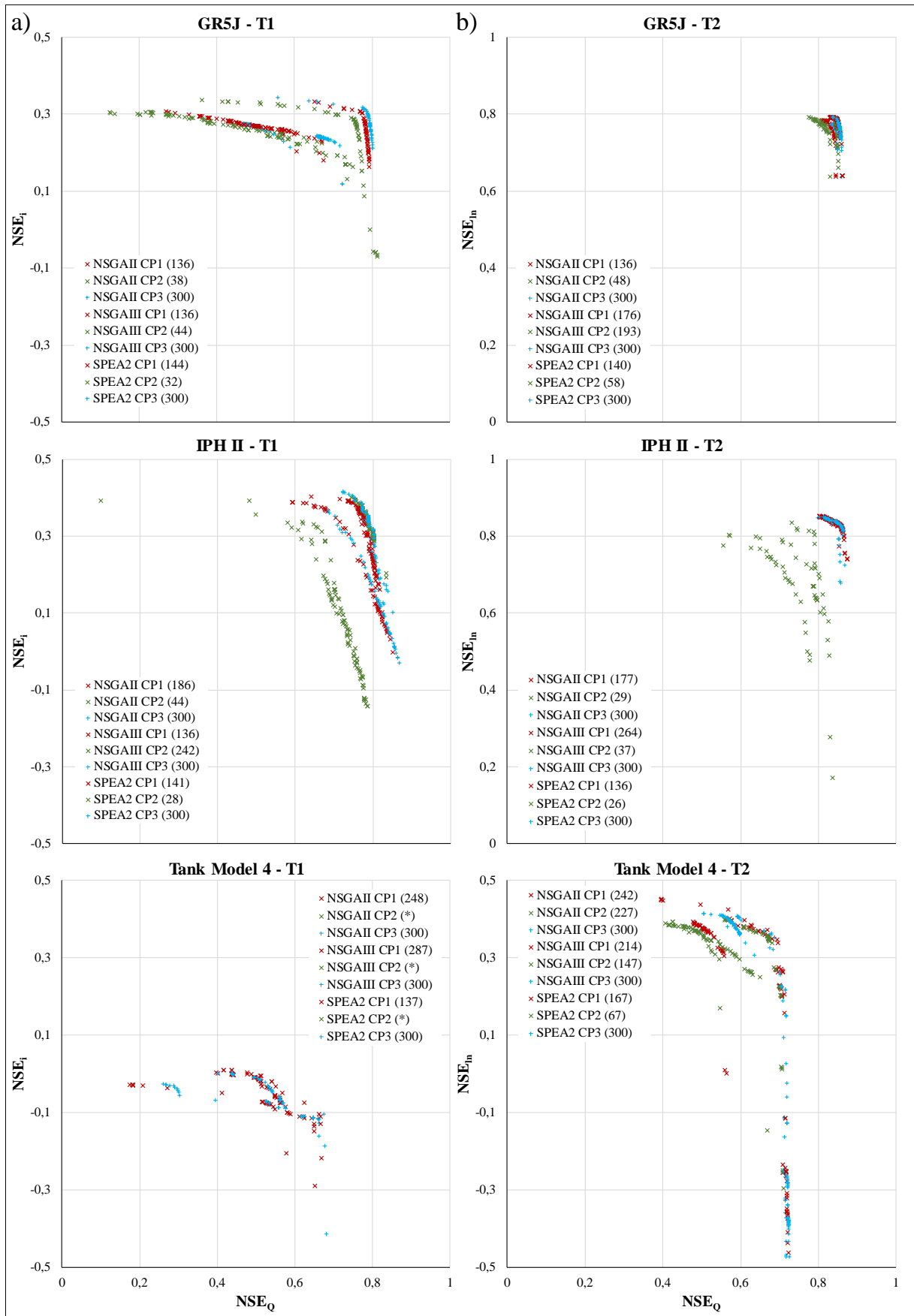
Figura 53 – FP problema de calibração teste T1 para o modelo TankModel 4, após 300 gerações



6.3.2 Métricas de desempenho dos MOEA's

As tentativas que tiveram a FP do critério CP3 mais próxima do ótimo global teórico (1,1), foram apresentadas da Figura 54 a Figura 56, acompanhado da FP obtida com os critérios CP1 e CP2, da respectiva tentativa. As métricas de desempenho MS e SP, das FP mencionadas, estão resumidas na Tabela 5 e Tabela 6, respectivamente. Sobre o critério de parada aplicado (CP1, CP2 e CP3), foram representados os valores de MS e SP como: melhor, intermediário e pior, com a simbologia ▲, — e ▼, respectivamente.

Figura 54 – FP dos critérios de parada na bacia rio Tesouras, para os testes de calibração multi-objetivo a) T1, esquerda e b) T2, direita



(*) a medida GD não convergiu antes das 300 gerações

Figura 55 – FP dos critérios de parada na bacia Santo Ângelo, para os testes de calibração multi-objetivo a) T1, esquerda e b) T2, direita

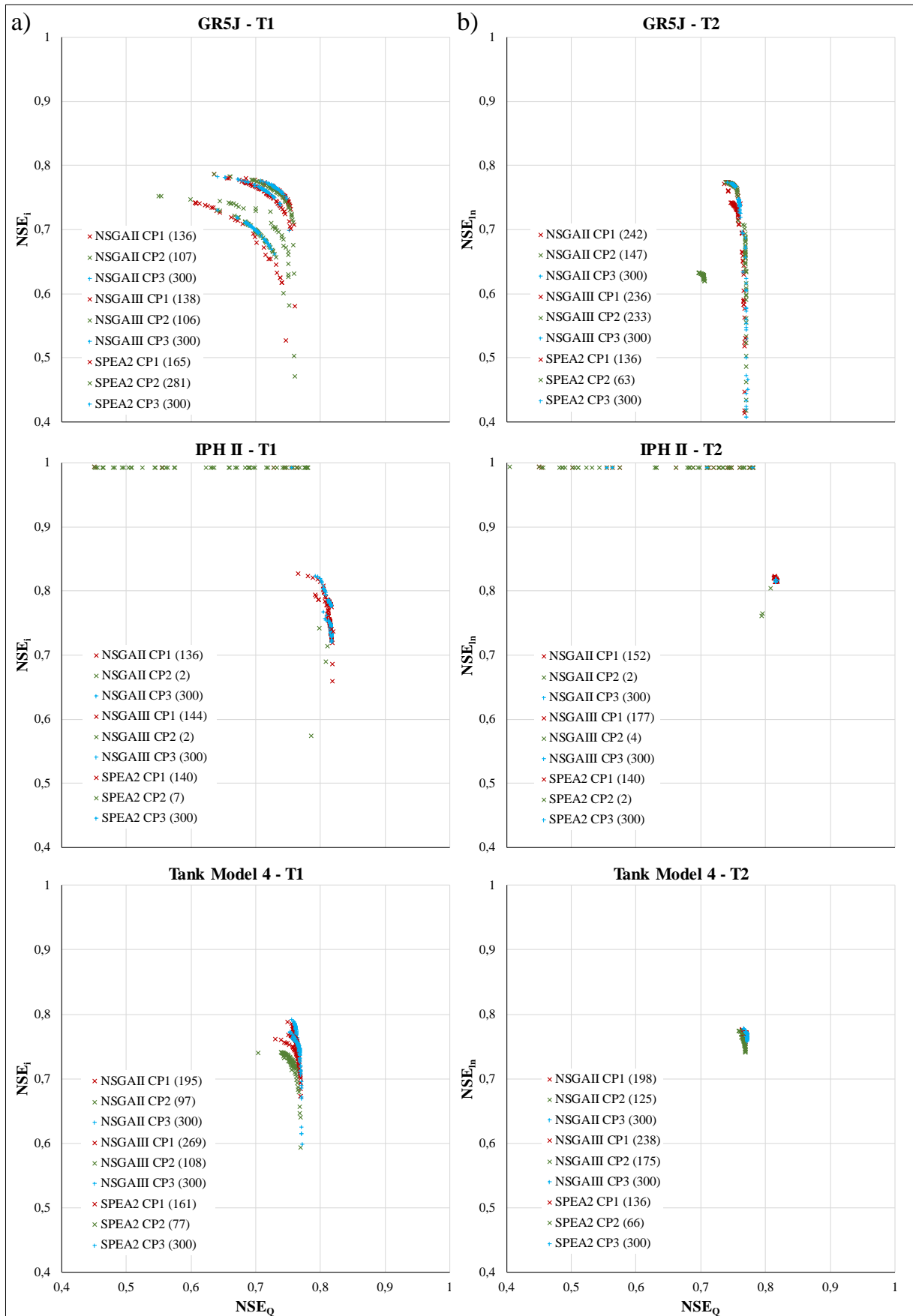
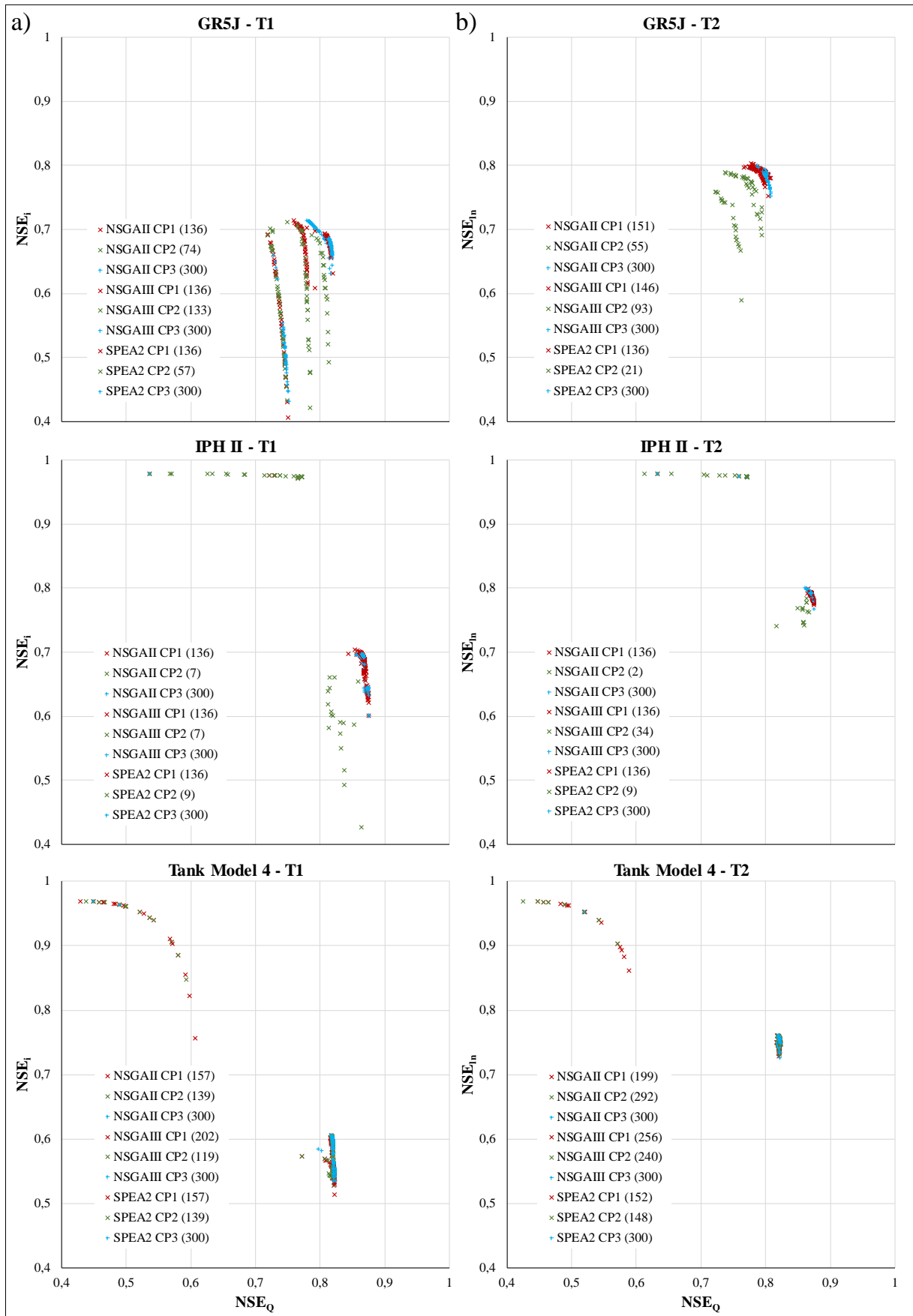


Figura 56 – FP dos critérios de parada na bacia vila Canoas, para os testes de calibração multi-objetivo a) T1, esquerda e b) T2, direita



Aquelas métricas (SP ou MS) que foram maiores a 100, estão representadas como “>100”, também, o critério de parada CP2 não conseguiu atingir a convergência durante as 300 gerações para algumas das aplicações, pelo que não foi gerado um FP, assim como as métricas correspondentes, nestes casos foi colocado o símbolo (*).

Tabela 5 – Métrica de desempenho MS dos MOEA’s, na calibração dos modelos

Bacia	MOEA	Critério	Teste T1 ¹			Teste T2 ²		
			NSGA-II	NSGA-III	SPEA2	NSGA-II	NSGA-III	SPEA2
Rio Tesouras	GR5J	CP1	3,17	3,32	2,89	0,64	0,73	0,57
		CP2	3,04	3,09	2,84	0,67	0,61	0,64
		CP3	3,49	3,40	2,83	0,68	0,62	0,57
	IPH II	CP1	2,52	2,573	2,58	0,29	0,34	0,30
		CP2	2,88	2,525	2,54	0,61	0,87	0,45
		CP3	2,44	2,568	2,67	0,30	0,33	0,31
	Tank Model 4	CP1	4,76	4,734	4,56	2,65	3,05	2,41
		CP2	*	*	*	2,67	3,10	2,79
		CP3	4,74	4,729	5,02	2,62	2,76	2,74
Santo Ângelo	GR5J	CP1	0,89	0,94	0,87	0,91	0,93	1,01
		CP2	0,90	1,05	1,15	1,16	0,93	1,65
		CP3	0,97	1,00	1,20	1,21	0,96	0,99
	IPH II	CP1	0,62	0,69	0,62	0,622	0,57	0,63
		CP2	0,65	0,74	0,65	0,701	0,66	0,71
		CP3	0,62	0,78	0,56	0,623	0,58	0,63
	Tank Model 4	CP1	0,80	0,80	0,791	0,795	0,77	0,789
		CP2	0,82	0,85	0,793	0,804	0,79	0,794
		CP3	0,81	0,95	0,904	0,785	0,90	0,778
Vila Canoas	GR5J	CP1	1,095	1,26	1,01	0,69	0,70	0,69
		CP2	1,102	1,27	1,09	0,98	0,79	0,77
		CP3	1,022	1,35	1,14	0,71	0,71	0,68
	IPH II	CP1	0,41	0,99	0,40	0,414	0,56	0,398
		CP2	0,46	0,50	0,43	0,569	0,43	0,423
		CP3	0,42	1,03	1,10	0,409	0,59	0,401
	Tank Model 4	CP1	0,49	0,50	0,5259	0,466	0,850	0,52
		CP2	0,45	0,54	0,5259	0,846	0,522	0,52
		CP3	1,53	1,76	0,5212	0,843	0,847	0,47

Legenda: (1) Maximização de NSE_Q vs NSE_i ; (2) Maximização de NSE_Q vs NSE_{in} ;
 (*) a medida GD não convergiu antes das 300 gerações, o critério CP2 não gerou um FP;

Tabela 6 – Métrica de desempenho SP dos MOEA's, na calibração dos modelos

Bacia	MOEA	Critério	Teste T1 ¹			Teste T2 ²			
			NSGA-II	NSGA-III	SPEA2	NSGA-II	NSGA-III	SPEA2	
Rio Tesouras	GR5J	CP1							
		CP2							
		CP3							
	IPH II	CP1							
		CP2							
		CP3							
	Tank Model 4	CP1	>100	>100	>100				
		CP2	*	*	*				
		CP3	>100	>100	>100				
	Santo Ângelo	GR5J	CP1	>100		>100			
			CP2						
			CP3						
IPH II		CP1							
		CP2							
		CP3							
Tank Model 4		CP1							
		CP2							
		CP3							
Vila Canoas		GR5J	CP1						
			CP2						
			CP3						
	IPH II	CP1							
		CP2							
		CP3							
	Tank Model 4	CP1	>100			>100			
		CP2							
		CP3							

Legenda: (1) Maximização de NSE_Q vs NSE_i ; (2) Maximização de NSE_Q vs NSE_{in} ;
 (*) a medida GD não convergiu antes das 300 gerações, o critério CP2 não gerou um FP;

As estatísticas das métricas MS e SP das FP obtidas com cada critério de parada, aplicadas na calibração multi-objetivo dos modelos hidrológicos com os MOEA, foram apresentadas em diagramas box-plot, na Figura 57, em cada bacia para cada teste.

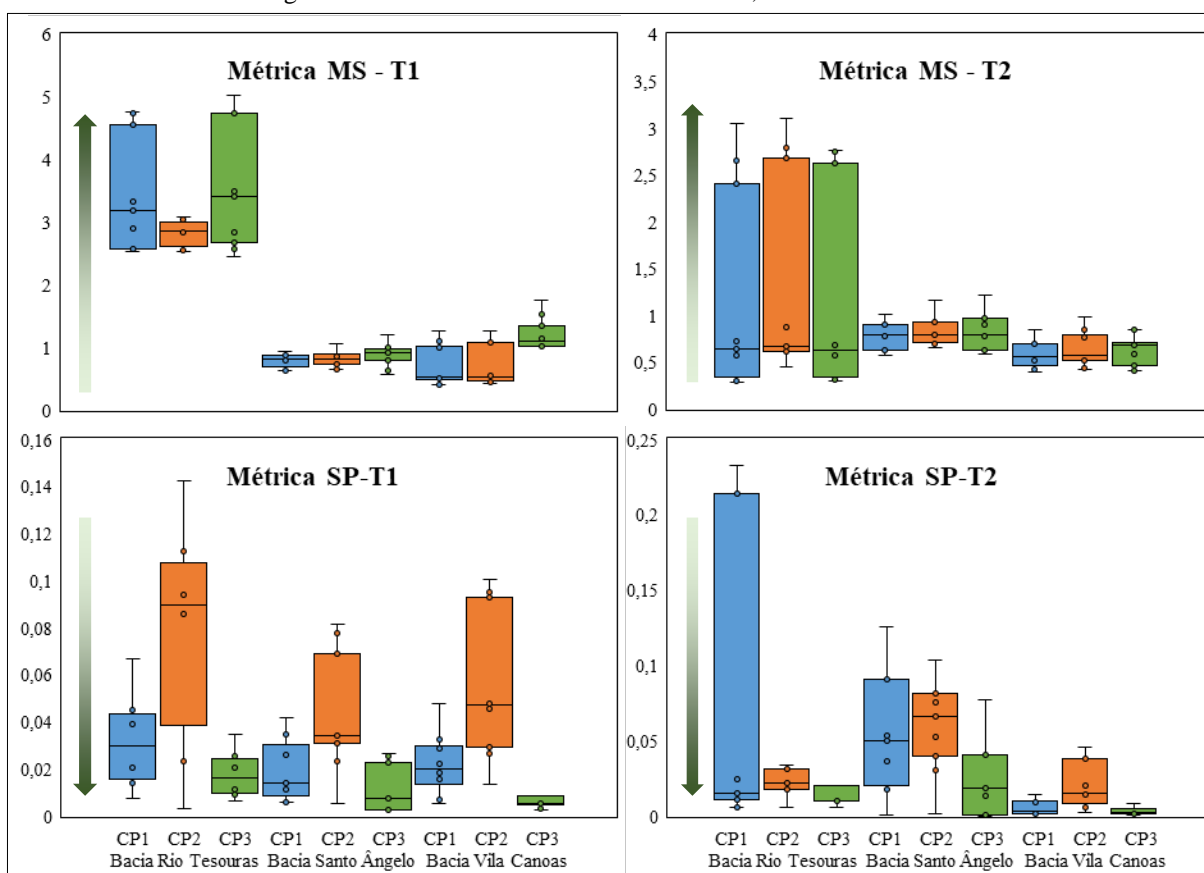
Em geral os valores das métricas MS no teste T1 tendem a ser maiores aos valores observados no teste T2, assim como, os valores das métricas SP no teste T1, tendem a ser menores aos valores observados no teste T2. Indicando que as soluções das FP obtidas no teste T1 tem uma melhor diversidade em comparação com o teste T2.

Com relação aos valores da métrica MS, das FP obtidas com o critério CP3, o valor tende a ser o maior comparado com os valores da métrica MS, das FP obtidas com os critérios

CP1 e CP3. Corroborado pelos valores da métrica SP, obtidas com o critério CP3, que tenderam a ser menores, respeito aos valores obtidos com os outros critérios, na maioria dos casos. Indicando que as soluções das FP obtidas com o critério CP3, possuem uma distribuição melhor que os outros critérios.

Sobre a métrica SP, das FP obtida com o critério CP2, na maioria dos casos apresentam maiores valores, comparado aos outros critérios, indicando que as soluções das FP têm uma diversidade inferior. Sendo mais visível no teste T1.

Figura 57 – Estatísticas das métricas MS e SP, nos FP analisados



Legenda: a seta verde indica o sentido em que a métrica melhora;

T1 é o teste de maximização de NSE_Q vs NSE_i ; T2 é o teste maximização de NSE_Q vs NSE_{in}

Finalmente, a diversidade de soluções das FP dos critérios de parada, em ordem de melhor a pior, seriam: CP3, CP1 e CP2.

6.3.3 Series de vazões calculadas a partir da Calibração Multi-Objetivo

Este item tem como objetivo apresentar a performance das series calculadas de vazões utilizando o conjunto de parâmetros da tentativa que gerou a Frente de Pareto obtida com o critério CP3, mais próxima dos ótimos globais teóricos (1,1) de ambas funções objetivo, na

calibração multi-objetivo. Os MOEA's que geraram estas frentes (mostradas da Figura 58 a Legenda: CP da vazão observada (linha azul); CP das vazões calculadas com os parâmetros das soluções não dominadas do FP (linhas cinzas); Sub-gráfico dos valores normalizados dos parâmetros do modelo GR5J (linhas pretas)

Figura 60), na calibração de cada modelo hidrológico e cada bacia estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – MOEAs que geraram a FP mais próxima do ótimo global

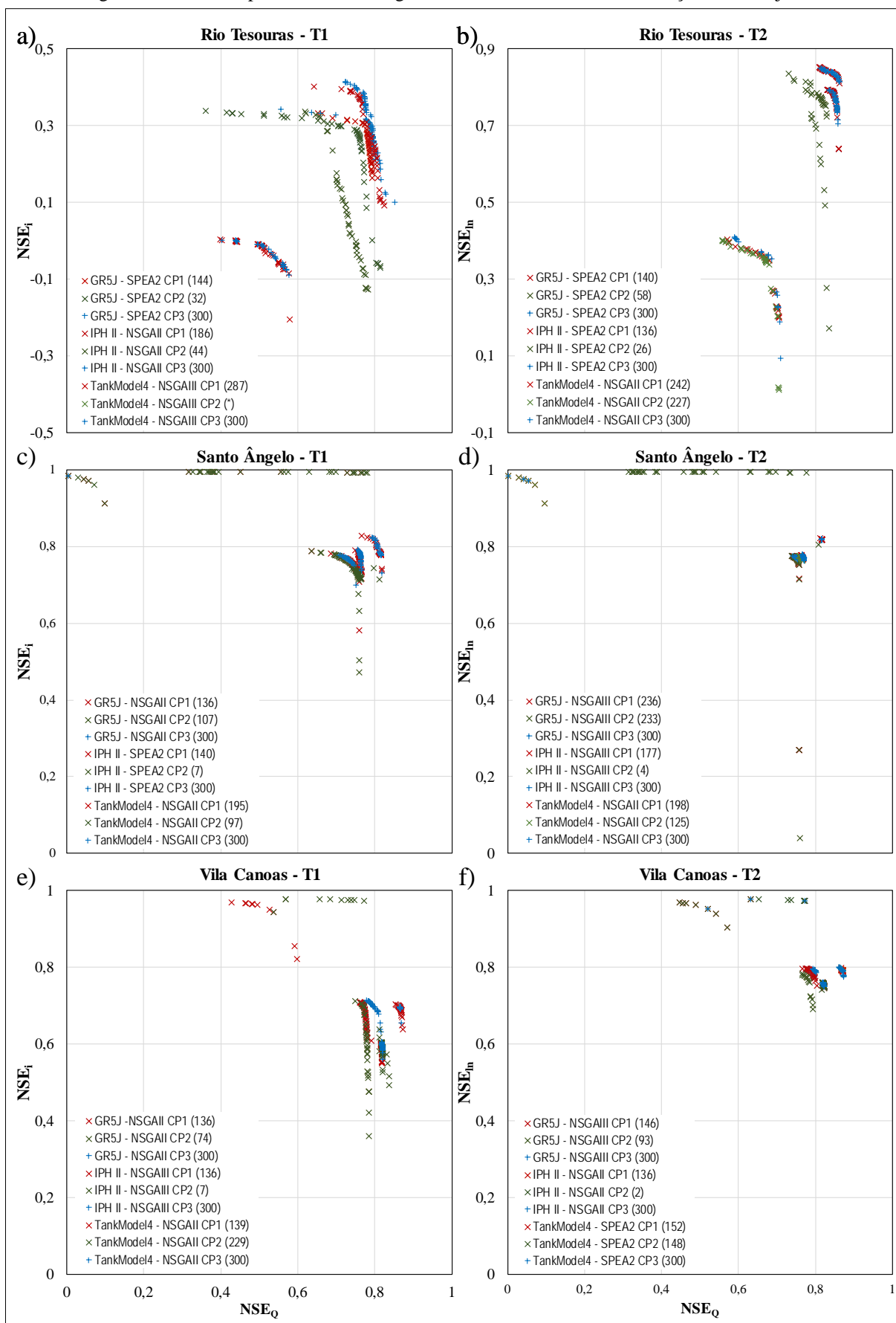
Bacia	Modelo	Teste T1 ¹	Teste T2 ²
Rio Tesouras	GR5J	SPEA2	SPEA2
	IPH II	NSGA II	SPEA2
	Tank Model 4	NSGA III	NSGA II
Santo Ângelo	GR5J	NSGA II	NSGA III
	IPH II	SPEA2	NSGA III
	Tank Model 4	NSGA II	NSGA II
Vila Canoas	GR5J	NSGA II	NSGA III
	IPH II	NSGA III	NSGA II
	Tank Model 4	NSGA II	SPEA2

Legenda: ⁽¹⁾ Maximização de NSE_Q vs NSE_i ;

⁽²⁾ Maximização de NSE_Q vs NSE_{in}

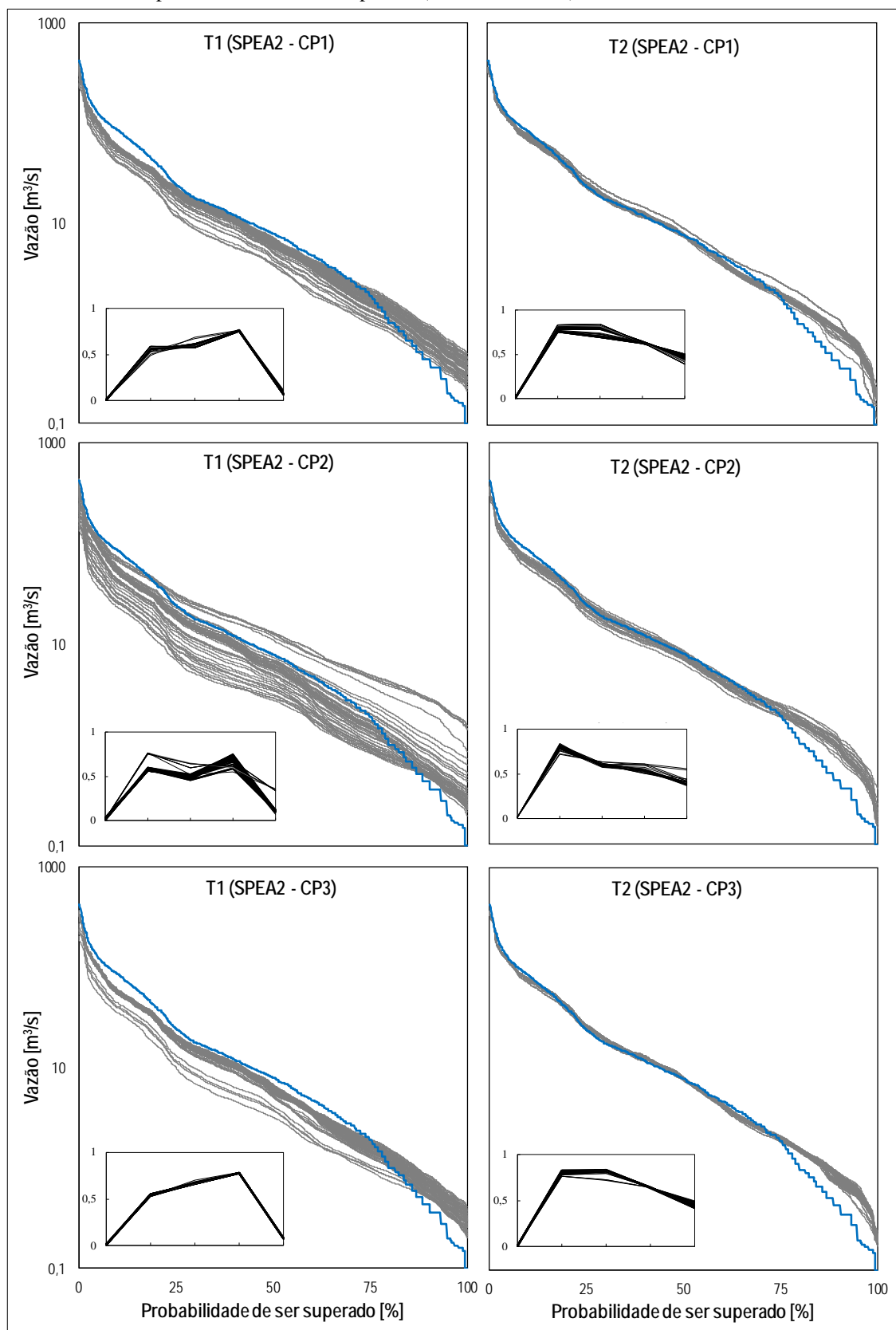
As Curvas de Permanência (CP) das vazões calculadas com as soluções obtidas nas FP, acompanhadas do gráfico normalizado dos parâmetros obtidos da calibração multi-objetivo, foram apresentados da Figura 59 a Figura 61.

Figura 58 – FP mais próxima do ótimo global, obtidas nos testes de calibração multi-objetivo



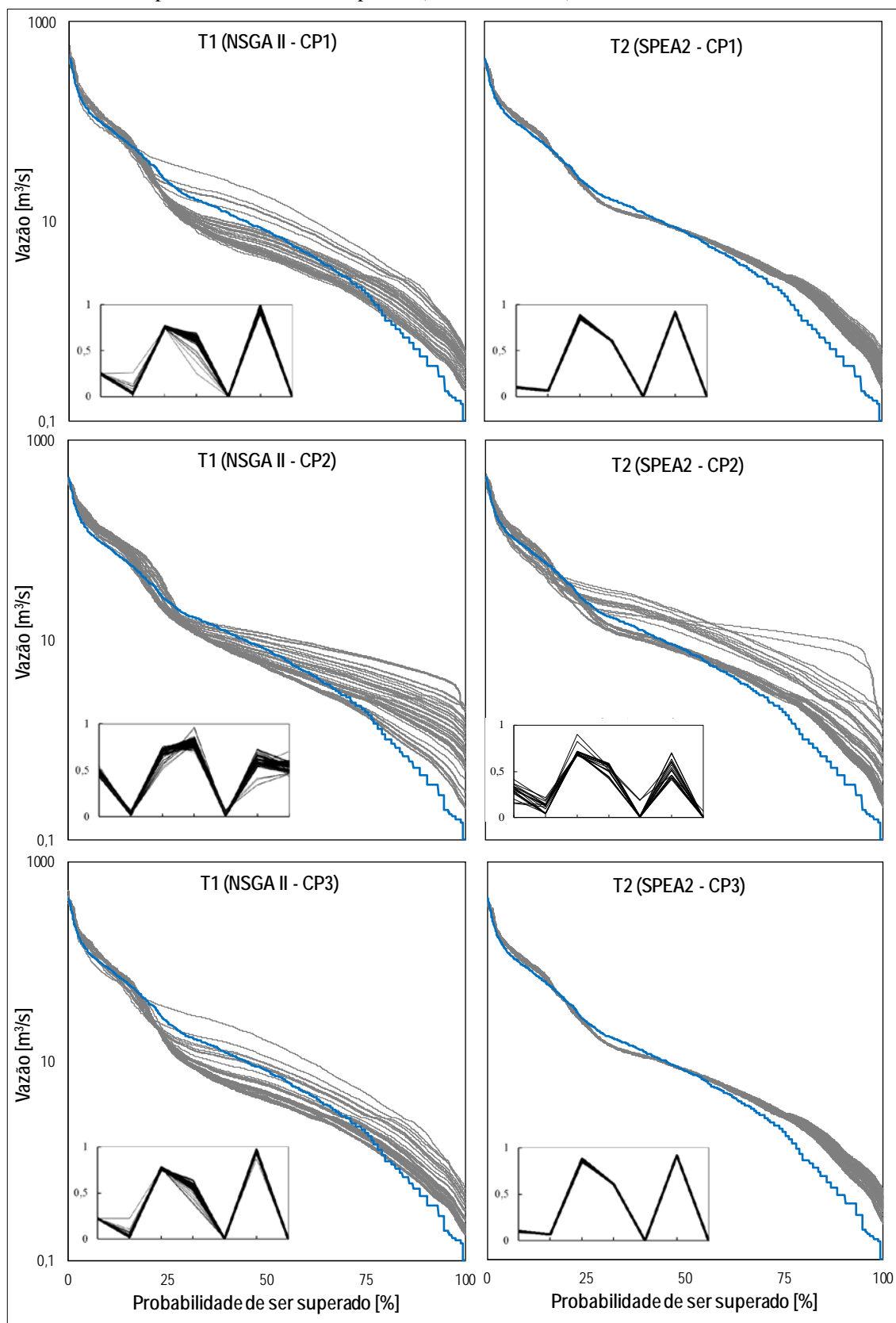
Legenda: a geração em que terminou o critério está entre parêntesis

Figura 59 – Curva de Permanência (CP) dos testes de calibração Multi-Objetivo, T1 e T2, do modelo GR5J, aplicando os critérios de parada (CP1, CP2 e CP3), na bacia rio Tesouras



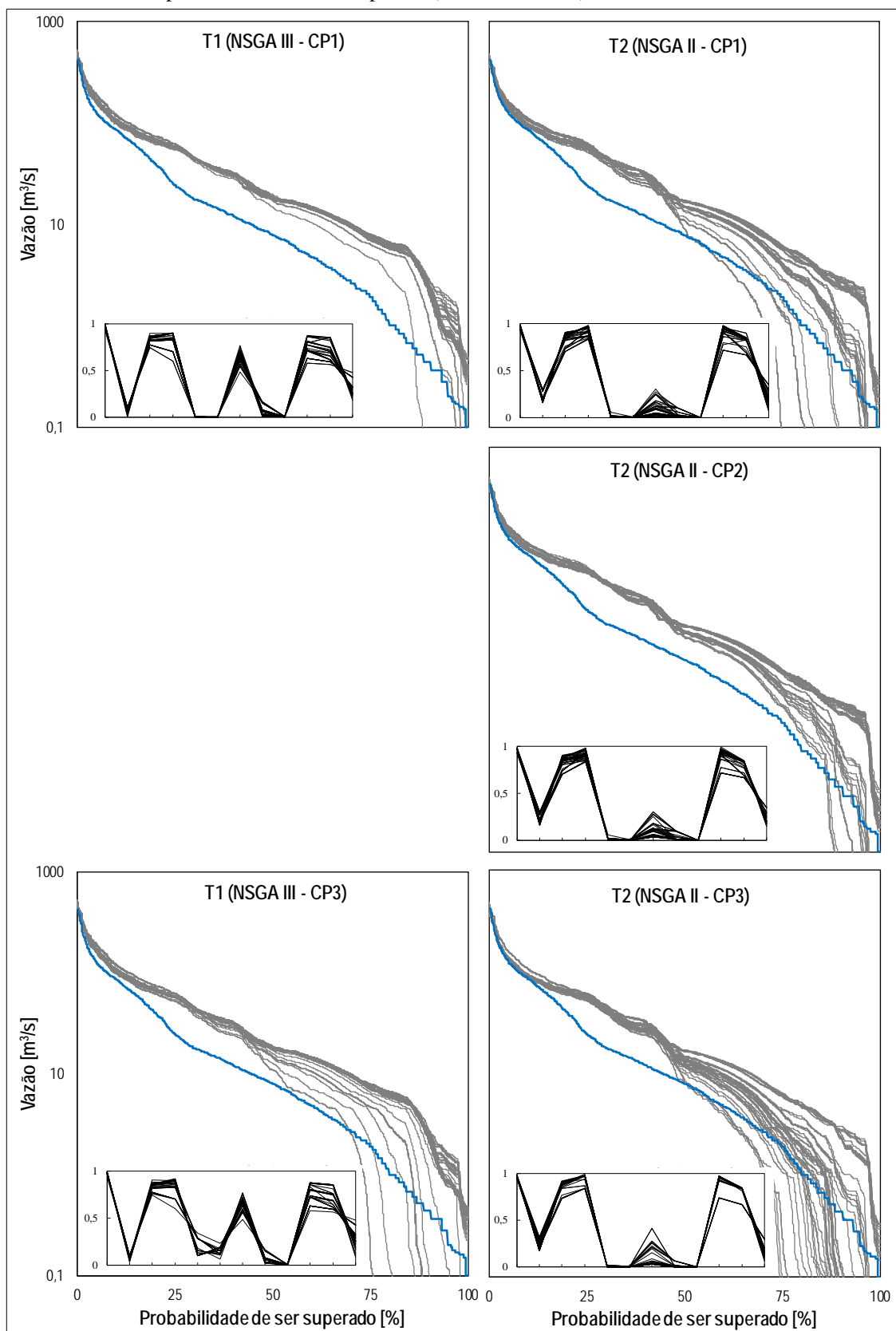
Legenda: CP da vazão observada (linha azul); CP das vazões calculadas com os parâmetros das soluções não dominadas do FP (linhas cinzas); Sub-gráfico dos valores normalizados dos parâmetros do modelo GR5J (linhas pretas)

Figura 60 – Curva de Permanência (CP) dos testes de calibração Multi-Objetivo, T1 e T2, do modelo IPH II, aplicando os critérios de parada (CP1, CP2 e CP3), na bacia rio Tesouras



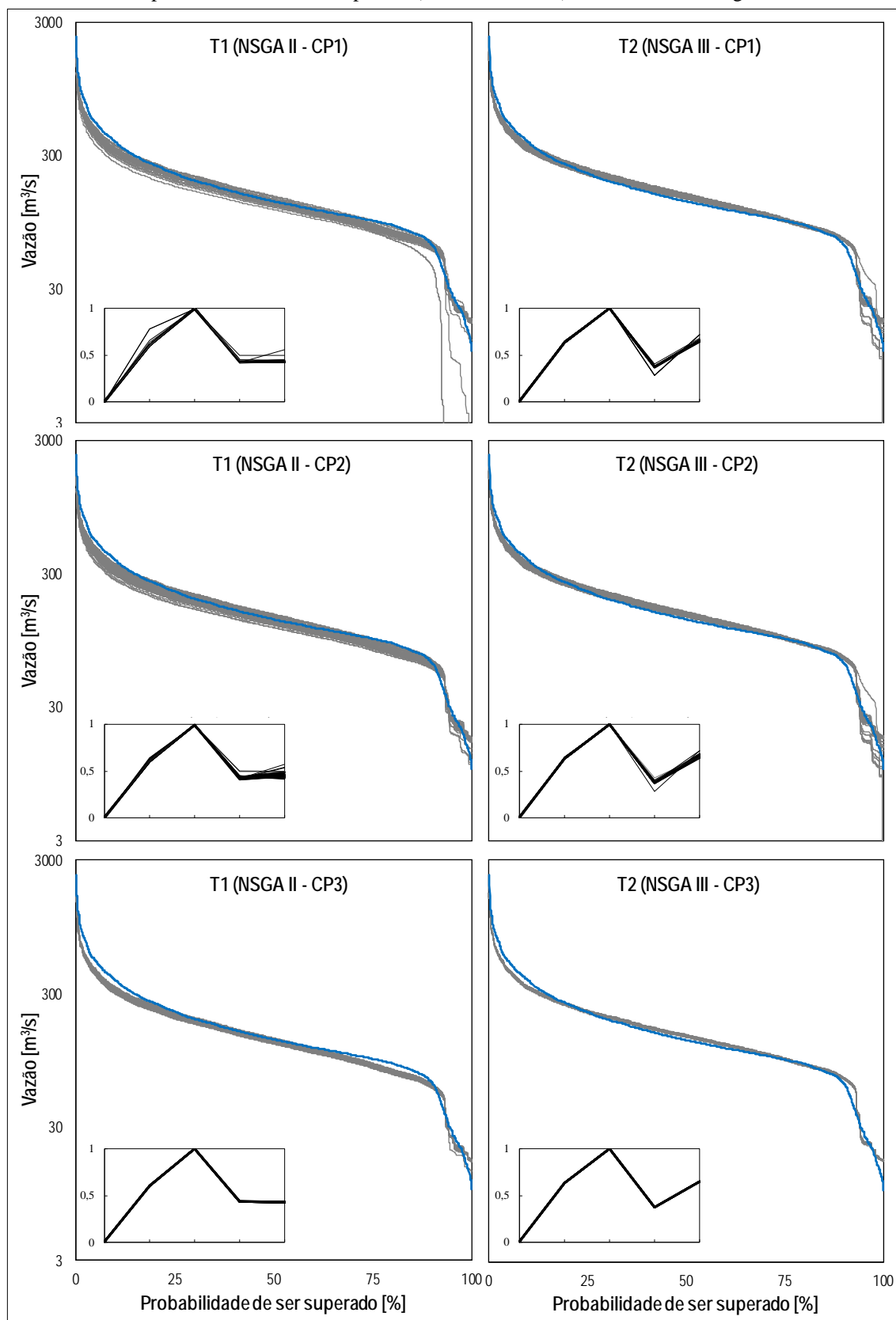
Legenda: CP da vazão observada (linha azul); CP das vazões calculadas com os parâmetros das soluções não dominadas do FP (linhas cinzas); Sub-gráfico dos valores normalizados dos parâmetros do modelo IPH II (linhas pretas)

Figura 61 – Curva de Permanência (CP) dos testes de calibração Multi-Objetivo, T1 e T2, do modelo TankModel 4, aplicando os critérios de parada (CP1, CP2 e CP3), na bacia rio Tesouras



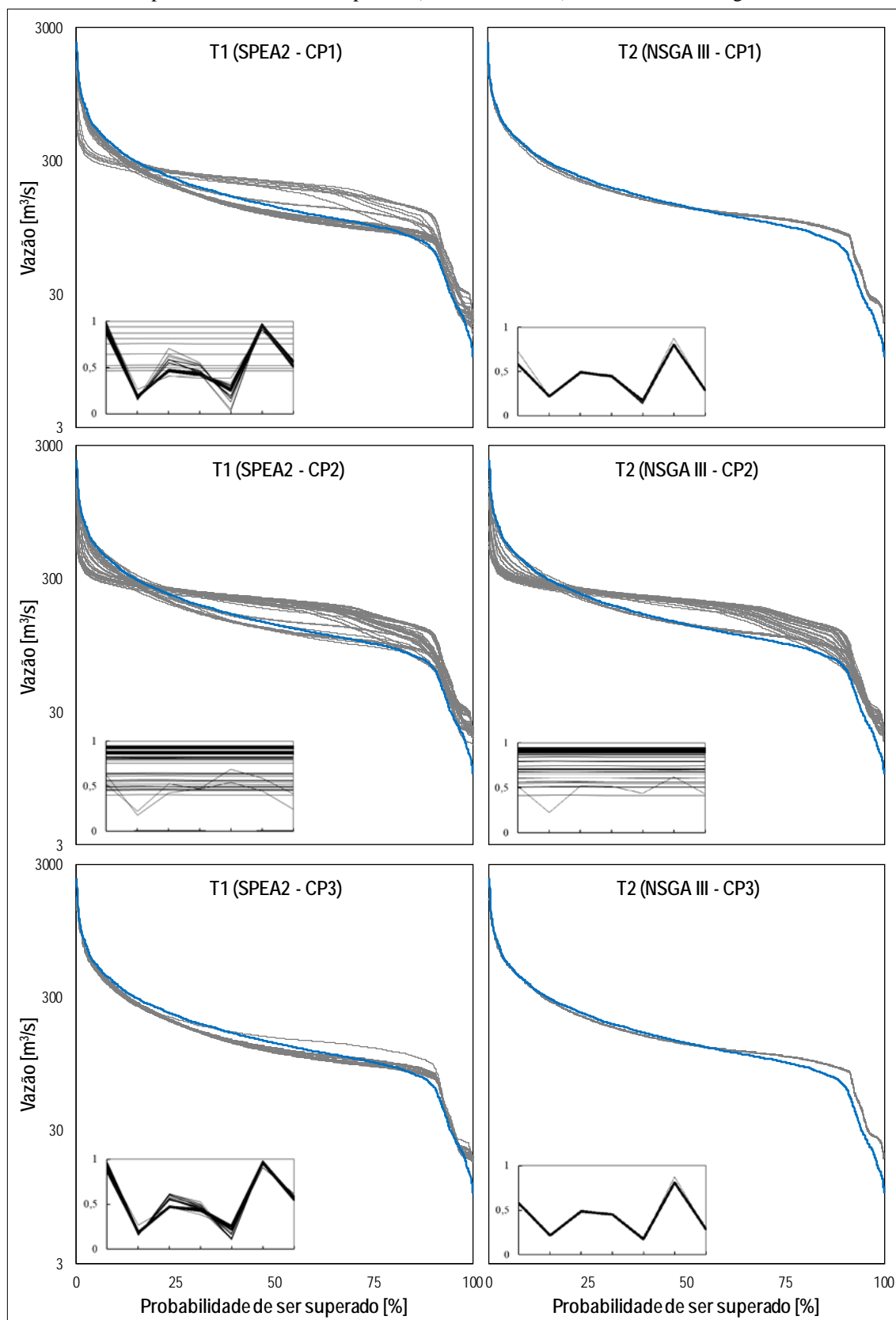
Legenda: CP da vazão observada (linha azul); CP das vazões calculadas com os parâmetros das soluções não dominadas do FP (linhas cinzas); Sub-gráfico dos valores normalizados dos parâmetros do modelo TankModel 4 (linhas pretas); (*) não existe CP pelo critério CP2 no teste T1, por não existir FP correspondente

Figura 62 – Curva de Permanência (CP) dos testes de calibração Multi-Objetivo, T1 e T2, do modelo GR5J, aplicando os critérios de parada (CP1, CP2 e CP3), na bacia Santo Ângelo



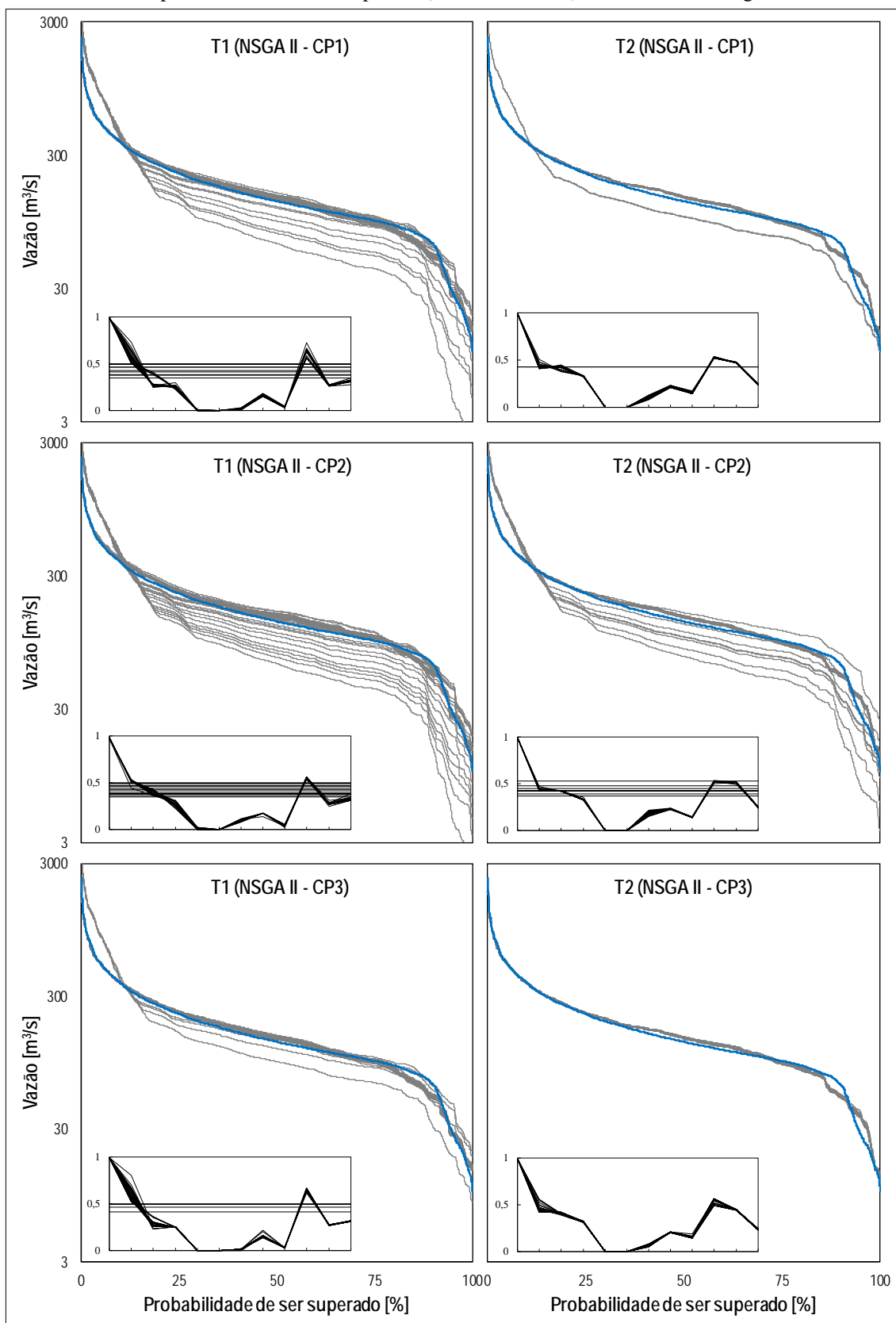
Legenda: CP da vazão observada (linha azul); CP das vazões calculadas com os parâmetros das soluções não dominadas do FP (linhas cinzas); Sub-gráfico dos valores normalizados dos parâmetros do modelo GR5J (linhas pretas)

Figura 63 – Curva de Permanência (CP) dos testes de calibração Multi-Objetivo, T1 e T2, do modelo IPH II, aplicando os critérios de parada (CP1, CP2 e CP3), na bacia Santo Ângelo



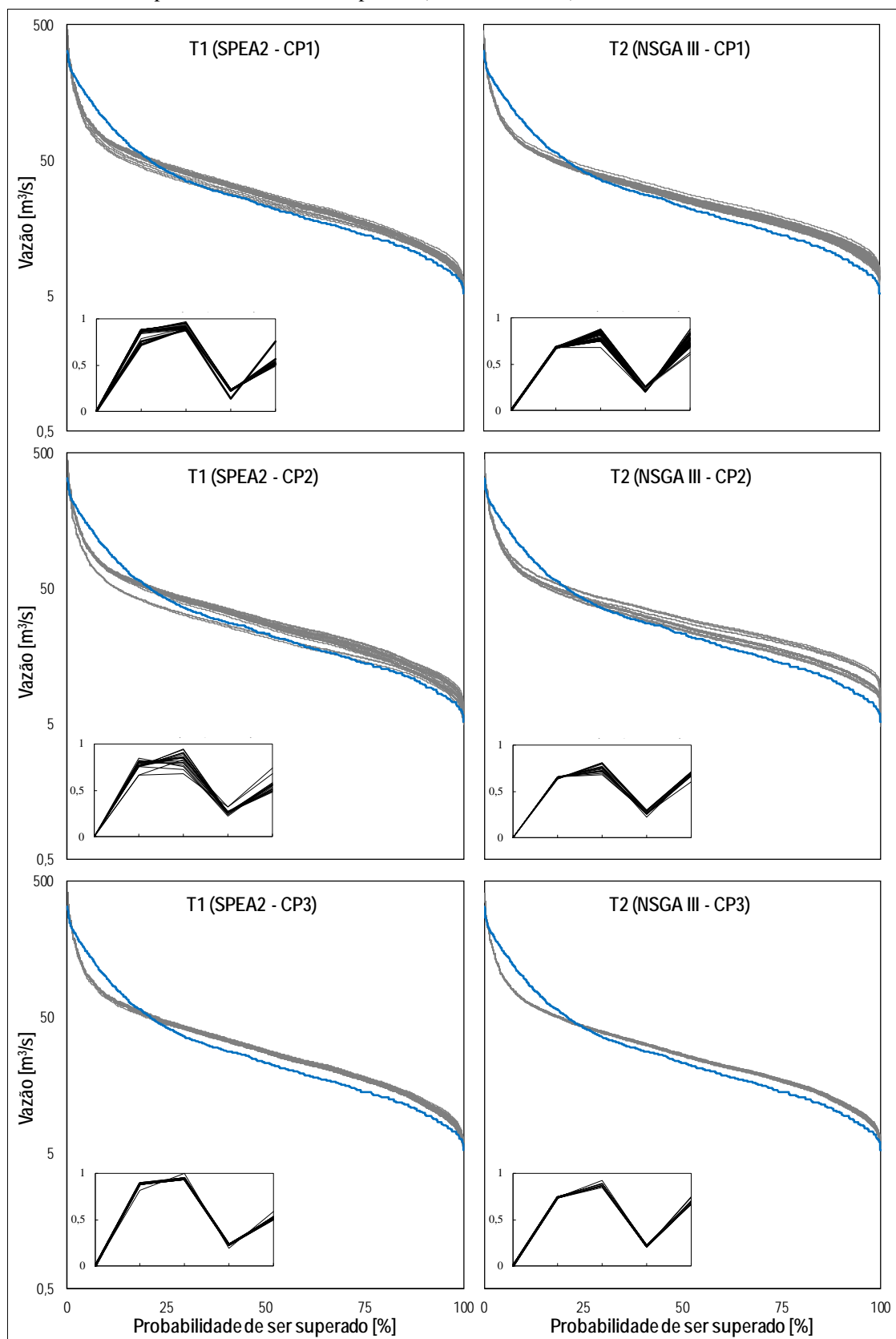
Legenda: CP da vazão observada (linha azul); CP das vazões calculadas com os parâmetros das soluções não dominadas do FP (linhas cinzas); Sub-gráfico dos valores normalizados dos parâmetros do modelo IPH II (linhas pretas)

Figura 64 – Curva de Permanência (CP) dos testes de calibração Multi-Objetivo, T1 e T2, do modelo TankModel 4, aplicando os critérios de parada (CP1, CP2 e CP3), na bacia Santo Ângelo



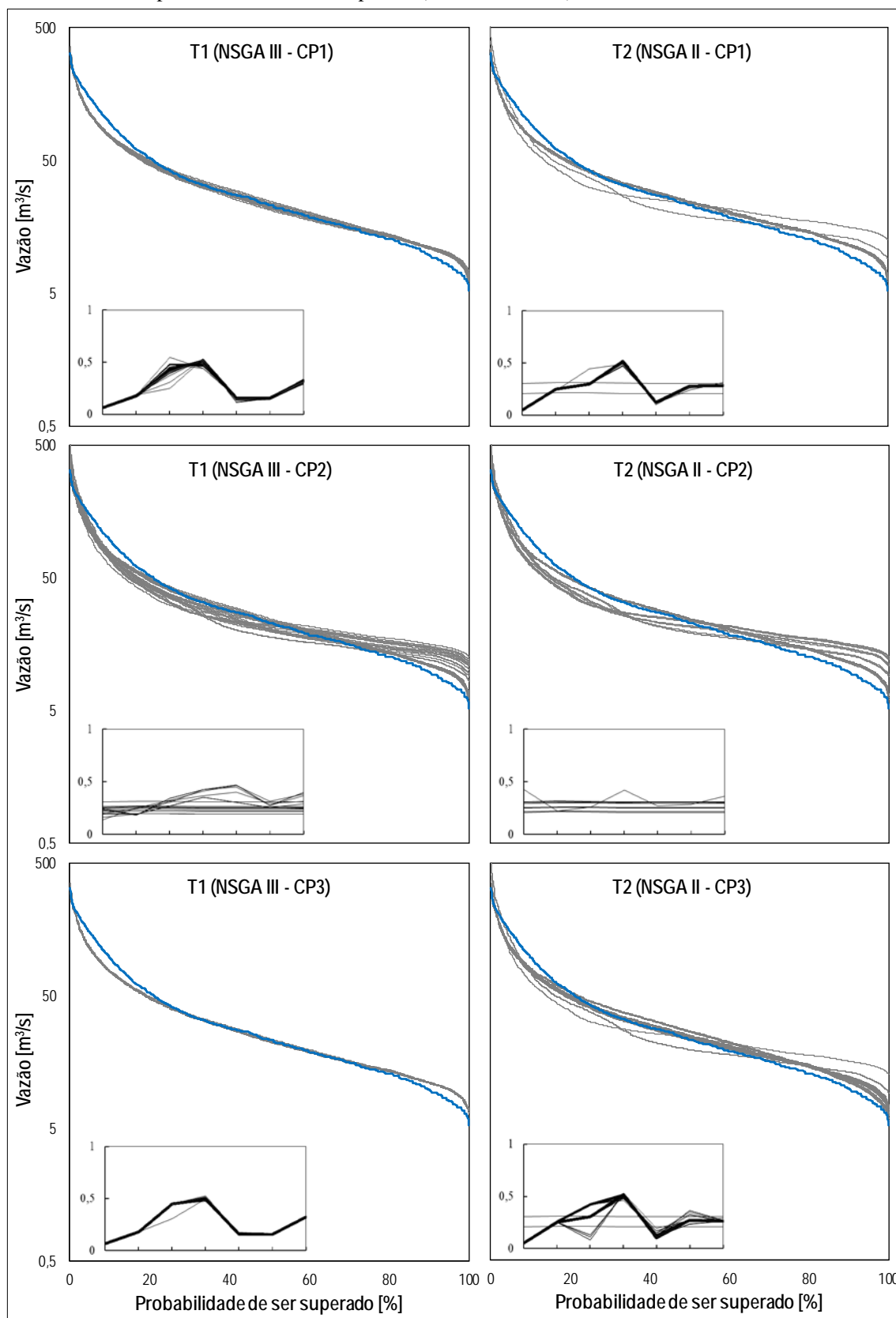
Legenda: CP da vazão observada (linha azul); CP das vazões calculadas com os parâmetros das soluções não dominadas do FP (linhas cinzas); Sub-gráfico dos valores normalizados dos parâmetros do modelo TankModel 4 (linhas pretas)

Figura 65 – Curva de Permanência (CP) dos testes de calibração Multi-Objetivo, T1 e T2, do modelo GR5J, aplicando os critérios de parada (CP1, CP2 e CP3), na bacia Vila Canoas



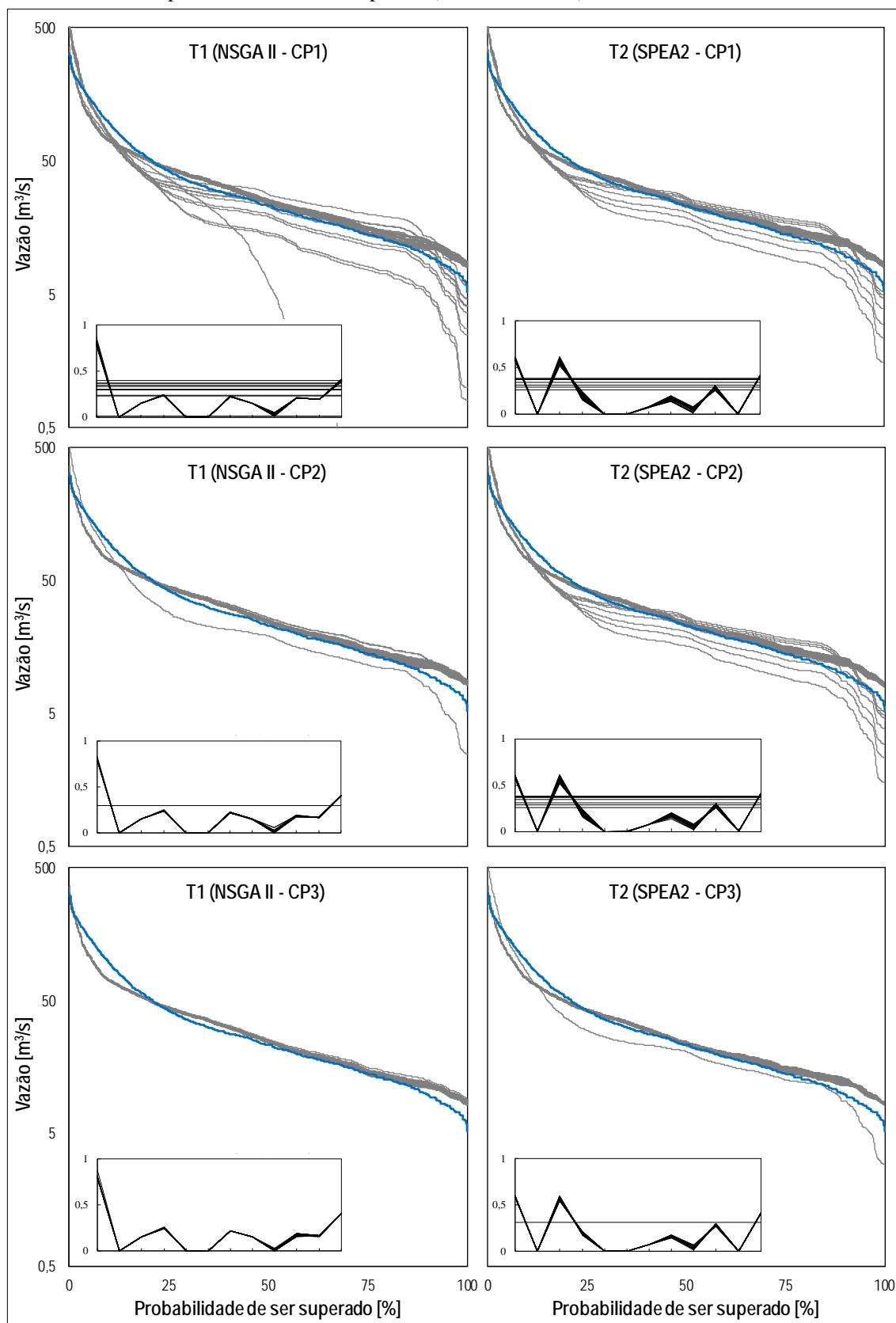
Legenda: CP da vazão observada (linha azul); CP das vazões calculadas com os parâmetros das soluções não dominadas do FP (linhas cinzas); Sub-gráfico dos valores normalizados dos parâmetros do modelo GR5J (linhas pretas)

Figura 66 – Curva de Permanência (CP) dos testes de calibração Multi-Objetivo, T1 e T2, do modelo IPH II, aplicando os critérios de parada (CP1, CP2 e CP3), na bacia Vila Canoas



Legenda: CP da vazão observada (linha azul); CP das vazões calculadas com os parâmetros das soluções não dominadas do FP (linhas cinzas); Sub-gráfico dos valores normalizados dos parâmetros do modelo IPH II (linhas pretas)

Figura 67 – Curva de Permanência (CP) dos testes de calibração Multi-Objetivo, T1 e T2, do modelo TankModel 4, aplicando os critérios de parada (CP1, CP2 e CP3), na bacia Vila Canoas



Legenda: CP da vazão observada (linha azul); CP das vazões calculadas com os parâmetros das soluções não dominadas do FP (linhas cinzas); Sub-gráfico dos valores normalizados dos parâmetros do modelo TankModel 4 (linhas pretas)

As Curva de Permanência (CP) da Figura 59 e Figura 64, que foram geradas com o mesmo algoritmo nos dois testes de calibração multi-objetivo T1 e T2, isto é, SPEA2 e NSGA II, respectivamente. Nos dois casos se pode observar que as curvas se concentram mais numa faixa no caso do teste T2, comparado com o teste T1, onde as curvas são mais dispersas. Este efeito é mais evidente quando foram aplicados os critérios CP1 e CP3. Lembrando que a única diferença nos testes T1 e T2, foi a otimização da função objetivo que era sensível às vazões baixas, estas foram NSE_Q e NSE_{In} , respectivamente. Pelo que este efeito na concentração das curvas de permanência pode estar relacionado com o uso da função NSE para a transformação logarítmica das vazões observadas.

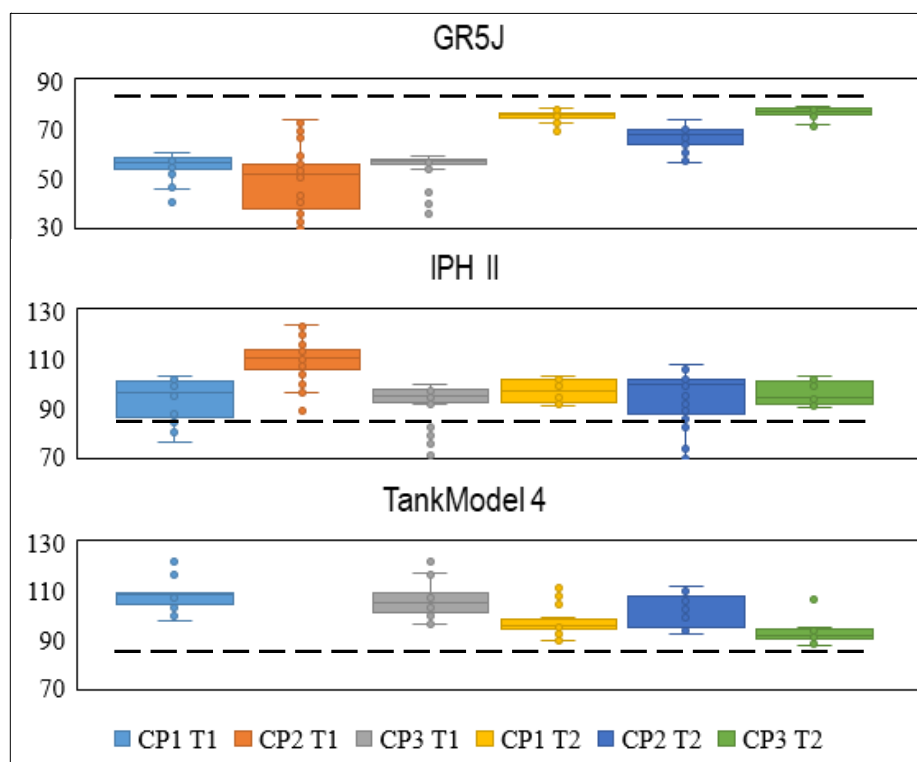
Também tem casos em que as CP dos Testes T1 e T2 que não correspondem ao mesmo algoritmo, apresentaram o comportamento das curvas mencionado anteriormente, por exemplo: na bacia rio Tesouras com o modelo IPH II (Legenda: CP da vazão observada (linha azul); CP das vazões calculadas com os parâmetros das soluções não dominadas do FP (linhas cinzas); Sub-gráfico dos valores normalizados dos parâmetros do modelo GR5J (linhas pretas)

Figura 60), na bacia Santo Ângelo com os modelos GR5J (Figura 62), IPH II (Figura 63), TankModel 4 (Figura 64).

Contrário ao exposto anteriormente, na bacia Vila Canoas com os modelos IPH II (Figura 66), TankModel 4 (Figura 67) as CP dos testes T1 apresentaram-se mais concentradas respeito ao as curvas com o teste T2. Observou-se que a ordem de grandeza das vazões da bacia Vila Canoas é menor que as observadas nas bacias rio Tesouras e Santo Ângelo. Assumindo que as MOEA, embora diferentes, têm um desempenho parecido no processo de otimização, indicaria que a função objetivo NSE da transformação inversa da vazão seria mais sensível às vazões baixas.

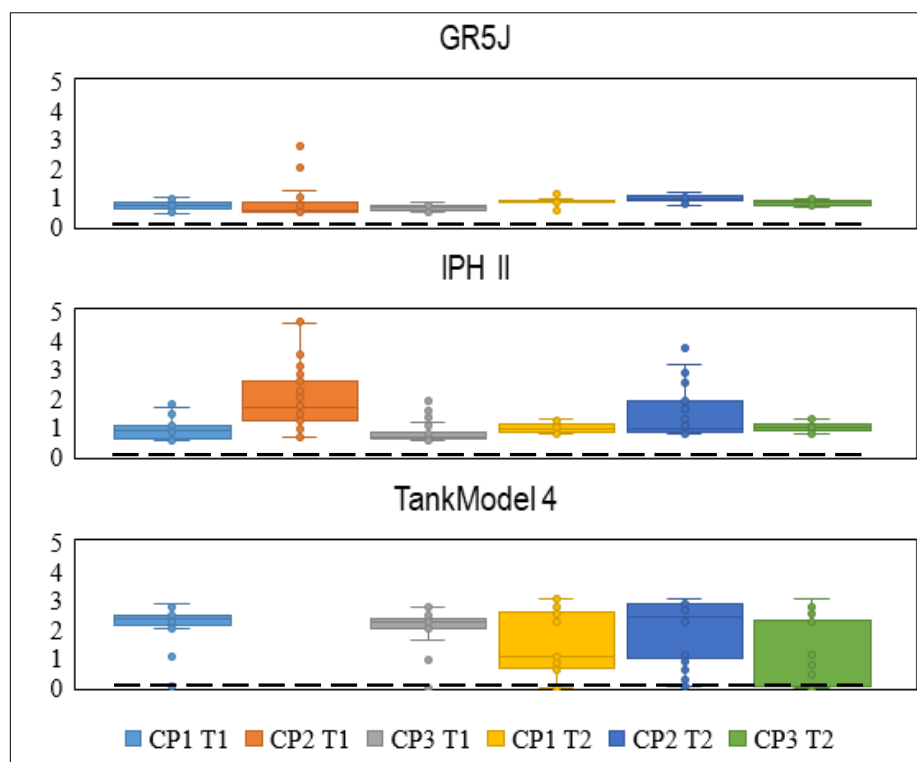
Para os outros casos apresentados nas CP das bacias, não se observou muitas diferenças respeito às configurações das curvas de permanência. Para analisar qual dos modelos representou melhor as vazões altas e baixas nas CP, que foram apresentados da Figura 59 a Figura 67, comparadas com as CP das vazões observadas, foram mostrados a continuação em diagramas box-plot os valores de Q10 e Q90 das series de vazões das CP (da Figura 68 a Figura 73) e os valores das Q10 e Q90 das vazões observadas de cada bacia (em linhas tracejadas pretas).

Figura 68 – Box-Plots das vazões Q10 [m³/s], obtidas com os critérios de parada, para os testes a)T1 e b)T2, na bacia rio Tesouras



Legenda: linha tracejada preta indica a Q10 = 85,4 m³/s, das vazões observadas usadas no período de calibração

Figura 69 – Box-Plots das vazões Q90[m³/s], obtidas com os critérios de parada, para os testes a)T1 e b)T2, na bacia rio Tesouras



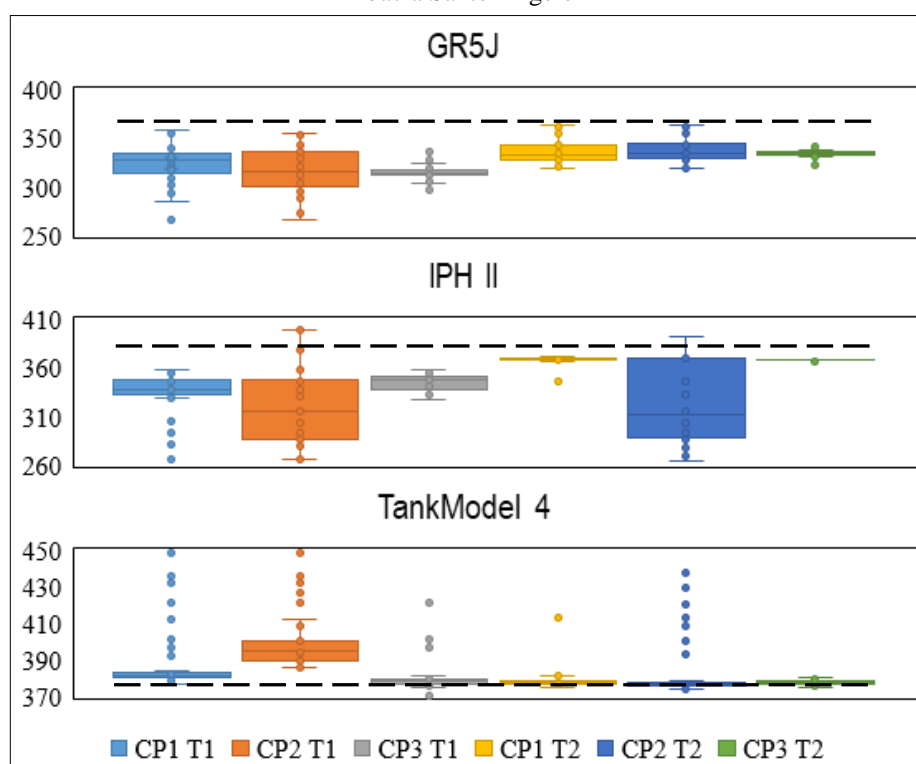
Legenda: linha tracejada preta indica a Q90 = 0,4 m³/s, das vazões observadas usadas no período de calibração

Da Figura 68, as vazões geradas na calibração do modelo GR5J, com todos os critérios de parada, subestimaram a vazão $Q_{10} = 85,4 \text{ m}^3/\text{s}$, da bacia rio Tesouras. Pelo contrário o modelo TankModel 4, superestimou a vazão Q_{10} com todos os critérios de parada. Com tudo, os valores observados nos box-plot do teste T2 com os critérios CP1 e CP3 se mostraram mais próximos da vazão Q_{10} . No caso do modelo IPH II, os limites dos box-plot para os critérios CP1 e CP3 do teste T1 e teste T2, respetivamente, contém a vazão Q_{10} observada.

Sobre a vazão $Q_{90} = 0,4 \text{ m}^3/\text{s}$, da bacia rio Tesouras, na Figura 69, os modelos GR5J e IPH II superestimaram a Q_{90} para todos os critérios de parada, assim como no teste T1 com o modelo TankModel 4. No entanto o modelo GR5J e IPH II, são mais próximos do Q_{90} observado, para os critérios de parada do teste 1. Já os box-plot do modelo TankModel 4 se aproximam mais que os outros modelos, no entanto este modelo apresenta muitos valores nulos de vazão.

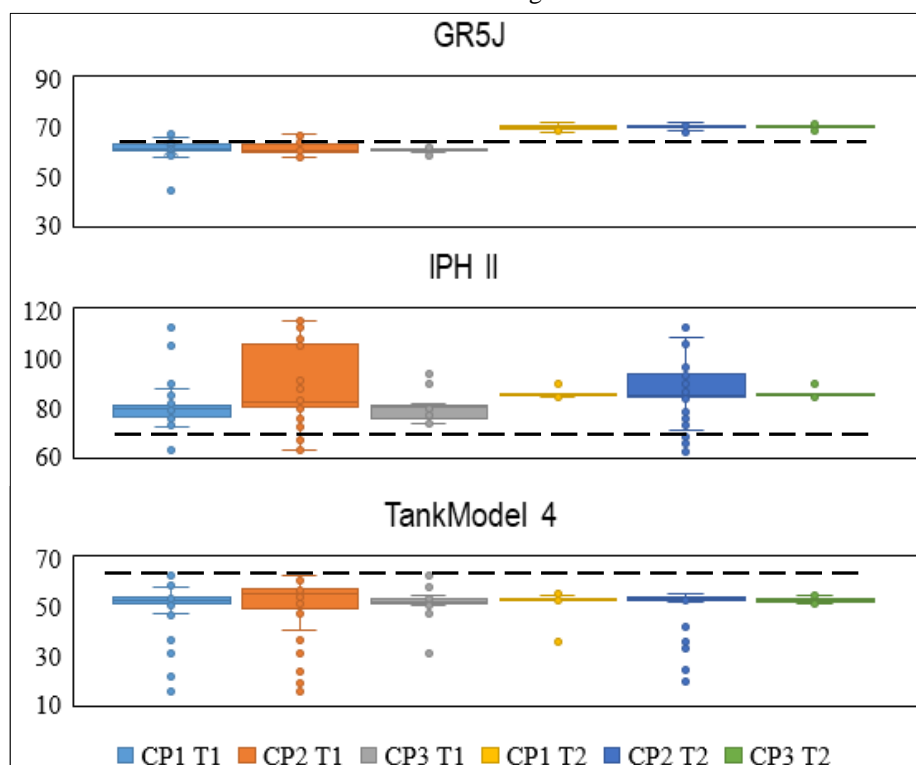
Dos três modelos, em ordem de melhor a pior representação das vazões Q_{90} e Q_{10} na bacia Rio Tesouras, são: o modelo IPH II (no teste T1), GR5J (no teste 2) e o TankModel 4.

Figura 70 – Box-Plots das vazões Q_{10} [m^3/s], obtidas com os critérios de parada, para os testes a)T1 e b)T2, na bacia Santo Ângelo



Legenda: linha tracejada preta indica a $Q_{10} = 377,8 \text{ m}^3/\text{s}$, das vazões observadas usadas no período de calibração

Figura 71 – Box-Plots das vazões Q90 [m³/s], obtidas com os critérios de parada, para os testes a)T1 e b)T2, na bacia Santo Ângelo



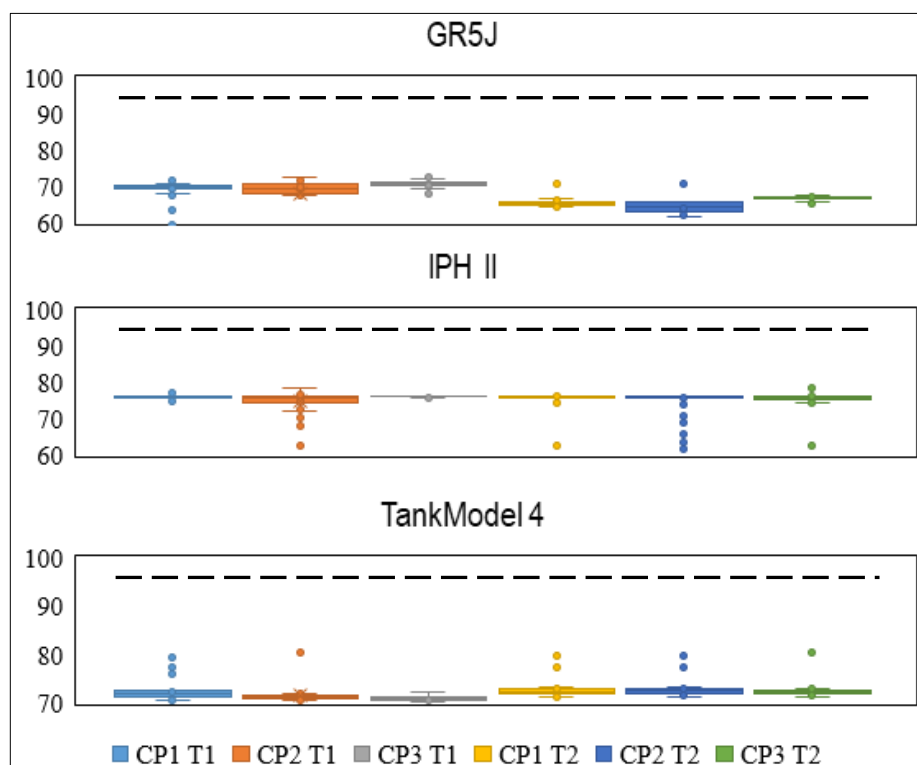
Legenda: linha tracejada preta indica a $Q_{90} = 64,3$ m³/s, das vazões observadas usadas no período de calibração

Da Figura 70, houve uma maior aproximação da vazão $Q_{10} = 377,8$ m³/s, na bacia rio Tesouras, nos box-plot dos testes T2, para todos os modelos, tendo uma maior concentração dos valores para os critérios de parada CP1 e CP3, destacando o IPH II e o TankModel 4.

Sobre a vazão $Q_{90} = 64,3$ m³/s, da bacia rio Tesouras, na Figura 71, o modelo GR5J no teste T1 para todos os critérios de parada, tem os diagramas box-plot mais próximo do Q_{90} . Também o modelo IPH II, embora superestimando, tem os box-plot mais próximos do Q_{90} observado, para os critérios de parada do teste 1. Já os box-plot do modelo TankModel 4 subestimaram a Q_{90} em todos os testes.

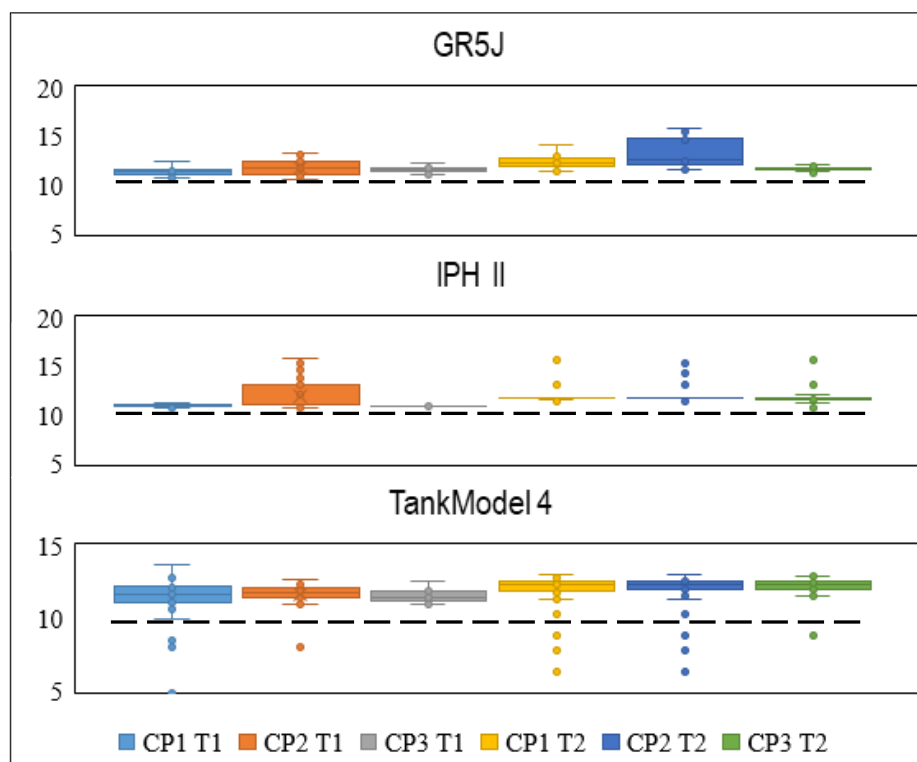
Dos três modelos, em ordem de melhor a pior representação das vazões Q_{90} e Q_{10} na bacia Santo Ângelo, são: o modelo IPH II (no teste T1), GR5J (no teste 1) e o TankModel 4.

Figura 72 – Box-Plots das vazões Q10 [m³/s], obtidas com os critérios de parada, para os testes a)T1 e b)T2, na bacia Vila Canoas



Legenda: linha tracejada preta indica a Q10 = 96,2 m³/s, das vazões observadas usadas no período de calibração

Figura 73 – Box-Plots das vazões Q90 [m³/s], obtidas com os critérios de parada, para os testes a)T1 e b)T2, na bacia Vila Canoas



Legenda: linha tracejada preta indica a Q90 = 9,8 m³/s, das vazões observadas usadas no período de calibração

Da Figura 72, ouve uma subestimativa da vazão $Q_{10} = 96,2 \text{ m}^3/\text{s}$, na bacia rio Tesouras, nos box-plot dos testes T1 e T2, para todos os modelos. Destacando o IPH II (para todos os critérios), e o GR5J no teste T1 e finalmente o TankModel 4.

Sobre a vazão $Q_{90} = 9,8 \text{ m}^3/\text{s}$, da bacia rio Tesouras, na Figura 73, os modelos superestimaram a Q_{90} em todos os casos. Tendo as melhores performances nas box-plot do teste T1, em ordem de melhor a pior, IPH II, GR5J e TankModel 4.

Na ordem de melhor a pior performance das Q_{90} e Q_{10} , se ordenaram: o modelo IPH II (no teste T1), GR5J (no teste 1) e o TankModel 4.

Em termos da representatividade da Q_{90} e Q_{10} das vazões observadas nas três bacias, o modelo IPH II se mostrou o melhor, no geral para os testes T1, seguido do GR5J e finalmente o TankModel 4.

Analisando a performance em termos da FO das series obtidas nos testes de calibração multi-objetivo, para o conjunto de parâmetros da solução com distancia euclidiana mais próxima do ótimo global teórico (1,1), para as FP da Tabela 7, resumidas na Tabela 8. Observou-se que, segundo uma classificação da performance em termos do NSE, feita por [82]:

- Para o teste T1, o modelo GR5J, IPH II e TankModel 4, exibem métricas boas ($>0,65$), ou satisfatórias ($>0,5$), nas bacias Santo Ângelo e vila Canoas. Mas na bacia rio Tesouras, a métrica FO2, não foi satisfatória ($<0,50$) para todos os casos;
- No teste T2, os modelos GR5J, IPH II e TankModel 4, exibem métricas boas ($>0,65$) ou satisfatórias ($>0,5$), nas bacias Santo Ângelo e vila Canoas, independentemente do critério de parada. Mas na bacia rio Tesouras, a métrica NSE_{in} , não foi satisfatória ($<0,50$) para todos os casos do modelo TankModel 4.

Tabela 8 – FO da solução mais próxima do ótimo global

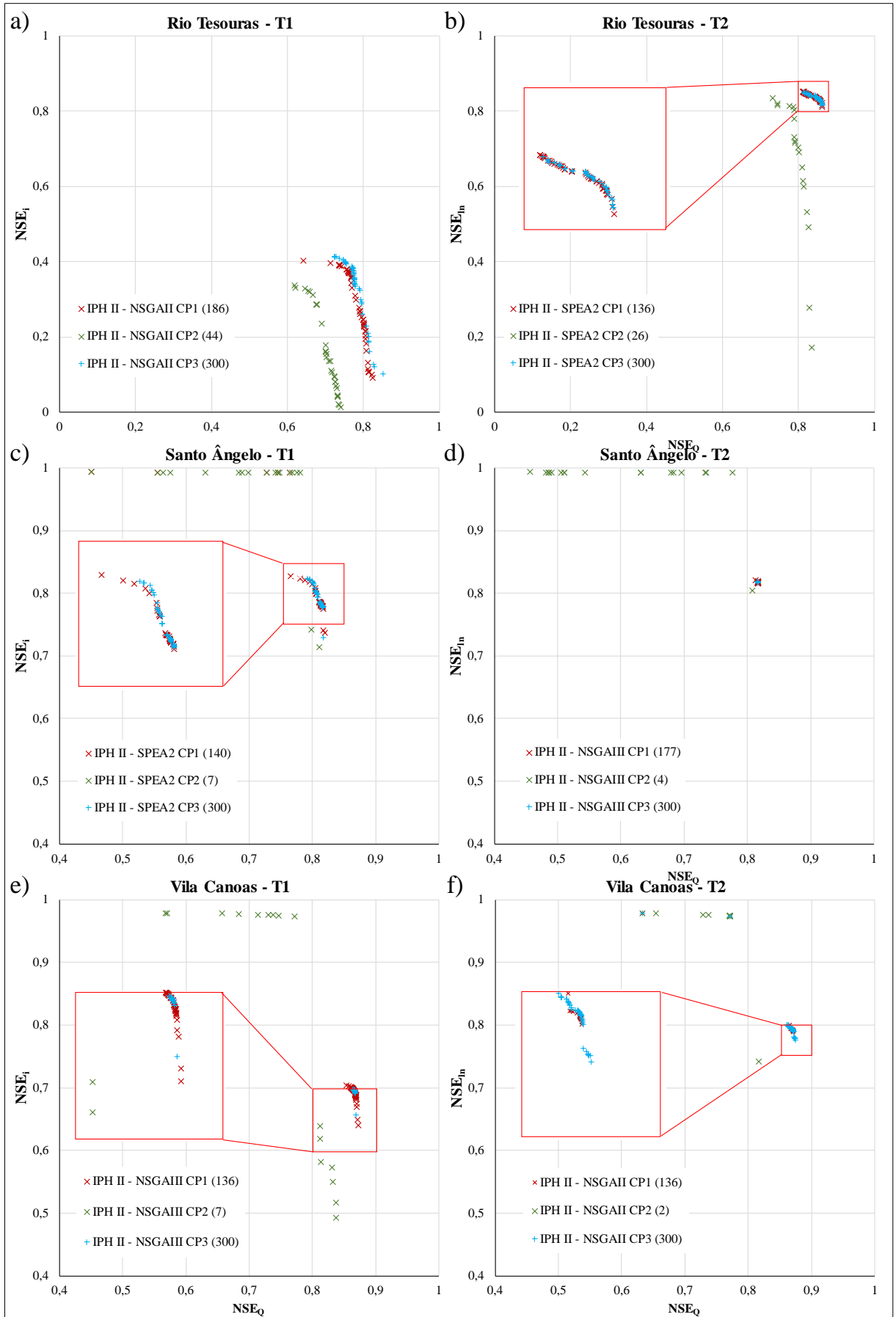
Modelo		GR5J ¹		IPH II ¹		TankModel 4 ¹		GR5J ²		IPH II ²		TankModel 4 ²	
Bacia		NSE _Q	NSE _i	NSE _Q	NSE _i	NSE _Q	NSE _i	NSE _Q	NSE _{in}	NSE _Q	NSE _{in}	NSE _Q	NSE _{in}
Rio Tesouras	CP1	0,769	0,308	0,736	0,391	0,505	-0,011	0,845	0,789	0,855	0,832	0,656	0,368
	CP2	0,754	0,286	0,647	0,329	-	-	0,789	0,804	0,789	0,803	0,667	0,358
	CP3	0,776	0,317	0,737	0,409	0,504	-0,010	0,847	0,788	0,855	0,832	0,678	0,364
Santo Ângelo	CP1	0,745	0,752	0,805	0,802	0,755	0,786	0,752	0,768	0,817	0,819	0,765	0,776
	CP2	0,740	0,753	0,798	0,742	0,751	0,737	0,751	0,770	0,808	0,804	0,762	0,773
	CP3	0,748	0,748	0,805	0,808	0,758	0,789	0,754	0,767	0,816	0,818	0,768	0,777
Vila Canoas	CP1	0,767	0,705	0,861	0,701	0,591	0,854	0,791	0,789	0,870	0,793	0,819	0,759
	CP2	0,766	0,706	0,771	0,973	0,817	0,605	0,780	0,773	0,863	0,784	0,819	0,759
	CP3	0,783	0,712	0,864	0,697	0,818	0,605	0,799	0,792	0,870	0,793	0,820	0,760

Legenda: ⁽¹⁾ teste T1, Maximização de NSE_Q vs NSE_i ; ⁽²⁾ teste T2, Maximização de NSE_Q vs NSE_{In}

Da Tabela 8, entre cada modelo aplicado em cada bacia, o modelo IPH II teve as funções mais próximas do ótimo global (1, 1), para os dois testes. Também é possível observar isto na Figura 74. Observou-se que, segundo uma classificação da performance em termos do NSE, feita por [82]:

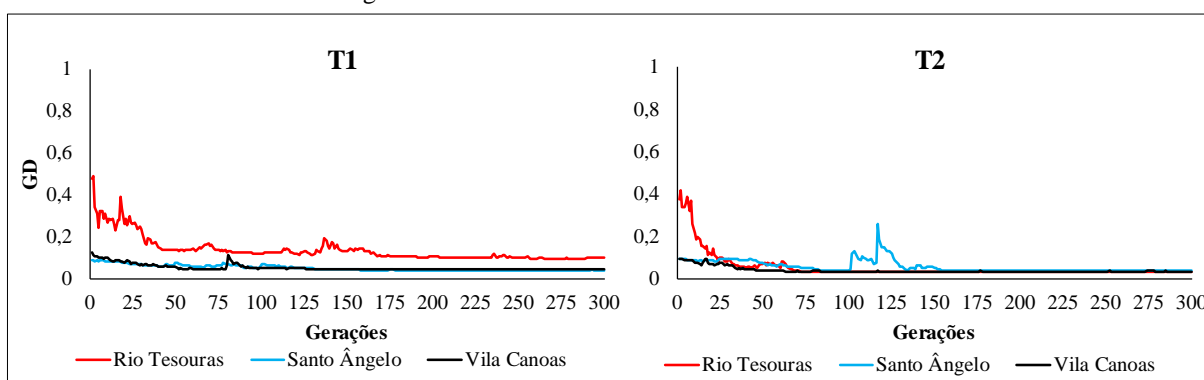
- Na bacia do rio Tesouras, na Figura 74 a, com o algoritmo NSGA II e os três critérios de parada, as soluções apresentaram $NSE_i < 0,5$ (não satisfatórias) embora o $0,6 < NSE_Q$ (bons). Na Figura 74 b com o algoritmo SPEA 2 com os critérios CP1 e CP3, as soluções apresentaram $0,75 < NSE_{In}$ (muito bom) e $0,75 < NSE_Q$ (muito bom);
- Na bacia Santo Ângelo, na Figura 74 c, com o algoritmo SPEA 2 e os critérios CP1 e CP3, as soluções além de apresentar $0,75 < NSE_i$ (muito bom) e $0,75 < NSE_Q$ (muito bom), a FP obtida com o critério CP1 na geração 140 é muito próxima da FP obtida com o critério CP3 após 300 gerações (no quadro vermelho). Também na Figura 74 d, com o algoritmo NSGA III e os critérios CP1 e CP3, as soluções apresentaram $0,75 < NSE_{In}$ (muito bom) e $0,75 < NSE_Q$ (muito bom) e também não houve nenhuma melhora significativa entre as FP;
- Na bacia Vila Canoas, na Figura 74 e, com o algoritmo NSGA III e os critérios de parada, as soluções apresentaram $0,6 < NSE_i < 0,75$ (bons) e o $0,75 < NSE_Q$ (muito bom). Na Figura 74 f, com o algoritmo NSGA II e os critérios CP1 e CP3, as soluções apresentaram $0,75 < NSE_{In}$ (muito bom) e $0,75 < NSE_Q$ (muito bom). Nos dois testes o critério CP1 foi atingido na geração 136 e a FP é muito próximo da FP obtida com o critério CP3, após 300 gerações.

Figura 74 – FP dos MOEAS que tiveram soluções mais próximas do ótimo global com o Modelo IPH II



No geral na Figura 74, em todas as bacias o critério CP2 foi atingido nas primeiras 50 gerações, isto é devido á convergência ($\Delta GD < 0,001$) aconteceu nas primeiras gerações como é observado na Figura 75. Também, aqueles resultados em que o critério CP2 não gerou a FP (Figura 54), é causado por ter $\Delta GD \gg 0,001$ ou $GD \gg 0,4$ para esses casos, como observado na Figura 52. Ainda na Figura 75, o ΔGD foi aproximadamente igual a 0,0002, entre as FP gerados nas gerações em que o critério CP1 foi atingido

Figura 75 – GD dos MOEAS nas bacias de estudo



Finalmente, os hidrogramas de vazões calculadas com os conjuntos de parâmetros que geraram os pontos dos FP da Figura 74 encontra-se no Anexo B. Na bacia rio Tesouras, na Figura B 9 e Figura B 10, o conjunto de parâmetros normalizados apresentados com o critério CP1 é muito próximo dos parâmetros obtidos com o critério CP3 nos dois casos, no entanto os hidrogramas do Teste T2 aparentam representar melhor as vazões baixas comparado com os hidrogramas do teste T1. Isto, também foi observado nos hidrogramas da bacia Santo Ângelo, na Figura B 15 e Figura B 16. No entanto, na bacia vila Canoas, os hidrogramas do Teste 1 com o critério CP1 ou CP3, na Figura B 21, visualmente tem uma melhor performance comparado com os hidrogramas do Teste T2, na Figura B 22.

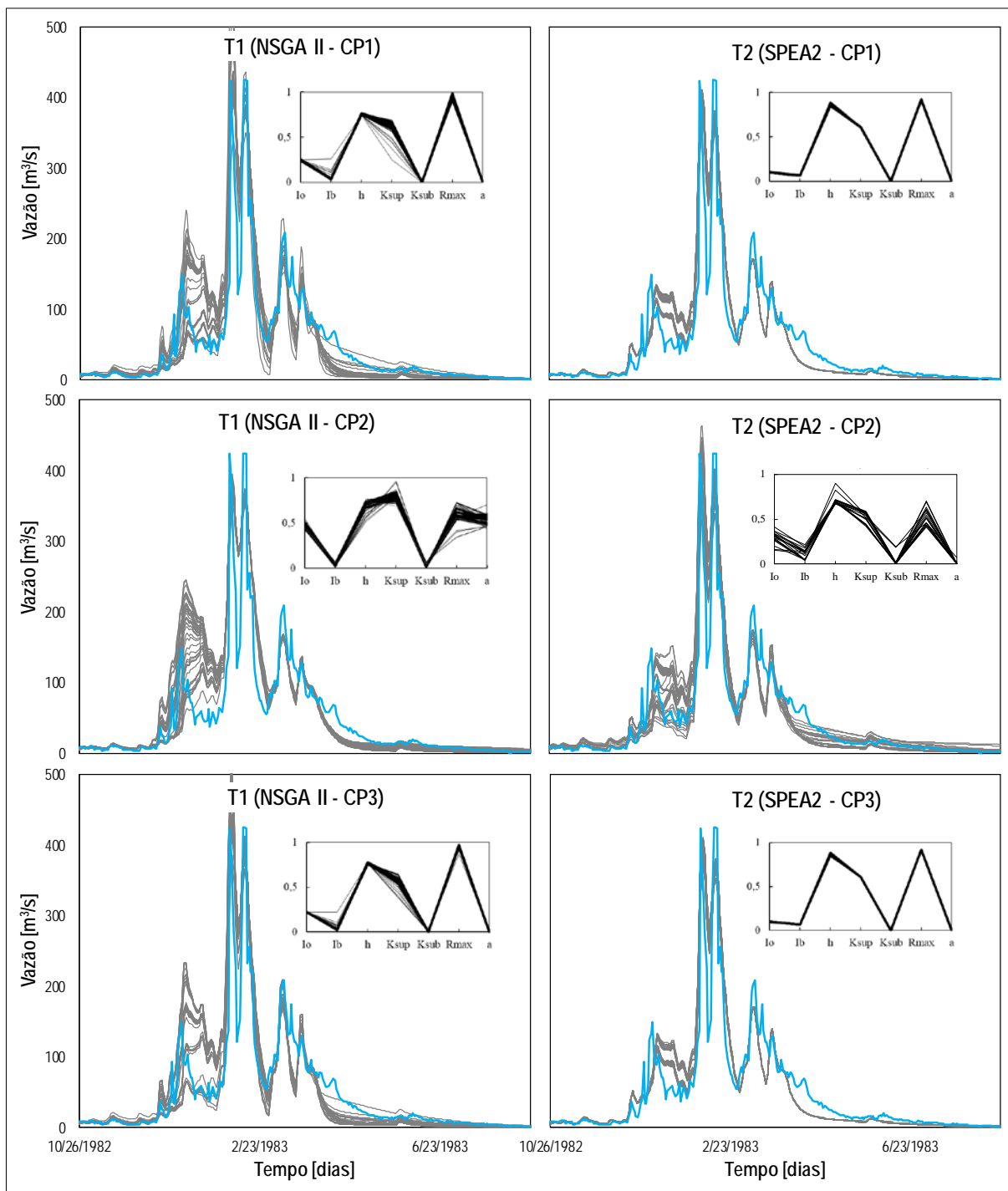
6.3.4 Series de vazões calculadas com o melhor modelo da Calibração Multi-Objetivo

Anteriormente foi observado que o modelo IPH II, apresentou a melhor performance nas bacias testadas com o teste T1, quando analisadas as vazões observadas Q10 e Q90 das bacias. Em termos, das funções objetivo, que o modelo IPH II, apresentou a melhor performance nas bacias testadas com o teste T2.

Então, a seguir são apresentados os hidrogramas para todas as soluções obtidas na calibração multi-objetivo do modelo IPH II nos testes T1 e T2, para os MOEAs da Tabela 7. Da Figura 76 a Figura 78, os hidrogramas representam um subperíodo de 150 dias, no Anexo

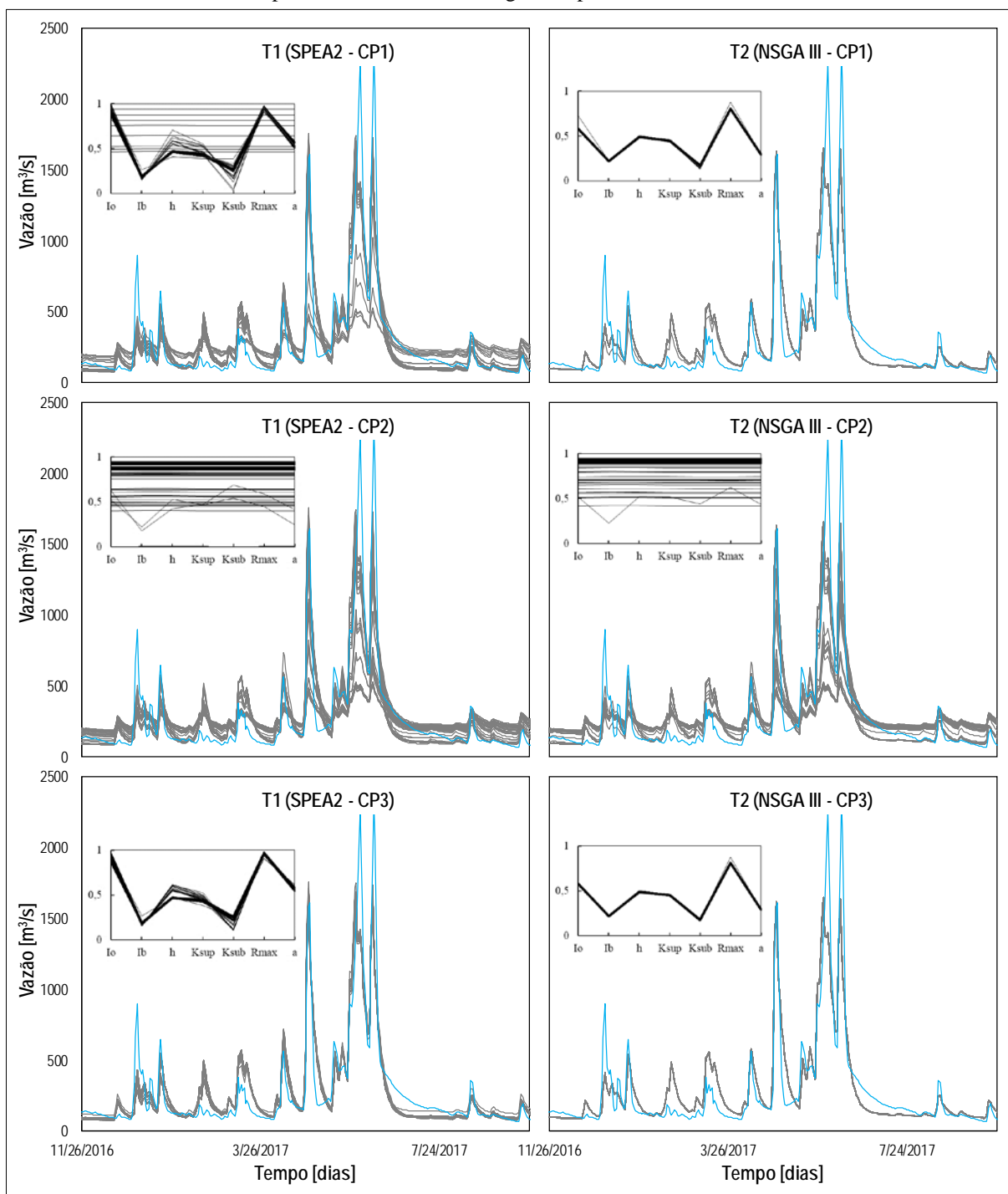
B foram incluídos os hidrogramas para os períodos de calibração e no Anexo C para os períodos de verificação completos.

Figura 76 – Hidrogramas dos testes de calibração Multi-Objetivo, T1 e T2, do modelo IPH II, aplicando os critérios de parada, na bacia rio Tesouras no período 26/10/1982-22/8/1983



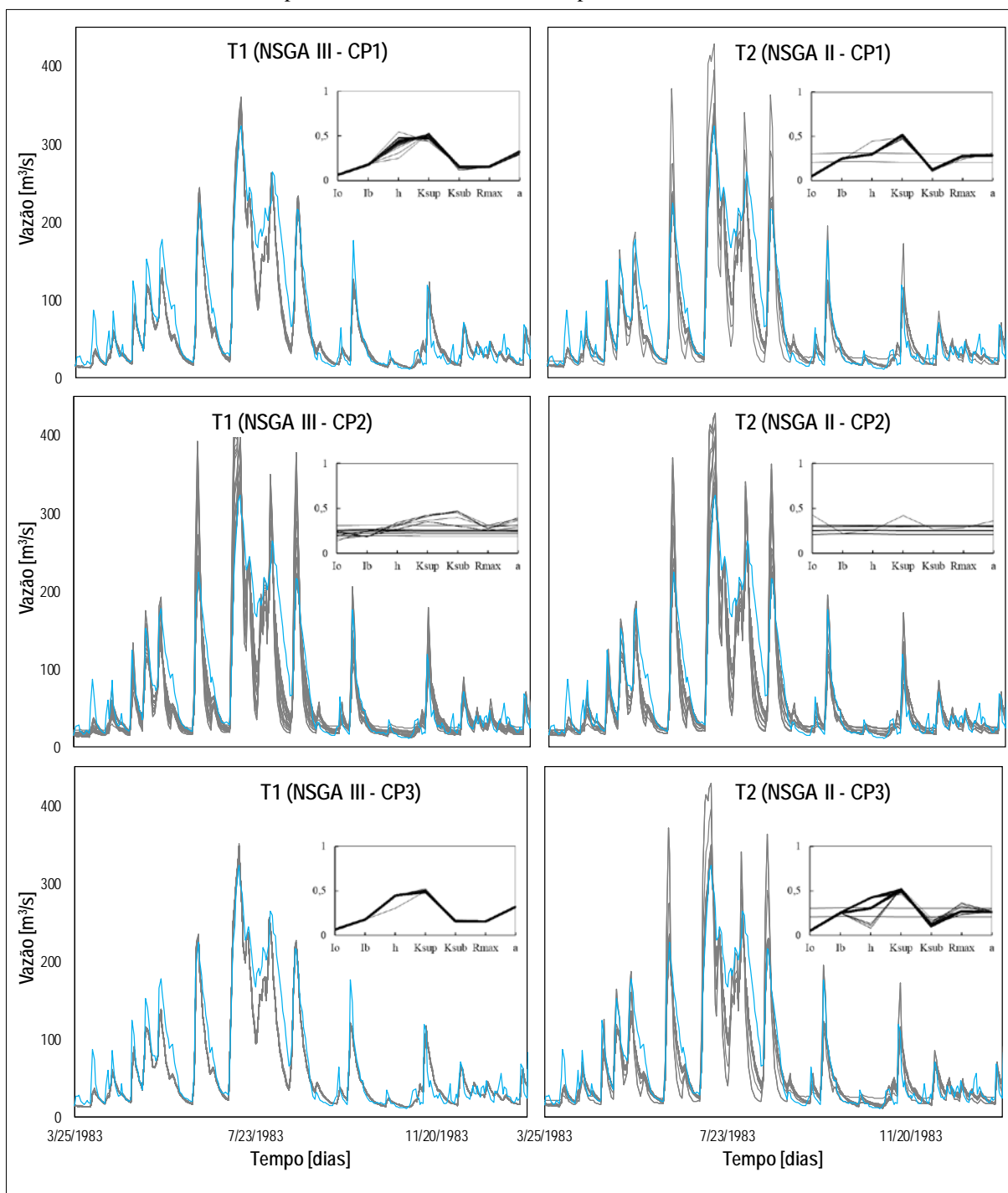
Legenda: Hidrograma da vazão observada (linha azul); Hidrogramas de vazão calculadas com os parâmetros das soluções não dominadas do FP (linhas cinzas); Sub-gráfico dos valores normalizados dos parâmetros do modelo IPH II (linhas pretas)

Figura 77 – Hidrogramas dos testes de calibração Multi-Objetivo, T1 e T2, do modelo IPH II, aplicando os critérios de parada, na bacia Santo Ângelo no período 26/11/2016-22/9/2017



Legenda: Hidrograma da vazão observada (linha azul); Hidrogramas de vazão calculadas com os parâmetros das soluções não dominadas do FP (linhas cinzas); Sub-gráfico dos valores normalizados dos parâmetros do modelo IPH II (linhas pretas)

Figura 78 – Hidrogramas dos testes de calibração Multi-Objetivo, T1 e T2, do modelo IPH II, aplicando os critérios de parada, na bacia Vila Canoas no período 22/8/1983-19/1/1984



Legenda: Hidrograma da vazão observada (linha azul); Hidrogramas de vazão calculadas com os parâmetros das soluções não dominadas do FP (linhas cinzas); Sub-gráfico dos valores normalizados dos parâmetros do modelo IPH II (linhas pretas)

Capítulo 7. Conclusões e Recomendações

7.1 Conclusões

Nesta pesquisa, foram apresentados três MOEA (NSGA II, NSGA III e SPEA2), assim como seis modelos hidrológicos conceituais GR4J, GR5J, HyMOD, IPH II, TankModel 3 e TankModel 4. Inicialmente foram testados os modelos para identificar quais são os mais adequados para representar os processos hidrológicos de três bacias hidrográficas, empregando seis funções objetivo (NSE_Q , NSE_i , NSE_{In} , $RMSE_Q$, $RMSE_i$, RMS_{EIn}). Desta análise, foram escolhidos os modelos GR5J, IPH II e TankModel 4, por apresentar o melhor desempenho na representação das vazões de pico e baixas na maioria das três bacias.

O objetivo principal desta pesquisa foi apresentar e avaliar um novo critério de parada (CP1) que consiga ter um ganho computacional no processo de terminar o processo de calibração, e ao mesmo tempo não altere a performance dos resultados obtidos na calibração. Para este fim, foram analisados outros dois critérios de parada, por número máximo de gerações (CP3) e considerando a convergência da métrica GD (CP2).

Uma desvantagem observada no critério de parada CP3 é o desnecessário custo computacional empregado para alguns dos testes, conseguindo-se soluções da FP equivalentes com menos de metade das gerações, com os critérios CP1 e CP2.

[77] relatou que o critério CP2 tem a desvantagem de precisar do conhecimento prévio do limite ótimo desejado. Isto foi confirmado nos resultados das múltiplas tentativas de calibração realizados nas bacias, verificando-se que o critério CP2 não conseguiu convergir com sucesso durante o processo de calibração multi-objetivo dos modelos hidrológicos com os MOEA's, em todas as bacias de estudo. Esta mesma desvantagem gerou também um término prematuro da calibração multi-objetivo, ainda nas primeiras gerações (menor a 10), que gerou uma FP com uma distribuição desigual das soluções ao longo da FP assim como uma performance não satisfatória.

As análises dos parâmetros do critério proposto neste trabalho (CP1), mostraram que os valores dos parâmetros $N_p = 50$, $Count_{Max} = 10$ e $G_{min} = 125$, usados na calibração de todos os modelos hidrológicos, garantiram que os MOEA's não apresentem uma parada prematura (mínimo 136 gerações) nem desperdício computacional com a parada uma vez obtida uma Frente de Pareto que se mostrou equivalente, a que seria obtida com mais gerações.

Nos testes de calibração multi-objetivo dos modelos GR5J, IPH II e TankModel 4, aplicando o novo critério de parada CP1, demonstrou-se ter um ganho de esforço computacional no processo de calibração comparado com o critério CP3. Para os modelos GR5J, IPH II e

TankModel 4, houve uma economia de tempo respeito ao critério CP3, até de 57%, 57% e 55%, respetivamente, dependendo do MOEA. Ainda, o critério CP1, comparado com o critério CP2, gerou FP com uma melhor performance na maioria dos casos.

Também foi verificado que a métrica NSE da transformação logarítmica, recomendado na literatura por [41], [67] e [92], por aumentar a sensibilidade para valores baixos das vazões e atenuar a influência dos valores de pico, foi adequada nos testes T2, nas bacias rio Tesouras e Santo Ângelo respeito ao modelo IPH II. No entanto, na bacia vila Canoas, o teste T1 parece corroborar o observado por [100], de usar a métrica NSE da transformação inversa da vazão e contradiz outros autores.

Os índices de desempenho dos MOEAs, SP e MS são responsáveis por medir a diversidade das soluções, tanto em espaçamento de soluções no FP e na amplitude do FP, respetivamente. Nas métricas das FP obtidas com cada critério de parada, mostraram que não sempre o aumento do número de gerações implica em melhores valores de índices de desempenho.

Em geral o critério de parada proposto neste trabalho se mostrou uma boa opção para os MOEAs utilizados nesta pesquisa, devido a que conseguiu manter uma boa performance dos resultados, é fácil de ser incorporado nos MOEAs, e por não precisar fazer muitos cálculos adicionais ou salvar variáveis matriciais intermediárias durante o processo de calibração, sem gerar um esforço computacional adicional.

Com respeito a representação das séries temporais de vazões observadas pelos modelos hidrológicos, calibrados com os algoritmos multi-objetivo, este estudo teve como um dos objetivos identificar as métricas adequadas para avaliar a simulação das vazões baixas pelos modelos hidrológicos numa calibração multi-objetivo. A métrica NSE, para a transformação logarítmica das vazões (NSE_{ln}), foi usada no teste T2, e apresentou uma performance muito boa ou satisfatória, comparado os resultados empregando a métrica NSE, calculado para a transformação inversa das vazões (NSE_i), usado no teste T1, para duas das três bacias testadas, recomendando realizar testes em mais bacias.

Quanto às curvas de permanência obtidas das vazões calculadas, foi observada uma maior concentração nas curvas do teste T2 e uma maior dispersão das curvas para o teste T1, nas bacias rio Tesouras e Santo Ângelo, no entanto na bacia vila Canoas foi observado o contrário, isto pode ser analisado em outros trabalhos, devido a que na bacia vila Canoas a ordem de grandeza das vazões observadas era menor em comparação com as vazões das outras duas bacias.

7.2 Recomendações

Um escopo que não foi abordado neste trabalho, foi o uso de modelos distribuídos, para futuros trabalhos, se recomenda testar o novo critério de parada CP1 com outros modelos hidrológicos e outras métricas. Assim como a influência de mais de duas funções objetivo nos parâmetros adotados para o critério de parada proposto (CP1).

Alguns trabalhos da literatura implementaram as técnicas computacionais de paralelismo no processo de calibração multi-objetivo com a finalidade de diminuir o custo computacional ([18], [24], [123]), no entanto, o critério de parada usado nesses casos foi o CP3. Neste trabalho foi comprovado que o novo critério de parada (CP1) gerou resultados satisfatórios comparados com os obtidos com o critério CP3. Recomenda-se aplicar o critério CP3 nesta abordagem de calibração automática paralela.

REFERÊNCIAS

- [1] ADEYERI, O. *et al.* Conceptual hydrological model calibration using multi-objective optimization techniques over the transboundary Komadugu-Yobe basin, Lake Chad Area, West Africa. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 27, 2020.
- [2] AJAMI, N. K. *et al.* Calibration of a semi-distributed hydrologic model for streamflow estimation along a river system. **Journal of hydrology**, v. 298, n. 1-4, p. 112-135, 2004.
- [3] ANDRÉASSIAN, V. *et al.* Crash tests for a standardized evaluation of hydrological models. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 13, p. 1757-1764, 2009.
- [4] ARAÚJO, A. D. S.; VELHO, H. F. D. C.; GOMES, V. C. F. Calibrating an hydrological model by an evolutionary strategy for multi-objective optimization. **Inverse Problems in Science and Engineering**, v. 21, n. 3, p. 438-450, 2013.
- [5] ARAÚJO, D. R. B. *et al.* A performance comparison of multi-objective optimization evolutionary algorithms for all-optical networks design. **IEEE Symposium on Computational Intelligence in Multicriteria Decision-Making**, Paris, France, p. 89-96, 2011.
- [6] ASGARI, M. *et al.* A review of parallel computing applications in calibrating watershed hydrologic models. **Environmental Modelling & Software**, v. 151, p. 105370, 2022.
- [7] BACU, V. *et al.* **Grid based architectural components for SWAT model calibration.** In 2011 International Conference on High Performance Computing & Simulation. Istanbul, Turkey: IEEE. 2011, p. 193-199.
- [8] BEKELE, E. G.; NICKLOW, J. W. Multi-objective automatic calibration of SWAT using NSGA-II. **Journal of Hydrology**, v. 341, n. 3-4, p. 165-176, 2007.
- [9] BELDRING, S. Multi-criteria validation of a precipitation–runoff model. **Journal of Hydrology**, v. 257, n. 1-4, p. 189-211, 2002.
- [10] BEVEN, K.; BINLEY, A. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. **Hydrological processes**, v. 6, n. 3, p. 279-298, 1992.
- [11] BORGES, A. L.; BORDAS, M. P. **Choix de bassins représentatifs et expérimentaux pour l'étude de l'érosion sur le plateau basaltique sudaméricain.** Proceedings of the Porto Alegre Symposium. Porto Alegre, Brasil: IAHS. 1988, p. 161-169.
- [12] BOYLE, D. P. **Multicriteria calibration of hydrological models.** Tucson, AZ, USA. 2001.
- [13] BRAVO, J. M. *et al.* **Avaliação visual e numérica da calibração do modelo hidrológico IPH II com fins educacionais.** In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos

- Hídricos, 2007, São Paulo. Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, v. 1. 2007.
- [14] BRAVO, J. M.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Verificação da eficiência e eficácia de um algoritmo evolucionário multi-objetivo na calibração automática do modelo hidrológico IPH II. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 14, n. 3, p. 37-50, 2009.
- [15] CASTRO, N. *et al.* **Relatório Final das atividades de março de 2007 a maio de 2010.** IPH, UFRGS. Porto Alegre, Brasil. 2010.
- [16] CELESTE, A.; CHAVES, V. S. Avaliação de Algoritmos de Otimização e Funções Objetivo para Calibração Automática do Modelo Chuva-Vazão Tank Model. **Ciência e Natura**, v. 36, n. 3, p. 527– 537, 2014.
- [17] CHEN, M.; IZADY, A.; ABDALLA, O. A. An efficient surrogate-based simulation-optimization method for calibrating a regional MODFLOW model. **Journal of hydrology**, v. 544, p. 591-603, 2017.
- [18] CHEN, R. -S.; PI, L. -C.; HSIEH, C. -C. Application of Parameter Optimization Method for Calibrating Tank Model. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 41, n. 2, p. 389–402, 2005.
- [19] CHENG, C.-T.; OU, C. P.; CHAU, K. W. Combining a fuzzy optimal model with a genetic algorithm to solve multi-objective rainfall–runoff model calibration. **Journal of hydrology**, v. 268, n. 1-4, p. 72-86, 2002.
- [20] CHIEW, F. H. S.; MCMAHON, T. A. Assessing the Adequacy of Catchment Streamflow yield estimates. **Australian Journal of Soil Research**, v. 31, n. 5, p. 665 - 680, 1993.
- [21] CHUGH, T. *et al.* A survey on handling computationally expensive multiobjective optimization problems with evolutionary algorithms. **Soft Computing**, v. 23, n. 9, p. 3137–3166, 2019.
- [22] COELLO, C. A. C.; LAMONT, G. B.; VAN VELDHUIZEN, D. A. **Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems.** New York: Springer, 2007.
- [23] COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Ajuste Multiobjetivo dos Parâmetros de um Modelo Hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 3, p. 27–39, 2003.
- [24] CONFESOR JR, R. B.; WHITTAKER, G. W. Automatic Calibration of Hydrologic Models With Multi-Objective Evolutionary Algorithm and Pareto Optimization. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 43, n. 4, p. 981-989, 2007.

- [25] DE LAVENNE, A. *et al.* Spatial variability of the parameters of a semi-distributed hydrological model. **Proc. IAHS**, v. 373, p. 87–94, 2016.
- [26] DE VOS, N. J.; RIENTJES, T. H. M. Multi-objective performance comparison of an artificial neural network and a conceptual rainfall—runoff model. **Hydrological Sciences Journal**, v. 52, n. 3, p. 397-413, 2007.
- [27] DEB, K. *et al.* A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 6, n. 2, p. 182-197, 2002.
- [28] DEB, K.; JAIN, H. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach, Part I: Solving problems with box constraints. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 18, n. 4, p. 602-622, 2014.
- [29] DEB, K.; JAIN, S. Running performance metrics for evolutionary multi-objective optimization, 2002.
- [30] DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. **Water Resources Research**, v. 28, n. 4, p. 1015-1031, 1992.
- [31] DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. K. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. **Journal of Hydrology**, v. 158, n. 3-4, p. 265-284, 1994.
- [32] EDIJATNO, N. D. O. N. *et al.* GR3J: a daily watershed model with three free parameters, v. 44, n. 2, p. 263-277, 1999.
- [33] EDIJATNO, N. D. O. N. **Mise au point d'un modèle élémentaire pluie-débit au pas de temps journalier**. Strasbourg, France. 1991.
- [34] EFSTRATIADIS, A. *et al.* HYDROGEIOS: a semi-distributed GIS-based hydrological model for modified river basins. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 12, n. 4, p. 989-1006, 2008.
- [35] EFSTRATIADIS, A.; KOUTSOYIANNIS, D. One decade of multi-objective calibration approaches in hydrological modelling: a review. **Hydrological Sciences Journal**, v. 55, n. 1, p. 58-78, 2010.
- [36] EIBEN, A. E.; SMITH, J. E. **Introduction to Evolutionary Computing**. [S.l.]: Springer Berlin, Heidelberg, 2015.
- [37] ENGELAND, K. *et al.* Multi-objective regional modelling. **Journal of Hydrology**, v. 327, n. 3-4, p. 339-351, 2006.

- [38] ENGELAND, K.; XU, C. Y.; GOTTSCHALK, L. Assessing uncertainties in a conceptual water balance model using Bayesian methodology. **Hydrological sciences journal**, v. 50, n. 1, 2005.
- [39] FENÍCIA, F. *et al.* Soft combination of local models in a multi-objective framework. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, n. 6, p. 1797-1809, 2007.
- [40] FERNÁNDEZ, F. V. *et al.* Stopping criteria in evolutionary algorithms for multi-objective performance optimization of integrated inductors. **IEEE Congress on Evolutionary Computation**, Barcelona, Spain, p. 1-8, 2010.
- [41] FERREIRA, P. M. D. L.; PAZ, A. R. D.; BRAVO, J. M. Objective functions used as performance metrics for hydrological models: state-of-the-art and critical analysis. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 25, n. 42, 2020.
- [42] FEYEN, L.; KALAS, M.; VRUGT, J. A. Semi-distributed parameter optimization and uncertainty assessment for large-scale streamflow simulation using global optimization. **Hydrological Sciences Journal**, v. 53, n. 2, p. 293-308, 2008.
- [43] FREITAS, H. R.; MENDES, C. L.; ILIC, A. Performance optimization of the MGB hydrological model for multi-core and GPU architectures. **Environmental Modelling & Software**, v. 148, p. 105271, 2022.
- [44] GARCIA, F.; FOLTON, N.; OUDIN, L. Which objective function to calibrate rainfall-runoff models for low-flow index simulations? **Hydrological Sciences Journal**, v. 62, n. 7, p. 1149-1166, 2017.
- [45] GERMANO, A.; TUCCI, C. E. M.; SILVEIRA, A. L. L. D. Estimativa dos parâmetros do Modelo IPH II para algumas bacias urbanas brasileiras. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 3, n. 4, p. 103-120, 1998.
- [46] GHOREISHI, S. N.; CLAUSEN, A.; JØRGENSEN, B. N. Termination Criteria in Evolutionary Algorithms: A Survey. **Proceedings of the 9th International Joint Conference on Computational Intelligence**, p. 373-384, 2017.
- [47] GONG, W. *et al.* Multi-objective parameter optimization of common land model using adaptive surrogate modeling. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 19, n. 5, p. 2409-2425, 2015.
- [48] GUAN, X. *et al.* The Capacity of the Hydrological Modeling for Water Resource Assessment under the Changing Environment in Semi-Arid River Basins in China. **Water**, v. 11, n. 7, p. 1-20, 2019.

- [49] GUERRERO, J. L. *et al.* **A stopping criterion based on Kalman estimation techniques with several progress indicators.** Proceedings of the 11th Annual conference on Genetic and Evolutionary Computation. [S.l.]: [s.n.]. 2009, p. 587-594.
- [50] GUO, J. *et al.* Multi-objective optimization of empirical hydrological model for streamflow prediction. **Journal of Hydrology**, v. 511, p. 242–253, 2014.
- [51] GUTIERREZ, J. C. T. *et al.* Multi-objective calibration of Tank model using multiple genetic algorithms and stopping criteria. **Brazilian Journal of Water Resources**, v. 27, p. 1-14, 2022.
- [52] GUTIERREZ, J. C. T.; ADAMATTI, D. S.; BRAVO, J. M. A new stopping criterion for multi-objective evolutionary algorithms: application in the calibration of a hydrologic model. **Computational Geosciences**, v. 23, p. 1219–1235, 2019.
- [53] HAAN, C. T. Parametric Uncertainty in Hydrologic Modeling. **Transactions of the ASAE**, v. 32, n. 1, p. 0137–0146, 1989.
- [54] HAUPT, R. L.; HAUPT, S. E. **Practical genetic algorithms.** New York: Wiley, v. 2, 2004.
- [55] HOGUE, T. S. *et al.* A multistep automatic calibration scheme for river forecasting models. **Journal of Hydrometeorology**, v. 1, n. 6, p. 524-542, 2000.
- [56] ISHIBUCHI, H. *et al.* Modified Distance Calculation in Generational Distance and Inverted Generational Distance. **In: GASPAR-CUNHA, A.; HENGGELER ANTUNES, C. . C. C. C. Evolutionary Multi-Criterion Optimization.** [S.l.]: Springer, Cham, v. 9019, 2015., p. 110-125.
- [57] ISHIHARA, Y.; KOBATAKE, S. Runoff model for flood forecasting. **Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute**, Kyoto, v. 29, n. 260, p. 27-43, 1979. Disponivel em: <http://hdl.handle.net/2433/124881>.
- [58] JÚNIOR, A. S. *et al.* Implementação de um Algoritmo Genético baseado em XML para a calibração do Tank Model. **XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos ABRH**, 2009.
- [59] KHU, S. T.; MADSEN, H.; DI PIERRO, F. Incorporating multiple observations for distributed hydrologic model calibration: An approach using a multi-objective evolutionary algorithm and clustering. **Advances in Water Resources**, v. 31, n. 10, p. 1387-1398, 2008.
- [60] KIM, J.; RYU, J. H. Quantifying the performances of the semi-distributed hydrologic model in parallel computing—A case study. **Water**, v. 11, n. 4, p. 823, 2019.

- [61] KIM, S. M. *et al.* Comparison of hydrologic calibration of HSPF using automatic and manual methods. **Water resources research**, v. 43, n. 1, 2007.
- [62] KNOWLES, J. ParEGO: a hybrid algorithm with on-line landscape approximation for expensive multiobjective optimization problems. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 10, n. 1, p. 50-66, 2006.
- [63] KOLLAT, J. B.; REED, P. M. Comparing state-of-the-art evolutionary multi-objective algorithms for long-term groundwater monitoring design. **Advances in Water Resources**, v. 29, n. 6, p. 792-807, 2006.
- [64] KOLLAT, J. B.; REED, P. M.; WAGENER, T. When are multiobjective calibration trade-offs in hydrologic models meaningful? **Water Resources Research**, v. 48, n. 3, 2012.
- [65] KRAUSE, P.; BOYLE, D. P.; BÄSE, F. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. **Advances in Geosciences**, v. 5, p. 89-97, 2005.
- [66] KUNSTMANN, H.; KRAUSE, J.; MAYR, S. Inverse distributed hydrological modelling of Alpine catchments. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 10, n. 3, p. 395-412, 2006.
- [67] LEMOINE, N. **Le bassin versant de surface vu par le souterrain: une voie d'amélioration des performances et du réalisme des modèles pluie-débit?** Paris. 2008.
- [68] LIAO, S. *et al.* Multicore parallel genetic algorithm with Tabu strategy for rainfall-runoff model calibration. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 22, n. 8, p. 04017024, 2017.
- [69] LIONG, S.-Y.; KHU, S.-T.; CHAN, W.-T. Derivation of Pareto front with genetic algorithm and neural network. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 6, n. 1, p. 52-61, 2001.
- [70] LIU, Y.; SUN, F. Sensitivity analysis and automatic calibration of a rainfall-runoff model using multi-objectives. **Ecological Informatics**, v. 5, n. 4, p. 304-310, 2010.
- [71] LWIN, K. T.; QU, R.; MACCARTHY, B. L. Mean-VaR Portfolio Optimization: A Nonparametric Approach. **European Journal of operational research**, v. 260, n. 2, p. 751-766, 2017.
- [72] MADSEN, H. Automatic calibration of a conceptual rainfall-runoff model using multiple objectives. **Journal of Hydrology**, v. 235, n. 3, p. 235, 2000.
- [73] MADSEN, H. Parameter estimation in distributed hydrological catchment modelling using automatic calibration with multiple objectives. **Advances in water resources**, v. 26, n. 2, p. 205-216, 2003.

- [74] MADSEN, H.; WILSON, G.; AMMENTORP, H. C. Comparison of different automated strategies for calibration of rainfall-runoff models. **Journal of hydrology**, v. 261, n. 1-4, p. 48-59, 2002.
- [75] MARTÍ, L. *et al.* **A Cumulative Evidential Stopping Criterion for Multiobjective Optimization Evolutionary Algorithms**. Proceedings of the 9th annual conference companion on Genetic and evolutionary computation. [S.l.]: [s.n.]. 2007, p. 2835-2842.
- [76] MARTÍ, L. *et al.* An Approach to Stopping Criteria for Multi-objective Optimization Evolutionary Algorithms: The MGBM Criterion. **IEEE Congress on Evolutionary Computation**, p. 1263-1270, 2009.
- [77] MARTÍ, L. *et al.* A stopping criterion for multi-objective optimization evolutionary algorithms. **Information Sciences**, p. 700-718, 2016.
- [78] MARTINEK, P.; MARŠÍK, J. Optimized Design of Analogue Circuits Using DE Algorithms. **2005 IMAPS CS International Conference Proceedings**, p. 385-389, 2005.
- [79] MEERT, P.; PEREIRA, F.; WILLEMS, P. Surrogate modeling-based calibration of hydrodynamic river model parameters. **Journal of Hydro-environment Research**, v. 19, p. 56-67, 2018.
- [80] MEIXNER, T. *et al.* Multicriteria parameter estimation for models of stream chemical composition. **Water Resources Research**, v. 38, n. 3, p. 1-9, 2002.
- [81] MOORE, R. J. The probability-distributed principle and runoff production at point and basin scales. **Hydrological Sciences Journal**, v. 30, n. 2, p. 273-297, 1985.
- [82] MORIASI, D. N. *et al.* Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.
- [83] MOSTAFAIE, A. *et al.* Comparing multi-objective optimization techniques to calibrate a conceptual hydrological model using in situ runoff and daily GRACE data. **Computational Geosciences**, v. 22, p. 789-814, 2017.
- [84] MULETA, M. K.; NICKLOW, J. W. Sensitivity and uncertainty analysis coupled with automatic calibration for a distributed watershed model. **Journal of hydrology**, v. 306, n. 1-4, p. 127-145, 2005.
- [85] NAEINI, M. R. *et al.* Three decades of the Shuffled Complex Evolution (SCE-UA) optimization algorithm: Review and applications. **Scientia Iranica**, v. 26, n. 4, p. 2015-2031, 2019.

- [86] NASCIMENTO, N. O.; MICHEL, C. **Some epistemological aspects of the development and use of hydrologic conceptual models**. Proceedings of the 4th Junior Scientist Course" Assessment of Modelling Uncertainties and Measurement Error in Hydrology". St-Etienne, France: [s.n.]. 1992, p. 245-264.
- [87] NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models: part I — A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282-290, 1970.
- [88] NELDER, J. A.; MEAD, R. A Simplex Method for Function Minimization. **Computer Journal**, v. 7, n. 4, p. 308-313, 1965.
- [89] NEUFELD, J. S.; SCHULZ, S.; BUSCHER, U. A systematic review of multi-objective hybrid flow shop scheduling, v. 309, n. 1, p. 1-23, 2023.
- [90] NGOC, T. A.; HIRAMATSU, K.; HARADA, M. Optimizing parameters for two conceptual hydrological models using a genetic Algorithm: A case study in the Dau Tieng River Watershed, Vietnam. **Japan Agricultural Research Quarterly**, v. 47, n. 1, p. 85-96, 2013.
- [91] OLIVEIRA, G. G. D.; PEDROLLO, O. C.; CASTRO, N. M. D. R. AS INCERTEZAS ASSOCIADAS ÀS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS OBTIDAS PELO MODELO ETA CPTEC/HADCM3: AVALIAÇÃO COMPARATIVA ENTRE OS DADOS SIMULADOS E OBSERVADOS DE PRECIPITAÇÃO, EVAPOTRANSPIRAÇÃO E VAZÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IJUÍ, BRASIL. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, p. 101-121, 2015.
- [92] OUDIN, L. *et al.* Dynamic averaging of rainfall-runoff model simulations from complementary model parameterizations. **Water Resources Research**, v. 42, n. 7, 2006.
- [93] PARAJKA, J.; MERZ, R.; BLÖSCHL, G. Uncertainty and multiple objective calibration in regional water balance modelling: case study in 320 Austrian catchments. **Hydrological Processes: An International Journal**, v. 21, n. 4, p. 435-446, 2007.
- [94] PENG, T. *et al.* Modeling and Combined Application of Orthogonal Chaotic NSGA-II and Improved TOPSIS to Optimize a Conceptual Hydrological Model. **Water Resources Management**, v. 32, p. Modeling and Combined Application of Orthogonal Chaotic NSGA-II and Improved TOPSIS to Optimize a Conceptual Hydrological Model, 2018.
- [95] PERRIN, C. Towards an improved version of a lumped rainfall-runoff model through a comparative approach. **La Houille Blanche**, v. 88, n. 6-7, p. 84-91, 2002.
- [96] PERRIN, C.; MICHEL, C.; ANDRÉASSIAN, V. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. **275-289**, v. 279, n. 1-4, p. 275-289, 2003.

- [97] PHAN, D. H.; SUZUKI, J. R2-IBEA: R2 indicator based evolutionary algorithm for multiobjective optimization. **IEEE Congress on Evolutionary Computation**, Cancun, Mexico, p. 1836-1845, 2013.
- [98] PHUONG, H. T. *et al.* A hydrological tank model assessing historical runoff variation in the Hieu River Basin. **Asian Journal of Water, Environment and Pollution**, v. 15, n. 1, p. 75-86, 2018.
- [99] PRICE, K. V.; STORN, R. M.; LAMPINEN, J. A. **Differential Evolution**. 1. ed. [S.l.]: Springer Berlin, Heidelberg, 2005. p. 539.
- [100] PUSHPALATHA, R. *et al.* A review of efficiency criteria suitable for evaluating low-flow simulations. **Journal of Hydrology**, v. 420-421, p. 171–182, 2012.
- [101] QUAN, Z. *et al.* Evaluation of the HYMOD model for rainfall–runoff simulation using the GLUE method. **Proc. IAHS**, v. 368, p. 180–185, 2015.
- [102] RODILA, D. D.; BACU, V.; GORGAN, D. **Comparative analysis of multicore and Grid based execution of SWAT model**. International Conference on P2P, Parallel, Grid, Cloud and Internet Computing. Barcelona, Spain: IEEE. 2011, p. 273-278.
- [103] ROUHANI, H. *et al.* Parameter estimation in semi-distributed hydrological catchment modelling using a multi-criteria objective function. **Hydrological Processes: An International Journal**, v. 21, n. 22, p. 2998-3008, 2007.
- [104] ROUHOLAHNEJAD, E. *et al.* A parallelization framework for calibration of hydrological models. **Environmental Modelling & Software**, v. 31, p. 28-36, 2012.
- [105] ROY, T. *et al.* Using satellite-based evapotranspiration estimates to improve the structure of a simple conceptual rainfall–runoff model. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 21, n. 2, p. 879–896, 2017.
- [106] RUDENKO, O.; SCHOENAUER, M. **A Steady Performance Stopping Criterion for Pareto-based Evolutionary Algorithms**. 6th International Multi-Objective Programming and Goal Programming Conference. Hammamet, Tunisia: [s.n.]. 2004.
- [107] SANTOS, L.; THIREL, G.; PERRIN, C. Continuous state-space representation of a bucket-type rainfall-runoff model: a case study with the GR4 model using state-space GR4. **Geoscientific Model Development**, v. 11, n. 4, p. 1591–1605, 2018.
- [108] SANTOS, L.; THIREL, G.; PERRIN, C. Technical note: Pitfalls in using log-transformed flows within the KGE criterion. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 22, p. 4583–4591, 2018.

- [109] SAVIC, D. **Single-objective vs. Multiobjective Optimisation for Integrated Decision Support**. International Congress on Environmental Modelling and Software. Lugano, Switzerland: [s.n.]. 2002, p. 7-12.
- [110] SCHOTT, J. R. **Fault tolerant design using single and multicriteria genetic algorithm optimization**. Cambridge, Massachusetts. 1995.
- [111] SCHOUPS, G. *et al.* Multi-criteria optimization of a regional spatially-distributed subsurface water flow model. **Journal of Hydrology**, v. 311, n. 1-4, p. 20-48, 2005.
- [112] SCHOUPS, G.; LEE ADDAMS, C.; GORELICK, S. M. Multi-objective calibration of a surface water-groundwater flow model in an irrigated agricultural region: Yaqui Valley, Sonora, Mexico. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 9, n. 5, p. 549-568, 2005.
- [113] SEIBERT, J. Multi-criteria calibration of a conceptual runoff model using a genetic algorithm. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 4, n. 2, p. 215-224, 2000.
- [114] SEIBERT, J.; MCDONNELL, J. J. On the dialog between experimentalist and modeler in catchment hydrology: Use of soft data for multicriteria model calibration. **Water resources research**, v. 38, n. 11, p. 1-14, 2002.
- [115] SHARIFI, M. R. *et al.* A new optimization algorithm to solve multi-objective problems. **Scientific Reports**, v. 11, n. 20326, p. 1-19, 2021.
- [116] SINGH, V. P. Hydrology: Problems, Challenges and Opportunities. **In: PANDEY, A. . K. S. . K. A. Hydrological Aspects of Climate Change**. Singapore: Springer, 2021., p. 159–171.
- [117] SONG, X. M. *et al.* Parameter identification and global sensitivity analysis of Xin'anjiang model using meta-modeling approach. **Water Science and Engineering**, v. 6, n. 1, p. 1-17, 2013.
- [118] SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. K. Model calibration. **In: SINGH, V. P. Computer Models of Watershed Hydrology**. [S.l.]: Water Resources Publications, 1995., p. 23-67.
- [119] SORRIBAS, M. V.; BRAVO, J. M.; COLLISCHONN, W. **Avaliação preliminar do algoritmo de otimização multi-objetivo MOSCEM-UA aplicado na calibração do modelo hidrológico MGB-IPH**. XX SBRH-Brazilian Symposium of Water Resources. Bento Gonçalves: Brazilian Association of Water Resources. 2013, p. 1-8.
- [120] SRINIVAS, N.; DEB, K. Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms. **Evolutionary computation**, v. 2, n. 3, p. 221-248, 1994.
- [121] SUGAWARA, M. Automatic calibration of the tank model. **Hydrological Sciences Bulletin**, v. 24, n. 3, p. 375-388, 1979.

- [122] SUGAWARA, M. Tank model. **In: SINGH, V. P. Computer models of watershed hydrology**. Littleton, Colorado: Water Resources Publications, 1995., p. 165–214.
- [123] TANG, Y.; REED, P. M.; KOLLAT, J. B. Parallelization strategies for rapid and robust evolutionary multiobjective optimization in water resources applications. **Advances in Water Resources**, v. 30, n. 3, p. 335-353, 2007.
- [124] TANG, Y.; REED, P.; WAGENER, T. How effective and efficient are multiobjective evolutionary algorithms at hydrologic model calibration? **Hydrology and earth system sciences**, v. 10, n. 2, p. 289-307, 2006.
- [125] TODOROVIĆ, A.; GRABS, T.; TEUTSCHBEIN, C. Advancing traditional strategies for testing hydrological model fitness in a changing climate. **Hydrological Sciences Journal**, v. 67, n. 12, p. 1790-1811, 2022.
- [126] TRAUTMANN, H. *et al.* **A convergence criterion for multiobjective evolutionary algorithms based on systematic statistical testing**. Parallel Problem Solving from Nature–PPSN X: 10th International Conference. Dortmund, Germany: Springer Berlin Heidelberg. 2008, p. 825-836.
- [127] TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T. Adaptive forecasting with a conceptual rainfall-runoff model. **Hydrological forecasting Proceedings of the Oxford Symposium IAHS**, n. 129, p. 425-454, 1980.
- [128] TUCCI, C. E. M.; ORDONEZ, J. S.; SIMÕES LO-PES, M. **Modelo Matemático Precipitação-Vazão IPH II Alguns Resultados**. AnaisIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Fortaleza: [s.n.]. 1981.
- [129] VAN VELDHUIZEN, D. A. **Multiobjective Evolutionary Algorithms: Classifications, Analyses, and New Innovations**. Ohio, USA. 1999.
- [130] VRUGT, J. A. *et al.* Effective and efficient algorithm for multiobjective optimization of hydrologic models. **Water resources research**, v. 39, n. 8, 2003.
- [131] WAGENER, T. *et al.* A framework for development and application of hydrological models. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 5, n. 1, p. 13-26, 2001.
- [132] WAGENER, T.; GUPTA, H. V. Model identification for hydrological forecasting under uncertainty. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 19, p. 378-387, 2005.
- [133] WAGNER, T.; TRAUTMANN, H. Online Convergence Detection for evolutionary multi-objective algorithms revisited. **IEEE Congress on Evolutionary Computation**, p. 1-8, 2010.

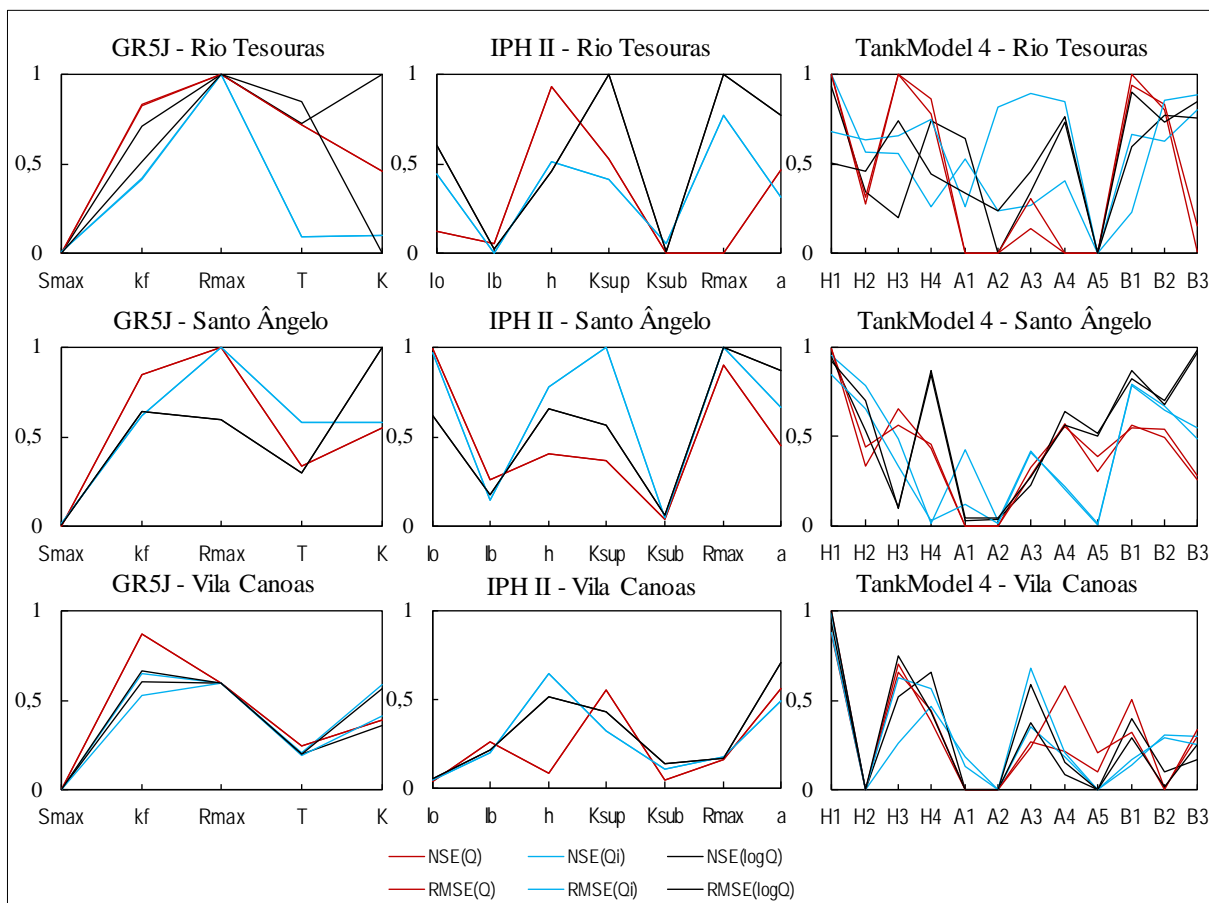
- [134] WAGNER, T.; TRAUTMANN, H.; NAUJOKS, B. **OCD**: Online convergence detection for evolutionary multi-objective algorithms based on statistical testing. International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 2009, p. 198-215.
- [135] WU, H.; LYE, L. M.; CHEN, B. A design of experiment aided sensitivity analysis and parameterization for hydrological modeling. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 39, n. 4, p. 460-472, 2012.
- [136] WU, L. *et al.* Multi-objective synchronous calibration and Pareto optimality of runoff and sediment parameters in an arid and semi-arid watershed. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 24, p. 65470-65481, 2023.
- [137] XI, M. *et al.* Calibration of an agricultural-hydrological model (RZWQM2) using surrogate global optimization. **Journal of Hydrology**, v. 544, p. 456-466, 2017.
- [138] YAPO, P. O.; GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S. Multiobjective global optimization for hydrologic models. **Journal of Hydrology**, v. 204, p. 83-97, 1998.
- [139] YEN, G. G.; HE, Z. Performance metric ensemble for multiobjective evolutionary algorithms. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 18, n. 1, p. 131-144, 2014.
- [140] YIN, Z. *et al.* Parallel hydrological model parameter uncertainty analysis based on message-passing interface. **Water**, v. 12, n. 10, p. 2667, 2020.
- [141] YU, P.-S.; YANG, T.-C. Fuzzy multi-objective function for rainfall-runoff model calibration. **Journal of hydrology**, v. 238, n. 1-2, p. 1-14, 2000.
- [142] ZHANG, D. *et al.* Moving SWAT model calibration and uncertainty analysis to an enterprise Hadoop-based cloud. **Environmental Modelling & Software**, v. 84, p. 140-148, 2016.
- [143] ZHANG, X. *et al.* Efficient multi-objective calibration of a computationally intensive hydrologic model with parallel computing software in Python. **Environmental modelling & software**, v. 46, p. 208-218, 2013.
- [144] ZHOU, A. *et al.* Multiobjective evolutionary algorithms: A survey of the state of the art. **Swarm and evolutionary computation**, v. 1, n. 1, p. 32-49, 2011.
- [145] ZHOU, J. *et al.* Multi-objective parameter calibration and multi-attribute decision-making: an application to conceptual hydrological model calibration. **Water resources management**, v. 28, p. 767-783, 2014.
- [146] ZITZLER, E.; DEB, K.; THIELE, L. Comparison of multiobjective evolutionary algorithms: Empirical results. **Evolutionary computation**, v. 8, n. 2, p. 173-195, 2000.

- [147] ZITZLER, E.; LAUMANNNS, M.; THIELE, L. SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm. **TIK-report 103**, p. 1-21, 2001.

ANEXO A – CALIBRAÇÃO MONO-OBJETIVO

Neste anexo, são apresentados os parâmetros normalizados obtidos da calibração automática mono-objetivo e os hidrogramas completos dos períodos de calibração Mono-Objetivo e períodos de validação, em cada bacia hidrográfica.

Figura A 1 - Parâmetros normalizados, para as Funções Objetivo da calibração Mono-Objetivo dos modelos GR5J, IPH II e TankModel 4



Bacia hidrográfica do rio Tesouras

Figura A 2 - Hidrogramas dos modelos GR5J, IPH II e TankModel 4, para três Funções Objetivo NSE, na bacia do rio Tesouras no período de calibração Mono-Objetivo, 01/09/1982 - 31/12/1986

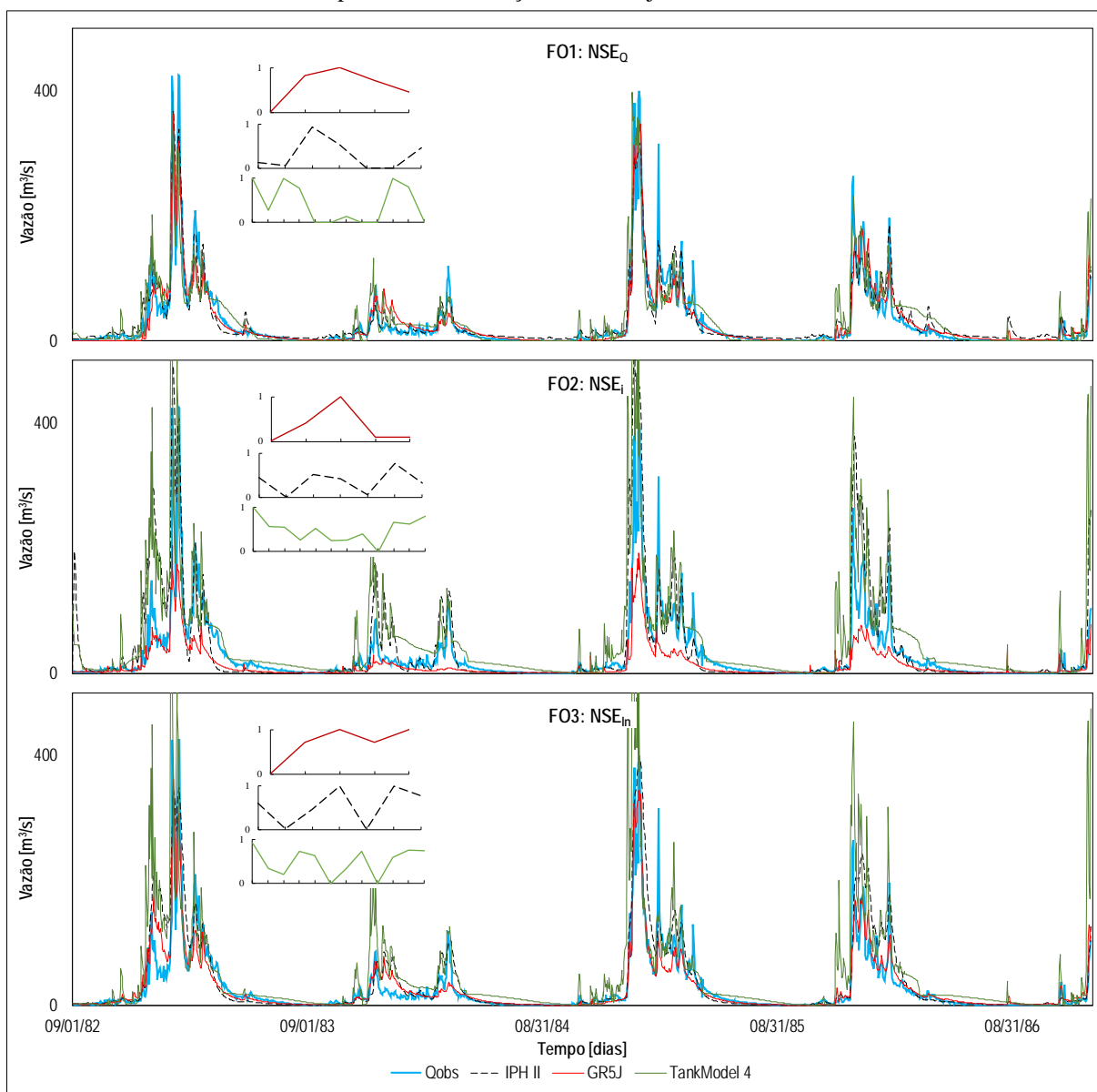


Figura A 3 - Hidrogramas dos modelos GR5J, IPH II e TankModel 4, para três Funções Objetivo RMSE, na bacia do rio Tesouras no período de calibração Mono-Objetivo, 01/09/1982 - 31/12/1986

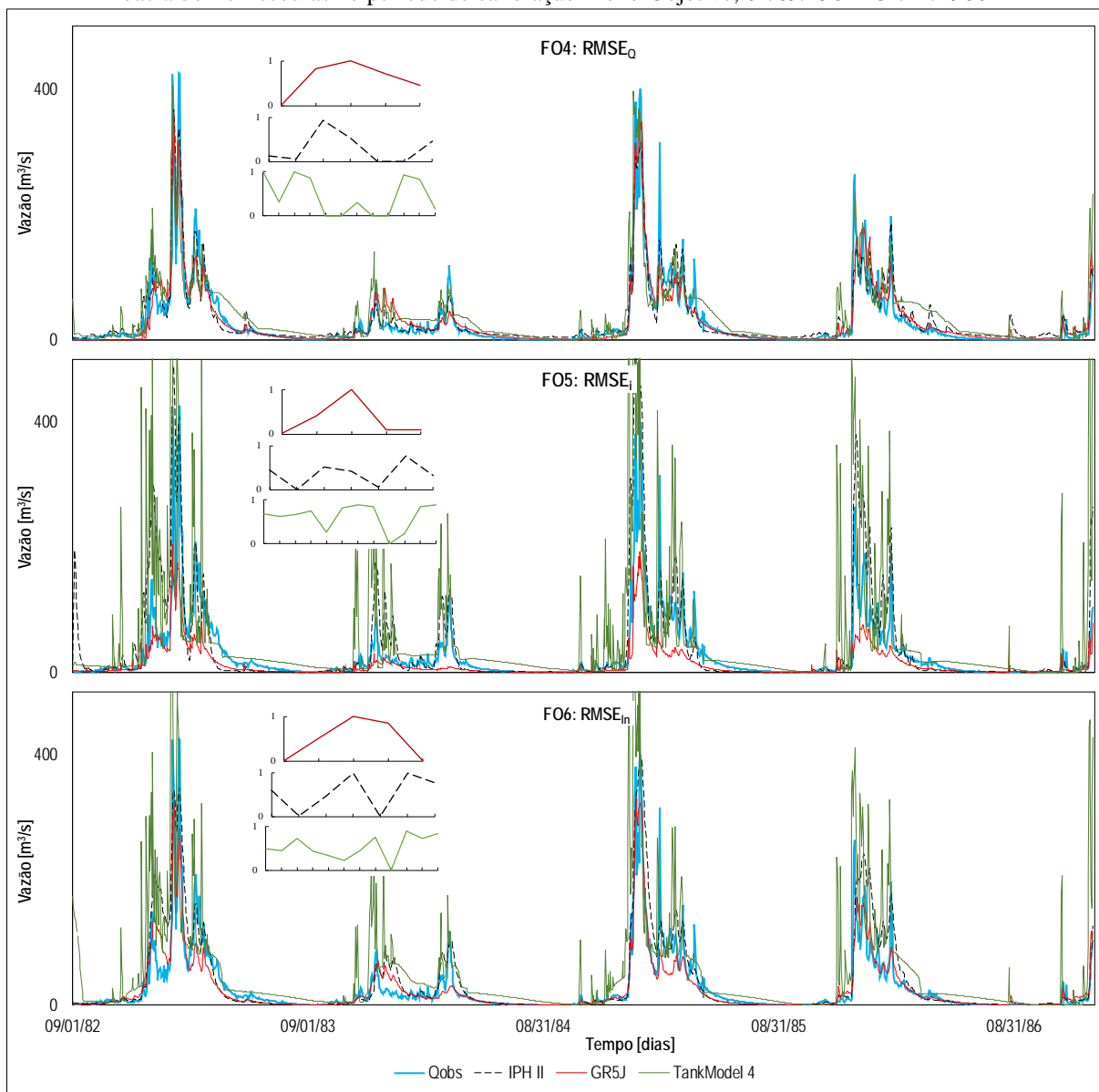


Figura A 4 - Hidrogramas dos modelos GR5J, IPH II e TankModel 4, para três Funções Objetivo NSE, na bacia do rio Tesouras no período de validação 01/01/1982 - 31/08/1986

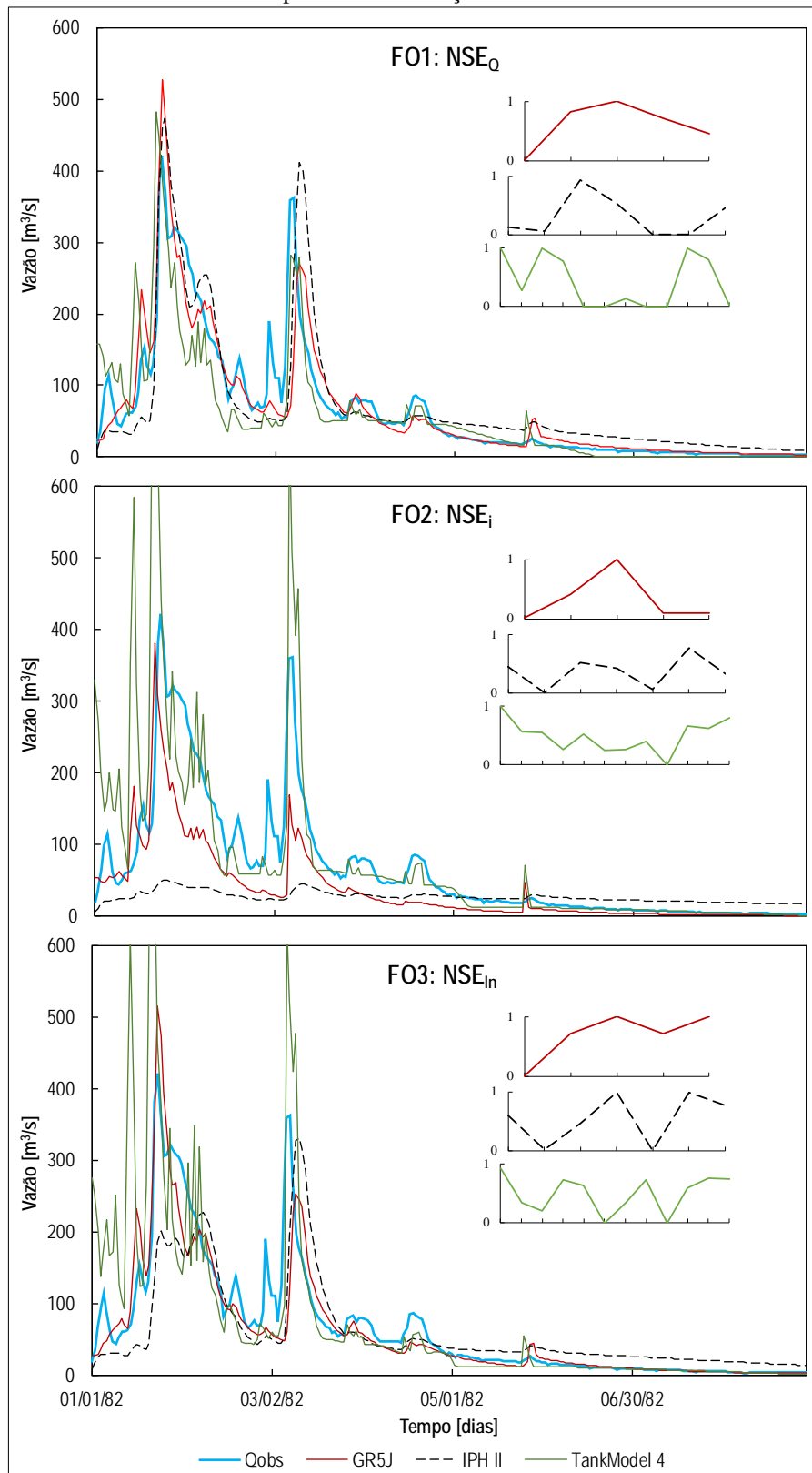
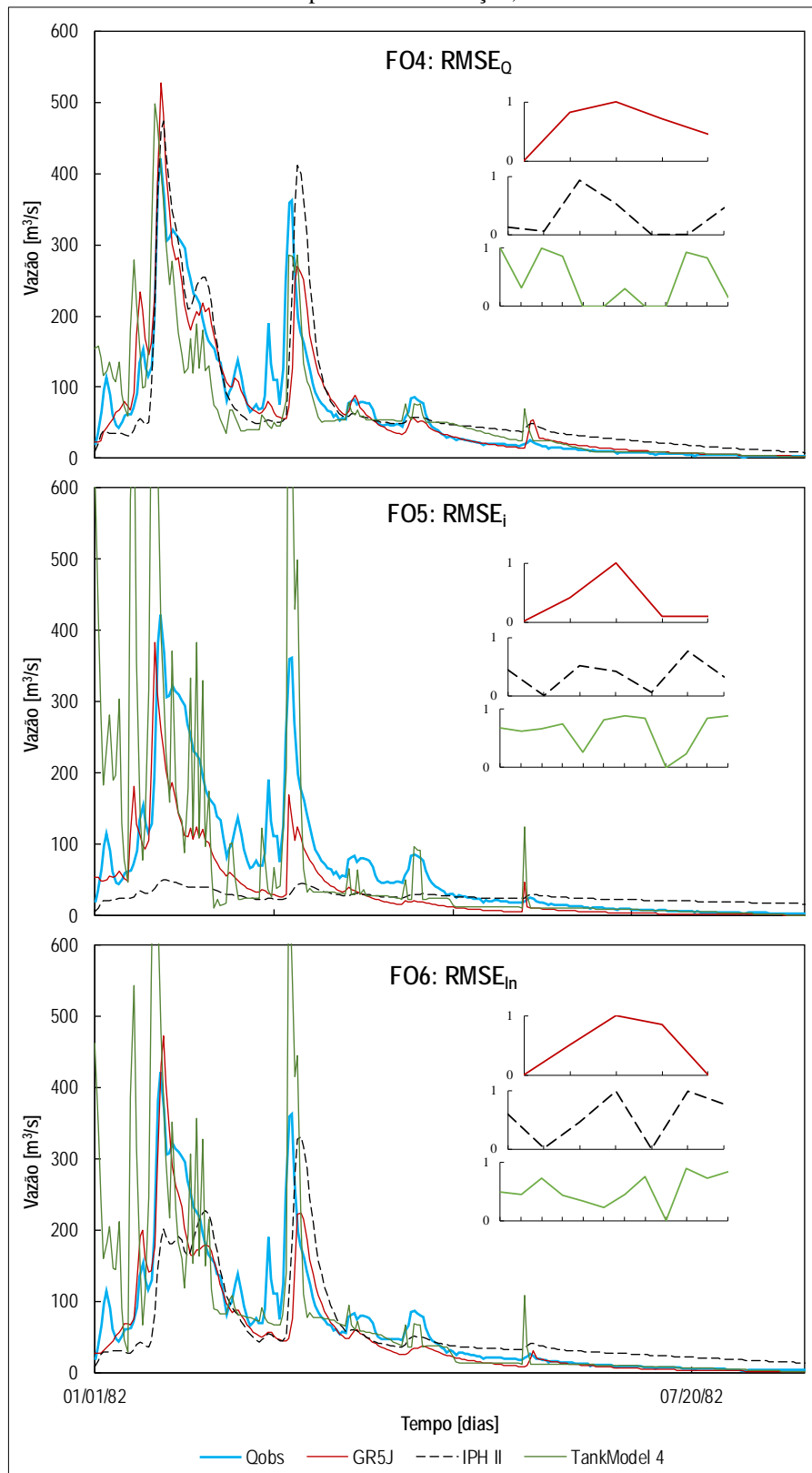


Figura A 5 - Hidrogramas dos modelos GR5J, IPH II e TankModel 4, para três Funções Objetivo RMSE, na bacia do rio Tesouras no período de validação, 01/01/1982 - 31/08/1986



Bacia hidrográfica do Santo Ângelo

Figura A 6 - Hidrogramas dos modelos GR5J, IPH II e TankModel 4, para três Funções Objetivo NSE, na bacia Santo Ângelo no período de calibração Mono-Objetivo, 01/01/1912 - 31/12/1918

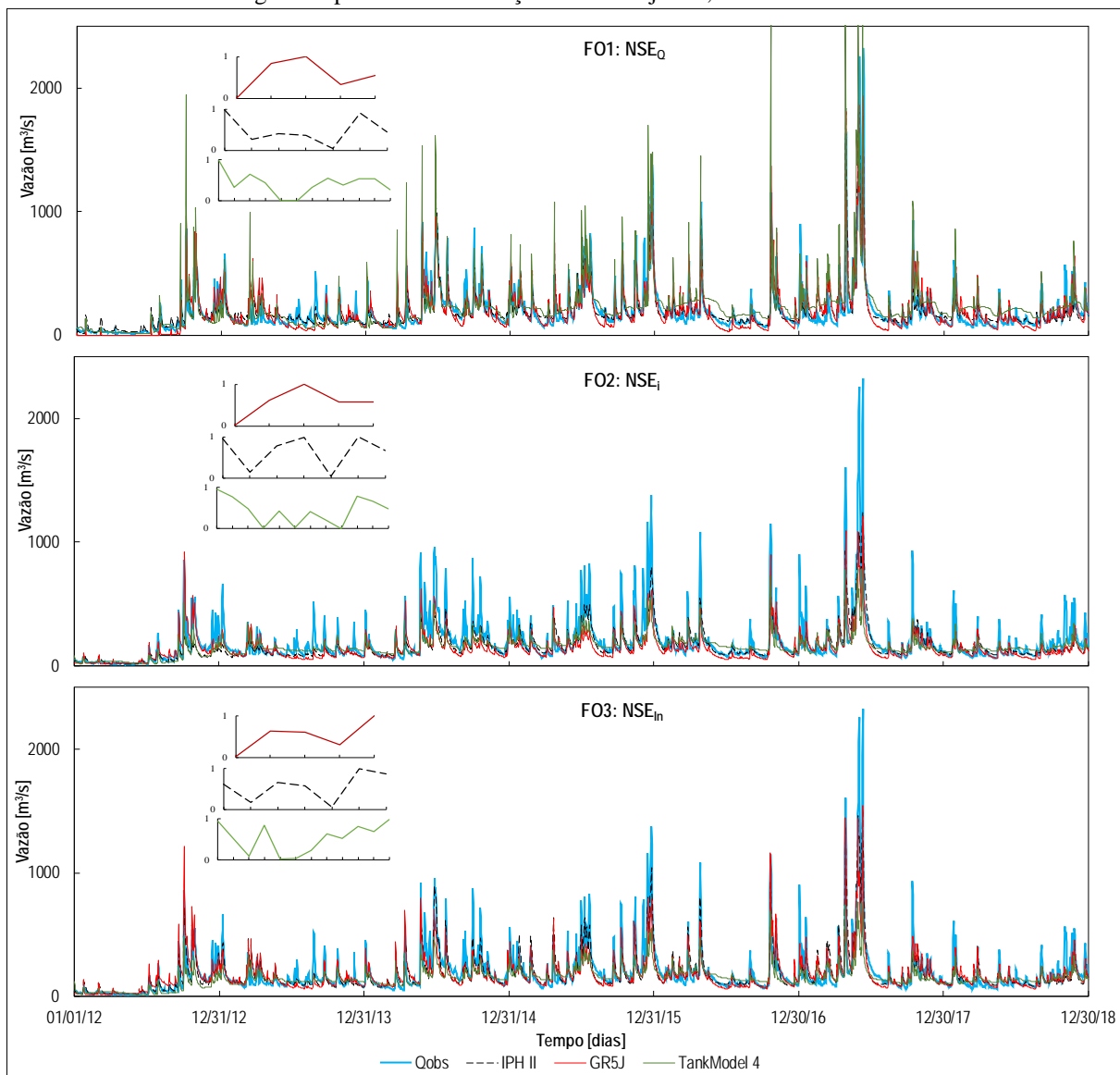


Figura A 7 - Hidrogramas dos modelos GR5J, IPH II e TankModel 4, para três Funções Objetivo RMSE, na bacia Santo Ângelo no período de calibração Mono-Objetivo, 01/01/1912 - 31/12/1918

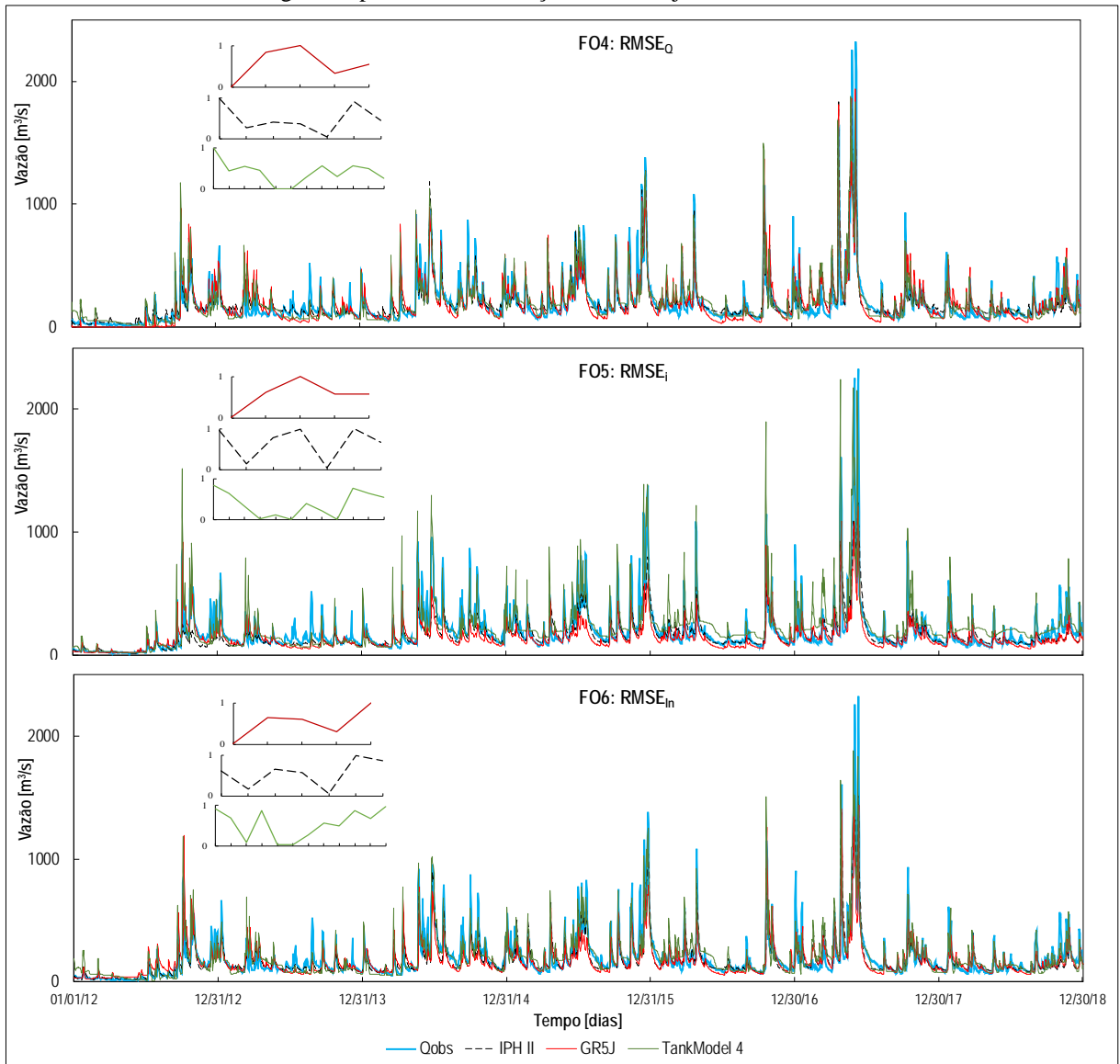


Figura A 8 - Hidrogramas dos modelos GR5J, IPH II e TankModel 4, para três Funções Objetivo NSE, na bacia Santo Ângelo no período de validação, 15/01/2008 - 31/12/2011

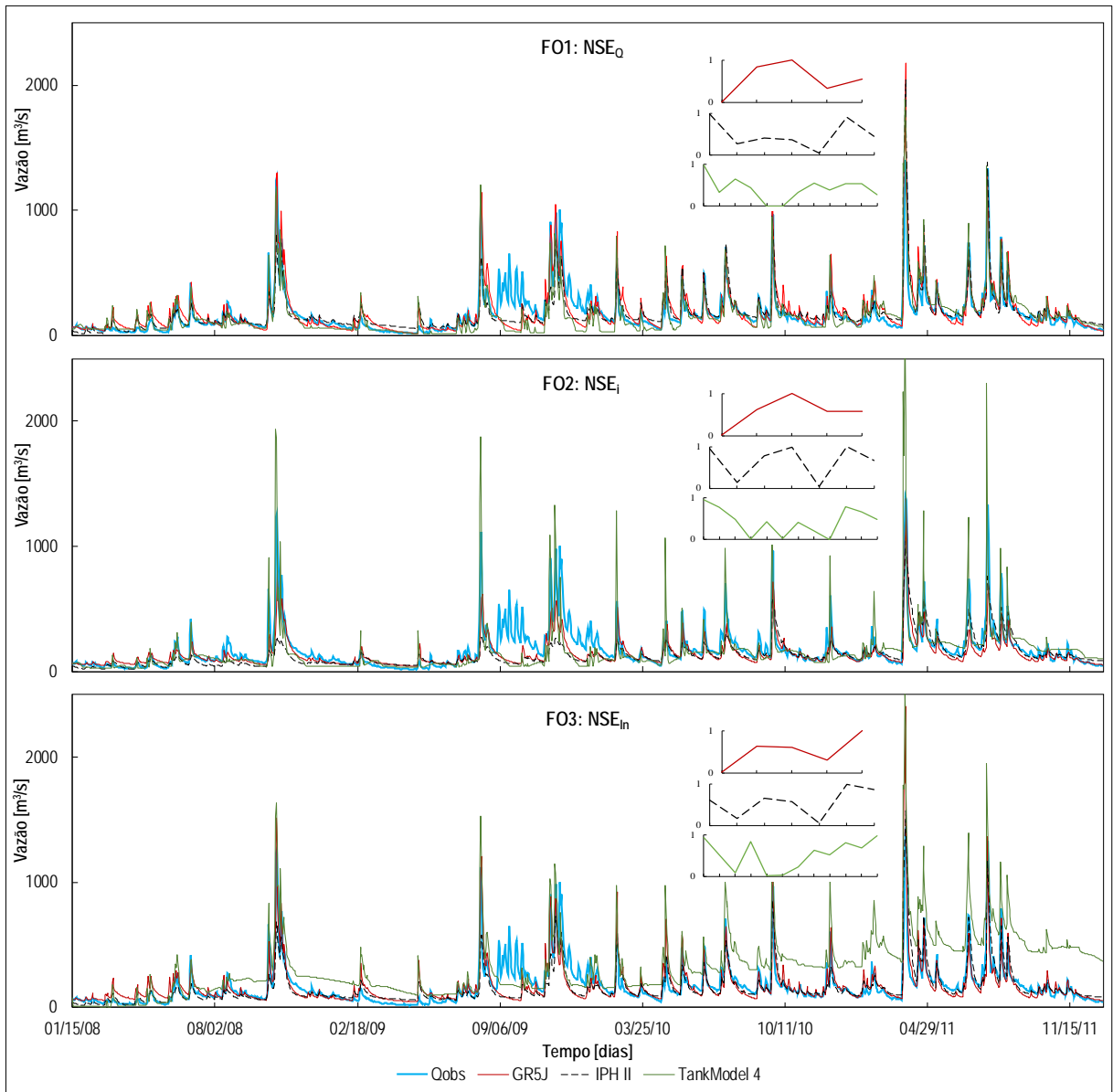
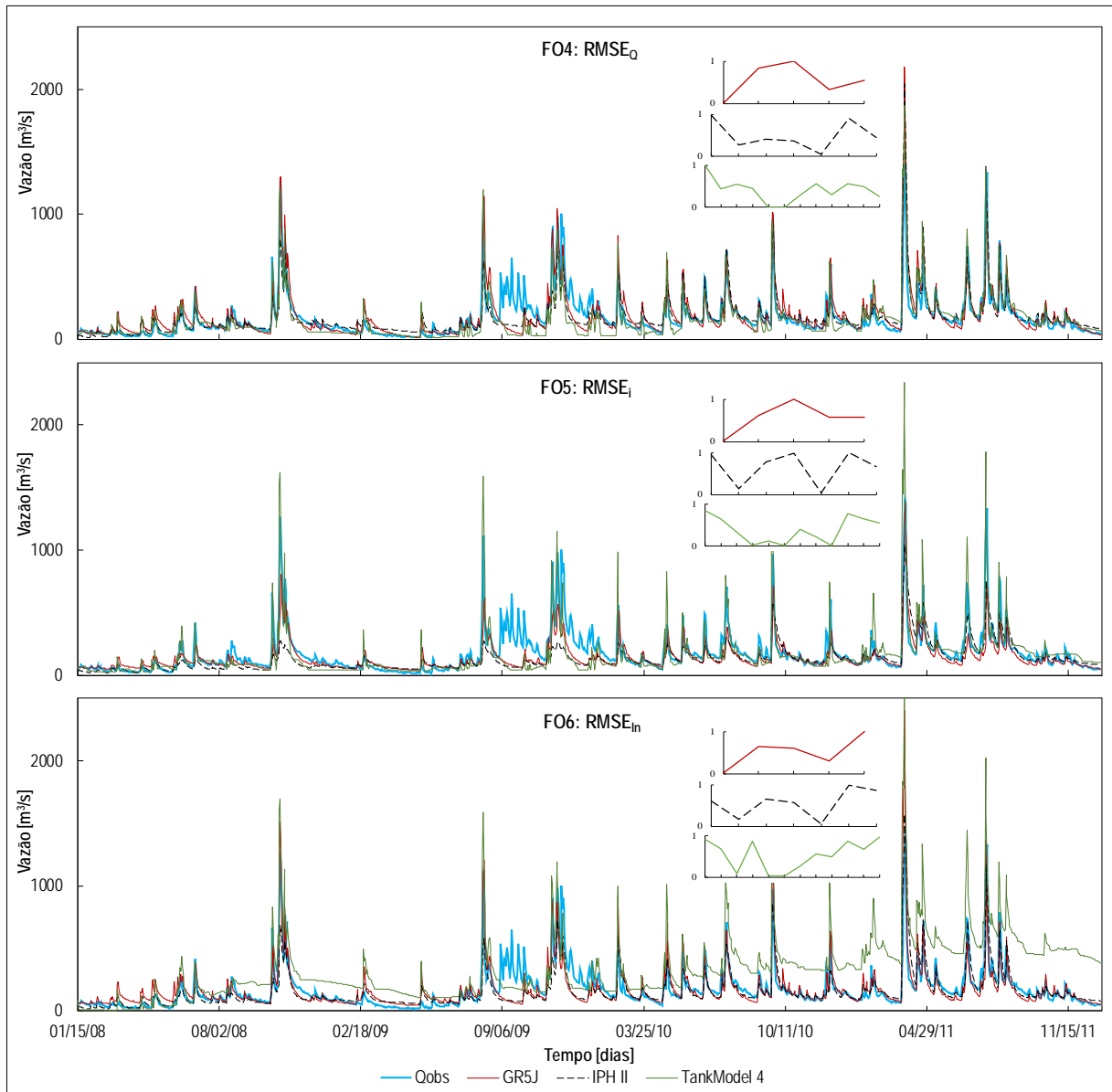


Figura A 9 - Hidrogramas dos modelos GR5J, IPH II e TankModel 4, para três Funções Objetivo RMSE, na bacia Santo Ângelo no período de validação, 15/01/2008 - 31/12/2011



Bacia hidrográfica do rio Vila Canoas

Figura A 10 - Hidrogramas dos modelos GR5J, IPH II e TankModel 4, para três Funções Objetivo NSE, na bacia Vila Canoas no período de calibração Mono-Objetivo, 01/01/1980 - 31/12/1984

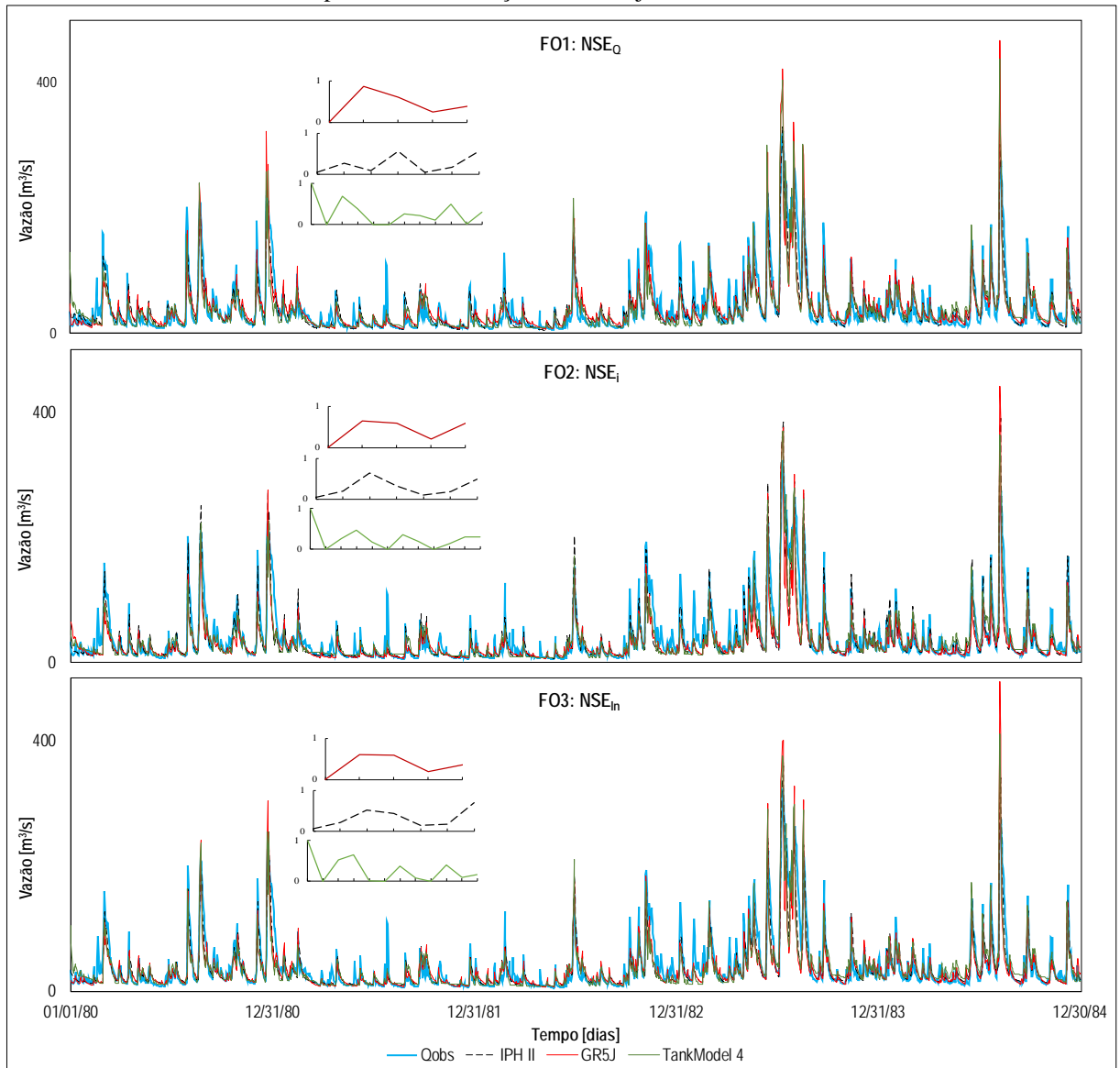


Figura A 11 - Hidrogramas dos modelos GR5J, IPH II e TankModel 4, para três Funções Objetivo RMSE, na bacia Vila Canoas no período de calibração Mono-Objetivo, 01/01/1980 - 31/12/1984

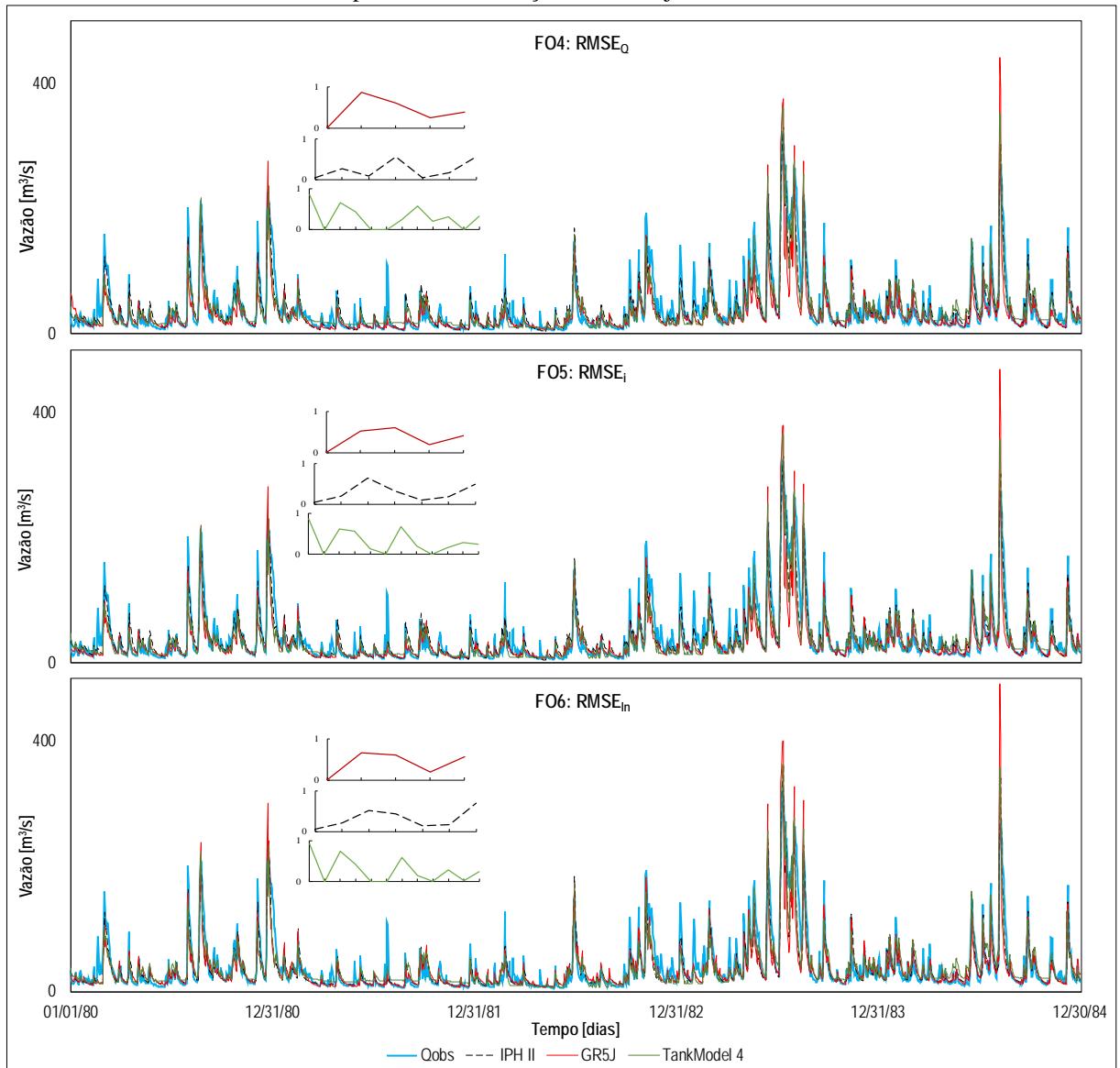


Figura A 12 - Hidrogramas dos modelos GR5J, IPH II e TankModel 4, para três Funções Objetivo NSE, na bacia Vila Canoas no período de validação, 01/01/1985 - 31/03/1987

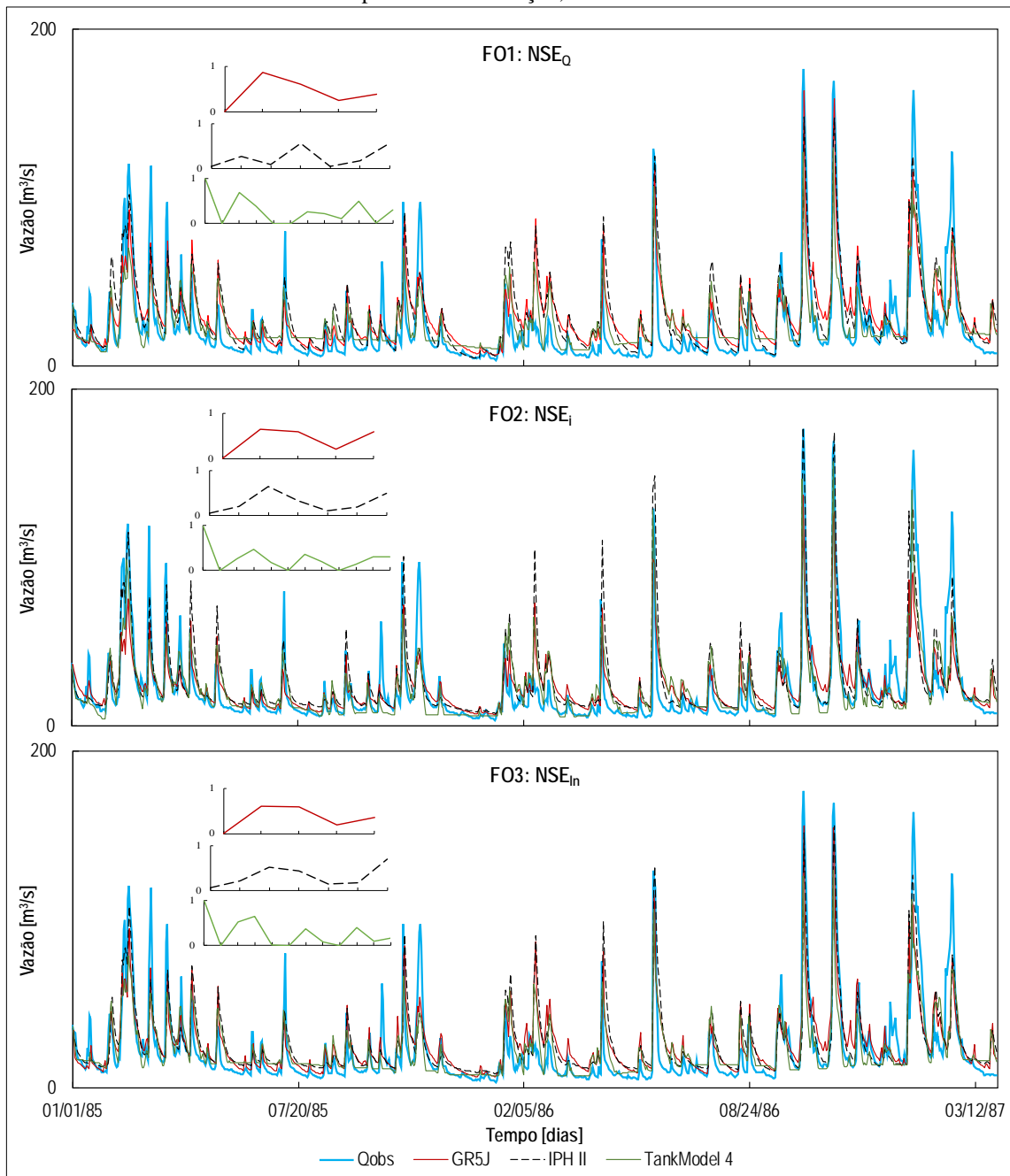
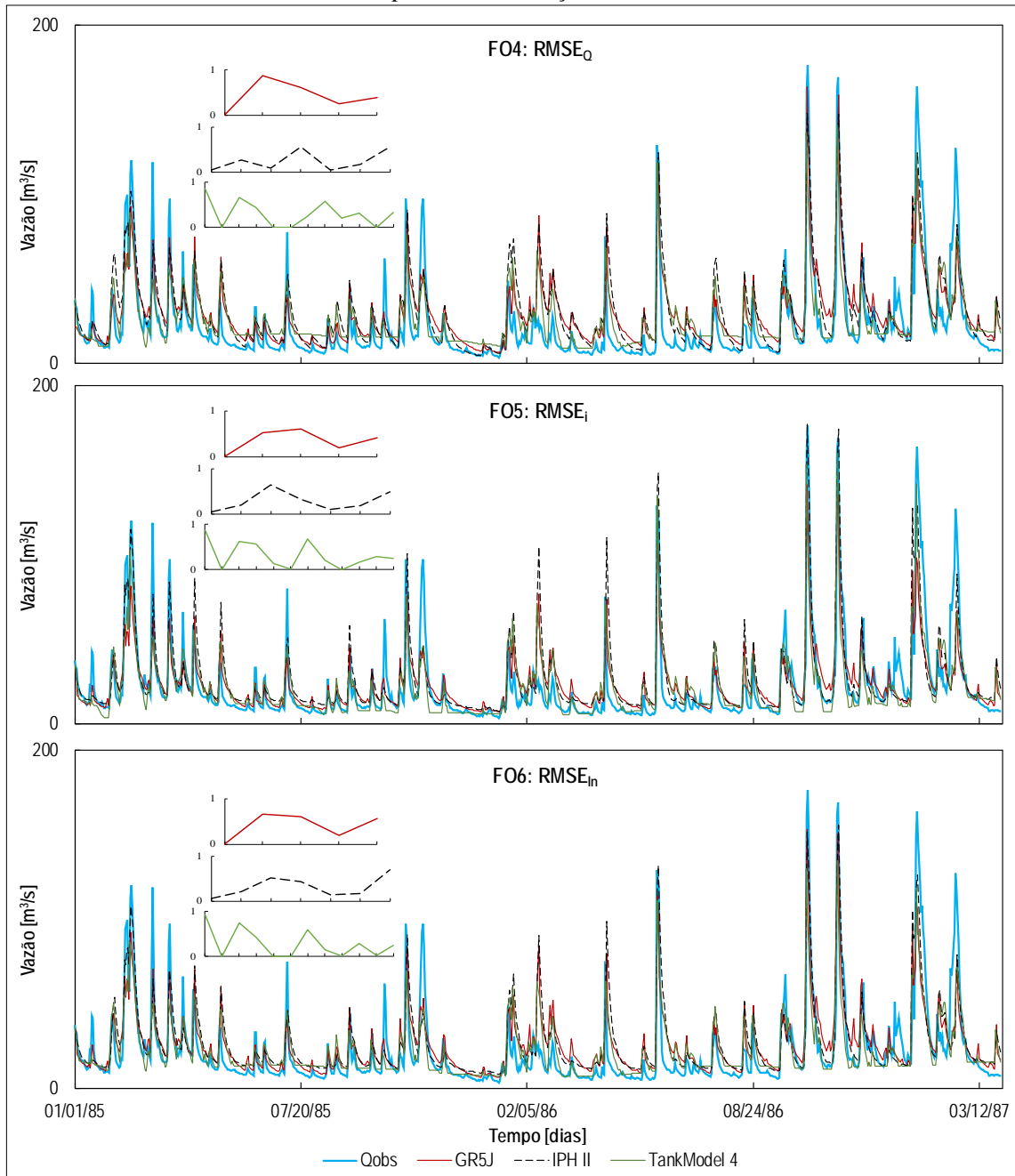


Figura A 13 - Hidrogramas dos modelos GR5J, IPH II e TankModel 4, para três Funções Objetivo RMSE, na bacia Vila Canoas no período de validação, 01/01/1985 - 31/03/1987



ANEXO B – CALIBRAÇÃO MULTI-OBJETIVO

Neste Apêndice, são apresentados os parâmetros normalizados dos modelos hidrológicos obtidos nos testes de calibração multi-objetivo e hidrogramas completos dos períodos de calibração Multi-Objetivo em cada bacia hidrográfica.

Parâmetros normalizados da calibração Multi-Objetivo do modelo GR5J

Figura B 1 - Parâmetros normalizados do teste de calibração Multi-Objetivo T1, na bacia a) rio Tesouras, b) Santo Ângelo e c) Vila Canoas

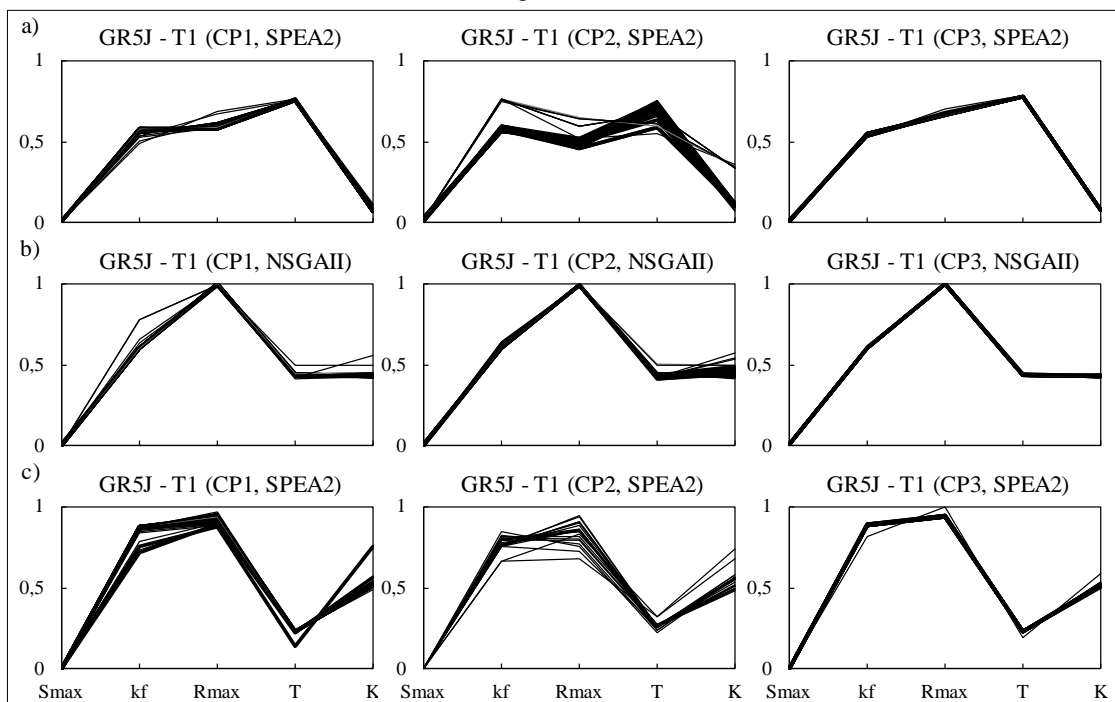
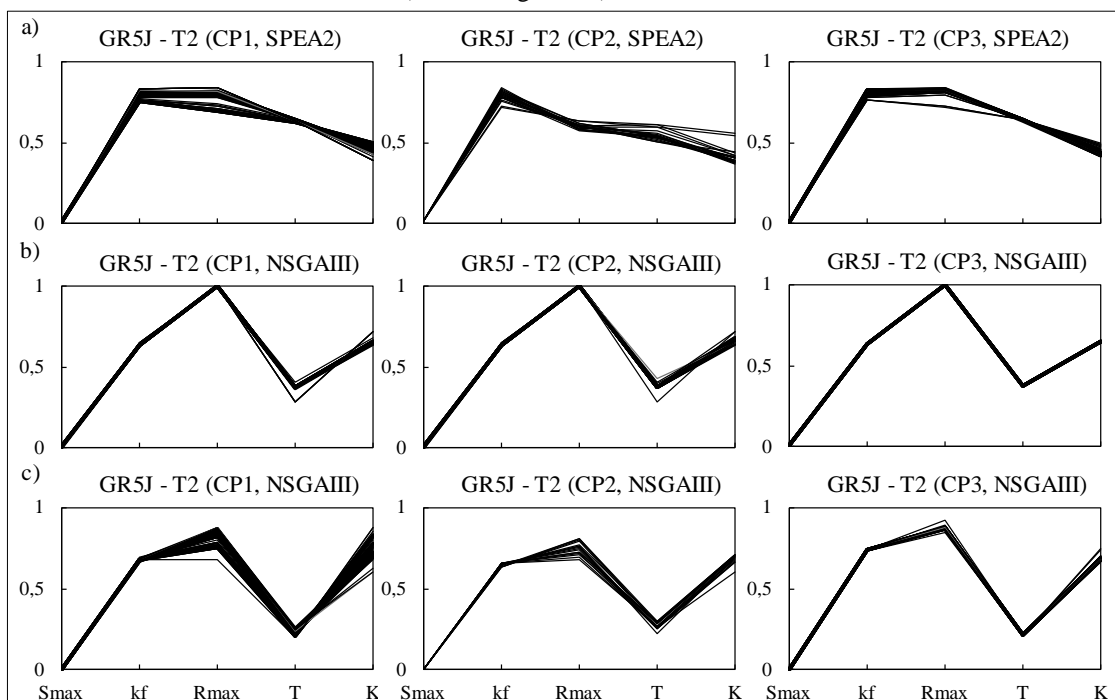


Figura B 2 - Parâmetros normalizados do teste de calibração Multi-Objetivo T2, na bacia a) rio Tesouras, b) Santo Ângelo e c) Vila Canoas



Parâmetros normalizados da calibração Multi-Objetivo do modelo IPH II

Figura B 3 - Parâmetros normalizados do teste de calibração Multi-Objetivo T1, na bacia a) rio Tesouras, b) Santo Ângelo e c) Vila Canoas

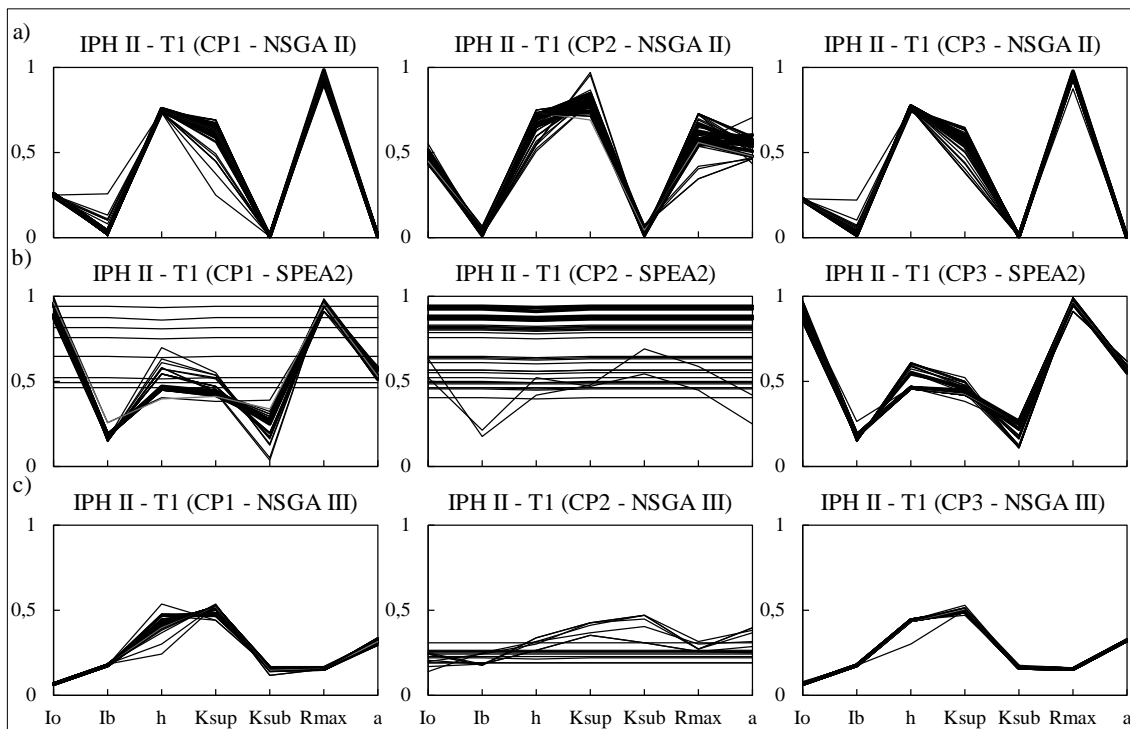
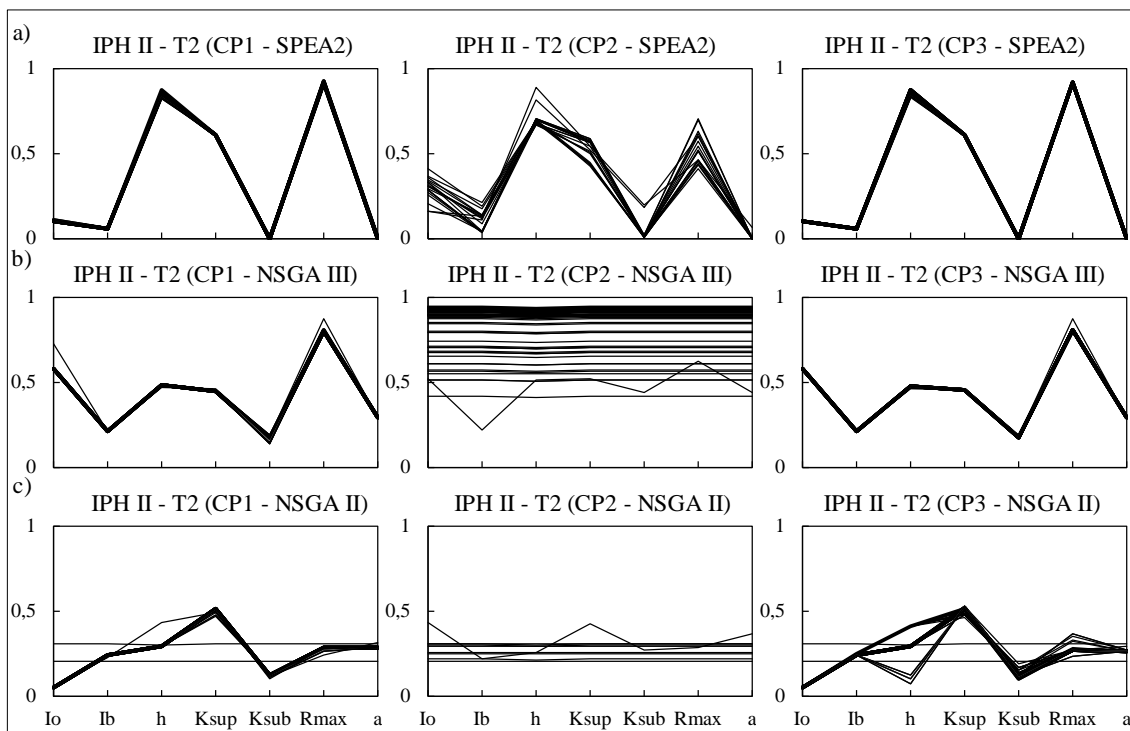


Figura B 4 - Parâmetros normalizados do teste de calibração Multi-Objetivo T2, na bacia a) rio Tesouras, b) Santo Ângelo e c) Vila Canoas



Parâmetros normalizados da calibração Multi-Objetivo do modelo TankModel 4

Figura B 5 - Parâmetros normalizados do teste de calibração Multi-Objetivo T1, na bacia a) rio Tesouras, b) Santo Ângelo e c) Vila Canoas

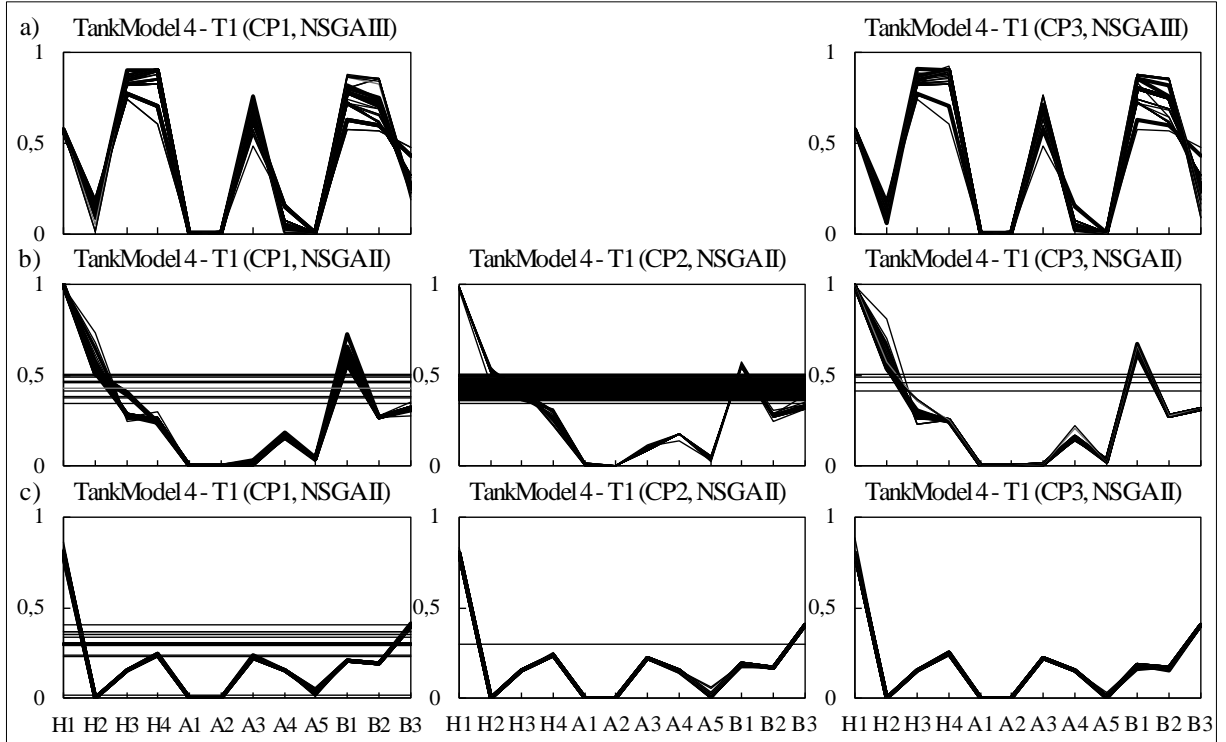
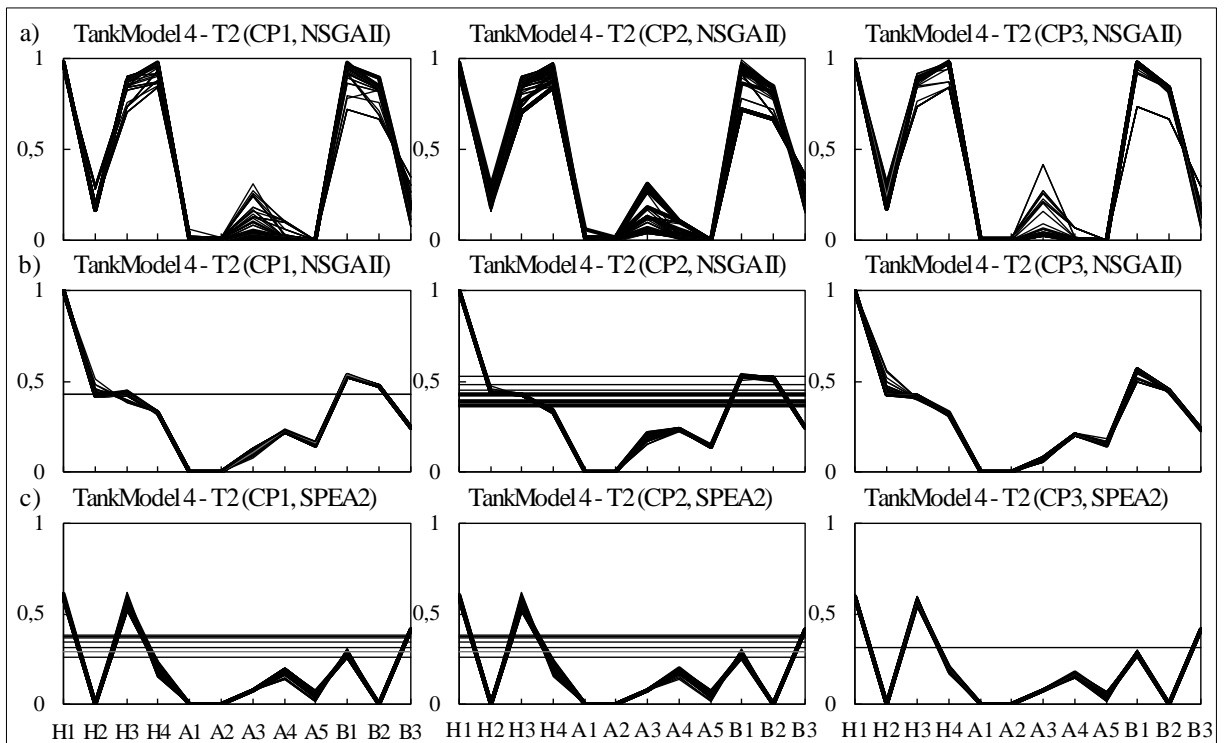
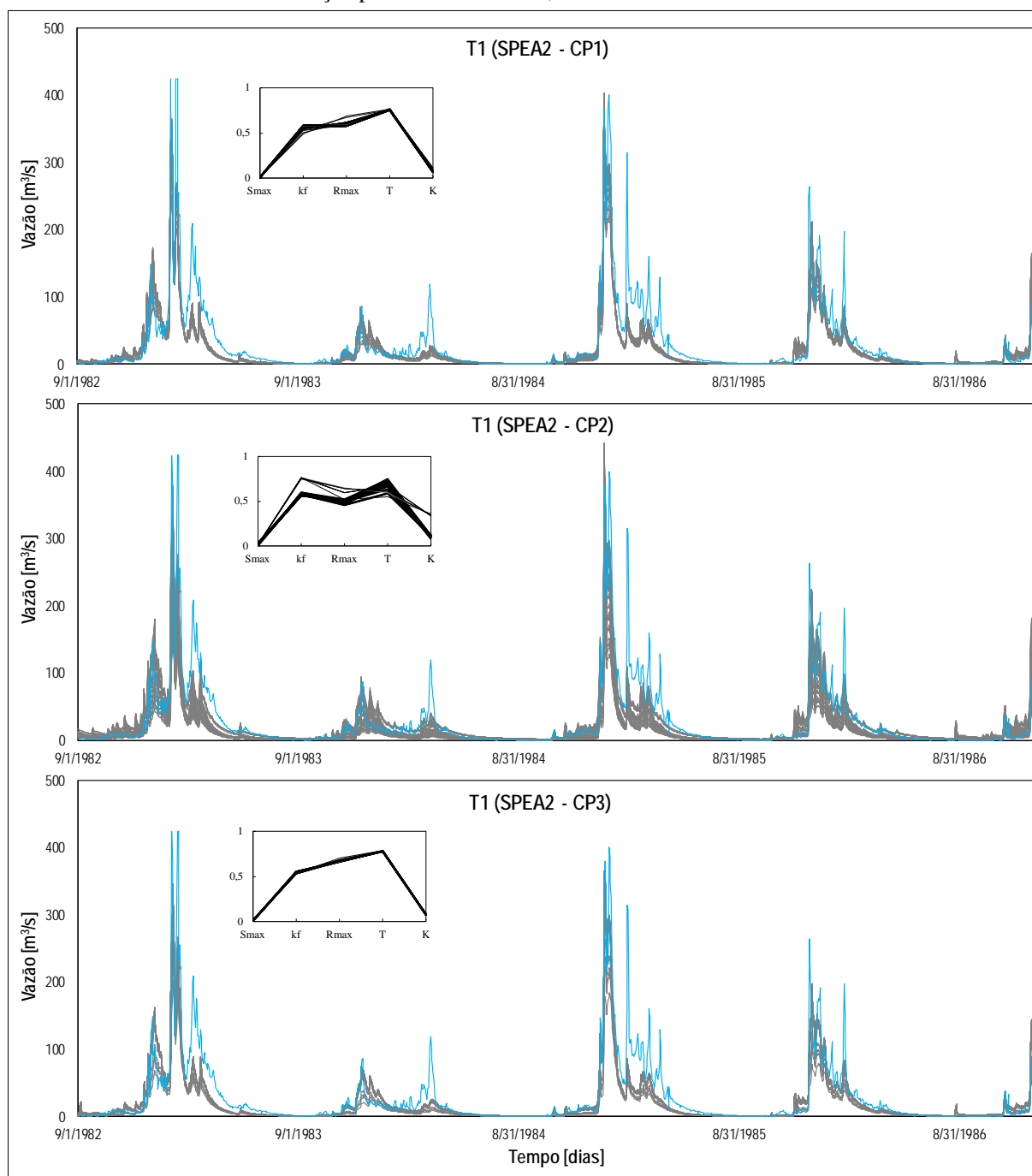


Figura B 6 - Parâmetros normalizados do teste de calibração Multi-Objetivo T2, na bacia a) rio Tesouras, b) Santo Ângelo e c) Vila Canoas



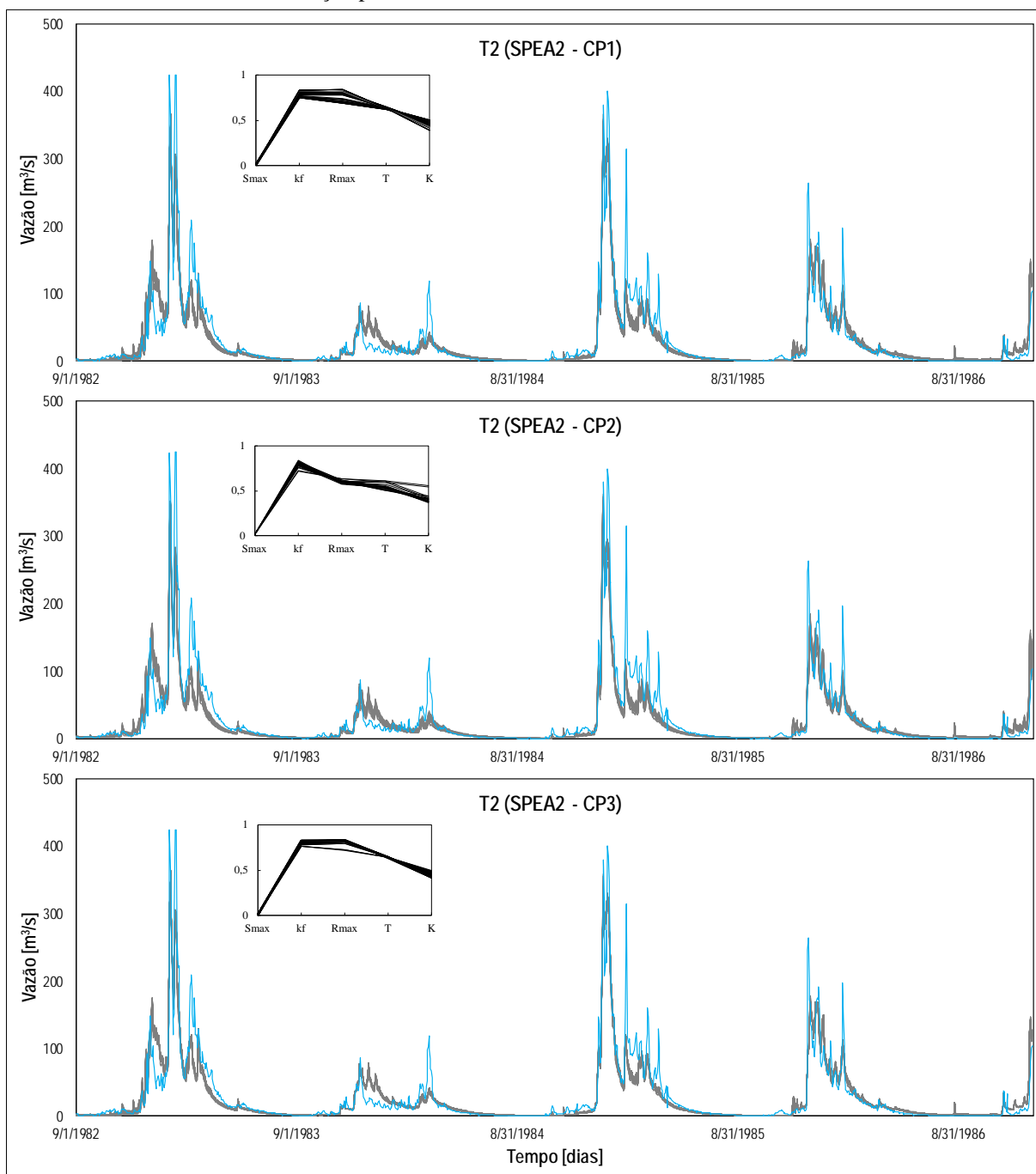
Hidrogramas na Bacia hidrográfica do rio Tesouras

Figura B 7 - Hidrogramas do teste T1, aplicando os critérios de parada, na bacia rio Tesouras no período de calibração para o modelo GR5J, 01/09/1982 - 31/12/1986



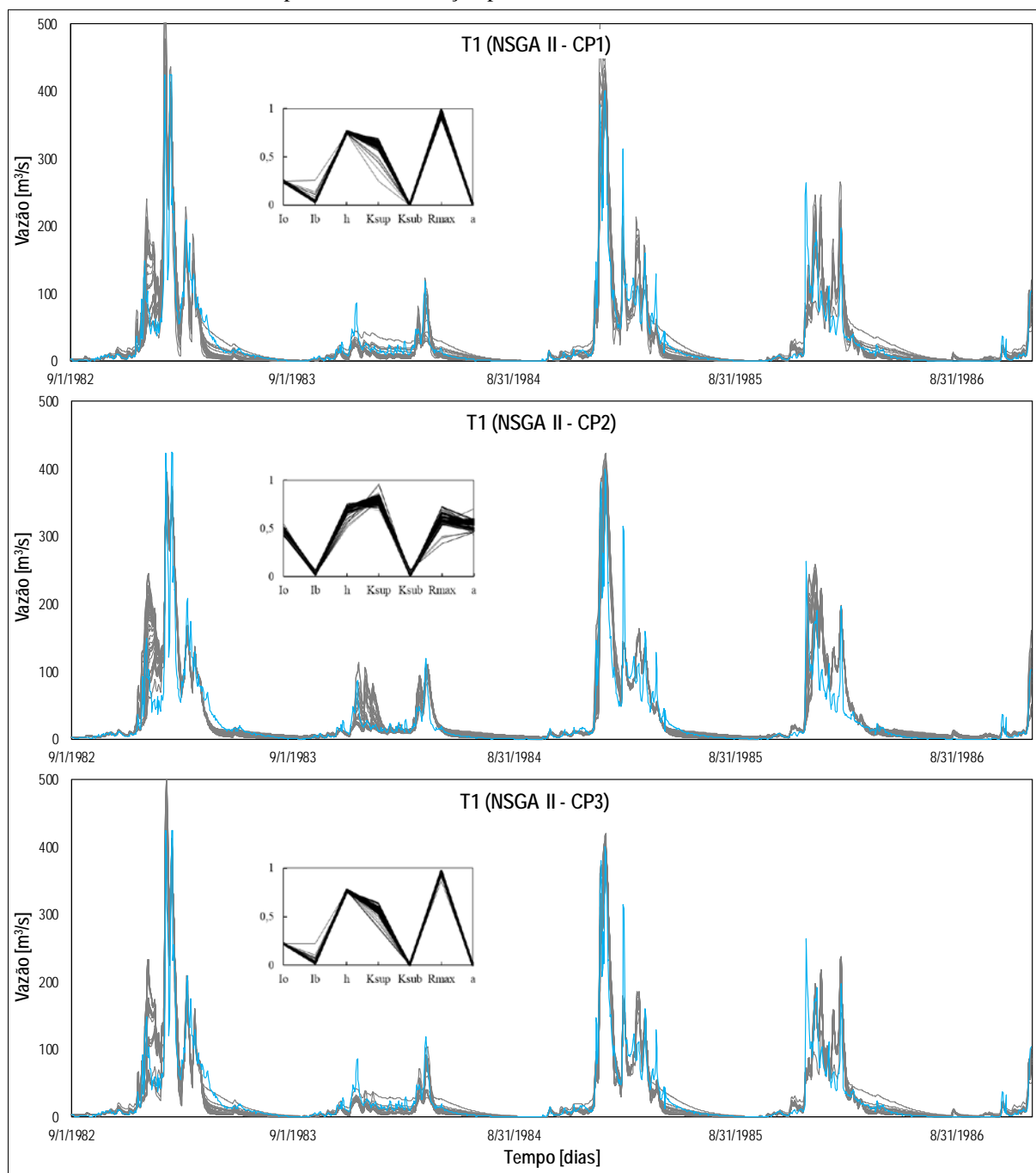
Legenda: Hidrograma da vazão observada (linha azul); Hidrogramas de vazão calculadas com os parâmetros das soluções não dominadas do FP (linhas cinzas); Sub-gráfico dos valores normalizados dos parâmetros do modelo GR5J utilizando o SPEA2 (linhas pretas).

Figura B 8 - Hidrogramas do teste T2, aplicando os critérios de parada, na bacia rio Tesouras no período de calibração para o modelo GR5J, 01/09/1982 - 31/12/1986



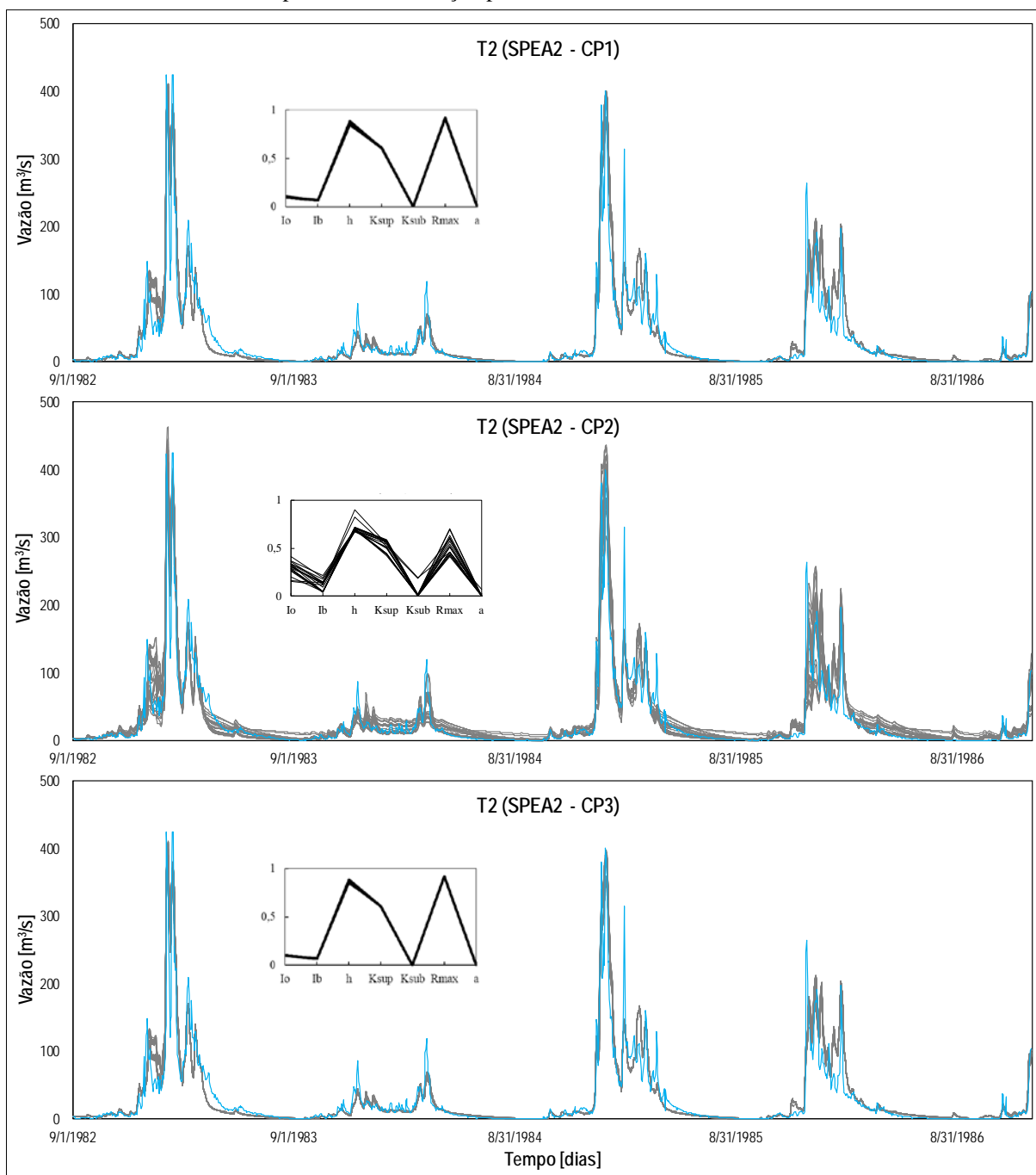
Legenda: Hidrograma da vazão observada (linha azul); Hidrogramas de vazão calculadas com os parâmetros das soluções não dominadas do FP (linhas cinzas); Sub-gráfico dos valores normalizados dos parâmetros do modelo GR5J utilizando o SPEA2 (linhas pretas).

Figura B 9 - Hidrogramas de todos os parâmetros do FP no teste T1, aplicando os critérios de parada, na bacia Rio Tesouras no período de calibração para o modelo IPH II, 01/09/1982 - 31/12/1986



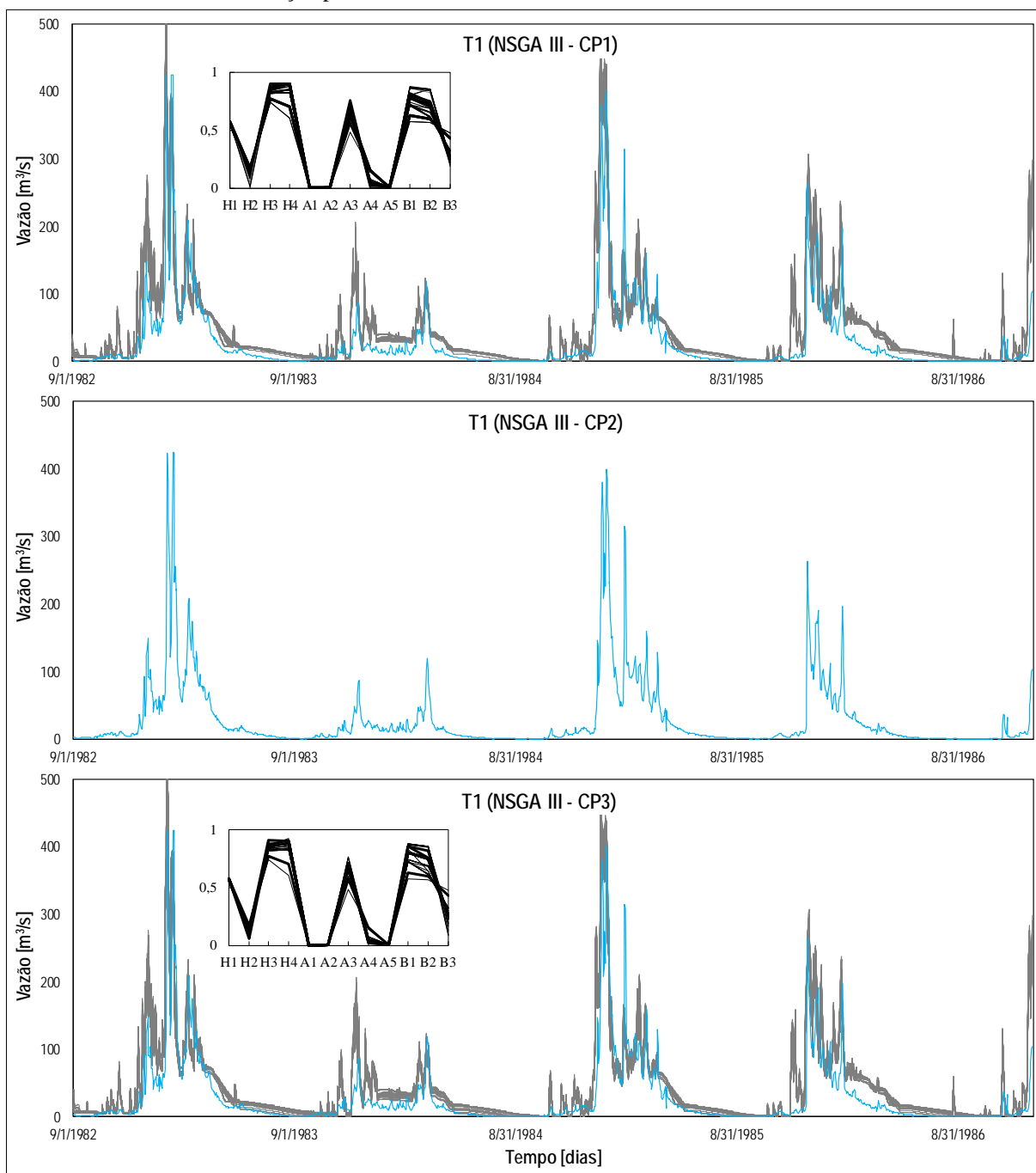
Legenda: Hidrograma da vazão observada (linha azul); Hidrogramas de vazão calculadas com os parâmetros das soluções não dominadas do FP (linhas cinzas); Sub-gráfico dos valores normalizados dos parâmetros do modelo IPH II utilizando o NSGA II (linhas pretas).

Figura B 10 - Hidrogramas de todos os parâmetros do FP no teste T2, aplicando os critérios de parada, na bacia Rio Tesouras no período de calibração para o modelo IPH II, 01/09/1982 - 31/12/1986



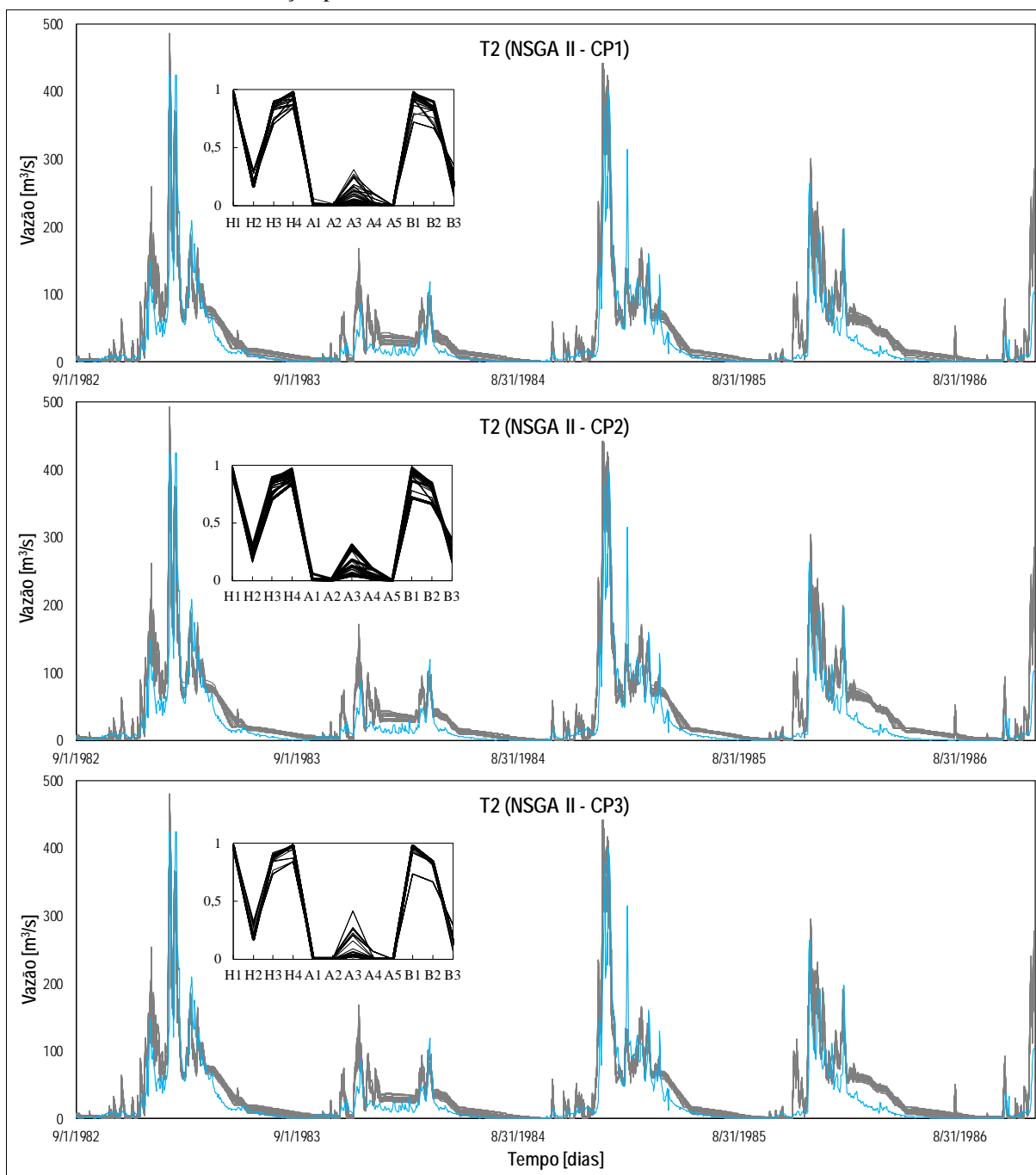
Legenda: Hidrograma da vazão observada (linha azul); Hidrogramas de vazão calculadas com os parâmetros das soluções não dominadas do FP (linhas cinzas); Sub-gráfico dos valores normalizados dos parâmetros do modelo IPH II utilizando o SPEA2 (linhas pretas).

Figura B 11 - Hidrogramas do teste T1, aplicando os critérios de parada, na bacia rio Tesouras no período de calibração para o modelo TankModel 4, 01/09/1982 - 31/12/1986



Legenda: Hidrograma da vazão observada (linha azul); Hidrogramas de vazão calculadas com os parâmetros das soluções não dominadas do FP (linhas cinzas); Sub-gráfico dos valores normalizados dos parâmetros do modelo TankModel 4 utilizando o NSGA III (linhas pretas).

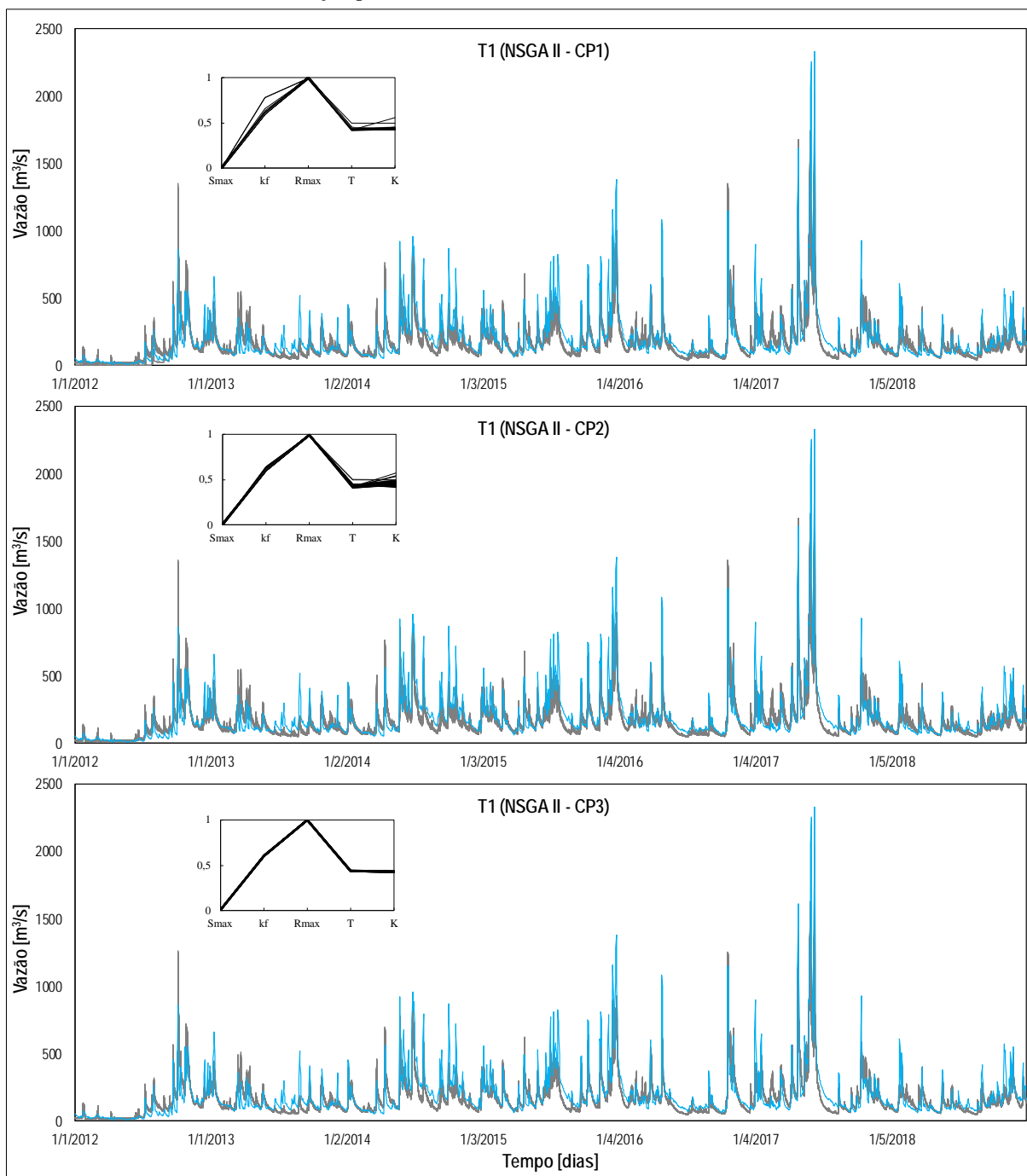
Figura B 12 - Hidrogramas do teste T2, aplicando os critérios de parada, na bacia rio Tesouras no período de calibração para o modelo TankModel 4, 01/09/1982 - 31/12/1986



Legenda: Hidrograma da vazão observada (linha azul); Hidrogramas de vazão calculadas com os parâmetros das soluções não dominadas do FP (linhas cinzas); Sub-gráfico dos valores normalizados dos parâmetros do modelo TankModel 4 utilizando o NSGA II (linhas pretas).

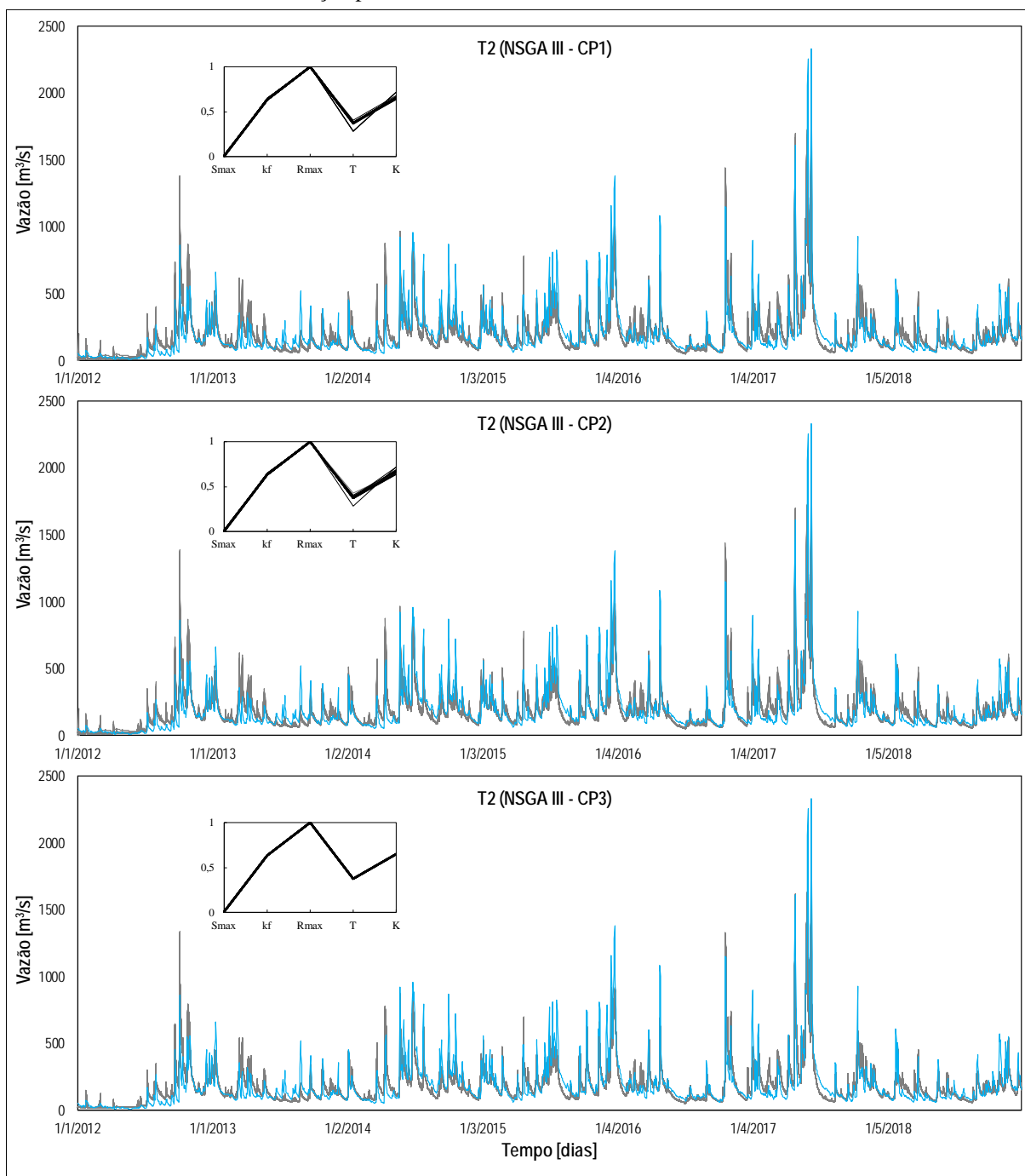
Bacia hidrográfica do Santo Ângelo

Figura B 13 - Hidrogramas do teste T1, aplicando os critérios de parada, na bacia Santo Ângelo no período de calibração para o modelo GR5J, 01/01/1912 - 31/12/1918



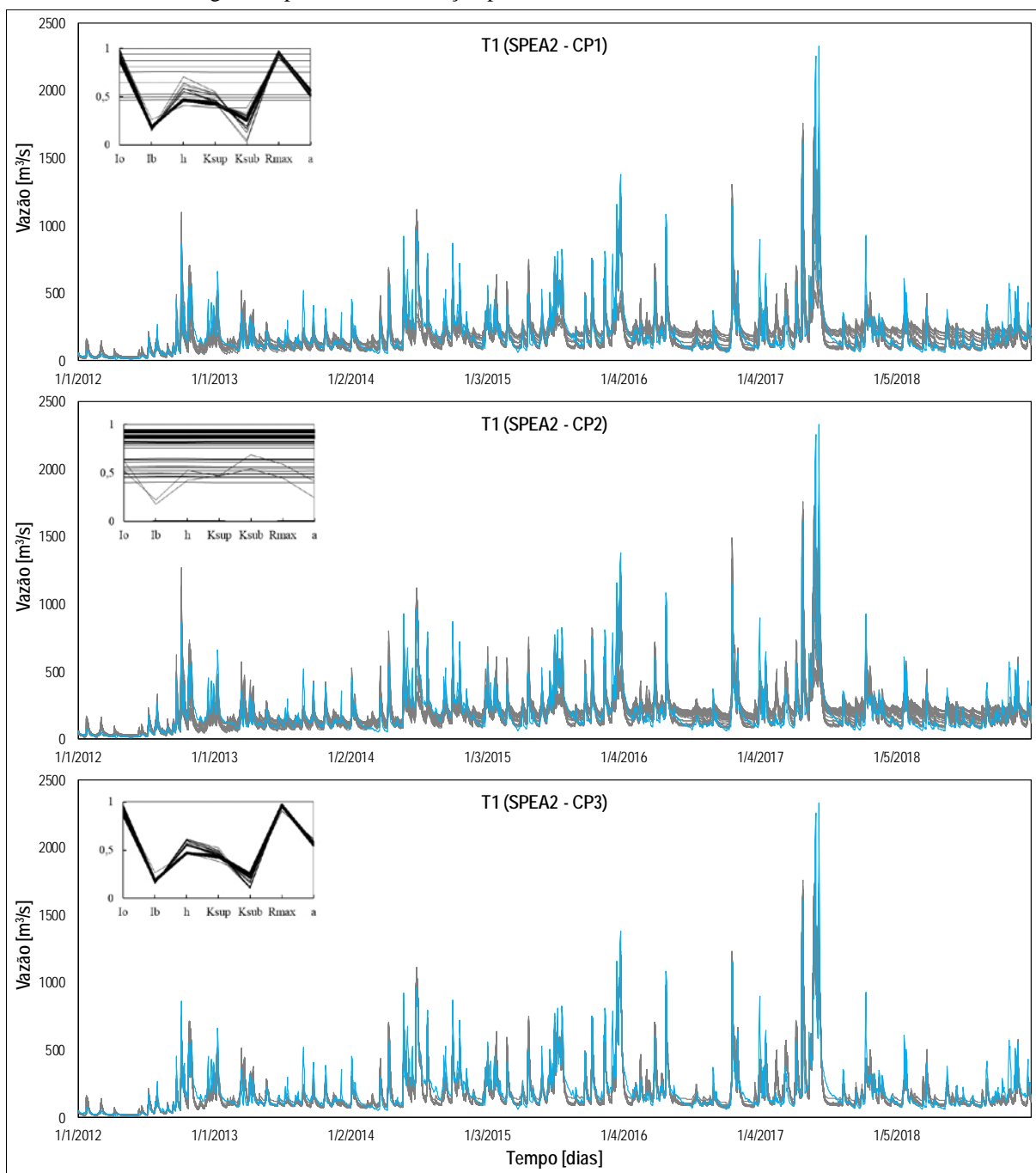
Legenda: Hidrograma da vazão observada (linha azul); Hidrogramas de vazão calculadas com os parâmetros das soluções não dominadas do FP (linhas cinzas); Sub-gráfico dos valores normalizados dos parâmetros do modelo GR5J utilizando o NSGA II (linhas pretas).

Figura B 14 - Hidrogramas do teste T2, aplicando os critérios de parada, na bacia Santo Ângelo no período de calibração para o modelo GR5J, 01/01/1912 - 31/12/1918



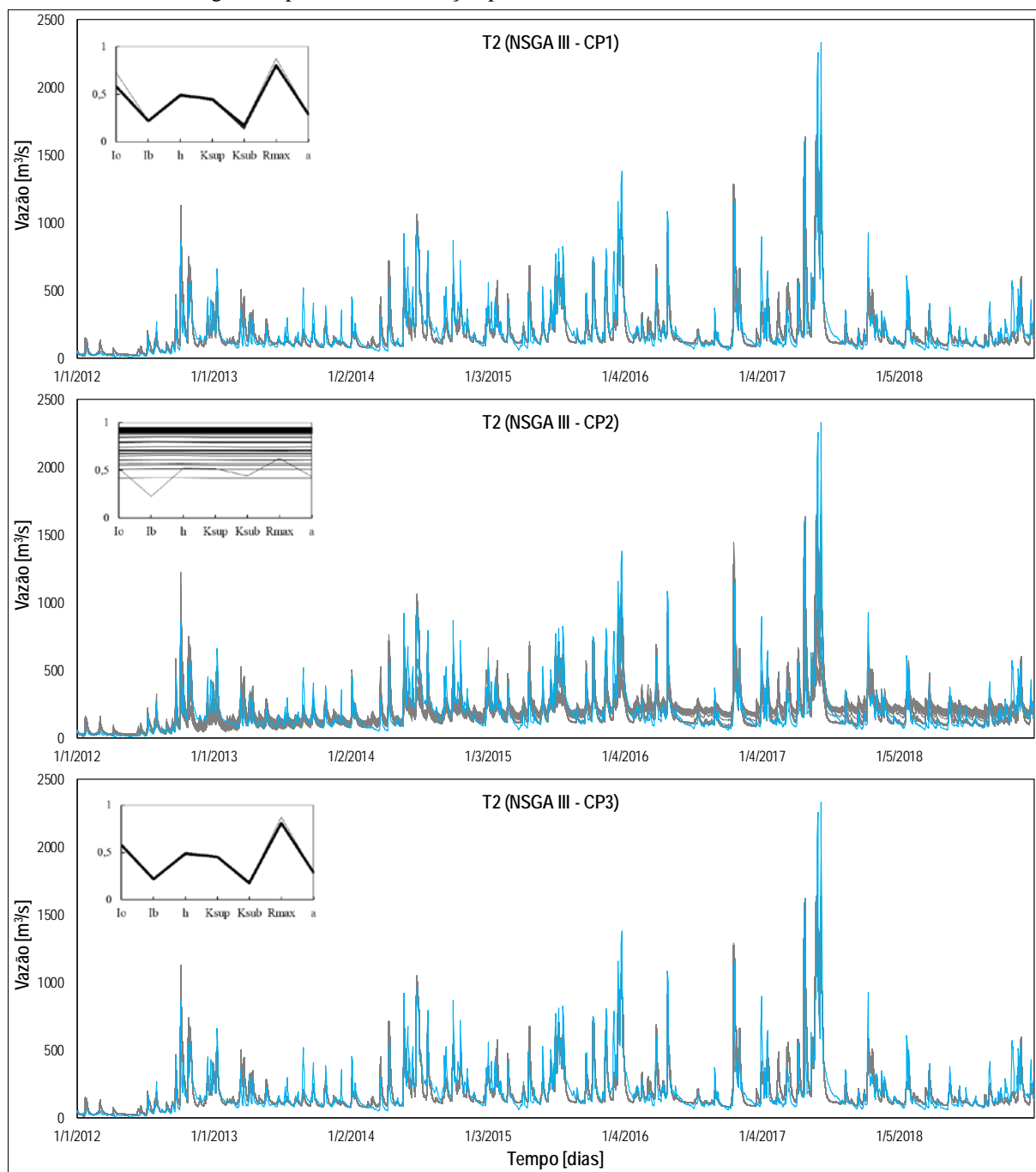
Legenda: Hidrograma da vazão observada (linha azul); Hidrogramas de vazão calculadas com os parâmetros das soluções não dominadas do FP (linhas cinzas); Sub-gráfico dos valores normalizados dos parâmetros do modelo GR5J utilizando o NSGA III (linhas pretas).

Figura B 15 - Hidrogramas de todos os parâmetros do FP no teste T1, aplicando os critérios de parada, na bacia Santo Ângelo no período de calibração para o modelo IPH II, 01/01/1912 - 31/12/1918



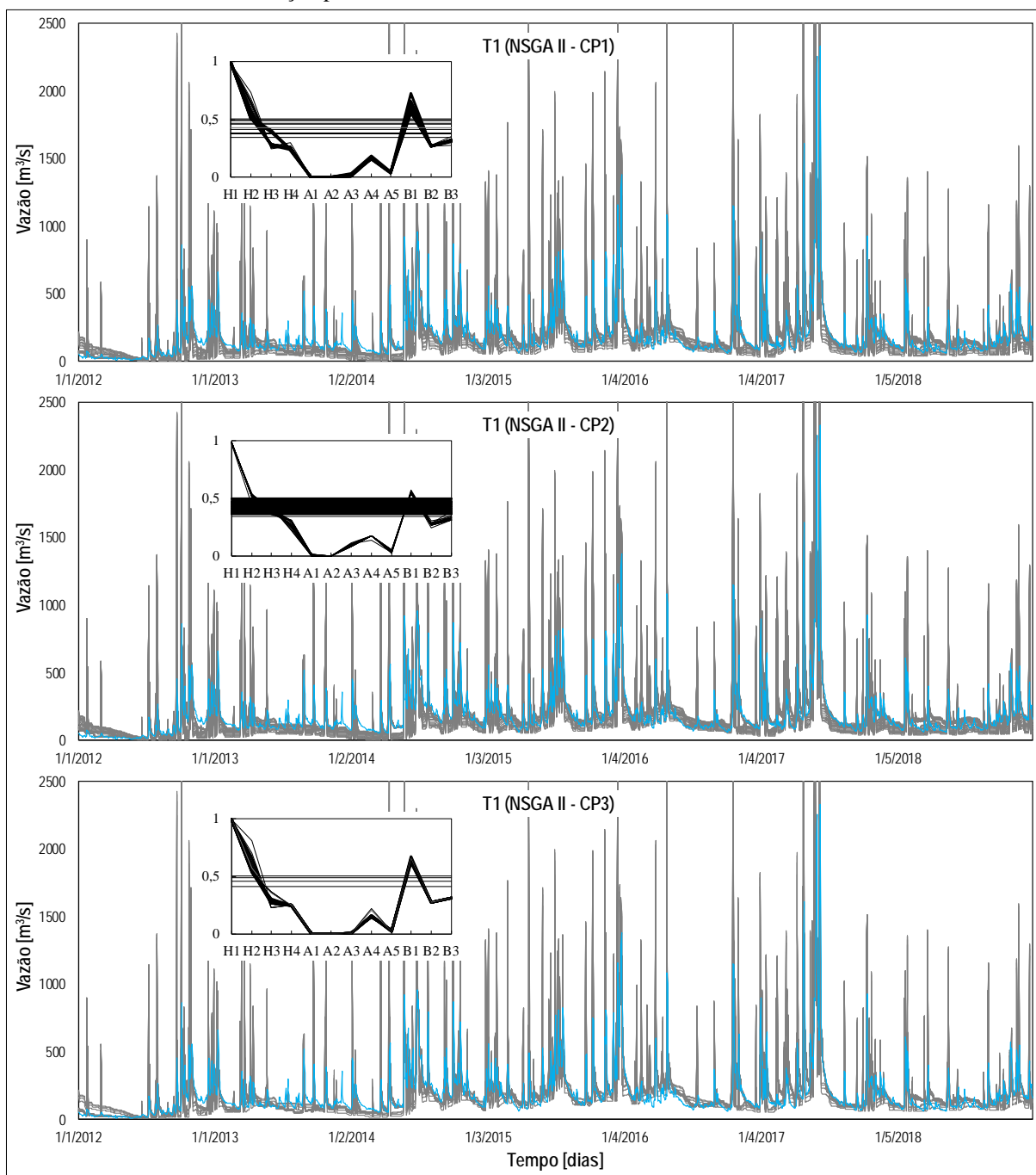
Legenda: Hidrograma da vazão observada (linha azul); Hidrogramas de vazão calculadas com os parâmetros das soluções não dominadas do FP (linhas cinzas); Sub-gráfico dos valores normalizados dos parâmetros do modelo IPH II utilizando o SPEA2 (linhas pretas).

Figura B 16 - Hidrogramas de todos os parâmetros do FP no teste T2, aplicando os critérios de parada, na bacia Santo Ângelo no período de calibração para o modelo IPH II, 01/01/1912 - 31/12/1918



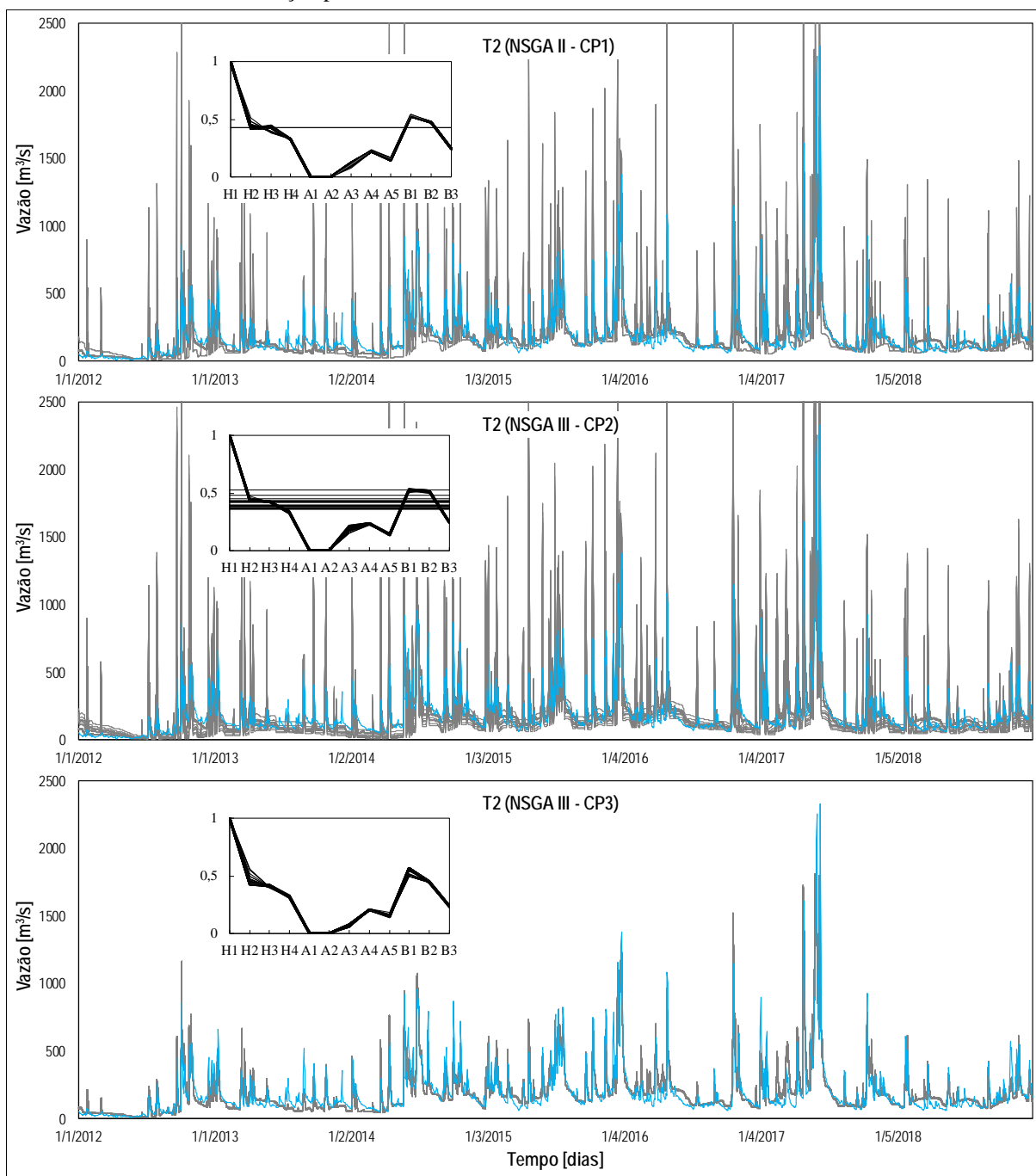
Legenda: Hidrograma da vazão observada (linha azul); Hidrogramas de vazão calculadas com os parâmetros das soluções não dominadas do FP (linhas cinzas); Sub-gráfico dos valores normalizados dos parâmetros do modelo IPH II utilizando o NSGA III (linhas pretas).

Figura B 17 - Hidrogramas do teste T1, aplicando os critérios de parada, na bacia Santo Ângelo no período de calibração para o modelo TankModel 4, 01/01/1912 - 31/12/1918



Legenda: Hidrograma da vazão observada (linha azul); Hidrogramas de vazão calculadas com os parâmetros das soluções não dominadas do FP (linhas cinzas); Sub-gráfico dos valores normalizados dos parâmetros do modelo TankModel 4 utilizando o NSGA II (linhas pretas).

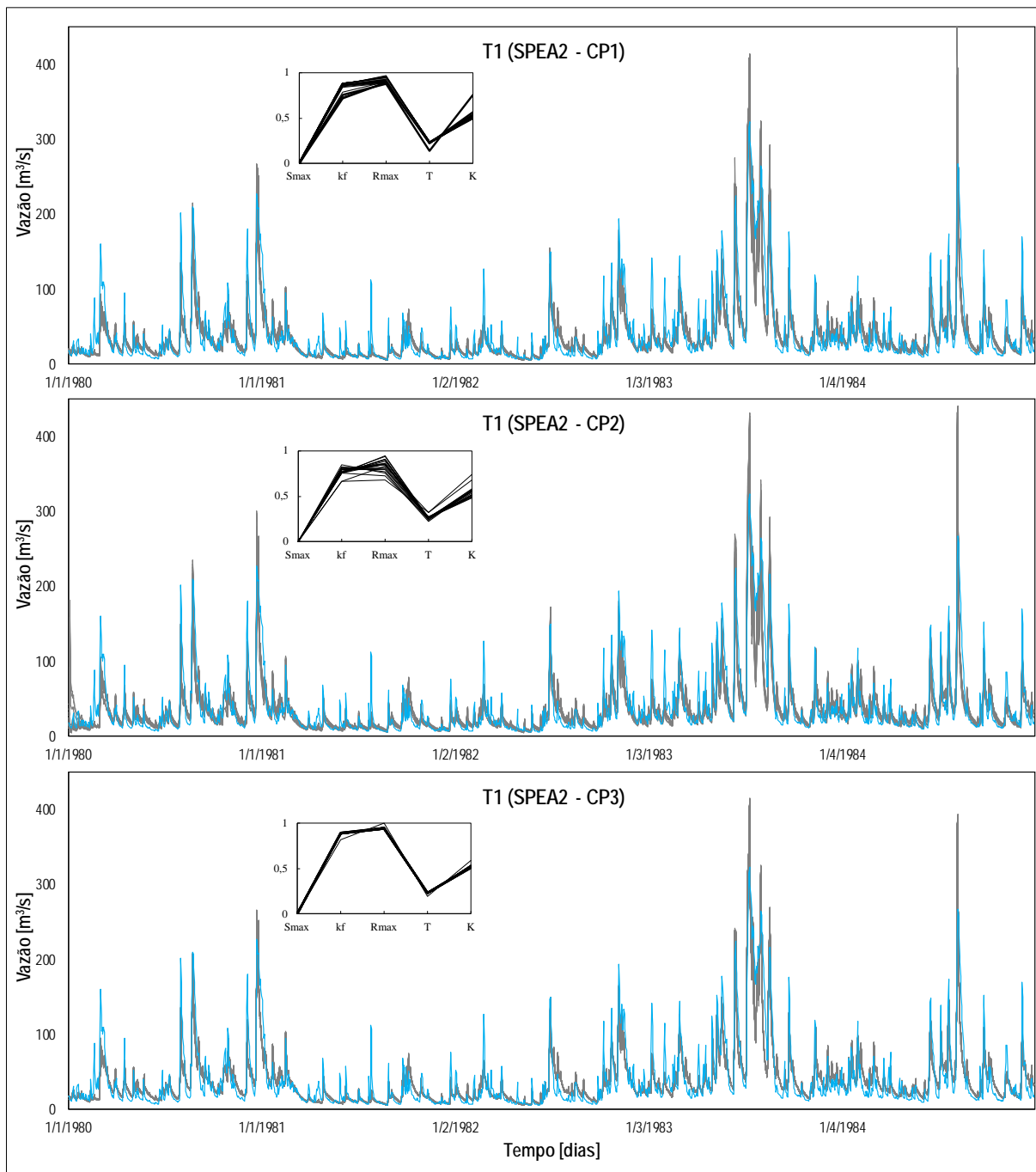
Figura B 18 - Hidrogramas do teste T2, aplicando os critérios de parada, na bacia Santo Ângelo no período de calibração para o modelo TankModel 4, 01/01/1912 - 31/12/1918



Legenda: Hidrograma da vazão observada (linha azul); Hidrogramas de vazão calculadas com os parâmetros das soluções não dominadas do FP (linhas cinzas); Sub-gráfico dos valores normalizados dos parâmetros do modelo TankModel 4 utilizando o NSGA III (linhas pretas).

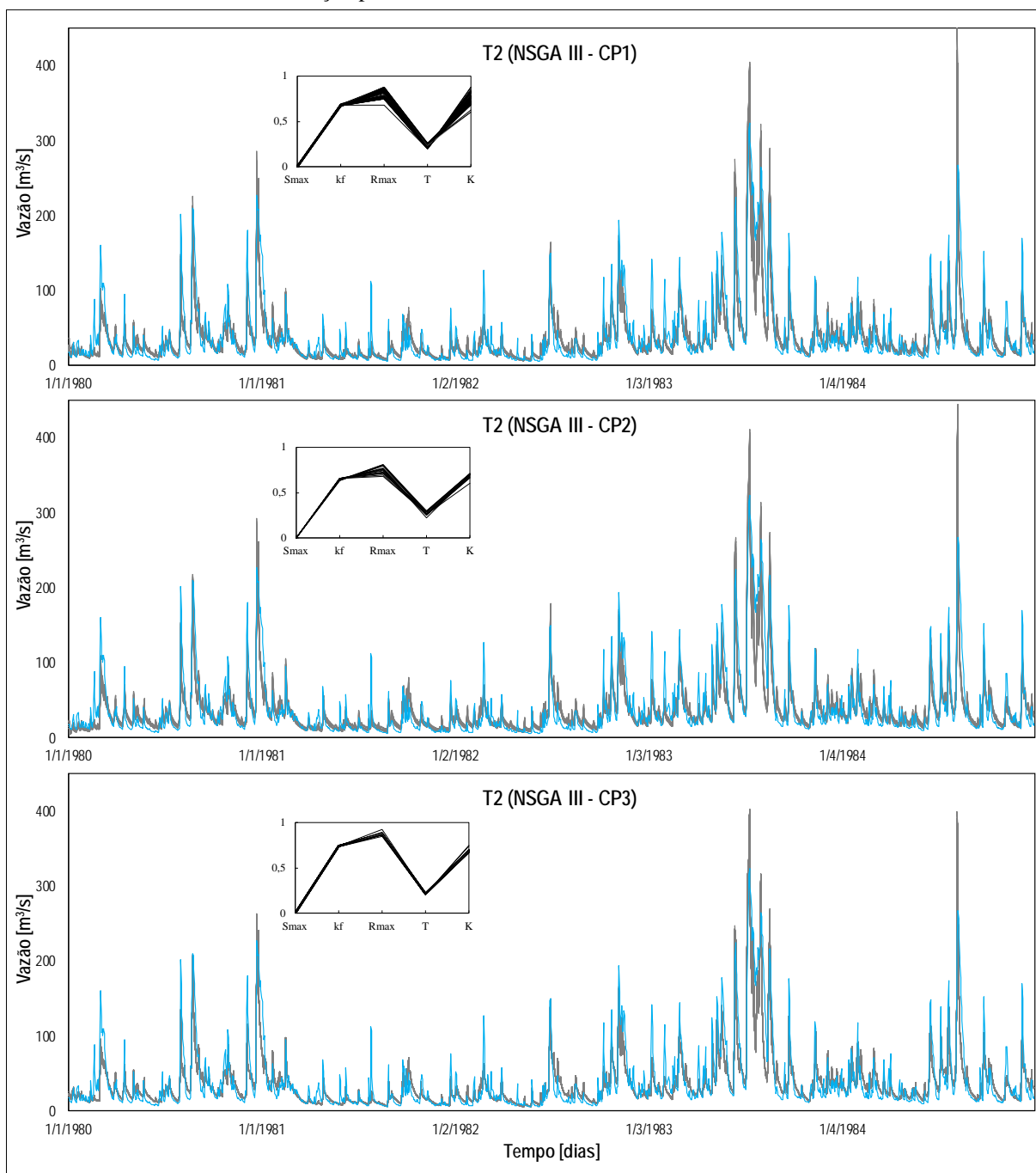
Bacia hidrográfica do rio Vila Canoas

Figura B 19 - Hidrogramas do teste T1, aplicando os critérios de parada, na bacia Vila Canoas no período de calibração para o modelo GR5J, 01/01/1980 - 31/12/1984



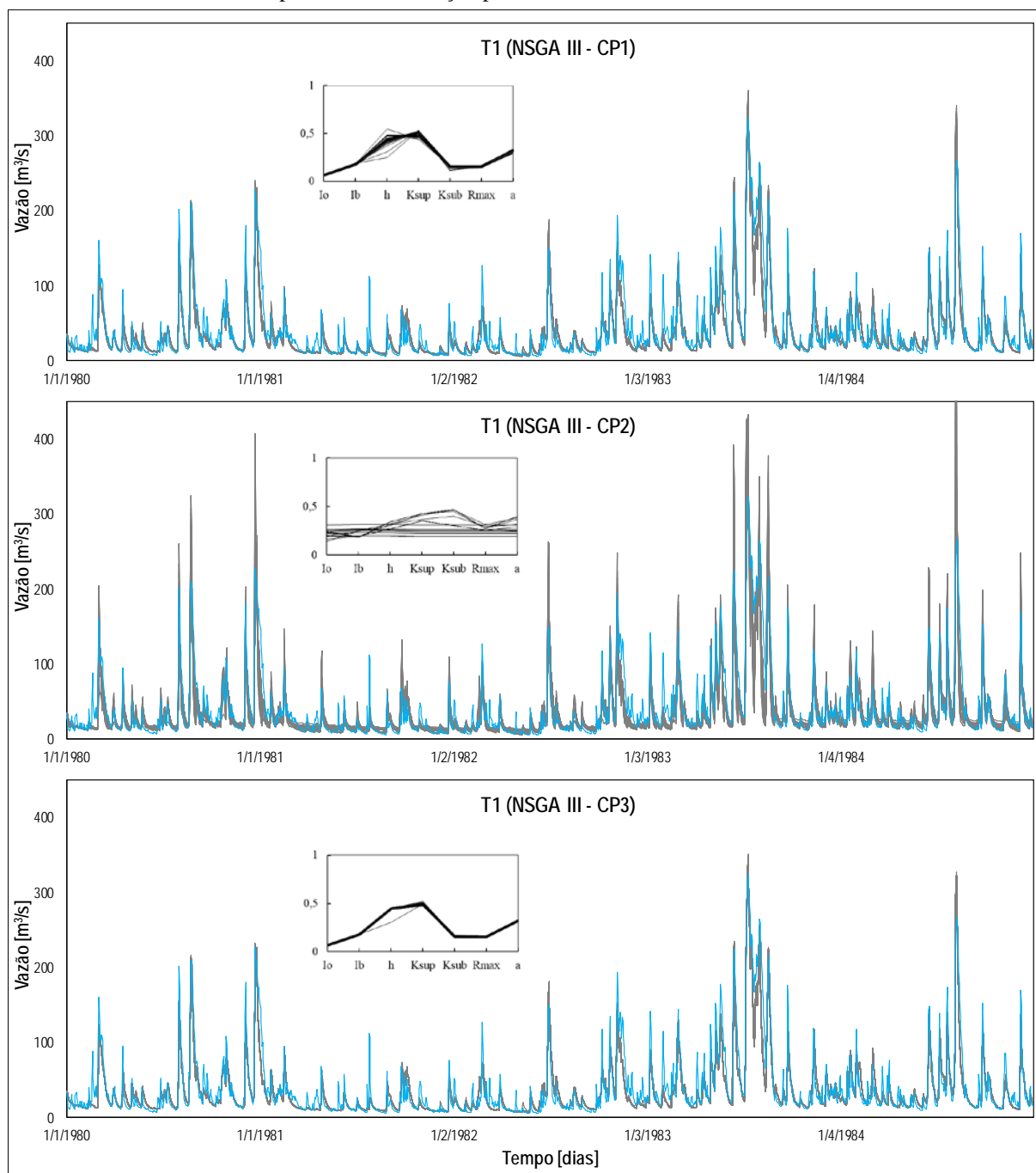
Legenda: Hidrograma da vazão observada (linha azul); Hidrogramas de vazão calculadas com os parâmetros das soluções não dominadas do FP (linhas cinzas); Sub-gráfico dos valores normalizados dos parâmetros do modelo GR5J utilizando o SPEA2 (linhas pretas).

Figura B 20 - Hidrogramas do teste T2, aplicando os critérios de parada, na bacia Vila Canoas no período de calibração para o modelo GR5J, 01/01/1980 - 31/12/1984



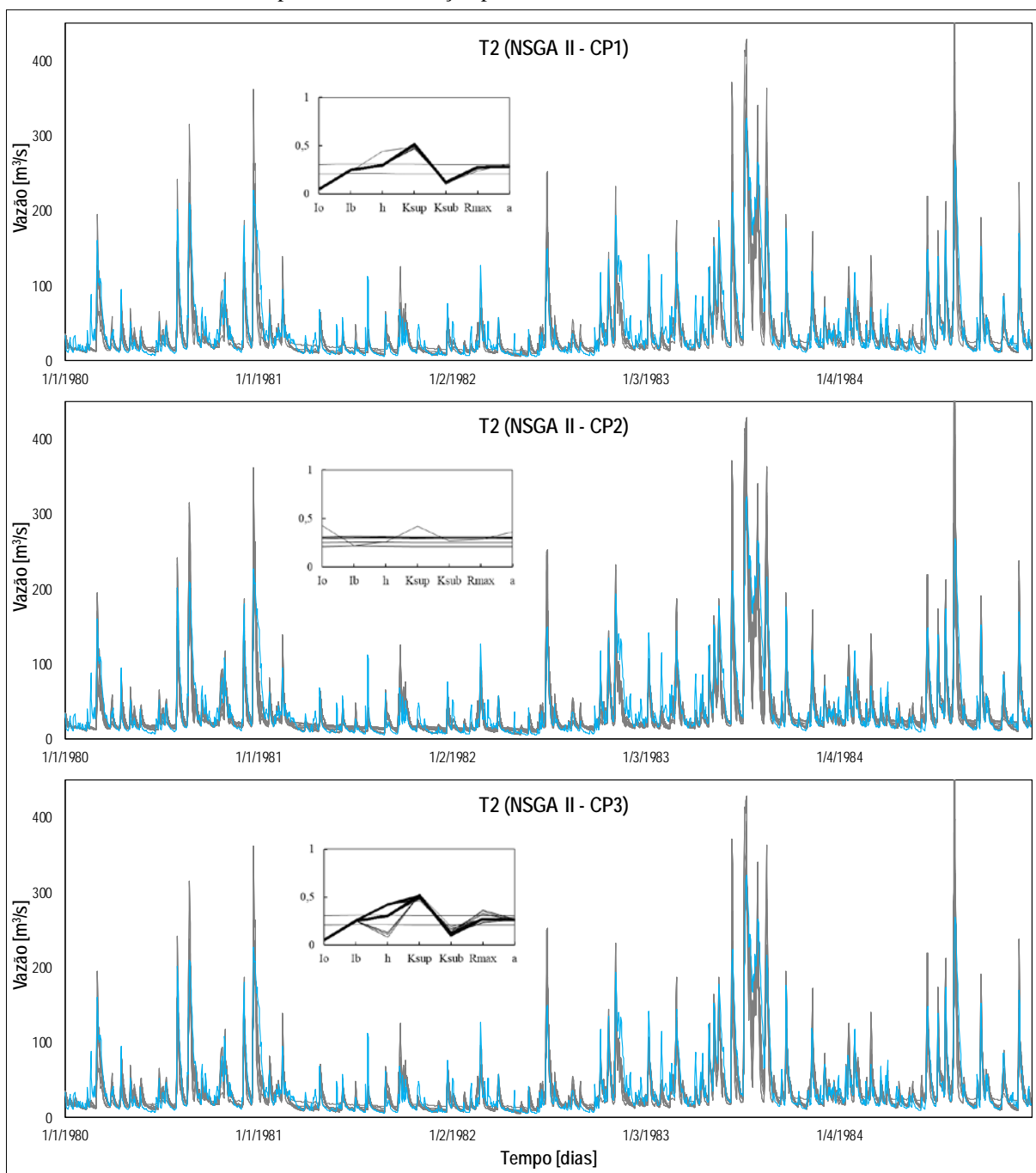
Legenda: Hidrograma da vazão observada (linha azul); Hidrogramas de vazão calculadas com os parâmetros das soluções não dominadas do FP (linhas cinzas); Sub-gráfico dos valores normalizados dos parâmetros do modelo GR5J utilizando o NSGA III (linhas pretas).

Figura B 21 - Hidrogramas de todos os parâmetros do FP no teste T1, aplicando os critérios de parada, na bacia Vila Canoas no período de calibração para o modelo IPH II, 01/01/1980 - 31/12/1984



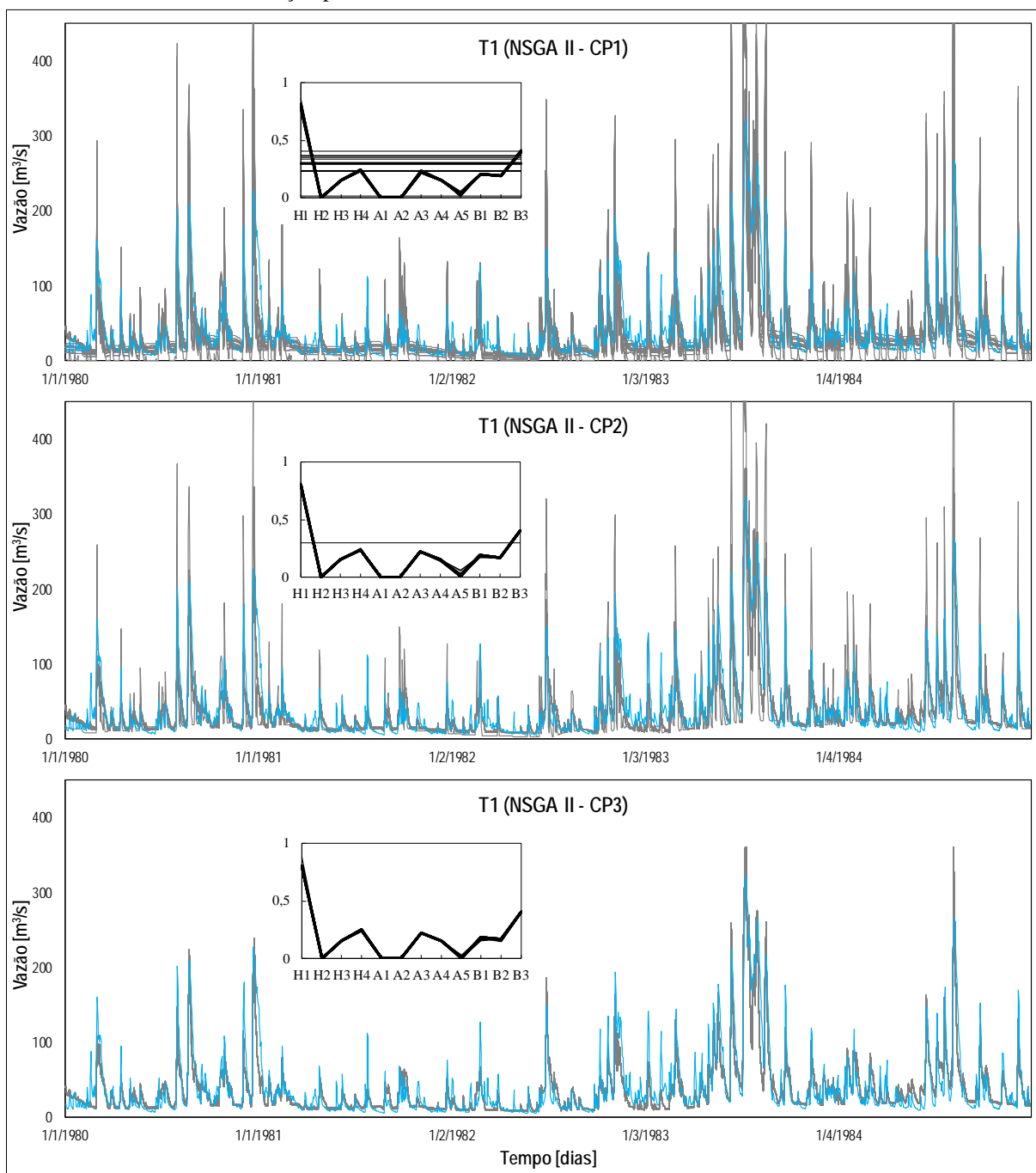
Legenda: Hidrograma da vazão observada (linha azul); Hidrogramas de vazão calculadas com os parâmetros das soluções não dominadas do FP (linhas cinzas); Sub-gráfico dos valores normalizados dos parâmetros do modelo IPH II utilizando o NSGA III (linhas pretas).

Figura B 22 - Hidrogramas de todos os parâmetros do FP no teste T2, aplicando os critérios de parada, na bacia Vila Canoas no período de calibração para o modelo IPH II, 01/01/1980 - 31/12/1984



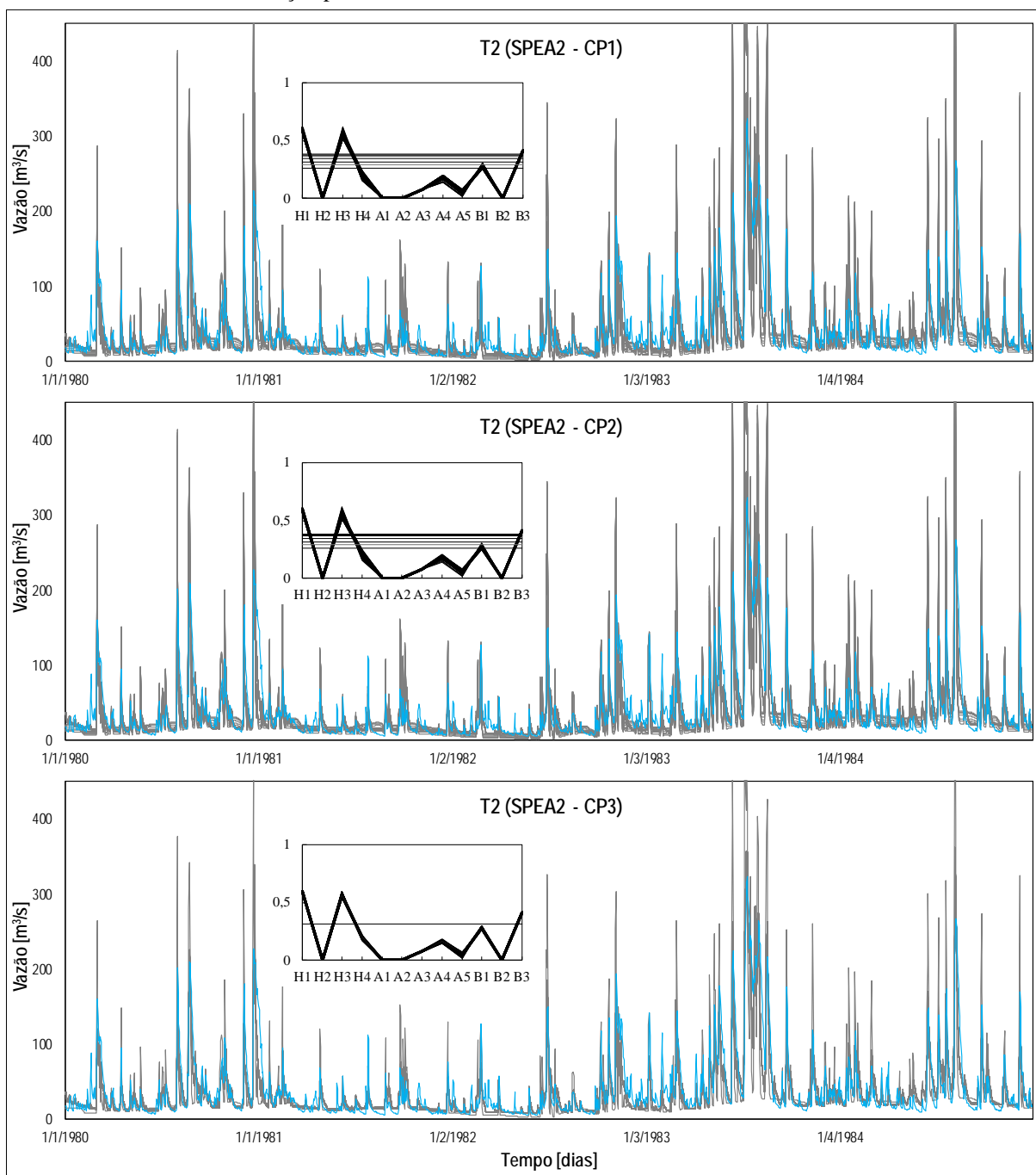
Legenda: Hidrograma da vazão observada (linha azul); Hidrogramas de vazão calculadas com os parâmetros das soluções não dominadas do FP (linhas cinzas); Sub-gráfico dos valores normalizados dos parâmetros do modelo IPH II utilizando o NSGA II (linhas pretas).

Figura B 23 - Hidrogramas do teste T1, aplicando os critérios de parada, na bacia Vila Canoas no período de calibração para o modelo TankModel 4, 01/01/1980 - 31/12/1984



Legenda: Hidrograma da vazão observada (linha azul); Hidrogramas de vazão calculadas com os parâmetros das soluções não dominadas do FP (linhas cinzas); Sub-gráfico dos valores normalizados dos parâmetros do modelo TankModel 4 utilizando o NSGA II (linhas pretas).

Figura B 24 - Hidrogramas do teste T2, aplicando os critérios de parada, na bacia Vila Canoas no período de calibração para o modelo TankModel 4, 01/01/1980 - 31/12/1984

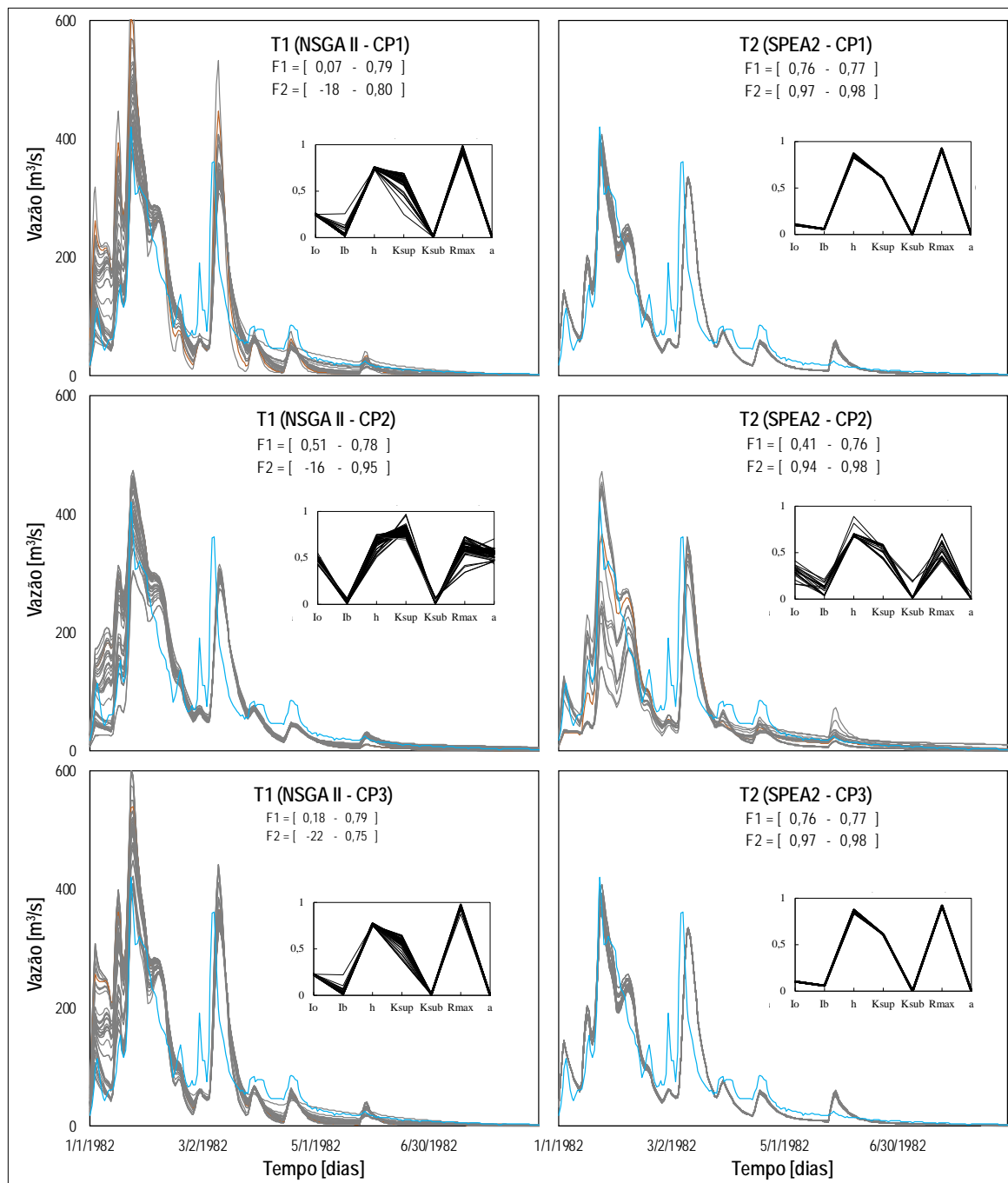


Legenda: Hidrograma da vazão observada (linha azul); Hidrogramas de vazão calculadas com os parâmetros das soluções não dominadas do FP (linhas cinzas); Sub-gráfico dos valores normalizados dos parâmetros do modelo TankModel 4 utilizando o SPEA2 (linhas pretas).

ANEXO C – MELHOR MODELO DA CALIBRAÇÃO MULTI-OBJETIVO

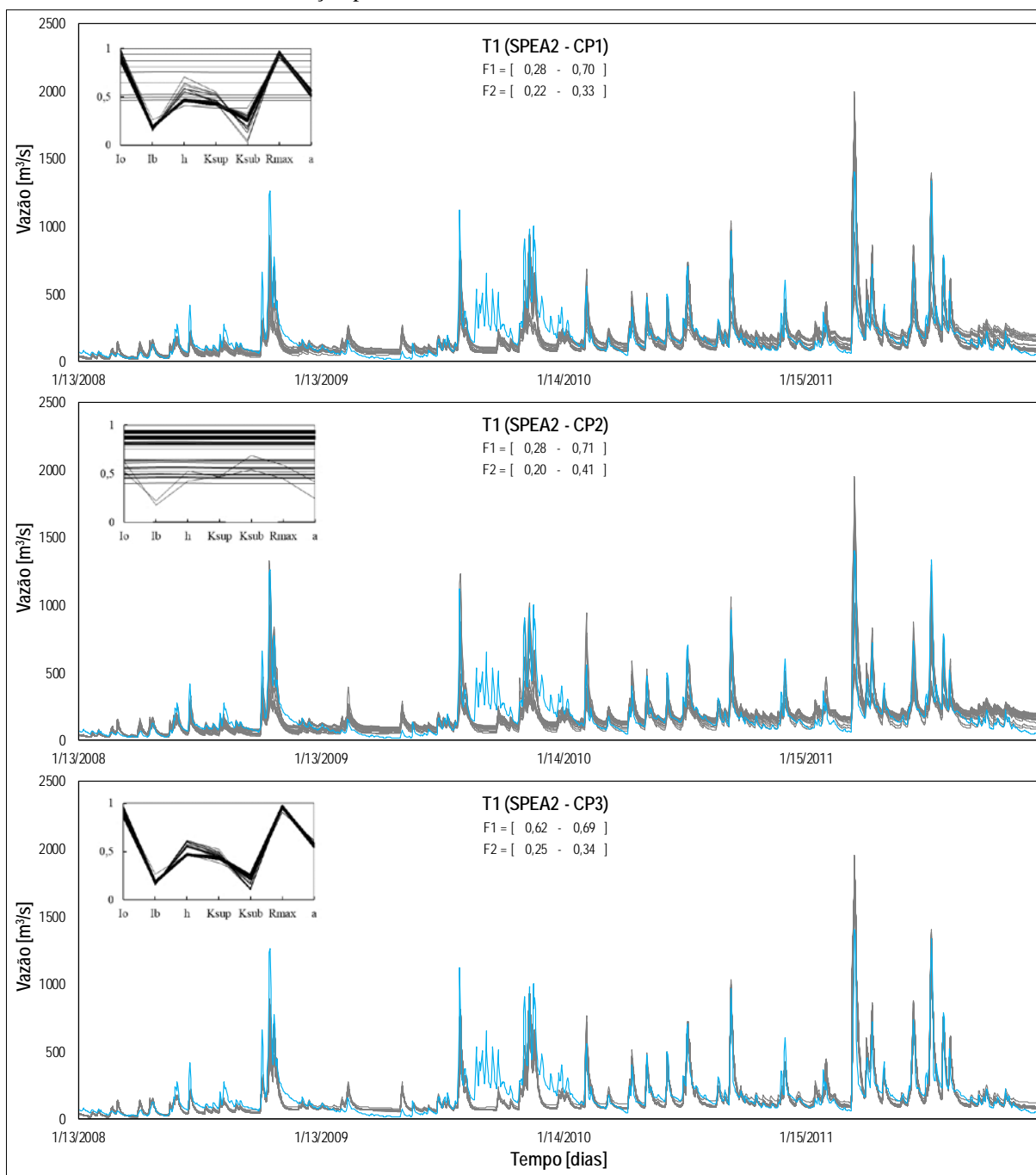
Neste Apêndice, são apresentados os hidrogramas dos períodos de validação Multi-Objetivo em cada bacia hidrográfica, como o modelo IPH II, que representou melhor as series de vazão observadas nos testes de calibração multi-objetivo.

Figura C1 - Hidrogramas dos testes T1 e T2, aplicando os critérios de parada, na bacia rio Tesouras no período de validação para o modelo IPH II, 01/01/1982 - 31/08/1982



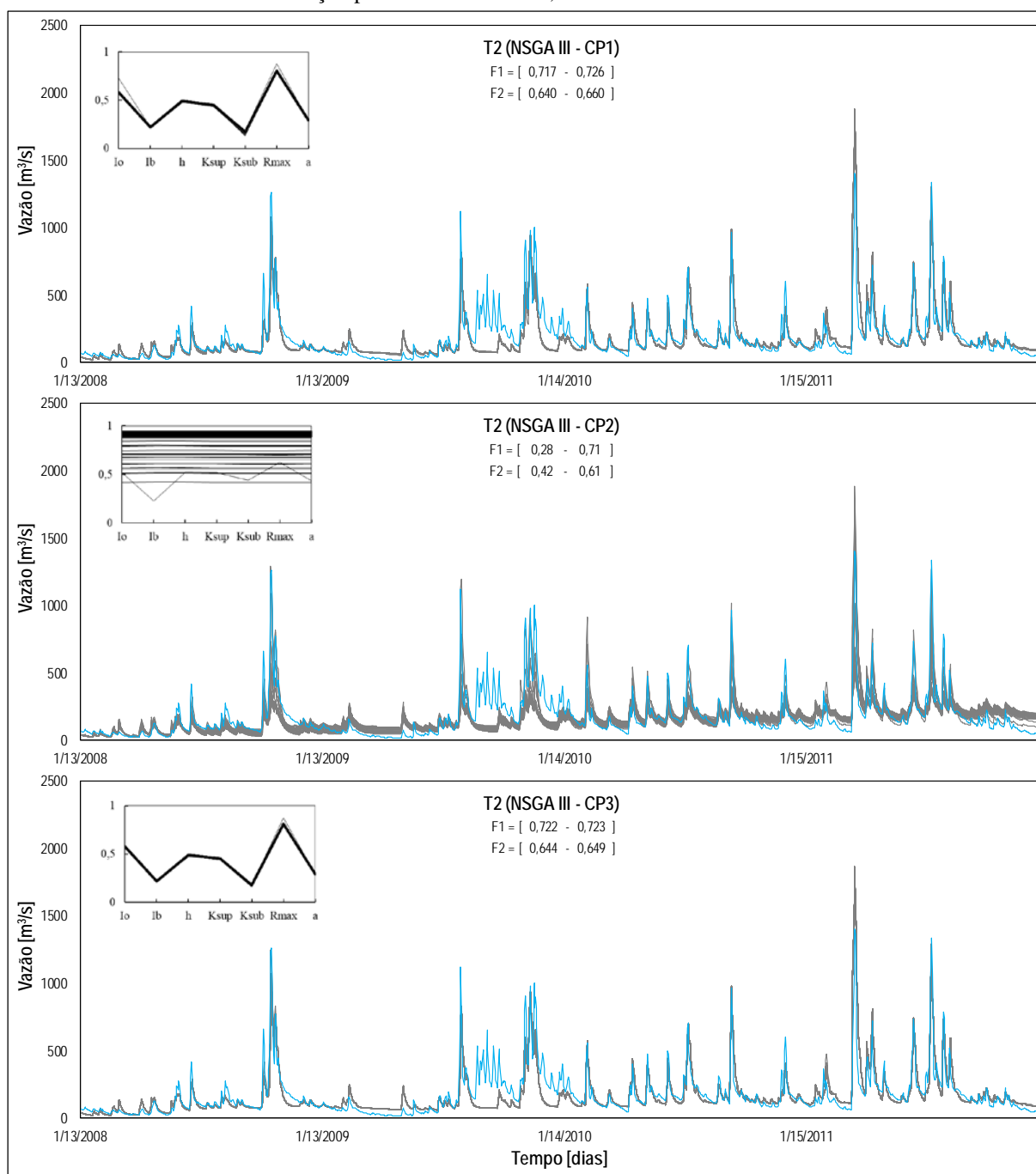
Legenda: Hidrograma da vazão observada (linha azul); Hidrogramas de vazão calculadas com os parâmetros das soluções não dominadas do FP (linhas cinzas); Sub-gráfico dos valores normalizados dos parâmetros do modelo IPH II utilizando o NSGA II e SPEA2 (linhas pretas); a função F1 é o NSE das vazões calculadas; a função F2 é o NSE da transformação inversa das vazões calculadas para o teste T1; a função F2 é o NSE da transformação logarítmica das vazões calculadas para o teste T2

Figura C2 - Hidrogramas do teste T1, aplicando os critérios de parada, na bacia Santo Ângelo no período de validação para o modelo IPH II, 15/01/2008 - 31/12/2011



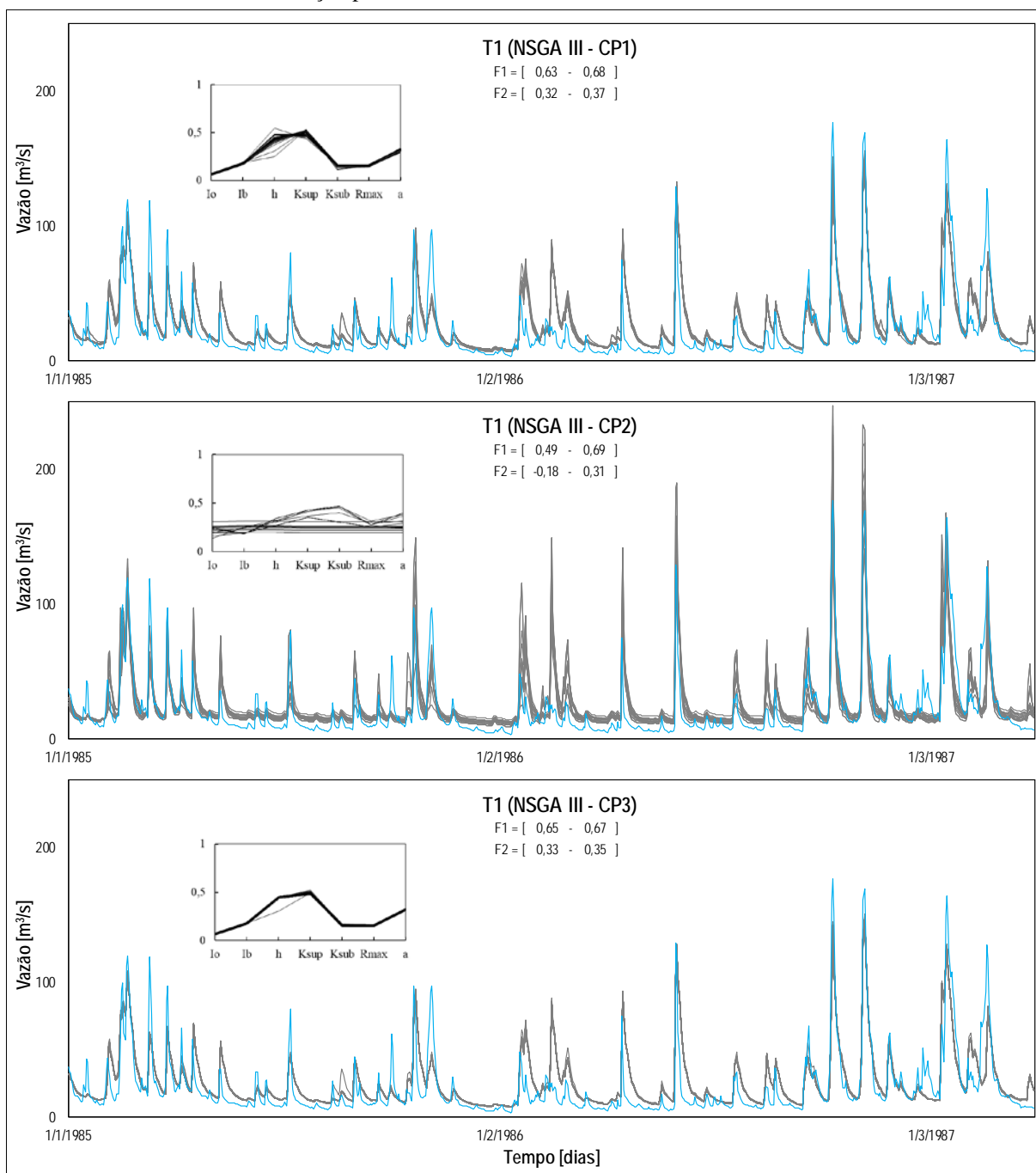
Legenda: Hidrograma da vazão observada (linha azul); Hidrogramas de vazão calculadas com os parâmetros das soluções não dominadas do FP (linhas cinzas); Sub-gráfico dos valores normalizados dos parâmetros do modelo IPH II utilizando o SPEA2 (linhas pretas); a função F1 é o NSE das vazões calculadas; a função F2 é o NSE da transformação inversa das vazões calculadas

Figura C3 - Hidrogramas do teste T2, aplicando os critérios de parada, na bacia Santo Ângelo no período de validação para o modelo IPH II, 15/01/2008 - 31/12/2011



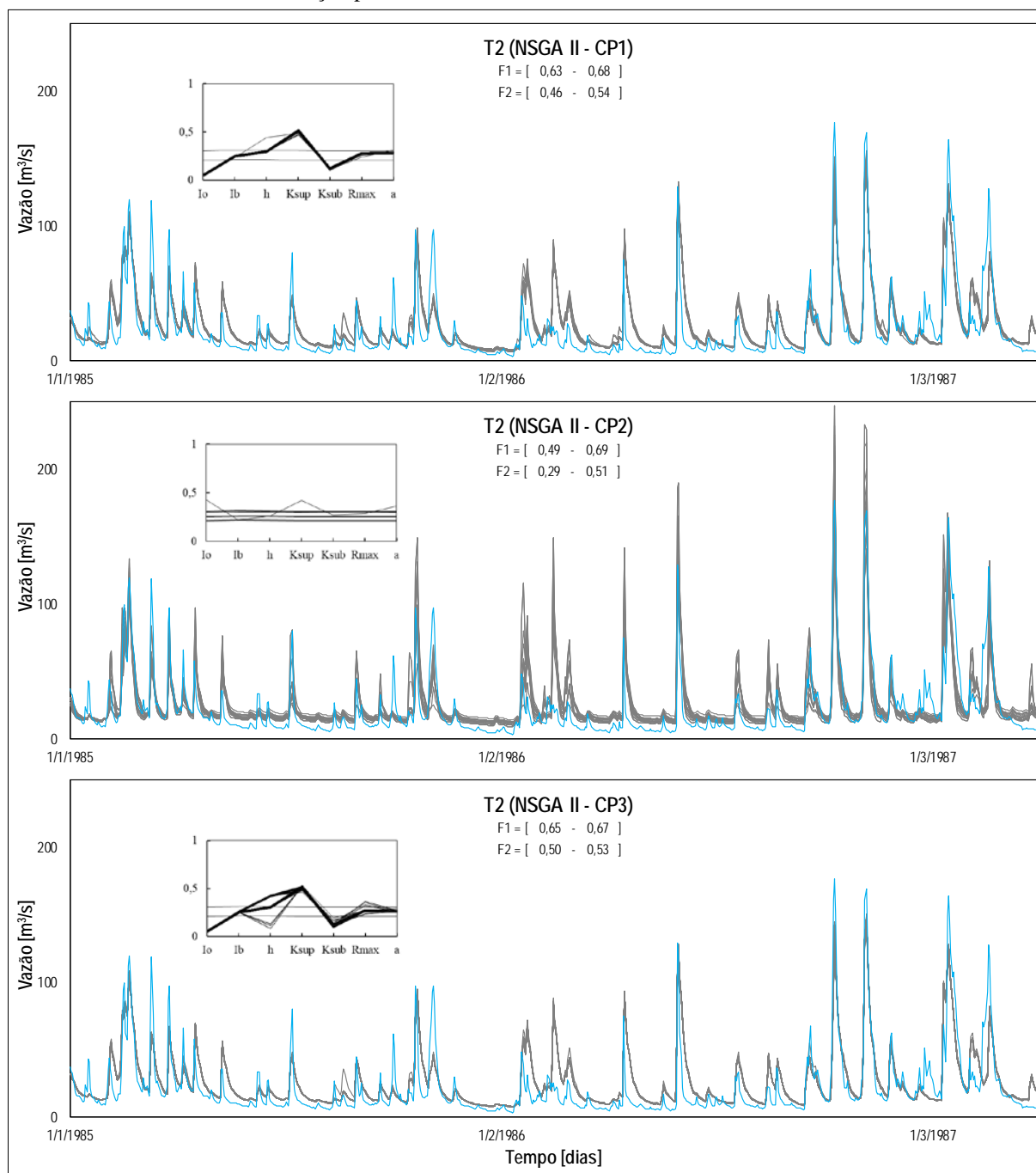
Legenda: Hidrograma da vazão observada (linha azul); Hidrogramas de vazão calculadas com os parâmetros das soluções não dominadas do FP (linhas cinzas); Sub-gráfico dos valores normalizados dos parâmetros do modelo IPH II utilizando o NSGA III (linhas pretas); a função F1 é o NSE das vazões calculadas; a função F2 é o NSE da transformação logarítmica das vazões calculadas

Figura C4 - Hidrogramas do teste T1, aplicando os critérios de parada, na bacia Vila Canoas no período de validação para o modelo IPH II, 01/01/1985 - 31/03/1987



Legenda: Hidrograma da vazão observada (linha azul); Hidrogramas de vazão calculadas com os parâmetros das soluções não dominadas do FP (linhas cinzas); Sub-gráfico dos valores normalizados dos parâmetros do modelo IPH II utilizando o NSGA III (linhas pretas); a função F1 é o NSE das vazões calculadas; a função F2 é o NSE da transformação inversa das vazões calculadas

Figura C5 - Hidrogramas do teste T2, aplicando os critérios de parada, na bacia Vila Canoas no período de validação para o modelo IPH II, 01/01/1985 - 31/03/1987



Legenda: Hidrograma da vazão observada (linha azul); Hidrogramas de vazão calculadas com os parâmetros das soluções não dominadas do FP (linhas cinzas); Sub-gráfico dos valores normalizados dos parâmetros do modelo IPH II utilizando o NSGA II (linhas pretas); a função F1 é o NSE das vazões calculadas; a função F2 é o NSE da transformação logarítmica das vazões calculadas

ANEXO D – ROTINAS USADAS DOS ALGORITMOS MONO-OBJETIVO E MODELOS HIDROLÓGICOS

Neste Apêndice, são apresentados os links das rotinas usadas neste trabalho e desenvolvidas em linguagem de programação Matlab (M-código).

- Modelos Hidrológicos: <https://github.com/Juancarlos1983/Modelos-Hidrologicos.git>
- MOEA NSGA II: <https://github.com/Juancarlos1983/MOEA-NSGAII.git>
- MOEA NSGA II: <https://github.com/Juancarlos1983/MOEA-NSGAIII.git>
- MOEA NSGA II: <https://github.com/Juancarlos1983/MOEA-SPEA2.git>