

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

FELIPE MACIEL PAULO MAMÉDIO

**IMPACTO DE ERROS NOS DADOS DE ENTRADA NA EFICIÊNCIA DE UM
MODELO HIDROLÓGICO**

Porto Alegre

2014

FELIPE MACIEL PAULO MAMÉDIO

**IMPACTO DE ERROS NOS DADOS DE ENTRADA NA EFICIÊNCIA DE UM
MODELO HIDROLÓGICO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Juan Martín Bravo

FELIPE MACIEL PAULO MAMÉDIO

**IMPACTO DE ERROS NOS DADOS DE ENTRADA NA EFICIÊNCIA DE UM
MODELO HIDROLÓGICO**

Dissertação submetida ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e aprovada no dia 14 de abril de 2014.

(Prof. Dr. Juan Martín Bravo, IPH/UFRGS)

Banca Examinadora

(Prof. Dr. Daniel Gustavo Allasia Piccilli, UFSM)

(Prof. Dr. Olavo Correa Pedrollo, IPH/UFRGS)

(Prof. Dr. Walter Collischonn, IPH/UFRGS)

AGRADECIMENTOS

- ✓ A Capes, pelo apoio que exerce de forma a permitir a busca do conhecimento.
- ✓ Ao meu orientador Juan Martin, pela paciência, pelos conselhos e pelos ensinamentos.
- ✓ Aos professores Daniel Allasia, Dirceu Reis, Olavo Pedrollo e Walter Collischonn, pelas sugestões que permitiram a adequação do estudo.
- ✓ Aos professores (as) Andrea Fontes, Jaildo Pereira e Paulo Serrano pelo incentivo e apoio demonstrado ao longo desses anos.
- ✓ Aos professores do IPH/UFRGS em geral com os quais tive a oportunidade de conviver e aprender.
- ✓ Aos amigos Fablo Fonseca, Manuel Mahunguana, Francisco Valentim, Alisson Jesus, Marcone Alves, Rafael Cavalcanti, Almir Nunes, Leonardo Monteiro, Denis Costa e Carine Oliveira pelo apoio nos momentos bons e complicados, e acima de tudo, pela amizade.
- ✓ Aos meus pais Florisvaldo Mamédio e Ivana Mamédio, a minha tia Elenice Maciel, ao meu avô Antônio Paulo e a minha irmã Ilana Mamédio pelo apoio que sempre demonstraram, pela cobrança e pelos ensinamentos que contribuíram com minha formação pessoal.
- ✓ Por fim, agradeço por ter tido a oportunidade de ter feito escolhas que me permitiram chegar a esse momento, o qual considero como um dos mais importantes na minha trajetória de vida. Destaco essa importância não só pelo conhecimento adquirido, mas principalmente pelas pessoas com as quais tive o privilégio de conviver.

RESUMO

A aplicação de modelos hidrológicos vem sendo bastante utilizada como apoio à tomada de decisão no planejamento dos recursos hídricos. Tendo em vista que os dados que servem de entrada para esses modelos estão sujeitos a erros diversos, o presente estudo teve o intuito de contribuir com o conhecimento do impacto desses erros no desempenho do modelo e na estimativa de seus parâmetros. O modelo analisado foi o IPH II fazendo uso do programa computacional WIN_IPH2. Entendendo que a avaliação da sensibilidade ainda é uma área que requer mais estudos, o presente trabalho é focado na utilização das análises de sensibilidade estática e dinâmica. Para isso foram geradas diversas séries temporais de dados de entradas do modelo hidrológico obtidas pela perturbação da série de dados observados. A perturbação foi representada por erros aleatórios (seguindo uma distribuição normal ou uniforme) ou sistemáticos incorporados às séries temporais das variáveis: precipitação e evapotranspiração. Posteriormente, as análises de sensibilidade estática e dinâmica foram executadas. Para efetuar o acompanhamento da interferência dos erros, na eficiência do modelo, foi feita a avaliação dos resultados obtidos com a aplicação do modelo WIN_IPH2 para diferentes medidas de desempenho, e verificado o impacto dos erros nos dados de entrada no desempenho do modelo (sensibilidade estática) e no desempenho do modelo e na estimativa dos parâmetros (sensibilidade dinâmica). Na análise de sensibilidade estática verificou-se o decaimento mais acentuado da eficiência do modelo, em comparação com a análise de sensibilidade dinâmica, onde o modelo consegue contornar os erros nos dados de entrada com a alteração dos valores dos parâmetros. Por fim, o presente estudo confirmou as conclusões obtidas em estudos anteriores: Oudin et al. (2006), Andréassian et al. (2004), Kavetski et al. (2003). Além disso, o presente estudo apontou para outros fatores, na medida em que, observa-se junto à tendência do desempenho do modelo cair quando a intensidade do erro gerado é elevada, a importância de avaliar o possível comprometimento de dados em eventos extremos, uma vez que, nessa situação o desempenho do modelo passa a ser afetado de forma mais acentuada.

Palavras-chave: Modelos hidrológicos, sensibilidade estática, sensibilidade dinâmica.

ABSTRACT

The hydrologic models had been used to support the decision making in water resources management. Since the input data of those models are subject to several kinds of errors, this study aimed to assess how this errors affect the model performance and the estimate of its parameters. The hydrologic model IPH II was used. Perceiving that the sensitivity analysis is still a field that requires further knowledge, this study was focused in the use of the dynamic and the static sensitivity procedures. In this sense, several time series of input data were obtained through the perturbations of an observed time serie. The perturbation was represented by the addition of random errors (with a normal or uniform distribution) or systematic errors to the observed time series of evapotranspiration and precipitation. Then, the static and dynamic sensibility analysis were performed. The effect of input data errors was assessed for several calibration processes of the IPH II using several performance measures. Thus, modification of the model performance (static sensitivity analysis) and model performance and parameter estimation (dynamic sensitivity analysis) were estimated. In the static sensitivity analysis it was found a most pronounced decay of the model efficiency in comparison with the dynamic sensitivity analysis, where the model can circumvent the errors in the input data with modification of the optimum parameter values. Finally, this study confirmed the conclusions of other previous studies as Oudin et al. (2006), Andréassian et al. (2004), Kavetski et al. (2003). In addition this study found other factors, as was observed that if the intensity of the error is high in an extreme event of precipitation, it reduced the model performance more than when it is low, in spite of the time series of errors have the same statistics.

Keywords: Hydrological models, static sensitivity analysis, dynamic sensitivity analysis

Figuras

Figura 3.1 - Fluxograma representando a análise da sensibilidade de forma estática.....	41
Figura 3.2 - Fluxograma representando a análise da sensibilidade de forma dinâmica, na qual a análise é feita tanto nos parâmetros quanto nos resultados fornecidos pelo modelo.	42
Figura 3.3 - Perdas por evapotranspiração no solo e interceptação	47
Figura 3.4 - Meios de locomoção da água	48
Figura 3.5 - Situações que podem vir a ocorrer no cálculo de volumes superficiais e percolados.	49
Figura 3.6 - Método de Clark.....	52
Figura 4.1 - Esquema resumido da metodologia adotada para a análise de sensibilidade no modelo IPH II.....	55
Figura 4.2 - Procedimento para análise da sensibilidade estática no IPH II	58
Figura 4.3 - Procedimento para análise da sensibilidade dinâmica no IPH II.....	59
Figura 5.1 - Localização das bacias avaliadas.....	60
Figura 5.2 – Bacia hidrográfica do rio Preto	62
Figura 5.3 - Precipitação média da bacia hidrográfica do rio Preto através da média aritmética	63
Figura 5.4 - Curva de permanência para a série de dados diários de chuva utilizada na bacia hidrográfica do rio Preto.	64
Figura 5.5 – Bacia hidrográfica do rio Salsa	65
Figura 5.6 - Precipitação média da bacia hidrográfica do rio Salsa através da média aritmética	66
Figura 5.7 - Curva de permanência para a série de dados diários de chuva utilizada na bacia hidrográfica do rio Salsa	67
Figura 5.8 – Bacia hidrográfica do rio Canoas.....	68
Figura 5.9 - Precipitação média da bacia hidrográfica do rio Canoas através da média aritmética	70
Figura 5.10 - Curva de permanência para a série de dados diários de chuva utilizada na bacia hidrográfica do rio Canoas	70
Figura 5.11 – Bacia hidrográfica do rio Itu.	72
Figura 5.12 - Precipitação média da bacia hidrográfica do rio Itu através da média aritmética .	73
Figura 5.13 - Curva de permanência para a série de dados diários de chuva utilizada na bacia hidrográfica do rio Itu	74
Figura 5.14 – Bacia hidrográfica do rio Ijuí.....	75
Figura 5.15 - Precipitação média da bacia hidrográfica do rio Ijuí através da média aritmética	77
Figura 5.16 - Curva de permanência para a série de dados diários de chuva utilizada na bacia hidrográfica do rio Ijuí	78
Figura 5.17 - Dados de entrada de evapotranspiração corrompidos através de erro aleatório com distribuição normal: (a) Erro para $\sigma = 0,1$ e (b) Erro para $\sigma = 0,5$ (Exemplo para bacia do rio Canoas).....	79
Figura 5.18 - Dados de entrada de precipitação corrompidos através de erro aleatório com distribuição normal: (a) Erro para $\sigma = 0,1$ e (b) Erro para $\sigma = 0,5$ (Exemplo para bacia do rio Canoas).....	80
Figura 5.19 - Impacto de erros aleatórios com distribuição normal (para σ igual a 0,5), na precipitação, na saída do modelo (Exemplo para a Bacia do rio Ijuí).....	80

Figura 6.1 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções objetivo, sujeito a erro sistemático nos dados de evapotranspiração e precipitação.	84
Figura 6.2 - Acompanhamento da interferência de erros sistemáticos na precipitação sobre as vazões de saída para a bacia sintética para quatro diferentes funções-objetivo.	85
Figura 6.3 - Descrição das estatísticas apresentadas no gráfico box-plot.....	86
Figura 6.4 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objetivo, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal nos dados de evapotranspiração para a bacia sintética.	87
Figura 6.5 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objetivo, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal nos dados de precipitação para a bacia sintética.	88
Figura 6.6 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções objetivo, sujeito a erro sistemático nos dados de evapotranspiração e precipitação.	92
Figura 6.7 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objetivo, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal nos dados de evapotranspiração para a bacia sintética.	93
Figura 6.8 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objetivo, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal nos dados de precipitação para a bacia sintética.	94
Figura 6.9 - Impacto do incremento de erros sistemáticos na evapotranspiração e na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através das funções-objetivo avaliadas....	96
Figura 6.10 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Kling-Gupta para a bacia sintética.	100
Figura 6.11 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Kling-Gupta para a bacia sintética.	101
Figura 6.12 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Kling-Gupta para a bacia sintética.	102
Figura 6.13 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Kling-Gupta para a bacia sintética.	103
Figura 6.14 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Nash-Sutcliffe para a bacia sintética.....	104
Figura 6.15 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Nash-Sutcliffe para a bacia sintética.	105
Figura 6.16 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Nash-Sutcliffe para a bacia sintética.	106
Figura 6.17 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Nash-Sutcliffe para a bacia sintética.	107

Figura 6.18 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Quadrático Inverso para a bacia sintética.	108
Figura 6.19 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Quadrático Inverso para a bacia sintética.	109
Figura 6.20 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Quadrático Inverso para a bacia sintética.	110
Figura 6.21 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Quadrático Inverso para a bacia sintética.	111
Figura 6.22 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Relativo Médio para a bacia sintética.	112
Figura 6.23 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Relativo Médio para a bacia sintética.	113
Figura 6.24 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Relativo Médio para a bacia sintética.	114
Figura 6.25 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Relativo Médio para a bacia sintética.	115
Figura 6.26 - Acompanhamento da interferência de erros sistemáticos na precipitação sobre as vazões de saída (Bacia do rio Ijuí)	117
Figura 6.27 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objetivo, sujeito a erro sistemático nos dados de evapotranspiração e precipitação.	119
Figura 6.28 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objetivo, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal nos dados de evapotranspiração.....	121
Figura 6.29 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objetivo, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal nos dados de precipitação.	123
Figura 6.30 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objetivo, sujeito a erro sistemático nos dados de evapotranspiração e precipitação.	126
Figura 6.31 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objetivo, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal na evapotranspiração..	127
Figura 6.32 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objetivo, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal na precipitação.	129
Figura 6.33 - Impacto do incremento de erros sistemáticos na evapotranspiração e precipitação nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Kling-Gupta para as cinco bacias testadas.	132

Figura 6.34 - Impacto do incremento de erros sistemáticos na evapotranspiração e precipitação nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Nash-Sutcliffe para as cinco bacias testadas.	133
Figura 6.35 - Impacto do incremento de erros sistemáticos na evapotranspiração e precipitação nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Quadrático Inverso para as cinco bacias testadas.	134
Figura 6.36 - Impacto do incremento de erros sistemáticos na evapotranspiração e precipitação nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Relativo Médio para as cinco bacias testadas.	135
Figura 6.37 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme e normal na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Kling-Gupta para as cinco bacias testadas.	137
Figura 6.38 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme e normal na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Nash-sutcliffe para as cinco bacias testadas.	138
Figura 6.39 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme e normal na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Quadrático Inverso para as cinco bacias testadas.	139
Figura 6.40 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme e normal na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio relativo Médio para as cinco bacias testadas.	140
Figura 6.41 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme e normal na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Kling-Gupta para as cinco bacias testadas.	142
Figura 6.42 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme e normal na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Nash-Sutcliffe para as cinco bacias testadas.	143
Figura 6.43 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme e normal na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Quadrático Inverso para as cinco bacias testadas.	144
Figura 6.44 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme e normal na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Relativo Médio para as cinco bacias testadas.	145
Figura 10.1 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objetivo, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal nos dados de evapotranspiração para a bacia do rio Preto.	162
Figura 10.2 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objetivo, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal nos dados de precipitação para a bacia do rio Preto.	163
Figura 10.3 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objetivo, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal nos dados de evapotranspiração para a bacia do rio Preto.	164
Figura 10.4 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objetivo, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal nos dados de precipitação para a bacia do rio Preto.	165

Figura 10.5 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Kling-Gupta para a bacia do rio Preto.....	166
Figura 10.6 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Kling-Gupta para a bacia do rio Preto.....	167
Figura 10.7 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Kling-Gupta para a bacia do rio Preto.....	168
Figura 10.8 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Kling-Gupta para a bacia do rio Preto.	169
Figura 10.9 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Nash-Sutcliffe para a bacia do rio Preto.	170
Figura 10.10 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Nash-Sutcliffe para a bacia do rio Preto.	171
Figura 10.11 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Nash-Sutcliffe para a bacia do rio Preto.....	172
Figura 10.12 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Nash-Sutcliffe para a bacia do rio Preto.	173
Figura 10.13 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Quadrático Inverso para a bacia do rio Preto.....	174
Figura 10.14 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Quadrático Inverso para a bacia do rio Preto.	175
Figura 10.15 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Quadrático Inverso para a bacia do rio Preto.	176
Figura 10.16 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Quadrático Inverso para a bacia do rio Preto.	177
Figura 10.17 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Relativo Médio para a bacia do rio Preto.....	178
Figura 10.18 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Relativo Médio para a bacia do rio Preto.....	179
Figura 10.19 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Relativo Médio para a bacia do rio Preto.	180

Figura 10.20 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Relativo Médio para a bacia do rio Preto.	181
Figura 11.1 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objeto, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal nos dados de evapotranspiração para a bacia do rio Salsa.	182
Figura 11.2 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objeto, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal nos dados de precipitação para a bacia do rio Salsa.	183
Figura 11.3 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objeto, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal nos dados de evapotranspiração para a bacia do rio Salsa.	184
Figura 11.4 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objeto, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal nos dados de precipitação para a bacia do rio Salsa.	185
Figura 11.5 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Kling-Gupta para a bacia do rio Salsa.	186
Figura 11.6 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Kling-Gupta para a bacia do rio Salsa.	187
Figura 11.7 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Kling-Gupta para a bacia do rio Salsa.	188
Figura 11.8 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Kling-Gupta para a bacia do rio Salsa.	189
Figura 11.9 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Nash-Sutcliffe para a bacia do rio Salsa.	190
Figura 11.10 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Nash-Sutcliffe para a bacia do rio Salsa.	191
Figura 11.11 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Nash-Sutcliffe para a bacia do rio Salsa.	192
Figura 11.12 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Nash-Sutcliffe para a bacia do rio Salsa.	193
Figura 11.13 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Quadrático Inverso para a bacia do rio Salsa.	194
Figura 11.14 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Quadrático Inverso para a bacia do rio Salsa.	195

Figura 11.15 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Quadrático Inverso para a bacia do rio Salsa.....	196
Figura 11.16 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Quadrático Inverso para a bacia do rio Salsa.....	197
Figura 11.17 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Relativo Médio para a bacia do rio Preto.....	198
Figura 11.18 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Relativo Médio para a bacia do rio Salsa.....	199
Figura 11.19 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Relativo Médio para a bacia do rio Preto.....	200
Figura 11.20 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Relativo Médio para a bacia do rio Preto.....	201
Figura 12.1 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objetivo, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal nos dados de evapotranspiração para a bacia do rio Canoas.....	202
Figura 12.2 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objetivo, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal nos dados de precipitação para a bacia do rio Canoas.....	203
Figura 12.3 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objetivo, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal nos dados de evapotranspiração para a bacia do rio Canoas.....	204
Figura 12.4 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objetivo, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal nos dados de precipitação para a bacia do rio Canoas.....	205
Figura 12.5 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Kling-Gupta para a bacia do rio Canoas.....	206
Figura 12.6 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Kling-Gupta para a bacia do rio Canoas.....	207
Figura 12.7 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Kling-Gupta para a bacia do rio Canoas.....	208
Figura 12.8 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Kling-Gupta para a bacia do rio Canoas.....	209
Figura 12.9 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Nash-Sutcliffe para a bacia do rio Canoas.....	210

Figura 12.10 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Nash-Sutcliffe para a bacia do rio Canoas.....	211
Figura 12.11 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Nash-Sutcliffe para a bacia do rio Canoas.....	212
Figura 12.12 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Nash-Sutcliffe para a bacia do rio Canoas.....	213
Figura 12.13 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Quadrático Inverso para a bacia do rio Canoas.....	214
Figura 12.14 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Quadrático Inverso para a bacia do rio Canoas.....	215
Figura 12.15 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Quadrático Inverso para a bacia do rio Canoas.	216
Figura 12.16 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Quadrático Inverso para a bacia do rio Canoas.	217
Figura 12.17 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Relativo Médio para a bacia do rio Canoas.....	218
Figura 12.18 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Relativo Médio para a bacia do rio Canoas.....	219
Figura 12.19 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Relativo Médio para a bacia do rio Canoas.	220
Figura 12.20 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Relativo Médio para a bacia do rio Canoas.	221
Figura 13.1 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objetivo, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal nos dados de evapotranspiração para a bacia do rio Itu.....	222
Figura 13.2 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objetivo, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal nos dados de precipitação para a bacia do rio Itu.....	223
Figura 13.3 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objetivo, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal nos dados de evapotranspiração para a bacia do rio Itu.....	224
Figura 13.4 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objetivo, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal nos dados de precipitação para a bacia do rio Itu.....	225

Figura 13.5 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Kling-Gupta para a bacia do rio Itu.....	226
Figura 13.6 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Kling-Gupta para a bacia do rio Itu.....	227
Figura 13.7 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Kling-Gupta para a bacia do rio Itu.....	228
Figura 13.8 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Kling-Gupta para a bacia do rio Itu.....	229
Figura 13.9 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Nash-Sutcliffe para a bacia do rio Itu.....	230
Figura 13.10 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Nash-Sutcliffe para a bacia do rio Itu.....	231
Figura 13.11 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Nash-Sutcliffe para a bacia do rio Itu.....	232
Figura 13.12 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Nash-Sutcliffe para a bacia do rio Itu.....	233
Figura 13.13 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Quadrático Inverso para a bacia do rio Itu.....	234
Figura 13.14 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Quadrático Inverso para a bacia do rio Itu.....	235
Figura 13.15 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Quadrático Inverso para a bacia do rio Itu.....	236
Figura 13.16 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Quadrático Inverso para a bacia do rio Itu.....	237
Figura 13.17 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Relativo Médio para a bacia do rio Itu.....	238
Figura 13.18 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Relativo Médio para a bacia do rio Itu.....	239
Figura 13.19 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Relativo Médio para a bacia do rio Itu.....	240

Figura 13.20 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Relativo Médio para a bacia do rio Itu.	241
Figura 14.1 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objeto, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal nos dados de evapotranspiração para a bacia do rio Ijuí.	242
Figura 14.2 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objeto, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal nos dados de precipitação para a bacia do rio Ijuí.	243
Figura 14.3 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objeto, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal nos dados de evapotranspiração para a bacia do rio Ijuí.	244
Figura 14.4 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objeto, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal nos dados de precipitação para a bacia do rio Ijuí.	245
Figura 14.5 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Kling-Gupta para a bacia do rio Ijuí.	246
Figura 14.6 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Kling-Gupta para a bacia do rio Ijuí.	247
Figura 14.7 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Kling-Gupta para a bacia do rio Ijuí.	248
Figura 14.8 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Kling-Gupta para a bacia do rio Ijuí.	249
Figura 14.9 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Nash-Sutcliffe para a bacia do rio Ijuí.	250
Figura 14.10 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Nash-Sutcliffe para a bacia do rio Ijuí.	251
Figura 14.11 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Nash-Sutcliffe para a bacia do rio Ijuí.	252
Figura 14.12 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Nash-Sutcliffe para a bacia do rio Ijuí.	253
Figura 14.13 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Quadrático Inverso para a bacia do rio Ijuí.	254
Figura 14.14 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Quadrático Inverso para a bacia do rio Ijuí.	255

Figura 14.15 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Quadrático Inverso para a bacia do rio Ijuí.....	256
Figura 14.16 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Quadrático Inverso para a bacia do rio Ijuí.....	257
Figura 14.17 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Relativo Médio para a bacia do rio Ijuí.....	258
Figura 14.18 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Relativo Médio para a bacia do rio Ijuí.....	259
Figura 14.19 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Relativo Médio para a bacia do rio Ijuí.	260
Figura 14.20 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Relativo Médio para a bacia do rio Ijuí.	261

Tabelas

Tabela 5.1 - Informações meteorológicas e hidrológicas para a bacia do rio Preto	62
Tabela 5.2 - Temperatura média compensada para a estação climatológica de Itiruçu-Jaguaquara (83295)	64
Tabela 5.3 - Evaporação total obtida através do evaporímetro de Piché para a estação de Itiruçu-Jaguaquara (83295)	64
Tabela 5.4 - Informações meteorológicas e hidrológicas para a bacia do rio Salsa	66
Tabela 5.5 - Temperatura média compensada para a estação climatológica de Canavieiras (83398)	67
Tabela 5.6 - Evaporação total obtida através do evaporímetro de Piché para a estação de São Joaquim (83920)	68
Tabela 5.7 - Informações meteorológicas e hidrológicas para a bacia do rio Canoas	69
Tabela 5.8 - Temperatura média compensada para a estação climatológica de São Joaquim (83920)	71
Tabela 5.9 - Evaporação total obtida através do evaporímetro de Piché para a estação de São Joaquim (83920)	71
Tabela 5.10 - Informações meteorológicas e hidrológicas para a bacia do rio Itu	73
Tabela 5.11 - Temperatura média compensada para a estação climatológica de Uruguaiana (83927)	74
Tabela 5.12 - Evaporação total obtida através do evaporímetro de Piché para a estação de Uruguaiana (83927)	75
Tabela 5.13 - Informações meteorológicas e hidrológicas para a bacia do rio Ijuí	76
Tabela 5.14 - Temperatura média compensada para a estação climatológica de Cruz Alta (83912)	78
Tabela 5.15 - Evaporação total obtida através do evaporímetro de Piché para a estação de Cruz Alta (83912)	78
Tabela 5.16 - Conjunto de parâmetros utilizados na geração da série sintética	81
Tabela 6.1 - Impacto dos erros dos dados de entrada através da função objetivo Kling-Gupta	147
Tabela 6.2 - Impacto dos erros dos dados de entrada através da função objetivo Nash-Sutcliffe	148
Tabela 6.3 - Impacto dos erros dos dados de entrada através da função objetivo Desvio Quadrático Inverso	149
Tabela 6.4 - Impacto dos erros dos dados de entrada através da função objetivo Desvio Relativo Médio	150

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	22
2.	OBJETIVO.....	24
3.	ASPECTOS DE INTERESSE REFERENTES AOS MODELOS HIDROLÓGICOS.....	25
3.1.	MODELOS E SISTEMAS.....	25
3.2.	USO DE MODELOS HIDROLÓGICOS	27
3.3.	PRECISÃO DAS MEDIÇÕES HIDROLÓGICAS	29
3.3.1.	Considerações iniciais	29
3.3.2.	Fontes de erros	31
3.3.3.	Erros Sistemáticos	33
3.3.4.	Erros aleatórios.....	36
3.4.	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	38
3.5.	CALIBRAÇÃO.....	43
3.6.	MODELO WIN_IPH2	45
4.	METODOLOGIA	55
4.1.	INSERÇÃO DE ERROS SISTEMÁTICOS	55
4.2.	INSERÇÃO DE ERROS ALEATÓRIOS.....	56
4.3.	PROCEDIMENTO PARA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	57
5.	APLICAÇÃO DE METODOLOGIA	60
5.1.	ESTUDOS DE CASO	60
5.2.	PERTURBAÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA	79
5.3.	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE CONSIDERANDO SÉRIE SINTÉTICA DE VAZÕES.....	81
5.4.	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE CONSIDERANDO SÉRIES REAIS DE VAZÕES	81
6.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	82
6.1.	IMPACTO DOS ERROS NOS DADOS DE ENTRADA: SÉRIE SINTÉTICA DE VAZÕES.....	82

6.1.1.	Análise de sensibilidade Estática	82
6.1.2.	Análise de sensibilidade dinâmica	89
6.1.2.1.	Impacto sobre a eficiência do modelo	90
6.1.2.2.	Impacto sobre o valor dos parâmetros	95
6.2.	IMPACTO DOS ERROS NOS DADOS DE ENTRADA: SÉRIES REAIS DE VAZÕES	116
6.2.1.	Análise de sensibilidade estática.....	116
6.2.2.	Análise de sensibilidade dinâmica.....	123
6.2.2.1.	Impacto sobre a eficiência do modelo	124
6.2.2.2.	Impacto sobre os valores dos parâmetros.....	129
6.2.3.	Análise geral dos resultados	146
7.	CONCLUSÕES.....	151
8.	RECOMENDAÇÕES	155
9.	REFERÊNCIAS	157
10.	ANEXO I – Bacia do rio Preto.....	162
	Análise de sensibilidade estática	162
	Análise de sensibilidade dinâmica	164
	Impacto dos erros nos dados de entrada nos parâmetros do modelo em diferentes funções objetivo.....	166
11.	ANEXO II – Bacia do rio Salsa	182
	Análise de sensibilidade estática	182
	Análise de sensibilidade dinâmica	184
	Erro aleatório na evapotranspiração e na precipitação	184
	Impacto dos erros nos dados de entrada nos parâmetros do modelo em diferentes funções objetivo.....	186
12.	ANEXO III – Bacia do rio Canoas.....	202
	Análise de sensibilidade estática	202
	Erro aleatório na evapotranspiração e na precipitação	202
	Análise de sensibilidade dinâmica	204

Erro aleatório na evapotranspiração e na precipitação	204
13. ANEXO IV – Bacia do rio Itu.....	222
Análise de sensibilidade estática	222
Erro aleatório na evapotranspiração e na precipitação	222
Análise de sensibilidade dinâmica	224
Erro aleatório na evapotranspiração e na precipitação	224
14. ANEXO V – Bacia do rio Ijuí.....	242
Análise de sensibilidade estática	242
Erro aleatório na evapotranspiração e na precipitação	242
Análise de sensibilidade dinâmica	244
Erro aleatório na evapotranspiração e na precipitação	244

1. INTRODUÇÃO

Dentre as substâncias encontradas na natureza, a água apresenta grande importância, pois, suas ocorrências, distribuições e circulações estão diretamente associadas ao ciclo da vida sobre o globo terrestre. Devido à importância desse bem, é essencial o entendimento dos processos que regem sua circulação na terra, de forma a favorecer a otimização de seu uso bem como a manutenção das suas características próximas as naturais. Nesse sentido, a ciência que busca esse entendimento é a hidrologia, a qual é descrita por Merriam-Webster (1961) e AHPH (1962), como a ciência que trata da ocorrência, circulação e distribuição da água na terra, bem como de suas propriedades físicas e químicas e sua interação com o ambiente como um todo (CHOW, 1964).

Para entender o comportamento da água sobre a terra, a hidrologia faz uso da observação dos processos sobre o meio físico, de forma a identificar a variação dos fenômenos que compõem o ciclo hidrológico. Sendo assim, diversos modelos hidrológicos têm sido desenvolvidos com o objetivo de representar o sistema da melhor forma possível.

Essa representação tem por finalidade uma melhor compreensão do comportamento de um sistema natural ante a ocorrência de um determinado evento, ou ante a modificação das suas características naturais. Na modelagem hidrológica os modelos de transformação chuva-vazão assumem uma especial importância, por serem os mais utilizados, uma vez que, sua aplicação está associada a utilização de dados de precipitação, os quais são relativamente fáceis de se obter, na obtenção da vazão em uma determinada seção de interesse. Alguns usos contemplados por tais modelos são citados por Tucci (1998), dando destaque para: entendimento do comportamento dos fenômenos hidrológicos sobre a bacia; dimensionamento e previsão de cenários hidrológicos de planejamento; análise de consistência e preenchimento de falhas dos dados observados; análise do efeito da alteração do uso e ocupação do solo sobre a geração do escoamento na bacia; previsão de variáveis hidrológicas em tempo real. Daí tem-se a importância da modelagem hidrológica, na representação e entendimento de um sistema qualquer, tal como uma bacia hidrográfica, e a previsão de condições diferentes das observadas ao levar em consideração aspectos do sistema em análise.

No entanto, um modelo necessita de dados de entrada para fornecer as respostas. Devido aos vários fatores envolvidos na obtenção e distribuição dos dados de entrada, os mesmos, estão sujeitos a incertezas, as quais são designadas como a imperfeição associada à obtenção dos dados. As imperfeições, na coleta de dados, são dadas por erros diversos, os quais podem ser classificados em erros grosseiros, sistemáticos ou aleatórios, sendo contemplados em diversos estudos, como por exemplo, Oudin et al. (2006), Cabral (2004), Andressian et al. (2004), Aikten (1973).

Segundo Cabral (2004), os erros grosseiros ocorrem devido à falta de atenção, pouco treino ou falta de perícia do operador, sendo normalmente fáceis de detectar e eliminar. Como exemplo de tal erro, tem-se a falha na leitura de dados de precipitação, evaporação, níveis d'água, dentre outros, por parte do responsável pela coleta desses.

O erro sistemático apresenta-se sempre no mesmo sentido, ou seja, em amplitudes regulares de forma a representar um erro com comportamento fixo, no qual, a medição da variável de interesse sempre estará sendo subestimada ou superestimada continuamente. Esses erros podem acontecer devido a algum problema no leitor automático, e também pela instalação incorreta do aparelho de medição.

Por fim, o erro aleatório é associado à variabilidade natural dos processos físicos, levando a flutuações nos valores medidos, ou seja, pode ocorrer em diversas amplitudes, tanto no sentido de subestimar, quanto de superestimar as medidas de uma determinada variável. Sendo assim, esses erros podem ocorrer, por exemplo, ao se estimar a precipitação média da bacia a partir de dados pontuais de postos pluviométricos.

Os erros mencionados acima acarretam em incertezas, sobre as variáveis de entrada, que serão propagados nos resultados obtidos com a aplicação do modelo, as quais, segundo Tucci et al. (2005) envolvem tanto os erros de medição das mesmas como a variabilidade natural. No entanto, o presente estudo irá ater-se apenas aos erros sistemáticos e aleatórios, ao levar em consideração que erros grosseiros são mais fáceis de identificar quando comparado aos restantes.

Entendendo que tais erros podem afetar tanto a eficiência do modelo quanto a estimativa dos parâmetros deste, o presente estudo teve o intuito de analisar a alteração do desempenho do modelo hidrológico IPH II em situações idealizadas quando utilizados dados de entrada de precipitação e evapotranspiração que apresentam erros aleatórios ou sistemáticos. Apesar de que os erros que afetam as séries temporais dessas variáveis (i.e.

precipitação) serem muito mais complexos, a utilização de erros aleatórios e sistemáticos permite uma fácil interpretação dos resultados, tanto em termos do impacto sobre o desempenho do modelo hidrológico como da estimativa dos valores dos parâmetros. Nesse sentido, a aplicação de análises de sensibilidade estática e dinâmica tem o intuito de permitir a compreensão de como uma determinada mudança em uma variável de entrada conhecida pode afetar a resposta desse modelo, a qual é dada por outra variável e depende do valor do conjunto de parâmetros previamente obtidos.

2. OBJETIVO

Principal:

O objetivo dessa pesquisa é investigar o impacto dos erros contidos nos dados de entrada sobre o desempenho do modelo hidrológico IPH II.

Secundários:

- ✓ Verificar o quanto pode ser alterada a resposta do modelo IPH II pela presença de erros sistemáticos e aleatórios nos dados de entrada de precipitação e evapotranspiração em diferentes funções-objetivo através da análise de sensibilidade estática e dinâmica;
- ✓ Verificar qual o impacto de erros nos dados de entrada na estimativa dos parâmetros do modelo IPH II para as funções-objetivo adotadas;

3. ASPECTOS DE INTERESSE REFERENTES AOS MODELOS HIDROLÓGICOS

3.1. MODELOS E SISTEMAS

Os modelos podem ser entendidos como uma representação simplificada da realidade, auxiliando no entendimento de processos que envolvem essa realidade. Um mesmo processo pode ser representado de várias maneiras, ainda que, algumas sejam mais recomendadas que outras. Tal afirmação tem o intuito de passar a ideia que não existe um modelo soberano, absoluto, e sim um modelo que até o momento melhor descreve o comportamento do sistema (RENNÓ & SOARES, 2000).

Outros autores, a exemplo de Tucci (2005), consideram os modelos uma representação simplificada de um sistema. Seguindo essa abordagem, os modelos hidrológicos são tidos como uma das ferramentas desenvolvidas pela ciência através da qual é possível avaliar o comportamento da bacia hidrográfica, e em certos casos prever a resposta do sistema em estudo quando sujeito a ações antrópicas e ambientais. Essa descrição ressalta a importância do conhecimento das características dos sistemas, de forma a favorecer o entendimento dos modelos, uma vez que, Cadier et al. (1987), descreve que o modelo consiste na representação de um sistema de maneira a favorecer o entendimento de um determinado processo, bem como o uso, fornecendo assim resposta para as diferentes entradas que afetam o sistema.

Sendo assim, torna-se necessário entender alguns aspectos relacionados aos sistemas e modelos. Dentre esses aspectos, destaca-se a diferenciação entre as seguintes denominações:

- ❖ Estocástico e determinístico;
- ❖ Conceitual e empírico;
- ❖ Contínuo e discreto;
- ❖ Linear e não-linear;
- ❖ Concentrado e distribuído.

Segundo Naghettini et al. (2007) e Marinho et al. (2012) os processos associados ao ciclo hidrológico podem ser classificados de acordo com o tipo de variáveis utilizadas na modelagem em determinísticos ou estocásticos, mas reconhecem que tais processos são uma combinação de ambas as classificações. A diferença básica entre estocástico e

determinístico é apontada por diversos autores. Tucci (2005) por exemplo, informa que nos modelos estocásticos a relação entre entrada e saída é estatística, enquanto que nos modelos determinísticos uma entrada fornece apenas uma saída.

Quanto à relação entre as variáveis, os modelos podem ser conceituais ou empíricos. Burn e Tucci (2001) descrevem que os modelos conceituais, ao considerar os processos físicos do sistema analisado nas funções utilizadas, reproduzem os processos hidrológicos de forma a permitir a melhor extrapolação de cenários diferentes do ajuste. Por sua vez os modelos empíricos, por serem baseados na experimentação, utilizam formulações matemáticas que não apresentam relação com o processo físico desta fase do ciclo hidrológico.

Os modelos ainda podem ser classificados quanto à forma de representação dos dados em contínuos ou discretos. Na análise dessa consideração, Tucci (2005) informa que o sistema é contínuo quando os fenômenos são contínuos no tempo, enquanto que o sistema é discreto quando as mudanças de estado ocorrem em intervalo de tempo discretos.

Para a linearidade, Cheng (1959, apud TUCCI, 2005) descreve que o sistema é dito linear quando as propriedades de homogeneidade e sobreposição são satisfeitas. Já a não-linearidade está associada ao fato de não atender o princípio da sobreposição. Dessa forma, Aguirre et al. (1996, 1998) destaca que a representação não-linear permite analisar e reproduzir certos fenômenos e comportamentos dinâmicos mais complexos, em comparação com a representação linear. Outra consideração importante acerca dos sistemas e modelos é apontada por Buchianeri (2004), ao contemplar a diferença entre modelos concentrados e distribuídos. Entende-se por concentrado, o modelo que não leva em consideração a variabilidade espacial, enquanto que, o modelo é distribuído quando as variáveis e parâmetros do modelo dependem do espaço e/ou tempo.

Os conceitos mencionados dão o alicerce para a compreensão do sistema e do modelo que o representa. Nesse contexto, observa-se a variedade de modelos existentes conforme essas definições, bem como a infinidade de usos que podem ser dados aos mesmos.

3.2. USO DE MODELOS HIDROLÓGICOS

É notório o desenvolvimento dos modelos hidrológicos a partir de meados da década de 1950. Tucci (2005) e Marinho et al. (2012), dentre outros autores, concordam que tal avanço está estritamente ligado ao desenvolvimento dos computadores e ao avanço das técnicas de geoprocessamento e de sensoriamento remoto. Sendo assim, Tucci (2005) ressalta que as informações obtidas com a aplicação de modelos hidrológicos são importantes para apoiar a tomada de decisão no planejamento dos recursos hídricos.

Os modelos hidrológicos são ferramentas úteis para o entendimento do comportamento dos fenômenos hidrológicos, uma vez que, permitem analisar, simular e quantificar os processos hidrológicos de uma bacia hidrográfica. Rennó (2004) aborda tal consideração ao apresentar um modelo desenvolvido de forma a permitir a simulação do comportamento do sistema solo-vegetação-atmosfera para a bacia do rio Corumbataí-SP.

Ainda, os modelos hidrológicos são comumente utilizados para obter dados sintéticos para uma região específica com uma série histórica de dados reduzida, a fim de se estender o período de observação no tempo ou preencher falhas nas séries temporais dos dados (ALEXANDRE, 2008). Oliveira (2010) aborda essa consideração ao comparar as metodologias de preenchimento de falhas disponíveis na literatura, no intuito de indicar o procedimento mais adequado ao se efetuar o preenchimento de falhas de uma série de dados de precipitação, devido à preocupação com o comprometimento da continuidade das informações oriunda das falhas nos registros. Outro uso importante dado aos modelos hidrológicos, diz respeito à previsão de vazão de enchentes, uma vez que a previsão de vazões em tempo real representa uma informação importante no gerenciamento de recursos hídricos, a fim de minimizar os possíveis danos.

Além dos usos já mencionados, os modelos hidrológicos podem ser utilizados também com a finalidade de estender séries de vazões no tempo. Devido a geralmente encontrarem-se séries maiores de precipitação em relação às de vazão, algumas vezes torna-se necessário estender as séries de vazões através de modelos hidrológicos chuva-vazão (e.g. OBREGON et al., 1999). Ainda, poderiam ser mencionadas outras aplicações de modelos hidrológicos, a exemplo de prever cenários de planejamento, e avaliar o efeito das mudanças climáticas (ESCORIÃO et al., 2012).

Observados os principais usos dados aos modelos hidrológicos e considerando que Naghettini et al. (2007) entendem que as repostas aos diversos problemas hidrológicos estão associadas à qualidade e quantidade dos registros hidrológicos, surgem algumas questões: Quais as condições que um modelo deve respeitar? Qual o intervalo de dados necessários para que se possa ter confiança nos resultados fornecidos pelos modelos? Qual a influência dos erros sobre a eficiência do modelo?

As respostas a algumas das perguntas feitas acima estão contempladas nos estudos feitos por Xu e Vandewiele (1994), ao informarem que os modelos, para serem utilizados na engenharia devem satisfazer as seguintes condições:

- ✓ Disponibilidade de dados necessários para a calibração, de forma a favorecer a universalização do modelo, ou seja, a inexistência de dados para ajustar um modelo torna inviável seu uso;
- ✓ A calibração deve ser fácil de ser realizada. Tal afirmação leva em consideração o princípio da parcimônia, a partir do qual se entende que um modelo deve ser constituído da forma mais simples possível e com o menor número de parâmetros, conseguindo uma boa representação dos processos envolvidos no sistema.

Além dessas condições, os estudos de Xu e Vandewiele (1994) consideraram que uma série de dados com 10 anos é necessária e suficiente para uma calibração confiável, uma vez que, após esse período, não há praticamente ganho algum em qualidade do modelo. Eles ressaltam ainda que seus estudos diferem de O'Donnell e Canedo (1980), no qual, os autores atribuem que 3 anos seria adequado, que 5 anos seria melhor e acima disso os ganhos são reduzidos. Ainda segundo Xu e Vandewiele (1994), outros autores identificaram 15 anos como o período necessário para a calibração, e explicam que essas diferenças estariam ligadas a: (1) questões climáticas das áreas analisadas, (2) entradas dos modelos, já que O'Donnell e Canedo (1980) trabalharam com dados diários, e (3) própria flexibilidade dos modelos utilizados em seus estudos. Já Yapo et al. (1996) a partir de uma série histórica de 40 anos de dados estimou que um período de 8 anos de dados é necessário para obter calibrações insensíveis ao período selecionado. Concluindo ainda que para a obtenção de parâmetros mais confiáveis, devem-se considerar as condições hidroclimáticas, uma vez que, o desempenho do modelo na calibração é elevado quando são utilizados os períodos de dados que incluem os eventos mais críticos.

Com referência aos erros, Xu e Vandewiele (1994) destacam que erros sistemáticos (10% em relação ao observado) sobre os dados de precipitação não são significativos na estimativa do escoamento, no entanto apresentam efeitos consideráveis sobre a estimativa dos valores dos parâmetros do modelo. Ainda, que erros aleatórios nos dados de entrada, quando grandes (desvio padrão nos erros da precipitação variando entre 10 e 20% para as bacias analisadas), afetam significativamente o desempenho do modelo.

Observando as aplicações dadas aos modelos e as considerações feitas por alguns autores, tem-se a dimensão dos transtornos que os erros nos dados de entrada podem acarretar, tanto economicamente quanto socialmente. Cabe assim, uma melhor compreensão das diferentes fontes de erros, tipos de erros e à avaliação de seus impactos sobre os modelos hidrológicos, conforme apresentados nos itens seguintes.

3.3. *PRECISÃO DAS MEDIÇÕES HIDROLÓGICAS*

3.3.1. **Considerações iniciais**

Teoricamente, o verdadeiro valor dos fenômenos e das variáveis hidrológicas não pode ser determinado por medição, uma vez que, apesar de existirem maneiras razoáveis de quantificar e reduzir erros que possam ocorrer nessa medição, os erros na medição não podem ser eliminados completamente (WMO, 1994; LOUCKS E BEEK, 2005). Se as medições são independentes umas das outras, a incerteza nas medições pode ser estimada tomando-se ao menos entre 20 e 25 observações para o cálculo do desvio padrão, e assim determinar o nível de confiança dos resultados. No entanto, tal procedimento seria inviável em medições hidrométricas, uma vez que o valor da variável durante o processo de medição sofreria variações ao se realizar tantos procedimentos. Devido a isso, a análise da incerteza associada a esses dados pode ser contemplada ao se avaliar as várias fontes de erro nas medições (WMO, 1994). Mas tal afirmação nos levaria a outro problema, uma vez que, a aplicação de estatísticas em dados hidrológicos parte do pressuposto que os dados hidrológicos observados são variáveis aleatórias independentes, com uma determinada distribuição estatística predefinida, quando na verdade o termo aleatório transmite a idéia que o evento ocorra ao acaso, sem uma distribuição específica.

Nesse sentido, é válido distinguir a incerteza do erro, uma vez que algumas vezes estas se confundem. A incerteza está associada à falta de perfeição, enquanto que o erro estaria associado justamente à diferença entre o valor medido e o valor verdadeiro. O valor verdadeiro corresponde ao valor obtido numa medição ideal, feita em condições perfeitas, com instrumentos perfeitos e por operadores perfeitos, na escala espacial adequada. No entanto, por mais cuidado que se tenha ao efetuar uma medição, em condições reais, os resultados dela provavelmente contêm erros (CABRAL, 2004).

Nesse contexto, nas medições certamente é feito uso de algum aparelho ou equipamento. Dessa forma, é válido refletir sobre as seguintes questões: O observador responsável por manejar os dados, está apto para trabalhar com os dados medidos? Existe algum fator externo que possa estar interferindo nas medidas? O próprio ato de medir, já estaria embutindo um erro sobre a medição? O modelo é sensível a esses erros? A interpolação de valores pontuais permite uma boa estimativa de comportamento médio espacial? Essas são apenas algumas perguntas que exemplificam interferências às quais estão sujeitos os dados de entrada e, conseqüentemente, o efeito sobre os modelos que utilizam tais dados. Nesse contexto, Lima (2010) destaca que, por mais criteriosa que seja uma medição, por mais preciso que seja o instrumento, não é possível a obtenção de uma medida exata. Já Aitken (1973) destaca que deve ser reconhecida a existência de erros, tanto nos dados de entrada quanto nos parâmetros que descrevem a física do sistema.

Fica clara, então, a necessidade de se avaliar como os modelos hidrológicos se comportam, quando sujeitos a erros nos dados de entrada. Essa necessidade já vem sendo contemplada em alguns estudos, sendo que, Oudin et al. (2006), concluíram que os modelos hidrológicos usam suas diferentes funções para absorver erros dos dados de entrada e mitigar o seu impacto sobre as vazões simuladas. Seguindo essa análise constata-se a afirmação de Allasia e Villanueva (2003), de que o objetivo da análise da incerteza é proporcionar ferramentas que indiquem limitações na aplicação dos modelos, e contribuir com o conhecimento dos parâmetros mais significativos.

O'Donnell e Canedo (1980) e Xavier (2002), destacam em seus estudos as seguintes fontes de incerteza na modelagem hidrológica:

1. Registro de dados da bacia hidrográfica

- a) Erros na coleta dos dados brutos;
- b) Dados pontuais são tidos como médias espaciais;

- c) Redução de dados contínuos para média temporal;
- d) Estimativa de variáveis que não são diretamente observadas.

2. Estrutura do modelo:

- a) Imperfeito conhecimento dos processos que ocorrem na bacia hidrográfica;
- b) Aproximações grosseiras na representação dos processos da bacia hidrográfica;
- c) Modelo agregando espacialmente propriedades variáveis da bacia, a exemplo da capacidade de infiltração;
- d) Tratamento dos processos de forma sequencial, quando esses na verdade ocorrem simultaneamente;
- e) Omissão de alguns processos que ocorrem na bacia, por estes serem considerados sem importância para a modelagem.

3. Calibração do modelo

- a) Escolha da função-objetivo;
- b) O tamanho da série de dados utilizados na calibração;
- c) Variabilidade do desempenho do modelo hidrológico para amostras de dados diferentes utilizadas na calibração;
- d) Critérios para definir a convergência do processo de calibração;
- e) Incapacidade de discriminar entre ótimo global e ótimo local durante o processo de calibração.

A análise desse tópico torna necessária uma descrição dos erros sistemáticos e dos erros aleatórios nos dados de entradas de modelos hidrológicos, os quais vêm sendo alvo de diferentes estudos na área, uma vez que, tais erros tentam representar de forma simplificada o comportamento dos erros existentes nas medições dessas variáveis.

3.3.2. Fontes de erros

Fontes de erros nos dados hidrológicos estão normalmente associadas ao tipo de instrumento utilizado na medição, e ao próprio método de medição adotado, o qual apresenta sua própria fonte de erros. As fontes específicas de erros são tipicamente mencionadas nos manuais dos aparelhos de medição, bem como na metodologia operacional adotada. Segundo a WMO (1994), algumas fontes de erro incluem:

- ✓ Determinação incorreta do ponto de referência de um instrumento. Essa situação pode ser encontrada na determinação do nível de um posto fluviométrico que tenha suas medições baseadas no nível do manancial através da curva-chave;
- ✓ Erro de leitura do aparelho de medição pelo operador. Nesse caso, a má visibilidade dos dados do aparelho pode levar a uma leitura equivocada;
- ✓ Erro devido à interpolação. Ocorre por exemplo na medição de velocidade através do molinete para estimativa da vazão ou na determinação da precipitação e evapotranspiração, onde os métodos aplicados descrevem valores pontuais como representativos para a medida de uma determinada área;
- ✓ Erro instrumental. No qual o aparelho tende a fornecer medidas diferentes para um mesmo valor real;
- ✓ Erro de insensibilidade. Através do qual o aparelho não consegue captar a mudança no fenômeno ou variável medida;
- ✓ Erro devido a fatores climáticos. Ocorre quando o aparelho de medição pode ser afetado pela temperatura, ou outra pressão externa sem relação com o elemento medido;
- ✓ Erro de instabilidade. Tende a ocorrer quando o aparelho de medição não consegue manter certas propriedades especificadas;
- ✓ Erro devido ao evento apresentar-se fora da capacidade de medição do aparelho. Pode ocorrer quando o evento medido apresenta-se inferior ao mínimo, ou superior ao máximo do valor possível de ser medido pelo aparelho. Um exemplo desse caso pode ser observado nas medições feitas com ADCP em zonas nas quais ele não consegue definir os campos de velocidade, ou em zonas nas quais a profundidade é muito baixa;

Observados esses aspectos entende-se que os erros estão associados tanto aos métodos e aparelhos empregados nas medições, quanto a erros operacionais. Dessa forma, o emprego de melhores aparelhos, com precisões maiores, normalmente implica em um maior custo, bem como em pessoal qualificado para operá-lo, tornando importante avaliar qual decisão tomar ao considerar a precisão requerida e o custo associado. Essa ideia pode ser deduzida através dos estudos de Boiten (2008), no qual são apresentados vários métodos empregados na obtenção da vazão de um rio, sejam eles com medições simples ou contínuas, bem como o erro associado ao seu uso. O autor apresenta que a composição do erro na estimativa de vazão está associada à profundidade, à largura e à velocidade do escoamento podendo ser eles sistemáticos ou aleatórios. Ainda, o autor considera alguns

aspectos sobre o uso da curva-chave na obtenção da vazão, dando certa importância à dificuldade de medições de vazões muito baixas ou elevadas, além de considerar a diferença encontrada quando a medição é feita durante o período de cheias e de recessão do hidrograma.

Essas considerações, elencadas para o caso da medição de vazão, aplicam-se quase todas à obtenção da evapotranspiração e da precipitação, nas quais, em muitos casos ocorrem situações onde: valores pontuais acabam representando áreas extensas; o equipamento usado na medição sofre efeito de fenômenos externos (radiação solar, animais, etc); o operador comete alguma falha ao coletar os dados.

3.3.3. Erros Sistemáticos

Erros nos dados de entrada ocorrem por diversos motivos, e no caso dos erros sistemáticos, a principal causa resume-se a erros instrumentais e até mesmo humanos, tendo como principal consequência o desvio do valor médio com relação ao valor tido como correto. Devido a este tipo de erro repercutir sistematicamente, sua identificação torna-se bastante complicada. Esse tipo de erro apresenta a característica de ocorrer principalmente na instrumentação, de forma que não pode ser reduzido com o aumento do número de medições, se os instrumentos e procedimentos persistirem inalterados. No entanto, caso o erro sistemático tenha um valor conhecido, segundo Lima (2010), tais erros podem ser eliminados ou compensados em algumas situações através da adição ou subtração da parcela conhecida.

Troutman (1982,1983 apud OUDIN et al., 2006), concluiu que os erros sistemáticos das chuvas são transferidos para o modelo como incertezas nos parâmetros. Isto é, durante a calibração utilizando esses dados de entrada, os valores dos parâmetros são modificações daqueles obtidos na simulação de referência (utilizando os dados sem erros) e o desempenho do modelo praticamente não diferiu do obtido durante a simulação de referência. Concordando com esses resultados, Xu e Wandewiele (1994), também observaram que os erros sistemáticos sobre os dados de precipitação quase não afetam a eficiência do modelo, destacando que este foi um resultado inesperado, à medida que difere de outras literaturas. No entanto, os autores reconhecem que tais erros tem uma influência significativa nos valores dos parâmetros do modelo. Esse reconhecimento está

associado ao modelo depender de um ajuste empírico, de forma que, os parâmetros não refletem o fenômeno natural.

Oudin et al. (2006) apresentam resultados contrários aos apresentados pelo dois trabalhos prévios, e concluíram que erros sistemáticos nos dados de evapotranspiração acarretam em um impacto moderado sobre o desempenho dos modelos. E destacam que um dos modelos hidrológicos avaliados mostrou um balanço hídrico mais aceitável que o outro quando sujeito a tais erros. Já sobre o efeito de erros sistemáticos nos dados de precipitação, os autores mencionam que o desempenho dos modelos foi drasticamente afetado.

Collischonn e Tassi (2011) atentam para algumas fontes de erros nas observações de precipitação, dentre as quais, o crescimento de vegetação, ou outra obstrução próxima ao posto de observação, a danificação do aparelho e problemas mecânicos no registrador gráfico estariam associados aos erros sistemáticos, uma vez que, interferem na tomada da medição de forma fixa.

Para introduzir os erros sistemáticos nos dados de entrada de precipitação, Oudin et al. (2006) utilizaram em seus estudos um viés multiplicativo. Essa metodologia consiste em inserir um erro que afete todos os dias da série de dados através da seguinte fórmula:

$$P_j^* = KP_j \quad (3.1)$$

onde K é o coeficiente que permite o teste sistemático sobre o fenômeno a ser analisado; $P_j^*(\text{mm})$ é o valor da precipitação perturbada no dia j; $P_j(\text{mm})$ é o valor observado de precipitação no dia j.

O valor do K deve permitir que o modelo apresente um desempenho razoável. No entanto, valores muito extremos podem provocar resultados incoerentes na simulação, como na estimativa dos parâmetros. Nesse sentido, Oudin et al. (2006) utilizaram diferentes valores de K variando entre 0,5 e 2 no caso da precipitação.

Escarião et al. (2012), ao avaliarem a influência do modelo hidrológico nos deflúvios superficiais de uma bacia hidrográfica na região semi-árida do Brasil, geraram séries sintéticas de precipitação, segundo um viés multiplicativo, de forma a criar cenários para possíveis mudanças climáticas. Para alcançar tal fim, estabeleceram que a precipitação variasse entre -20% e 20%, baseados na seguinte equação:

$$P_j^* = P_j \left(1 + \frac{\Delta P}{100} \right) \quad (3.2)$$

onde $P^*_j(\text{mm})$ é o valor da precipitação perturbada no dia j ; $P_j(\text{mm})$ é o valor observado de precipitação no dia j ; e $\Delta P(\%)$ representa a variação da precipitação.

Já com relação à evapotranspiração, os erros sistemáticos estão associados aos equipamentos utilizados, e a erros cometidos pelo observador. Um erro típico associado, ao observador, ocorre quando este toma a medida abaixo ou acima do valor real, no caso de não estar preparado tecnicamente para efetuar a leitura. Incertezas ainda existem na definição de coeficiente para a estimativa de dados de evapotranspiração potencial a partir de dados de evaporação obtidos, por exemplo, de tanques Classe A ou evaporímetros de Piché. Outros métodos de obtenção da evapotranspiração potencial fazem uso de dados climáticos, tendo os erros associados prioritariamente aos equipamentos utilizados na obtenção desses dados. Os estudos de Carvalho e Reis (2008), por exemplo, avaliaram o desempenho de um dado modelo quando alimentado com dados de evapotranspiração adquiridos de seis diferentes métodos. Nesse estudo, os métodos como o de Penman e Penman-Monteith se destacavam mais em relação aos outros, sendo um resultado já esperado pelos autores, devido à complexidade desses métodos quando comparados aos outros que se baseavam apenas na temperatura. Os autores destacam ainda, que o modelo analisado é insensível às perdas de informação em relação à evapotranspiração quando esses dados que alimentam o modelo são baseados nas normais climatológicas e apontam assim a necessidade de avaliar a forma como os modelos chuva-vazão empregam os dados e evapotranspiração na estimativa da evapotranspiração real na bacia em análise.

Na inserção de erros sistemáticos nos dados de evapotranspiração, Oudin et al. (2006) utilizaram um viés multiplicativo semelhante ao utilizado para a precipitação. O erro foi embutido em todos os dias da série de dados através da seguinte fórmula:

$$E_j^* = KE_j \quad (3.3)$$

onde K é o coeficiente que permite o teste sistemático sobre o fenômeno a ser analisado; $E^*_j(\text{mm})$ consiste nos dados de evapotranspiração perturbada; $E_j(\text{mm})$ representa os dados observados de evapotranspiração. A proposta de Oudin et al (2006), foi de variar o coeficiente K entre 0,5 e 2.

Sendo assim, é válido ressaltar, que os dados de precipitação e evapotranspiração normalmente disponibilizados, são pontuais, e a medida é representativa até uma determinada área de abrangência do dispositivo. No entanto, os modelos hidrológicos tipicamente precisam de valores médios dessas variáveis em áreas maiores, sendo

necessária a aplicação de técnicas de interpolação que também tem incertezas no produto gerado.

3.3.4. Erros aleatórios

Erros aleatórios tem sua origem nos mais variados aspectos da medição de um fenômeno e, devido à sua aleatoriedade, torna-se bastante complicada sua eliminação. Esse tipo de erro não pode ser eliminado, mas seus efeitos podem ser mitigados através de repetidas medições do fenômeno ou variável em análise. Entende-se que a distribuição de erros aleatórios pode ou não ser considerada normal (gaussiana). Dessa forma, em certos casos, a distribuição normal pode, ou deve, ser substituída por outras distribuições estatísticas (WMO, 1994).

Ibbitt (1972, apud OUDIN et al., 2006), é tido como um dos pioneiros na investigação do impacto de erros aleatórios sobre os valores dos parâmetros de um modelo hidrológico. Esse autor utilizou uma série sintética de precipitação e avaliou o impacto de erros aleatórios de magnitude crescente no desempenho de um modelo hidrológico. Foi observado durante esses testes que os valores médios dos parâmetros obtidos com os dados de entrada perturbados não diferiram significativamente dos valores de referência. Assim, as componentes de armazenamento do modelo atenuaram o impacto dos erros sobre a precipitação, os quais foram absorvidos no cálculo da evaporação real, de forma que, os valores dos parâmetros obtidos com dados perturbados não diferem significativamente dos valores de referência.

Xu e Wandewiele (1994) avaliaram a sensibilidade de um modelo chuva-vazão ao ter os dados de entrada acrescidos de erros aleatórios através do método de Monte Carlo. Seu estudo demonstrou que para as bacias avaliadas na Bélgica, o modelo teve seu desempenho seriamente afetado quando os desvios chegaram a 20% e para as bacias avaliadas na China os desvios se concentraram em 10%, no entanto foram avaliadas 85 bacias na Bélgica e apenas seis na China.

A perturbação de series de dados observados com erros aleatórios foi abordada por Kavetski et al. (2003, apud, OUDIN et al., 2006), de forma que, o erro sofreu mudanças a cada dia, sendo descrita pela seguinte equação:

$$P_j^* = P_j e^{(\sigma \eta_j - \frac{\sigma^2}{2})} \quad (3.4)$$

onde $P_j^*(\text{mm})$ é o valor da precipitação perturbada no dia j ; $P_j(\text{mm})$ é o valor observado de precipitação no dia j ; σ é o coeficiente de intensidade do erro aleatório; η_j é um número aleatório com distribuição normal com média igual a zero e desvio padrão igual á unidade, o qual é gerado para cada dia da série.

Conforme os estudos de Oudin et al. (2006), na perturbação de dados de precipitação, o coeficiente σ sofreu uma variação entre 0 e 0,5. Valores superiores a 0,5 foram desconsiderados, pois,provocaram desempenho muito baixos no ajuste dos modelos GR4J e TOPMO os quais foram alvo de estudo dos referidos autores.

Já as análises do impacto de erros aleatórios nos dados de evapotranspiração no desempenho do modelo foram contempladas por Kavetski et al. (2003, apud, OUDIN et al., 2006) ao analisar os efeitos sobre um simples modelo hidrológico ABC. Nessa análise os autores optaram por considerar um erro aleatório nos dados mensais, ao invés dos dados diários, de forma a favorecer a inércia comportamental da evapotranspiração.

Dessa forma, a seguinte equação descreve a inserção do erro na série de dados de evapotranspiração:

$$E_j^* = E_j e^{(\sigma \eta_j - \frac{\sigma^2}{2})} \quad (3.5)$$

onde $E_j^*(\text{mm})$ consiste nos dados de evapotranspiração perturbada; $E_j(\text{mm})$ representa os dados observados de evapotranspiração; σ é o coeficiente de intensidade do erro aleatório; η_j é um número aleatório com distribuição normal com média igual a zero e desvio padrão igual à unidade, o qual é gerado para cada dia da série. Semelhante ao caso da precipitação, o coeficiente σ foi variado entre 0 e 0,5.

Oudin et al. (2006) ao contemplar em seus estudos o efeito de erros aleatórios nos dados de evapotranspiração, sobre dois modelos distintos, constatou que ambos os modelos apresentaram-se quase insensíveis a tais erros. Apesar de reconhecerem que um modelo apresentou-se menos sensível que o outro. Esse fato foi atribuído pelos autores às características intrínsecas dos modelos chuva-vazão. Já os erros aleatórios nas precipitações se mostraram com um dos elementos de maior impacto no desempenho de ambos os modelos hidrológicos avaliados.

3.4. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Analisando os tópicos referentes aos erros, verifica-se que a representação sintética dos erros nas avaliações envolve a quantificação das incertezas nas entradas do modelo e sua propagação através da aplicação deste. Dessa forma a análise de incerteza, segundo Loucks e Beek (2005), considera o grau do erro nos dados de entrada, e assim tem o intuito de obter uma estimativa da probabilidade de ocorrência dos resultados. Enquanto que a análise de sensibilidade do modelo é tida por Hall et al. (2009) como o inverso do problema anterior, uma vez que, a análise da sensibilidade pode contribuir com o conhecimento tanto do impacto das variáveis de entrada, quanto do impacto dos parâmetros do modelo hidrológico, sobre os resultados alcançados com a aplicação deste, sem no entanto, conforme explicam Loucks e Beek (2005), considerar uma descrição probabilística dos erros nos dados de entrada.

Mccuen e Snyder (1986, apud SALES, 2012) descreve a análise da sensibilidade como um método a partir do qual é possível avaliar os efeitos que as variáveis ou parâmetros de um modelo hidrológico têm sobre as respostas obtidas com a aplicação do modelo. Já Silveira (2010) entende a análise da sensibilidade como uma técnica que proporciona a avaliação das variáveis de saída em função de alterações nos valores dos fenômenos de entrada. Essas afirmações sugerem a análise de sensibilidade como uma relação entre a mudança da resposta quando sujeita a um dado estímulo.

Observa-se que a análise da sensibilidade pode ser contemplada, alterando-se a variável de entrada e verificando-se os efeitos dessa alteração sobre a resposta do modelo, ou através da alteração dos parâmetros do modelo separadamente, enquanto os demais são mantidos constantes.

Hall et al. (2009), ao realizar a análise de sensibilidade de um modelo hidrodinâmico, compreende que a análise da sensibilidade é uma parte necessária na modelagem, ao contribuir no diagnóstico da influência que os fatores de entrada do modelo têm na saída estimada pelo modelo, seja de forma individual ou combinada. Dessa forma, os referidos autores destacam as seguintes razões para utilizar a análise da sensibilidade nos estudos:

- ✓ Identificar os fatores que podem necessitar de mais pesquisas para melhorar a confiança nos resultados do modelo;

- ✓ Identificar os fatores que são insignificantes para a saída gerada pelo modelo e que podem ser eliminados de uma análise mais profunda;
- ✓ Verificar se o modelo reproduz corretamente o processo que está simulando;
- ✓ Encontrar o domínio de cada parâmetro para uso em estudos de calibração;
- ✓ Identificar, caso exista, a interação entre os fatores, ou grupo de fatores;
- ✓ Estabelecer se o modelo fornece resultados coerentes para variações nos fatores de entrada, ou, em caso contrário, se depende de hipóteses frágeis.

Van Griensven et al. (2006) destacam a importância da análise de sensibilidade, uma vez que, em virtude dos vários parâmetros de entrada do modelo apenas alguns apresentam real relevância para a calibração do mesmo. Os referidos autores destacam que cada novo modelo requer uma análise de sensibilidade própria, de forma a identificar um subconjunto de parâmetros, os quais serão utilizados na calibração do modelo ou na análise de incerteza. Nesse sentido, o referido estudo fez uso da análise de sensibilidade no modelo SWAT, considerando os parâmetros referentes a qualidade da água presentes no modelo.

Collishonn (2001) avaliou a sensibilidade aos parâmetros de um modelo de grandes bacias para a bacia do rio Taquari Antas. A sensibilidade foi avaliada pelo autor através da variação do coeficiente de Nash-Sutcliffe e do erro relativo do volume, para uma faixa aceitável do valor de cada parâmetro. O autor conduziu a análise de sensibilidade separadamente para cada parâmetro do modelo estudado, de maneira que, o parâmetro a ser analisado era alterado enquanto os demais permaneciam constantes. Ao final, o autor fez uma análise de sensibilidade qualitativa, baseada no coeficiente de Nash-Sutcliffe, no coeficiente de Nash-Sutcliffe do logaritmo das vazões e no erro do volume, classificando a sensibilidade do modelo em relação à variação do parâmetro em alta, média e baixa. Observa-se então que as funções escolhidas pelo autor visam acompanhar o desempenho do modelo para as cheias (Nash-Sutcliffe) e estiagens (Nash-Sutcliffe do logaritmo das vazões), além de verificar a variação do volume (erro do volume).

Já Silveira (2010) avaliou a sensibilidade do hidrograma unitário sintético do SCS (*Soil Conservation Service*) e do método de Santa Bárbara aos parâmetros desses modelos em função da vazão de pico. O procedimento adotado pela autora consistiu em variar os valores de cada parâmetro separadamente enquanto os demais permaneciam constantes, e verificar a influência dessa alteração sobre a vazão de pico.

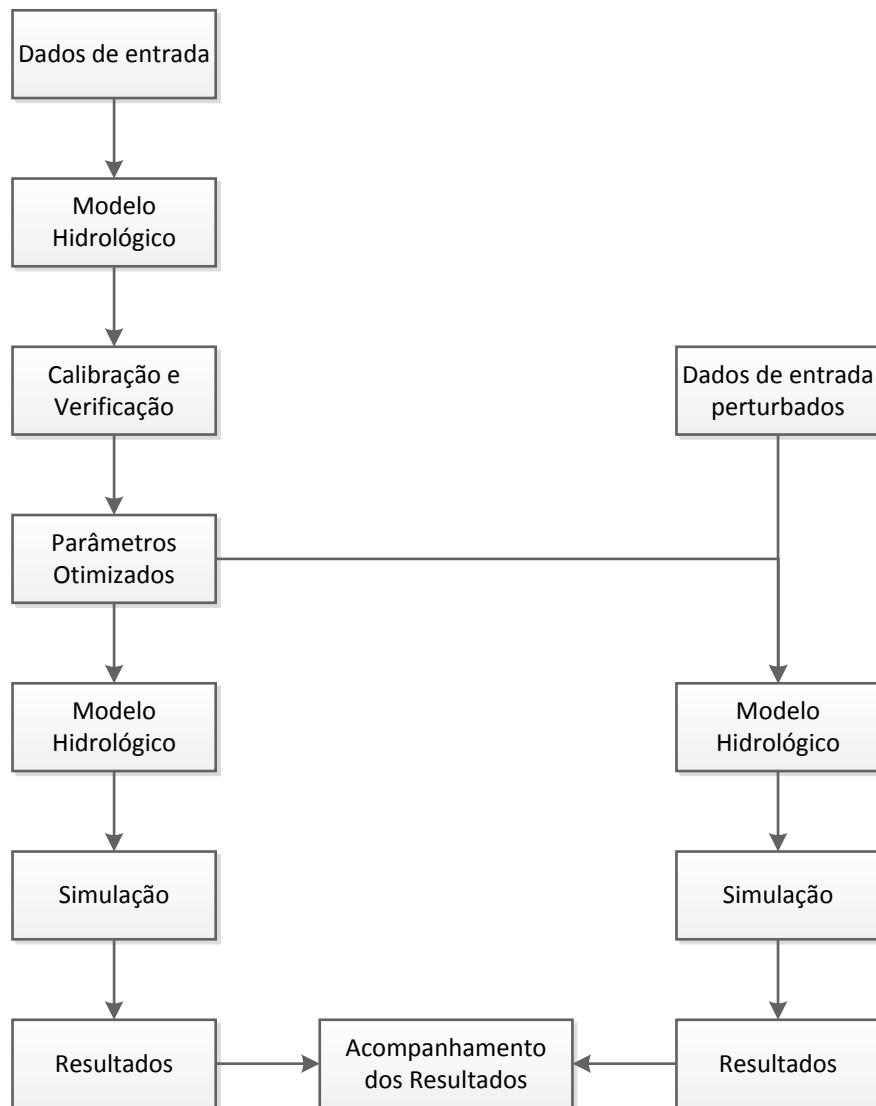
Oudin et al. (2006) aponta em seus estudos algumas diferenças entre as análises referentes à sensibilidade. Segundo o autor essa aparente divergência consiste nos seguintes pontos:

- ✓ Falta de consenso sobre os tipos de testes utilizados para avaliar os impactos de erros dos dados sobre o desempenho dos modelos e na determinação dos parâmetros.
- ✓ Tipos de modelos utilizados;
- ✓ Número e tipo das bacias utilizadas;
- ✓ Intervalo proposto para erros aleatórios e sistemáticos.

Ainda segundo Oudin et al. (2006), um possível caminho para entender melhor as diferenças entre os estudos referentes a análise de sensibilidade são os estudos de Andressian (2004), os quais consideram a existência de dois grupos de análise da sensibilidade, são elas:

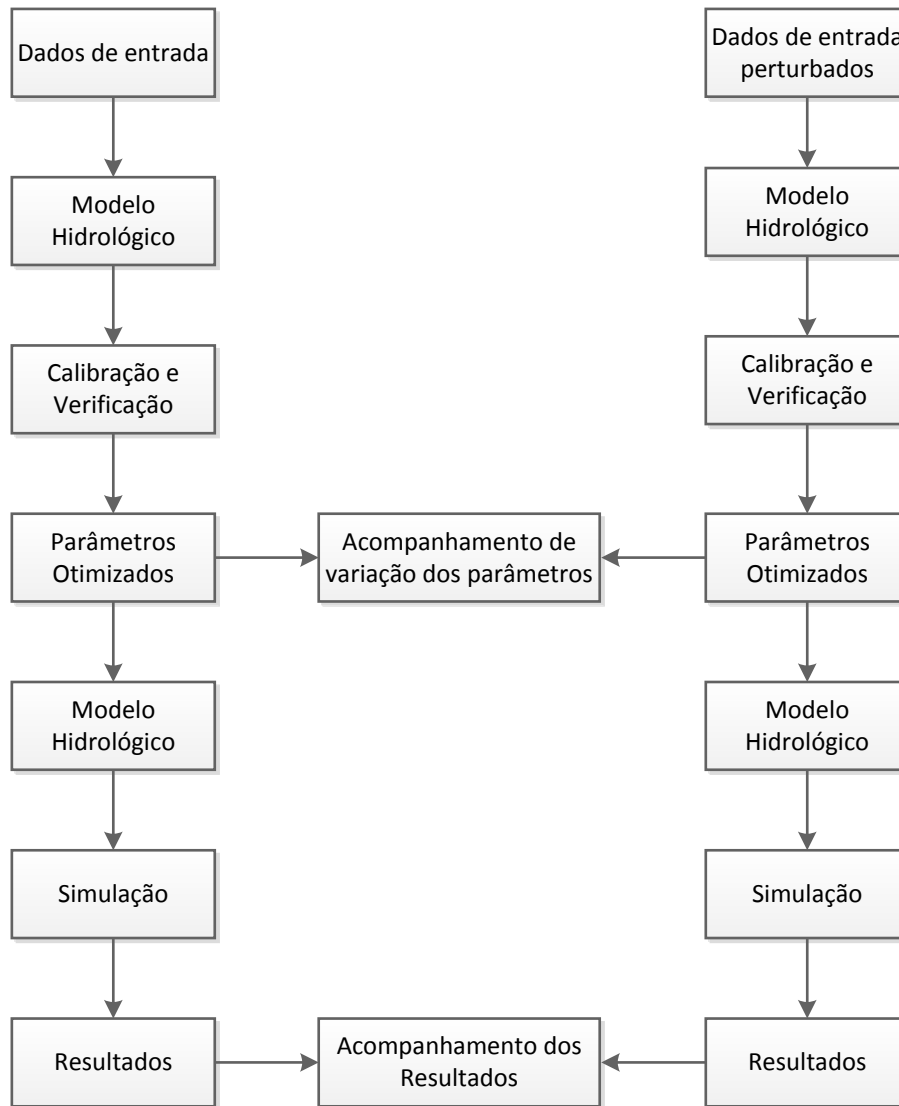
- ✓ Sensibilidade estática: consiste em calibrar o modelo utilizando os dados de entrada observados. Posteriormente, os dados de entrada são perturbados, incluindo diferentes tipos de erros. A seguir, o modelo previamente calibrado é alimentado com os dados perturbados, sendo avaliado por fim o impacto nas repostas oferecidas pelo modelo. As análises de sensibilidade estática são as mais utilizadas na bibliografia. Na Figura 3.1 observa-se o processo de análise da sensibilidade de forma estática;

Figura 3.1 - Fluxograma representando a análise da sensibilidade de forma estática



- ✓ Sensibilidade dinâmica: Nesse tipo de análise, o processo de calibração é repetido para cada conjunto de dados. A cada alteração dos dados de entrada o modelo deve ser novamente calibrado, e assim é possível avaliar os efeitos que a alteração dos dados de entrada produz nos resultados obtidos com a simulação do modelo e na estimativa dos parâmetros. A Figura 3.2 ilustra esse procedimento.

Figura 3.2 - Fluxograma representando a análise da sensibilidade de forma dinâmica, na qual a análise é feita tanto nos parâmetros quanto nos resultados fornecidos pelo modelo.



Essas análises de sensibilidade são interessantes uma vez que é reconhecido que em muitos casos vários conjuntos de parâmetros podem alcançar a mesma precisão para um dado modelo. Levando essa afirmação em consideração, Kleidorfer et al (2008) destacam a importância em analisar a sensibilidade dos parâmetros e do modelo ao considerar as incertezas nos dados de entrada do modelo na calibração ao embutir erros sistemáticos e aleatórios nos dados de precipitação, tendo como intuito verificar o impacto dessa situação sobre o modelo KAREN. Nesse estudo, os autores constataram que erros sistemáticos (entre $\pm 30\%$) apresentam impacto significativo nos parâmetros que geram o escoamento, enquanto os erros aleatórios com distribuição uniforme ($\pm 50\%$) apenas

provocaram efeito sobre os parâmetros de poluição do referido modelo. Observados os pontos elencados até aqui, entende-se que a análise de sensibilidade permite usar o modelo de uma forma mais criteriosa (ANTUNES, 1980).

3.5. CALIBRAÇÃO

Na utilização de um modelo chuva-vazão conceitual, a calibração dos parâmetros é tida como uma etapa fundamental. A calibração consiste em modificar os valores dos parâmetros do modelo, até que este apresente o hidrograma calculado condizente com o observado. A execução dessa tarefa pode ser de forma manual ou automática.

A literatura em geral tem o consenso que a calibração manual é interessante no que diz respeito ao entendimento do modelo pelo usuário, e desfavorável à medida que o processo de parada é adequado conforme a sensibilidade do mesmo, tornando-se muitas vezes um processo demorado, acarretando em cansaço por parte do operador. Já com relação à calibração automática, é evidente sua rapidez, o que favorece usuários que não tenham familiaridade com o modelo em uso, no entanto alguns autores questionam que a calibração automática utilizada por usuário inexperiente pode favorecer o surgimento de parâmetros com valores incompatíveis com a realidade, dentre outros aspectos, a serem considerados mais a frente (SOROOSHIAN & GUPTA 1995; BRAVO et al. 2007). Nessa conjuntura é altamente recomendável limitar o intervalo de variação dos parâmetros calibráveis de maneira a contribuir na estimativa de valores dos parâmetros compatíveis com as condições físicas reais.

Collischonn e Tucci (2001) informam que a calibração automática é elaborada no sentido de contornar a falta de usuários experientes, dar agilidade ao processo e providenciar sua repetição, reduzindo assim a subjetividade. Os autores destacam, ainda, que as ferramentas utilizadas procuram o valor otimizado do conjunto de parâmetros de um modelo hidrológico, com a mínima interferência do usuário. Nesse sentido, os referidos autores abordaram em seus estudos a aplicação do algoritmo SCE-UA para a calibração do modelo hidrológico IPH II.

Tucci (2005) aponta uma gama expressiva de algoritmos de calibração automática. Esses algoritmos tem o intuito de achar o ponto ótimo de uma função-

objetivo, o qual pode ser um máximo ou um mínimo global. A função-objetivo é, tipicamente, uma medida de desempenho da capacidade do modelo em representar as vazões observadas. Exemplos de funções-objetivo comumente utilizadas na calibração automática de modelos hidrológicos são apresentados entre as equações 3.6 e 3.12:

$$FO1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{NT} (Qo_i - Qc_i)^2}{NT}} \quad (3.6)$$

$$FO2 = \frac{\sum_{i=1}^{NT} |Qo_i - Qc_i|}{NT} \quad (3.7)$$

$$FO3 = 1 - ED \quad (3.8)$$

$$FO4 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{NT} \left(\frac{1}{Qo_i} - \frac{1}{Qc_i}\right)^2}{NT}} \quad (3.9)$$

$$FO5 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{NT} (Qo_i - Qc_i)^2}{\sum_{i=1}^{NT} (Qo_i - \bar{Q})^2} \quad (3.10)$$

$$FO6 = \frac{\sum_{i=1}^{NT} \frac{|Qo_i - Qc_i|}{Qo_i}}{NT} \quad (3.11)$$

$$FO7 = \frac{\sum_{i=1}^{NT} Qc_i - \sum_{i=1}^{NT} Qo_i}{\sum_{i=1}^{NT} Qo_i} * 100 \quad (3.12)$$

onde Qo_i é a vazão observada no intervalo de tempo i ; Qo_c é a vazão calculada no intervalo de tempo i ; \bar{Q} é a vazão média da série; NT é o número de intervalos de tempo da série de dados; ED corresponde a distância Euclidiana ao ponto ideal.

A equação 3.6 consiste em avaliar a dispersão entre valores observados e calculados com relação à média. Valores reduzidos dessa função expressam a tendência do ajuste próximo à média, que para o caso em questão indica a aproximação entre os dados observados e calculados, enquanto valores altos informam o espalhamento dos dados. Essa função é bastante encontrada na literatura com a denominação de RMSE, mas também pode ser entendida como o desvio padrão. Já a equação 3.7 é conhecida como Desvio Absoluto Médio, e sua concepção descreve essa função como a média aritmética dos desvios individuais em valor absoluto. A equação 3.8 corresponde à função de Kling-Gupta, a qual se apresenta como uma alternativa para a avaliação do desempenho de modelos hidrológicos, sendo descrita detalhadamente nos estudos de Gupta et al. (2009). A equação 3.9 atende pelo nome de Desvio Quadrático Inverso a qual é tida como o erro padrão do inverso da vazão, a qual pode ser utilizada para o ajuste de vazões mínimas. A

equação 3.10 é bastante conhecida por representar o coeficiente de Nash-Sutcliffe, através dessa função é possível obter um melhor ajuste para as cheias, já que os erros avaliados por ela são mais sensíveis às vazões máximas. A equação 3.11 representa o Desvio Relativo Médio entre os valores observados e simulados de forma que, se observa a tendência de um melhor ajuste das vazões mínimas e médias. Por fim, a equação 3.12 descreve o Erro do Volume, sendo comumente utilizada para avaliar o desvio geral do volume, ou seja, através dela é possível perceber a diferença entre o volume simulado e o observado, indicando assim se as equações presentes no modelo conseguem representar eficazmente o escoamento na bacia.

Existem diversas metodologias que podem ser utilizadas na calibração automática de modelos hidrológicos (BRAVO et al. 2007, 2009; COLLISCHONN, 2001; COLLISCHONN & TUCCI, 2001), sendo uma das mais utilizada o algoritmo SCE-UA (DUAN et al., 1992).

Bravo et al. (2006), informam que o algoritmo de busca global SCE-UA vem apresentando excelentes resultados na calibração automática de modelos hidrológicos. Esse algoritmo opera com uma população de soluções candidatas que converge na direção ao ótimo global de uma única função-objetivo, através de sucessivas iterações e avaliações da função. Esse algoritmo está presente no WIN_IPH2, de forma a favorecer a calibração automática dos parâmetros do modelo hidrológico IPH II.

3.6. *MODELO WIN_IPH2*

O ciclo hidrológico pode ser descrito como um fenômeno global no qual a água circula entre a superfície terrestre e a atmosfera devido à associação entre energia solar, à gravidade e a rotação terrestre. Essa afirmação descreve então o ciclo hidrológico como o fluxo global de água, o qual é constituído por vários processos. No entanto, apesar de ser um fenômeno global, o ciclo hidrológico é normalmente estudado com mais afinco na porção terrestre, onde o principal sistema de análise é a bacia hidrográfica (TUCCI et al., 2009).

Observadas as considerações feitas até aqui, o modelo WIN_IPH2 apresenta-se então no sentido de representar um sistema definido por uma bacia hidrográfica, de forma a fornecer respostas ante a ocorrência de um determinado evento. Nessa conjuntura, o WIN_IPH2 atende por um modelo chuva-vazão, concentrado, o qual foi desenvolvido no

Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), tendo o intuito de simular o escoamento em bacias rurais e urbanas. Segundo Bravo et al. (2007), esse modelo consiste em uma versão nova do modelo IPH II e tendo como diferencial a inserção de dois algoritmos de otimização para calibração automática. Além disso, o WIN_IPH2 apresenta uma interface mais amigável e uma saída gráfica de resultados que facilita a comparação de resultados em análises de sensibilidade como as propostas nessa pesquisa.

No que diz respeito à calibração, no programa ela pode ser feita tanto de forma manual quanto automática.

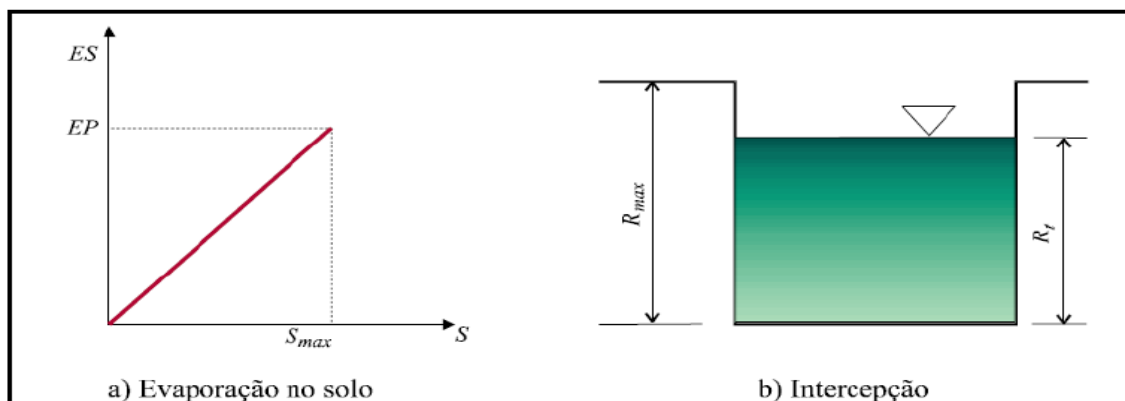
Segundo Tucci e Campana (1993), Mine (1998), Germano et al.(1998), Bravo et al. (2006), Silva (2011) o IPH II, é composto pelos seguintes algoritmos:

1 – Perdas por evaporação e interceptação;

A interceptação pode ser compreendida como a retenção de uma parcela da precipitação no dossel florestal, ou seja, pode ser entendida como um reservatório que armazena água durante certo período de tempo e subsequentemente retorna a atmosfera através da evapotranspiração, a qual é entendida como o movimento da água entre a superfície e a atmosfera, pela evaporação de superfícies líquidas, pela evaporação de superfícies úmidas e pela transpiração vegetal.

Entendido isso, o modelo parte do princípio que uma parcela da precipitação que chega a superfície, é perdida por evapotranspiração e/ou interceptação. Para representar isso, o modelo permite que a parcela da evapotranspiração seja removida da precipitação quando esta é maior que a primeira, e o excedente segue para um reservatório que tem uma capacidade máxima $R_{máx}$. Assim, quando o $R_{máx}$ é excedido, o volume não armazenado é guiado para o próximo algoritmo, responsável por informar à parcela da precipitação que irá escoar superficialmente e a parcela que vai infiltrar no solo conforme ilustrado na Figura 3.3.

Figura 3.3 - Perdas por evapotranspiração no solo e interceptação



Fonte: Mine (1998)

Ainda nessa fase, pode ocorrer da chuva não atender a evapotranspiração potencial. Quando isso ocorre, o modelo entende que parte deve ser atendida pelo reservatório de perdas, e o restante, do solo, considerando o seu conteúdo de umidade. Para descrever a retirada de água do solo, o modelo considera uma relação linear entre a porcentagem de evapotranspiração potencial e a umidade do solo, conforme a equação 3.13:

$$E_t = \frac{EP_t \cdot S_t}{S_{max}} \quad (3.13)$$

onde E_t é a evapotranspiração no tempo t ; EP_t representa a evapotranspiração potencial; S_t é o estado de umidade da camada superior do solo; e S_{max} descreve a capacidade máxima de umidade da camada superior do solo

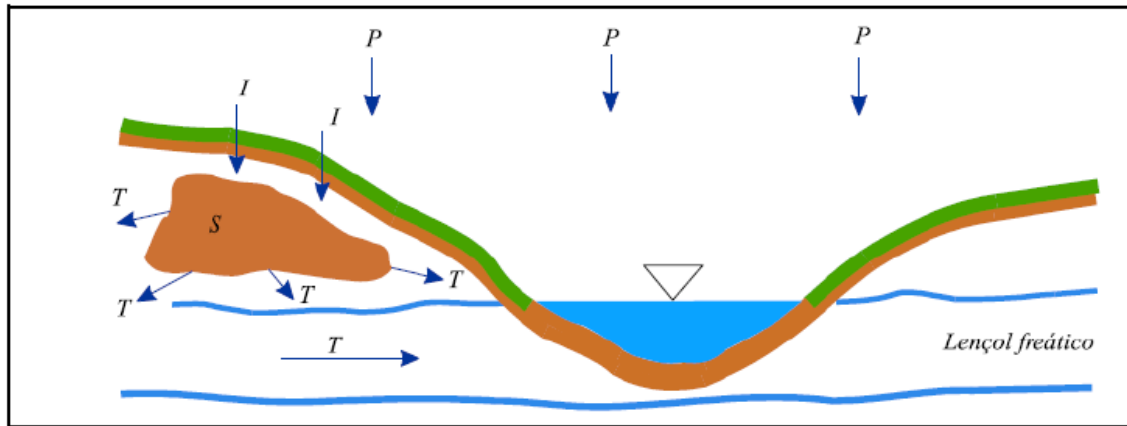
2 – Separação do escoamento;

A compreensão da separação do escoamento exige a percepção dos processos de infiltração e percolação. A primeira é tida como a parcela de água que penetra nas camadas superficiais, e locomove-se para baixo pelos poros do solo, devido à atuação da força da gravidade, até atingir uma camada impermeável. Já a percolação atua como o movimento subterrâneo da água no solo para camadas inferiores. A separação do escoamento ocorre então conforme ilustra a Figura 3.4, a qual descreve formas de movimento da água ao atingir o solo.

O entendimento dessas características permite a compreensão do próximo passo para o modelo, o qual consiste em descrever a parcela do volume excedente que vai originar escoamento superficial, e a parcela que vai participar do escoamento subterrâneo.

Segundo Tucci (2005), o algoritmo de separação de escoamentos faz uso da equação da continuidade atrelada a equação de Horton, além de uma função empírica com o intuito de representar a percolação desenvolvida por Berthelot em 1970.

Figura 3.4 - Meios de locomoção da água



Fonte: Mine (1998)

Sabendo que a equação de Horton é descrita da seguinte forma:

$$I = I_b + (I_0 - I_b)h^t \quad (3.14)$$

Onde I (mm/h) é a Capacidade de infiltração no tempo t ; I_b (mm/h) a capacidade de infiltração quando o solo está saturado; I_0 (mm/h) a capacidade de infiltração do solo correspondente à capacidade de campo; e h^t um adimensional dado por e^{-k} , onde k é um parâmetro empírico dependente do tipo de solo.

Considerando a equação empírica de Berthelot para a percolação da camada superior do solo, da seguinte forma:

$$T = I_b \cdot (1 - h^t) \quad (3.15)$$

onde T é a Percolação; I_b (mm/h) a capacidade de infiltração quando o solo está saturado; e h^t um adimensional dado por e^{-k} , onde k é um parâmetro empírico dependente do tipo de solo.

Entendendo a equação da continuidade manuseada para informar o processo que ocorre na camada superficial do solo como:

$$\frac{dS}{dt} = I - T \quad (3.16)$$

Tem-se que, ao efetuar a substituição das equações 3.14 e 3.15 em 3.16 e fazendo a integração no intervalo $t=0$ até t , obtém-se o armazenamento no solo através da seguinte formulação:

$$S = S_0 + \frac{I_0}{\ln(h)}(h^t - 1) \quad (3.17)$$

onde S é o armazenamento no solo; S_0 é o estado de umidade do solo quando inicia a percolação, sendo que no modelo IPH II foi adotado $S_0 = 0$; I_0 (mm/h) a capacidade de infiltração do solo correspondente a capacidade de campo; e h^t um adimensional dado por e^{-k} , onde k é um parâmetro empírico dependente do tipo de solo.

Isolando-se h^t , em 3.14 e 3.15, e substituindo em 3.17, são obtidas duas equações que relacionam o armazenamento com a infiltração e a percolação, como pode ser acompanhado a seguir:

$$S_t = a_i + b_i \cdot I_t \quad (3.18)$$

$$S_t = a_i + b_i \cdot T_t \quad (3.19)$$

$$a_i = \frac{(-I_0)^2}{(\ln(h) \cdot (I_0 - I_b))} \quad (3.20)$$

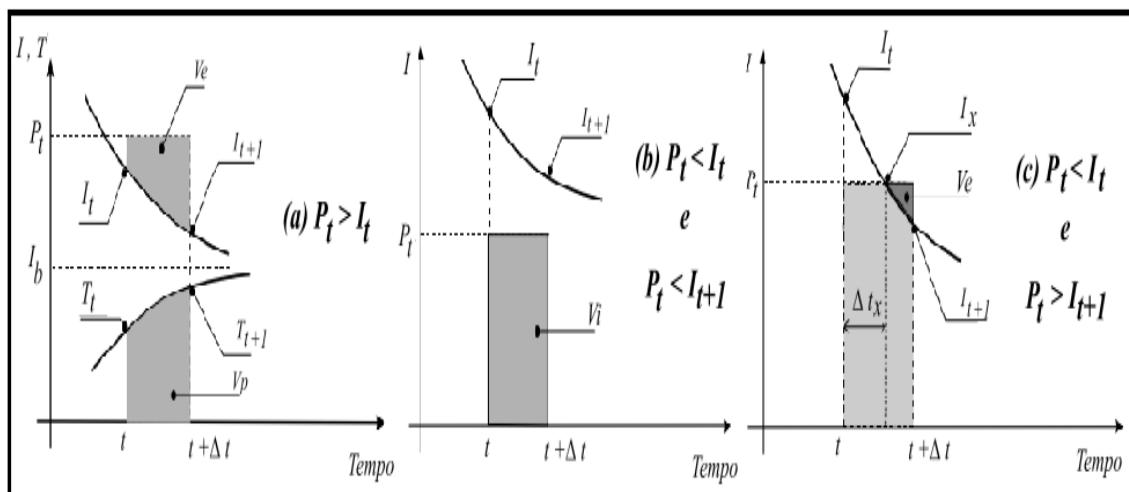
$$b_i = \frac{I_0}{(\ln(h) \cdot (I_0 - I_b))} \quad (3.21)$$

$$a_t = 0 \quad (3.22)$$

$$b_t = \frac{-I_0}{(\ln(h) \cdot (I_b))} \quad (3.23)$$

Visto isso, Mine (1998), Bravo et al (2006), e Silva (2011) apontam algumas situações que podem ocorrer no cálculo dos volumes superficiais e percolados, são elas (Figura 3.5):

Figura 3.5 - Situações que podem vir a ocorrer no cálculo de volumes superficiais e percolados.



Fonte: Tucci (1998)

✓ A precipitação P_t (parcela que chega a este ponto) é maior do que a capacidade de infiltração I_t (Figura 3.5). Ocorrendo isso, a equação de Horton pode ser utilizada e o

volume infiltrado é dado pela integral, no intervalo de tempo entre 0 e Δt da equação de Horton como pode ser observado abaixo:

$$V_i = I_b \cdot \Delta t - (I_t - I_b) \cdot \left(\frac{h^{\Delta t} - 1}{\ln(h)} \right) \quad (3.24)$$

O volume de escoamento superficial é obtido através da seguinte equação:

$$V_e = P_t \cdot \Delta t - V_i \quad (3.25)$$

Sendo o volume percolado descrito pela seguinte formulação:

$$V_p = S_t - S_{t+1} + V_i \quad (3.26)$$

Sendo assim, o armazenamento S_{t+1} é obtido a partir de I_{t+1} , que é calculado pela equação de Horton (equação 3.14).

✓ Considerando que a precipitação P_t seja menor do que a capacidade de infiltração I_t e P_{t+1} é menor que I_{t+1} , tem-se que o algoritmo de separação do escoamento considera a infiltração de todo o volume, permitindo assim a substituição da infiltração pela precipitação na equação da continuidade. Considerando também na equação da continuidade a substituição da Percolação T em função de S (equação 3.19) e solucionando a equação diferencial da continuidade para o intervalo de tempo $t, t+1$, tem-se a seguinte equação (Tucci, 1998; Bravo, 2006; Silva, 2011):

$$S_{t+1} = S_t \cdot e^{-\frac{\Delta t}{bt}} + P_t \cdot b_t \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{bt}} \right) \quad (3.27)$$

Obs: P_t é dado em $\text{mm}/\Delta t$

Sendo assim, é possível determinar I_{t+1} através de S_{t+1} através da equação 3.18 e dessa forma, verificar se I_{t+1} é maior que P_{t+1} . Caso isso se confirme, tem-se que não haverá escoamento superficial e $V_e=0$, e o volume percolado pode ser calculado pela equação 3.26. Mas, ao se considerar o uso do modelo para séries contínuas de eventos, este caso apresenta uma modificação. Devido ao modelo utilizar valores médios para a capacidade de infiltração, em períodos em que a precipitação é inferior a infiltração ainda pode existir escoamento superficial em alguns setores da bacia devido a variabilidade de I . Sendo assim, considerou-se a seguinte equação:

$$Cr_t = \frac{\left(\frac{P_t}{I_t} \right)^2}{\left(\frac{P_t}{I_t} + \alpha \right)} \quad (3.28)$$

onde Cr_t é o coeficiente para representar a percentagem de precipitação que escoam superficialmente; α é o Parâmetro que permite levar em conta a não uniformidade das

características do uso do solo (infiltração) permitindo que mesmo que a taxa de infiltração seja maior que a chuva efetiva, possa acontecer um pequeno escoamento superficial.

Nesse contexto, o volume do escoamento superficial apresenta a seguinte forma:

$$V_e = P_t \cdot Cr_t \quad (3.29)$$

✓ A última consideração é adotada, quando P_t é menor do que a capacidade de infiltração I_t e a P_{t+1} é maior do que I_{t+1} . Sendo assim, após o cálculo da capacidade de infiltração verifica-se que dentro do intervalo a curva de infiltração cruza a da precipitação criando duas situações distintas as quais resultam na seguinte equação:

$$\Delta_{tx} = \frac{2 \cdot b_t \cdot (S_x - S_t)}{(2 \cdot b_t \cdot P - S_x - S_t)} \quad (3.30)$$

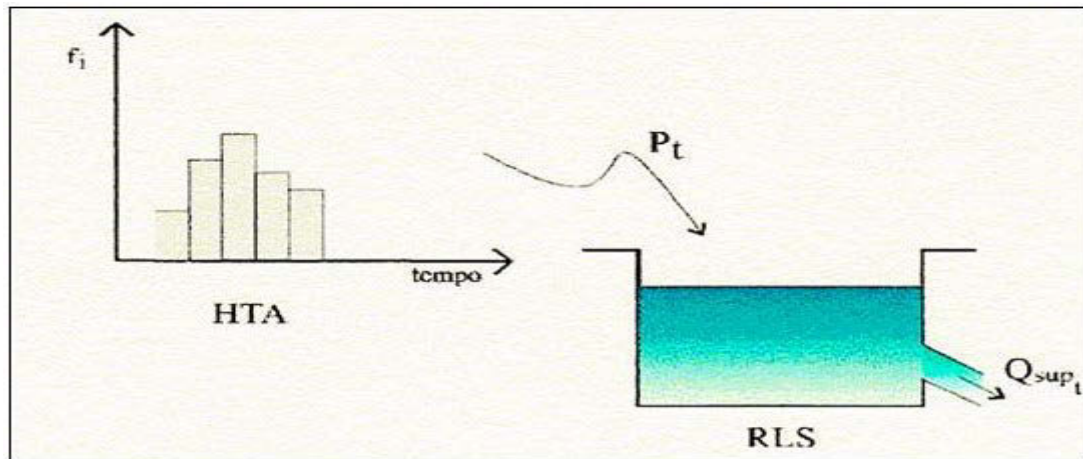
Dessa forma, conhecidos os intervalos $[0, \Delta_{tx}]$ e $[\Delta_{tx}, \Delta t]$, o primeiro é tratado como a situação dois e o segundo como a situação 1.

3 – Propagações do escoamento superficial e subterrâneo (Método de Clark).

Em uma bacia hidrográfica o escoamento pode ser dado tanto pelo escoamento superficial quanto subterrâneo. O escoamento superficial é entendido na hidrologia como a parcela da precipitação que não infiltra no solo, devido à intensidade da chuva ser superior a capacidade de infiltração do solo, ou pelo solo já estar saturado, de forma que, a água começa a escoar superficialmente, sendo impulsionada para cotas mais baixas devido à ação da gravidade. Já o escoamento subterrâneo ou de base é tido como escoamento natural do rio devido ao aporte da água subterrânea presente nos aquíferos da bacia.

Nesse contexto, o IPH II faz uso do método de Clark para representar os efeitos da propagação superficial e subterrânea na bacia. Esse método consiste em uma combinação entre histograma tempo-área (HTA) com um reservatório linear simples (RLS), conforme ilustrado na Figura 3.6. O HTA tem por finalidade a representação da translação da chuva sobre a bacia. Já o RLS tem o intuito de representar os efeitos do armazenamento entre do ponto no qual a precipitação atinge a bacia, até a sua saída desta (Bravo et al, 2006; Silva, 2011).

Figura 3.6 - Método de Clark



Fonte: Mine (1998)

O volume trasladado apresenta a seguinte formulação:

$$V_t = \sum_{j=1}^t V e_{t-j+1} \cdot f_j \quad (3.31)$$

onde $V e_{t-j+1}$ é o volume escoado superficialmente; e f_j consiste na ordenada i do HTA. Segundo Silva (2011) a obtenção do histograma requer o conhecimento detalhado da bacia. No entanto, quando as informações não são precisas o suficiente, pode-se admitir sem muitos erros o HTA sintético, o qual admite que o tempo de percurso seja proporcional à distância do ponto em estudo a seção principal.

Na elaboração do HTA sintético, têm-se as seguintes considerações:

- ✓ A área de contribuição é relacionada ao tempo de percurso para $0 < T < \frac{1}{2}$, através da seguinte equação:

$$A_c = 0.5^n \cdot T^n \quad (3.32)$$

- ✓ Já ao considerar $\frac{1}{2} < T < 1$ a relação entre a área de contribuição com o tempo de percurso passa a apresentar a seguinte forma:

$$A_c = 1 - 0.5^n \cdot (1 - T)^n \quad (3.33)$$

onde A_c é a Área contribuinte acumulada expressa relativamente à área total; T é o tempo em unidades de tempo de concentração; e n é o coeficiente que varia entre 1, 1.5 e 2 a depender da forma da bacia.

Assim, o histograma tempo-área é dividido em k (1,2,...,k) intervalos, onde as ordenadas são:

$$f_i = (A_{c_i} - A_{c_{i-1}}) \quad (3.34)$$

Dessa forma, o efeito do armazenamento nas vazões superficial e subterrânea é considerado ao simular o hidrograma resultante do HTA no RLS através das seguintes formulações:

$$Qsup_{t+1} = Qsup_t \cdot e^{\frac{-\Delta t}{\Delta ksup}} + Vsup_{t+1} \cdot (1 - e^{\frac{-\Delta t}{\Delta ksup}}) \quad (3.35)$$

$$Qsub_{t+1} = Qsub_t \cdot e^{\frac{-\Delta t}{\Delta ksub}} + Vp \cdot (1 - e^{\frac{-\Delta t}{\Delta ksub}}) \quad (3.36)$$

onde $Qsup_t$ é a vazão superficial no instante t ; $Qsub_t$ representa a vazão subterrânea no instante t ; Vp atende pelo volume percolado; $Ksup$ indica o tempo médio de esvaziamento do RLS superficial; e $Ksub$ por sua vez o tempo médio de esvaziamento do RLS subterrâneo.

Sendo que, $Vsup_t$ é dado da seguinte forma:

$$Vsup_t = \sum_{i=r}^t Ve_{t-1+1} \cdot fp_i + \sum_{i=r}^t P_{t-i+1} \cdot fm_i \quad (3.37)$$

Os mesmos algoritmos apresentados anteriormente estão presentes no WIN_IPH2. Mais informações sobre os algoritmos recomenda-se observar os estudos de Tucci et al. (1981,1993), Mine (1998), Germano et al. (1998), Bravo (2006), Silva (2011).

Tendo conhecimento dos algoritmos presentes no IPH II, torna-se válido também informar os dados necessários para o modelo WIN_IPH2 ser utilizado, os quais são elencados por Bravo et al. (2006) e apresentados abaixo:

- ✓ Arquivos de entrada: Precipitação, evaporação, e vazão (quando além da simulação deseja-se realizar a calibração);
- ✓ Gerais: Intervalo de tempo em minutos, e número de registros utilizados nos arquivos de entrada;
- ✓ Dados da Bacia: Área da bacia em Km², porcentagem da área impermeável da bacia, coeficiente de forma do histograma tempo-área, e o tempo de concentração em intervalos de tempo;
- ✓ Condições iniciais da bacia: Percolação em m³/s, vazão subterrânea em m³/s, e vazão superficial em m³/s.

As descrições anteriores informam boa parte das características do programa WIN_IPH2, bem como, apontam para alguns parâmetros importantes no modelo e que são passíveis de calibração:

- ✓ I0 (mm/h) – Capacidade de infiltração do solo correspondente a capacidade de campo, onde h corresponde ao intervalo de tempo adotado;

- ✓ I_b (mm/h) – Capacidade de infiltração quando o solo está saturado, onde h corresponde ao intervalo de tempo adotado;
- ✓ H (adm) – Parâmetro de decaimento da curva de infiltração entre I_0 e I_b ;
- ✓ K_{sup} (h) – Parâmetro de propagação do escoamento superficial, onde h corresponde ao intervalo de tempo adotado;
- ✓ K_{sub} (h) – Parâmetro de propagação do escoamento subterrâneo, onde h corresponde ao intervalo de tempo adotado;
- ✓ R_{max} (mm) – Capacidade máxima do reservatório de interceptação;
- ✓ α – Parâmetro que permite levar em conta a não uniformidade das características do uso do solo (infiltração) permitindo que mesmo que a taxa de infiltração seja maior que a chuva efetiva, possa acontecer um pequeno escoamento superficial.

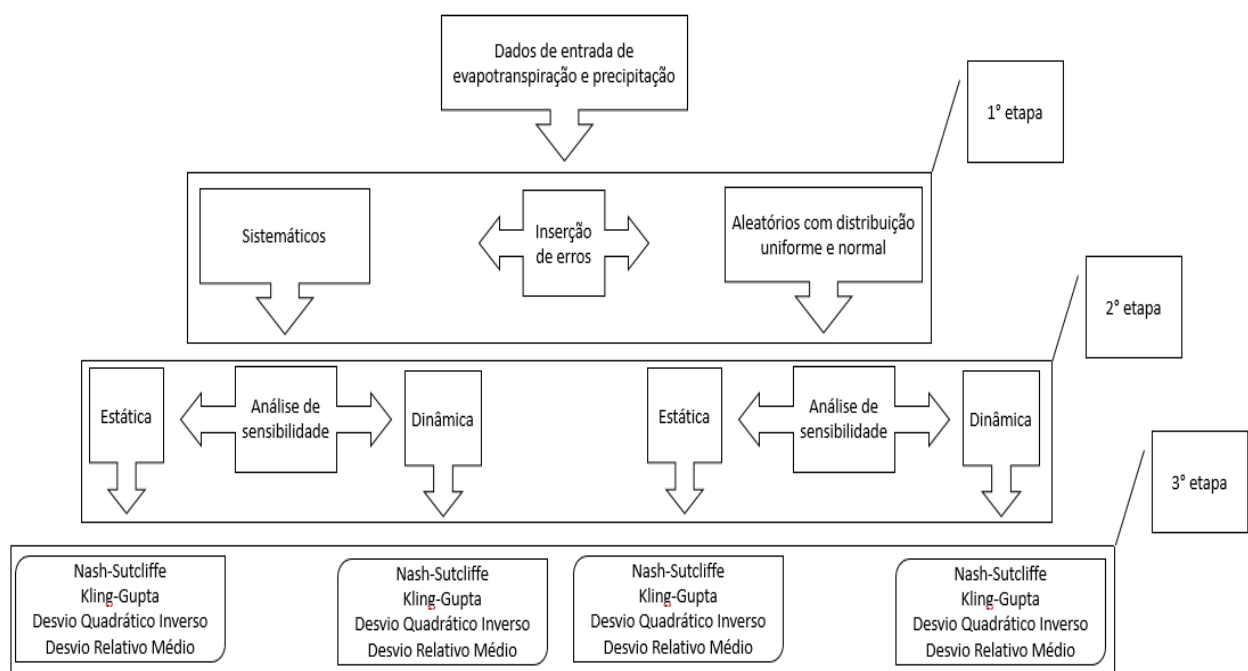
A variação desses parâmetros que permite variar o volume do hidrograma, deslocar a posição do pico, além de suavizar e amortecer a forma do hidrograma. Assim sendo, a calibração dos parâmetros faz com que o hidrograma gerado pelo modelo se aproxime do hidrograma observado. Nesse sentido, os parâmetros I_0 , I_b e H , conforme visto até aqui são utilizados no algoritmo de infiltração, exercendo assim uma influência sobre a separação do escoamento superficial, infiltrado e percolado. Já os parâmetros K_{sup} e K_{sub} atuam no sentido da propagação do escoamento, enquanto o parâmetro $R_{máx}$ está associado às perdas por interceptação e evapotranspiração, e o parâmetro α associa-se ao escoamento superficial. Antunes (1980) abarca parte dessas considerações ao contemplar a análise de sensibilidade através da perturbação dos valores dos parâmetros referidos em seus estudos, identificando os seguintes aspectos:

- ✓ H : diminui consideravelmente o pico, sendo o parâmetro mais sensível;
- ✓ I_0 : segundo parâmetro mais sensível, atuando no sentido de diminuição das vazões de cheia e elevação das vazões de base;
- ✓ K_{sup} : Os parâmetros abordados pela autora que associam-se a propagação do escoamento superficial ficaram na terceira e quinta colocações na ordem de sensibilidade, atuando no sentido de abater o pico, deslocar e alargar o hidrograma;
- ✓ I_b : Assume a quarta colocação na ordem de sensibilidade, de forma a abater as vazões de cheia;
- ✓ K_{sub} : Modifica as vazões de base, assumindo assim a sexta colocação na ordem de sensibilidade;
- ✓ R_{max} : Atua no sentido de alterar a magnitude de todas as vazões, sendo pouco sensível.

4. METODOLOGIA

A metodologia adotada é composta por três etapas, conforme apresentado na figura 4.1. A primeira etapa consiste na inserção de erros sistemáticos e aleatórios nas séries temporais de evapotranspiração e precipitação, a segunda etapa corresponde as análises de sensibilidade estática e dinâmica, as quais foram contempladas para quatro diferentes funções-objetivo conforme ilustrado como a terceira etapa.

Figura 4.1 - Esquema resumido da metodologia adotada para a análise de sensibilidade no modelo IPH II



4.1. INSERÇÃO DE ERROS SISTEMÁTICOS

O presente estudo fez uso do método de perturbação dos dados observados, que segundo Melching et al. (1990, apud TUCCI, 2005), consiste em embutir erros no valor de um determinado fenômeno para avaliar o impacto dos mesmos na variável de saída.

Para introduzir os erros sistemáticos nos dados de entrada foi aplicado um viés multiplicativo, conforme apresentado nas equações 4.1 e 4.2 elencadas abaixo. Diferentes valores do parâmetro K foram avaliados em cada bacia, sendo escolhida uma faixa de variação entre 0,5 e 2, considerando um intervalo de 0,1.

$$E_j^* = KE_j \quad (4.1)$$

$$P_j^* = KP_j \quad (4.2)$$

onde K é o coeficiente que permite o teste sistemático sobre o fenômeno a ser analisado; $E_j^*(\text{mm})$ consiste no valor da evapotranspiração perturbada no dia j; $E_j(\text{mm})$ representa o valor observado de evapotranspiração no dia j; $P_j^*(\text{mm})$ é o valor da precipitação perturbada no dia j; $P_j(\text{mm})$ é o valor observado de precipitação no dia j.

4.2. INSERÇÃO DE ERROS ALEATÓRIOS

As análises da interferência dos erros aleatórios com distribuição uniforme e normal podem ser contempladas através de algumas formulações. Nesse sentido, a inserção dos erros aleatórios com distribuição uniforme nos dados de evapotranspiração serão contempladas segundo a proposta da equação 4.3, de forma a permitir o impacto sobre o desempenho do modelo. Já a inserção do erro aleatório com distribuição uniforme na precipitação será abordada seguindo a mesma proposta utilizada para a evapotranspiração, apresentando a forma da equação 4.4.

Nesse sentido, para cada bacia, 20 sequencias temporais de números aleatórios com distribuição uniforme entre zero e um foram geradas. Cada uma dessas séries foi utilizada para perturbar os dados observados tanto da evapotranspiração quanto da precipitação a partir de diferentes coeficientes de intensidade do erro (σ), os quais foram variados entre 0,1 e 0,5, com intervalo de 0,1.

$$E_j^* = E_j \cdot (1 - \sigma + (2 \cdot \sigma \cdot \omega_j)) \quad (4.3)$$

$$P_j^* = P_j \cdot (1 - \sigma + (2 \cdot \sigma \cdot \omega_j)) \quad (4.4)$$

onde $E_j^*(\text{mm})$ consiste no valor da evapotranspiração perturbada no dia j; $E_j(\text{mm})$ representa o valor observado de evapotranspiração no dia j; $P_j^*(\text{mm})$ é o valor da precipitação perturbada no dia j; $P_j(\text{mm})$ é o valor observado de precipitação no dia j; σ é o coeficiente de intensidade do erro aleatório; ω_j é um número aleatório com distribuição uniforme.

Ainda, para cada bacia, 20 sequencias temporais de números aleatórios com distribuição normal com média zero e desvio padrão unitário foram geradas para perturbar os dados de evapotranspiração (equação 4.5) e precipitação (equação 4.6). Cada uma dessas séries foi utilizada para perturbar os dados observados a partir de diferentes

coeficientes de intensidade do erro (σ), os quais foram variados entre 0,1 e 0,5, com intervalo de 0.1.

$$E_j^* = E_j e^{(\sigma \eta_j - \frac{\sigma^2}{2})} \quad (4.5)$$

$$P_j^* = P_j e^{(\sigma \eta_j - \frac{\sigma^2}{2})} \quad (4.6)$$

onde $E_j^*(\text{mm})$ consiste no valor da evapotranspiração perturbada no dia j ; $E_j(\text{mm})$ representa o valor observado de evapotranspiração no dia j ; $P_j^*(\text{mm})$ é o valor da precipitação perturbada no dia j ; $P_j(\text{mm})$ é o valor observado de precipitação no dia j ; σ é o coeficiente de intensidade do erro aleatório; η_j é um número aleatório com distribuição normal com média igual a zero e desvio padrão igual à unidade, o qual é gerado para cada dia da série.

A análise dos erros foi contemplada separadamente entre os erros sistemáticos e aleatórios. Apesar do conhecimento de que tais erros possam estar ocorrendo simultaneamente, o presente estudo optou por estudá-los separadamente, de forma a buscar a compreensão de seus efeitos e facilitar futuras análises. Foi considerada a avaliação de erros aleatórios com distribuição uniforme de forma a proporcionar uma análise comparativa com os erros com distribuição normal sobre o desempenho do modelo.

Dessa forma, foi escrita, em linguagem de programação FORTRAN, uma ferramenta para inserção de erros aleatórios e sistemáticos em dados de entrada do modelo IPH II, a qual tem o intuito de agregar erros aleatórios com distribuição uniforme e normal, bem como erros sistemáticos sobre uma série de dados. Devido à grande quantidade de arquivos gerados, foi escrita outra ferramenta em linguagem de programação FORTRAN, com o intuito de unir e organizar os dados referentes aos parâmetros gerados na calibração automática do WIN_IPH2.

4.3. PROCEDIMENTO PARA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

O presente estudo foi focado no uso do modelo hidrológico de transformação chuva-vazão IPH II, desenvolvido no Instituto de Pesquisa Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Para facilitar o processo de calibração do modelo IPH II foi utilizado o modelo WIN_IPH2. Dessa forma, foi feita a

calibração automática mono-objetivo utilizando o algoritmo SCE-UA. O procedimento foi repetido para quatro diferentes funções-objetivo:

- ✓ Coeficiente de Kling-Gupta
- ✓ Coeficiente de Nash-Sutcliffe
- ✓ Desvio Quadrático Inverso
- ✓ Desvio Relativo Médio

A perturbação dos dados de entrada buscou refletir a presença de algum tipo de erro e, assim, através dessa metodologia foi possível avaliar qual o impacto desse erro nos resultados ou na definição dos próprios parâmetros do modelo.

Nesse sentido, as análises de sensibilidade estática e dinâmica foram executadas, conforme ilustrado na Figura 4.2 e na

Figura 4.3. Para efetuar o acompanhamento da interferência dos erros na eficiência do modelo, foi feita a avaliação dos resultados obtidos com a aplicação do modelo WIN_IPH2 para diferentes funções-objetivo, e verificado o impacto dos erros nos dados de entrada no desempenho do modelo (sensibilidade estática) e no desempenho do modelo e na estimativa dos parâmetros (sensibilidade dinâmica).

Figura 4.2 - Procedimento para análise da sensibilidade estática no IPH II

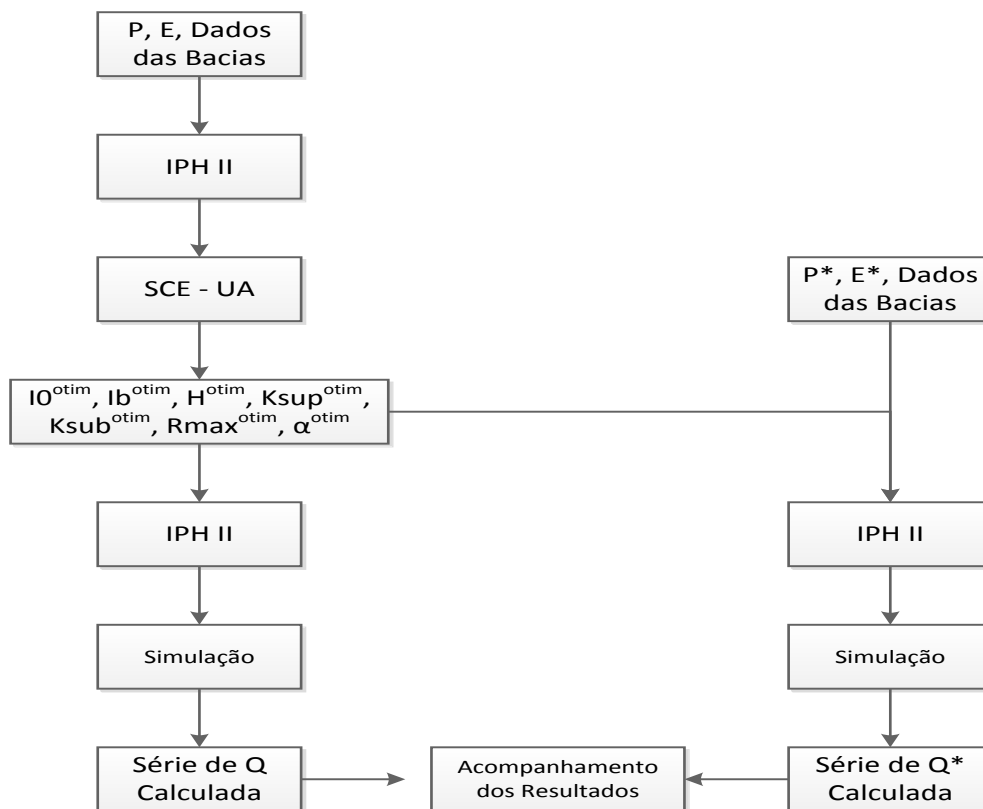
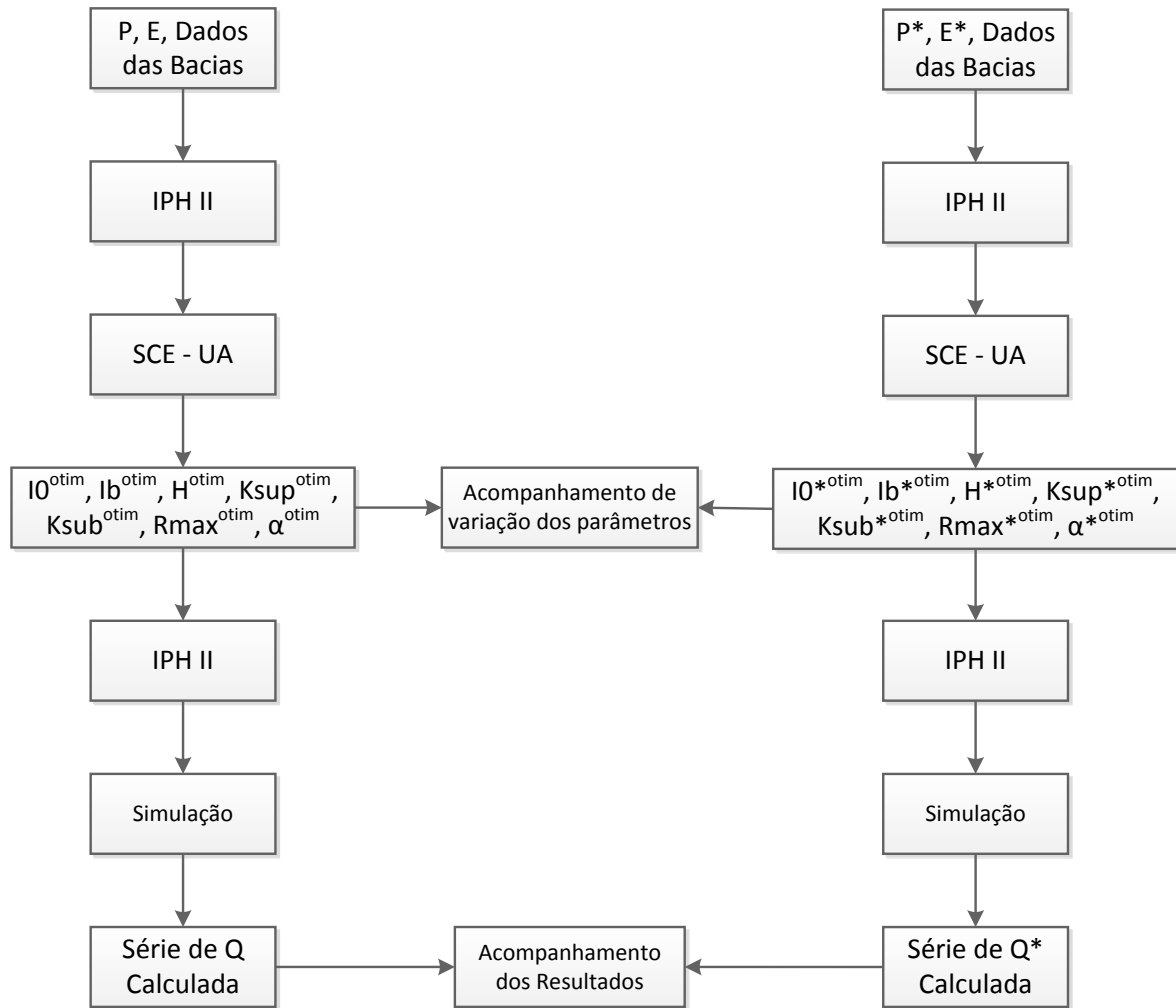


Figura 4.3 - Procedimento para análise da sensibilidade dinâmica no IPH II



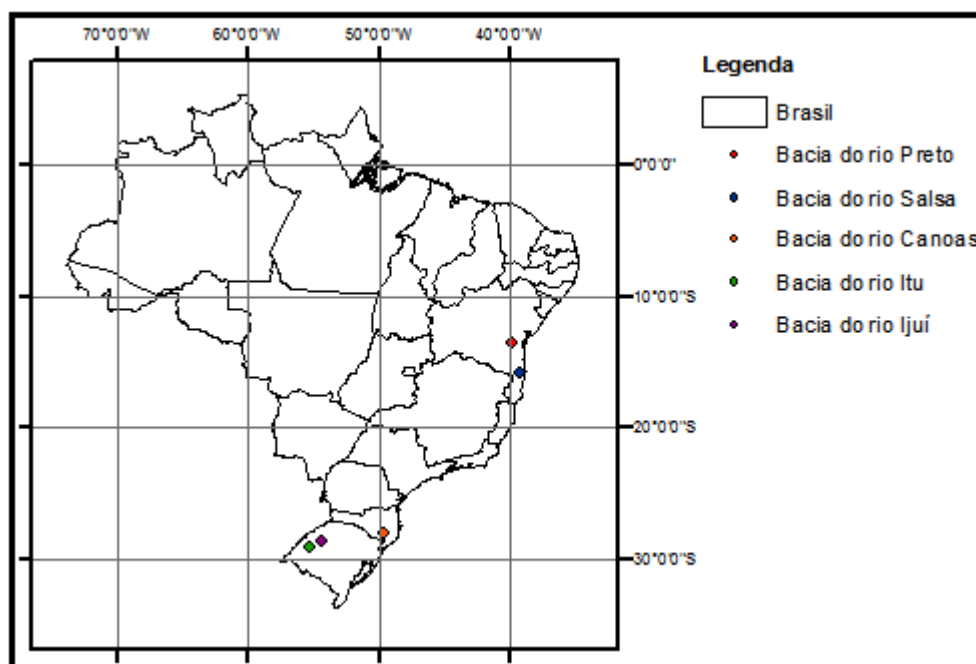
5. APLICAÇÃO DE METODOLOGIA

5.1. ESTUDOS DE CASO

Foram selecionadas cinco bacias hidrográficas (Figura 5.1), com área de até 5414 Km², e que apresentam séries de vazão, precipitação, e de dados climatológicos que permitem a obtenção da evapotranspiração potencial, de forma a favorecer a calibração, e conseqüentemente a simulação. As séries de vazões foram utilizadas para calibrar o modelo, enquanto que as de precipitação e evapotranspiração são os dados de entrada que permitem a simulação pelo WIN_IPH2.

A pretensão do estudo foi de selecionar as bacias em diferentes regiões do Brasil, de forma que, foram selecionadas bacias nos estados da Bahia, Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Todas as bacias foram mapeadas e caracterizadas quanto à localização, tipo climático e informações hidrológicas disponíveis para uso no entorno de suas áreas. Ainda, foram identificados os tipos de solo das áreas em estudo através do banco de dados do IBGE, de forma a informar suas características, as quais foram obtidas junto a AGEITEC (Agência Embrapa de Informação Tecnológica).

Figura 5.1 - Localização das bacias avaliadas



A precipitação diária foi obtida junto ao banco de dados da ANA e, adicionalmente, para facilitar o manejo dos dados hidrológicos, foi utilizado o programa Manejo de Dados Hidroweb (FAN e COLLISCHONN, 2009) o qual também facilita a análise da disponibilidade temporal dos dados de precipitação. Dessa forma, a precipitação utilizada como entrada no modelo foi calculada como a média aritmética dos postos com dados para o período em análise.

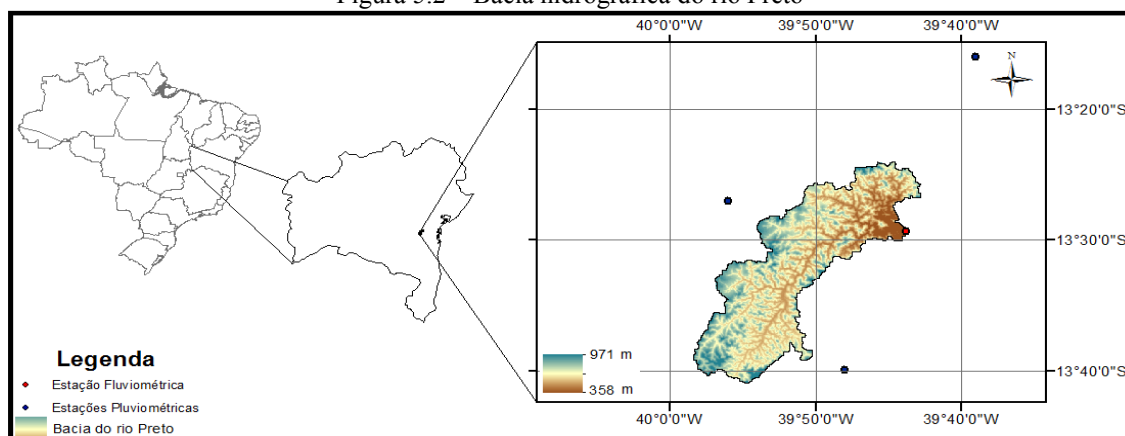
Os dados climatológicos diários foram obtidos através do banco de dados do INMET. O banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa (BDMEP) contém informações climatológicas diárias, mensais e anuais para diversas regiões do país. Com esses dados, a evapotranspiração potencial foi obtida na forma diária através da aplicação do método de Penman-Monteith conforme descrito em Shuttleworth (1993), sendo que, os períodos com falhas que porventura ocorreram em alguns postos, foram preenchidos com as normais climatológicas.

Os dados fluviométricos diários que nortearam esse estudo foram obtidos junto ao banco de dados da ANA. Buscou-se selecionar inicialmente esses dados na intenção de obter bons períodos sem falhas e que contemplassem períodos de cheia e estiagem, de forma a favorecer a calibração.

5.1.1. Bacia hidrográfica do rio Preto

A bacia hidrográfica do rio Preto foi delimitada até a localização do posto fluviométrico Tesouras (51840000). Localizada no estado da Bahia (Figura 5.1), essa bacia hidrográfica está inserida entre os municípios de Jaguaquara, Itaquara, Cravolândia e Ubaíra, abrangendo, assim, 346 Km². Seguindo a proposta de Koppen e Geiger, a área na qual a bacia apresenta-se está classificada com o clima Aw, o qual define o clima da região como tropical com estação seca de inverno. Essa bacia apresenta a elevação máxima de 971 m na cabeceira e 358 m no seu exutório.

Figura 5.2 – Bacia hidrográfica do rio Preto



A bacia hidrográfica do rio Preto apresenta 98,27 % de sua área composta por luvissoilo crômico pálico, o qual, favorece a ocorrência de processos erosivos, bem como dificulta a infiltração da água. Os 1,73 % restantes da área da bacia, são compostos por latossolo amarelo distrófico, o qual apresenta boas condições para a retenção da umidade, boa permeabilidade e por ser distrófico, apresentam-se com baixa fertilidade.

No entorno da bacia hidrográfica do rio Preto existem 3 postos pluviométricos, conforme apresentado na Tabela 5.1, sendo que, o posto de Ubaíra (01339028), foi desconsiderado por não apresentar dados para o período analisado. Dentre outros aspectos considerados no uso do modelo para essa bacia, destacam-se: período de dados utilizado correspondente a 2557 dias; área impermeável considerada igual a 10 %; coeficiente de forma do histograma tempo-área igual a um; tempo de concentração adotado como um, em unidades de intervalo de tempo.

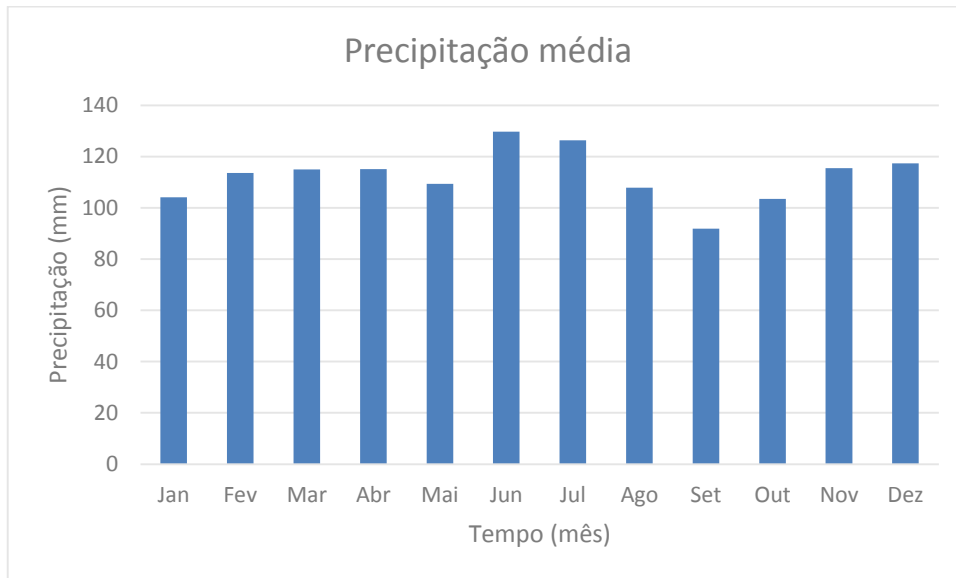
Tabela 5.1 - Informações meteorológicas e hidrológicas para a bacia do rio Preto

Código	Tipo	Nome	Estado	Latitude (S)	Longitude (W)	Período Utilizado
51840000	FLUVIOMÉTRICA	TESOURAS	BAHIA	13°29'14"	39°43'46"	01/04/1973 - 31/12/1980
01339014	PLUVIOMÉTRICA	ITAQUARA		13°27'0"	39°56'0"	
01339018	PLUVIOMÉTRICA	CABECEIRA DE ITIUBA		13°39'58"	39°47'59"	
01339028	PLUVIOMÉTRICA	UBAÍRA (AREIA)		13°16'0"	39°39'0"	
83295	CLIMATOLÓGICA	ITIRUÇU-JAGUAQUARA		13°20'59"	40°6'36"	

A avaliação dos postos pluviométricos utilizados, ilustrada na Figura 5.3, permite identificar que na bacia hidrográfica do rio Preto a precipitação média anual é de 1354 mm. Por se tratar da média aritmética entre postos com dados, percebe-se uma certa

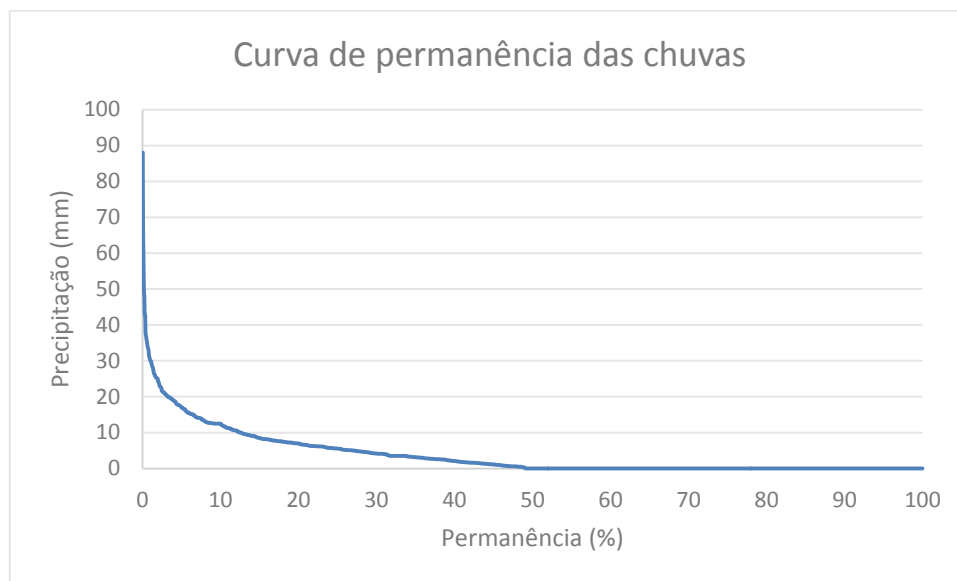
homogeneidade na distribuição das chuvas mensais, no entanto, é válido ressaltar, que os postos utilizados apresentam uma variabilidade considerável na quantidade precipitada em cada mês.

Figura 5.3 - Precipitação média da bacia hidrográfica do rio Preto através da média aritmética



Observados esses aspectos, é interessante verificar a porcentagem do tempo para o qual as chuvas na região em estudo foram superiores a zero. Dessa forma, a Figura 5.4 apresenta a curva de permanência para as chuvas diárias na bacia hidrográfica do rio Preto, demonstrando assim, que em cerca de 49,1% do tempo, as chuvas na região em estudo são superiores a zero.

Figura 5.4 - Curva de permanência para a série de dados diários de chuva utilizada na bacia hidrográfica do rio Preto.



Outra grandeza importante na caracterização de uma determinada região é a temperatura, sendo assim, a Tabela 5.2 apresenta o valor da temperatura média compensada do período de 1961 a 1990 para a estação climatológica de Itiruçu-Jaguaquara (83295). Na referida tabela é possível verificar que a estação referente a região em estudo registra uma temperatura média anual de 20,5°C.

Tabela 5.2 - Temperatura média compensada para a estação climatológica de Itiruçu-Jaguaquara (83295)

Tempo (Mês)	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Temperatura (°C)	22.3	22.3	22	21.4	20.1	18.8	17.9	18.3	19.4	20.9	21.5	21.8

Por fim, a evaporação média para o período de 1961 a 1990 registrada na estação climatológica de Itiruçu-Jaguaquara (83295), está apresentada na Tabela 5.3. Assim, é possível observar que a evapotranspiração anual registrada na referida estação climatológica alcança 978mm.

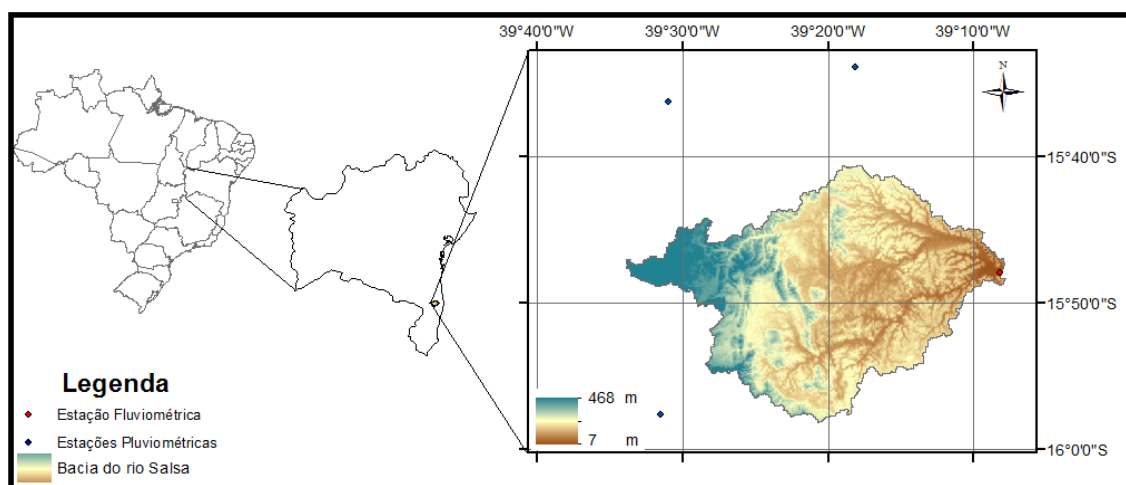
Tabela 5.3 - Evaporação total obtida através do evaporímetro de Piché para a estação de Itiruçu-Jaguaquara (83295)

Tempo (Mês)	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Evaporação (mm)	101.1	91.2	82.5	71.9	60.7	47.4	56.7	77.8	83.9	105.2	97.5	102.3

5.1.2. Bacia hidrográfica do rio Salsa

A bacia hidrográfica do rio Salsa foi delimitada até a localização do posto pluviométrico Barracão (53980000). Localizada na porção leste do estado da Bahia (Figura 5.5), essa bacia hidrográfica está inserida entre os municípios de Belmonte, Canavieiras e Mascote, abrangendo, assim, 783 Km². Seguindo a proposta de Koppen e Geiger, a área na qual a bacia apresenta-se está classificada com o clima Af, definindo assim que a região apresenta um clima tropical úmido. Essa bacia apresenta a elevação máxima de 468 m na cabeceira e 7 m no seu exutório.

Figura 5.5 – Bacia hidrográfica do rio Salsa



A bacia hidrográfica do rio Salsa apresenta 54,64 % de sua área composta por argilossolo amarelo distrófico, o qual, caracterizasse pela baixa fertilidade. Outra parcela da área da bacia, correspondente a 45,31 % desta caracterizasse pela presença do argilossolo vermelho-amarelo distrófico, o qual tende a ocorrer em relevos mais acidentados, sendo suscetível a erosão e caracterizando-se pela baixa fertilidade. Finalmente, os 0,05% restantes do solo da bacia, são compostos por espodossolo ferrocárbico hidromórfico, o qual caracteriza-se por permanecer saturado em um ou mais horizontes na maior parte do ano, pela acumulação de óxidos de ferro ou manganês, ou pela presença de um horizonte H hístico.

No entorno da bacia hidrográfica do rio Salsa estão presentes 3 postos pluviométricos com uma boa sequência de dados para o período analisado, conforme

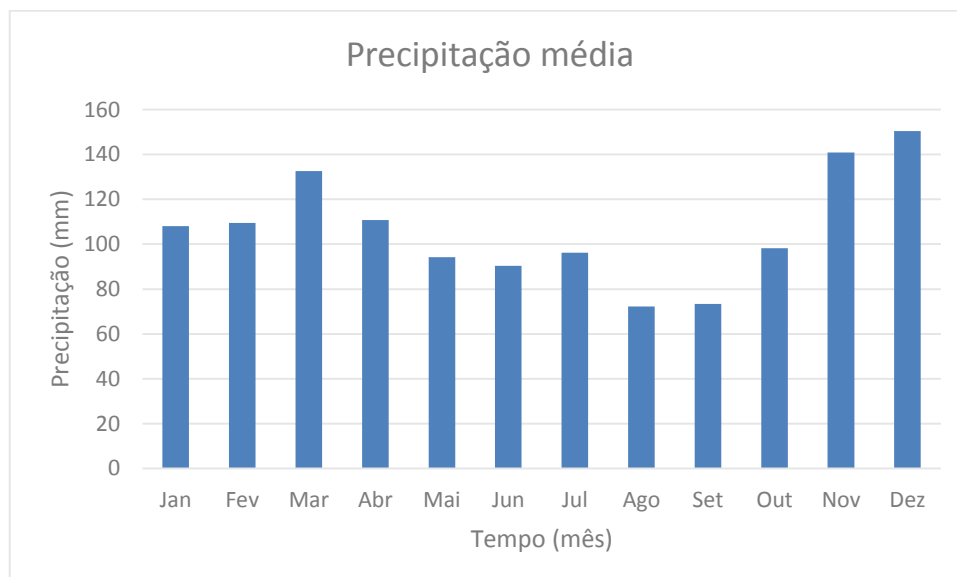
apresentado na Tabela 5.4. Dentre outros aspectos considerados no uso do modelo para essa bacia, destacam-se: período de dados utilizado correspondente a 1461 dias; Área impermeável considerada igual a 6%; coeficiente de forma do histograma tempo-área igual a 1,5; tempo de concentração adotado como 2, em unidades de intervalo de tempo.

Tabela 5.4 - Informações meteorológicas e hidrológicas para a bacia do rio Salsa

Código	Tipo	Nome	Estado	Latitude (S)	Longitude (W)	Período Utilizado
53980000	FLUVIOMÉTRICA	BARRACÃO	Bahia	15°47'0"	39°8'0"	01/01/1977 - 31/12/1980
01539006	PLUVIOMÉTRICA	ITAPEBI		15°57'39"	39°31'34"	
01539010	PLUVIOMÉTRICA	MASCOTE		15°33'51"	39°18'6"	
01539014	PLUVIOMÉTRICA	FAZENDA NANCY		15°36'12"	39°31'1"	
83398	CLIMATOLÓGICA	CANAVIEIRAS		15°39'36"	38°57'0"	

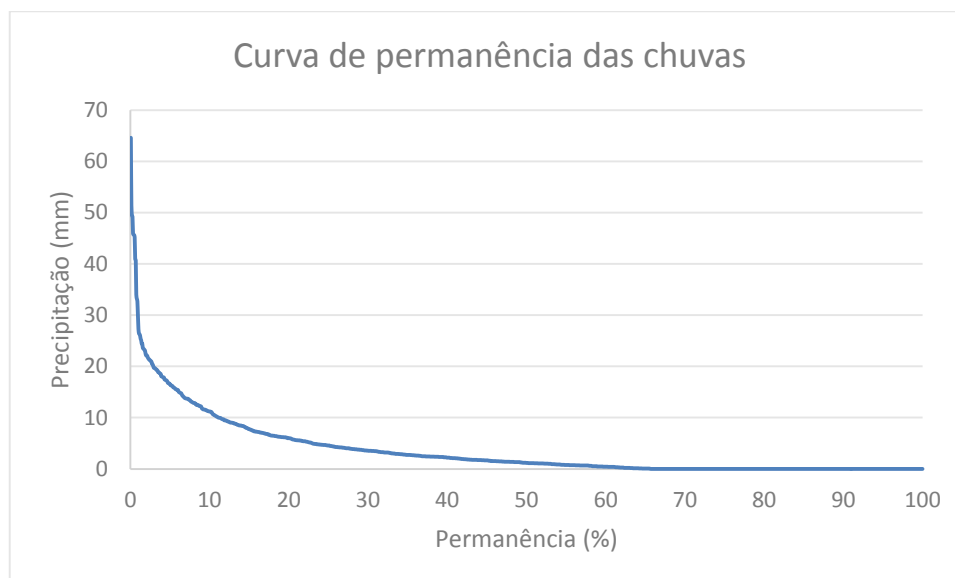
A avaliação dos postos pluviométricos utilizados, ilustrada na Figura 5.6, permite identificar que na bacia hidrográfica do rio Salsa, a precipitação média anual é de 1277 mm. Percebe-se que a distribuição das chuvas mensais indica que o ano hidrológico apresenta-se de outubro a setembro. Essa situação foi encontrada para todos os postos avaliados entre os anos de 1963 e 2005.

Figura 5.6 - Precipitação média da bacia hidrográfica do rio Salsa através da média aritmética



Observados as características das precipitações na região em estudo, torna-se interessante verificar a porcentagem do tempo para o qual as chuvas foram superiores a zero. Dessa forma, a Figura 5.7 apresenta a curva de permanência para as chuvas diárias na bacia hidrográfica do rio Salsa, demonstrando assim, que em cerca de 65,64% do tempo, as chuvas na região em estudo são superiores a zero.

Figura 5.7 - Curva de permanência para a série de dados diários de chuva utilizada na bacia hidrográfica do rio Salsa



Na caracterização da temperatura para a bacia hidrográfica do rio Canoas, foi utilizada a estação climatológica de Canavieiras. Sendo assim, a Tabela 5.5 apresenta o valor da temperatura média compensada do período com dados compreendido entre 1977 a 2009, para a estação climatológica de Canavieiras (83398). Na referida tabela é possível verificar que a estação referente a região em estudo registra uma temperatura média anual de 23,54°C.

Tabela 5.5 - Temperatura média compensada para a estação climatológica de Canavieiras (83398)

Tempo (mês)	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Temperatura (°C)	25.23	25.3	25.19	24.28	23.09	21.64	21.23	21.48	22.46	23.53	24.16	24.88

Por fim, a evaporação média para o período de 1977 a 2012 registrada na estação de Canavieiras (83398), está apresentada na Tabela 5.6. Assim, é possível observar que a evapotranspiração anual registrada na referida estação climatológica alcança 1035mm.

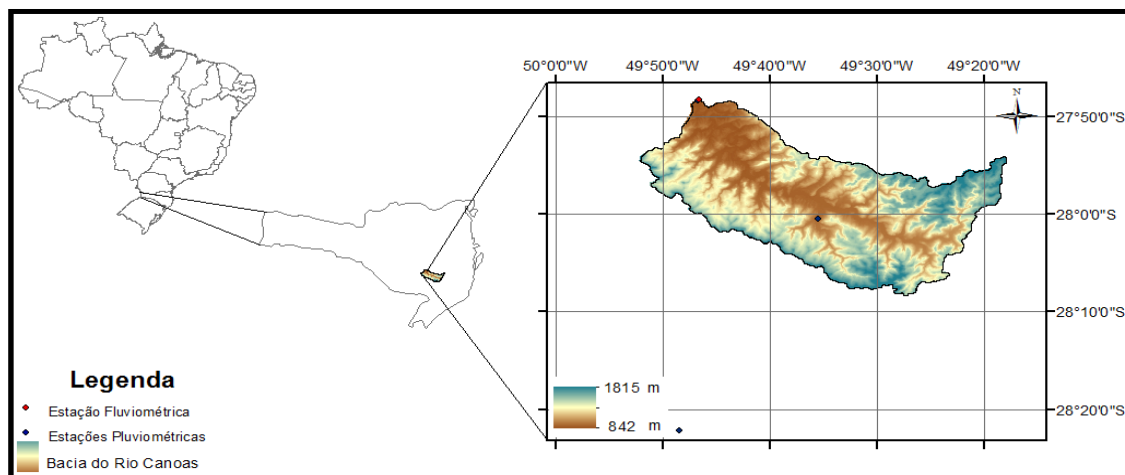
Tabela 5.6 - Evaporação total obtida através do evaporímetro de Piché para a estação de São Joaquim (83920)

Tempo (mês)	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Evaporação (mm)	110.38	93.47	91.48	74.84	68.35	59.41	69.86	87.61	100.62	104.76	98.74	104.74

5.1.3. Bacia hidrográfica do rio Canoas

A bacia hidrográfica do rio Canoas foi delimitada até a localização do posto pluviométrico Vila Canoas (71200000). Localizada no sudeste do estado de Santa Catarina (Figura 5.3), essa bacia hidrográfica está inserida entre os municípios de Urubici, Rio Rufino e Bom Retiro, abrangendo, assim, 1011 Km². Seguindo a proposta de Koppen e Geiger, a área na qual a bacia apresenta-se está classificada com o clima Cfa, sendo característico de um clima temperado úmido com verão quente. Essa bacia apresenta a elevação máxima de 1815 m na cabeceira e 842 m no seu exutório.

Figura 5.8 – Bacia hidrográfica do rio Canoas.



A bacia hidrográfica do rio Canoas apresenta 82,62 % de sua área composta por argilossolo vermelho-amarelo distrófico, o qual tende a ocorrer em relevos mais acidentados, sendo suscetível a erosão e caracterizando-se pela baixa fertilidade. A segunda parcela de solo mais representativa da bacia, corresponde ao cambissolo húmico distrófico, o qual está presente em 16,05 % da área da bacia e caracterizasse por ser rico em matéria orgânica, sendo típico de regiões ao sul do país, e ainda, por ser distrófico, está associado a baixa fertilidade. Por fim, os 1,33% restantes da área da bacia apresentam o neossolo litólico eutrófico, o qual está associado a relevos declivosos devido a camada

de solo sobre a rocha ser pequena, mas, por ser eutrófico, apresentam-se com alta taxa de fertilidade.

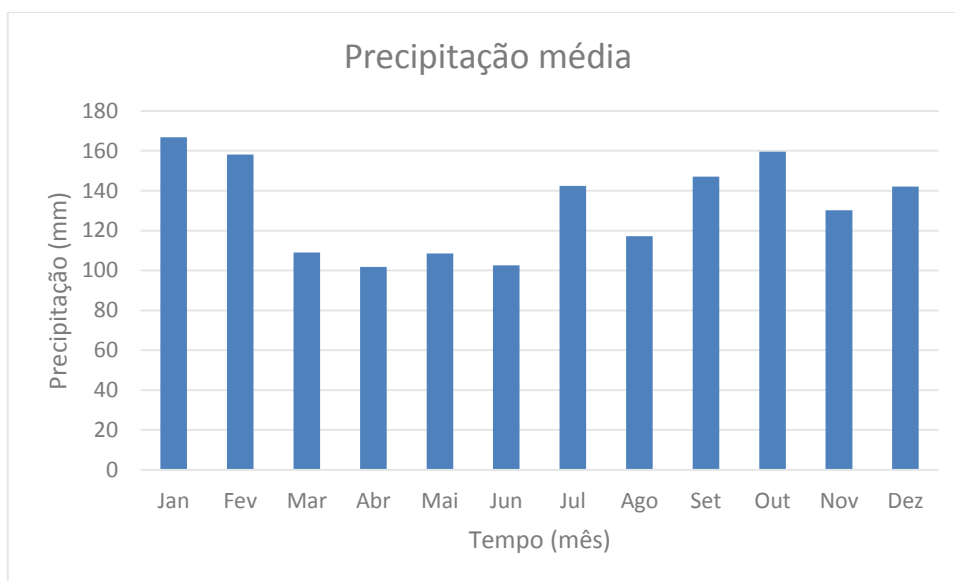
No entorno da bacia hidrográfica do rio Canoas estão presentes 3 postos pluviométricos, com boa disponibilidade para o período escolhido, conforme apresentado na Tabela 5.7. Dentre outros aspectos considerados no uso do modelo para essa bacia, destacam-se: período de dados utilizado correspondente a 2191 dias; Área impermeável considerada igual a 0; coeficiente de forma do histograma tempo-área igual a 1,5; tempo de concentração adotado como 2, em unidades de intervalo de tempo.

Tabela 5.7 - Informações meteorológicas e hidrológicas para a bacia do rio Canoas

Código	Tipo	Nome	Estado	Latitude (S)	Longitude (W)	Período Utilizado
71200000	FLUVIOMÉTRICA	VILA CANOAS	SANTA CATARINA	27°48'14"	49°46'45"	01/01/1978 - 31/12/1983
02849021	PLUVIOMÉTRICA	URUBICI		28°0'26"	49°35'32"	
02849023	PLUVIOMÉTRICA	DESPRAIADO		28°22'9"	49°48'28"	
02749031	PLUVIOMÉTRICA	VILA CANOAS		27°48'15"	49°46'48"	
83920	CLIMATOLÓGICA	SÃO JOAQUIM		28°18'0"	49°55'48"	

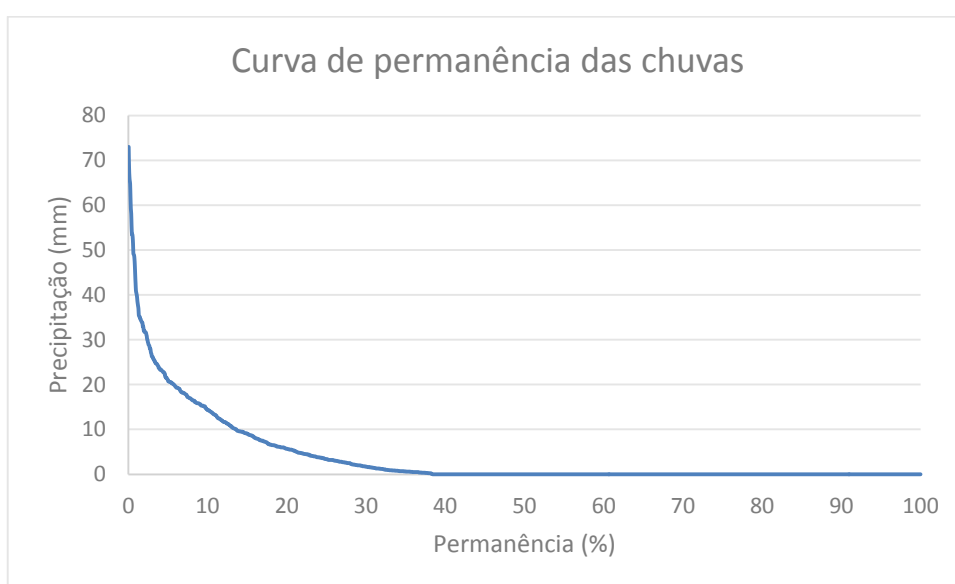
A avaliação dos postos pluviométricos utilizados, ilustrada na Figura 5.9, permite identificar que na bacia hidrográfica do rio Canoas, a precipitação média anual é de 1588 mm. Percebe-se que a distribuição das chuvas mensais descreve o início das chuvas no mês de julho. O comportamento das chuvas é semelhante para todos os postos avaliados entre os anos de 1977 e 2005.

Figura 5.9 - Precipitação média da bacia hidrográfica do rio Canoas através da média aritmética



Observados as características das precipitações na região em estudo, torna-se interessante verificar a porcentagem do tempo para o qual as chuvas foram superiores a zero, para o período de tempo escolhido para o presente estudo, conforme descrito na Tabela 5.7. Dessa forma, a Figura 5.10 apresenta a curva de permanência para as chuvas diárias na bacia hidrográfica do rio Canoas, demonstrando assim, que em cerca de 38,40% do tempo, as chuvas na região em estudo são superiores a zero, contrastando assim com os resultados encontrados para a bacias hidrográficas localizadas na região nordeste.

Figura 5.10 - Curva de permanência para a série de dados diários de chuva utilizada na bacia hidrográfica do rio Canoas



Na caracterização da temperatura para a bacia hidrográfica do rio Canoas, foi utilizada a estação climatológica de São Joaquim. Sendo assim, a Tabela 5.8 apresenta o valor da temperatura média compensada do período de 1961 a 1990 para a estação climatológica de São Joaquim (83920). Na referida tabela é possível verificar que a estação referente a região em estudo registra uma temperatura média anual de 13,3°C.

Tabela 5.8 - Temperatura média compensada para a estação climatológica de São Joaquim (83920)

Tempo (mês)	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Temperatura (°C)	16.8	17.1	15.9	13.2	11.4	9.7	9.8	10.7	12.0	12.8	14.4	16.0

Por fim, a evaporação média para o período de 1961 a 1990 registrada na estação de São Joaquim (83920), está apresentada na Tabela 5.9. Assim, é possível observar que a evapotranspiração anual registrada na referida estação climatológica alcança 1035mm.

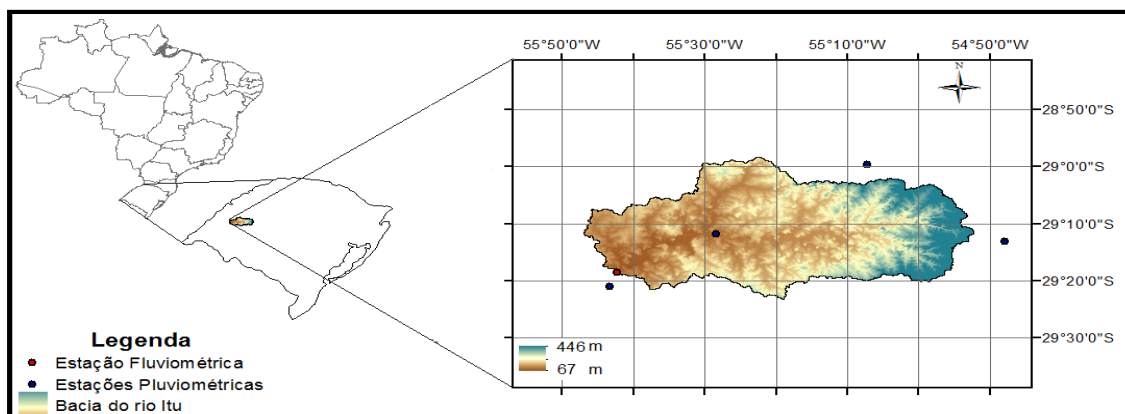
Tabela 5.9 - Evaporação total obtida através do evaporímetro de Piché para a estação de São Joaquim (83920)

Tempo (mês)	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Evaporação (mm)	86.9	76.3	73.5	74.9	75.9	81.2	90.5	100.8	92.4	92.3	96.0	94.3

5.1.4. Bacia hidrográfica do rio Itu

A bacia hidrográfica do rio Itu foi delimitada até a localização do posto fluviométrico Passo da Cachoeira (76650000). Localizada no estado do Rio Grande do Sul (Figura 5.11) essa bacia hidrográfica está inserida entre os municípios de Itaqui, Manoel Viana, São Francisco de Assis, Macambara, Unistalda e Santiago abrangendo, assim, 2564 Km². Seguindo a proposta de Koppen e Geiger, a área na qual a bacia apresenta-se está classificada com o clima Cfa, sendo característico de um clima temperado úmido com verão quente. Essa bacia apresenta a elevação máxima de 446 m na cabeceira e 67 m no seu exutório.

Figura 5.11 – Bacia hidrográfica do rio Itu.



A bacia hidrográfica do rio Itu apresenta 66,14 % de sua área composta por latossolo vermelho distrófico, o qual, ocorre predominantemente em relevo plano e suave ondulado de forma a favorecer a mecanização agrícola, sendo bem drenado e por ser distrófico apresenta uma baixa fertilidade. A segunda parcela de solo mais representativa da bacia corresponde ao neossolo litólico eutrófico, que abrange 28,81 % da área da bacia, caracterizando-se pela ocorrência em relevos declivosos e pela alta fertilidade, por ser eutrófico. A bacia apresenta ainda, 4,67% de nitossolo vermelho eutrófico, o qual apresenta-se altamente susceptível a erosão e bastante férteis, e ainda 0,38% de argilossolo vermelho distrófico o qual caracterizasse pela baixa fertilidade, e em alguns casos favorece a ocorrência de processos erosivos.

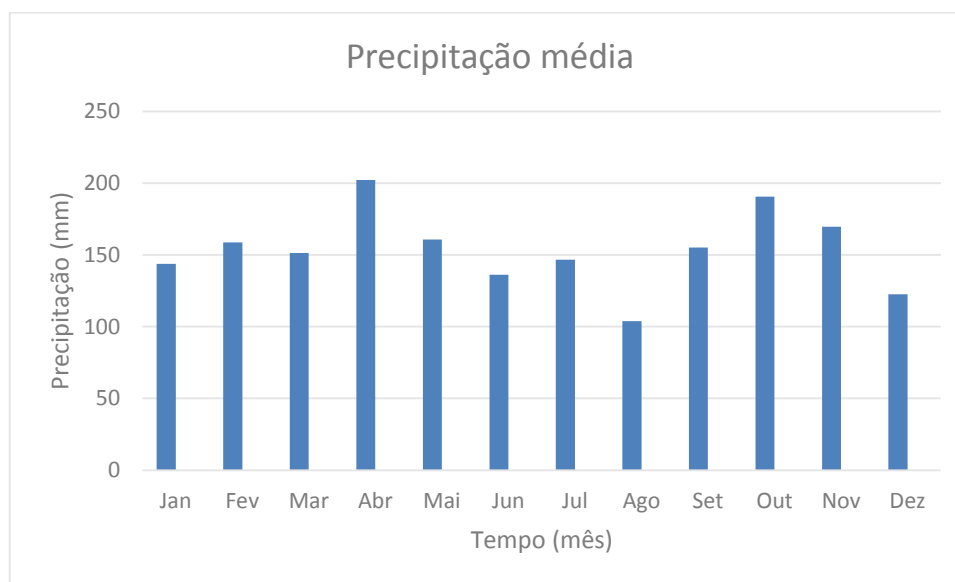
No entorno da bacia hidrográfica do rio Itu estão presentes 4 postos pluviométricos, conforme apresentado na Tabela 5.10, sendo que, o posto de Passo da Cachoeira (02955014), foi desconsiderado por não apresentar dados para o período analisado. Dentre outros aspectos considerados no uso do modelo para essa bacia, destacam-se: período de dados utilizado correspondente a 2319 dias; Área impermeável considerada igual a 8%; coeficiente de forma do histograma tempo-área igual a 1; tempo de concentração adotado como 3, em unidades de intervalo de tempo.

Tabela 5.10 - Informações meteorológicas e hidrológicas para a bacia do rio Itu

Código	Tipo	Nome	Estado	Latitude (S)	Longitude (W)	Período Utilizado
76650000	FLUVIOMÉTRICA	PASSO DA CACHOEIRA	RIO GRANDE DO SUL	29°18'34"	55°42'21"	01/01/1978 - 07/05/1984
02955002	PLUVIOMÉTRICA	CACHOEIRA SANTA CECÍLIA		29°11'46"	55°28'31"	
02955007	PLUVIOMÉTRICA	UNISTALDA		29°2'51"	55°9'4"	
02955014	PLUVIOMÉTRICA	PASSO DA CACHOEIRA		29°18'28"	55°42'32"	
02954020	PLUVIOMÉTRICA	SANTIAGO		29°11'12"	54°51'21"	
83927	CLIMATOLÓGICA	URUGUAIANA		29°45'0"	57°4'48"	

A avaliação dos postos pluviométricos utilizados, ilustrada na Figura 5.9, permite identificar que na bacia hidrográfica do rio Itu, a precipitação média anual considerando o método aritmético, é de 1843 mm. Percebe-se que a distribuição das chuvas mensais descreve o início das chuvas no mês de setembro. Sendo que, o comportamento das chuvas para todos os postos avaliados apresenta-se com essa característica considerando o período de 1977 a 2005.

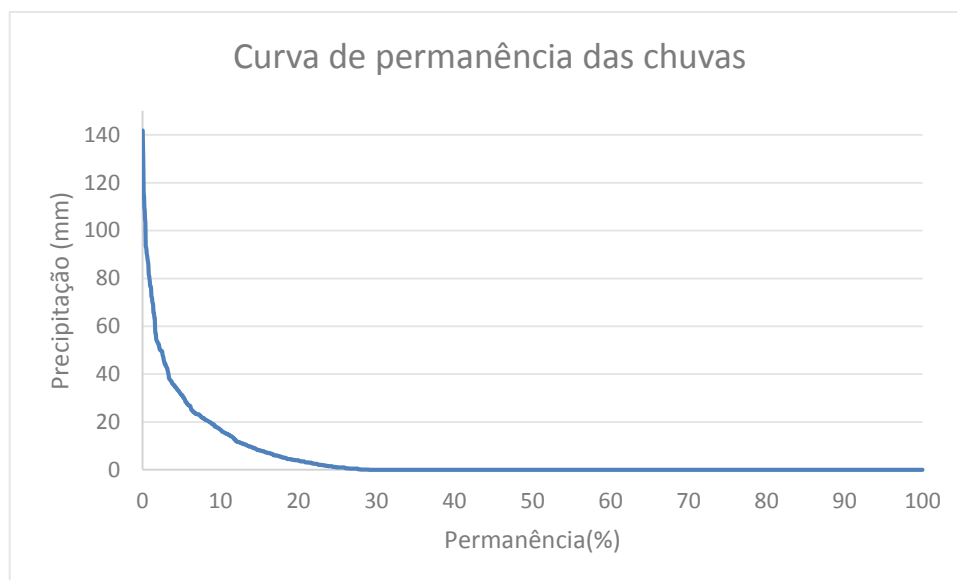
Figura 5.12 - Precipitação média da bacia hidrográfica do rio Itu através da média aritmética



Reconhecidas as características das precipitações na região em estudo, torna-se interessante verificar a porcentagem do tempo para o qual as chuvas foram superiores a zero, para o período de tempo escolhido para o presente estudo, conforme descrito na Tabela 5.10. Dessa forma, a Figura 5.10 apresenta a curva de permanência para as chuvas diárias na bacia hidrográfica do rio Itu, demonstrando assim, que em cerca de 29% do

tempo, as chuvas na região em estudo são superiores a zero, contrastando assim mais uma vez com os resultados encontrados para a bacias hidrográficas localizadas na região nordeste.

Figura 5.13 - Curva de permanência para a série de dados diários de chuva utilizada na bacia hidrográfica do rio Itu



Na caracterização da temperatura para a bacia hidrográfica do rio Itu, foi utilizada a estação climatológica de Uruguaiiana. Sendo assim, a Tabela 5.11 apresenta o valor da temperatura média compensada do período de 1961 a 1990 para a estação climatológica de São Joaquim (83927). Na referida tabela é possível verificar que a estação referente a região em estudo registra uma temperatura média anual de 19,7°C.

Tabela 5.11 - Temperatura média compensada para a estação climatológica de Uruguaiiana (83927)

Tempo (mês)	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Temperatura (°C)	25.9	25.1	23.1	19.8	16.8	13.8	14.2	14.6	17.1	19.6	22.3	24.7

Por fim, a evaporação média para o período de 1961 a 1990 registrada na estação climatológica de Uruguaiiana (83927), está apresentada na Tabela 5.12. Assim, é possível observar que a evapotranspiração anual registrada na referida estação climatológica alcança 1143mm.

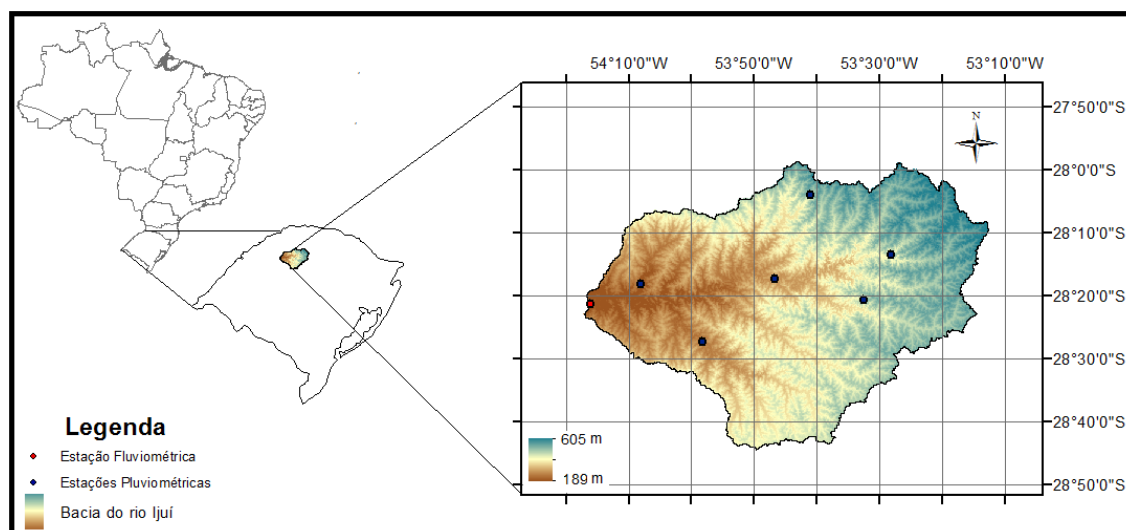
Tabela 5.12 - Evaporação total obtida através do evaporímetro de Piché para a estação de Uruguaiiana (83927)

Tempo (mês)	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Evaporação (mm)	115.4	98.2	103.6	90.6	76.6	68.0	69.0	79.9	86.1	110.3	116.1	129.9

5.1.5. Bacia hidrográfica do rio Ijuí

A bacia hidrográfica do rio Ijuí foi delimitada até a localização do posto fluviométrico Santo Angelo (75230000). Localizada no estado do Rio Grande do Sul (Figura 5.14), essa bacia está inserida entre os municípios de Santo Angelo, Catuípe, Ijuí, Ajuricaba, Nova Ramada, Palmeira das Missões, Condor, Santa Barbara do Sul, Entre-Ijuís, Coronel Barros, Augusto Pestana, Boa Vista do Cadeado, Cruz Alta, Bozano, Pejucara e Panambi, abrangendo, assim, 5414 Km². Seguindo a proposta de Koppen e Geiger, a área na qual a bacia apresenta-se está classificada com o clima Cfa, sendo característico de um clima temperado úmido com verão quente. Essa bacia apresenta a elevação máxima de 605 m na cabeceira e 189 m no seu exutório.

Figura 5.14 – Bacia hidrográfica do rio Ijuí



A bacia hidrográfica do rio Ijuí apresenta 63,72 % de sua área composta por latossolo vermelho distroférico, o qual, tende a ocorrer em relevos planos e suaves ondulados, caracterizando-se ainda pela baixa fertilidade e por altos teores de ferro. Outros 19,91 % da área da bacia, são compostos por latossolo vermelho distrófico, os quais também são característicos de relevos planos e suaves ondulados, favorecendo

assim a mecanização agrícola. Ainda, 8,36% da área da bacia apresenta neossolo litólico eutrófico, o qual caracterizasse por ocorrer em regiões declivosas e apresentar alta fertilidade. Por fim, a porção de 8,01% restante da área da bacia apresenta nitossolo vermelho eutrófico, o qual caracterizasse por apresentar alta fertilidade e alto risco de erosão devido a estar presente em relevos acidentados.

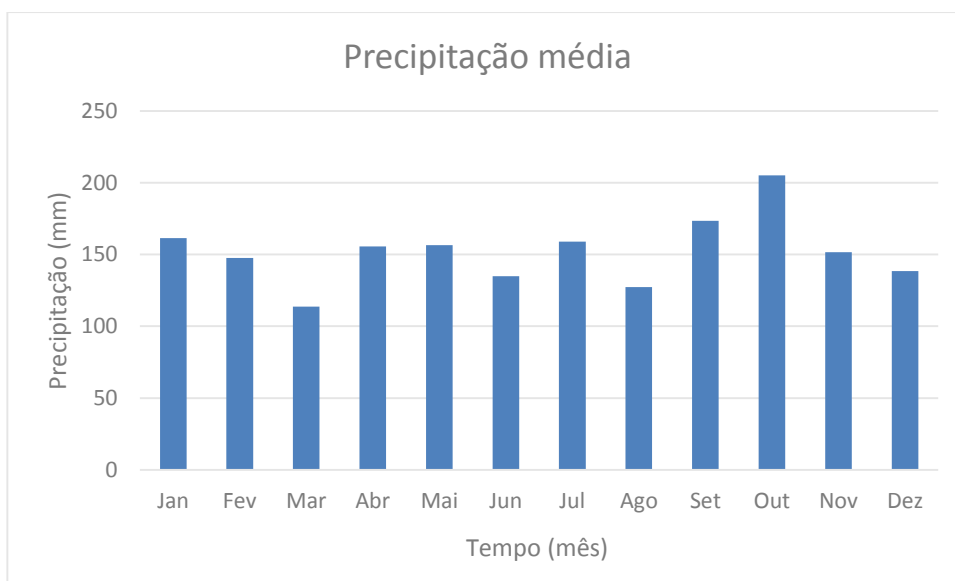
No entorno da bacia hidrográfica do rio Ijuí estão presentes 6 postos pluviométricos, conforme apresentado na Tabela 5.13, sendo que, os postos de Panambi (02853034), Nova Ramada (02853035) e Mauá (02854019), foram desconsiderados por não apresentarem dados para o período analisado. Dentre outros aspectos considerados no uso do modelo para essa bacia, destacam-se: período de dados utilizado correspondente a 1126 dias; Área impermeável considerada igual a 15%; coeficiente de forma do histograma tempo-área igual a 1,5; tempo de concentração adotado como 2, em unidades de intervalo de tempo.

Tabela 5.13 - Informações meteorológicas e hidrológicas para a bacia do rio Ijuí

Código	Tipo	Nome	Estado	Latitude (S)	Longitude (W)	Período Utilizado
75230000	FLUVIOMÉTRICA	SANTO ANGELO	RIO GRANDE DO SUL	28°21'29"	54°16'6"	01/01/1989 - 31/01/1992
02853003	PLUVIOMÉTRICA	CONCEIÇÃO		28°27'22"	53°58'18"	
02853010	PLUVIOMÉTRICA	PASSO FAXINAL		28°17'22"	53°46'46"	
02853023	PLUVIOMÉTRICA	CONDOR		28°13'32"	53°28'13"	
02853034	PLUVIOMÉTRICA	PANAMBI		28°20'40"	53°32'30"	
02853035	PLUVIOMÉTRICA	NOVA RAMADA		28°4'0"	53°41'0"	
02854019	PLUVIOMÉTRICA	MAUÁ		28°18'8"	54°8'3"	
83912	CLIMATOLÓGICA	CRUZ ALTA		28°37'48"	53°36'0"	

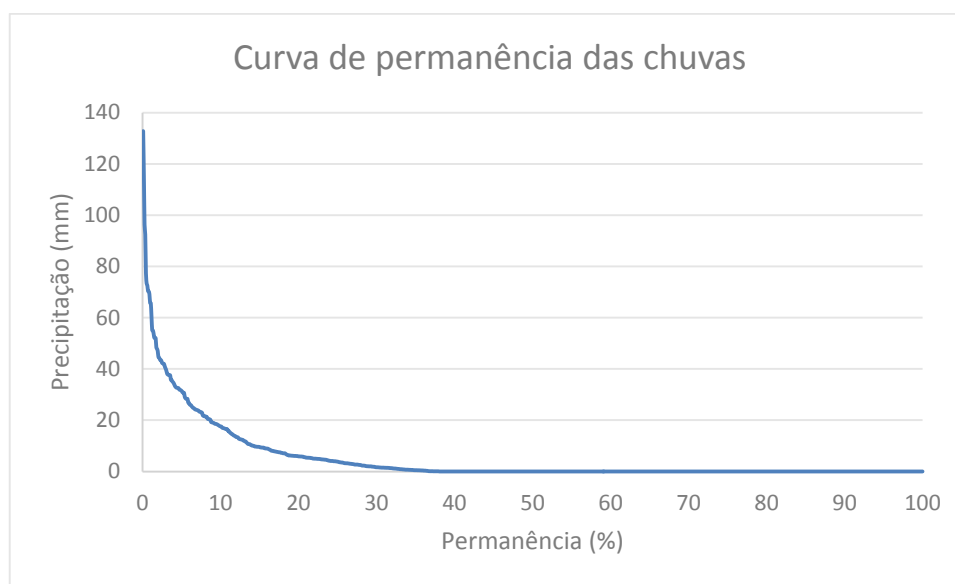
A avaliação dos postos pluviométricos utilizados, ilustrada na Figura 5.15, permite identificar que na bacia hidrográfica do rio Ijuí, a precipitação média anual considerando o método aritmético, é de 1823 mm. Percebe-se que a distribuição das chuvas mensais descreve o início das chuvas mais significativas nos meses de setembro e outubro, sendo mais homogêneo para os demais meses do ano. As informações, que descrevem o comportamento das chuvas para todos os postos avaliados foi feita considerando o período entre 1977 e 2004.

Figura 5.15 - Precipitação média da bacia hidrográfica do rio Ijuí através da média aritmética



Reconhecidas as características das precipitações na região em estudo, torna-se interessante verificar a porcentagem do tempo para o qual as chuvas foram superiores a zero, para o período de tempo escolhido para o presente estudo, conforme descrito na Tabela 5.13. Dessa forma, a Figura 5.16 apresenta a curva de permanência para as chuvas diárias na bacia hidrográfica do rio Ijuí, demonstrando assim, que em cerca de 38,1% do tempo, as chuvas na região em estudo são superiores a zero, contrastando assim mais uma vez com os resultados encontrados para as bacias hidrográficas localizadas na região nordeste.

Figura 5.16 - Curva de permanência para a série de dados diários de chuva utilizada na bacia hidrográfica do rio Ijuí



Na caracterização da temperatura para a bacia hidrográfica do rio Ijuí, foi utilizada a estação climatológica de Cruz Alta. Sendo assim, a Tabela 5.14 apresenta o valor da temperatura média compensada do período de 1961 a 1990 para a estação climatológica de Cruz Alta (83912). Na referida tabela é possível verificar que a estação referente a região em estudo registra uma temperatura média anual de 18,5°C.

Tabela 5.14 - Temperatura média compensada para a estação climatológica de Cruz Alta (83912)

Tempo (mês)	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Temperatura (°C)	23.3	23.0	21.4	18.5	16.0	13.5	13.6	14.7	16.3	18.4	20.8	22.6

Por fim, a evaporação média para o período de 1961 a 1990 registrada na estação climatológica de Cruz Alta (83912), está apresentada na Tabela 5.15. Assim, é possível observar que a evapotranspiração anual registrada na referida estação climatológica alcança 1230mm.

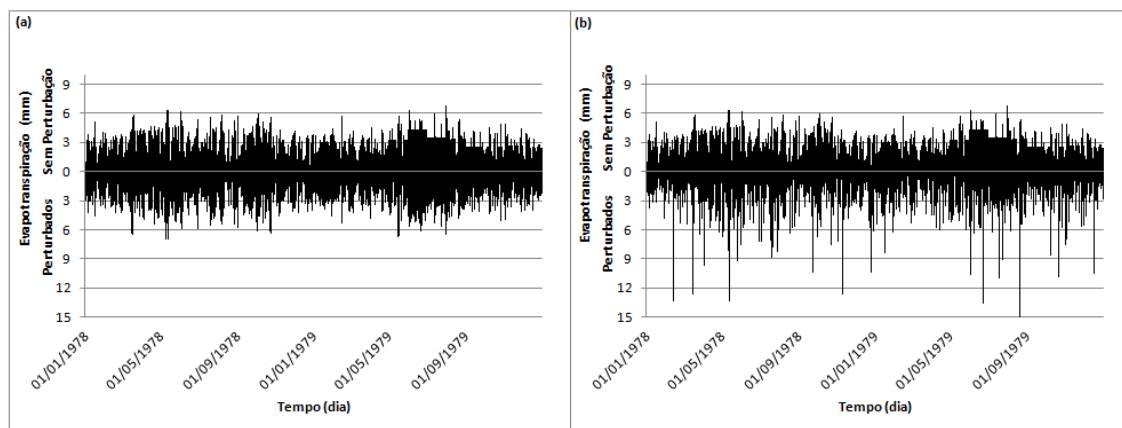
Tabela 5.15 - Evaporação total obtida através do evaporímetro de Piché para a estação de Cruz Alta (83912)

Tempo (mês)	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Evaporação (mm)	125.1	99.8	99.4	87.1	77.4	75.6	86.7	97.8	98.1	114.6	122.0	146.4

5.2. PERTURBAÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA

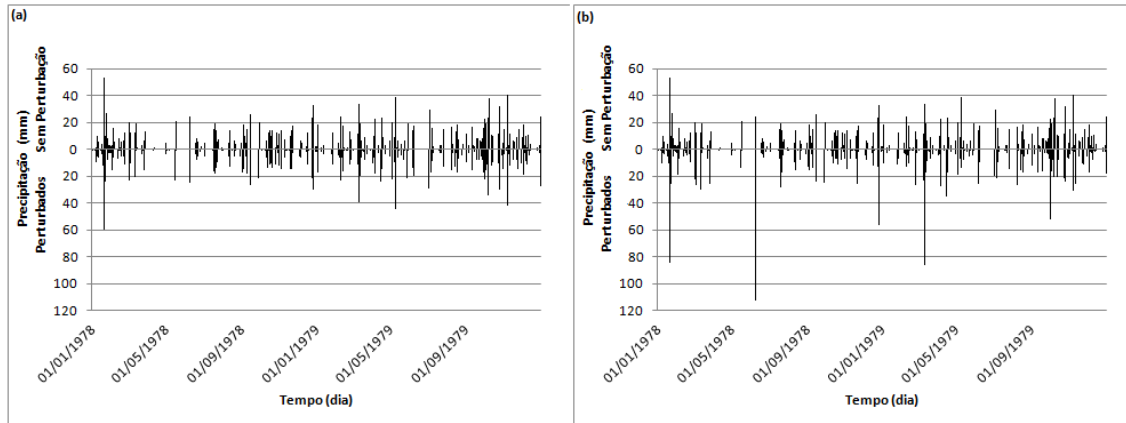
A perturbação dos dados de entrada foi contemplada similarmente a Oudin et al. (2006), de modo a favorecer a análise do impacto de erros aleatórios e sistemáticos nos dados de entrada sobre o desempenho do modelo. No entanto o presente estudo abordou a evapotranspiração obtida de forma diária, através do método de Penman-Monteith, enquanto os autores mencionados abordaram a evapotranspiração de forma mensal. Nesse sentido, a Figura 5.17 ilustra o efeito de erros aleatórios com distribuição normal, conforme descrito na metodologia do presente estudo, sobre os dados de evapotranspiração para a bacia do rio Canoas, de forma a permitir a comparação entre os dados de entrada sujeito aos efeitos dos erros com relação à série original. Na inserção desses erros, a evapotranspiração foi limitada subjetivamente a atingir no máximo 15mm/dia, de forma a não assumir valores que fujam muito da realidade.

Figura 5.17 - Dados de entrada de evapotranspiração corrompidos através de erro aleatório com distribuição normal: (a) Erro para $\sigma = 0,1$ e (b) Erro para $\sigma = 0,5$ (Exemplo para bacia do rio Canoas)



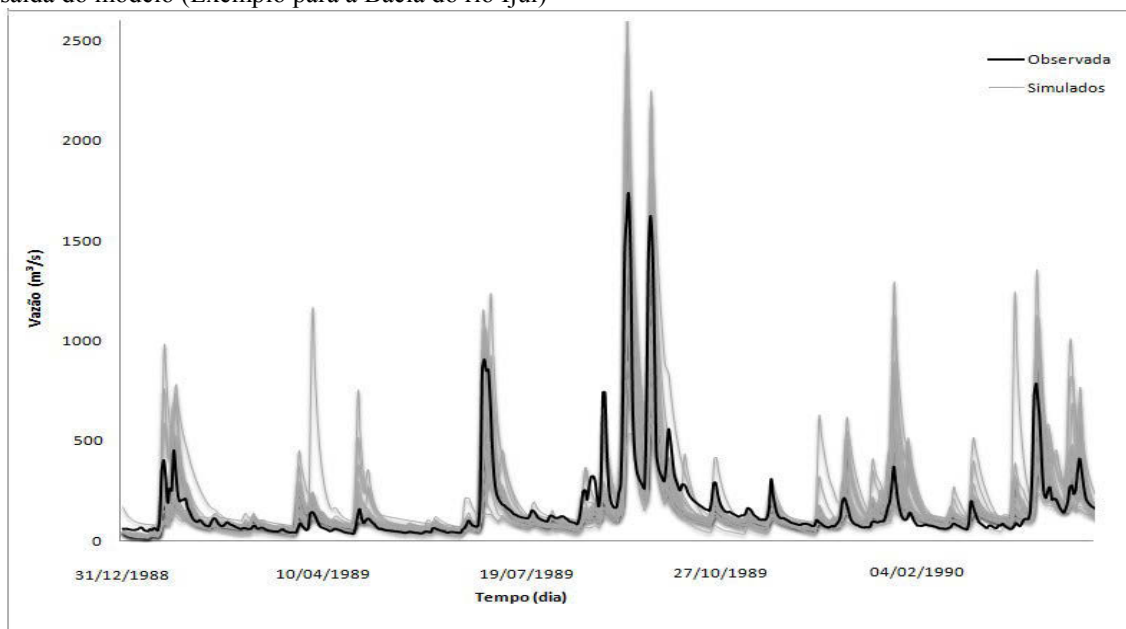
A perturbação da precipitação ocorreu de forma similar à evapotranspiração, sendo que o limite máximo adotado subjetivamente na inserção desse tipo de erro foi de 300 mm/dia. Ou seja, caso o erro inserido elevasse a precipitação acima de 300mm/dia o algoritmo faz com que o valor a ser adotado seja o limite máximo estabelecido. Observa-se também, que quando o valor do evento de precipitação é igual a zero não ocorre perturbação dos dados (Figura 5.18) de forma a descartar a hipótese de erro nesse caso, de forma a não representar a situação na qual houve leitura de chuva, quando está não ocorreu.

Figura 5.18 - Dados de entrada de precipitação corrompidos através de erro aleatório com distribuição normal: (a) Erro para $\sigma = 0,1$ e (b) Erro para $\sigma = 0,5$ (Exemplo para bacia do rio Canoas)



A abordagem dessas perturbações tem por finalidade avaliar a capacidade do modelo em representar o escoamento, mesmo quando sujeito a erros. Nesse sentido, é possível verificar o efeito dos erros na saída do modelo, conforme pode ser visto na Figura 5.19. Na referida ilustração, é possível acompanhar um exemplo comparativo entre a série de vazão observada, em relação a vinte simulações quando sujeitas a erros aleatórios com distribuição normal sobre os dados de precipitação.

Figura 5.19 - Impacto de erros aleatórios com distribuição normal (para σ igual a 0,5), na precipitação, na saída do modelo (Exemplo para a Bacia do rio Ijuí)



5.3. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE CONSIDERANDO SÉRIE SINTÉTICA DE VAZÕES

O primeiro conjunto de procedimentos de análise de sensibilidade efetuado é baseado no uso de séries de vazões sintéticas. A série sintética é obtida executando o modelo, com os parâmetros fixos em valores escolhidos, junto a uma série de dados pluviométricos e outra de dados de evapotranspiração. Esta série gerada pelo modelo é, posteriormente, utilizada como série de vazões observadas para o procedimento de calibração. Ao considerar uma série sintética na calibração, são eliminadas as incertezas nos dados e na capacidade de representação do modelo, ficando somente a incerteza na calibração dos parâmetros.

Entendendo que cada função-objetivo tem uma peculiaridade, o presente estudo optou por obter uma série sintética ideal para cada função-objetivo avaliada. Dessa forma, cada função-objetivo apresenta um conjunto de parâmetros que a descreve de forma mais condizente, os quais podem ser conferidos na Tabela 5.16. Através desses conjuntos de parâmetros foram geradas as séries sintéticas de vazões utilizadas como vazões observadas nas análises de sensibilidade propostas nesse item.

Tabela 5.16 - Conjunto de parâmetros utilizados na geração da série sintética

	Kling-Gupta	Nash-Sutcliffe	DQI	DRM
IO (mm/h)	10.85	19.86	38.31	47.84
Ib (mm/h)	3.55	8.21	9.38	6.19
H	0.024	0.021	0.054	0.096
Ksup (h)	3.05	5.39	3.16	3.15
Ksub (h)	448.15	14.96	71.20	73.08
Rmax (mm)	0.22	1.08	0.45	0.35
α	13.23	16.34	17.27	10.82

5.4. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE CONSIDERANDO SÉRIES REAIS DE VAZÕES

O segundo conjunto de procedimentos de análise de sensibilidade efetuados utiliza as séries reais de vazões nos diferentes estudos de caso. Nessa etapa foram utilizados os dados das cinco bacias hidrográficas definidas no estudo de caso. A ideia foi de obter séries com dados suficientes para uma boa calibração, conforme estabelecido por alguns

autores referenciados no presente estudo, apesar da limitação imposta pelos dados disponíveis. Dessa forma, buscou-se quando possível escolher períodos contendo eventos extremos de cheia e estiagem, bem como com uma boa série de dados para assim efetuar as análises de sensibilidade estática e dinâmica.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise de sensibilidade no modelo IPH II permitiu avaliar a eficiência do modelo quando sujeito a dados de entrada com erros, de forma a informar ao usuário alguns problemas associados ao uso deste. Através dos resultados obtidos no presente estudo, e apresentados a seguir, o usuário tem uma análise quantitativa e qualitativa das interferências oriundas de erros que poderiam existir nos dados de precipitação e de evapotranspiração.

6.1. IMPACTO DOS ERROS NOS DADOS DE ENTRADA: SÉRIE SINTÉTICA DE VAZÕES

6.1.1. Análise de sensibilidade Estática

Esse tópico aborda a análise de sensibilidade estática considerando quatro funções-objetivo: Coeficiente de Kling-Gupta; Coeficiente de Nash-Sutcliffe, Desvio Quadrático Inverso e Desvio Relativo Médio. A bacia do rio Canoas foi selecionada, e as séries de vazões sintéticas foram geradas pelo próprio modelo utilizando um conjunto de parâmetros diferentes para cada função-objetivo, com os dados observados de precipitação e evapotranspiração, conforme apresentado no item 5.3 (aplicação da metodologia). Nesse sentido, foi avaliado o impacto sobre as funções-objetivo quando o modelo hidrológico utiliza dados de entrada sujeitos a erros sistemáticos e aleatórios.

O erro sistemático foi avaliado tanto na evapotranspiração quanto na precipitação para o coeficiente de multiplicação K variando entre 0,5 e 2. Já para K igual a um tem-se o resultado obtido sem efeito de erro. Foram realizadas 16 simulações para dados de evapotranspiração e 16 para dados de precipitação sobre o efeito desse tipo de erro. Ao contemplar essa análise para todas as funções-objetivo, tem-se um total de 128

simulações, cujos resultados são apresentados na Figura 6.1. Da análise desses resultados, bem como considerando os hidrogramas obtidos, observa-se que:

✓ Ao avaliar a eficiência do modelo IPH II através da função de Kling-Gupta quando sujeito a erros sistemáticos verifica-se que quanto mais próximo de um o valor da F.O., menor foi o impacto sobre esta medida de desempenho. Sendo assim, observa-se que quando o erro é inserido na evapotranspiração o escoamento superficial tende a ser alterado, chegando a afetar o desempenho do modelo em até 20 % em sobrestimativas com a redução dos escoamentos superficiais e de base, e em 16% nas subestimativas a qual provoca com a elevação dos escoamentos superficiais e de base. O impacto da superestimativa da evapotranspiração nesta medida de desempenho é maior que o impacto da subestimativa desta variável para igual coeficiente de intensidade do erro (K), embora representem valores próximos. Já ao inserir o erro na precipitação, percebe-se que o escoamento superficial é drasticamente afetado tanto em subestimativas (até 81%) quanto em sobrestimativas (superior a 100%), no entanto o escoamento de base permanece inalterado. Isto provoca uma rápida deterioração do valor da medida de desempenho que segue um comportamento praticamente linear com o aumento ou redução do valor do coeficiente de intensidade de erro.

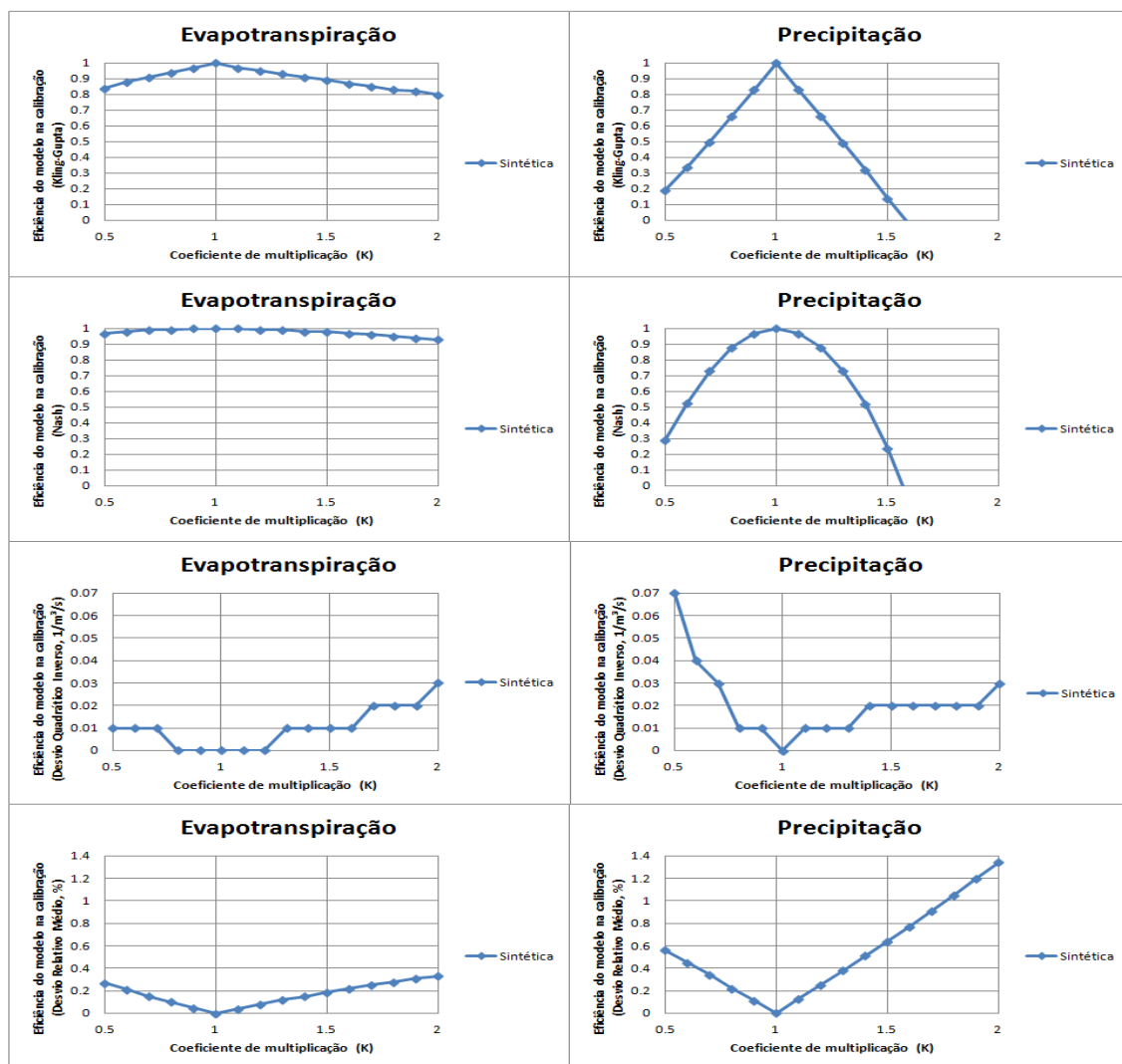
✓ Quando a função que descreve a eficiência do modelo é o coeficiente de Nash-Sutcliffe, verifica-se que quanto mais próximo de um é o valor da F. O., menor foi o impacto dos erros nos dados de entrada sobre esta medida de desempenho. Percebe-se assim, que subestimativas muito elevadas da evapotranspiração chegam a afetar o desempenho do modelo em 3% enquanto que sobrestimativas atingem a eficiência em até 7%. Já os erros na precipitação afetam drasticamente a eficiência do modelo tanto para sobrestimativas (superior a 100%) quanto para subestimativas (até 76%). Nessa situação, tanto o escoamento de base, quanto o escoamento superficial é alterado de forma a provocar esses impactos. Isto provoca uma rápida deterioração do valor da medida de desempenho que apresenta um formato parabólico em função do coeficiente de intensidade do erro.

✓ Ao avaliar a eficiência do modelo através do Desvio Quadrático Inverso tem-se que, quanto mais próximo de zero é o valor da F. O., menor foi o impacto dos erros nos dados de entrada sobre esta medida de desempenho. Para essa situação, o valor de 0,01 (1/m³/s) é aceitável, acima disso o efeito passa a ser considerável sobre essa F. O tanto na

evapotranspiração quanto na precipitação. Observa-se que a deterioração do valor desta F. O. é mais elevado quando o escoamento de base é afetado consideravelmente pelos erros embutidos.

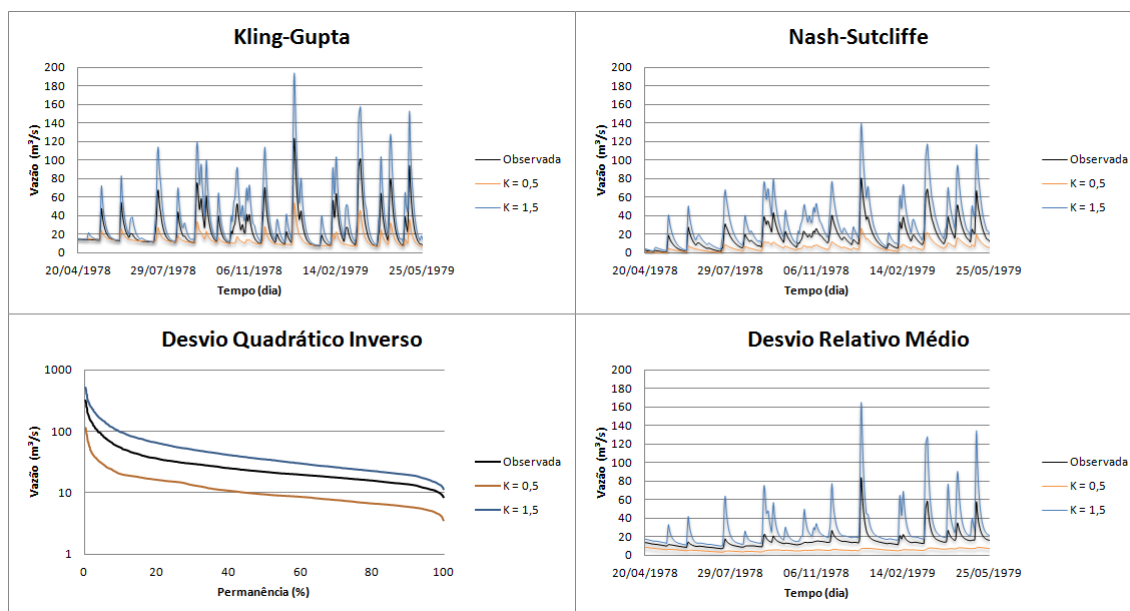
✓ Ao avaliar a eficiência do modelo através do Desvio Relativo Médio tem-se que, quanto mais próximo de zero é o valor da F. O., menor foi impacto dos erros nos dados de entrada sobre esta medida de desempenho. Essa função sofre efeitos de alterações tanto no escoamento superficial quanto subterrâneo. Nesse caso o hidrograma dado com os resultados dessa função apresenta-se bom até o valor correspondente a 5%, o qual corresponde a 0,05 na escala do gráfico apresentado. Acima desse valor, a influência sobre o escoamento de base passa a ser mais representativa impactando fortemente o modelo.

Figura 6.1 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções objetivo, sujeito a erro sistemático nos dados de evapotranspiração e precipitação devido a análise de sensibilidade estática.



Visando ilustrar o impacto de erros sistemáticos sobre as vazões de saída, a Figura 6.2 apresenta os hidrogramas quando os dados de entrada de precipitação estão sujeitos a erros sistemáticos para o coeficiente de multiplicação k da chuva correspondendo a 0,5 e 1,5. É possível acompanhar a diminuição do escoamento superficial em subestimativas da precipitação, bem como a elevação do escoamento superficial em sobrestimativas da precipitação com erros sistemáticos. Quando o mesmo erro é inserido na evapotranspiração, ocorre o inverso da situação apresentada, no que diz respeito ao comportamento do hidrograma. Essa situação é esperada, uma vez que para o modelo, subestimativa da evapotranspiração pode ser associada à elevação da precipitação no sistema, bem como, a superestimativa da evapotranspiração estaria associada à diminuição do aporte hídrico ao sistema. Observados esses aspectos, tem-se como perceber o impacto de erros sistemáticos nas medidas de desempenho apresentados na Figura 6.1 sobre as vazões simuladas.

Figura 6.2 - Acompanhamento da interferência de erros sistemáticos na precipitação sobre as vazões de saída para a bacia sintética para quatro diferentes funções-objetivo.

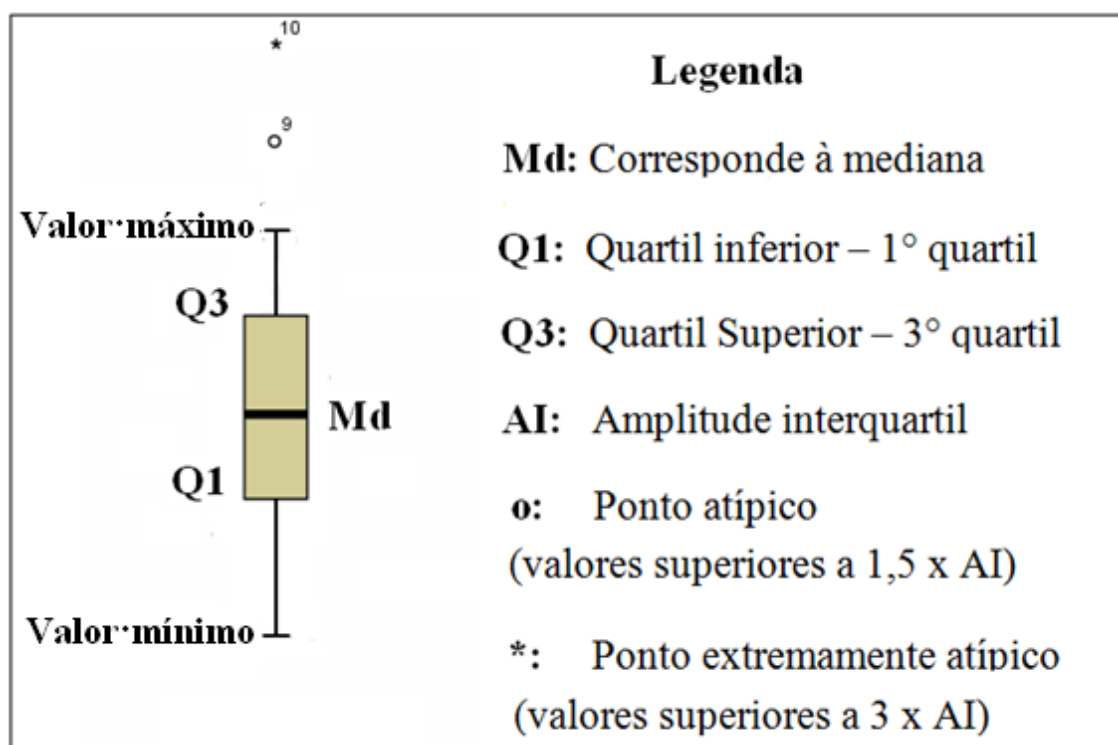


Já o erro aleatório, foi avaliado tanto na evapotranspiração quanto na precipitação, para a intensidade do erro σ variando entre zero e 0,5. Onde, σ igual à zero descreve o resultado sem efeito de erro. Para os erros com σ variando entre 0,1 e 0,5, o presente estudo utilizou 10 séries de dados sobre o efeito de erros com distribuição uniforme e 10 com erros com distribuição normal para cada valor de σ , buscando assim ter uma gama representativa de valores que favorecessem a análise. Dessa forma, foram realizadas sobre o efeito desse tipo de erro, 100 simulações com dados de evapotranspiração e 100

com dados de precipitação, sendo metade com erros com distribuição uniforme e o restante com distribuição normal. Ao contemplar essa análise para todas as funções-objetivo, tem-se um total de 800 simulações.

Ao longo desse estudo são apresentadas estatísticas dos resultados no formato box-plot (Figura 6.3) o qual favorece a observação dos seguintes aspectos: distribuição das variáveis em relação à homogeneidade dos dados; valores de tendência central; valores máximos e mínimos; e valores atípicos caso existam. O formato das caixas apresentadas nas figuras informa que em caso de serem muito pequenas, os valores estão concentrados em torno da mediana, enquanto caixas grandes informam a heterogeneidade dos dados analisados. Torna-se válido ressaltar também que os gráficos apresentam-se em escala diferente de forma a favorecer a visualização dos resultados.

Figura 6.3 - Descrição das estatísticas apresentadas no gráfico box-plot

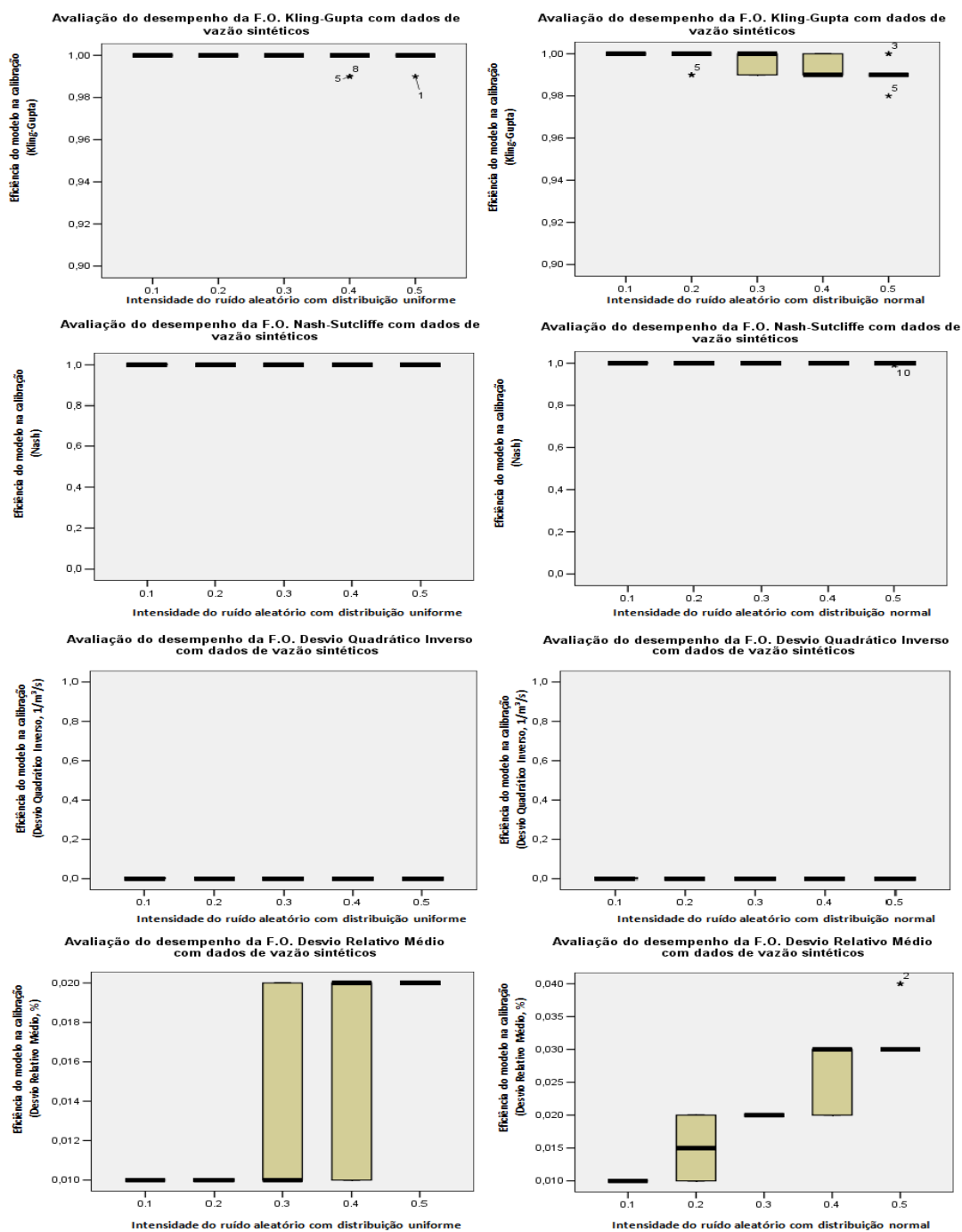


O acompanhamento dos resultados ilustrados na Figura 6.4, demonstra que, para todas as funções-objetivo avaliadas, o impacto de erros aleatórios, seja eles com distribuição uniforme ou normal sobre os dados de evapotranspiração, pouco afetou o resultado das F.O. Percebe-se a concentração dos dados em torno da mediana para grande parte das funções-objetivo avaliadas, indicando assim que o conjunto de parâmetros que

representa o sistema não sofre efeitos consideráveis quando sujeito a erros aleatórios sejam eles com distribuição uniforme ou normal sobre os dados de evapotranspiração.

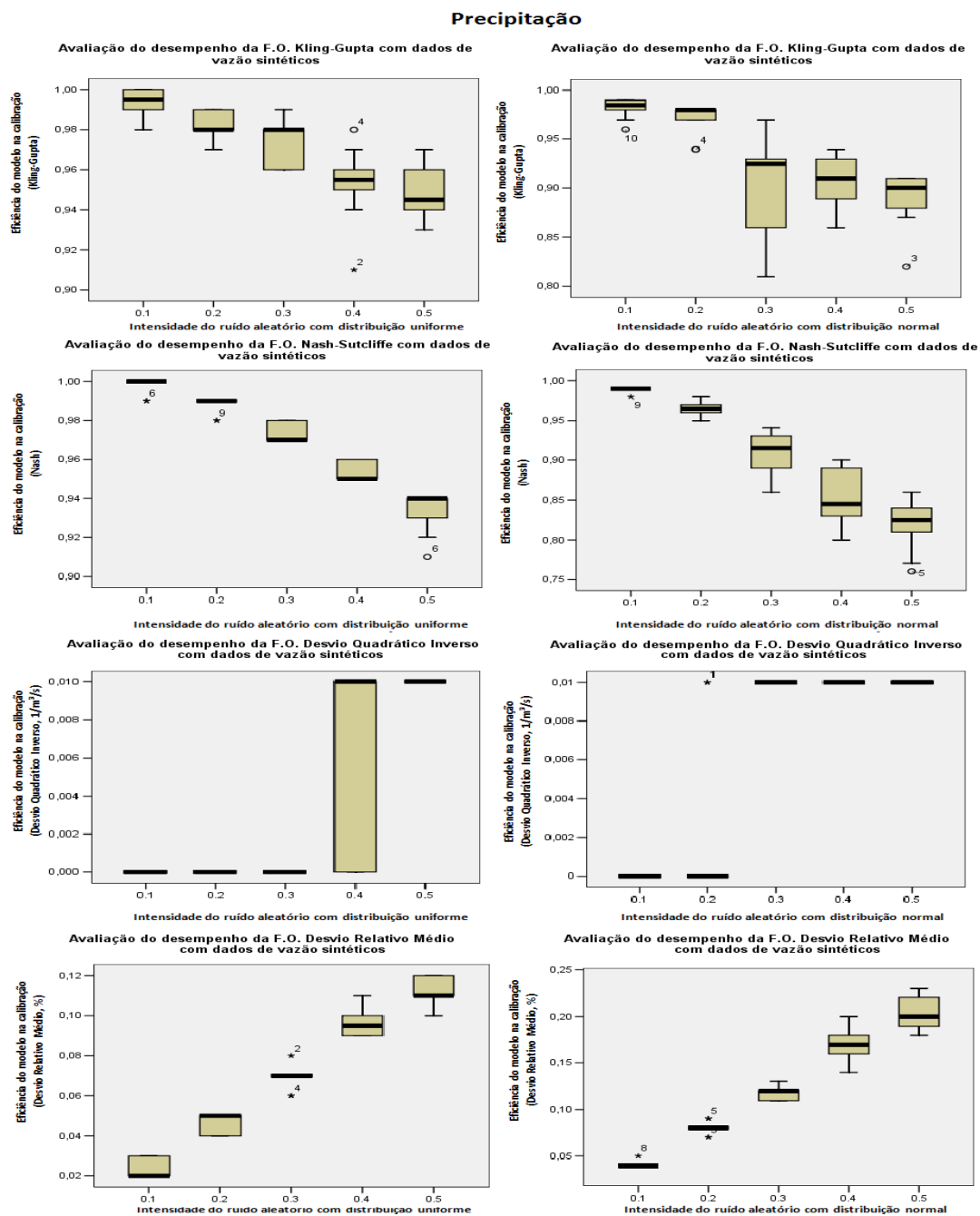
Figura 6.4 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objetivo, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal nos dados de evapotranspiração para a bacia sintética devido a análise de sensibilidade estática.

Evapotranspiração



Observam-se na Figura 6.5 que, para as funções-objetivo avaliadas, o impacto de erros aleatórios, seja eles com distribuição uniforme ou normal, sobre os dados de precipitação, são menos sentidos na F. O. DQI. Nas outras F. O. percebe-se que, a medida que a intensidade do erro aumenta, o desempenho do modelo diminui, bem como acompanha-se que a amplitude entre as estatísticas tende a aumentar, passando a ter uma maior heterogeneidade.

Figura 6.5 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objetivo, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal nos dados de precipitação para a bacia sintética devido a análise de sensibilidade estática.



6.1.2. Análise de sensibilidade dinâmica

Esse tópico aborda a análise de sensibilidade dinâmica, considerando quatro funções objetivo: Coeficiente de Kling-Gupta, Coeficiente de Nash-Sutcliffe, Desvio Quadrático Inverso e Desvio Relativo Médio e as séries sintéticas de vazões utilizadas na etapa anterior. Nesse sentido, foi avaliado o impacto sobre as funções-objetivo quando o modelo hidrológico utiliza dados de entrada sujeitos a erros sistemáticos e aleatórios.

O erro sistemático foi avaliado, tanto na evapotranspiração quanto na precipitação, para o coeficiente de multiplicação K variando entre 0,5 e 2. Já para K igual a um, tem-se o resultado obtido sem efeito de erro. Foram realizadas 16 simulações para dados de evapotranspiração e 16 para dados de precipitação sobre o efeito desse tipo de erro. Ao contemplar essa análise para todas as funções-objetivo, tem-se um total de 128 simulações.

O erro aleatório foi avaliado tanto na evapotranspiração quanto na precipitação para a intensidade do erro σ variando entre zero e 0,5. Onde, σ igual à zero descreve o resultado sem efeito de erro. Para os erros com σ variando entre 0,1 e 0,5, o presente estudo gerou 20 séries de dados sobre o efeito de erros com distribuição uniforme e 20 com erros com distribuição normal para cada valor de σ , buscando assim ter uma gama representativa de valores que favorecessem a análise. Dessa forma, foram realizadas para essa bacia 200 simulações para dados de evapotranspiração e 200 para dados de precipitação, sobre o efeito desse tipo de erro com diferentes intensidades, sendo metade com erros com distribuição uniforme e o restante com distribuição normal. Ao contemplar essa análise para todas as funções-objetivo, tem-se um total de 1600 simulações.

Os resultados obtidos na análise de sensibilidade dinâmica apoiaram a análise do impacto sobre a eficiência do modelo, e do impacto sobre os valores dos parâmetros, obtidos pela calibração automática, conforme apresentado a seguir.

6.1.2.1. Impacto sobre a eficiência do modelo

Durante a análise de sensibilidade dinâmica o modelo é calibrado novamente, utilizando-se os dados de entrada perturbados. A Figura 6.6 descreve os resultados encontrados para as diferentes funções-objetivo com dados de entrada sujeitos a erros sistemáticos, permitindo as seguintes considerações:

✓ Ao avaliar a eficiência do modelo IPH II através da função de Kling-Gupta quando sujeito a erros sistemáticos, verifica-se que quando o erro é inserido no sentido de subestimar a evapotranspiração o modelo consegue contornar os erros com a alteração dos valores dos parâmetros, mantendo o seu desempenho praticamente inalterado. Entretanto, quando o erro é superior a 50% do valor de referência, tem-se que o modelo ainda consegue contornar os erros, mas pode ter sua eficiência afetada em até 10%. Já ao verificar a inserção de erros na precipitação, percebe-se que subestimativas dessa variável apresentam um maior impacto sobre a eficiência do modelo. A deterioração do desempenho do modelo, mesmo com a alteração dos parâmetros, aumenta com a intensidade do erro de subestimativa e o modelo não consegue representar o escoamento de forma aceitável, fato esse já esperado, uma vez que o modelo não apresenta nenhum parâmetro que produza água para o sistema quando ocorre um déficit hídrico. Enquanto que, para erros que sobrestimam o valor da precipitação, verificou-se que o modelo consegue contornar o efeito dos erros mantendo um desempenho aceitável, mas que pode ser até 20% inferior ao desempenho ideal.

✓ Quando a função que descreve a eficiência do modelo passa a ser Nash-Sutcliffe, percebe-se que o modelo tem a capacidade de contornar os erros nos dados de evapotranspiração para praticamente toda a faixa analisada. Já os erros na precipitação provocam uma diminuição do desempenho do modelo IPH II com as mesmas características mencionadas para a função de Kling-Gupta.

✓ Ao avaliar a eficiência do modelo através do Desvio Quadrático Inverso e considerando que o valor de 0,01 ($1/m^3/s$) é aceitável, tem-se que o modelo consegue contornar os erros na evapotranspiração com a alteração dos valores dos parâmetros. O mesmo acontece quando os erros estão presentes na precipitação, com o diferencial que as subestimativas da precipitação ainda causam um impacto mais acentuado devido ao modelo não conseguir representar essa situação onde ocorre déficit de água.

✓ Ao avaliar a eficiência do modelo através do Desvio Relativo Médio tem-se que, o modelo consegue contornar as subestimativas da evapotranspiração com uma perda de até 5% no desempenho, enquanto que no caso de superestimativas desta variável a perda de desempenho pode atingir 14%. Ao avaliar a inserção de erros na precipitação percebe-se que o modelo consegue contornar o impacto quando este ocorre no sentido de sobrestimar os dados.

A avaliação da Figura 6.7, descreve os resultados encontrados para as diferentes funções-objetivo com dados de entrada sujeitos a erros aleatórios com distribuição uniforme e normal sobre os dados de evapotranspiração. A análise dos resultados ilustrados na figura informa que o modelo IPH II consegue contornar os erros com a alteração dos valores dos parâmetros, mantendo o seu desempenho praticamente inalterado em todas as funções-objetivo avaliadas.

A avaliação da Figura 6.8, descreve os resultados encontrados para as diferentes funções-objetivo com dados de entrada sujeitos a erros aleatórios com distribuição uniforme e normal sobre os dados de precipitação. A análise dos resultados ilustrados na figura informa que o modelo IPH II consegue contornar os erros com a alteração dos valores dos parâmetros, no entanto com uma perda de desempenho mais evidente quando comparado aos resultados obtidos com os dados de evapotranspiração. Ainda, em todas as funções verifica-se que a amplitude entre as estatísticas aumenta, à medida que a intensidade do erro é elevada, indicando assim duas situações: 1) Quanto maior a intensidade do erro, maior tende a ser a perda de desempenho do modelo; 2) Quanto maior a intensidade do erro, maior a dispersão dos resultados, em função do erro atingir ou não, eventos extremos de precipitação.

Figura 6.6 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, para diferentes funções objetivo, sujeito a erro sistemático nos dados de evapotranspiração e precipitação devido a análise de sensibilidade dinâmica.

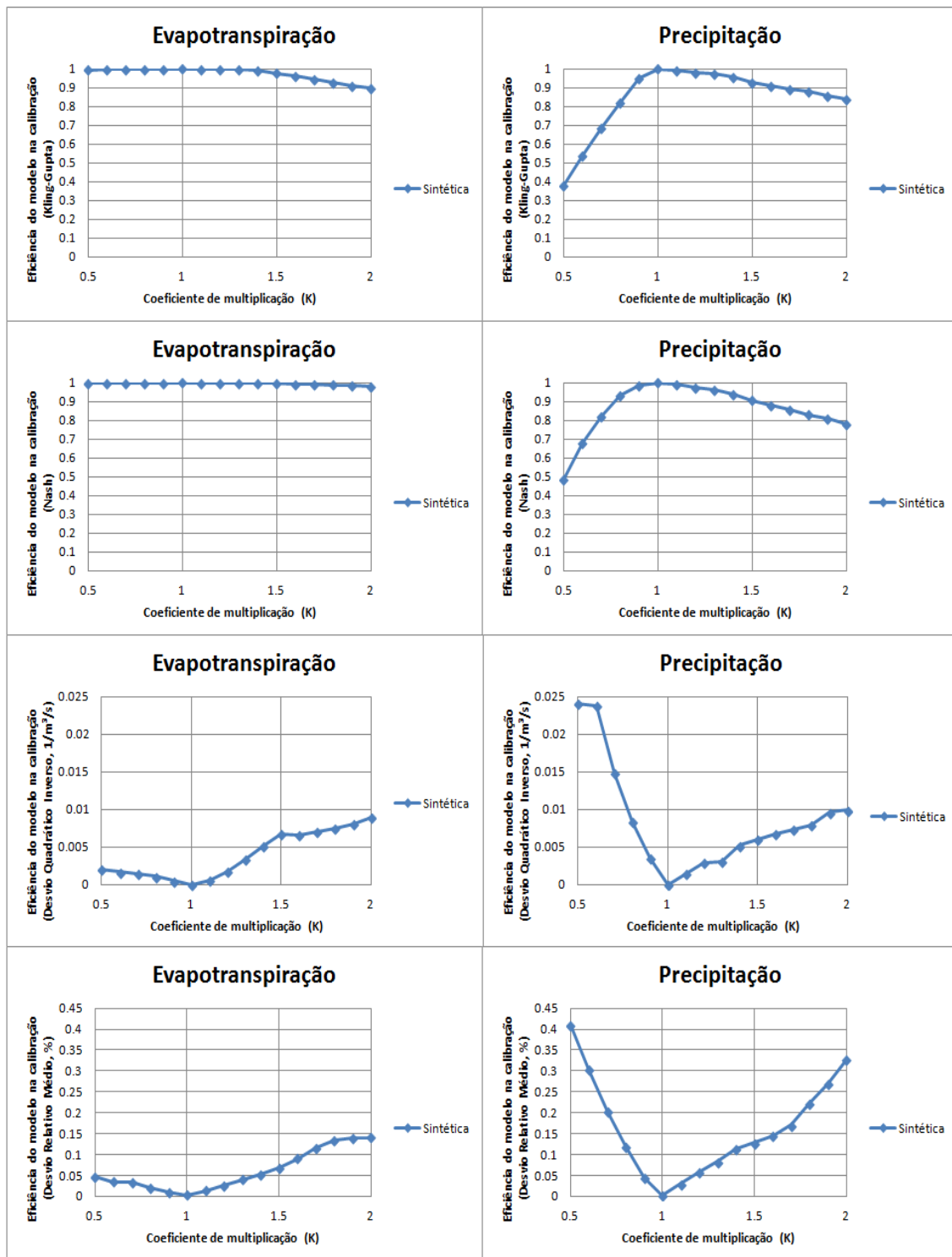


Figura 6.7 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, para diferentes funções-objetivo, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal nos dados de evapotranspiração para a bacia sintética devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Evapotranspiração

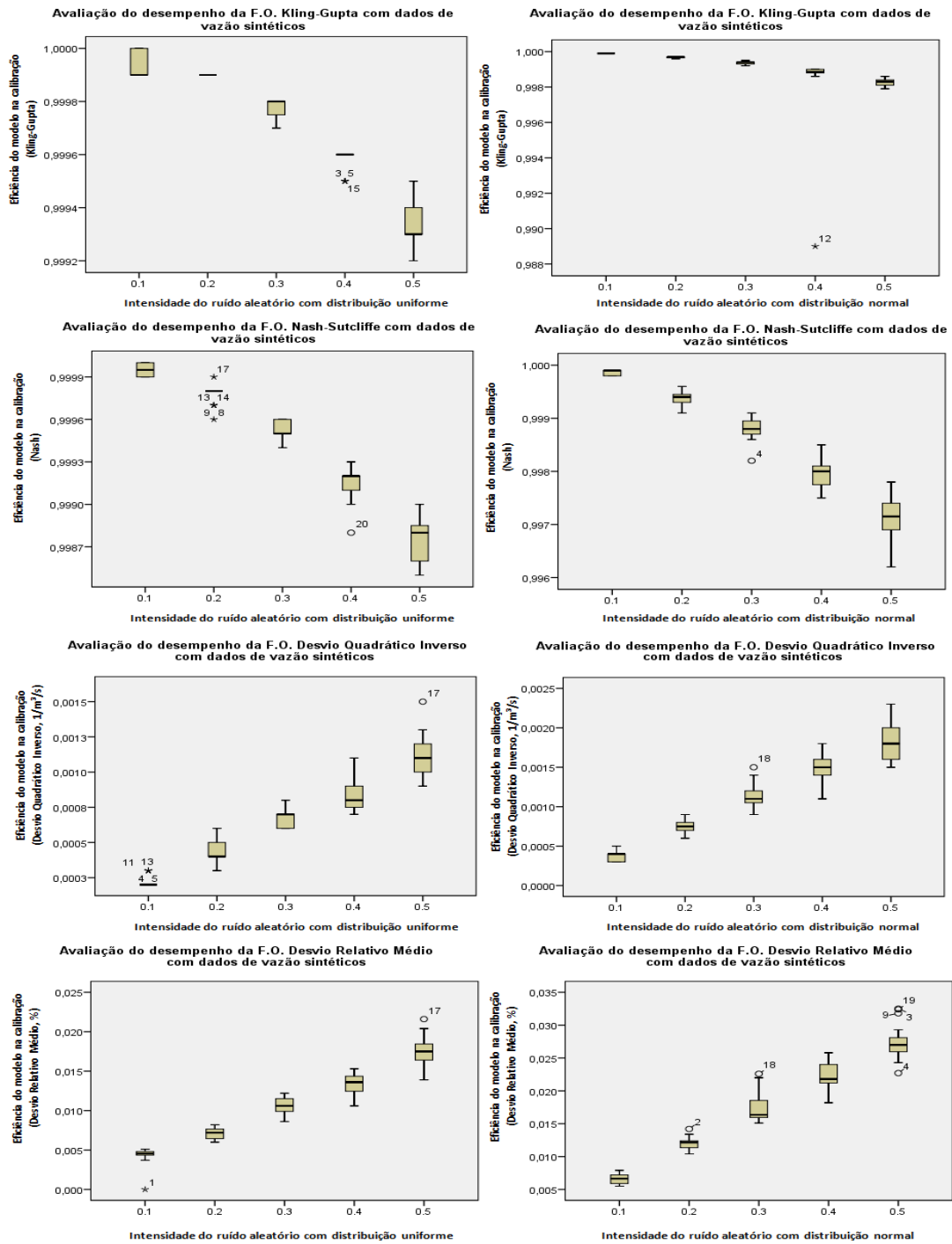
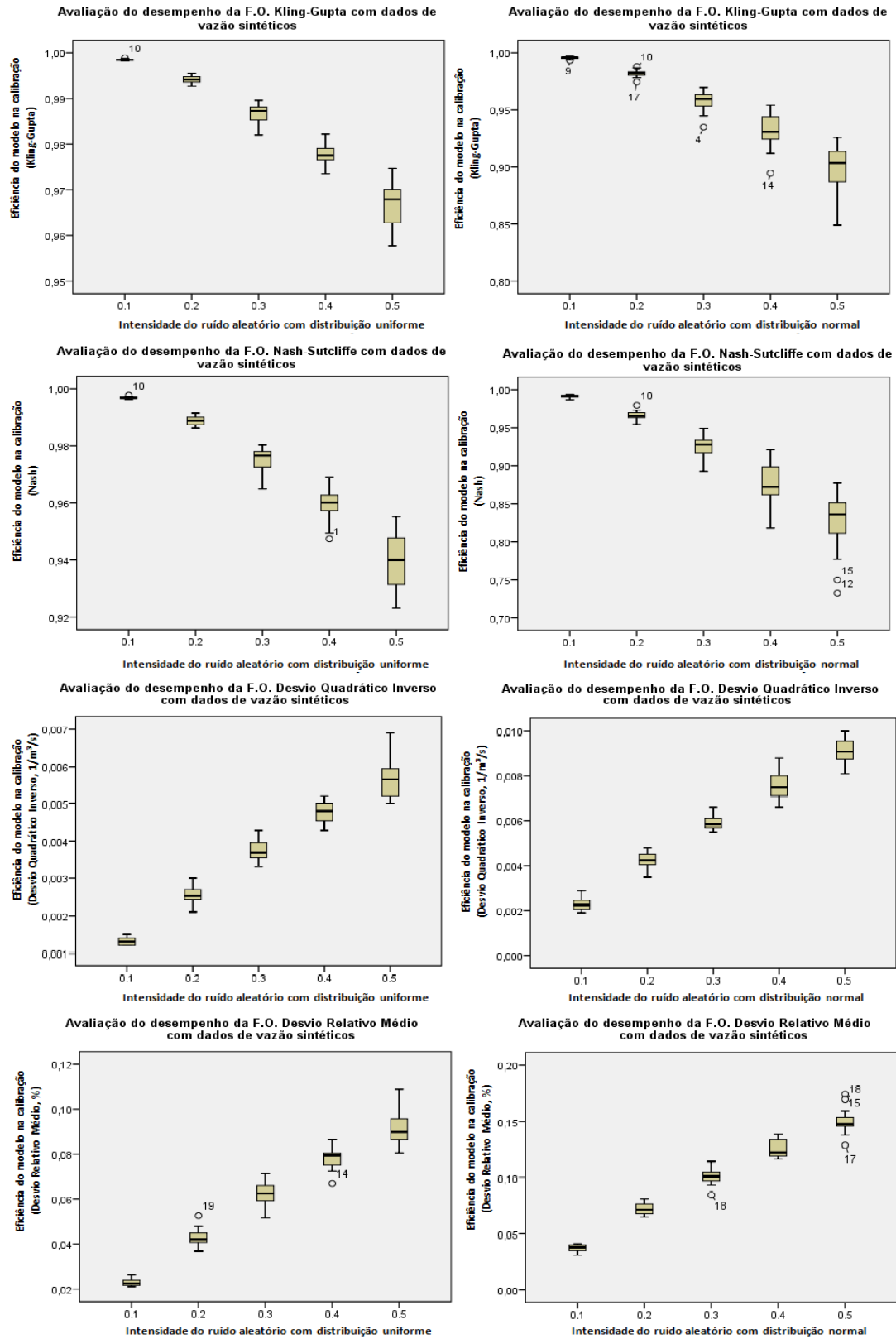


Figura 6.8 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, para diferentes funções-objetivo, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal nos dados de precipitação para a bacia sintética devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Precipitação



6.1.2.2. Impacto sobre o valor dos parâmetros

Durante a análise de sensibilidade dinâmica o modelo é novamente calibrado utilizando os dados de entrada perturbados e, em consequência, novos valores dos parâmetros são obtidos. Nesse item são apresentados os resultados obtidos e discutido o impacto sobre o valor dos parâmetros de referência adotados quando a geração da série sintética.

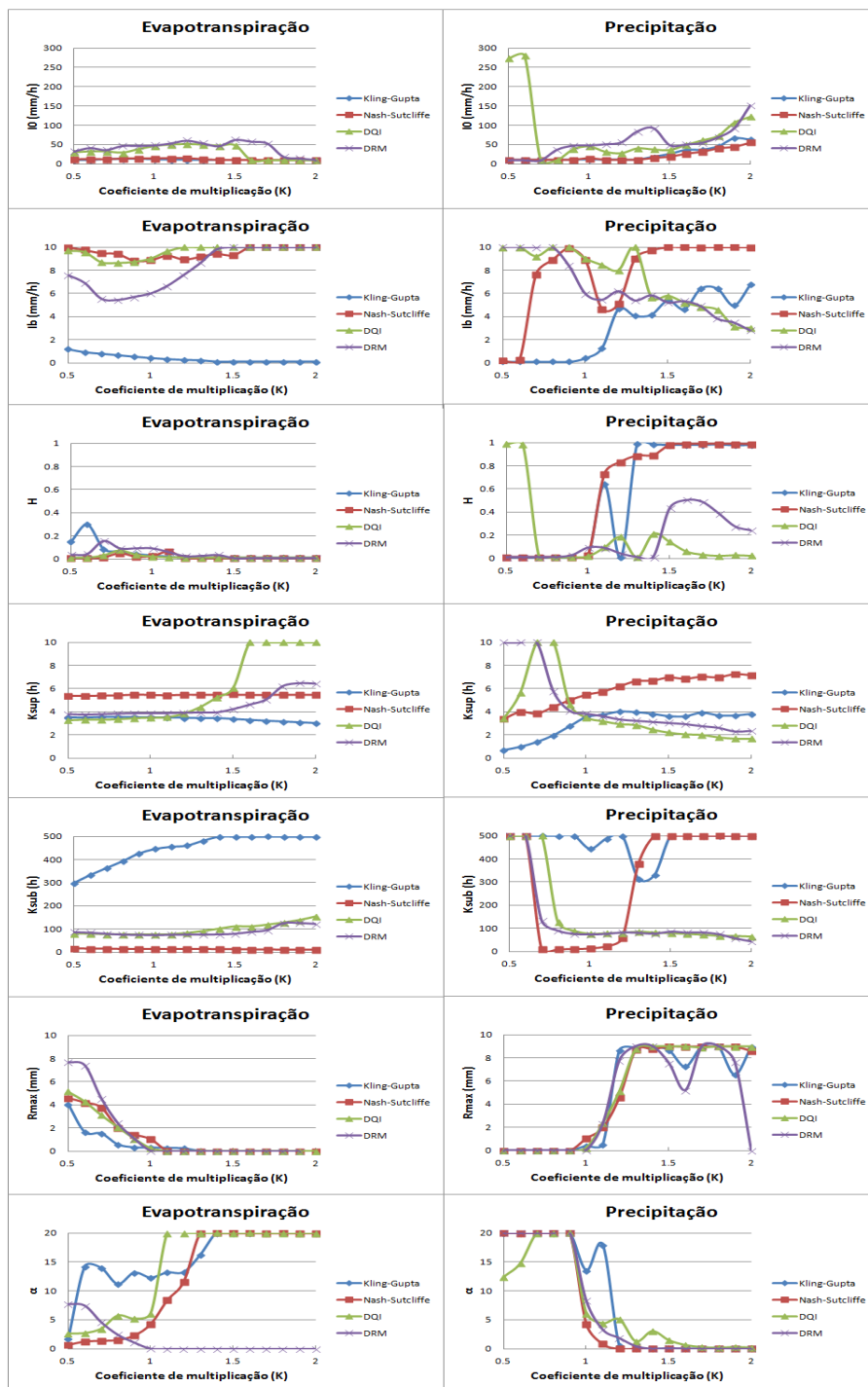
Conforme apresentado anteriormente, o aumento do parâmetro I_0 acarreta na diminuição do escoamento superficial na bacia em grande parte do período simulado, a exceção de valores extremos de cheia que ainda são representados corretamente. Em contra ponto a isso, sua diminuição proporciona a elevação do escoamento superficial. A alteração do parâmetro I_b está relacionada a alterações tanto do escoamento superficial quanto subterrâneo. O aumento do I_b proporciona a elevação do escoamento de base para todo o hidrograma bem como a diminuição do escoamento superficial. Enquanto que sua diminuição tende a diminuir o escoamento de base além de elevar o escoamento superficial. O parâmetro H apresenta efeitos tanto sobre o escoamento superficial, quanto subterrâneo. Seu aumento eleva o escoamento de base e reduz o escoamento superficial, enquanto sua diminuição decresce o escoamento de base e eleva o escoamento superficial. O parâmetro K_{sup} interfere no volume escoado, de forma que seu aumento proporciona a diminuição do escoamento superficial, enquanto sua diminuição eleva o escoamento superficial. O parâmetro K_{sub} está ligado ao volume subterrâneo escoado, sendo que sua elevação aumenta o escoamento de base, e sua diminuição atinge as vazões mínimas no sentido de reduzi-las. A alteração do parâmetro R_{max} está ligada ao escoamento superficial, na medida em que sua diminuição permite a elevação do escoamento superficial, e seu aumento provoca a diminuição do escoamento superficial. Por fim, o parâmetro α tende a provocar pequena elevação do escoamento superficial quando é elevado, e sua diminuição atua no sentido de diminuir o escoamento superficial, no entanto seu impacto sobre os resultados de todas as F. O. pode ser considerado relativamente baixo se comparado aos parâmetros restantes.

As considerações feitas acima são percebidas quando os parâmetros são modificados tempo a tempo, ou seja, um parâmetro é alterado enquanto os demais permanecem constantes. Nesse sentido, é válido ressaltar que para a situação onde os

parâmetros são modificados de forma simultânea, o resultado pode ser diferente em diferentes bacias.

Nesse sentido, a Figura 6.9 ilustra a alteração dos valores dos parâmetros obtidos por calibração na medida em que são embutidos erros sistemáticos nos dados de entrada.

Figura 6.9 - Impacto do incremento de erros sistemáticos na evapotranspiração e na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através das funções-objetivo avaliadas devido a análise de sensibilidade dinâmica.



Observando o efeito de erros sistemáticos nos dados de evapotranspiração e precipitação sobre os parâmetros do modelo IPH II apresentado na Figura 6.9, percebe-se que, mesmo utilizando funções-objetivo diferentes, o comportamento dos parâmetros apresenta-se semelhante na maioria dos casos. Quando o aporte de água ao sistema é reduzido, representado por erros sistemáticos superiores a um na evapotranspiração e inferiores a um na precipitação tem-se as seguintes situações: o parâmetro I_0 tende a ser reduzido, diminuindo assim a infiltração; o parâmetro I_b tende a ser elevado para a maioria das funções, a exceção da função-objetivo de Kling-Gupta, a qual apresenta-se no sentido de redução do parâmetro a medida que a situação descrita ocorre; o parâmetro H tende a ser diminuído até o limite mínimo de forma a contornar os erros; o parâmetro K_{sup} apresenta-se sendo elevado nas funções-objetivo do DQI e DRM que tendem a se ajustar melhor as vazões mínimas, e é diminuído nas funções-objetivo de Nash-Sutcliffe e Kling-Gupta que representam bem as vazões máximas; o K_{sub} é elevado quando os erros passam a ser bastante elevados, indicando que o modelo passa alterar os parâmetros de forma mais intensa para tentar contornar os erros embutidos; o R_{max} é diminuído até o limite inferior de forma a reduzir a interceptação da água. Quando o aporte de água ao sistema é aumentado, representado por erros sistemáticos inferiores a um na evapotranspiração e superiores a um na precipitação tem-se o inverso da situação descrita para os parâmetros anteriormente para grande parte das funções-objetivo.

Considerando os aspectos mencionados no início desse tópico, e avaliando a alteração dos valores dos parâmetros obtidos por calibração na medida em que são embutidos erros aleatórios nos dados de entrada, conforme apresentados da Figura 6.10 à Figura 6.25, observam-se os seguintes pontos:

Kling-Gupta [$I_0=10,85$; $I_b=3,55$; $H=0,025$; $K_{sup}=3,05$; $K_{sub}=448,16$; $R_{max}=0,23$; $\alpha=13,24$]: Quando esta medida de desempenho é utilizada como função-objetivo, o modelo IPH II consegue contornar os erros nos dados de evapotranspiração sejam eles com distribuição uniforme ou normal, com a alteração dos valores de quase todos os parâmetros. Os parâmetros I_0 , I_b e K_{sup} são os que apresentam menores alterações, enquanto que os parâmetros H , K_{sub} , R_{max} e α as maiores alterações. Observa-se ainda um padrão de aumento da amplitude entre as estatísticas para quase todos os parâmetros com o aumento da intensidade do erro, a exceção do parâmetro K_{sup} que permanece com seus valores concentrados em torno da mediana. Já ao considerar os

erros nos dados de precipitação percebe-se uma alteração mais acentuada em todos os parâmetros quando comparada aos erros nos dados de evapotranspiração. Os parâmetros I_0 , I_b e K_{sup} continuam apresentando menores alterações, enquanto que H , K_{sub} , R_{max} e α as maiores alterações. Dessa forma percebe-se a maior heterogeneidade dos valores dos parâmetros quando comparados a situação onde os erros foram embutidos na evapotranspiração.

Nash-Sutcliffe [$I_0=19,86$; $I_b=8,21$; $H=0,021$; $K_{sup}=5,39$; $K_{sub}=14,96$; $R_{max}=1,08$; $\alpha=16,34$]: Quando esta medida de desempenho é utilizada como função-objetivo, o modelo IPH II consegue contornar os erros nos dados de evapotranspiração sejam eles com distribuição uniforme ou normal, com a alteração dos valores de quase todos os parâmetros. Os parâmetros I_0 , I_b e K_{sup} e K_{sub} são os que apresentam menores alterações, enquanto que os parâmetros H , R_{max} e α as maiores alterações. Nessa função-objetivo o parâmetro K_{sup} também permanece com seus valores concentrados em torno da mediana. Considerando os erros nos dados de precipitação, percebe-se uma alteração mais importante em todos os parâmetros quando comparada aos erros nos dados de evapotranspiração. Os parâmetros I_b , H e K_{sup} apresentam menores alterações, enquanto que I_0 , K_{sub} , R_{max} e α as maiores alterações. Dessa forma percebe-se a maior heterogeneidade dos valores dos parâmetros quando comparados à situação onde os erros foram embutidos na evapotranspiração.

Desvio Quadrático Inverso [$I_0=38,31$; $I_b=9,38$; $H=0,054$; $K_{sup}=3,16$; $K_{sub}=71,2$; $R_{max}=0,45$; $\alpha=17,27$]: Quando esta medida de desempenho é utilizada como função-objetivo, o modelo IPH II consegue contornar os erros nos dados de evapotranspiração, sejam eles com distribuição uniforme ou normal, com a alteração dos valores de todos os parâmetros. Os parâmetros I_0 , I_b e K_{sup} são os que apresentam menores alterações, enquanto que os parâmetros H , R_{max} , K_{sub} e α as maiores alterações. Nessa função-objetivo o parâmetro K_{sup} passa a ter uma maior heterogeneidade à medida que os erros são mais intensos, sendo uma diferença em relação às funções que se ajustam melhor aos períodos de cheia. Ao considerar os erros nos dados de precipitação, tem-se que os parâmetros K_{sup} , e K_{sub} apresentam menores alterações com I_b se concentrando em torno da mediana a medida em que os erros são mais intensos, enquanto que I_0 , H , R_{max} e α as maiores alterações. Dessa forma, percebe-se a maior

heterogeneidade dos valores dos parâmetros quando comparados á situação onde os erros foram embutidos na evapotranspiração.

Desvio Relativo Médio [$I_0=47,84$; $I_b=6,19$; $H=0,096$; $K_{sup}=3,15$; $K_{sub}=73,08$; $R_{max}=0,35$; $\alpha=10,82$]: Também para essa medida de desempenho, o modelo IPH II consegue contornar os erros nos dados de evapotranspiração sejam eles com distribuição uniforme ou normal, com a alteração dos valores de quase todos os parâmetros. Os parâmetros I_0 , K_{sup} e K_{sub} são os que apresentam menores alterações, sendo que K_{sup} volta a estar concentrado em torno da mediana para todas as intensidades de erro adotadas, enquanto que os parâmetros I_b , H , R_{max} e α as maiores alterações. Ao considerar os erros nos dados de precipitação, tem-se que os parâmetros I_b , K_{sup} , e K_{sub} apresentam menores alterações, enquanto que I_0 , H , R_{max} e α as maiores alterações.

Figura 6.10 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Kling-Gupta para a bacia sintética devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Evapotranspiração

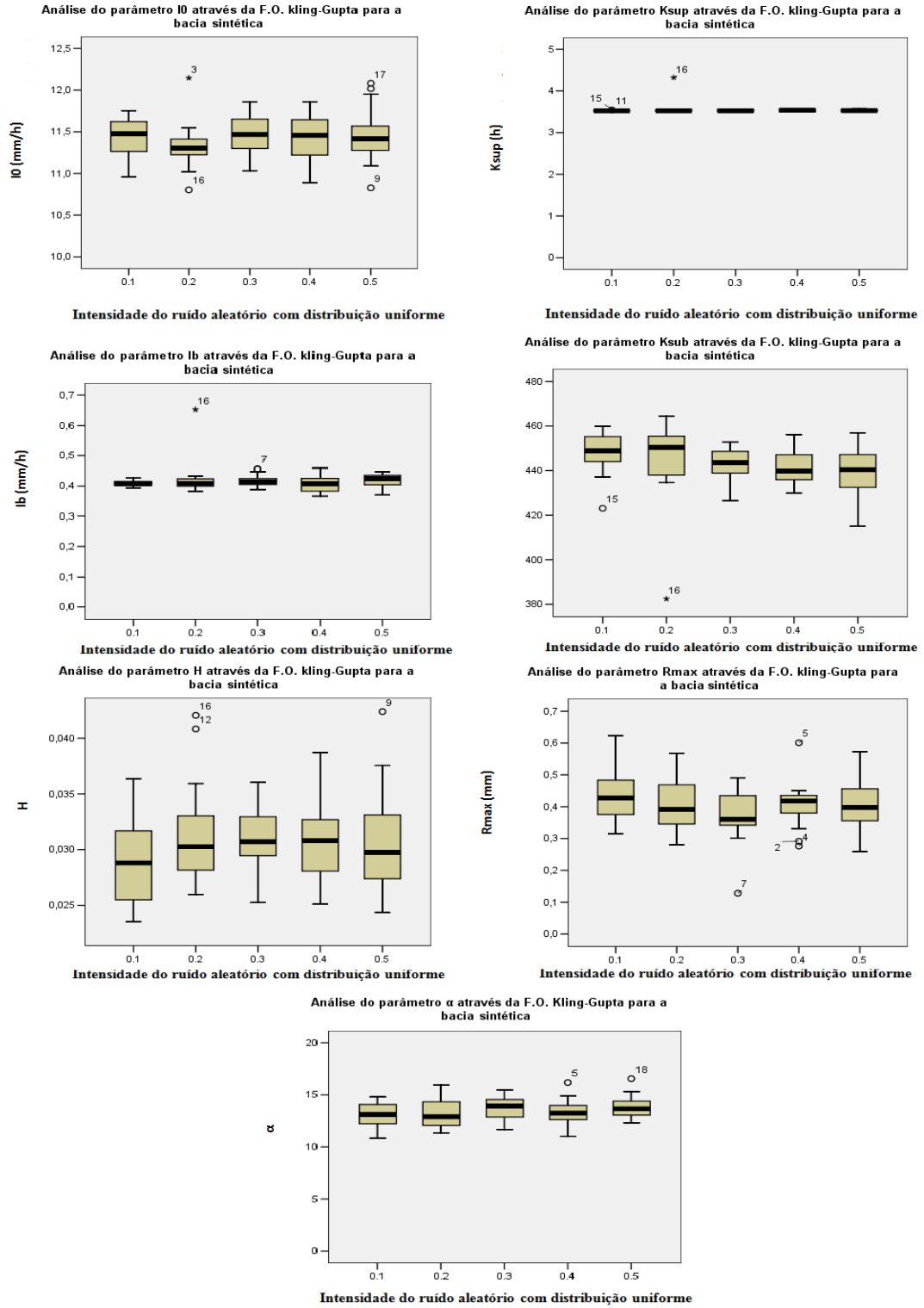


Figura 6.11 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Kling-Gupta para a bacia sintética devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Evapotranspiração

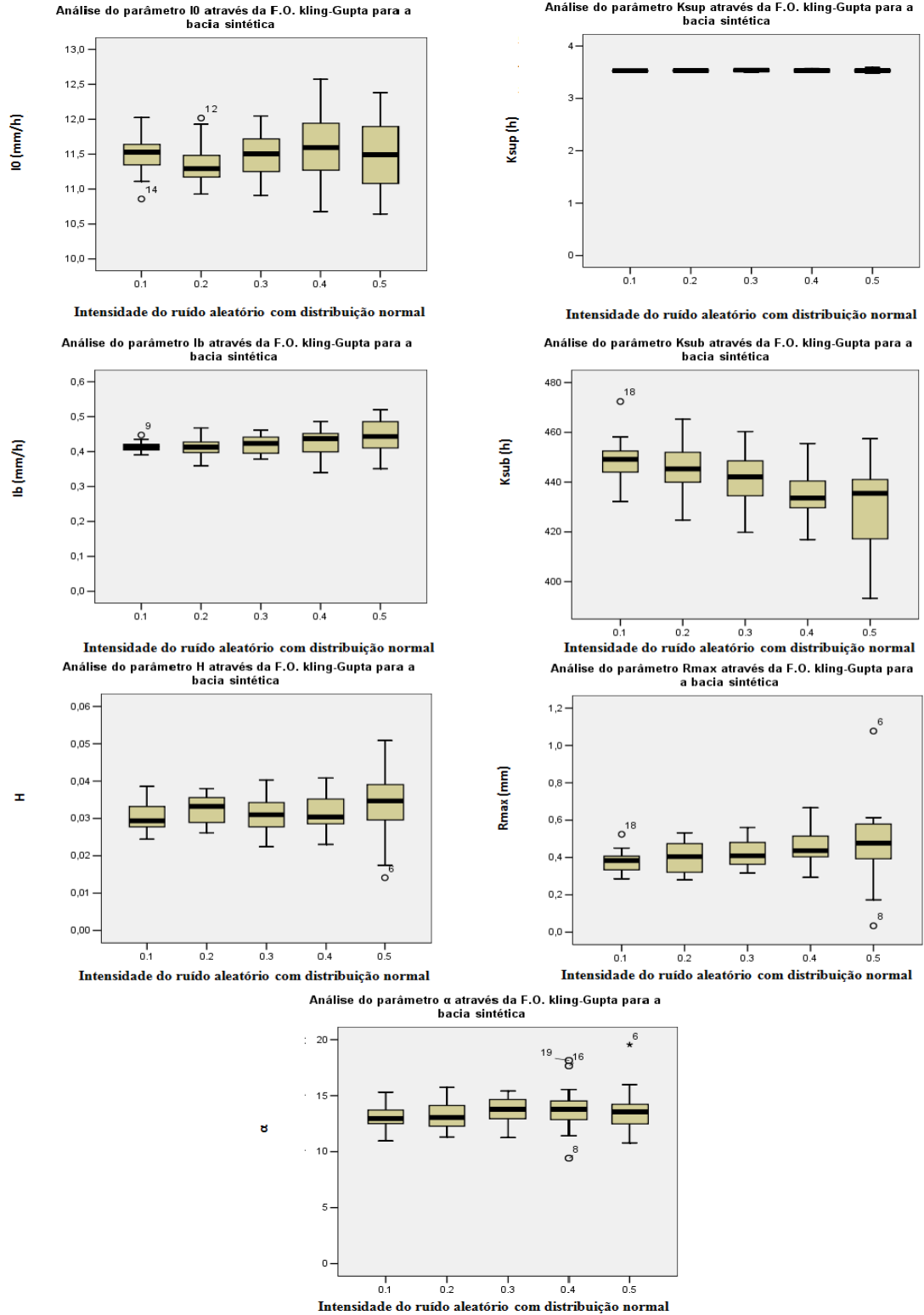


Figura 6.12 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Kling-Gupta para a bacia sintética devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Precipitação

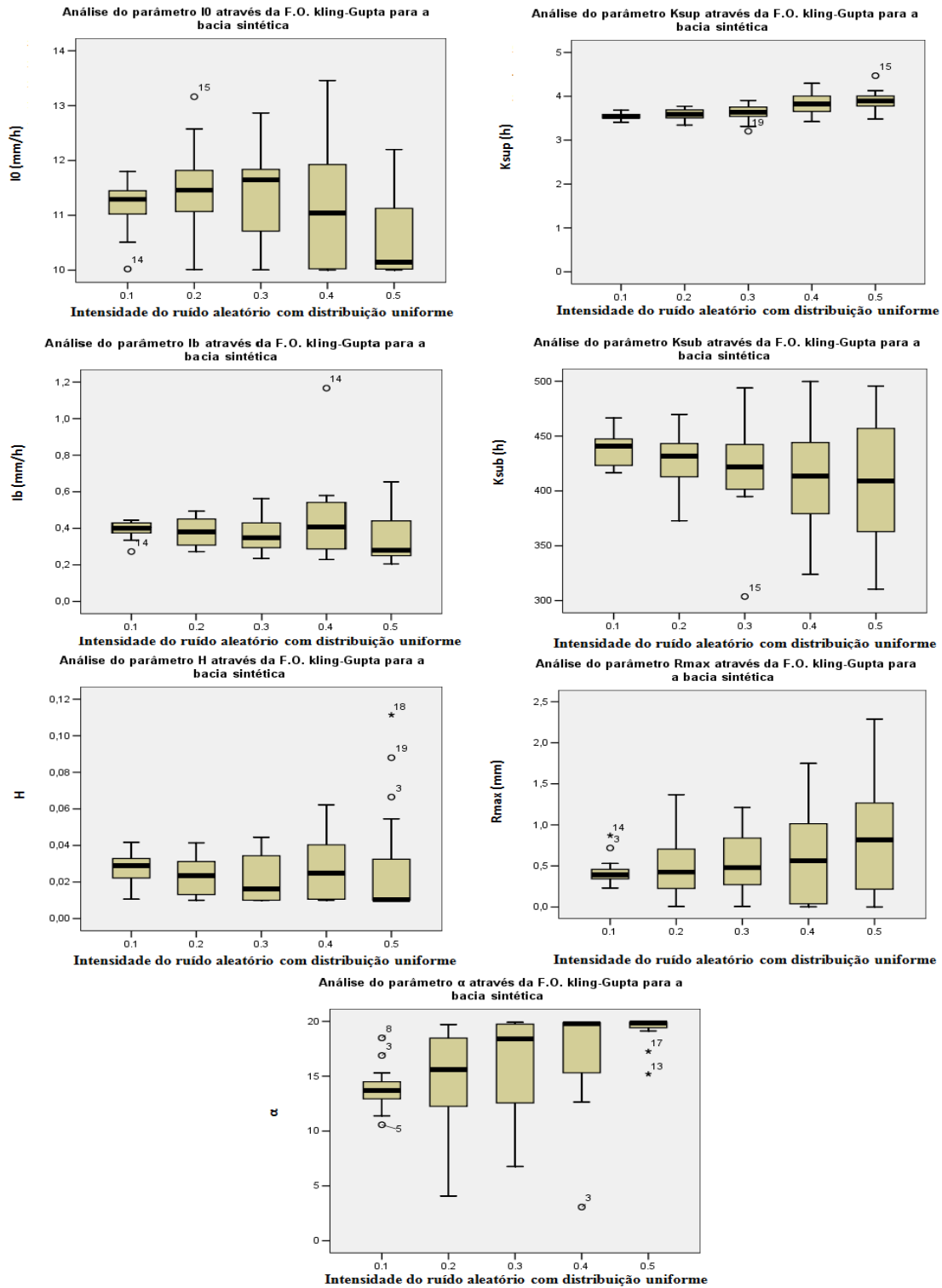


Figura 6.13 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Kling-Gupta para a bacia sintética devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Precipitação

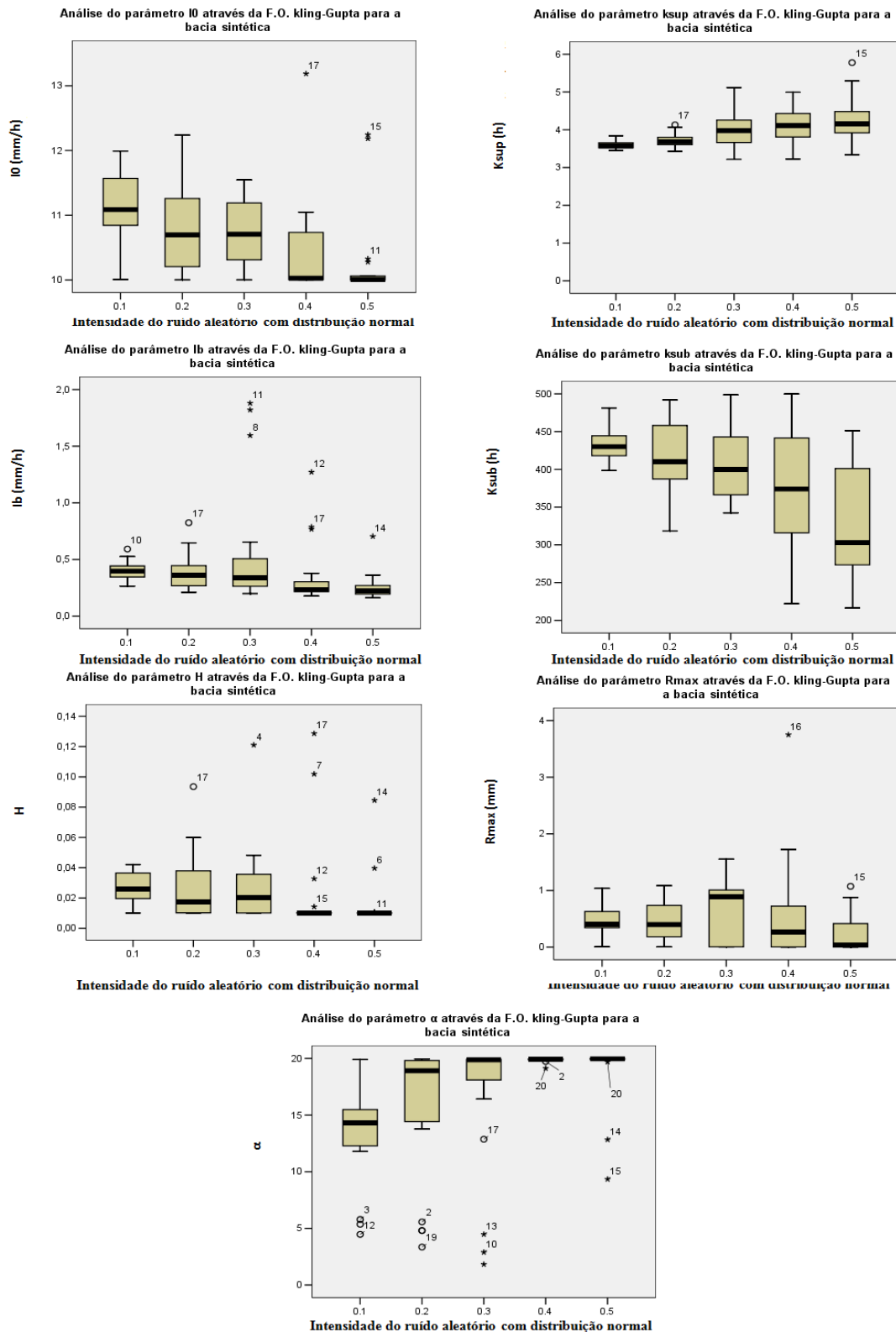


Figura 6.14 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Nash-Sutcliffe para a bacia sintética devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Evapotranspiração

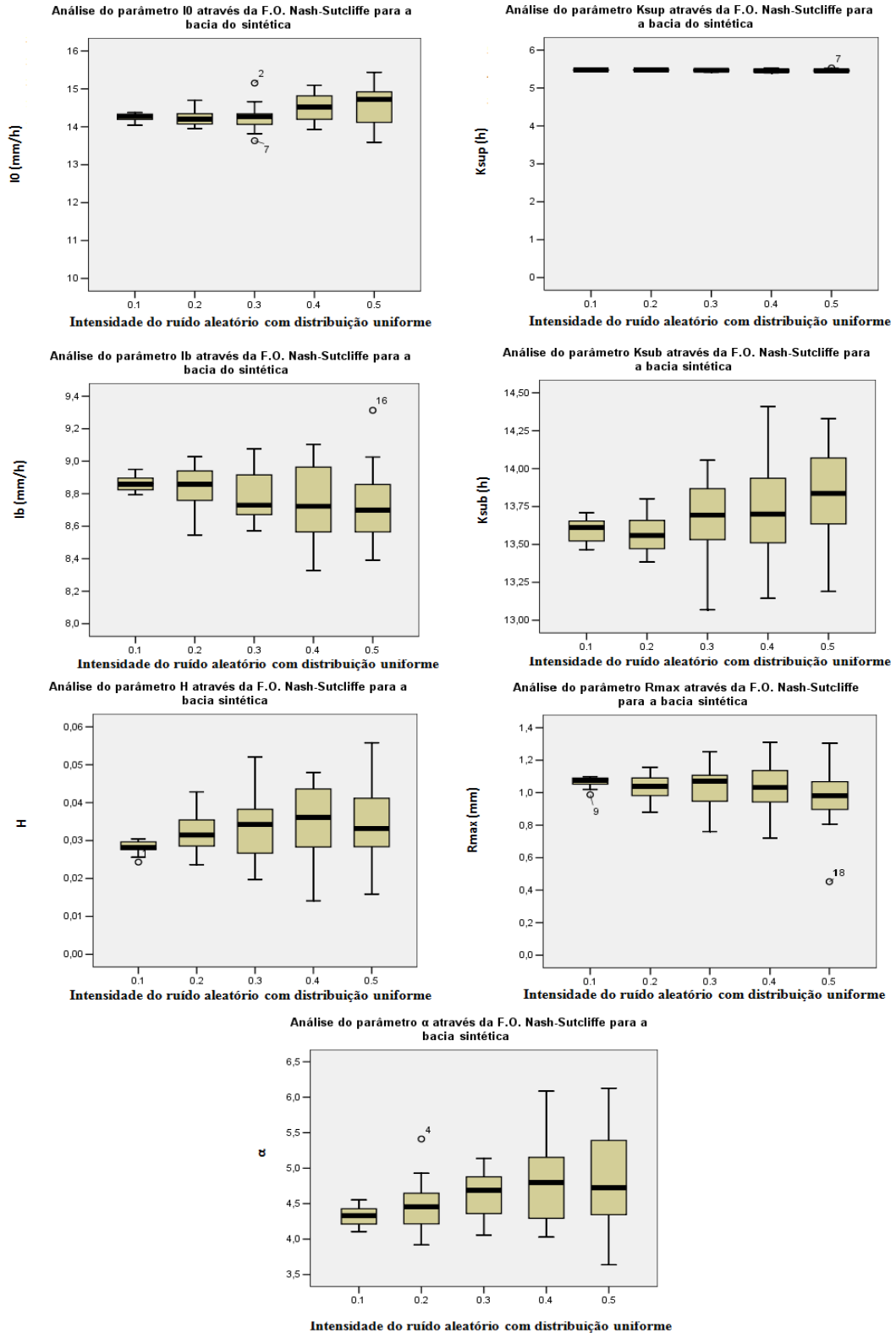


Figura 6.15 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Nash-Sutcliffe para a bacia sintética devido a análise de sensibilidade dinâmica.

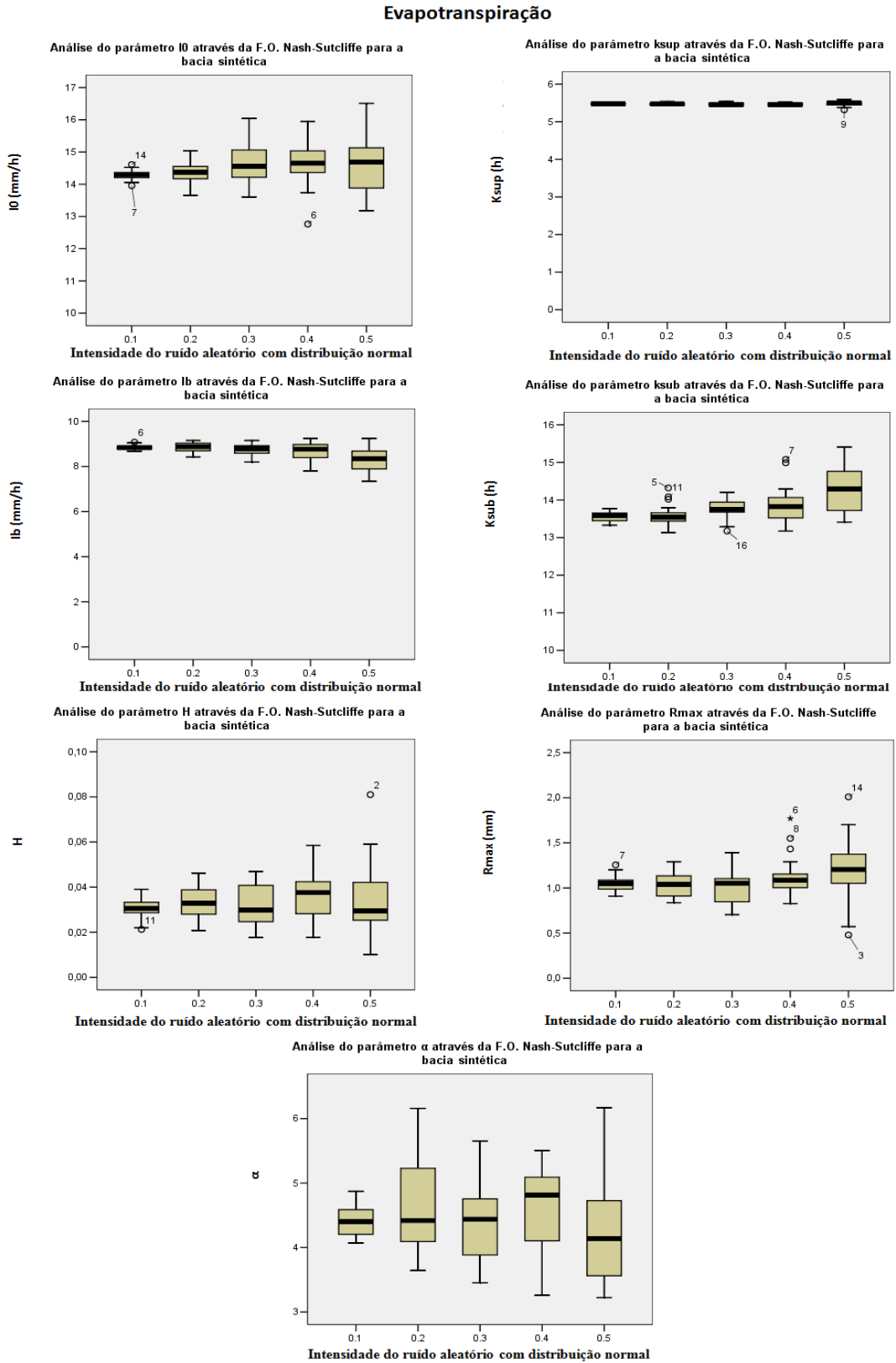


Figura 6.16 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Nash-Sutcliffe para a bacia sintética devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Precipitação

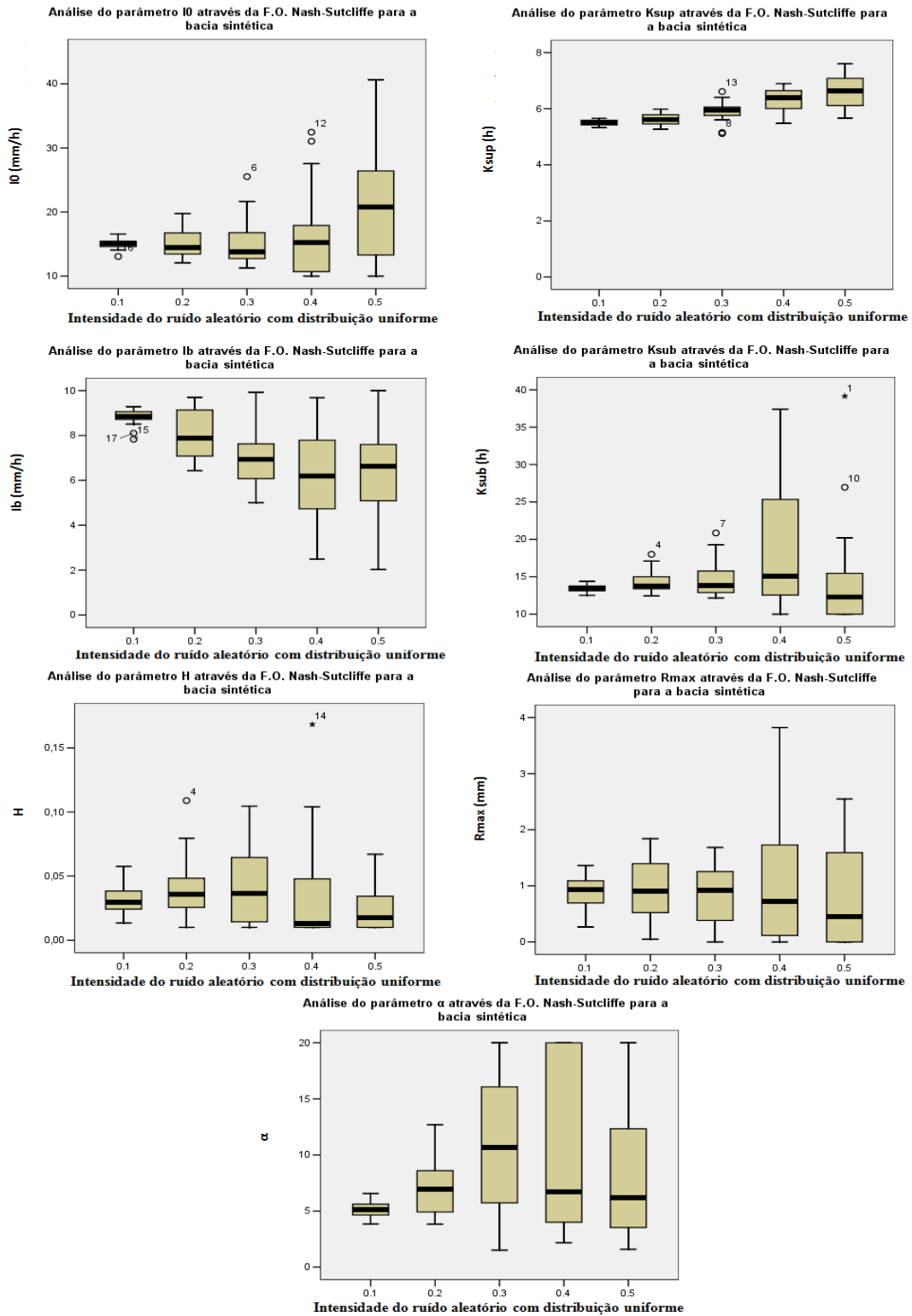


Figura 6.17 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Nash-Sutcliffe para a bacia sintética devido a análise de sensibilidade dinâmica.

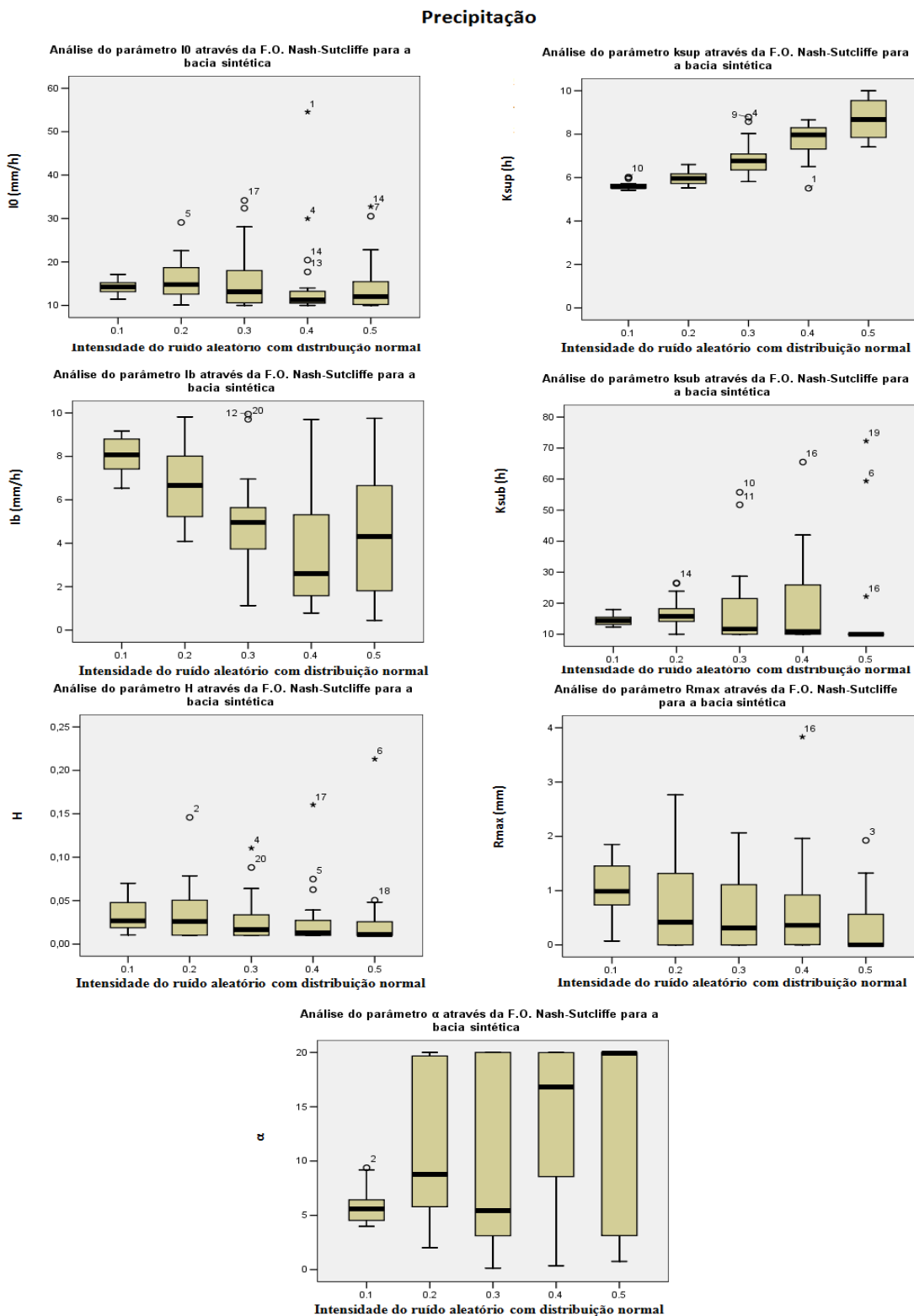


Figura 6.18 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Quadrático Inverso para a bacia sintética devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Evapotranspiração

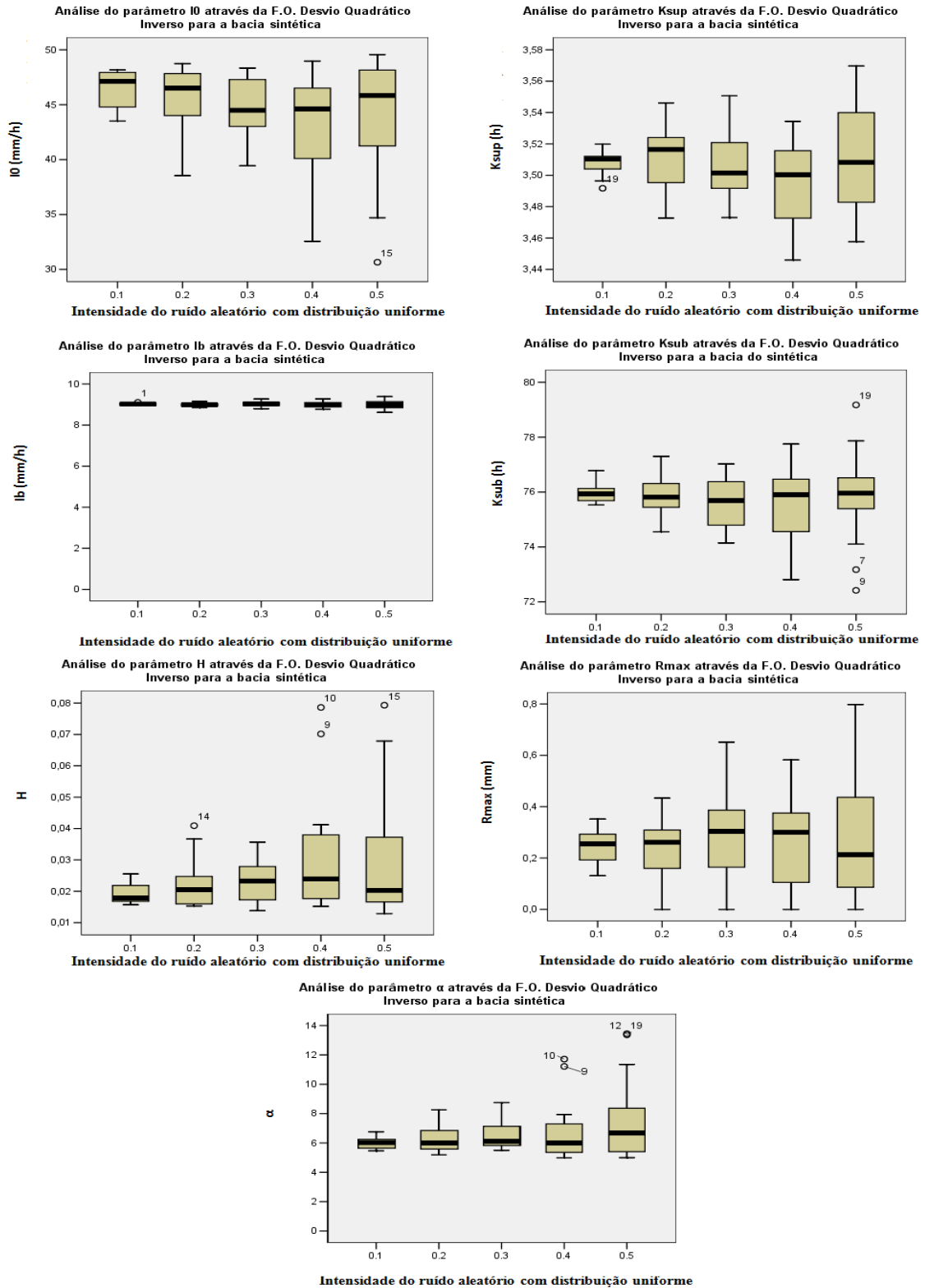


Figura 6.20 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Quadrático Inverso para a bacia sintética devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Precipitação

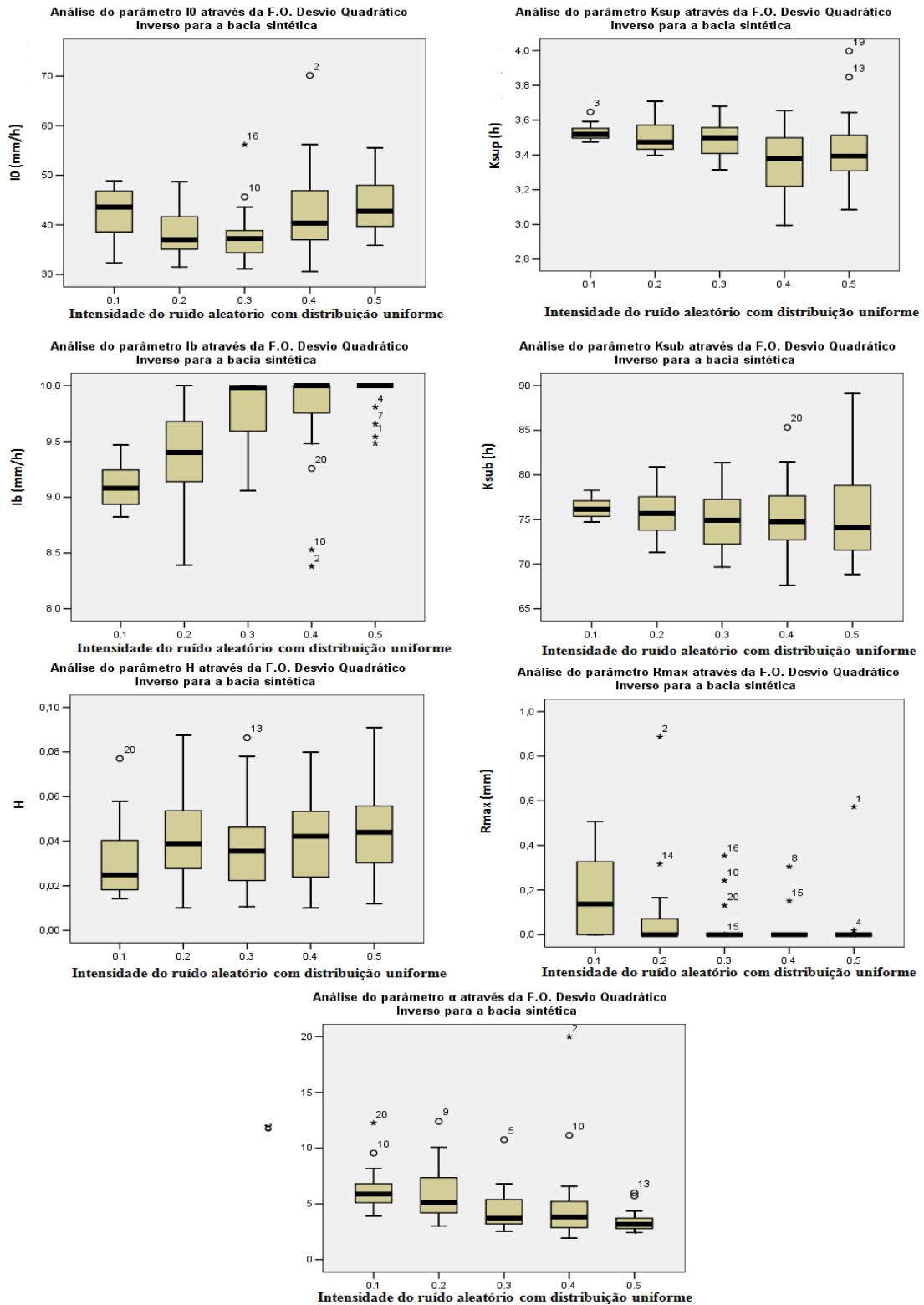


Figura 6.21 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Quadrático Inverso para a bacia sintética devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Precipitação

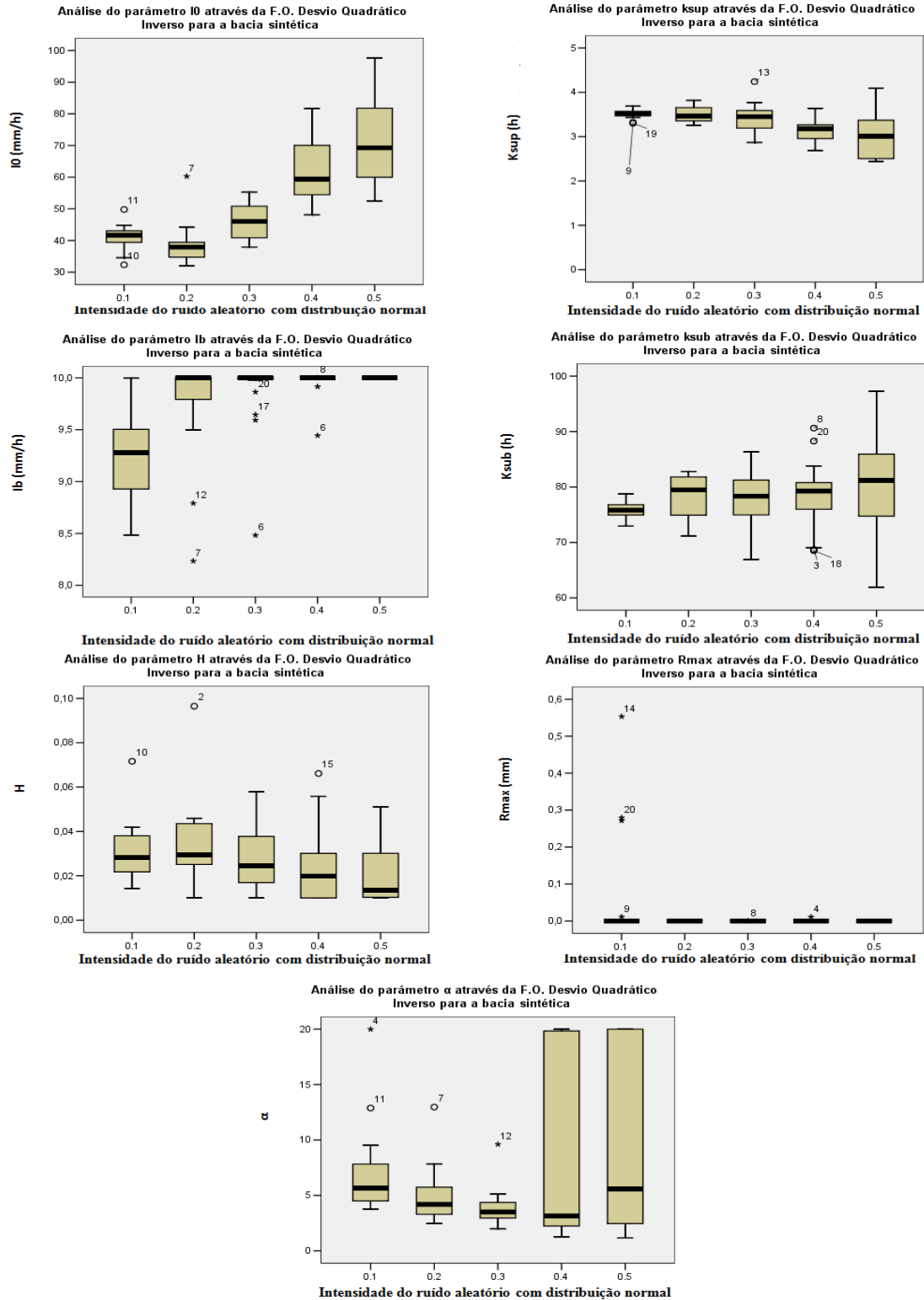


Figura 6.22 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Relativo Médio para a bacia sintética devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Evapotranspiração

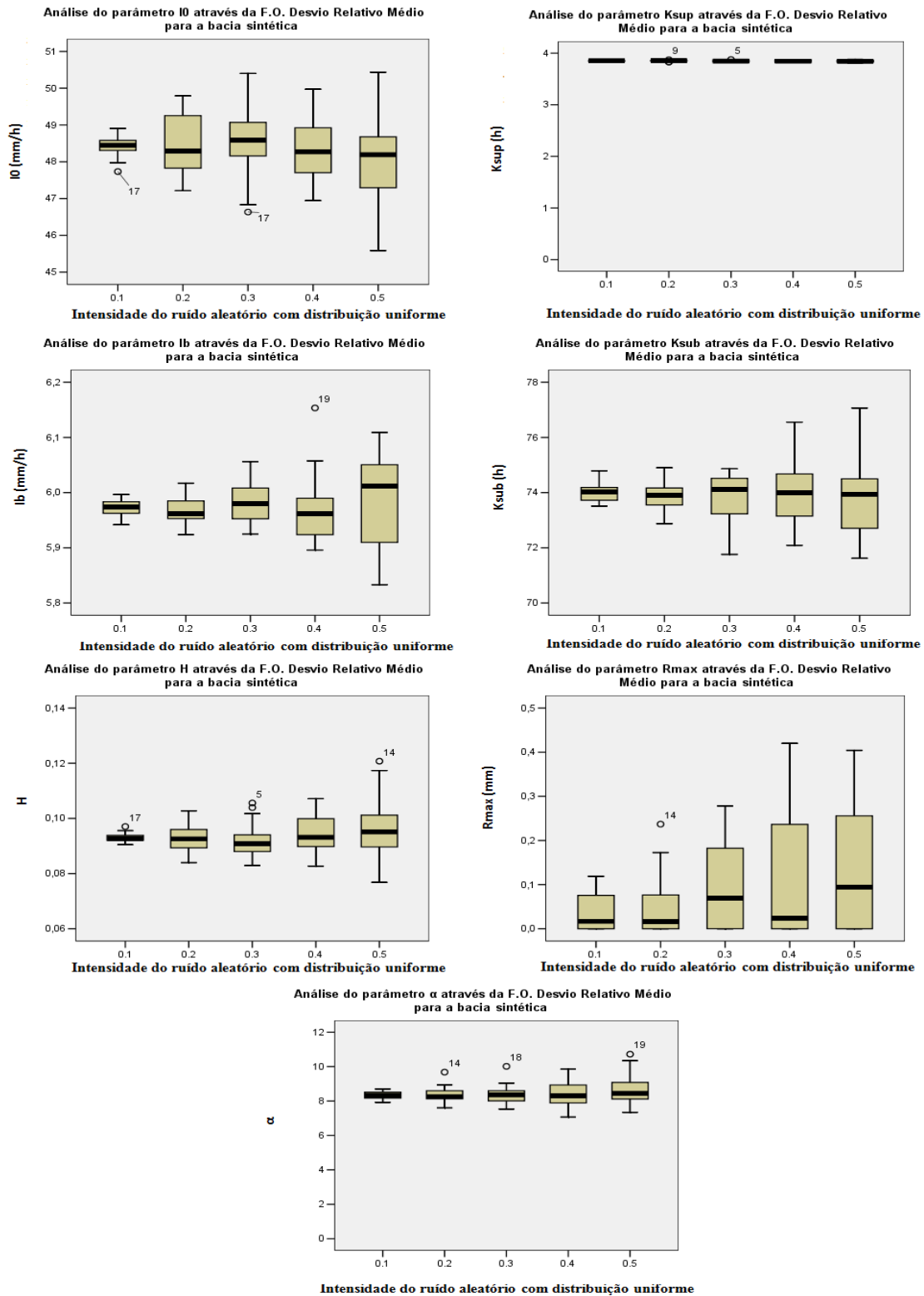


Figura 6.23 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Relativo Médio para a bacia sintética devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Evapotranspiração

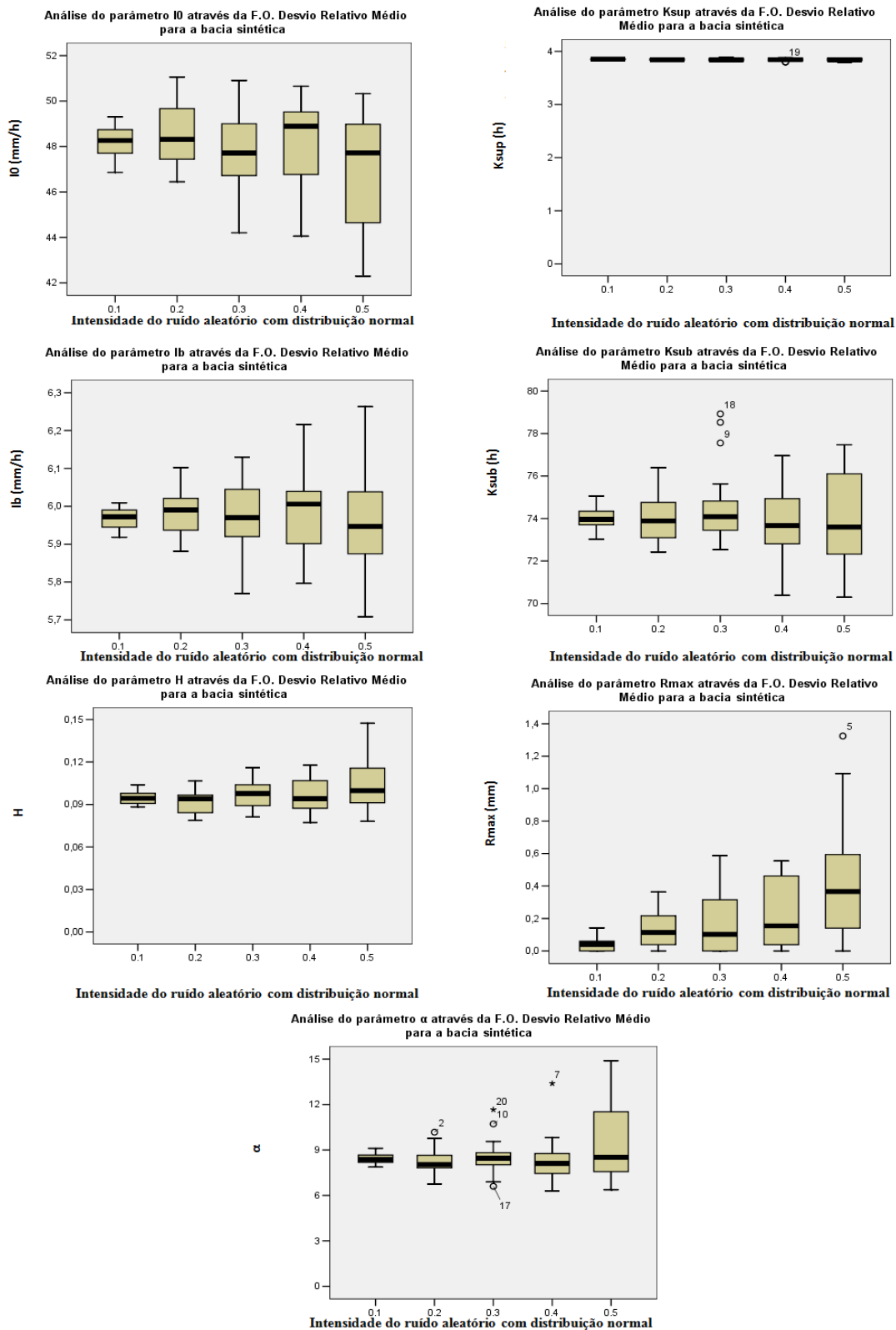


Figura 6.24 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Relativo Médio para a bacia sintética devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Precipitação

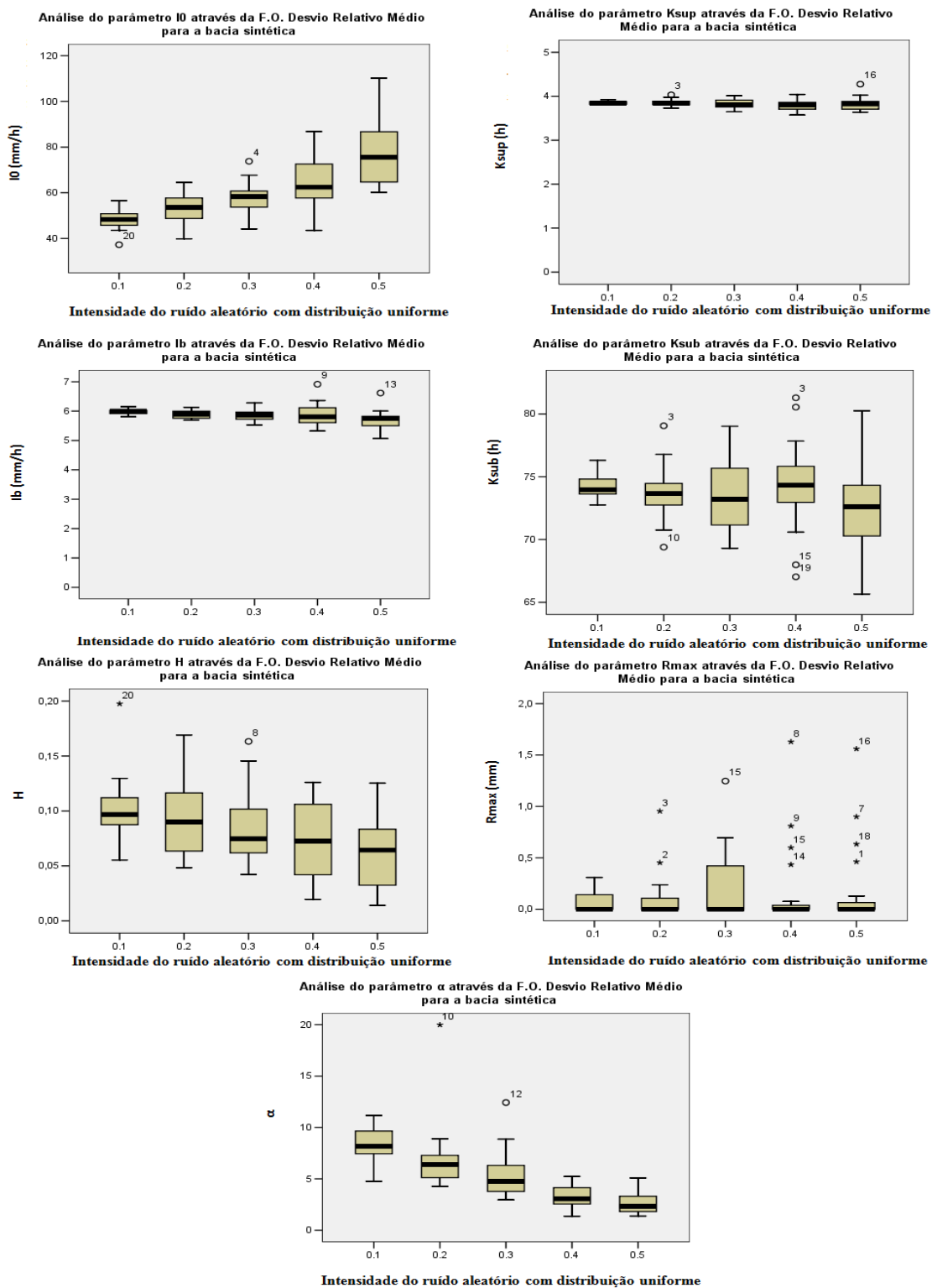
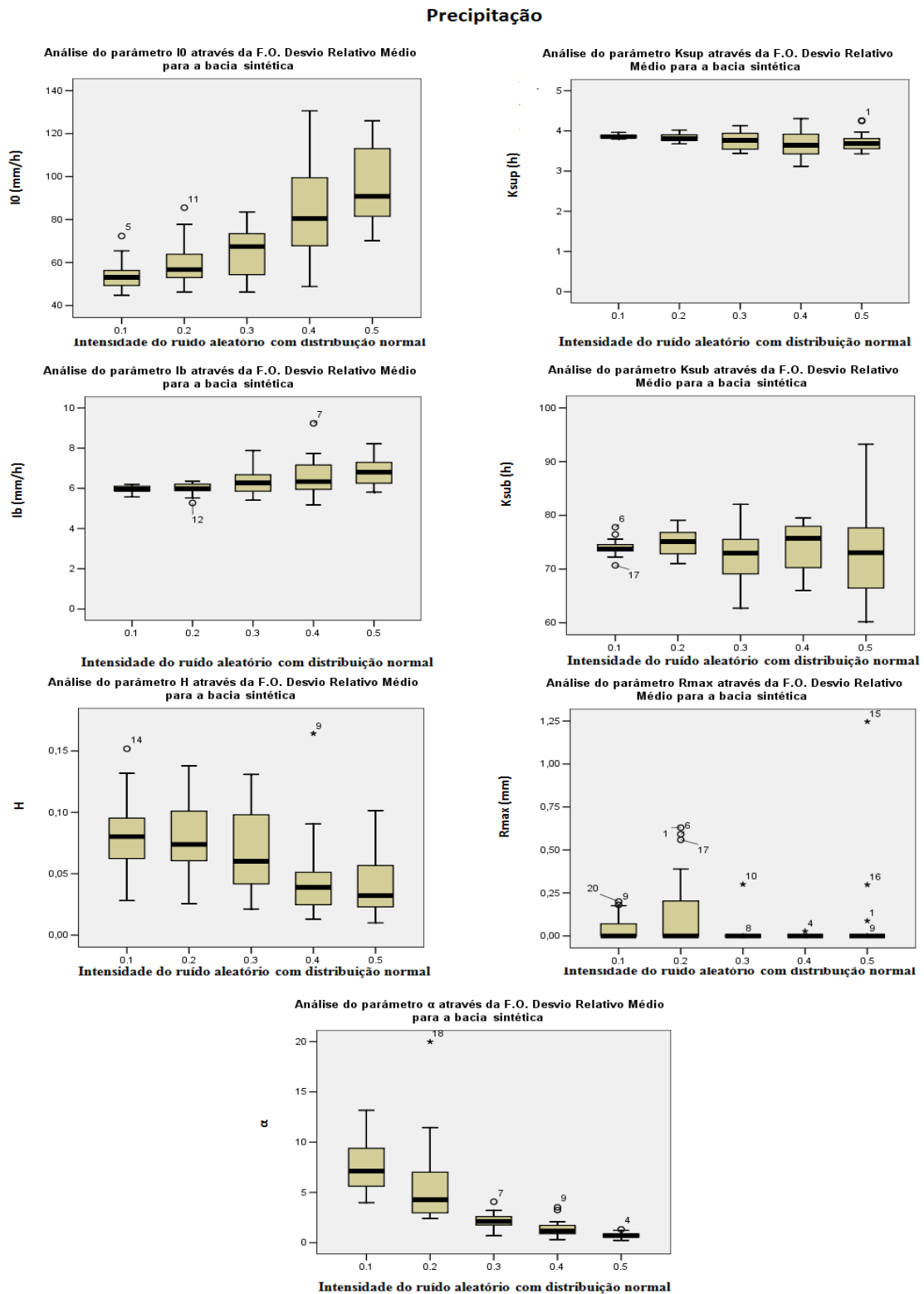


Figura 6.25 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Relativo Médio para a bacia sintética devido a análise de sensibilidade dinâmica.



Percebe-se assim que o modelo IPH II consegue contornar os erros nos dados de evapotranspiração com pequenas alterações nos valores dos parâmetros, mantendo o desempenho em praticamente todas as funções-objetivos analisadas. Quando erros são introduzidos nos dados de precipitação, a alteração dos valores dos parâmetros é mais importante e, apesar disso, o modelo não consegue manter o desempenho, o qual diminui com o aumento da intensidade do erro. Essa diferença está associada ao fato da precipitação representar maior volume, quando comparada a evapotranspiração.

6.2. IMPACTO DOS ERROS NOS DADOS DE ENTRADA: SÉRIES REAIS DE VAZÕES

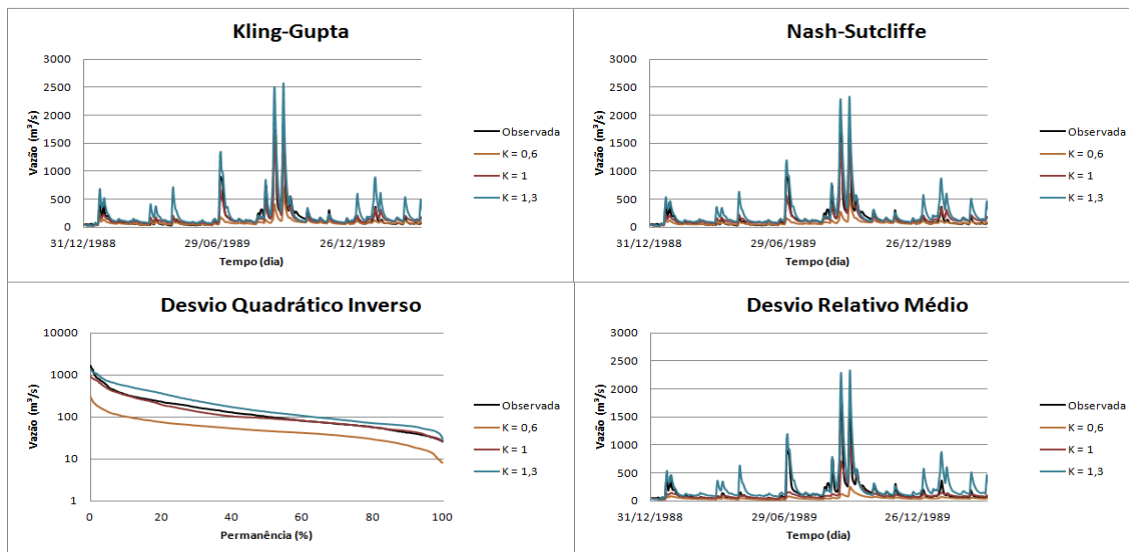
6.2.1. Análise de sensibilidade estática

A análise de sensibilidade estática considerando séries reais de vazões, foi contemplada para as diferentes funções-objetivo nas cinco bacias adotadas como estudo de caso. Foi avaliado o impacto sobre as funções-objetivo quando o modelo hidrológico utiliza dados de entrada sujeitos a erros sistemáticos e aleatórios.

O erro sistemático foi avaliado, tanto na evapotranspiração quanto na precipitação, para o coeficiente de multiplicação K variando entre 0,5 e 2. O valor de K igual a um representa o resultado obtido sem efeito de erro. Foram realizadas para cada bacia, 16 simulações para dados de evapotranspiração e 16 para dados de precipitação sobre o efeito desse tipo de erro. Ao contemplar essa análise para todas as funções-objetivo e bacias, tem-se um total de 640 simulações.

A análise de sensibilidade estática considerando erros sistemáticos demonstrou que subestimativas na evapotranspiração provocam a elevação da magnitude do hidrograma simulado, enquanto a superestimativa provoca a diminuição da magnitude do hidrograma simulado. Já ao se inserir tal erro na precipitação, percebe-se que quando o erro tende a subestimar a precipitação o hidrograma segue o mesmo comportamento e tende a ter seus valores reduzidos, enquanto que, ao se superestimar os dados de precipitação, o hidrograma apresenta uma elevação à medida que os erros são maiores (Figura 6.26).

Figura 6.26 - Acompanhamento da interferência de erros sistemáticos na precipitação sobre as vazões de saída (Bacia do rio Ijuí)



A avaliação da Figura 6.27, apresentada a seguir, descreve os resultados encontrados para as diferentes bacias bem como para as diferentes funções-objetivo, permitindo assim as seguintes considerações:

✓ Ao avaliar a eficiência do modelo IPH II através da função de Kling-Gupta quando sujeito a erros sistemáticos, verifica-se que quanto mais próximo de um, melhor foi à calibração. Sendo assim, observa-se que o desempenho do modelo ajustado às bacias localizadas no nordeste é bastante afetado com relação às demais quando o erro é inserido no sentido de subestimar a evapotranspiração. Quando a evapotranspiração é superestimada, a perda de desempenho do modelo IPH II apresenta-se mais gradual e com um comportamento parecido em todas as bacias. Já ao inserir o erro na precipitação, percebe-se que o desempenho do modelo ajustado em todas as bacias é drasticamente afetado em todas as bacias, tanto por subestimativas quanto por sobrestimativas desta. Vale ainda ressaltar que o desempenho do modelo ajustado na bacia do rio Canoas considerando uma pequena sobrestimativa da precipitação apresentou uma leve melhoria quando comparados ao desempenho obtido sem a perturbação indicando assim, que os dados de entrada de precipitação para essa bacia podem estar sujeitas a erros sistemáticos de subestimativa.

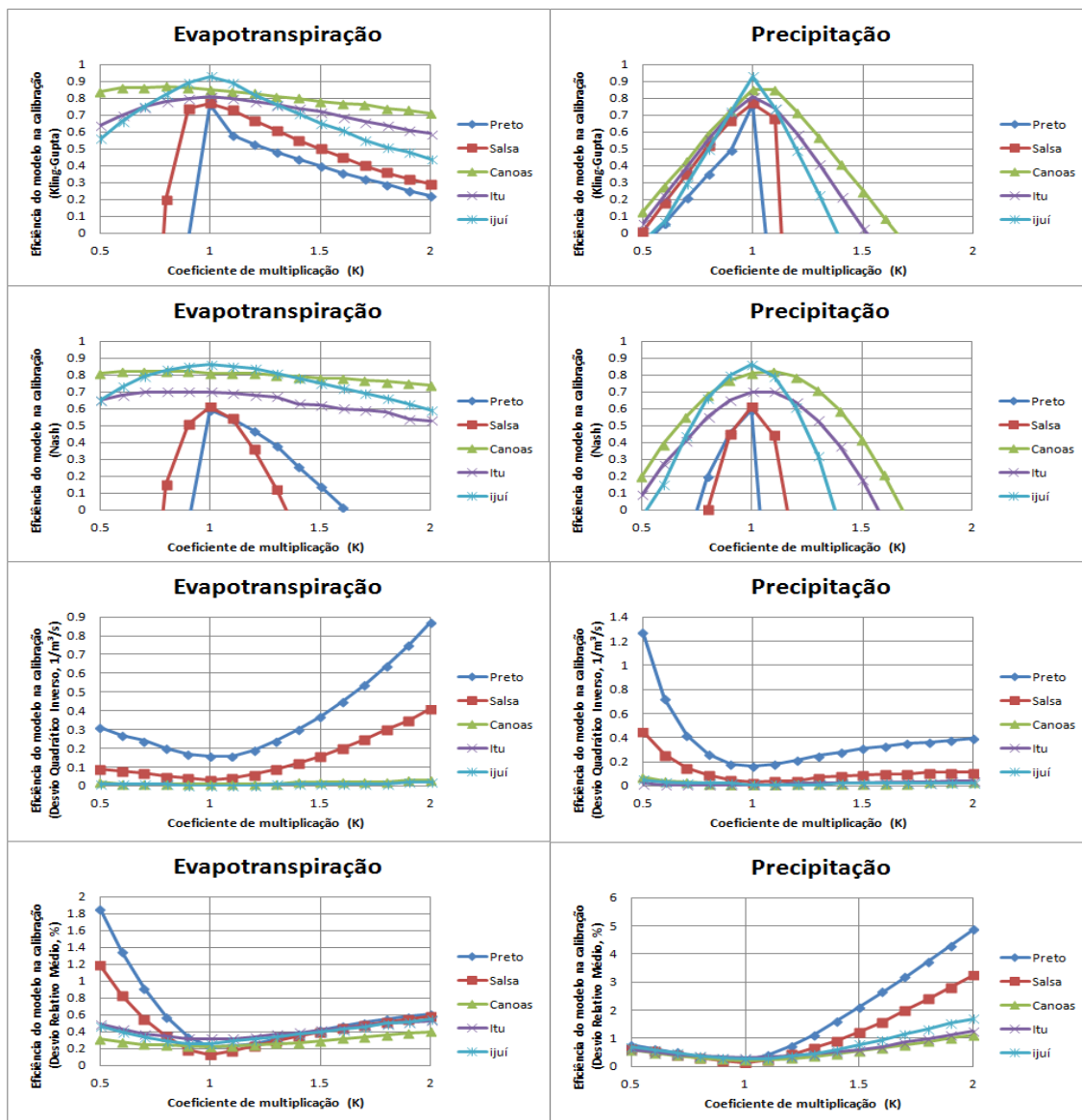
✓ Quando a função que descreve a eficiência do modelo passa a ser Nash-Sutcliffe, verifica-se que quanto mais próximo de um, mais eficiente foi à calibração. Percebe-se

assim, que as bacias inseridas no nordeste são bastante afetadas tanto para subestimativas quanto para sobrestimativas da evapotranspiração, quando comparadas as demais. Já os erros na precipitação provocam o mesmo comportamento para todas as bacias tanto em subestimativas quanto em sobrestimativas, afetando drasticamente a eficiência do modelo.

✓ Ao avaliar a eficiência do modelo através do Desvio Quadrático Inverso tem-se que, quanto mais próximo de zero, melhor foi à calibração. É possível visualizar, que as bacias nordestinas são consideravelmente afetadas tanto para sobrestimativas acentuadas da evapotranspiração, quanto para a subestimativa da precipitação. No entanto as demais bacias não apresentaram variação do desempenho considerável quando sujeitas a erros tanto na evapotranspiração quanto na precipitação.

✓ Ao avaliar a eficiência do modelo através do Desvio Relativo Médio tem-se que, quanto mais próximo de zero, melhor foi à calibração. É possível visualizar, certa inversão dos resultados obtidos com o uso dessa função-objetivo, quando comparada ao Desvio quadrático Inverso. As duas funções apresentam a tendência de se ajustar melhor as mínimas, mas reagiram de forma distinta aos erros. Na avaliação através do Desvio Relativo Médio percebe-se que a subestimativa da evapotranspiração tende a ter um maior efeito do que a sobestimativa desta sobre o resultado da função objetivo, bem como que, a sobrestimativa da precipitação tende a causar um maior efeito no resultado em relação à subestimativa desta.

Figura 6.27 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objetivo, sujeito a erro sistemático nos dados de evapotranspiração e precipitação devido a análise de sensibilidade estática.



O erro aleatório foi avaliado tanto na evapotranspiração quanto na precipitação para a intensidade do erro σ variando entre zero e 0,5. Onde, σ igual a zero descreve o resultado sem efeito de erro. Para os erros com σ variando entre 0,1 e 0,5, o presente estudo utilizou 10 séries de dados sobre o efeito de erros com distribuição uniforme e 10 com erros com distribuição normal para cada valor de σ , buscando assim ter uma gama representativa de valores que favorecessem a análise. Dessa forma, foram realizadas para

cada bacia 100 simulações para dados de evapotranspiração e 100 para dados de precipitação, sobre o efeito desse tipo de erro com diferentes intensidades, sendo metade com erros com distribuição uniforme e o restante com distribuição normal. Ao contemplar essa análise para todas as bacias e funções-objetivo, tem-se um total de 4000 simulações.

A Figura 6.28 ilustra a mediana dos resultados obtidos através da aplicação de erros aleatórios com distribuição uniforme e normal, com diferentes intensidades, sobre os dados de evapotranspiração. Observa-se nessa figura que os resultados são similares tanto no que diz respeito às funções-objetivo avaliadas, quanto para as bacias, mantendo praticamente inalterado o desempenho do modelo. Sendo assim, percebe-se que a perda de eficiência ocorreu da seguinte forma:

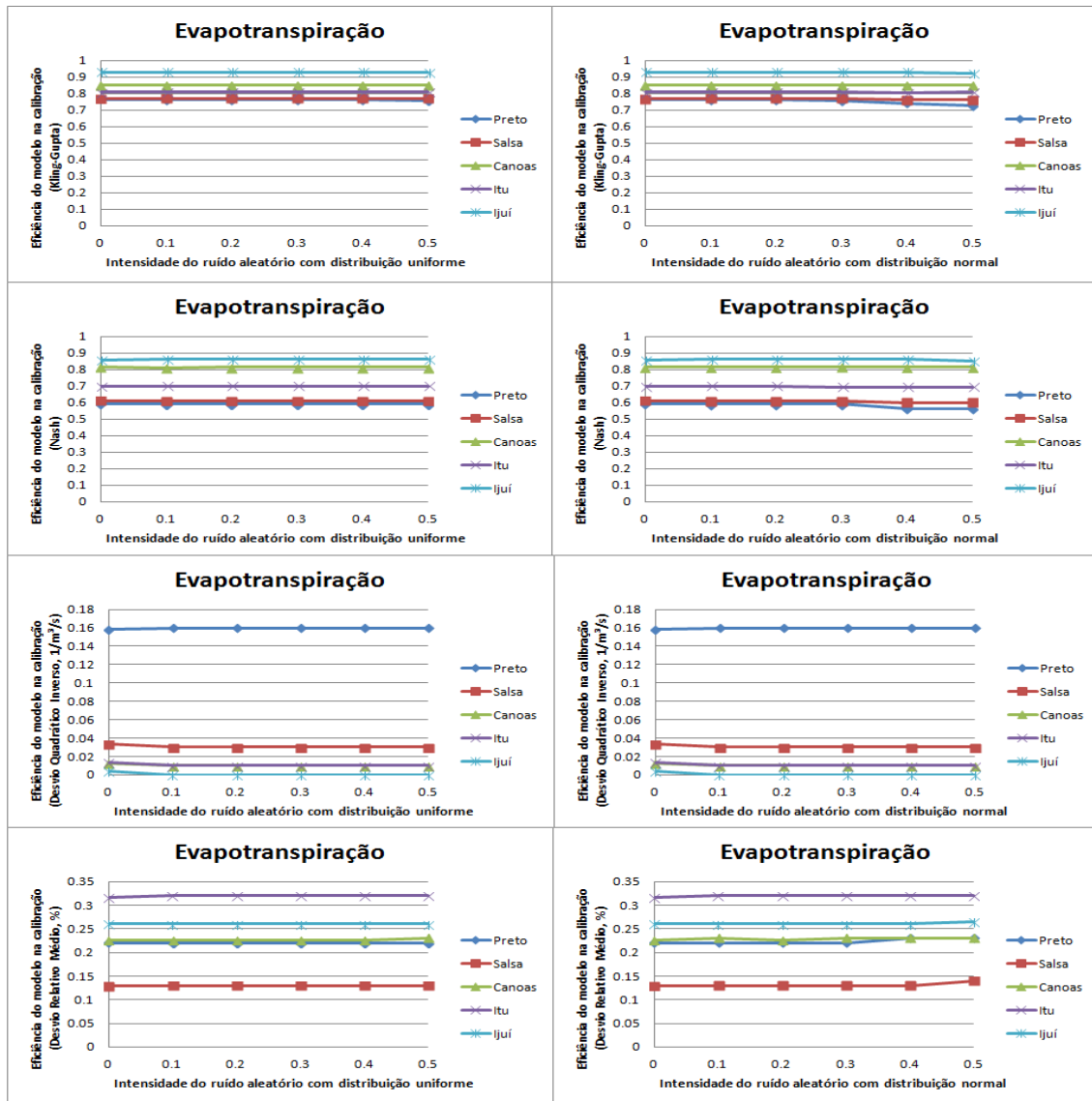
✓ Avaliando a eficiência do modelo através do coeficiente de Kling-Gupta, tem-se que ao inserir erros aleatórios com distribuição uniforme, o modelo ajustado às diferentes bacias teve seu desempenho afetado em menos de 1%, já com erros com distribuição normal praticamente todas as bacias refletiram a mesma situação anterior, a exceção da bacia do rio Preto que foi afetada em aproximadamente 4% para a maior intensidade de erro;

✓ Avaliando a eficiência do modelo através do coeficiente de Nash-Sutcliffe, tem-se que ao inserir erros aleatórios com distribuição uniforme, o modelo ajustado às diferentes bacias teve seu desempenho afetado em menos de 1%, já com erros com distribuição normal praticamente todas as bacias refletiram a mesma situação anterior, a exceção da bacia do rio Preto que foi afetada em aproximadamente 3%. Confirmando assim resultados anteriores, a exemplo de Parmele (1972), Paturel et al. (1995), Andréassian et al. (2004), Oudin et al. (2006) os quais atestam uma baixa sensibilidade dos modelos avaliados para dados de evapotranspiração sujeitos a erros aleatórios;

✓ A avaliação das funções do Desvio Quadrático Inverso e Desvio Relativo Médio sugerem as mesmas considerações feitas anteriormente, demonstrando assim, que independente da função priorizar o ajuste das cheias ou das estiagens, a utilização de dados de evapotranspiração sujeito a erros aleatórios praticamente não altera a eficiência do modelo.

No entanto, é possível avaliar uma pequena diferença na metodologia aplicada. Erros com distribuição uniforme apresentam um menor impacto, quando comparado aos erros com distribuição normal.

Figura 6.28 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objeto, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal nos dados de evapotranspiração devido a análise de sensibilidade estática.



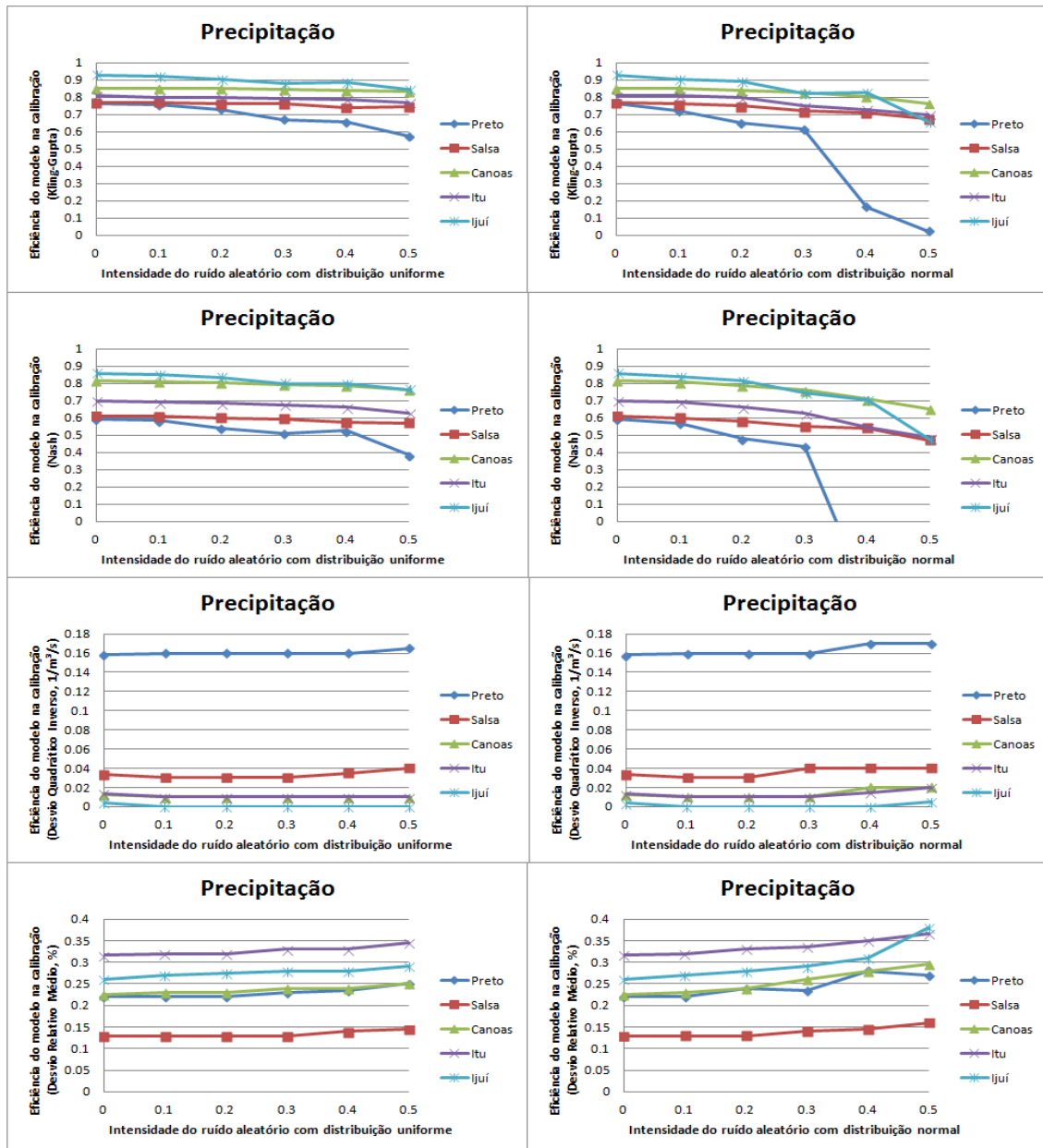
A Figura 6.29 apresenta a mediana dos resultados obtidos através da aplicação de erros aleatórios com distribuição uniforme e normal sobre os dados de precipitação. Observa-se nessa figura um maior impacto no desempenho do modelo quando aumentado a intensidade do erro se comparado aos resultados obtidos na análise da evapotranspiração (Figura 6.28). Com base nos resultados apresentados na Figura 6.29 são apresentadas as seguintes considerações:

- ✓ Avaliando a eficiência do modelo através do coeficiente de Kling-Gupta, tem-se que, na maioria das bacias observa-se uma alteração do desempenho relativamente baixa até a intensidade de erro correspondente a 0,3, embora maior que no caso da evapotranspiração, independente do tipo de erro. Maiores intensidades do erro provocam perda de desempenho mais intensas que dependem ainda da bacia analisada e do tipo de erro;
- ✓ Avaliando a eficiência do modelo através do coeficiente de Nash-Sutcliffe, tem-se que, na maioria das bacias observa-se uma diminuição do desempenho relativamente baixa, até intensidade de erro 0,4. Intensidades do erro correspondentes a 0,5 provocam perda de desempenho mais intensas para a maioria das bacias;
- ✓ A avaliação das funções do Desvio Quadrático Inverso e Desvio Quadrado Inverso mostra um comportamento diferente ao previamente apresentado. A variação do resultado das funções foi inferior a 4% para o erro com distribuição uniforme e inferior a 11% quando utilizado o erro com distribuição normal, podendo ser um indício de que funções que priorizam o ajuste de vazões mínimas são pouco afetadas quando sujeitas a tais erros. No entanto, é válido ressaltar que a forma do hidrograma calculado fora dos períodos de estiagens apresenta-se bastante afetada pelos erros inseridos.

Nessas análises, é possível avaliar com mais propriedade a diferença na aplicação de erros com distribuição uniforme e normal. Erros com distribuição uniforme apresentam um menor impacto, quando comparado ao com distribuição normal, e à medida que a intensidade aumenta essa diferença fica mais evidente. Além disso, são observados diferentes comportamentos na perda de desempenho do modelo dependendo de qual a função-objetivo foi utilizada como medida de desempenho. A função-objetivo do Desvio Quadrático Inverso, por exemplo, praticamente não foi alterada quando comparada as outras funções-objetivo. Essa situação pode estar ocorrendo devido às outras funções priorizarem mais as vazões máximas e médias, favorecendo assim um maior impacto sobre a sua medida de desempenho. Nesse sentido, as avaliações demonstraram que os erros aleatórios sobre os dados de precipitação impactam de forma diferente as funções. O efeito desse tipo de erro acaba afetando de uma maneira mais intensa as funções-objetivo que se ajustam melhor as máximas. Percebe-se também, que em alguns casos, o erro com intensidade menor acabou provocando uma maior

deterioração do valor da função-objetivo, e isso ocorre devido ao ponto em que esse tipo de erro atingiu.

Figura 6.29 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objetivo, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal nos dados de precipitação devido a análise de sensibilidade estática.



6.2.2. Análise de sensibilidade dinâmica

Esse tópico aborda a análise de sensibilidade dinâmica considerando quatro funções-objetivo: Coeficiente de Kling-Gupta; Coeficiente de Nash-Sutcliffe, Desvio Quadrático Inverso e Desvio Relativo Médio nas cinco bacias selecionadas no estudo de

caso. Nesse sentido, foi avaliado o impacto sobre as funções-objetivo quando o modelo hidrológico utiliza dados de entrada sujeitos a erros sistemáticos e aleatórios.

O erro sistemático foi avaliado tanto na evapotranspiração quanto na precipitação para o coeficiente de multiplicação K variando entre 0,5 e 2. Já para K igual a um tem-se o resultado obtido sem efeito de erro. Foram realizadas para cada bacia, 16 simulações para dados de evapotranspiração e 16 para dados de precipitação sobre o efeito desse tipo de erro. Ao contemplar essa análise para todas as funções-objetivo tem-se um total de 640 simulações.

O erro aleatório foi avaliado tanto na evapotranspiração quanto na precipitação para a intensidade do erro σ variando entre zero e 0,5. Onde, σ igual à zero descreve o resultado sem efeito de erro. Para os erros com σ variando entre 0,1 e 0,5, o presente estudo gerou 20 séries de dados sobre o efeito de erros com distribuição uniforme e 20 com erros com distribuição normal para cada valor de σ , buscando assim ter uma gama representativa de valores que favorecessem a análise. Dessa forma, foram realizadas para cada bacia 200 simulações para dados de evapotranspiração e 200 para dados de precipitação, sobre o efeito desse tipo de erro com diferentes intensidades, sendo metade com erros com distribuição uniforme e o restante com distribuição normal. Ao contemplar essa análise para todas as bacias e funções-objetivo, tem-se um total de 8000 simulações.

Os resultados obtidos na análise de sensibilidade dinâmica foram analisados em termos de impacto sobre a eficiência do modelo e de impacto sobre os valores dos parâmetros obtidos pela calibração automática, conforme apresentado a seguir.

6.2.2.1. Impacto sobre a eficiência do modelo

Durante a análise de sensibilidade dinâmica o modelo é calibrado novamente utilizando os dados de entrada perturbados. A Figura 6.30 descreve os resultados encontrados para as diferentes funções-objetivo, nas diferentes bacias, com dados de entrada sujeitos a erros sistemáticos, permitindo as seguintes considerações:

✓ Ao avaliar a eficiência do modelo IPH II através da função de Kling-Gupta, verifica-se que quando o coeficiente de multiplicação assume o valor um, a calibração foi realizada sem o efeito do erro. Sendo assim, observa-se que as bacias localizadas no nordeste sofrem um pequeno efeito sobre a medida de desempenho com relação às demais

bacias quando o erro é inserido no sentido de subestimar a evapotranspiração e apresenta o mesmo comportamento das demais, com uma queda suave da medida de desempenho quando a evapotranspiração é sobrestimada conseguindo contornar os efeitos dos erros sobre a medida de desempenho. Já ao inserir o erro na precipitação, percebe-se que maior parte das bacias é drasticamente afetada na subestimativa, pois mesmo com a alteração dos valores dos parâmetros o modelo não consegue produzir água, enquanto que para as sobrestimativas o modelo consegue contornar o efeito dos erros sobre a medida de desempenho, fato esse que provavelmente está associado a alterações nos parâmetros do modelo de forma a conseguir absorver o excedente precipitado.

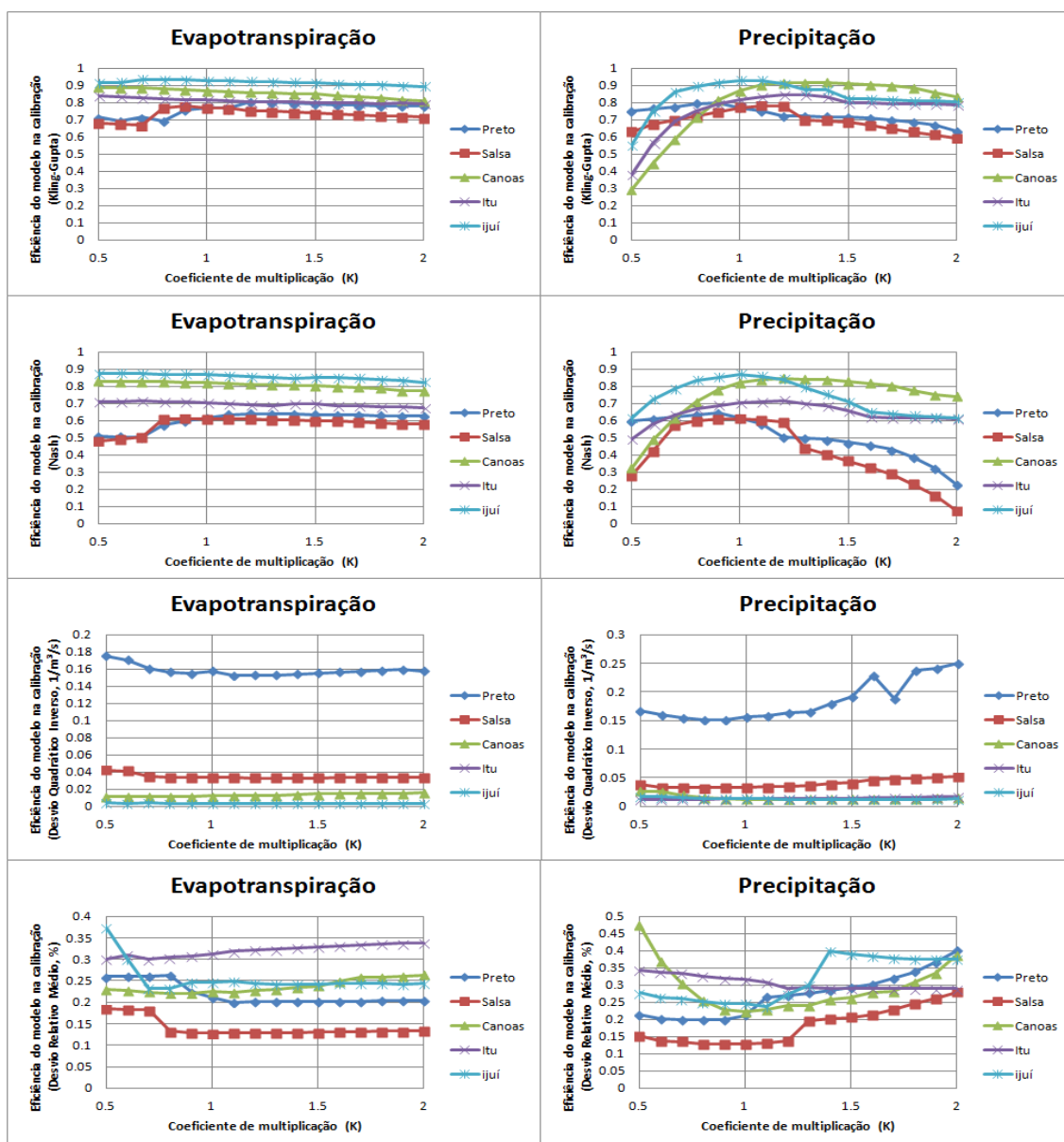
✓ Quando a função que descreve a eficiência do modelo passa a ser Nash-Sutcliffe, percebe-se que as bacias inseridas no nordeste são afetadas em cerca de 10% para subestimativas acentuadas da evapotranspiração e para sobrestimativas desta tem-se um efeito reduzido sobre a medida de desempenho, em todas as bacias. Na situação onde os erros são inseridos precipitação nota-se um comportamento distinto entre as bacias inseridas em zonas climáticas diferentes, uma vez que, as bacias localizadas ao nordeste foram bastante afetadas tanto para subestimativas quanto para sobrestimativas da precipitação e as bacias localizadas ao sul do país sofreram um maior efeito em subestimativas da precipitação (no caso de K corresponder a 0,5, a eficiência do modelo foi afetada entre 20 e 40% nas bacias analisadas), conseguindo contornar relativamente bem as sobrestimativas (entre 10 e 20%).

✓ Considerando a eficiência do modelo IPH II através da função do Desvio quadrático Inverso, verifica-se que quando o coeficiente de multiplicação assume o valor um, a calibração foi realizada sem o efeito do erro. Nesse sentido observa-se que os erros nos dados de evapotranspiração tendem a ser contornados tanto em subestimativa quanto em sobrestimativa da evapotranspiração. O mesmo ocorre quando os erros são inseridos na precipitação, com o diferencial do impacto sobre a eficiência do modelo ser mais sentido quando o coeficiente de multiplicação assume valores superiores a 1,5 em bacias localizadas no nordeste.

✓ Abordando a eficiência do modelo IPH II através da função do Desvio Relativo Médio, observa-se que os erros nos dados de evapotranspiração tendem a ser contornados tanto em subestimativa quanto em sobrestimativa da evapotranspiração sendo a bacia do rio Itu menos afetada em relação às demais (3,87%). Já ao inserir erros na precipitação,

nota-se diferenças entre as bacias analisadas, a exemplo da bacia do rio Canoas que é mais afetada caso ocorra subestimativa da precipitação (25,17 %) e a bacia do rio Preto sofre um maior impacto sobre a medida de desempenho quando ocorre a sobrestimativa da precipitação (20,2%).

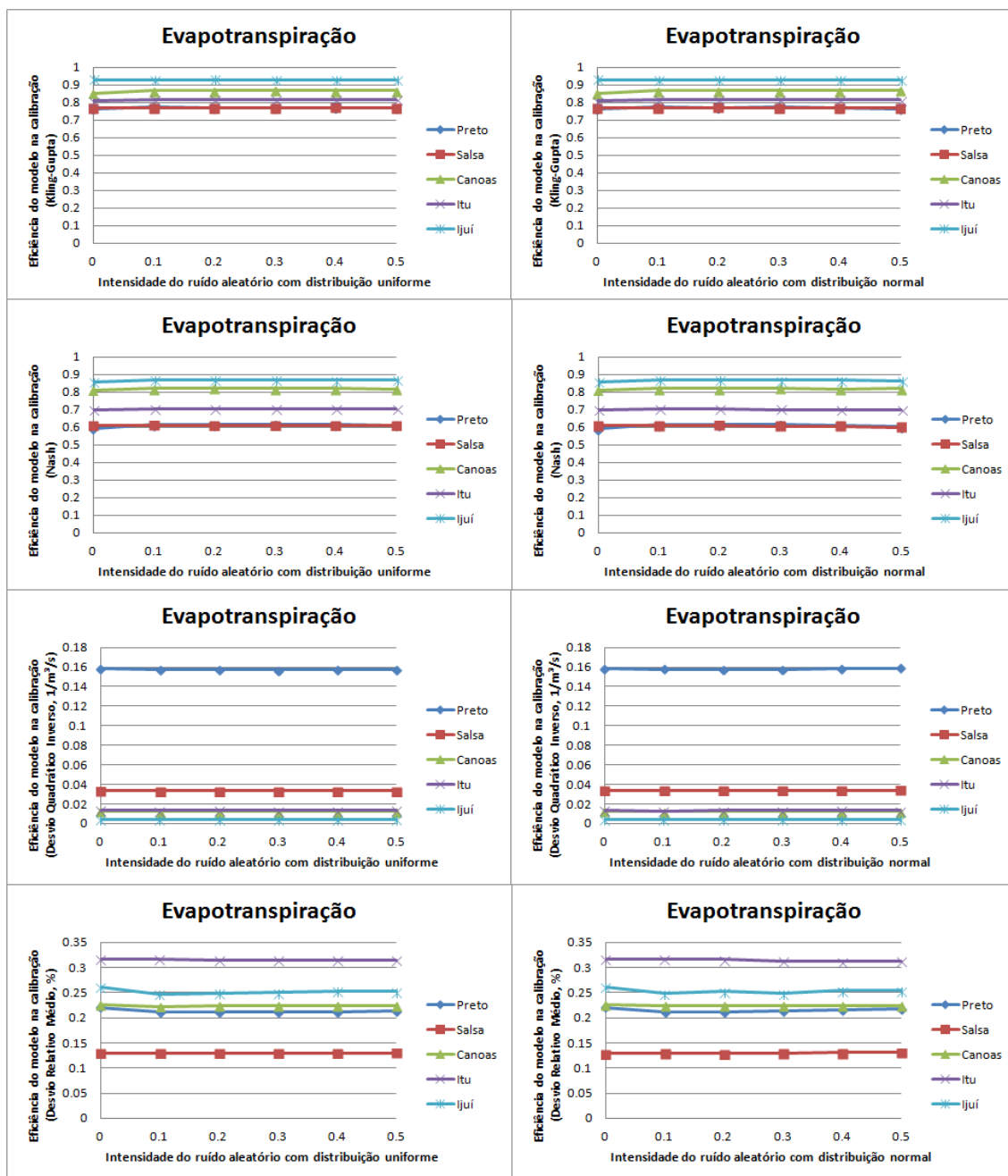
Figura 6.30 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objeto, sujeito a erro sistemático nos dados de evapotranspiração e precipitação devido a análise de sensibilidade dinâmica.



A mediana dos resultados considerando erros aleatórios na evapotranspiração com distribuição uniforme ou normal é apresentada na Figura 6.31 para todas as funções-objeto avaliadas e todas as bacias. A análise desses resultados permite identificar que o

modelo IPH II consegue contornar os erros na evapotranspiração com a alteração dos valores dos parâmetros mantendo seu desempenho praticamente inalterado.

Figura 6.31 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objetivo, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal na evapotranspiração devido a análise de sensibilidade dinâmica.



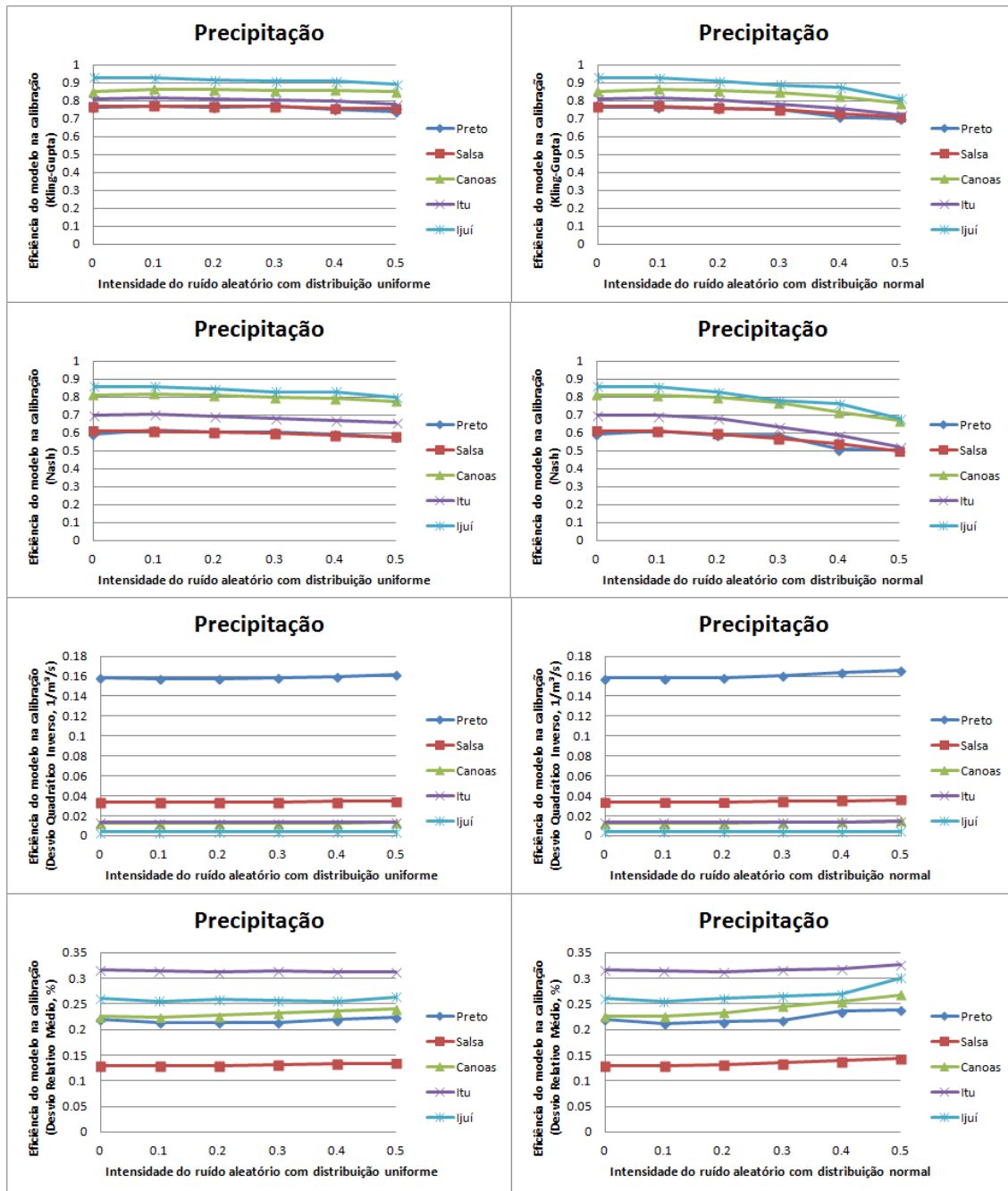
A mediana dos resultados considerando erros aleatórios na precipitação com distribuição uniforme ou normal é apresentada na Figura 6.32 para todas as funções-

objetivo e bacias avaliadas. Outras estatísticas dos resultados para cada uma das bacias foram estimadas e são apresentadas do Anexo I ao Anexo V.

Nessas análises é possível identificar que erros aleatórios na precipitação impactam o modelo da seguinte forma:

- ✓ Kling-Gupta: Erros com distribuição uniforme afetam o desempenho de forma suave para essa função-objetivo contornando os erros inseridos com queda do desempenho variando entre 1 e 4%. Já erros com distribuição normal são mais acentuados e variam entre 6 e 11%, sendo mais representativo em intensidades do erro correspondente a 0,5.
- ✓ Nash-Sutcliffe: Erros com distribuição uniforme afetam o desempenho dessa função entre 3 e 6%, no entanto apresenta-se de forma suave para as intensidades do erro adotada. Já erros com distribuição normal são mais acentuados e variam entre 10 e 18%, tendo uma queda de desempenho superior quando comparada a função-objetivo de Kling-Gupta.
- ✓ Desvio Quadrático Inverso: Apresenta pequenas variações para praticamente todas as intensidades do erro adotado, sejam eles com distribuição uniforme ou normal. Por apresentar um melhor ajuste as vazões mínimas é possível que essa função-objetivo acabe não tendo seu desempenho comprometido mesmo sujeita a erros.
- ✓ Desvio Relativo Médio: Erros com distribuição uniforme afetaram o desempenho dessa função em menos de 1% para todas as bacias avaliadas, bem como para o intervalo de erro proposto. Quando são avaliados erros com distribuição normal tem-se a variação dos resultados obtidos com a aplicação dessa função variando entre 1 e 4%, sendo eles mais representativos a partir da intensidade de erro correspondente a 0,3.

Figura 6.32 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objetivo, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal na precipitação devido a análise de sensibilidade dinâmica.



6.2.2.2. Impacto sobre os valores dos parâmetros

Durante a análise de sensibilidade dinâmica o modelo é novamente calibrado utilizando os dados de entrada perturbados e, em consequência, novos valores dos parâmetros são obtidos. Isto acontece porque o modelo tenta contornar os erros nos dados

de entrada alterando os valores dos parâmetros considerados ideais com o objetivo de minimizar as diferenças entre as vazões simuladas e as vazões observadas.

Nesse item são apresentados os resultados obtidos e discutido o impacto sobre os valores dos parâmetros de referência, obtidos durante a calibração com dados sem perturbação. A descrição do efeito de cada parâmetro sobre o comportamento do hidrograma já foi contemplada na análise com dados sintéticos.

Nesse sentido, como já foi descrito anteriormente, o erro sistemático, seja ele na evapotranspiração ou na precipitação, apresenta um impacto considerável sobre a eficiência do modelo. A análise da Figura 6.33 à Figura 6.36 permite a avaliação da alteração dos parâmetros do modelo IPH II para as quatro funções-objetivo avaliadas à medida que os dados de evapotranspiração e precipitação estão sujeitos a erros sistemáticos. Quando tais erros foram inseridos na evapotranspiração, normalmente detectou-se um menor efeito quando comparado à precipitação para todas as funções-objetivo avaliadas de forma a permitir as seguintes considerações:

✓ A avaliação dos parâmetros através da calibração pelo coeficiente de Kling-Gupta na evapotranspiração indica que o incremento do erro sistemático tende a diminuir o valor de I_0 , demonstrando assim que como I_0 trata de um parâmetro que regula a infiltração, quanto maior seu valor maior é a infiltração para a maioria das bacias, logo, em subestimativas da evapotranspiração, esse valor assume um valor elevado, e em sobrestimativas ele tende a ser reduzido; o parâmetro I_b está associado a percolação no solo, e para a maioria das bacias verifica-se a sua elevação com o aumento do erro sistemático; já o parâmetro H apresenta-se no sentido decrescente a medida que se eleva a intensidade do erro sistemático, atuando assim na redução da infiltração; o parâmetro K_{sup} apresenta uma certa continuidade para essa situação; o parâmetro K_{sub} tende a se elevar com o incremento sistemático, tornando assim o escoamento subterrâneo mais lento com o aumento da evapotranspiração; já o parâmetro R_{max} tende a decrescer com o aumento do incremento sistemático, reduzindo assim a interceptação a medida em que a evapotranspiração é elevada; por fim o parâmetro α é elevado para a maioria das bacias com o incremento sistemático. A avaliação dos parâmetros através da calibração pelo coeficiente de Kling-Gupta na precipitação demonstra que o incremento do erro sistemático tende a elevar o valor de I_0 , indicando assim que em subestimativas da precipitação, esse valor assume um valor baixo de forma a reduzir a infiltração, e em

sobrestimativas ele tende a ser elevado; com relação ao parâmetro I_b , para a maioria das bacias verifica-se o seu aumento com a elevação do erro sistemático; o parâmetro H apresenta-se no sentido crescente a medida que se eleva a intensidade do erro sistemático, atuando assim no acréscimo da infiltração; o parâmetro K_{sup} apresenta a tendência de se elevar com o acréscimo do erro sistemático; o parâmetro K_{sub} apresenta valores reduzidos próximo ao ótimo e se eleva tanto em subestimativas quanto nas sobrestimativas mais fortes; o parâmetro R_{max} tende a ser elevado com o aumento do incremento sistemático, aumentando a interceptação a medida em que a precipitação é elevada; por fim o parâmetro α é reduzido com o incremento sistemático uma vez que tem-se um maior aporte de chuva.

✓ A avaliação dos parâmetros através da calibração pelo coeficiente de Nash-Sutcliffe na evapotranspiração apresenta as mesmas considerações feitas anteriormente à exceção do parâmetro K_{sub} , que tende a decrescer para a maioria das bacias nessa situação. A aparente semelhança da tendência dos parâmetros pode estar associada ao fato das duas funções se ajustarem de forma mais eficaz aos períodos de cheia. A avaliação dos parâmetros através da calibração pelo coeficiente de Nash-Sutcliffe na precipitação apresenta as mesmas considerações feitas anteriormente através do coeficiente de Kling-Gupta. A tendência entre os resultados é semelhante, no entanto difere tanto em magnitude, quanto a intensidade do erro na qual a tendência de elevação ou diminuição dos parâmetros se torna mais evidente.

✓ A avaliação dos parâmetros através da calibração pelo Desvio Quadrático Inverso (DQI) na evapotranspiração apresenta as mesmas considerações feitas anteriormente. No entanto os hidrogramas simulados diferem consideravelmente. Essa aparente diferença pode ser percebida então pelo valor dos parâmetros, os quais, apesar de seguirem tendência semelhante são distintos em magnitude. A avaliação dos parâmetros através da calibração pelo Desvio Quadrático Inverso (DQI) na precipitação apresenta as mesmas considerações feitas anteriormente para as outras 2 FO. No entanto nota-se uma diferença mais evidente nos parâmetros H e K_{sup} .

✓ A avaliação dos parâmetros através da calibração pelo Desvio Relativo Médio na evapotranspiração apresenta as mesmas considerações feitas anteriormente para o DQI a exceção do parâmetro K_{sub} . A avaliação dos parâmetros através da calibração pelo Desvio Relativo Médio na precipitação apresenta as mesmas considerações feitas

anteriormente para o DQI a exceção do parâmetro R_{max} , que apresentou o comportamento de se reduzir tanto em subestimativas quanto em sobrestimativas para as bacias situadas no sul do país e de elevação para bacias situadas no nordeste.

Observados esses aspectos, nota-se que as medidas de desempenho utilizadas no modelo IPH II conseguem contornar os erros nos dados de evapotranspiração e precipitação sejam eles com distribuição uniforme ou normal, com a alteração dos valores dos parâmetros.

Figura 6.33 - Impacto do incremento de erros sistemáticos na evapotranspiração e precipitação nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Kling-Gupta para as cinco bacias testadas devido a análise de sensibilidade dinâmica.

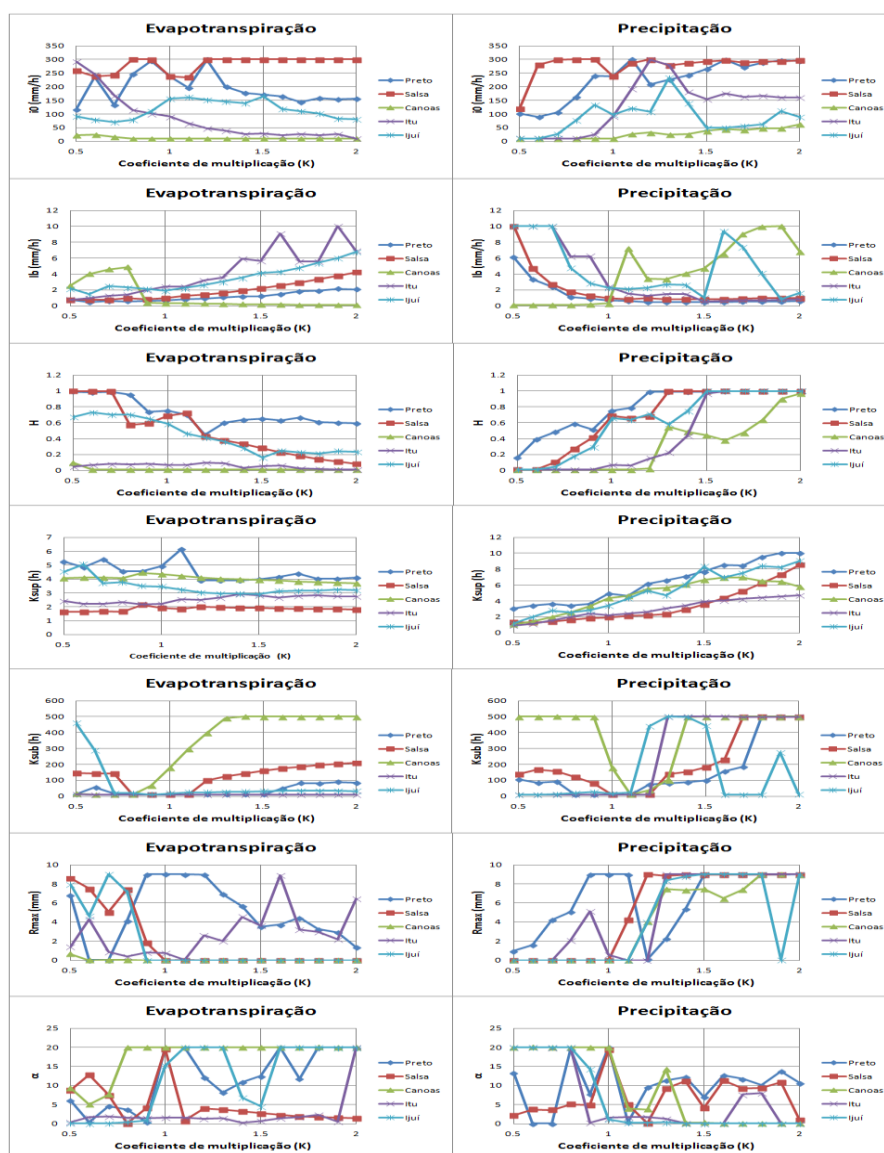


Figura 6.34 - Impacto do incremento de erros sistemáticos na evapotranspiração e precipitação nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Nash-Sutcliffe para as cinco bacias testadas devido a análise de sensibilidade dinâmica.

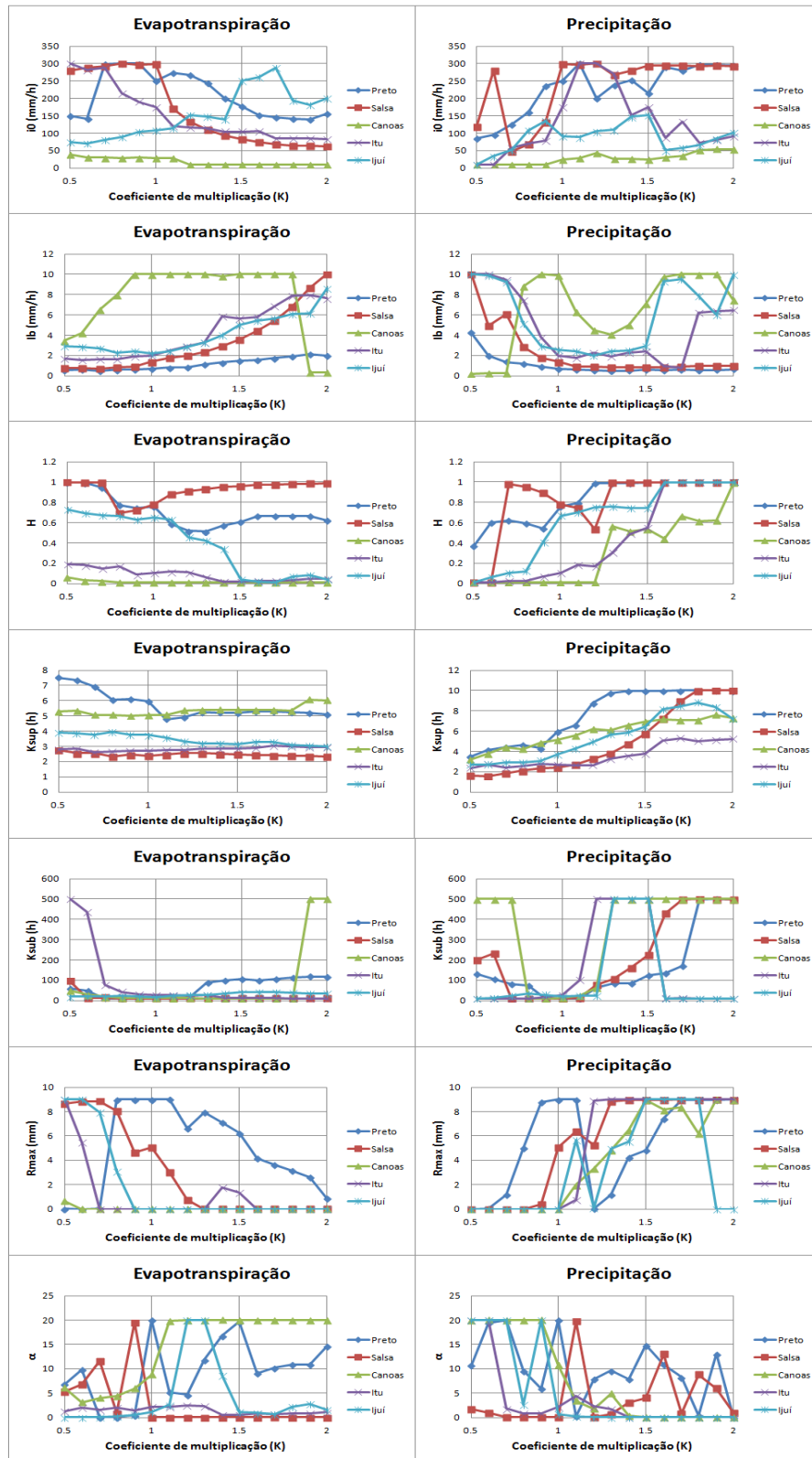


Figura 6.35 - Impacto do incremento de erros sistemáticos na evapotranspiração e precipitação nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Quadrático Inverso para as cinco bacias testadas devido a análise de sensibilidade dinâmica.

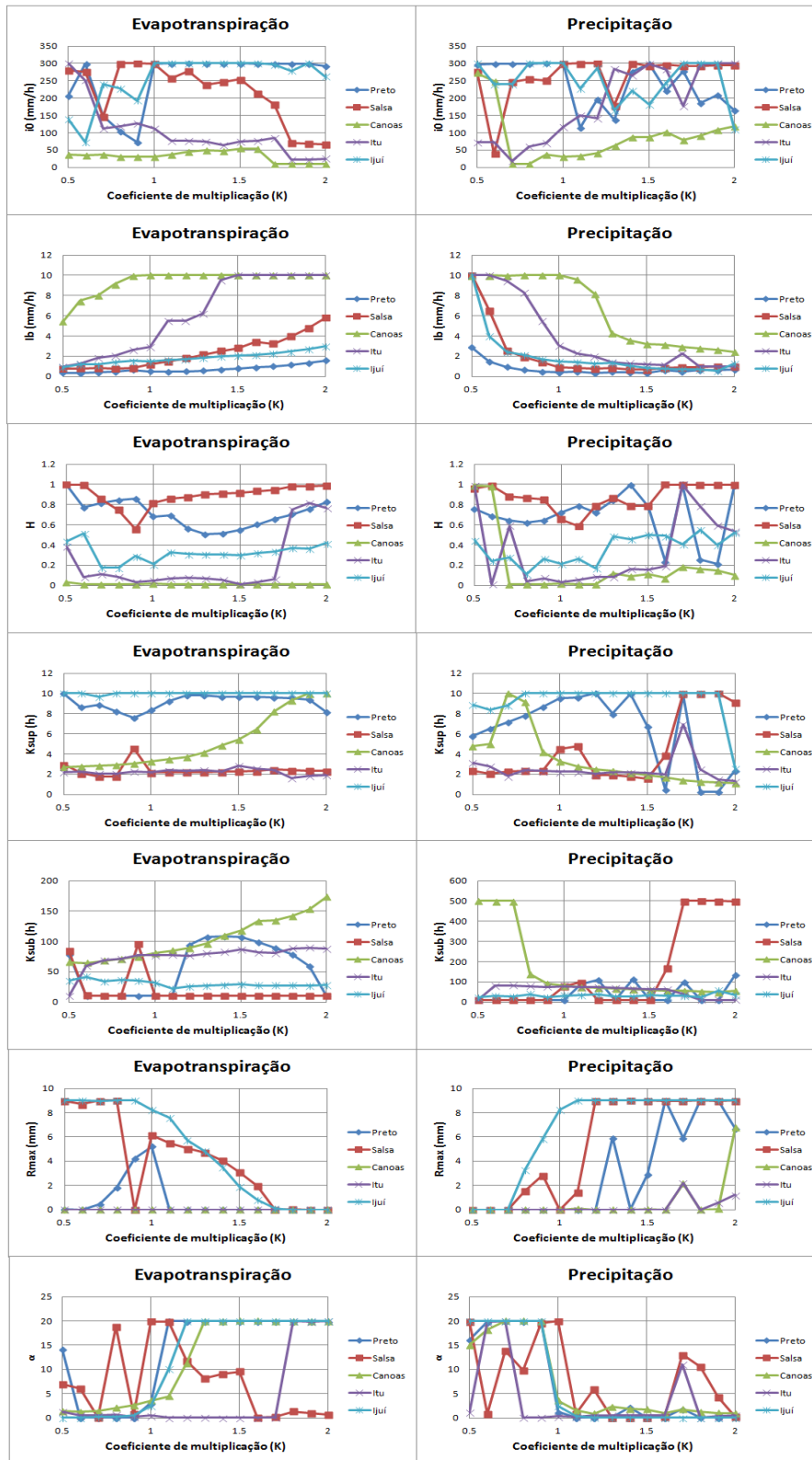
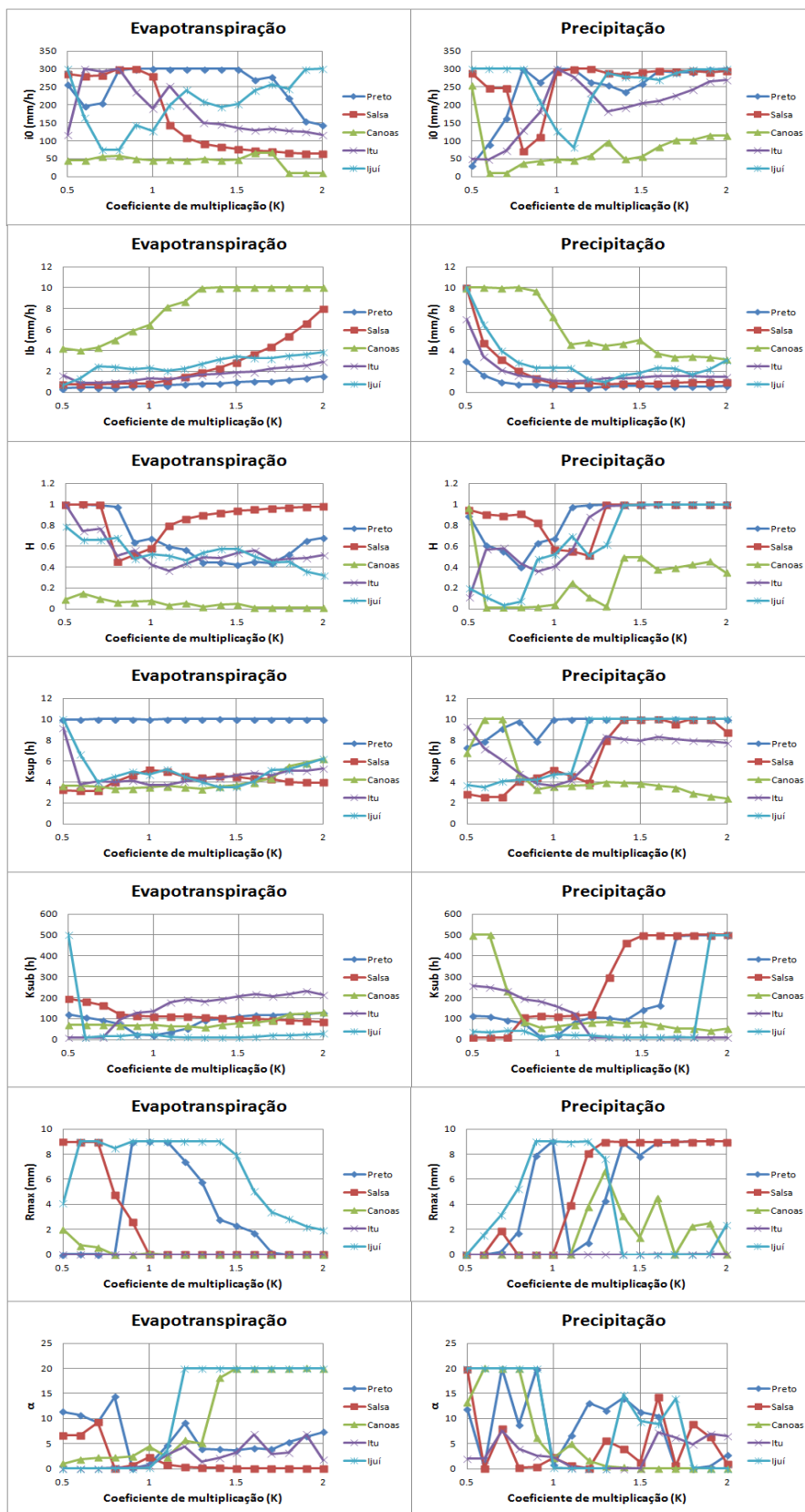


Figura 6.36 - Impacto do incremento de erros sistemáticos na evapotranspiração e precipitação nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Relativo Médio para as cinco bacias testadas devido a análise de sensibilidade dinâmica.



As análises do efeito de erros aleatórios na evapotranspiração sobre os parâmetros sejam eles com distribuição uniforme ou normal, estão apresentadas da Figura 6.37 a Figura 6.40, para as funções-objetivo avaliadas. Conforme visto anteriormente, erros aleatórios na evapotranspiração não apresentam impacto significativo sobre a eficiência do modelo para qualquer uma das bacias em todas as funções-objetivo. Dessa forma, percebe-se que para o valor de tendência central adotado, os parâmetros seguem a mesma tendência de não sofrer modificações consideráveis à medida que erros são inseridos, no entanto, ao se avaliar as estatísticas descritas nos Anexos de I a V, percebe-se a alteração dos parâmetros no sentido de contornar os erros. Ao longo das figuras nota-se uma pequena variação quando o valor de σ atinge 0,4 e 0,5, indicando assim que a elevação da intensidade dos erros aleatórios começa a interferir nos parâmetros do modelo de forma mais acentuada a medida que a intensidade do erro adotada alcança valores maiores.

Figura 6.37 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme e normal na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Kling-Gupta para as cinco bacias testadas devido a análise de sensibilidade dinâmica.

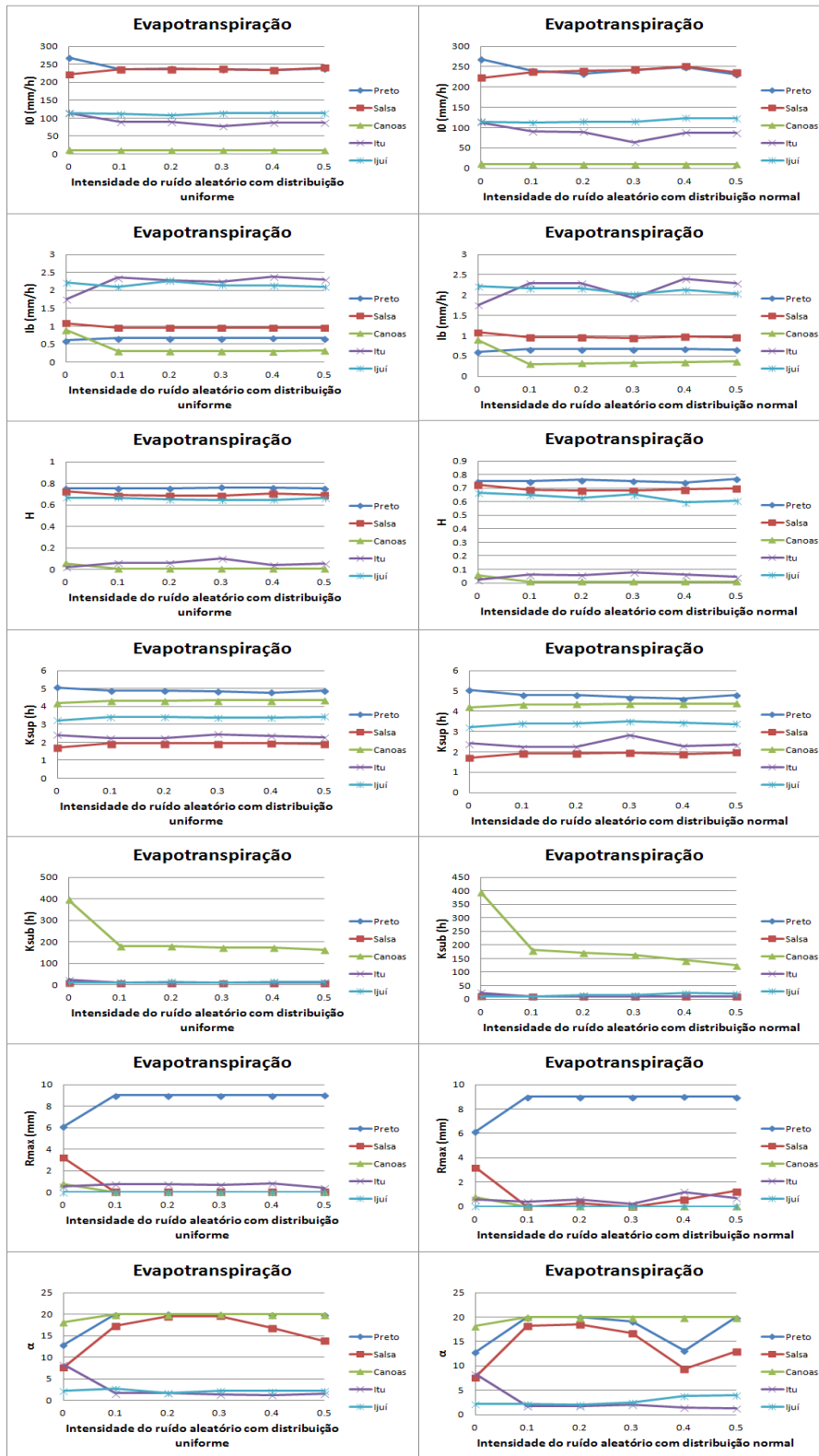


Figura 6.38 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme e normal na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Nash-sutcliffe para as cinco bacias testadas devido a análise de sensibilidade dinâmica.

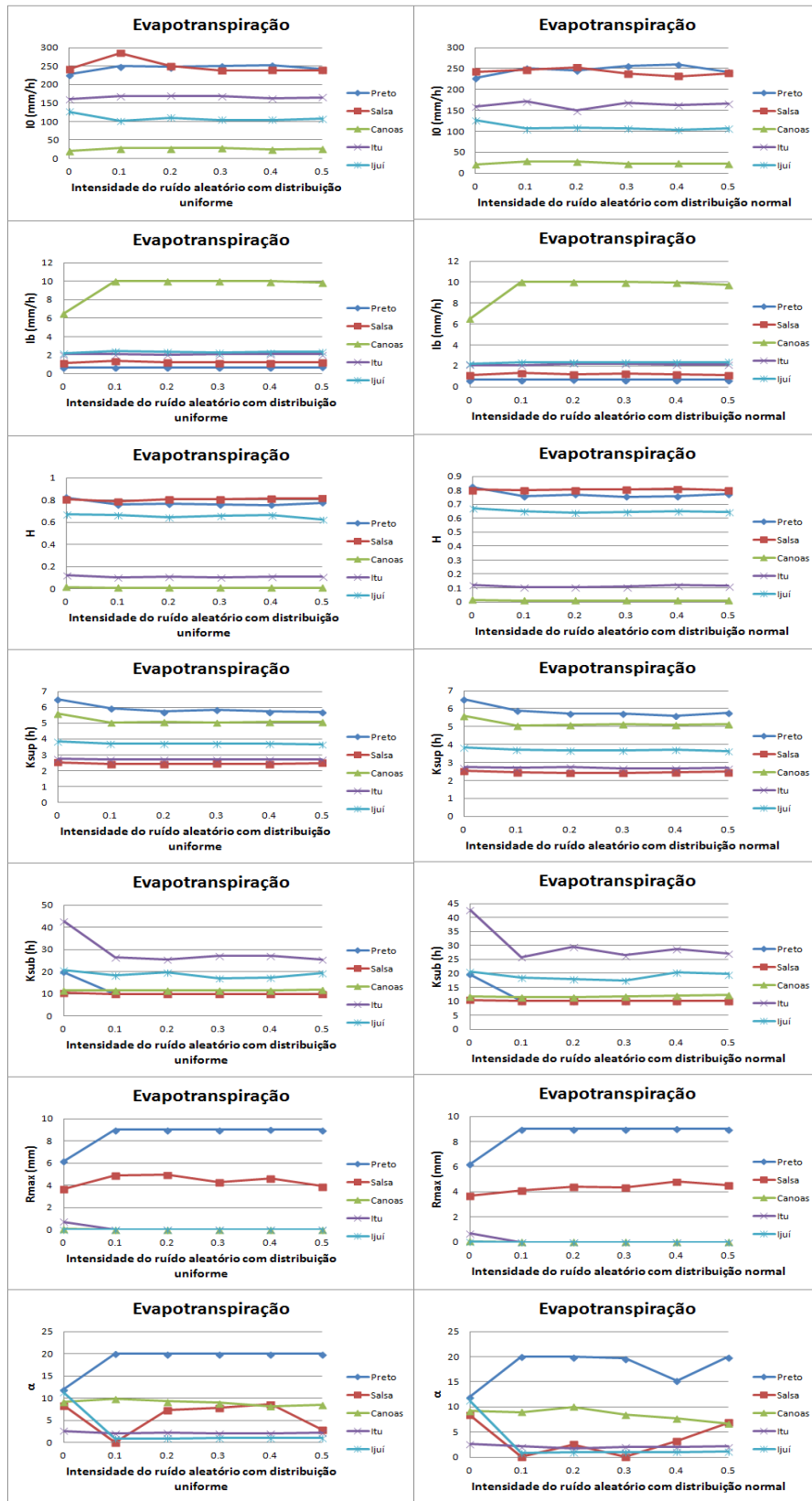


Figura 6.39 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme e normal na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Quadrático Inverso para as cinco bacias testadas devido a análise de sensibilidade dinâmica.

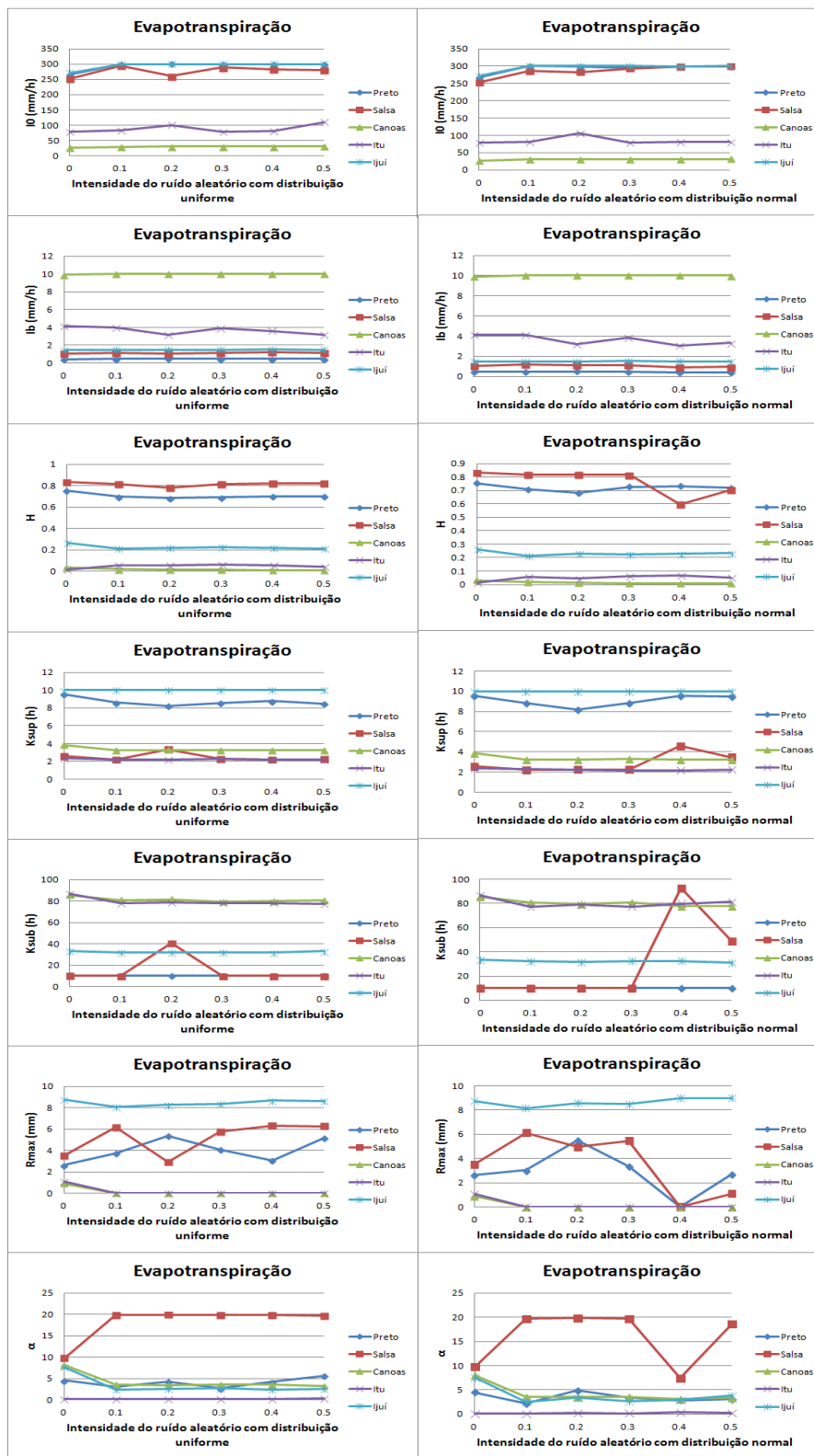
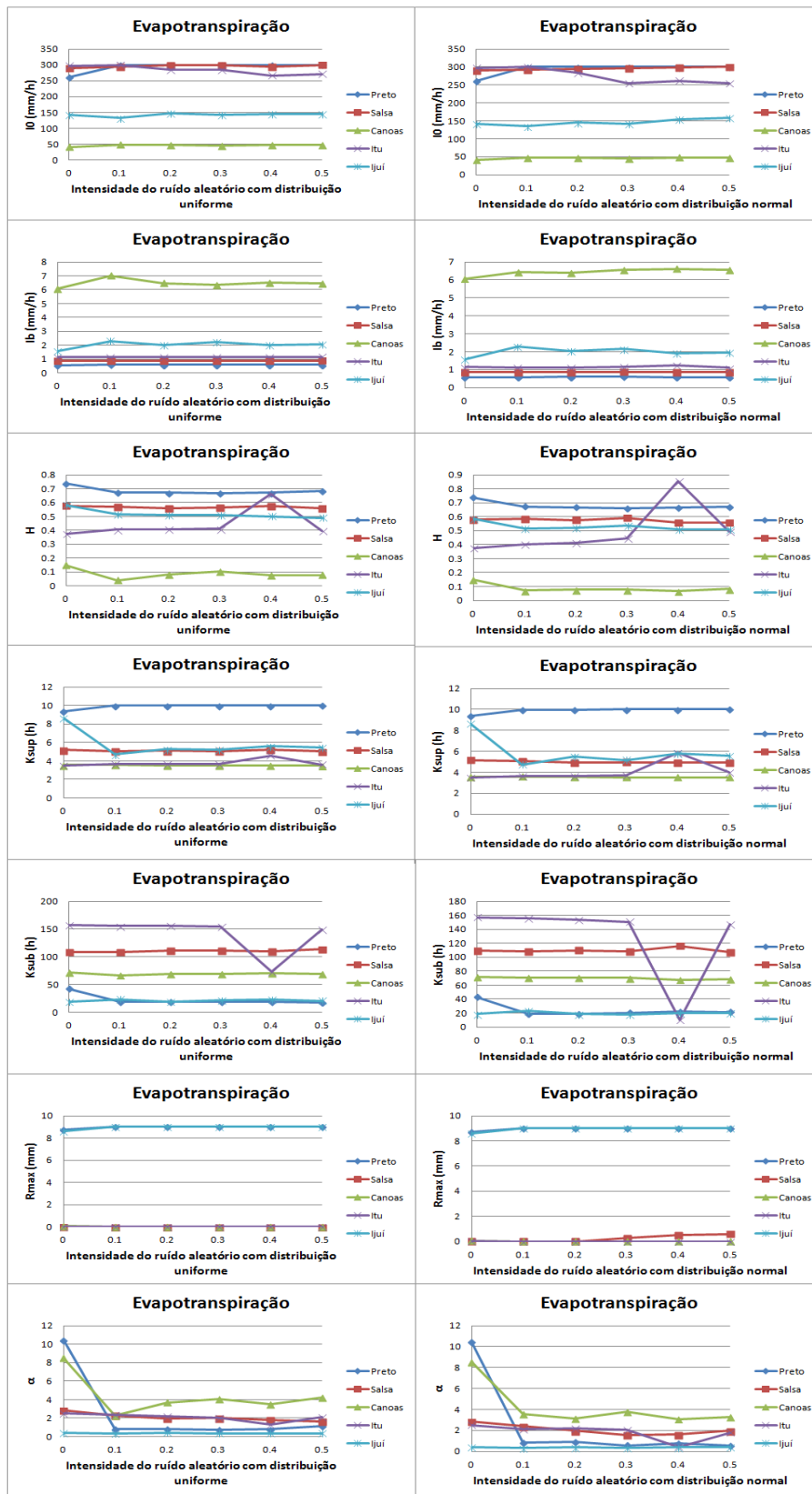


Figura 6.40 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme e normal na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio relativo Médio para as cinco bacias testadas devido a análise de sensibilidade dinâmica.



As análises ao se inserir erros aleatórios na precipitação sejam eles com distribuição uniforme ou normal estão apresentadas da Figura 6.41 à Figura 6.44.

Nessas análises é possível identificar que erros aleatórios na precipitação impactam os parâmetros do modelo da seguinte forma:

- ✓ Kling-Gupta: Os erros com distribuição uniforme afetaram o desempenho dessa função entre 1 e 4%, o que pode ser considerado pouco significativo, mas a avaliação das figuras permite visualizar a alteração de alguns parâmetros a exemplo de I_0 e H para algumas bacias. Já erros com distribuição normal são mais acentuados e provocam uma variação maior dos parâmetros quando o erro aleatório é elevado, sendo mais notório quando a intensidade do erro assume valores acima de 0,3. Essa situação indica que o modelo absorve os erros dos dados de entrada e transfere para os parâmetros do modelo para minimizar o impacto sobre a eficiência do modelo.
- ✓ Nash-Sutcliffe: Erros com distribuição uniforme tende a afetar os parâmetros I_0 , H e α de forma mais evidente. Por outro lado, erros com distribuição normal afetam de forma mais incisiva 4 parâmetros do modelo, I_0 , K_{sup} , K_{sub} e α .
- ✓ Desvio Quadrático Inverso: Apesar dessa função apresentar pequenas variações, mais uma vez percebe-se a variação dos parâmetros I_0 , R_{max} e α no sentido de contornar os efeitos sobre a medida de desempenho.
- ✓ Desvio Relativo Médio: Os erros associados a essa função para a situação analisada tendem a ser transferidos para os parâmetros I_0 , H , K_{sup} e α .

Figura 6.41 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme e normal na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Kling-Gupta para as cinco bacias testadas devido a análise de sensibilidade dinâmica.

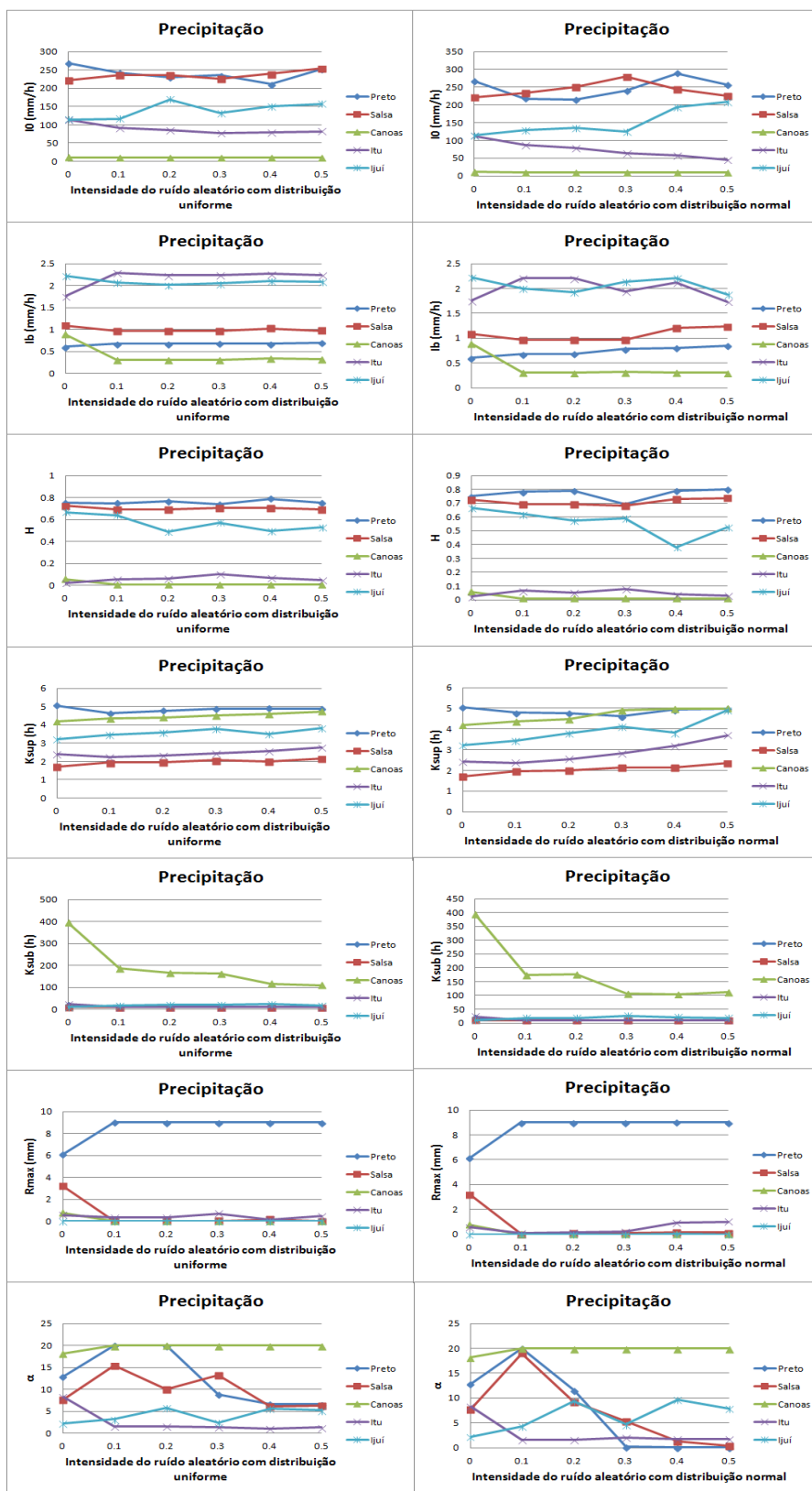


Figura 6.42 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme e normal na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Nash-Sutcliffe para as cinco bacias testadas devido a análise de sensibilidade dinâmica.

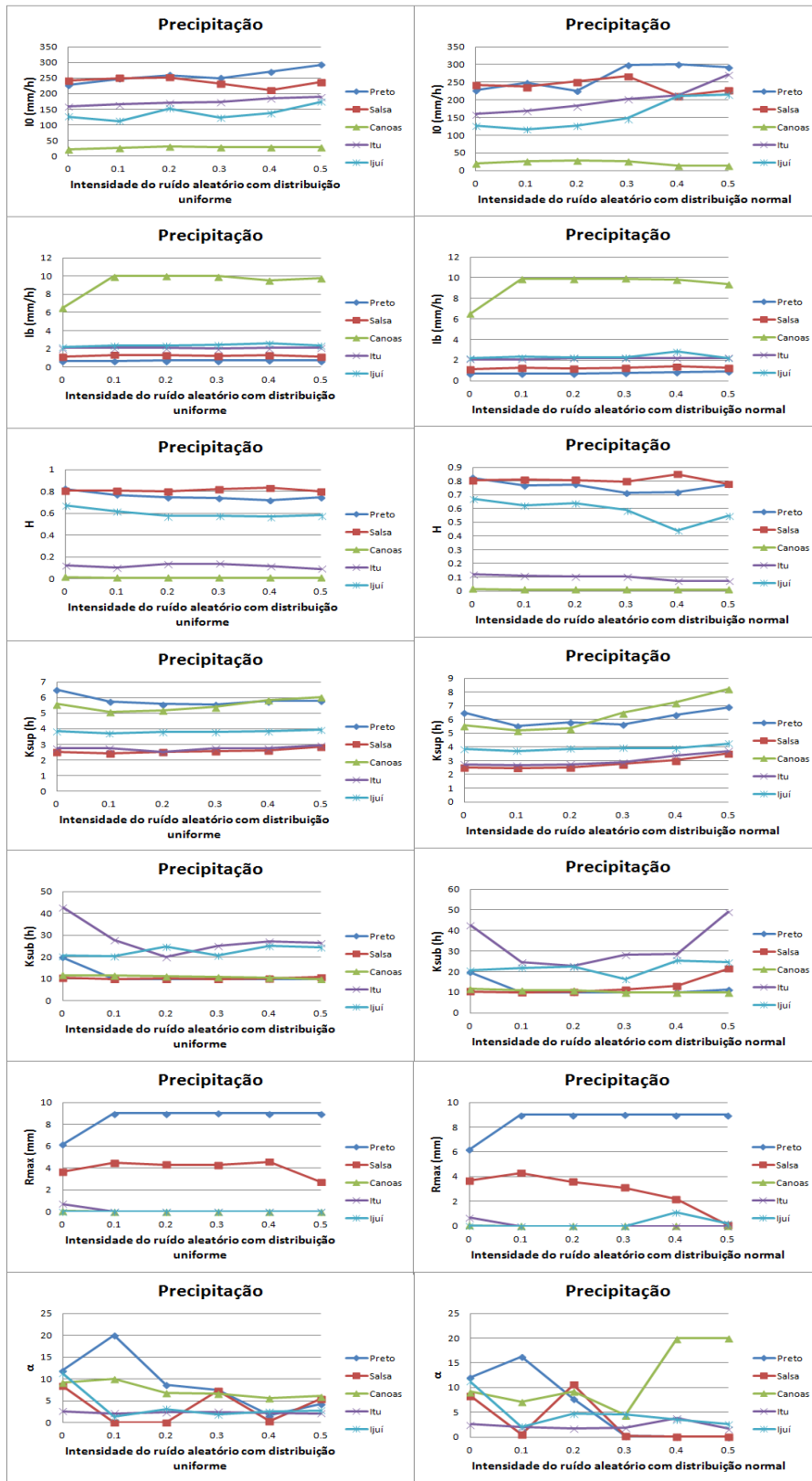


Figura 6.43 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme e normal na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Quadrático Inverso para as cinco bacias testadas devido a análise de sensibilidade dinâmica.

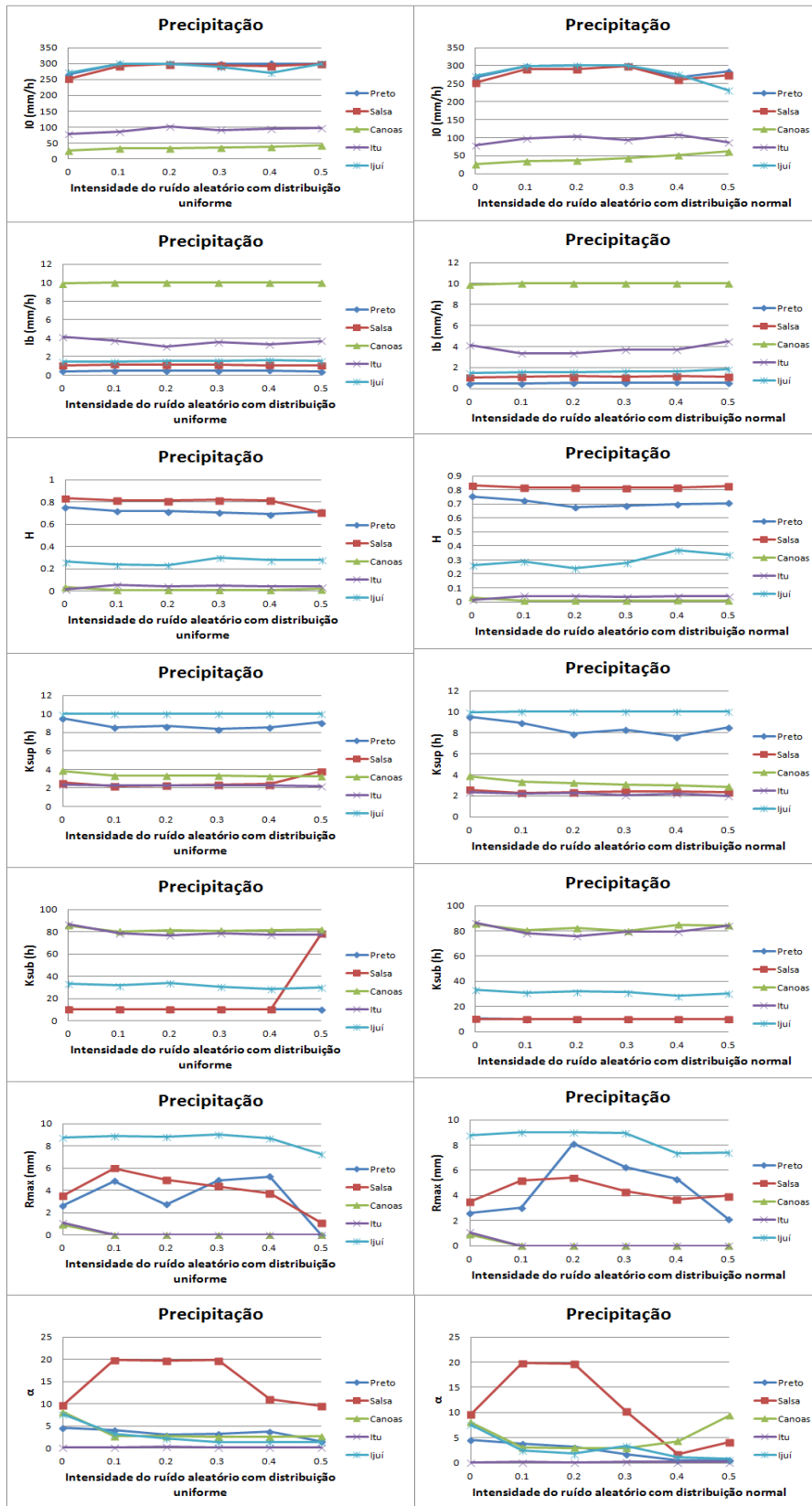
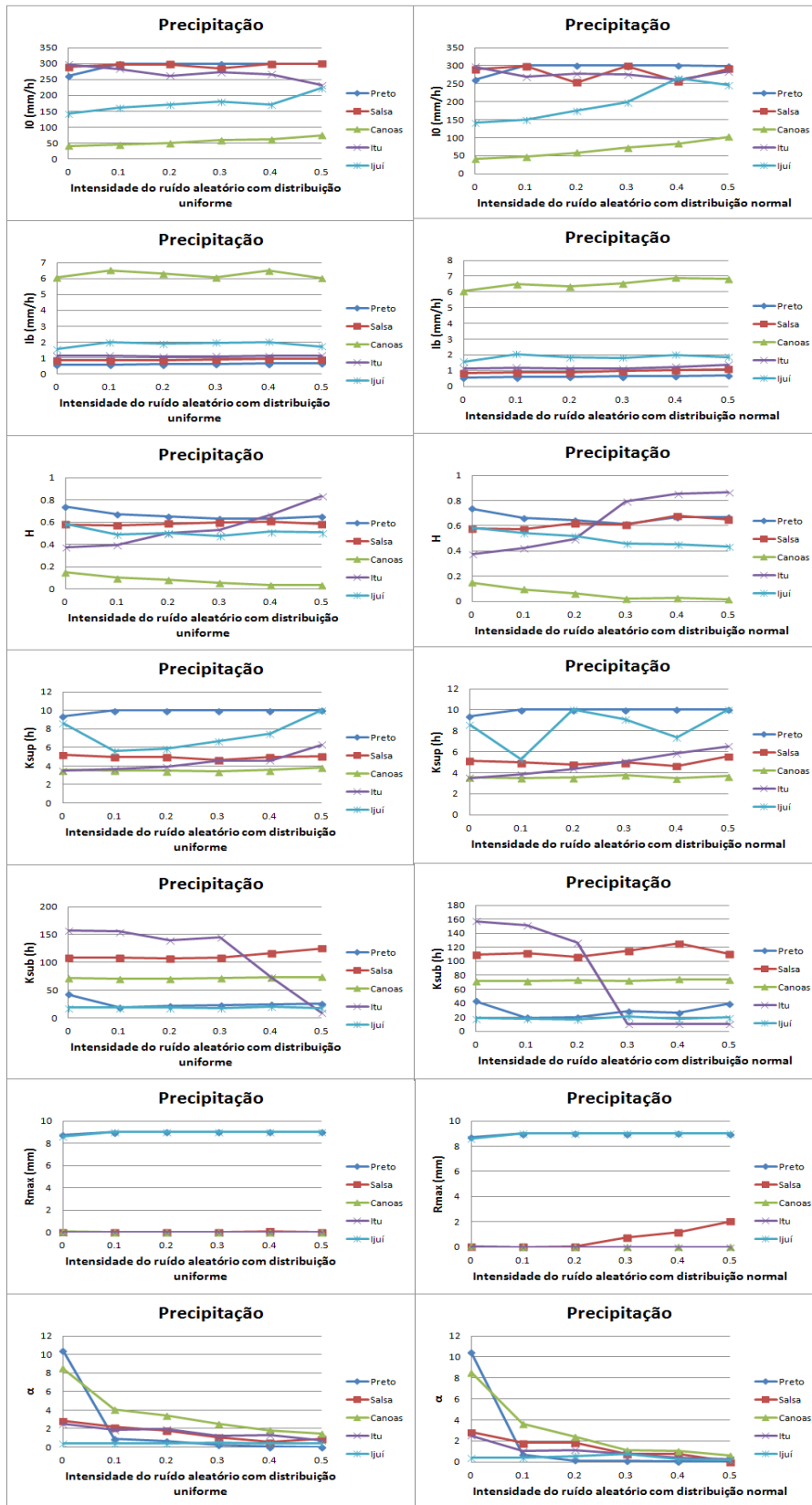


Figura 6.44 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme e normal na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Relativo Médio para as cinco bacias testadas devido a análise de sensibilidade dinâmica.



6.2.3. Análise geral dos resultados

Algumas considerações finais do estudo são descritas a seguir, conforme pode ser acompanhado, da Tabela 6.1 à Tabela 6.4. Essas análises consideraram as estatísticas máximas e mínimas alcançadas, tanto com a função-objetivo adotada quanto com os parâmetros. Nesse sentido, essa caracterização não foi obtida com relação ao valor de referência do parâmetro, e sim quanto à faixa de liberdade que o modelo permitia que os parâmetros variassem: impacto baixo (valores abaixo de 5%); impacto leve (entre 5% e 10%); impacto moderado (entre 10% e 20%); e impacto elevado (valores acima de 20%)

A Tabela 6.1 resume os resultados obtidos para cada tipo de erro avaliado, em termos de nível de impacto, tanto no desempenho do modelo quanto no valor dos parâmetros ao usar a função de Kling-Gupta no processo de calibração. Essa função tende a apresentar um melhor ajuste aos eventos maiores, e nos casos avaliados tende a representar um pouco melhor as vazões mínimas, quando comparada a outras funções que também se ajustam melhor às máximas. Observa-se que erros aleatórios na evapotranspiração, sejam eles com distribuição uniforme ou normal, não apresentam interferência considerável sobre a eficiência do modelo em nenhuma das situações avaliadas, apesar de alguns parâmetros serem afetados, conforme pode ser observado nos Anexos. Já o erro sistemático na evapotranspiração afeta o desempenho do modelo de forma moderada na análise de sensibilidade estática e é amortecido na análise de sensibilidade dinâmica, uma vez que, a recalibração realizada na análise de sensibilidade dinâmica favorece que os erros sejam contornados através da alteração dos parâmetros do modelo. Já quando se avalia o efeito do erro na precipitação constata-se um efeito leve quando os dados estão sujeitos a erros com distribuição uniforme, passando a ser mais afetado ao se inserir erros com distribuição normal e tendo seu desempenho bastante reduzindo com a inserção de erros sistemáticos.

Tabela 6.1 - Impacto dos erros dos dados de entrada através da função objetivo Kling-Gupta

		Evapotranspiração			Precipitação		
		Ruído aleatório		Ruído sistemático	Ruído aleatório		Ruído sistemático
		Distribuição Uniforme	Distribuição Normal		Distribuição Uniforme	Distribuição Normal	
E s t á t i c a	<i>Eficiência do modelo</i>	0	0	++	+	++	+++
	<i>I0</i>	+++	+++	++	+++	+++	+++
D i n â m i c a	<i>Ib</i>	0	+	+++	0	+	+++
	<i>H</i>	+	+	+++	+++	+++	+++
	<i>Ksup</i>	+	+	+	++	++	+++
	<i>Ksub</i>	0	0	++	0	0	+++
	<i>Rmax</i>	0	0	++	0	0	+++
	α	0	+++	+++	+++	+++	+++

0: Impacto Baixo +: Impacto Leve ++: Impacto Moderado +++: Impacto Elevado

A Tabela 6.2 resume os resultados obtidos para cada tipo de erro avaliado, em termos de nível de impacto, tanto no desempenho do modelo quanto no valor dos parâmetros, ao usar a função de Nash-sutcliffe no processo de calibração. Essa função tende a apresentar um melhor ajuste aos eventos maiores, e nos casos avaliados tende a absorver melhor os efeitos dos erros quando comparada a outra função que se ajusta melhor as máximas. Observa-se que erros aleatórios na evapotranspiração, sejam eles com distribuição uniforme ou normal, não apresentam interferência considerável sobre a eficiência do modelo em nenhuma das situações avaliadas, apesar dos parâmetros I_0 e α apresentarem uma variação elevada. Já o erro sistemático na evapotranspiração afeta pouco o desempenho do modelo na análise estática e é insignificante na análise dinâmica. Ao avaliar o efeito do erro na precipitação, constata-se um efeito leve quando os dados estão sujeitos a erros com distribuição uniforme, moderado ao se inserir erros com distribuição normal e impacto elevado com a inserção de erros sistemáticos.

Tabela 6.2 - Impacto dos erros dos dados de entrada através da função objetivo Nash-Sutcliffe

		Evapotranspiração			Precipitação		
		Ruído aleatório		Ruído sistemático	Ruído aleatório		Ruído sistemático
		Distribuição Uniforme	Distribuição Normal		Distribuição Uniforme	Distribuição Normal	
E s t á t i c a	<i>Eficiência do modelo</i>	0	0	+	+	++	+++
	<i>IO</i>	++	+++	+++	+++	+++	+++
	<i>Ib</i>	0	+	+++	++	+	+++
	<i>H</i>	+	+	++	++	+++	+++
	<i>Ksup</i>	+	+	+	++	+++	+++
	<i>Ksub</i>	0	0	+	0	0	+++
	<i>Rmax</i>	0	0	+++	0	0	+++
	<i>α</i>	++	+++	+++	+++	+++	+++

0: Impacto Baixo +: Impacto Leve ++: Impacto Moderado +++: Impacto Elevado

A Tabela 6.3 resume os resultados obtidos para cada tipo de erro avaliado, em termos de nível de impacto, tanto no desempenho do modelo quanto no valor dos parâmetros ao usar a função do Desvio Quadrático Inverso no processo de calibração. Essa função apresentou-se bem no sentido de se ajustar melhor as vazões mínimas do que as outras funções avaliadas, no entanto, à medida que erros eram acrescidos o hidrograma apresentava-se bastante afetado nas máximas, de forma a alcançar valores bastante elevados. Observa-se que erros aleatórios na evapotranspiração, sejam eles com distribuição uniforme ou normal não apresentam interferência considerável sobre a eficiência do modelo em nenhuma das situações avaliadas, apesar dos parâmetros K_{sup} , R_{max} e α apresentarem uma variação considerável. Já o erro sistemático na evapotranspiração afeta moderadamente o desempenho do modelo na análise estática e de forma leve na análise dinâmica. Ao avaliar o efeito do erro na precipitação constata-se um efeito leve quando os dados estão sujeitos a erros com distribuição uniforme, moderado ao se inserir erros com distribuição normal e impacto elevado com a inserção de erros sistemáticos.

Tabela 6.3 - Impacto dos erros dos dados de entrada através da função objetivo Desvio Quadrático Inverso

		Evapotranspiração			Precipitação			
		Ruído aleatório		Ruído sistemático	Ruído aleatório		Ruído sistemático	
		Distribuição Uniforme	Distribuição Normal		Distribuição Uniforme	Distribuição Normal		
E s t á t i c a	Eficiência do modelo	0	0	++	+	+	+++	
	D i n â m i c a	Eficiência do modelo	0	0	+	+	++	+++
		$I0$	+	+	+++	++	+++	+++
		Ib	0	0	+++	0	0	+++
		H	+	++	++	+	+	++
		$Ksup$	++	++	++	+++	+++	++
		$Ksub$	0	0	+	0	0	++
		$Rmax$	+++	+++	++	+++	+++	+++
		α	+++	+++	+++	+++	++	+++

0: Impacto Baixo +: Impacto Leve ++: Impacto Moderado +++: Impacto Elevado

A Tabela 6.4 resume os resultados obtidos para cada tipo de erro avaliado, em termos de nível de impacto tanto no desempenho do modelo quanto no valor dos parâmetros ao usar a função do Desvio Relativo Médio no processo de calibração. Essa função apresentou-se também muito bem no sentido de se ajustar melhor as vazões mínimas e as médias do, sendo que o hidrograma gerado com seu uso apresentava-se bastante afetado nas máximas, de forma a alcançar valores elevados. Observa-se que erros aleatórios na evapotranspiração, sejam eles com distribuição uniforme ou normal não apresentam interferência considerável sobre a eficiência do modelo em nenhuma das situações avaliadas, bem como pouco modificam os parâmetros. Já o erro sistemático na evapotranspiração afeta de forma elevada o desempenho do modelo na análise estática e de forma leve na análise dinâmica. Ao avaliar o efeito do erro na precipitação, constata-se que a análise de sensibilidade estática conduz a um efeito elevado sobre o desempenho do modelo, enquanto que na análise de sensibilidade dinâmica, o efeito é reduzido, provavelmente, pela variação dos parâmetros $I0$ e α . Quando os dados estão sujeitos a erros sistemáticos, o modelo acaba tendo seu desempenho drasticamente afetado, acompanhado de uma variação elevada de todos os seus parâmetros calibráveis.

Tabela 6.4 - Impacto dos erros dos dados de entrada através da função objetivo Desvio Relativo Médio

		Evapotranspiração			Precipitação		
		Ruido aleatório		Ruido sistemático	Ruido aleatório		Ruido sistemático
		Distribuição Uniforme	Distribuição Normal		Distribuição Uniforme	Distribuição Normal	
E s t á t i c a	<i>Eficiência do modelo</i>	0	0	+++	++	+++	+++
	<i>D</i>						
D i n â m i c a	<i>Eficiência do modelo</i>	0	0	+	+	+	++
	<i>l0</i>	0	0	+++	+++	+++	+++
	<i>lb</i>	0	0	++	0	+	+++
	<i>H</i>	+	+	+++	+	+	+++
	<i>Ksup</i>	0	0	+	0	0	+++
	<i>Ksub</i>	0	0	+	0	0	+++
	<i>Rmax</i>	0	+	+++	0	0	+++
<i>α</i>	+	+	+++	+++	+++	+++	

0: Impacto Baixo +: Impacto Leve ++: Impacto Moderado +++: Impacto Elevado

7. CONCLUSÕES

O presente estudo teve como objetivo investigar o impacto dos erros sistemáticos e aleatórios nos dados de entrada, precipitação e evapotranspiração, sobre o desempenho do modelo hidrológico IPH II. Para alcançar tal fim foi aplicada a análise de sensibilidade estática e dinâmica. Nesse sentido foram selecionadas cinco bacias em diferentes zonas climáticas do Brasil e utilizadas quatro funções-objetivo: Coeficiente de Kling-Gupta, Coeficiente de Nash-Sutcliffe, Desvio Quadrático Inverso e Desvio Relativo Médio.

As análises para as funções-objetivos mencionadas no modelo IPH II demonstraram que ao inserir erros sistemáticos e aleatórios sobre os dados de evapotranspiração, nota-se uma diferença a depender: da região na qual a bacia hidrográfica se encontra; das dimensões da bacia; bem como da análise de sensibilidade adotada.

Através da análise de sensibilidade estática, considerando-se dados de evapotranspiração com erros, notou-se que: 1) o modelo IPH II, ajustado em bacias localizadas mais ao sul do país (Canoas, Ijuí, Itu), em geral apresentou uma pequena perda de desempenho quando utilizados dados de entrada com erros sistemáticos entre $\pm 20\%$ do valor de referência para todas as funções-objetivo avaliadas, apresentando um decaimento leve das medidas de desempenho, à medida que erros foram superiores à faixa mencionada; 2) o modelo IPH II ajustado em bacias situadas no nordeste do país (Preto e Salsa) sofreu impactos acentuados até para pequenas faixas de erro (até $\pm 10\%$), sendo que valores superiores a esse acarretam em um decaimento abrupto das medidas de desempenho, sendo este decaimento mais marcado para subestimativas da evapotranspiração, quando avaliadas as funções-objetivo do coeficiente de Kling-Gupta, coeficiente de Nash-Sutcliffe, e Desvio Relativo Médio e na superestimativa quando a medida de desempenho é descrita pela função-objetivo do Desvio Quadrático Inverso; 3) erros aleatórios, sejam eles com distribuição uniforme ou normal sobre os dados de evapotranspiração, não afetaram o desempenho do modelo IPH II, indicando que a estimativa geral da evapotranspiração resultou mais importante para o modelo que os valores pontuais desta variável.

Ao considerar a análise de sensibilidade dinâmica, quando os dados de evapotranspiração estão submetidos ao efeito de erros sistemáticos e aleatórios percebem-se os seguintes aspectos: 1) o modelo IPH II consegue contornar erros sistemáticos na evapotranspiração em praticamente toda a faixa analisada, sendo que um leve efeito é sentido nas medidas de desempenho ao considerar subestimativas elevadas da evapotranspiração nas bacias nordestinas, o que pode ser traduzido em valores do coeficiente de multiplicação inferiores a 0,7. Isto indica que, dependendo da bacia hidrográfica analisada, mesmo com a alteração dos parâmetros, as medidas de desempenho passam a ser afetadas, devido a não conseguir representar o excedente hídrico; 2) erros aleatórios sejam eles com distribuição uniforme ou normal são contornados pelo modelo IPH II, o qual mantém seu desempenho praticamente inalterado. A avaliação do efeito de erros aleatórios permitiu concluir que o modelo IPH II apresentou-se praticamente insensível aos erros aleatórios na evapotranspiração em todas as funções-objetivo utilizadas. Na análise de sensibilidade dinâmica, tem-se que os parâmetros do modelo apresentaram algumas variações, as quais certamente contribuíram para que o valor da função objetivo não fosse impactado em nenhuma das funções-objetivo testadas.

As análises das medidas de desempenho no modelo IPH II, ao inserir erros sistemáticos e aleatórios sobre os dados de precipitação, apresentaram impactos mais consideráveis. Em geral, para todas as funções-objetivo testadas ao se inserir erros sistemáticos e aleatórios sobre os dados de precipitação, nota-se um comportamento diferenciado, devido à análise de sensibilidade adotada.

Através da análise de sensibilidade estática, considerando dados de precipitação sobre o efeito de erros, notou-se que: 1) grande parte dos modelos ajustados às bacias hidrográficas analisadas não consegue manter o desempenho quando utilizados dados de entrada com erros sistemáticos, sofrendo uma perda de eficiência considerável nas medidas de desempenho, sendo esse efeito mais notório nas funções-objetivo do coeficiente de Kling-Gupta e do coeficiente de Nash-Sutcliffe, tanto para subestimativas quanto para sobrestimativas, em subestimativas quando o desempenho do modelo é avaliado pelo Desvio Quadrático Inverso; e em sobrestimativas quando o desempenho é avaliado pelo Desvio Relativo Médio; 2) erros aleatórios sejam eles com distribuição uniforme ou normal sobre os dados de precipitação afetam o desempenho do modelo IPH

II em intensidades superiores a 0,4, sendo que erros com distribuição normal tendem a ser mais importantes quando comparados a erros com distribuição uniforme.

Ao considerar a análise de sensibilidade dinâmica, quando os dados de precipitação estão sobre o efeito de erros sistemáticos e aleatórios, notam-se os seguintes pontos: 1) o modelo IPH II consegue amortecer o efeito dos erros sistemáticos, no entanto para grande parte das bacias hidrográficas, subestimativas elevadas da precipitação impactam fortemente o desempenho do modelo quando comparadas as sobrestimativas, fato esse que pode ser explicado pela incapacidade do modelo em produzir água, e assim, mesmo à alteração dos parâmetros realizada na análise de sensibilidade dinâmica não consegue representar bem o déficit hídrico 2) erros aleatórios sejam eles com distribuição uniforme ou normal são contornados pelo modelo IPH II, apesar de produzir pequenos efeitos sobre as medidas de desempenho do coeficiente de Kling-Gupta e do coeficiente de Nash-Sutcliffe quando a intensidade do erro assume valores superiores a 0,3; bem como praticamente não afeta o desempenho do modelo ao considerar as funções-objetivo do Desvio quadrático Inverso e do desvio Relativo Médio. Nesse sentido, erros sistemáticos na precipitação apresentam-se como os que agregam o maior impacto sobre as medidas de desempenho avaliadas. Devido a ser contemplado em uma faixa grande (metade e o dobro do valor de referência), seu impacto sobre o desempenho do modelo IPH II torna-se bastante acentuado. Essa situação pode ser entendida, pela diferença de magnitude entre os dados de precipitação e evapotranspiração, pois, alterações na precipitação serão mais sentidas nas medidas de desempenho por ser em escala maior quando comparadas as mesmas alterações nos dados de evapotranspiração. Portanto, é possível ressaltar que a análise de sensibilidade estática produz um maior impacto sobre a eficiência do modelo quando comparado à análise de sensibilidade dinâmica. Essa situação é esperada, uma vez que um novo processo de calibração é executado para cada conjunto de dados de entrada na análise de sensibilidade dinâmica, permitindo que o modelo consiga amenizar os efeitos dos erros sobre as medidas de desempenho com a alteração dos valores dos parâmetros do modelo.

A falta de consenso sobre os tipos de testes utilizados para avaliar os impactos de erros dos dados de entrada sobre o desempenho dos modelos hidrológicos e na determinação dos parâmetros é um fator limitante para comparar resultados, de forma que, atento a isso o presente estudo adotou a mesma metodologia proposta por Oudin et

al. (2006), conseguindo diferenciar-se deste ao analisar uma maior quantidade de dados sobre efeito do mesmo erro bem como diferentes funções-objetivo. Apesar de o modelo analisado ser diferente, foi possível chegar a conclusões semelhantes a dos referidos autores conforme descrito anteriormente.

Outra consideração importante é refletida na disponibilidade de dados e na localização da bacia. Apesar do tamanho das séries serem distintas, o impacto dos erros sobre as funções-objetivo avaliadas tendem a seguir comportamentos semelhantes. Por outro lado, a localização da bacia, bem como seu tamanho e forma apresentam-se com certa relevância no presente estudo, aja visto a diferença entre os resultados encontrados em bacias hidrográficas com características distintas quanto a localização, forma e tamanho.

As considerações feitas até aqui demonstraram que o modelo IPH II consegue contornar erros de superestimativa da precipitação ou subestimativa de evapotranspiração para grande parte das bacias hidrográficas analisadas, já a situação contrária apresenta-se mais complicada, dado que subestimativas da precipitação bem como a superestimativa de evapotranspiração tem maior impacto no desempenho do modelo, em função deste não ter a capacidade de criar água através de algum de seus parâmetros, o que amenizaria o impacto sobre a medida de desempenho, mas não descreveria o processo físico real ao passo em que a água que entraria no sistema não teria origem definida, sendo apenas uma forma de encobrir erros que viessem a ocorrer na obtenção dos dados de evapotranspiração e precipitação. Essa situação deixa claro que os parâmetros do modelo interferem significativa no desempenho deste, sendo uma importante diferença entre as análises de sensibilidade estática e dinâmica, as quais são motivo de diferenças em estudos anteriores.

Por fim, o presente estudo confirma os resultados apresentados em estudos anteriores descritos ao longo desse texto e aponta para outros fatores, na medida em que, percebe-se a tendência do desempenho do modelo cair quando a intensidade do erro gerado é elevada, mas indica que erros aleatórios com intensidades menores também podem causar impactos maiores, caso ocorram no sentido de minimizar eventos extremos de forma mais acentuada, do que erros aleatórios com intensidades maiores sobre o mesmo evento e que não atinjam de forma semelhante. Ainda, a aparente divergência entre alguns autores sobre o modelo ser afetado de forma mais acentuada ou não por erros

nos dados de entrada está associado à metodologia empregada na análise de sensibilidade. Conforme observado neste trabalho, na análise de sensibilidade estática o desempenho do modelo IPH II é mais afetado pelos erros nos dados de entrada, quando comparado à análise dinâmica, no qual novos valores dos parâmetros são estimados por calibração para cada conjunto de dados com erros, amortecendo o impacto sobre o resultado da função-objetivo. Por fim, vale ressaltar a diferença entre as áreas das bacias hidrográficas analisadas, as quais podem também explicar as diferenças encontradas nas perdas de desempenho das funções-objetivo analisadas.

8. RECOMENDAÇÕES

Na realização do presente estudo alguns aspectos importantes de natureza técnica foram notados, os quais podem ser avançados em estudos futuros, são eles:

- ✓ Comparação da utilização das normais climatológicas, Penman, Penman-Monteith, Priestley-Taylor, Thornthwaite, Hargreaves, Oudin para a definição evapotranspiração no IPH II, de forma a compreender os efeitos de cada método sobre a eficiência do modelo, uma vez que o presente estudo demonstrou que erros nos dados de evapotranspiração são contornados pelo IPH II. Nesse sentido, é interessante verificar a necessidade do uso de métodos complexos na obtenção dos dados de evapotranspiração, quando métodos mais simples permitiriam as mesmas conclusões;
- ✓ Escolher locais bem monitorados, que permitam a utilização de outros métodos no cálculo da precipitação média sobre a bacia, uma vez que o presente estudo se limitou a utilizar dados de precipitação oriundos da média aritmética entre os postos localizados no entorno das bacias hidrográficas. Desse modo, é válido verificar qual método de interpolação de valores pontuais permite uma boa estimativa do comportamento espacial;
- ✓ Avaliar a aplicação do IPH II em diferentes regiões do país considerando as áreas das bacias hidrográficas, ao passo em que o presente estudo já aponta efeitos significativos sofridos por bacias hidrográficas que apresentam menor e maior escoamento superficial, fato esse que está relacionado às características climáticas e do uso e ocupação do solo da região em estudo, bem como com a área destas;
- ✓ Contemplar a análise de incerteza do modelo e dos parâmetros, uma vez que o presente estudo se ateve à análise de sensibilidade. Sendo a análise de sensibilidade um

subitem da análise de incerteza, seria interessante obter as distribuições de probabilidades das saídas do modelo, bem como do desempenho deste;

✓ Avaliar os fatores que contribuem com uma melhor calibração, uma vez que, no presente estudo, notou-se que as melhores calibrações foram obtidas em bacias hidrográficas nas quais a precipitação apresentava uma menor permanência em relação ao período considerado, com relação as bacias hidrográficas que apresentaram calibrações com um menor desempenho. Nesse sentido, pode-se avaliar a dependência do escoamento de base, bem como verificar para outras bacias a permanência das chuvas e assim tirar conclusões mais precisas

9. REFERÊNCIAS

- Ad Hoc Panel on Hydrology (AHPH). **Scientific hydrology**. U.S. Federal Council for Science and Technology. Washington, D. C. Junho, 1962.
- AITKEN, A. P. Assessing systematic errors in rainfall-runoff models. **Journal of Hydrlogy** . pg. 121-136. 1973.
- AGUIRRE, L. A.; RODRIGUES, G. G.; JÁCOME, C. R. F. Identificação de sistemas não-lineares utilizando modelos NARMAX polinomiais – uma revisão e novos resultados. **SBA Controle e automação**. Volume 9, nº2. 1998.
- AGUIRRE, L. A. A tutorial introduction to nonlinear dynamics and chaos, part II: Modeling and control. **SBA Controle e Automação**. Volume 7, nº 1. 1996.
- ALEXANDRE, A. M. B. Modelagem hidrológica para o estado de Roraima. **Simpósio de Recursos Hídricos do Sul**. São Paulo. 2008.
- ALLASIA, D. G.; VILLANUEVA, A. O. N. Análise da sensibilidade da vazão e custo a erros na estimative de parâmetros de metodologias de simulação chuva-vazão em áreas urbanas. **XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. 2003
- ANDRÉASSIAN, V.; PERRIN, C.; MICHAEL, C. Impact of imperfect potential evapotranspiration knowledge on the efficiency and parameters of watershed models. **Journal of Hydrology**. Pg. 19-35. 2004.
- ANTUNES, M. L. **Sensibilidade e otimização dos parâmetros de um modelo pluvio-hidrométrico**. Dissertação de Mestrado. IPH/UFRGS. 1980.
- BOITEN, W. **Hydrometry: A comprehensive introduction to the measurement of flow in open channels**. 3° edition. Wageningen University, the Netherlands. UNESCO-IHE Institute for Water Education, Delft, The Netherlands. 2008.
- 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 (RBRH)**. Volume 14. Pg. 37-50. 2009.
- BRAVO, J.M.; ALLASIA, D. G.; COLLISCHONN, W.; TASSI, R.; MELLER, A.; TUCCI, C. Avaliação visual e numérica do modelo hidrológico IPH II com fins educacionais. **XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. 2007.
- BRAVO, J.M.; ALLASIA, D.; TASSI, R.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. **WIN_IPH2**. IPH/UFRGS. 2006.

BRUN, G. W.; TUCCI, C. E. M. Previsão em tempo real do volume afluente ao reservatório de Ernestina. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH)**. Volume 6, nº2. Pg. 73-79. 2001.

BUCHANERI, V. C. **Geração da série histórica de vazão por meio do modelo SMAP: subsídio para o plano de manejo da bacia do rio Grande de Ubatuba**. Dissertação de Mestrado. ESALQ/USP. 2004.

BUENO. **Estudos Climáticos: Evapotranspiração**. Instituto Federal Goiano. 2012.

CABRAL, P. **Erros e Incertezas nas medições**. IEP/ISEP. 2004

CADIER, E.; LANNA, A. E.; MENEZES, M.; CATNPELLO, M. S. Avaliação dos estudos referentes aos recursos hídricos das pequenas bacias do nordeste brasileiro. **Anais do VII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. ABRH**. Vol 2, pg. 225-239. 1987.

CARVALHO, T.; REIS, D. S. JR. Avaliação da influência dos dados de evapotranspiração potencial no desempenho de modelos hidrológicos em bacias do semiárido cearense. In: **Anais do IX Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**. Salvador/Ba. 2008.

CHOW, V. T. Hydrology and its development. In: CHOW, V. T. **Handbook of Applied Hydrology: A Compendium of Water Resources Technology**. McGraw-Hill. 1964.

COLLISCHONN, W.; TASSI, R. **Introduzindo Hidrologia**. Apostila, versão 8. IPH/UFRGS. 2011.

COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. Tese de Dissertação. IPH/UFRGS. 2001.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Calibração automática global do modelo IPH-2. **XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. 2001.

DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. **Water Resources Research** 28(4), pp. 1015-1031. 1992.

ESCARIÃO, R. D.; MONTENEGRO, S. M. G. C.; AZEVEDO, J. R. G.; NETO, A. R. Influência do modelo hidrológico na avaliação da sensibilidade dos recursos hídricos a cenários de mudanças climáticas em região semiárida. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH)**. Volume 17, nº3. 2012.

FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. Ferramenta Facilitadora do Trabalho com Dados Hidrológicos Disponibilizados pela ANA. **IX Mostra Científica Internacional. UNIPAMPA, PUCRS e Universidad de La Cuenca del Plata**. Uruguaiana – RS, Brasil. 2009.

GERMANO, A.; TUCCI, C.; SILVEIRA, A. L. L. Estimativa dos parâmetros do modelo IPH II para algumas bacias urbanas brasileiras. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH)**. Vol. 3, n°4. Pg. 103-120. 1998.

GUPTA, H. V.; KLING, H.; YILMAZ, K. K. MARTINEZ, G. F. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modeling. **Journal of Hydrology**. Pg 80-91. 2009.

HALL, J. M.; BOYCE, S. A.; WANG, Y.; DAWSON, R. J.; TARANTOL, S.; SALTELLI, A. Sensitivity analysis for hydraulic models. **Journal of Hydraulic Engineering**. 2009.

KAVETSKI, D; FRANKS, S. W.; KUCZERA, G. **Confronting input uncertainty in environmental modeling**. In: DUAN, Q.; GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S.; ROUSSEAU, A. N.; TURCOTTE, R. (EDs.). **Calibration of Watershed Models**. Vol. 6. Water Science and Application. American Geophysical Union, Washington D. C. pg. 49-68. 2003.

KLEIDORFER, M.; DELETIC, A.; FLETCHER, T. D.; RAUCH, W. Impact of input data uncertainties on stormwater model parameters. **11° International Conference on Urban Drainage**, Edinburgh, Scotland, UK. 2008.

LIMA, C.R.A. **Teoria de erros: Medidas e gráficos**. UFJF. 2010.

LOUCKS, D. P.; BEEK, E. Water Resources Systems, Planning and Management: An Introduction to Methods, Models and Applications. **Studies and Reports in Hydrology**, UNESCO. 2005.

MARINHO, G. M. F.; ANDRADE, R. S.; ZUKOWSKI, J. C.; FILHO, L. n. L. M. Modelos hidrológicos: Conceitos e aplicabilidades. **Revista de Ciências Ambientais**. Volume 6, n° 2. Pg 35-47. 2012.

MERRIAM-WEBSTER editorial staff. **Webster's third new international dictionary of the English language, Unabridged**. G. e C. Merriam Company, Springfield, Mass. 1961.

MINE, M. R. M. **Método determinístico para minimizar o conflito entre gerar energia e controlar cheias**. Tese de Doutorado. IPH/UFRGS. Porto Alegre, 1998.

OBREGON, E.; TUCCI, C. E. M.; GOLDENFUM, J. A. Regionalização de vazões com base em séries estendidas: bacias afluentes a lagoa Mirim, RS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH)**. Volume 4, n°1. 1999.

O'DONELL, T.; CANEDO, P. The reliability of conceptual basin model calibration. **Oxford Symposium**. Publ. N°29. 1980.

OLIVEIRA, L. F. C.; FIOREZE, A. P.; MEDEIROS, A. M. M.; SILVA, M. A.S. Comparação de metodologias de preenchimento de falhas de séries históricas de precipitação pluvial anual. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Vol. 14, nº 11. 2010.

LOUDIN, L.; PERRIN, C.; MATHEVET, T.; ANDRÉASSIAN, V.; MICHEL, C. **Impact of biased and randomly corrupted inputs of efficiency and the parameters of watershed models**. Journal of Hydrology 320. Pg. 62-83. 2006.

PAZ, A. R.; BUENO, E. O.; TUCCI, C. E. M. Análise de metodologias de previsão de vazões em tempo real. Estudo de caso: Bacias do rio Doce (MG) e do rio Uruguai (RS). **II Simpósio de Recursos Hídricos do Centro-Oeste**. Campo Grande. 2002.

RENNÓ, C. D. **Construção de um sistema de análise e simulação hidrológica: aplicação a bacias hidrográficas**. Tese de doutorado. INPE. 2004.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. **Modelos hidrológicos para gestão ambiental**. Relatório Técnico Parcial. Ministério da Ciência e Tecnologia. 2000

SALLES, L. A. **Calibração e validação do modelo swat para a previsão de vazões na bacia do ribeirão Pípirapau**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. 2012.

SANTOS, L.L. Modelos hidráulicos-hidrológicos: Conceitos e aplicações. **Revista Brasileira de Geografia e Física (RBGF)**. Vol. 2, nº3. 2009.

SANTOS, E. S. **Caracterização da interceptação, da precipitação e do escoamento superficial em diferentes tipologias vegetais na bacia hidrográfica do rio Salomé-Ba**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC). 2007.

SCHWARZ, TOBIAS. WWW.AMBIWEB.DE. Dados climáticos.

SHUTTLEWORTH, W. J. **Evaporation**. In: MAIDMENT, D. R. **Handbook of Hydrology**. McGraw-Hill. Pg. 4.1-4.53.1993.

SILVEIRA, G.M. **Análise de sensibilidade de hidrogramas de projeto aos parâmetros de sua definição indireta**. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo. 2010

SILVA, R. V.; KOBAYAMA, M. **Topmodel: teoria integrada e revisão**. Editora UFPR. Nº14, pg 97-110. Curitiba, 2007.

SILVA, V. S. V. **Estimativa de precipitação pontual em diferentes escalas para uso em modelo concentrado chuva-vazão**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2011.

SOROOSHIAN, S; GUPTA, V. K. Model calibration In: Singh, V. J. (editor) Computer models of watershed hydrology. **Water resources publications**, Highlands Ranch. 1130 pg. 1995.

- STUDART, T. M. C. **Hidrologia Aplicada**. UFC. 2006.
- TAMIOSSO, M.F. **Avaliação do método Silveira com uso de dois modelos chuva-vazão para estimativa de disponibilidade hídrica em pequenas bacias com pequena amostragem de vazão**. Dissertação de Mestrado. Santa Maria. UFSM. 2012.
- TASSI, R.; BRAVO, J. M. MELLER, A.; COLLISCHONN, W. Avaliação do impacto de diferentes funções-objetivo na calibração automática do modelo hidrológico IPH II. **XXII Congresso Latino Americano de Hidráulica. Guayana**. 2006.
- TEIXEIRA, R. F. B. Índice de água precipitável da atmosfera a partir dos canais 4 e 5 do AVHRR-NOAA. **XI SBSR**. Pg. 1227-1331. Belo Horizonte. 2003.
- TUCCI, C. E. M.; SILVEIRA, A. L. L [et al]. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 4º Edição, Editora UFRGS. ABRH. 2009.
- TUCCI, C.E.M. **Modelos hidrológicos**. 2º ed. Porto Alegre. Ed. da UFRGS: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2005.
- TUCCI, C.E.M. **Modelos hidrológicos**. 1º ed. Porto Alegre. Ed. da UFRGS: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1998.
- TUCCI, C.E.M; CAMPANA, N. A. Simulação distribuída com IPH II: Nova Versão. In: **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Anais: ABRH, IPH. Volume nº 3, pg. 495-504. Porto Alegre. 1993
- TUCCI, C. E. M.; SANCHEZ, J.; SIMÕES LOPES. Modelo matemático precipitação-vazão IPH II. **Publicação Recursos Hídricos** nº 3. IPH/UFRGS. 1981.
- VAN GRIENSVEN, A.; MEIXNER, T. GRUNWALD, S.; BISHOP, T.; DILUZIO, M.; SRINIVASAN, R. A global sensitivity analysis toll for the parameters of multi-variable catchment models. **Journal of Hydrology**. Pg. 10-23. 2006.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). **Guide to hydrological practices: Data acquisition and processing, analysis, forecasting and other applications**. WMO nº 168. Fifth edition, 1994.
- XAVIER, L. N. R. **Análise da incerteza causada pela representação da precipitação no modelo TOPMODEL**. Tese de doutorado. COPPE/UFRJ. 2002.
- XU, C. Y.; VANDEWIELE, G. L. Sensitivity of monthly rainfall-runoff models to input erros and data lenght. **Hydrological Sciences Journal**. Pg 157-176. 1994.
- YAPO, O. P.; GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S. Automatic calibration of conceptual rainfall – runoff mmodels: sensitivity to calibration data. **Journal of Hydrology**. Pg. 23-48. 1996.

10. ANEXO I – Bacia do rio Preto

O presente tópico apresenta os resultados obtidos com a análise de sensibilidade estática e dinâmica para a bacia do rio Preto.

Análise de sensibilidade estática

Figura 10.1 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objetivo, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal nos dados de evapotranspiração para a bacia do rio Preto devido a análise de sensibilidade estática.

Evapotranspiração

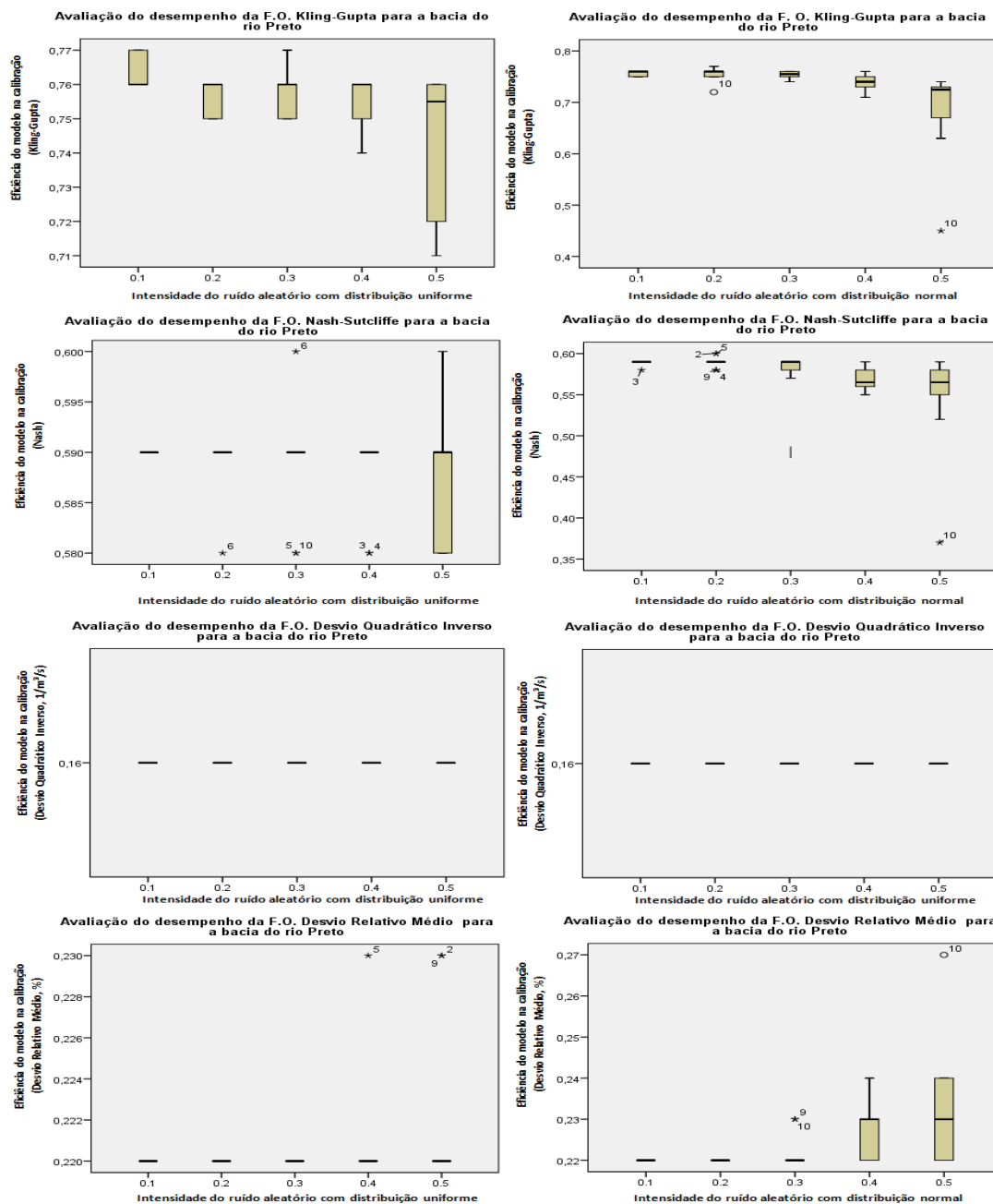
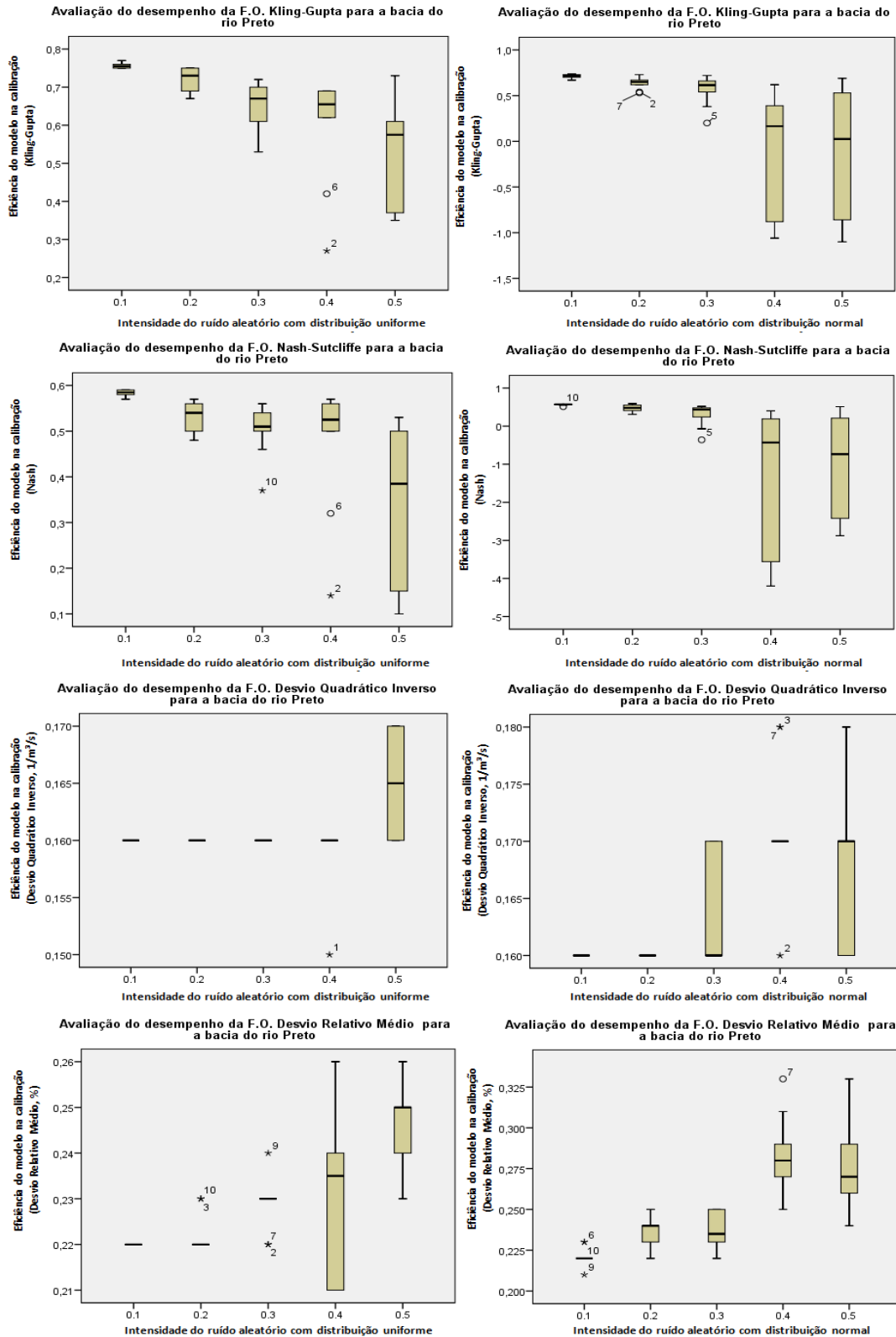


Figura 10.2 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objetivo, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal nos dados de precipitação para a bacia do rio Preto devido a análise de sensibilidade estática.

Precipitação



Análise de sensibilidade dinâmica

Figura 10.3 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objetivo, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal nos dados de evapotranspiração para a bacia do rio Preto devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Evapotranspiração

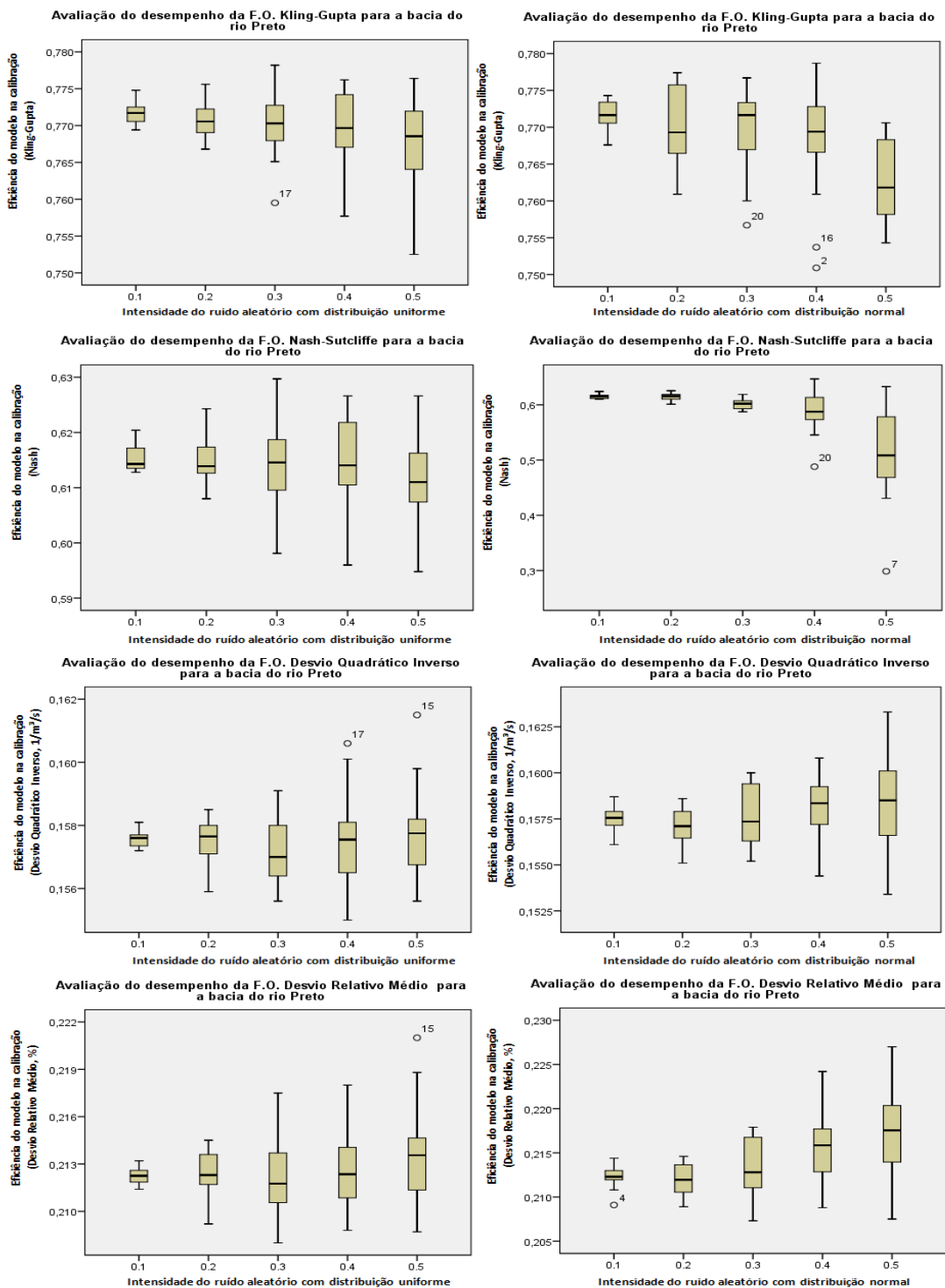
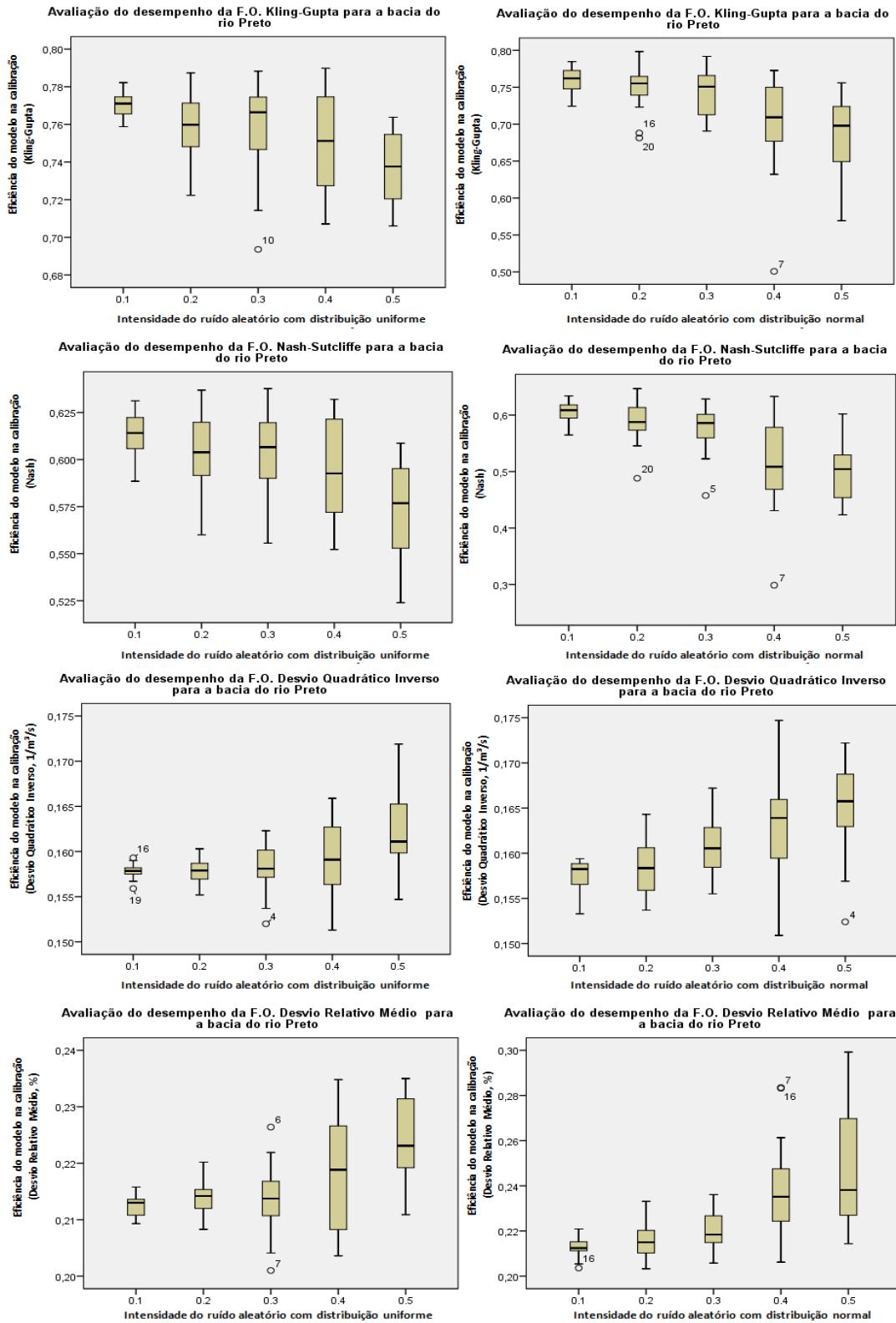


Figura 10.4 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objetivo, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal nos dados de precipitação para a bacia do rio Preto devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Precipitação



Impacto dos erros nos dados de entrada nos parâmetros do modelo em diferentes funções objetivo

Figura 10.5 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Kling-Gupta para a bacia do rio Preto devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Evapotranspiração

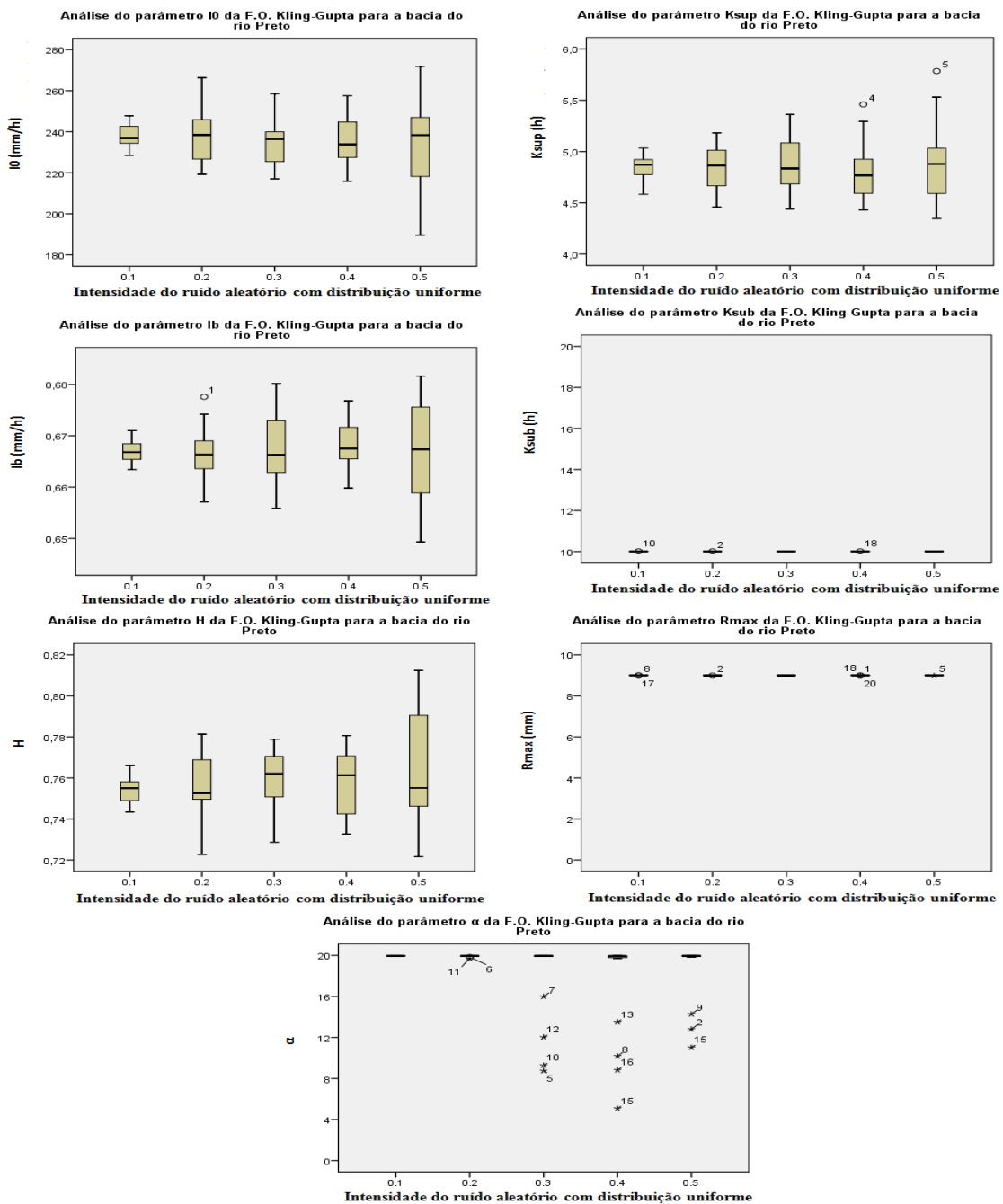


Figura 10.6 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Kling-Gupta para a bacia do rio Preto devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Evapotranspiração

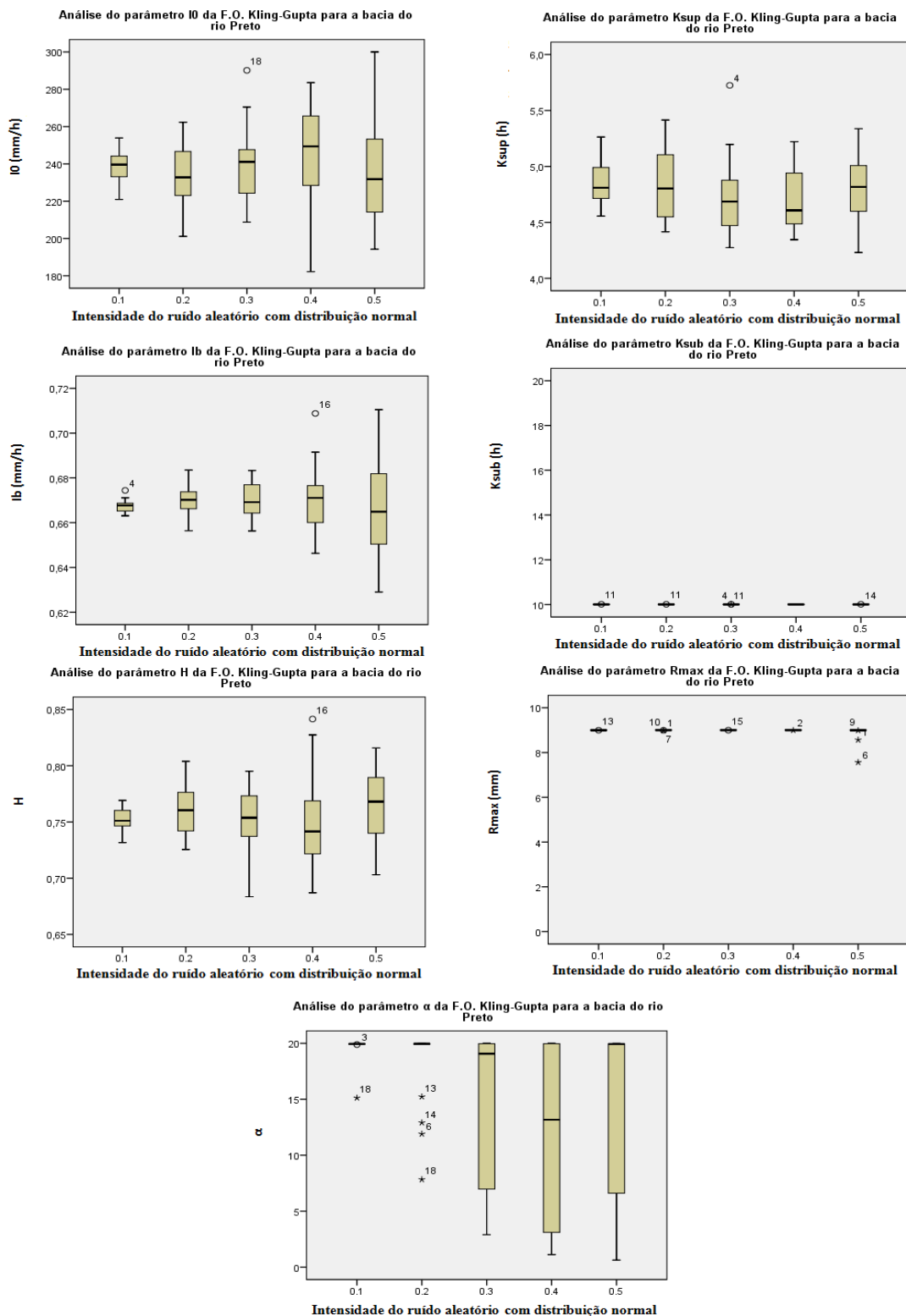


Figura 10.7 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Kling-Gupta para a bacia do rio Preto devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Precipitação

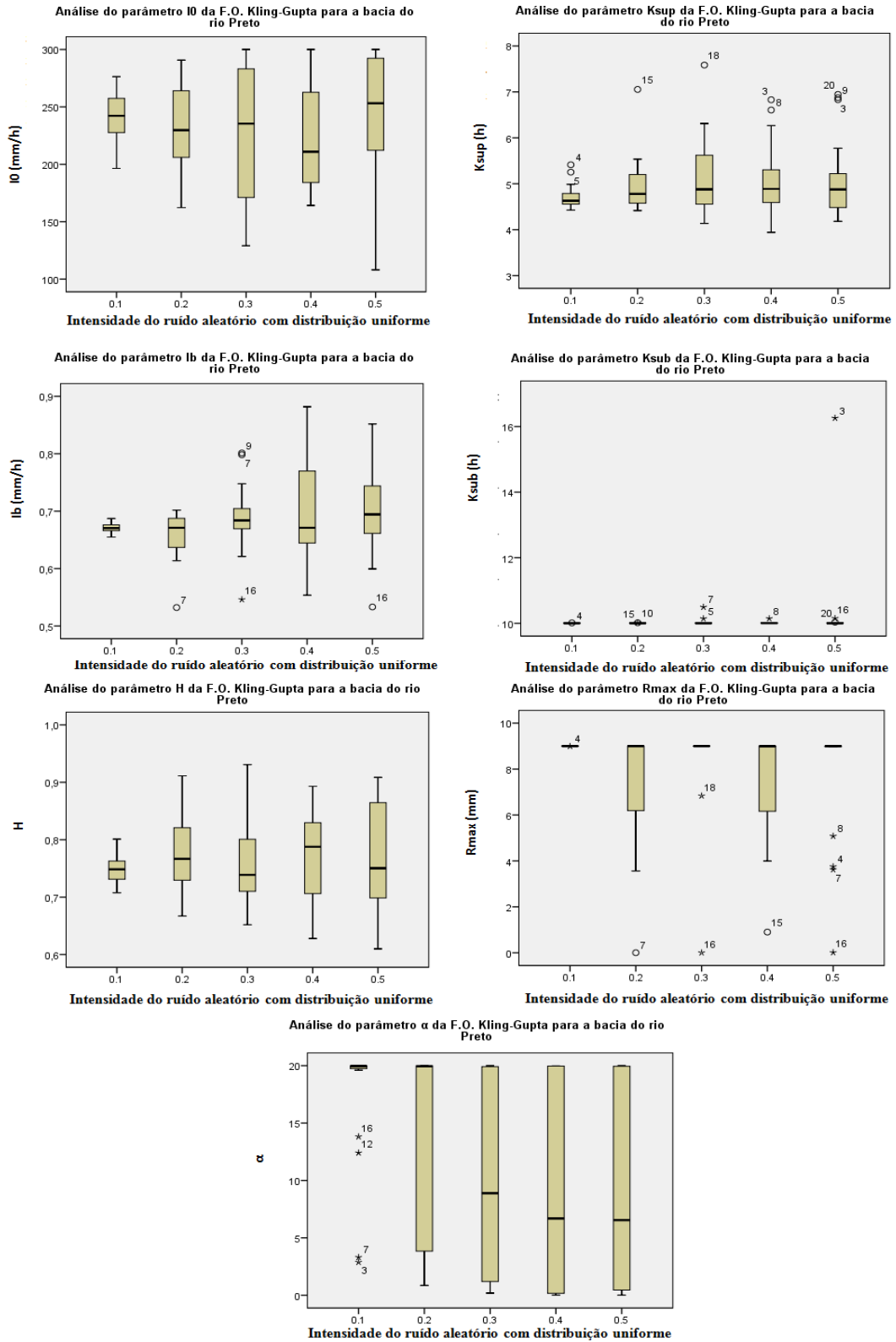


Figura 10.8 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Kling-Gupta para a bacia do rio Preto devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Precipitação

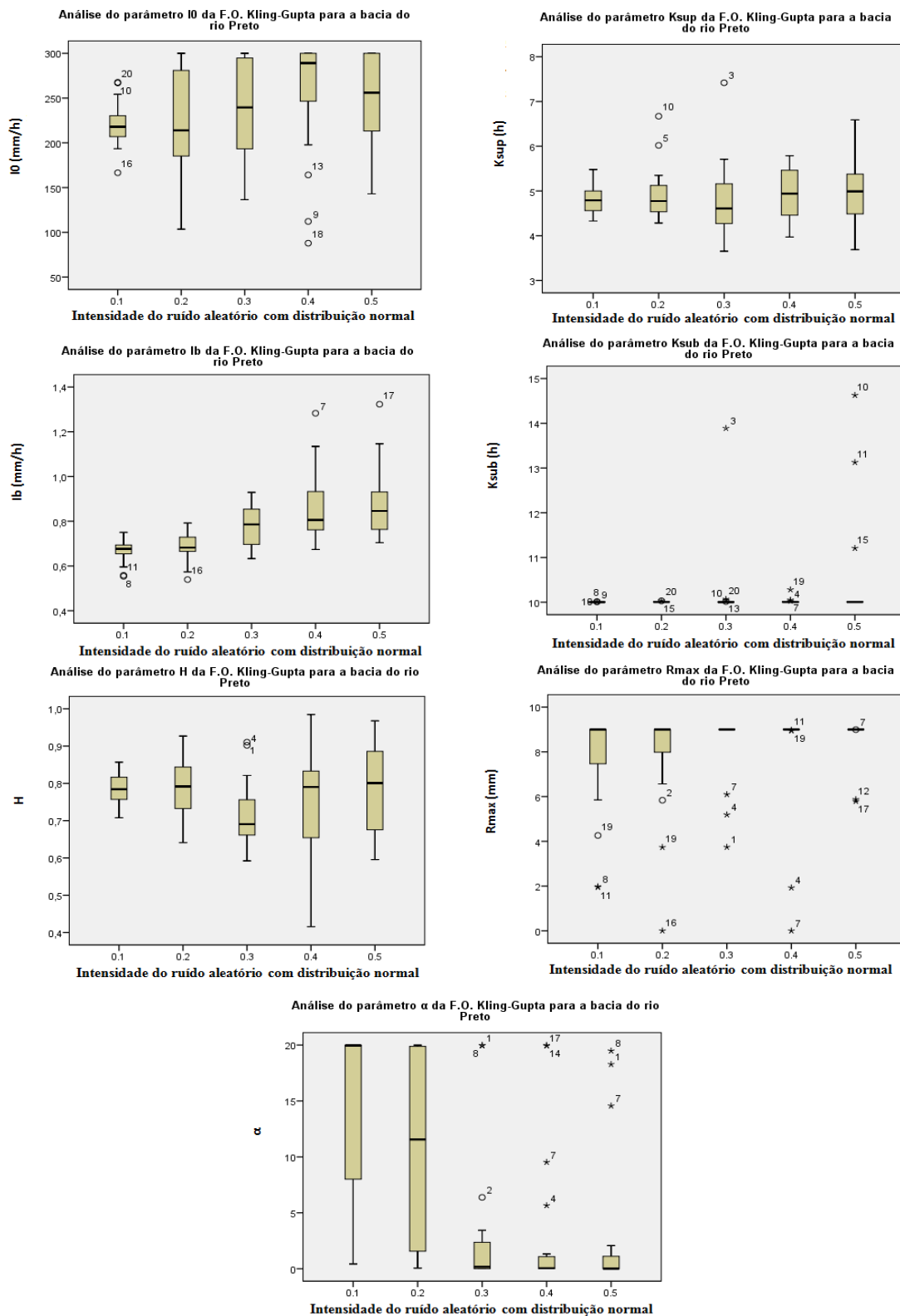


Figura 10.9 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Nash-Sutcliffe para a bacia do rio Preto devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Evapotranspiração

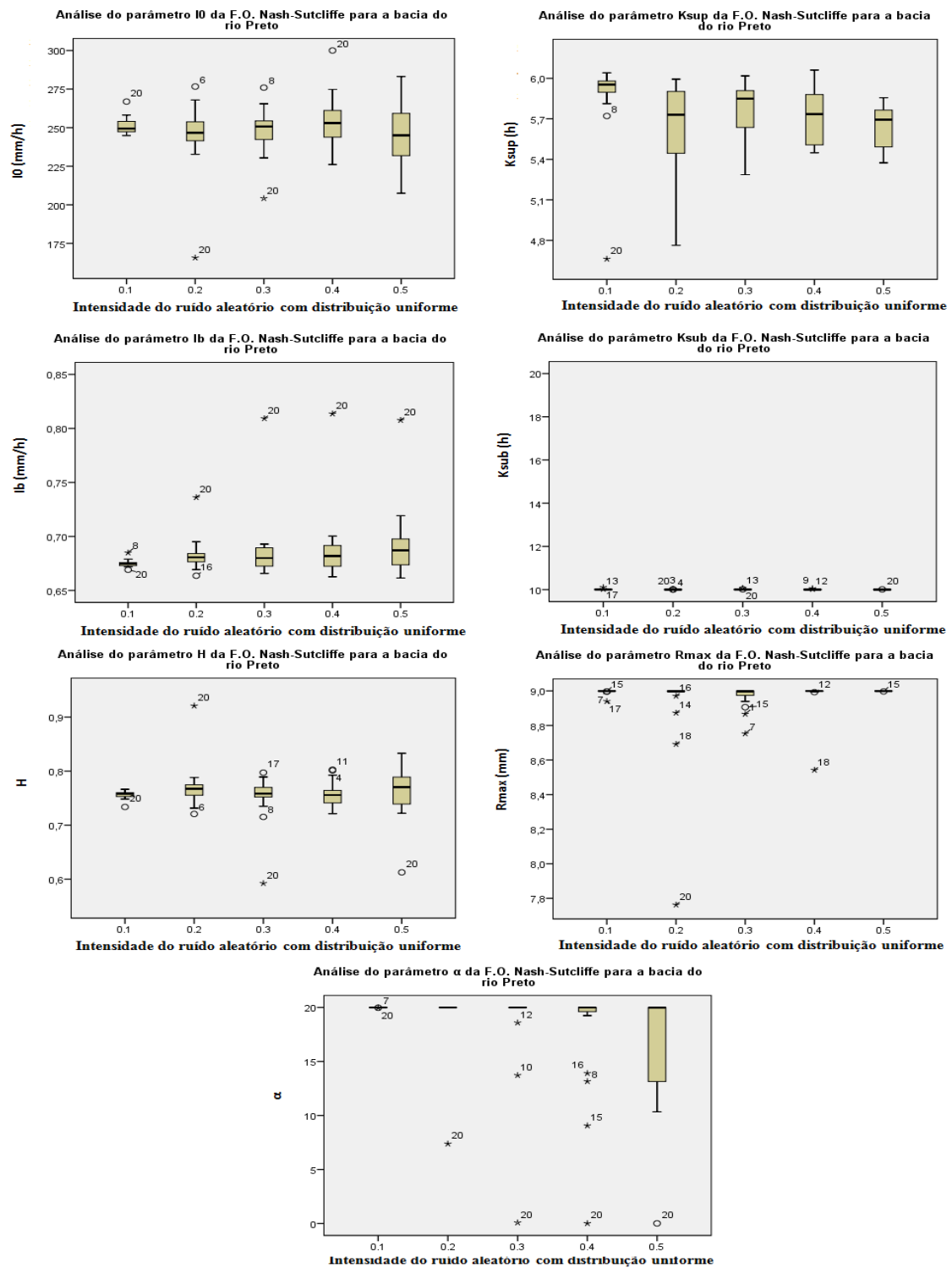


Figura 10.10 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Nash-Sutcliffe para a bacia do rio Preto devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Evapotranspiração

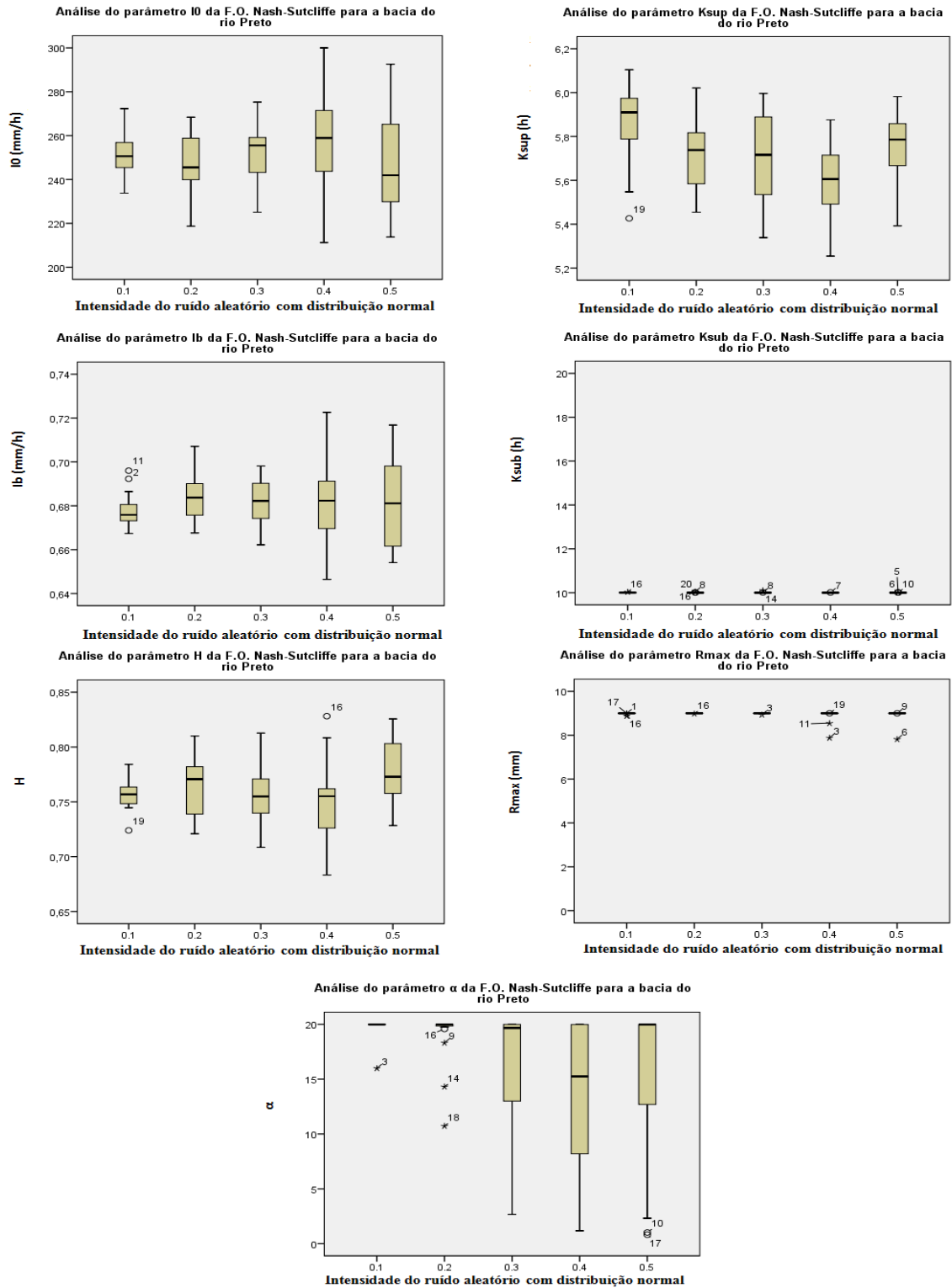


Figura 10.11 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Nash-Sutcliffe para a bacia do rio Preto devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Precipitação

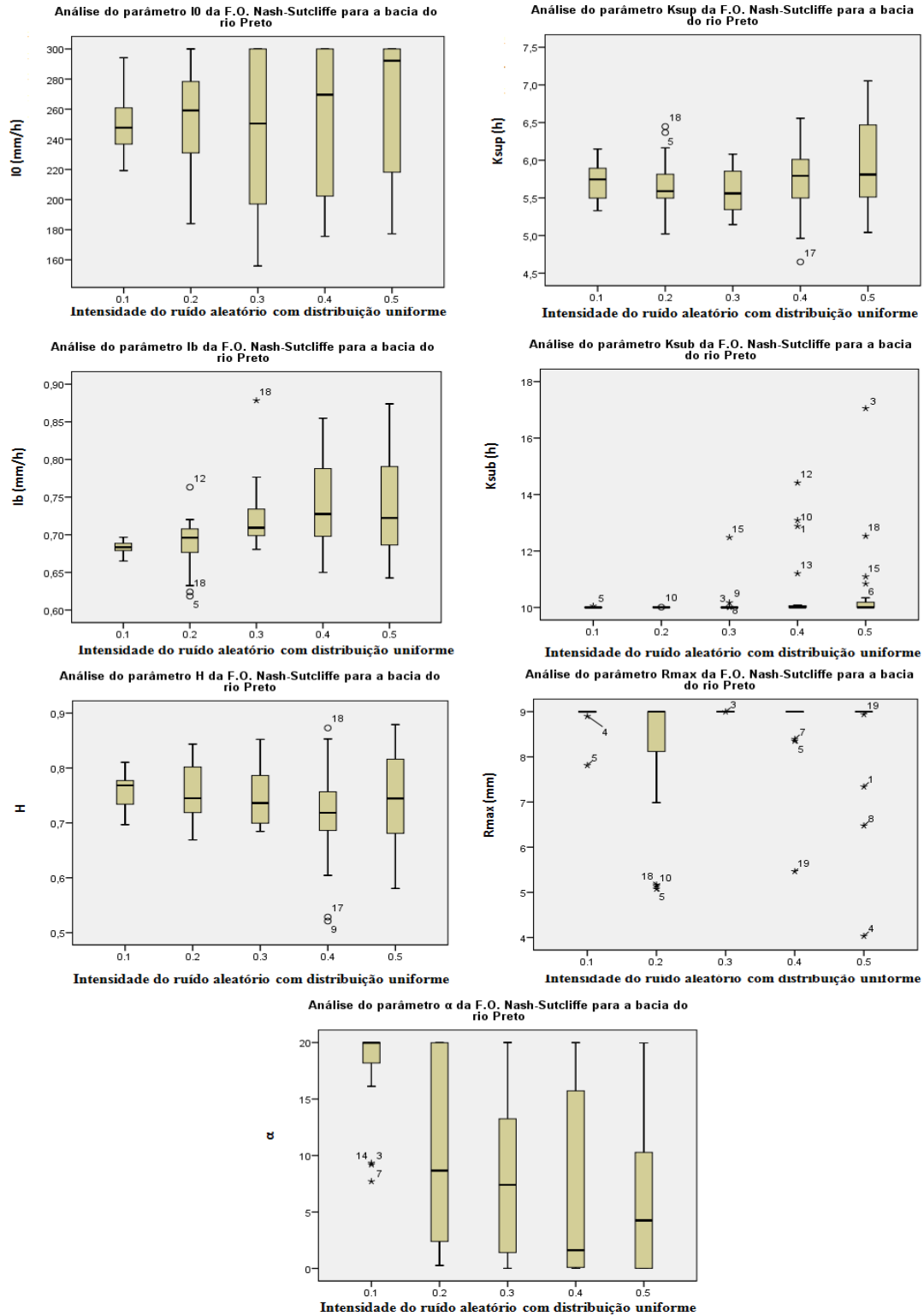


Figura 10.12 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Nash-Sutcliffe para a bacia do rio Preto devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Precipitação

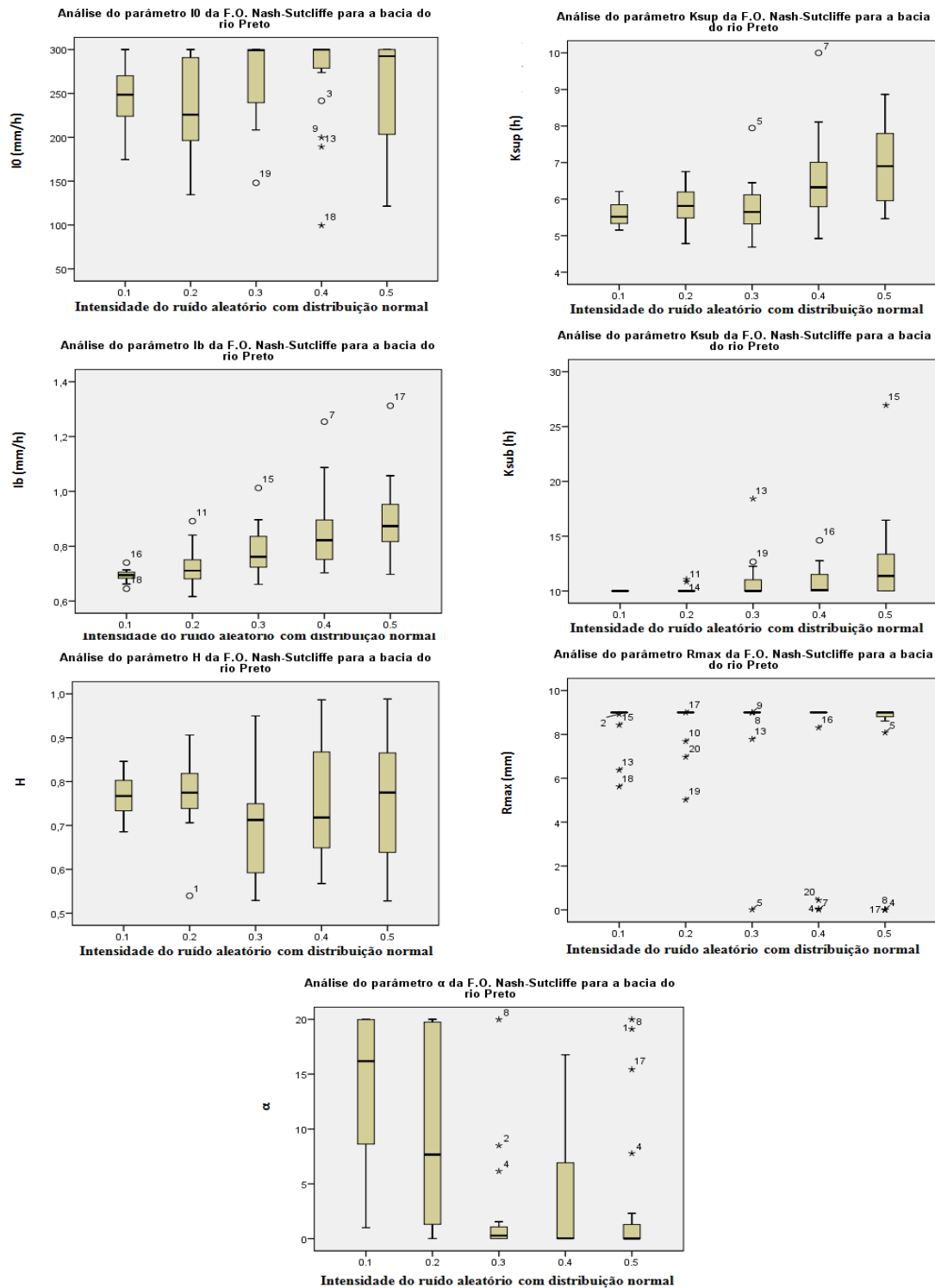


Figura 10.13 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Quadrático Inverso para a bacia do rio Preto devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Evapotranspiração

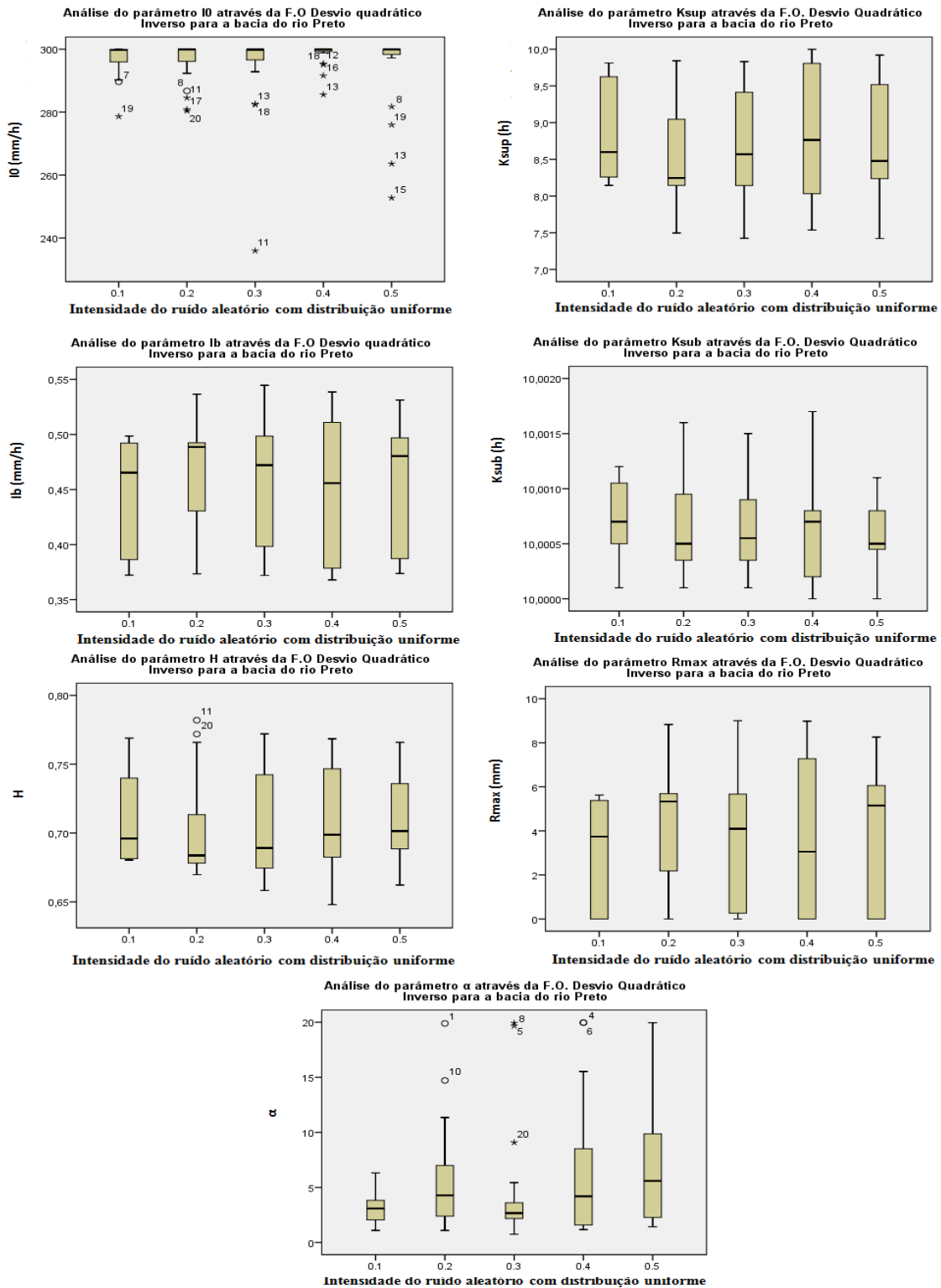


Figura 10.14 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Quadrático Inverso para a bacia do rio Preto devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Evapotranspiração

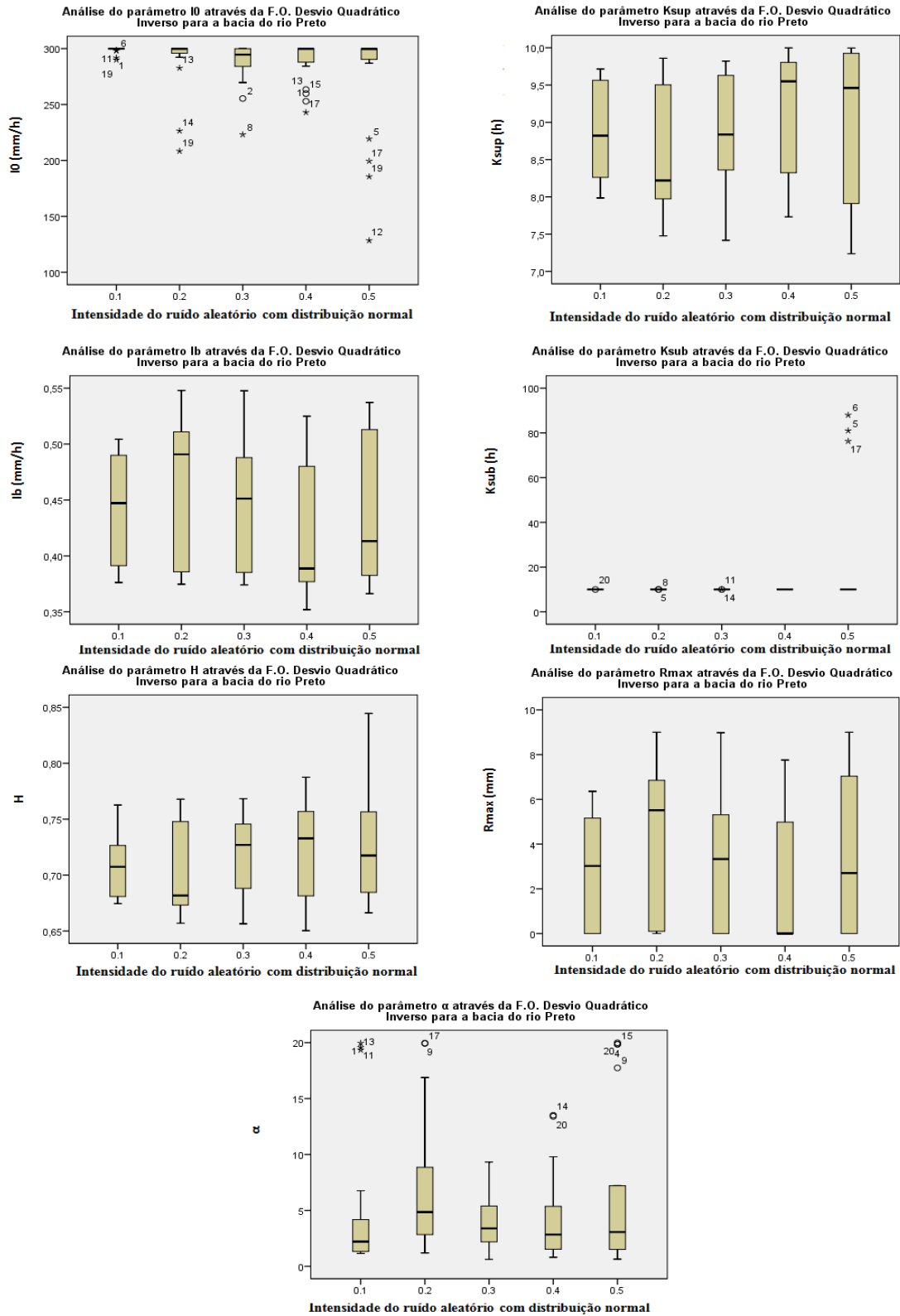


Figura 10.15 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Quadrático Inverso para a bacia do rio Preto devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Precipitação

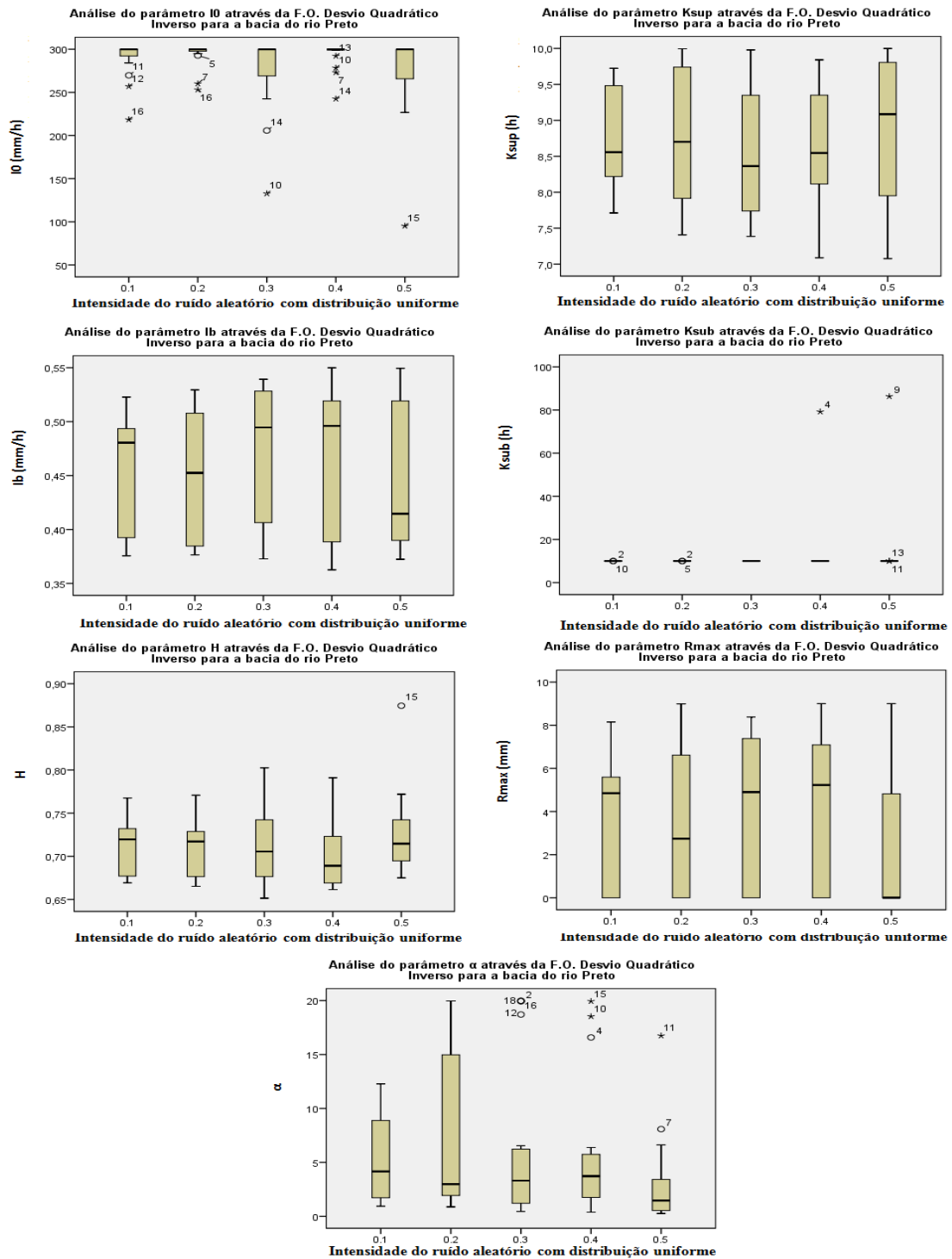


Figura 10.16 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Quadrático Inverso para a bacia do rio Preto devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Precipitação

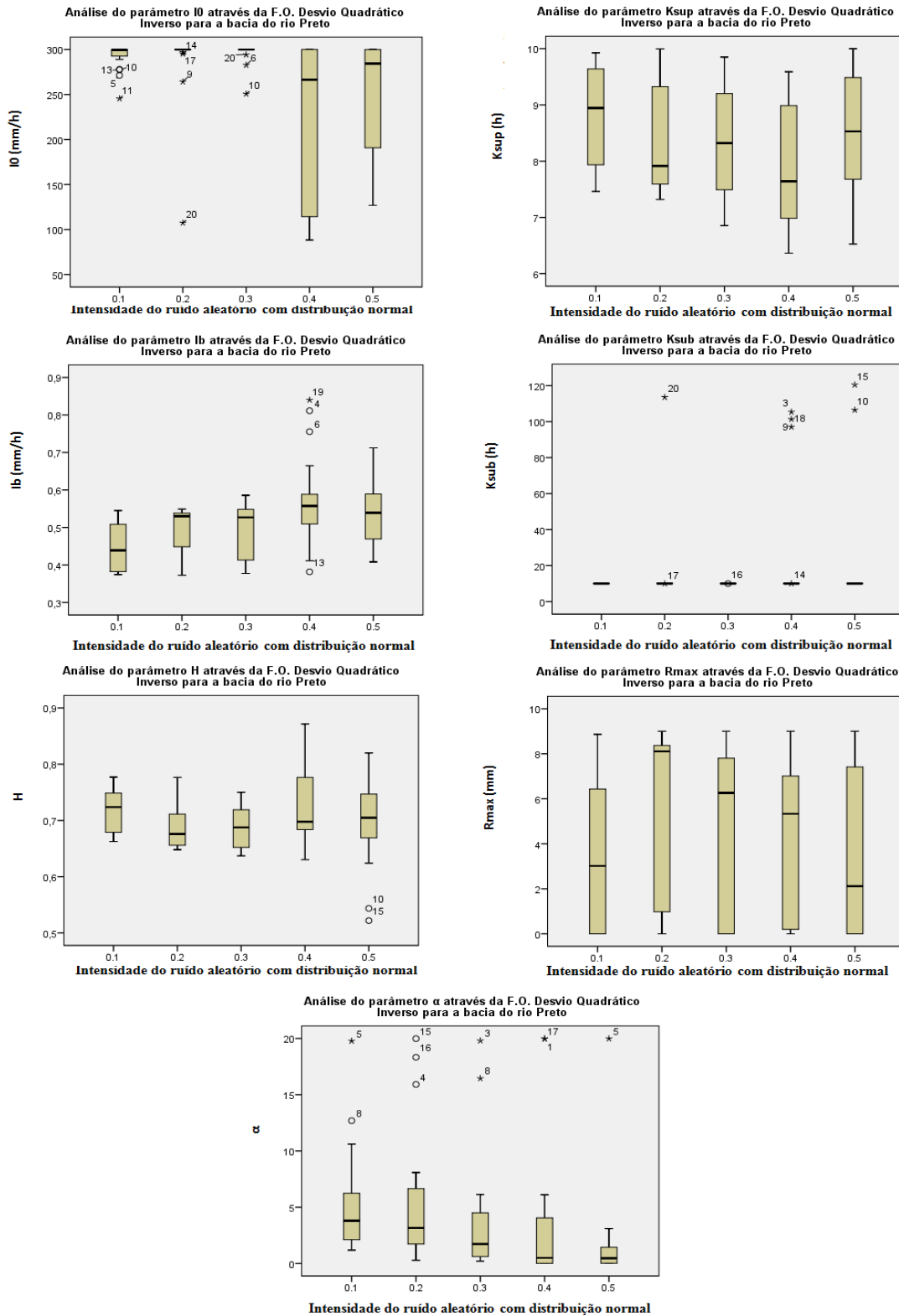


Figura 10.17 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Relativo Médio para a bacia do rio Preto devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Evapotranspiração

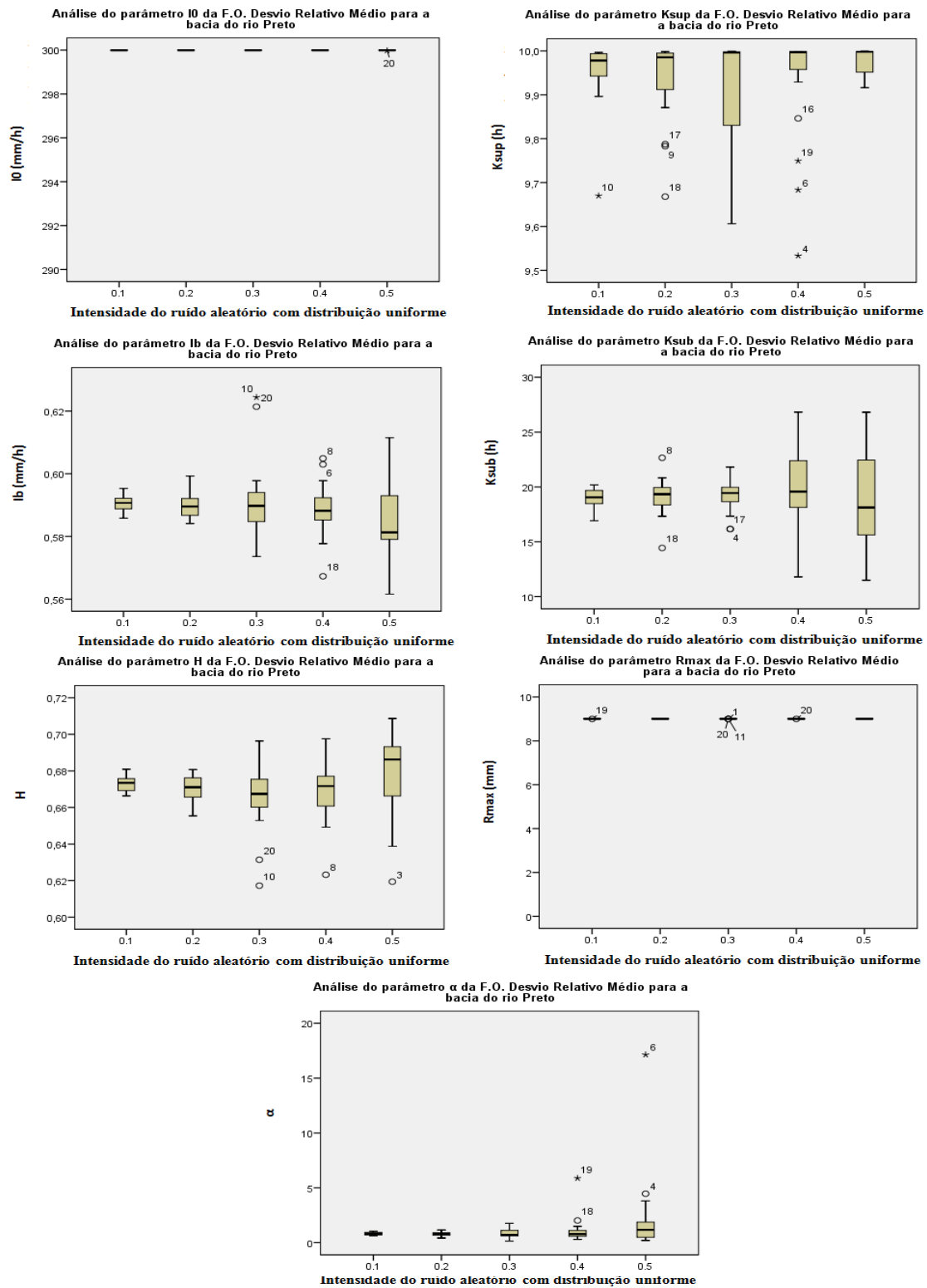


Figura 10.18 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Relativo Médio para a bacia do rio Preto devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Evapotranspiração

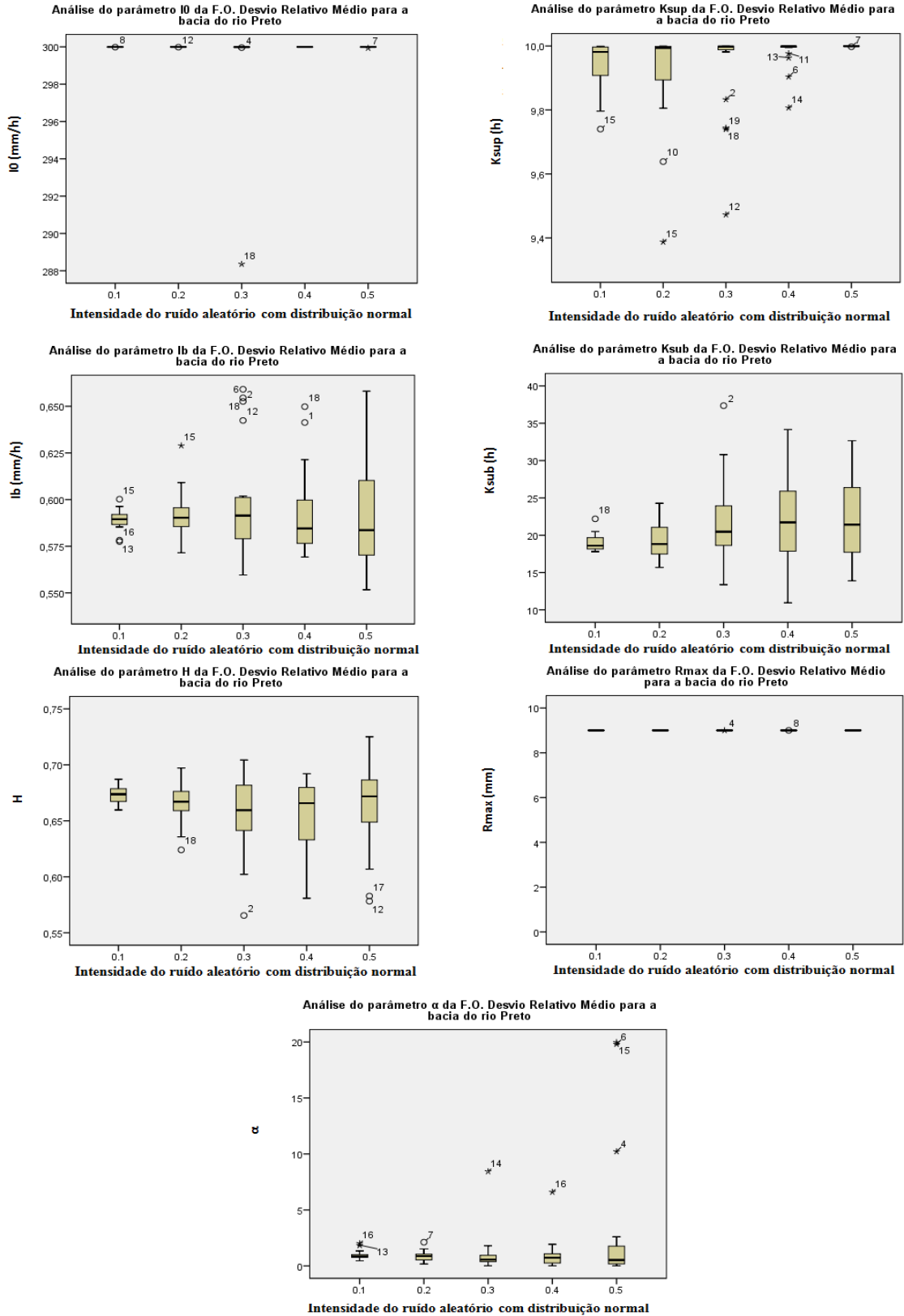


Figura 10.19 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Relativo Médio para a bacia do rio Preto devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Precipitação

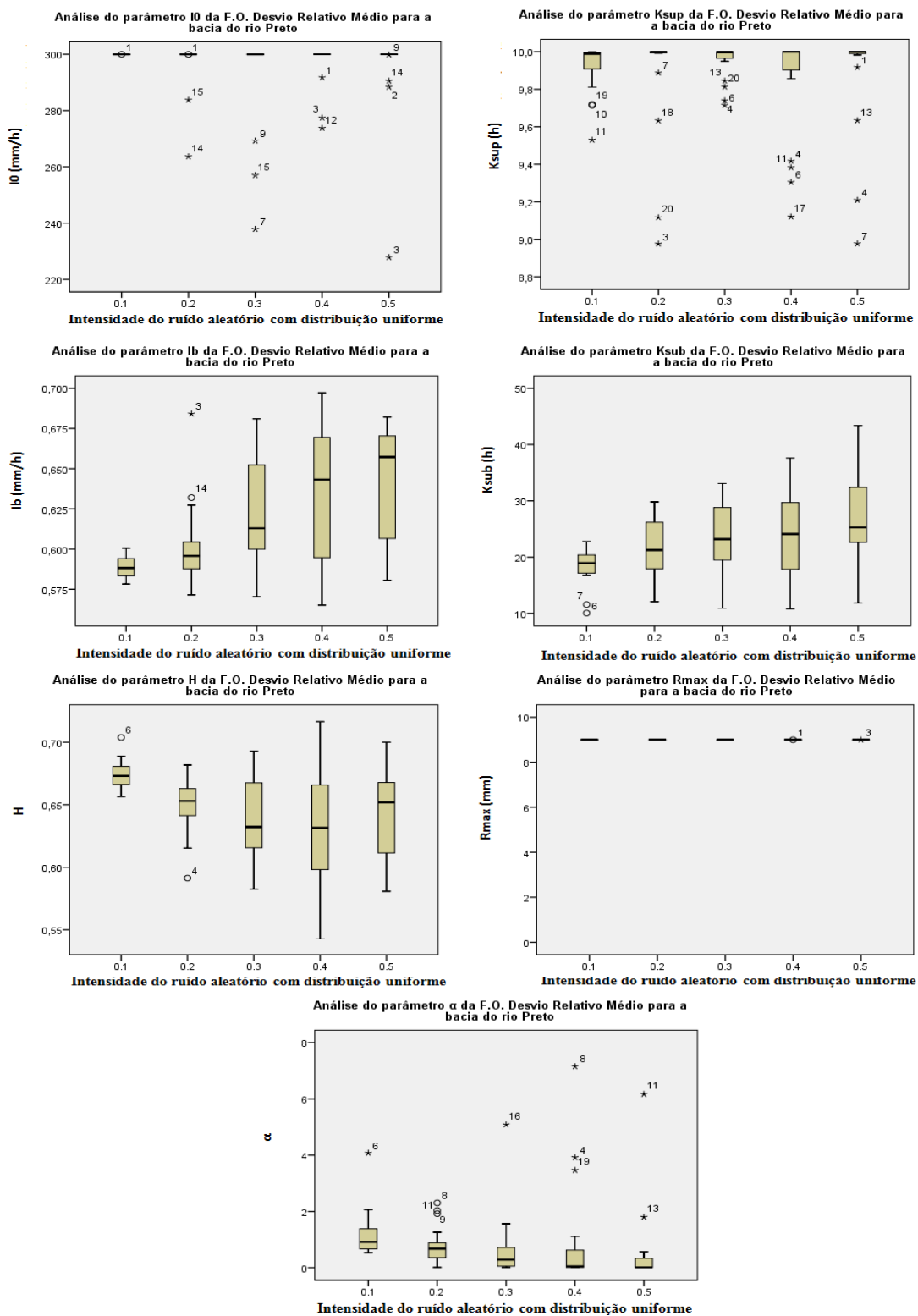
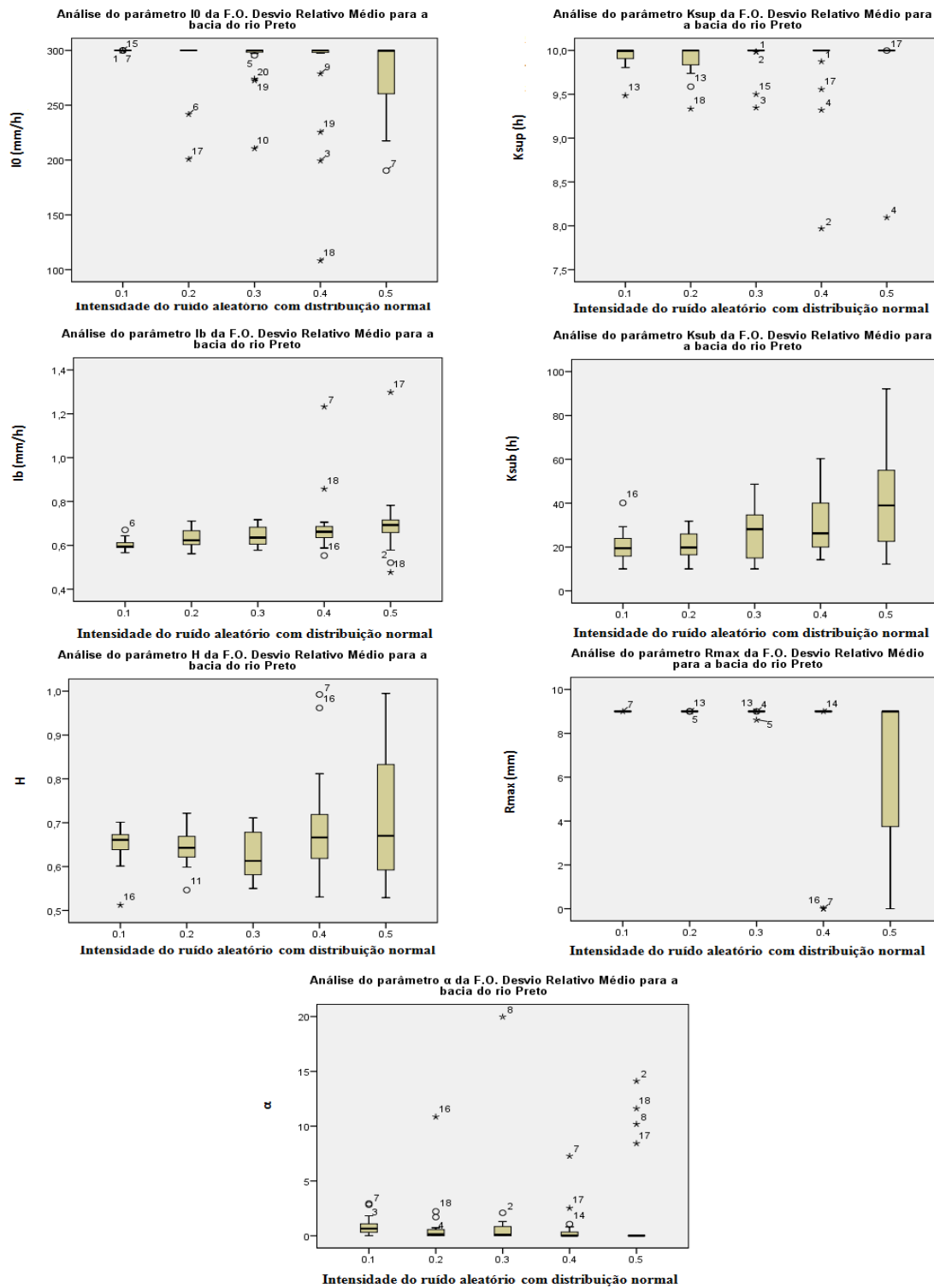


Figura 10.20 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Relativo Médio para a bacia do rio Preto devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Precipitação



11. ANEXO II – Bacia do rio Salsa

O presente tópico apresenta os resultados obtidos com a análise de sensibilidade estática e dinâmica para a bacia do rio Salsa.

Análise de sensibilidade estática

Figura 11.1 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objetivo, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal nos dados de evapotranspiração para a bacia do rio Salsa devido a análise de sensibilidade estática.

Evapotranspiração

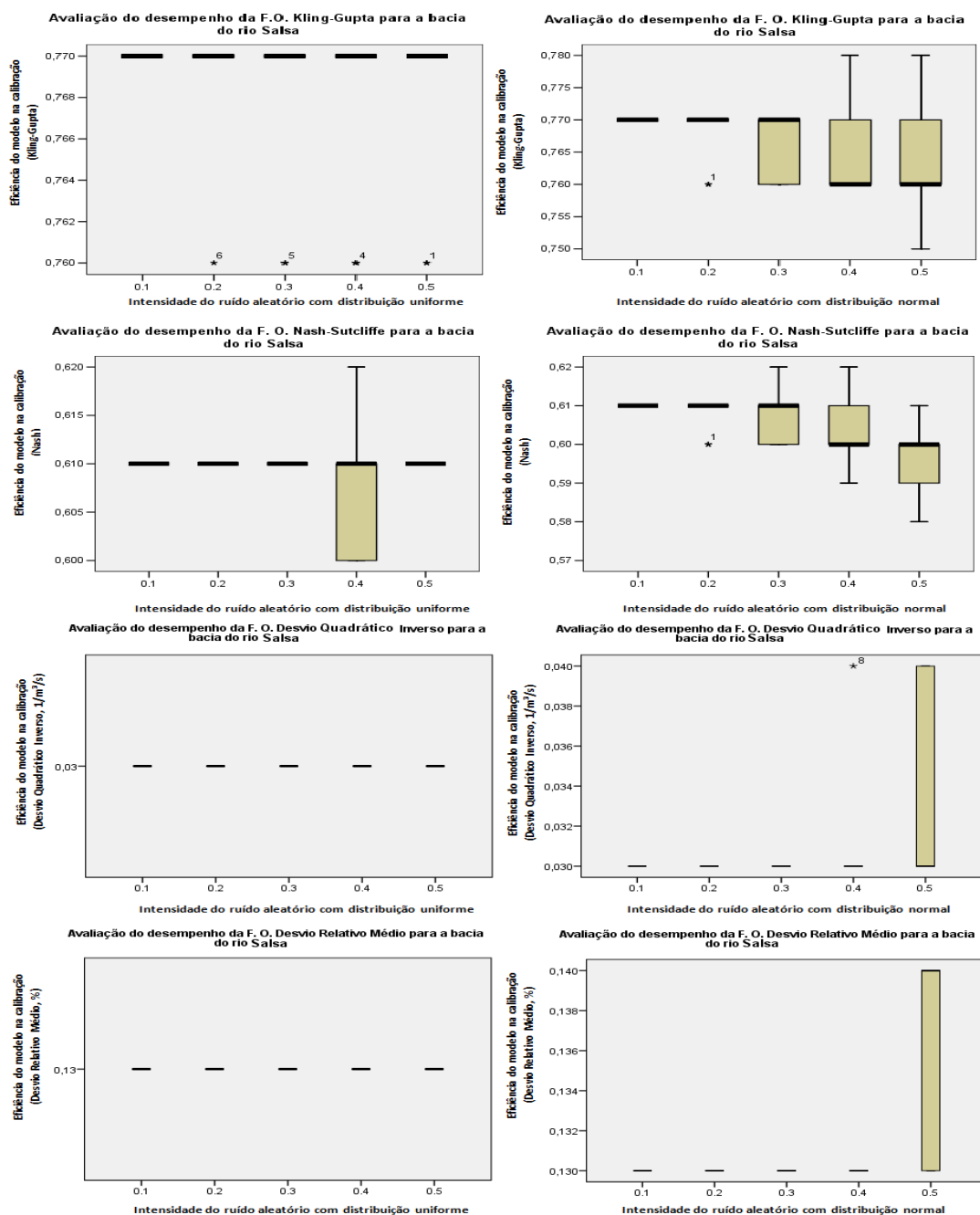
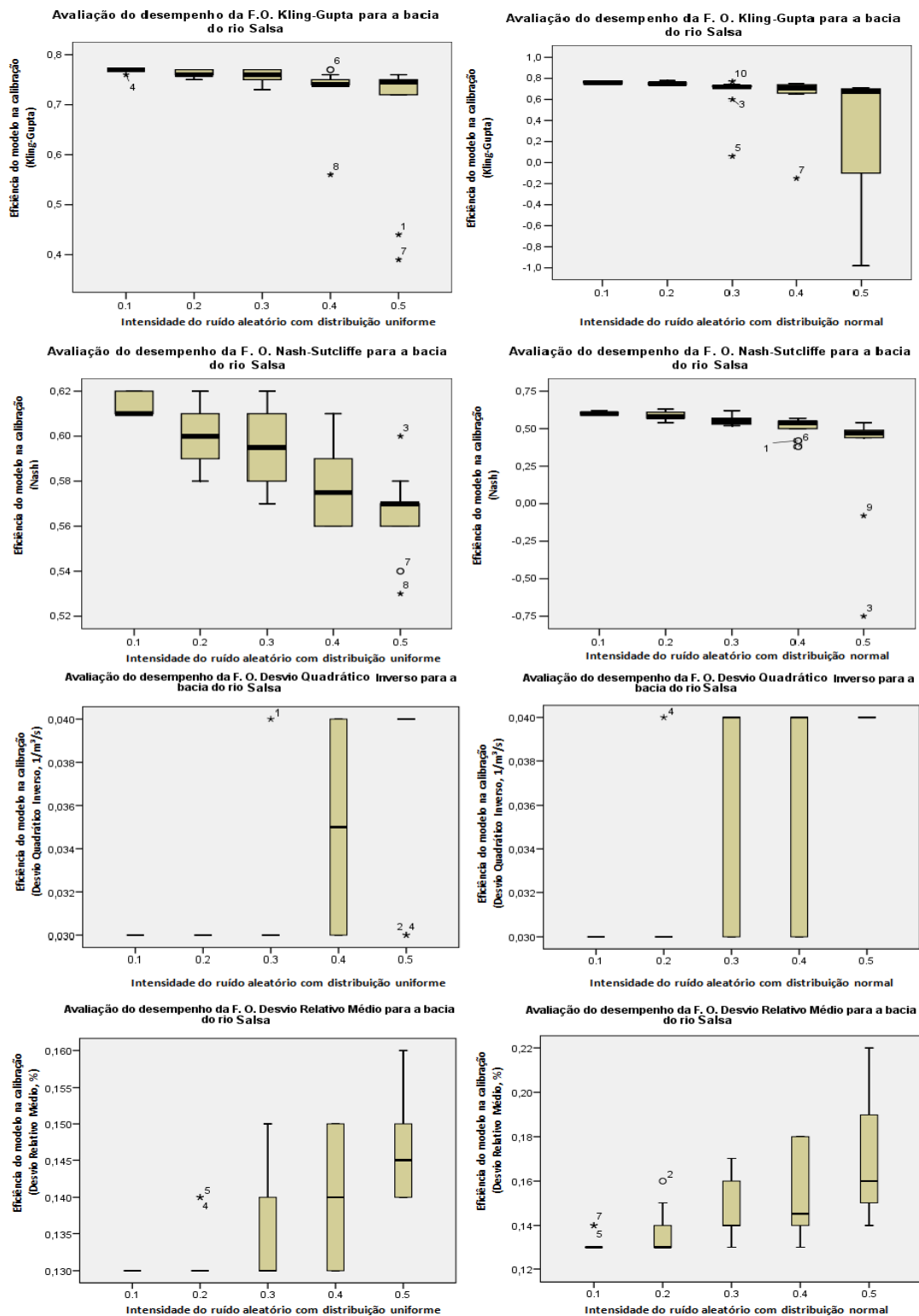


Figura 11.2 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objetivo, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal nos dados de precipitação para a bacia do rio Salsa devido a análise de sensibilidade estática.

Precipitação



Análise de sensibilidade dinâmica

Erro aleatório na evapotranspiração e na precipitação

Figura 11.3 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objetivo, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal nos dados de evapotranspiração para a bacia do rio Salsa devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Evapotranspiração

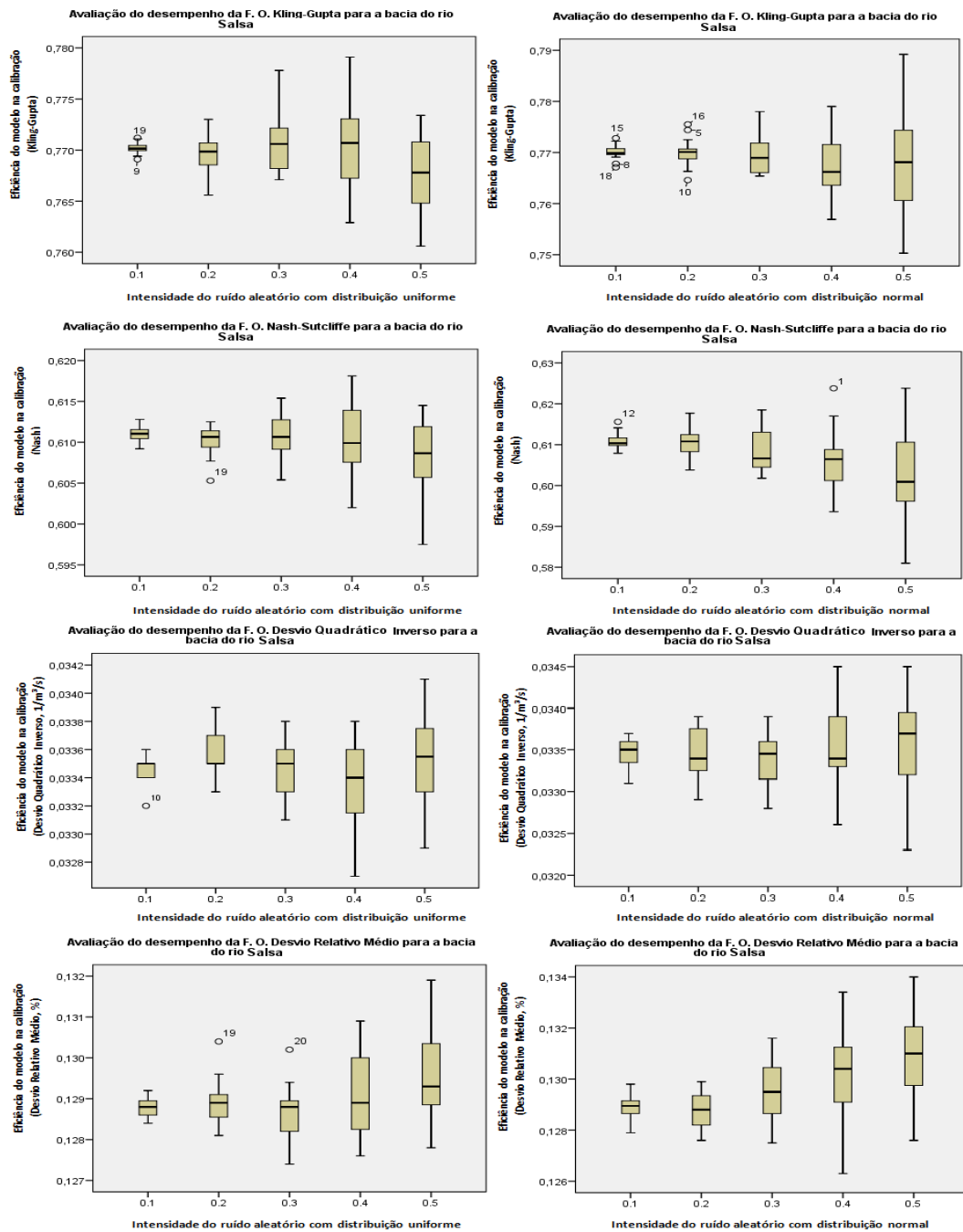
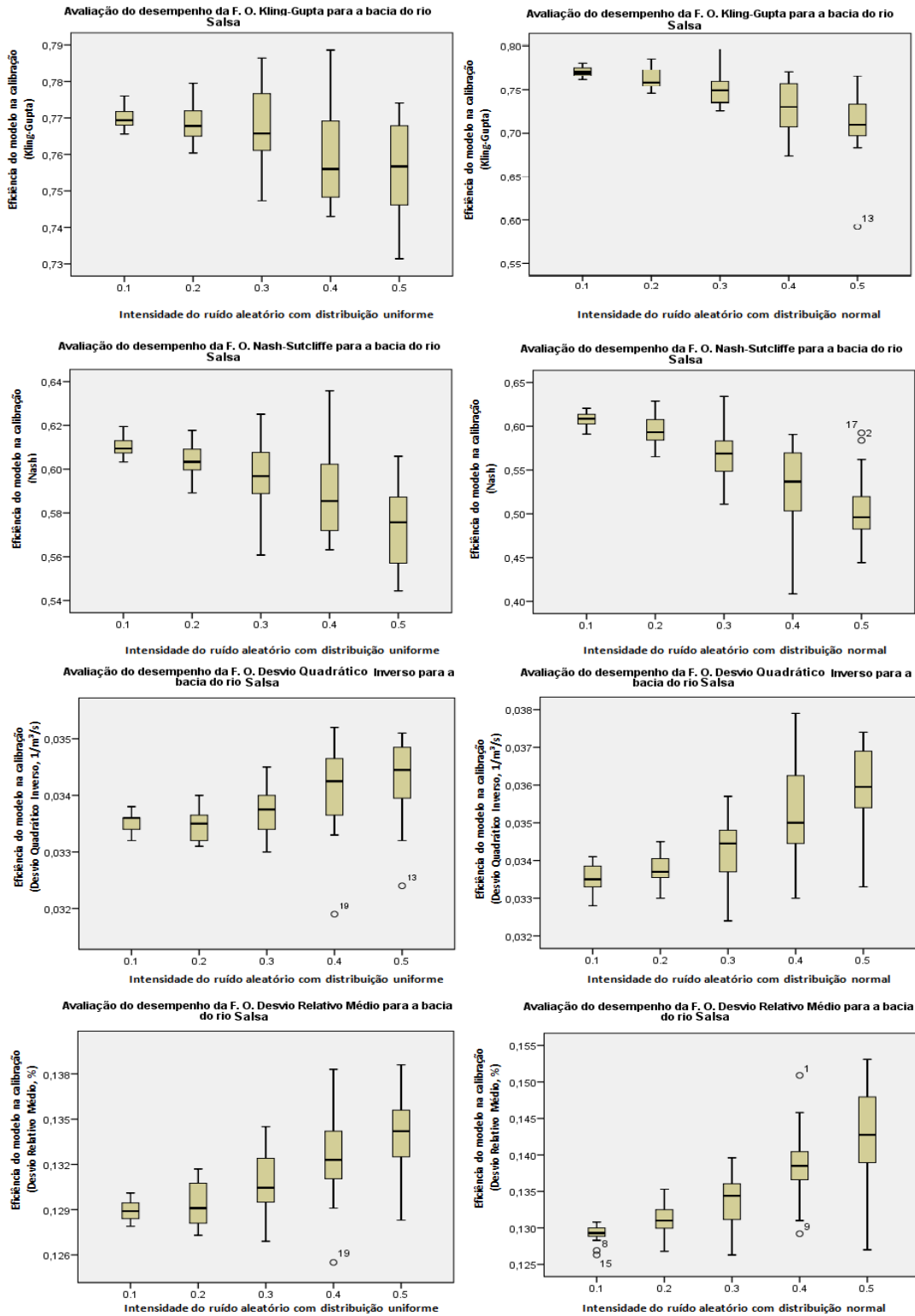


Figura 11.4 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objeto, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal nos dados de precipitação para a bacia do rio Salsa devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Precipitação



Impacto dos erros nos dados de entrada nos parâmetros do modelo em diferentes funções objetivo.

Figura 11.5 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Kling-Gupta para a bacia do rio Salsa devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Evapotranspiração

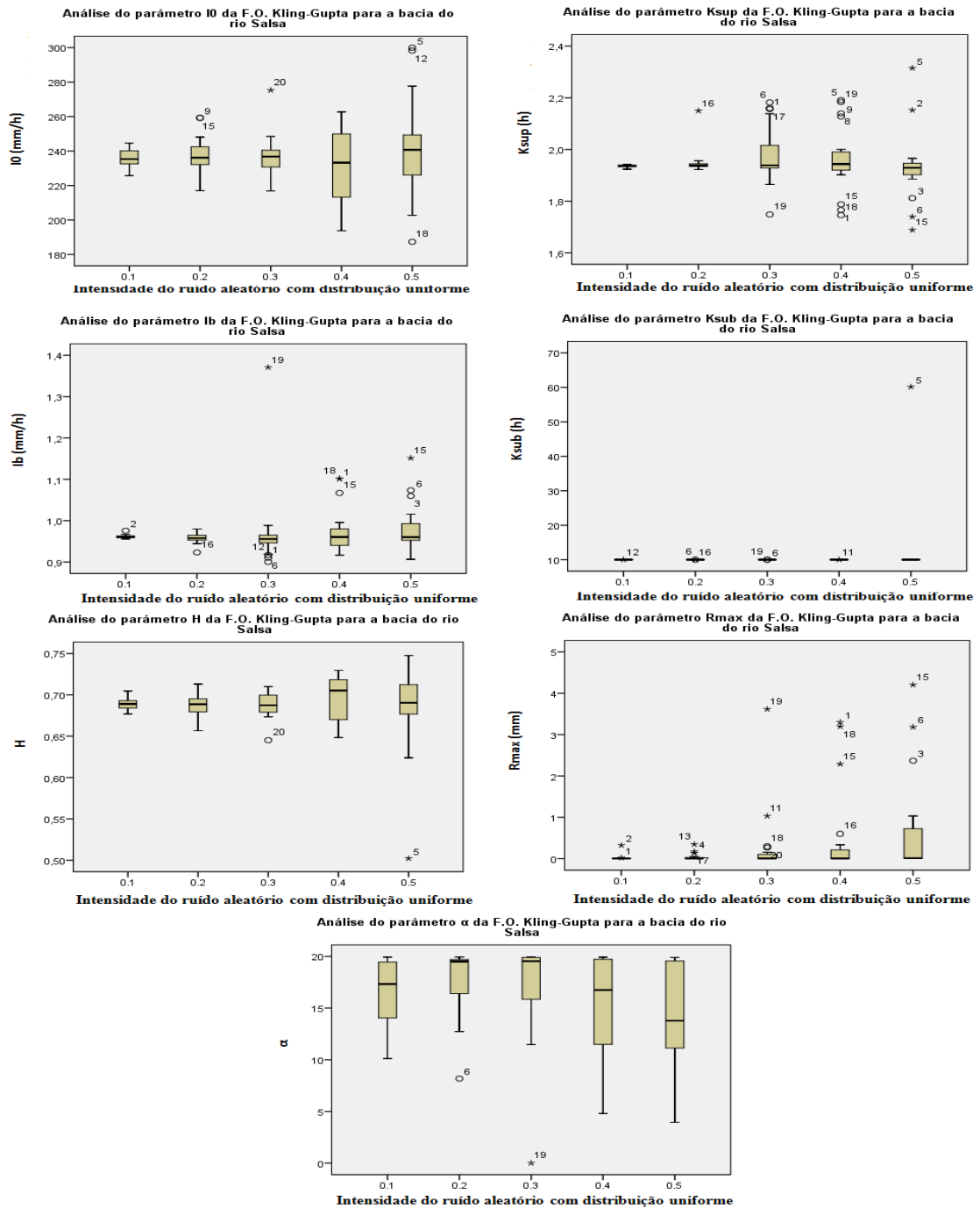


Figura 11.6 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Kling-Gupta para a bacia do rio Salsa devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Evapotranspiração

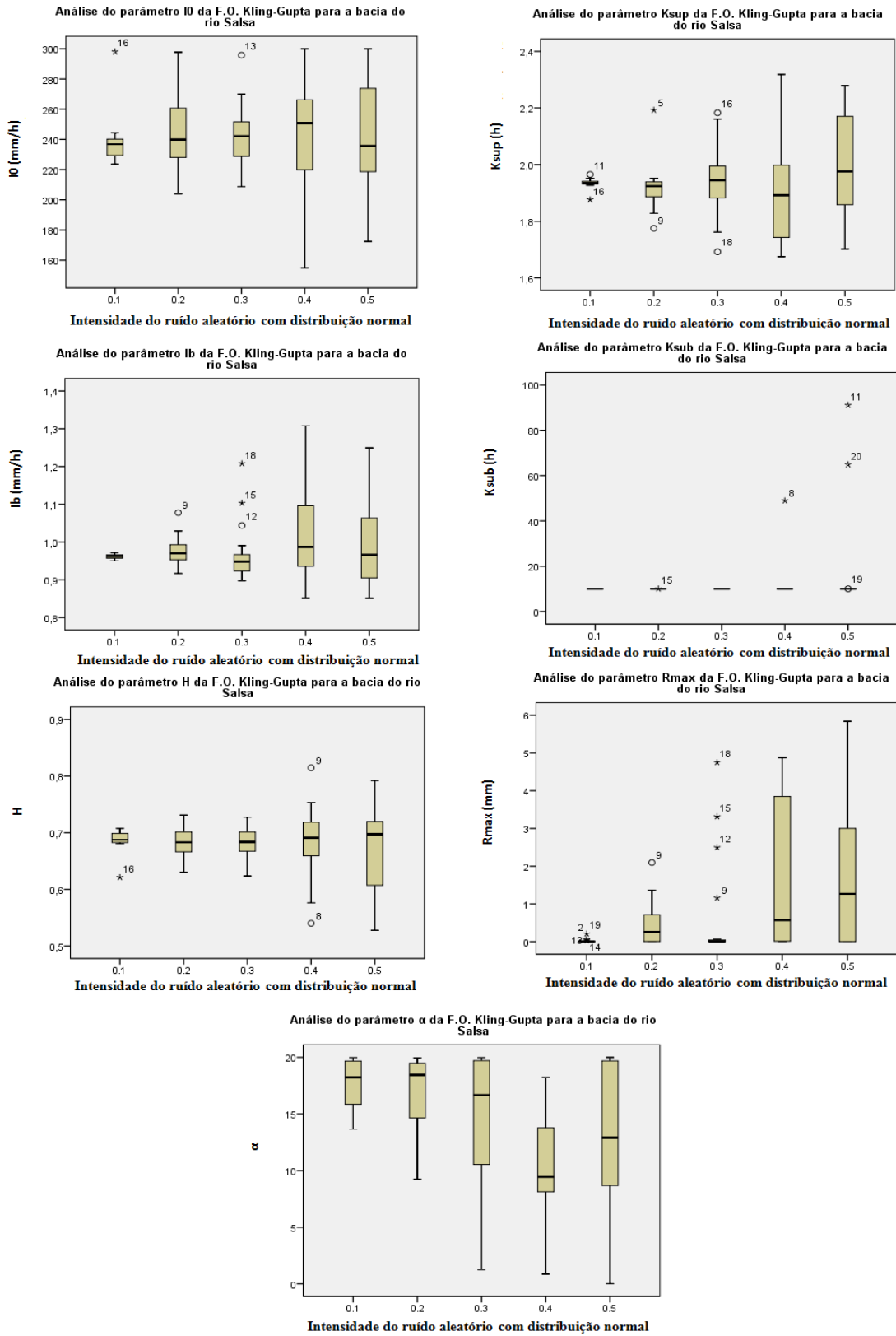


Figura 11.7 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Kling-Gupta para a bacia do rio Salsa devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Precipitação

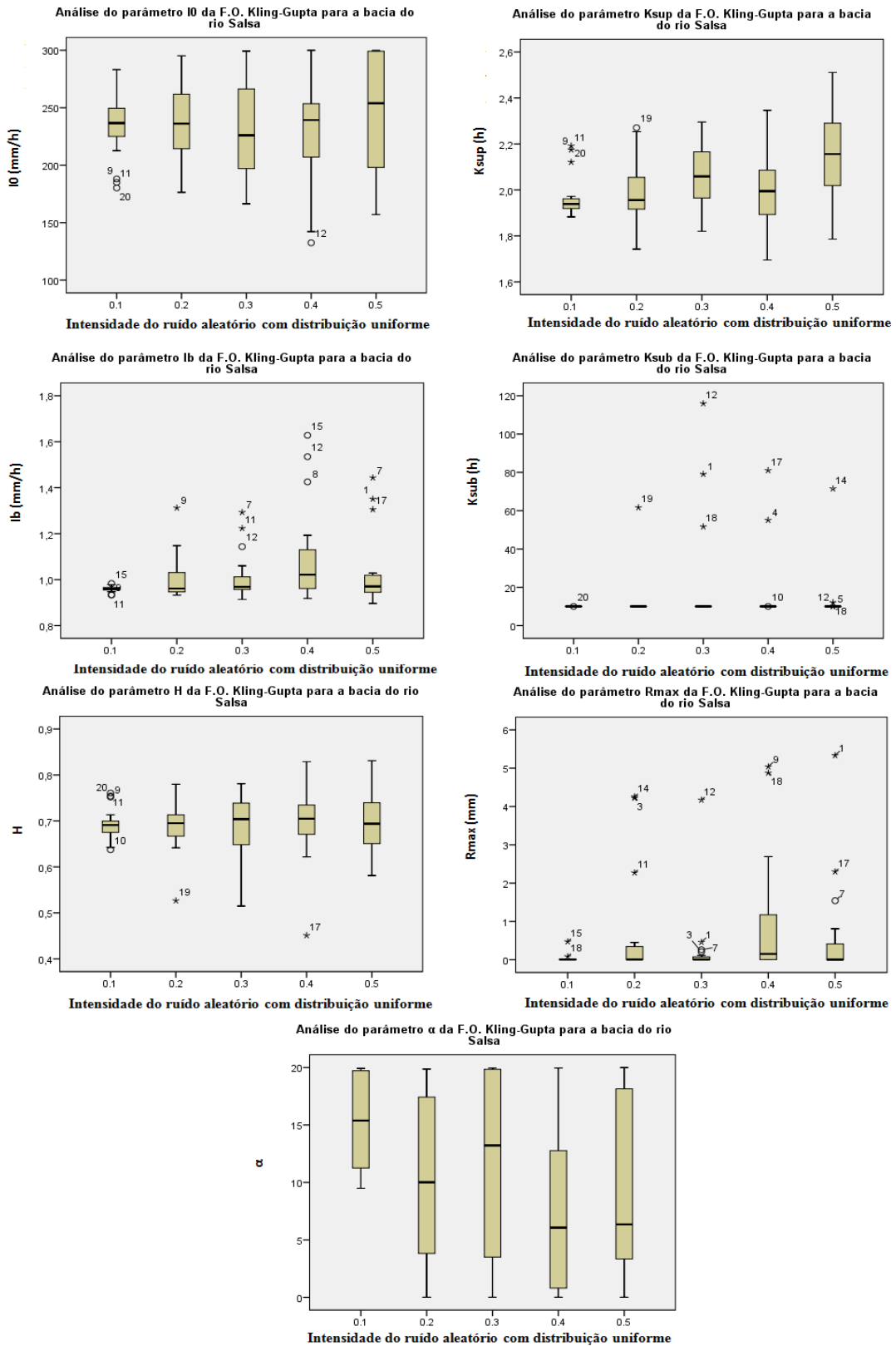


Figura 11.8 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Kling-Gupta para a bacia do rio Salsa devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Precipitação

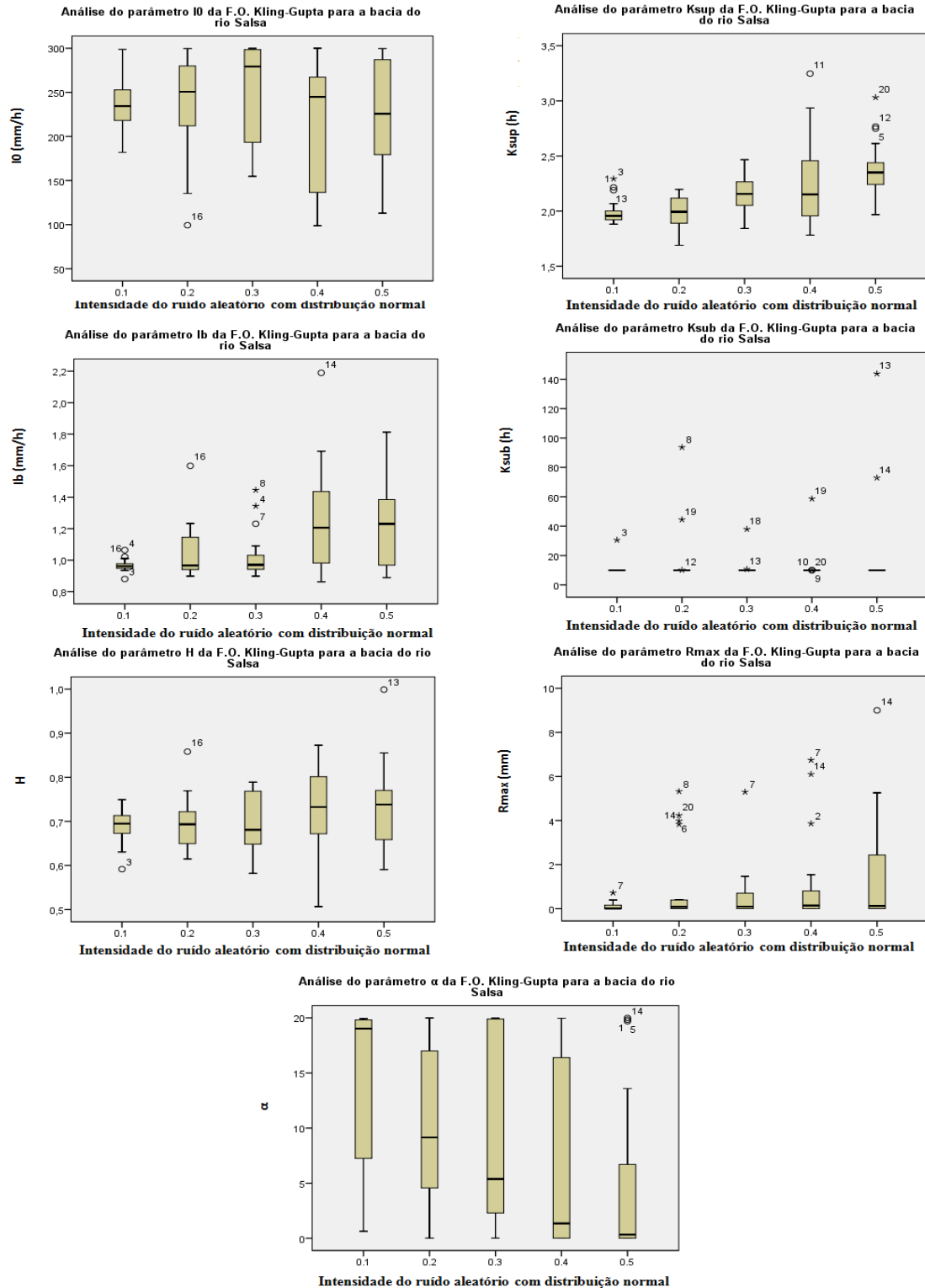


Figura 11.9 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Nash-Sutcliffe para a bacia do rio Salsa devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Evapotranspiração

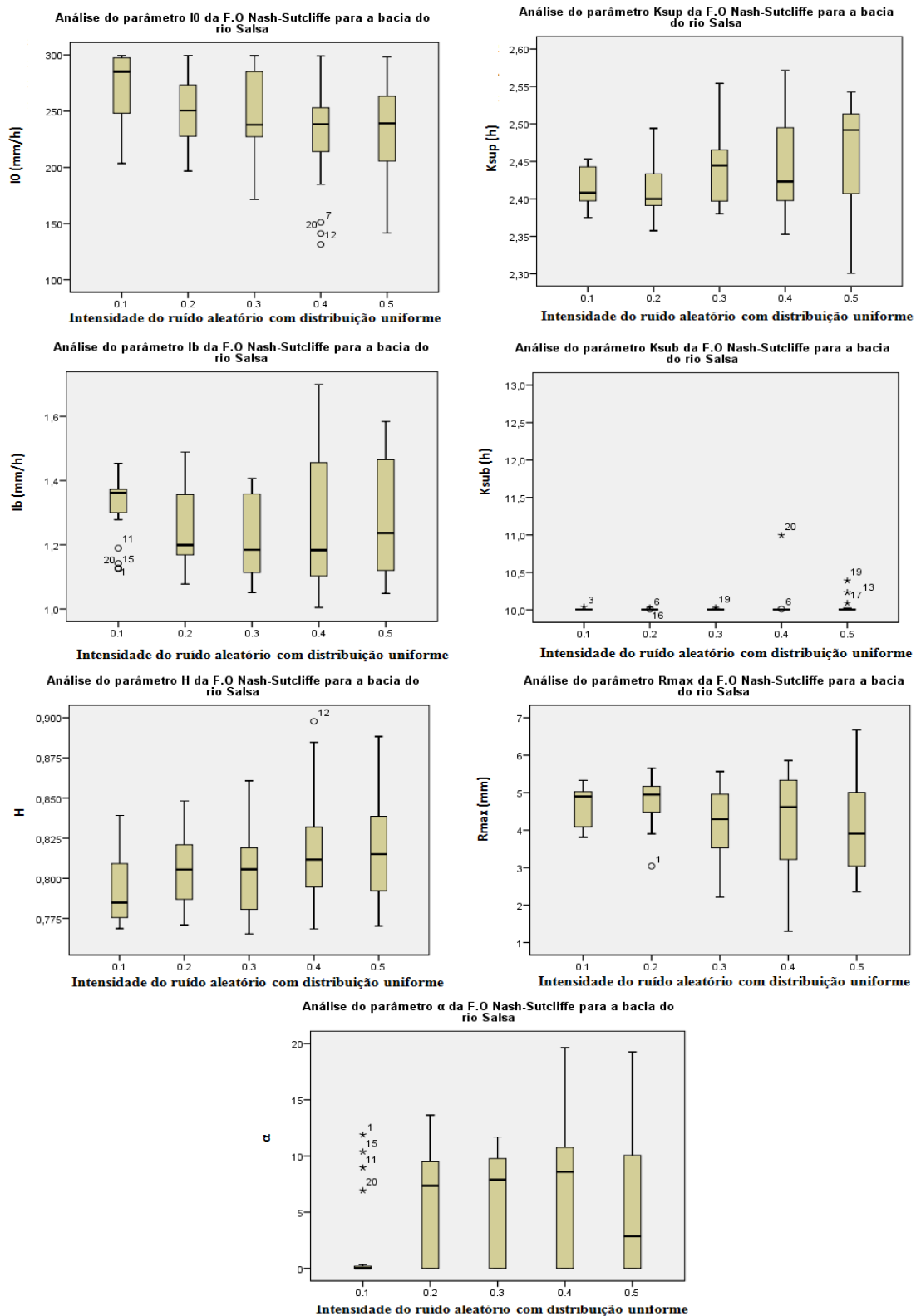


Figura 11.11 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Nash-Sutcliffe para a bacia do rio Salsa devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Precipitação

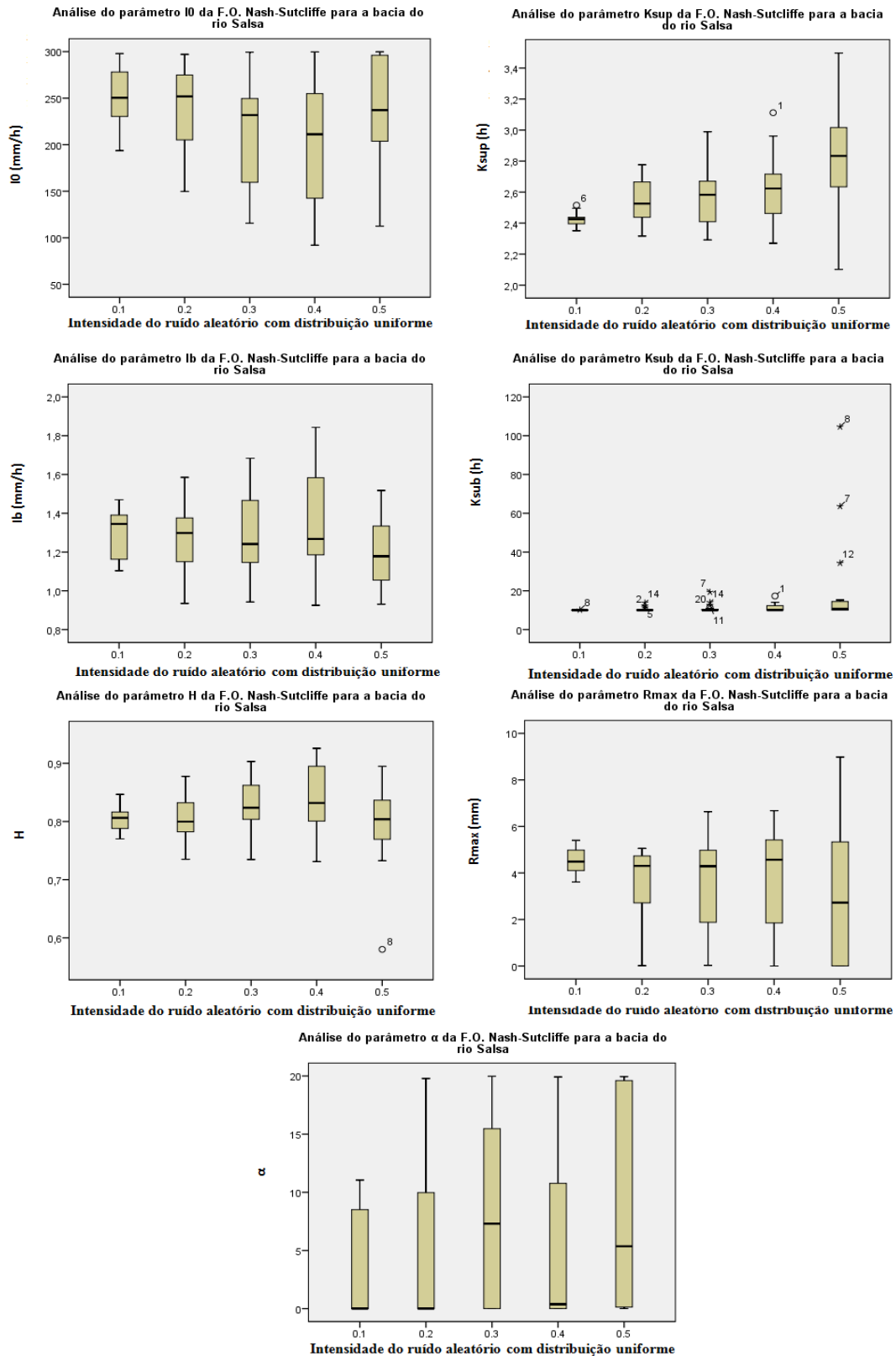


Figura 11.12 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Nash-Sutcliffe para a bacia do rio Salsa devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Precipitação

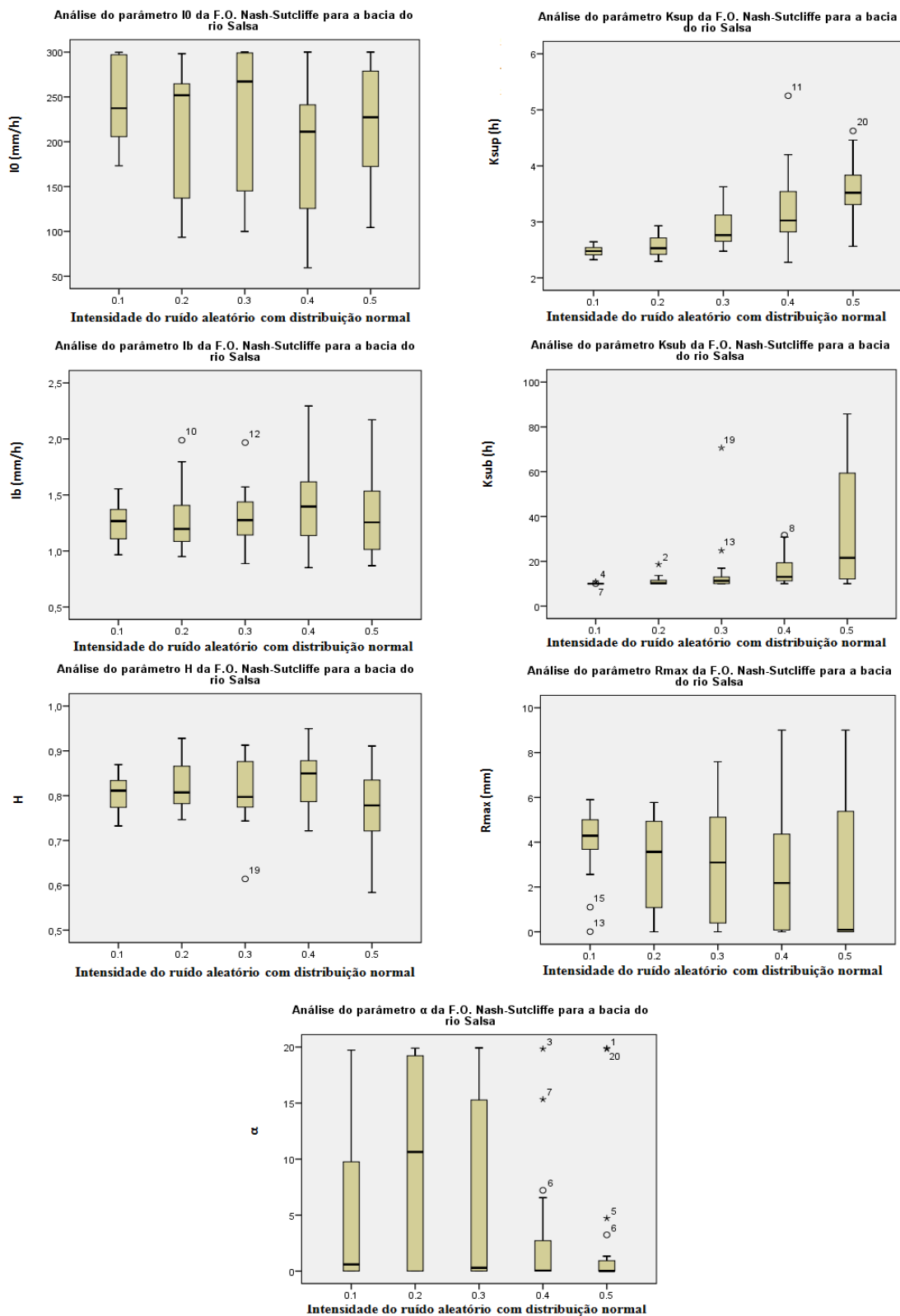


Figura 11.13 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Quadrático Inverso para a bacia do rio Salsa devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Evapotranspiração

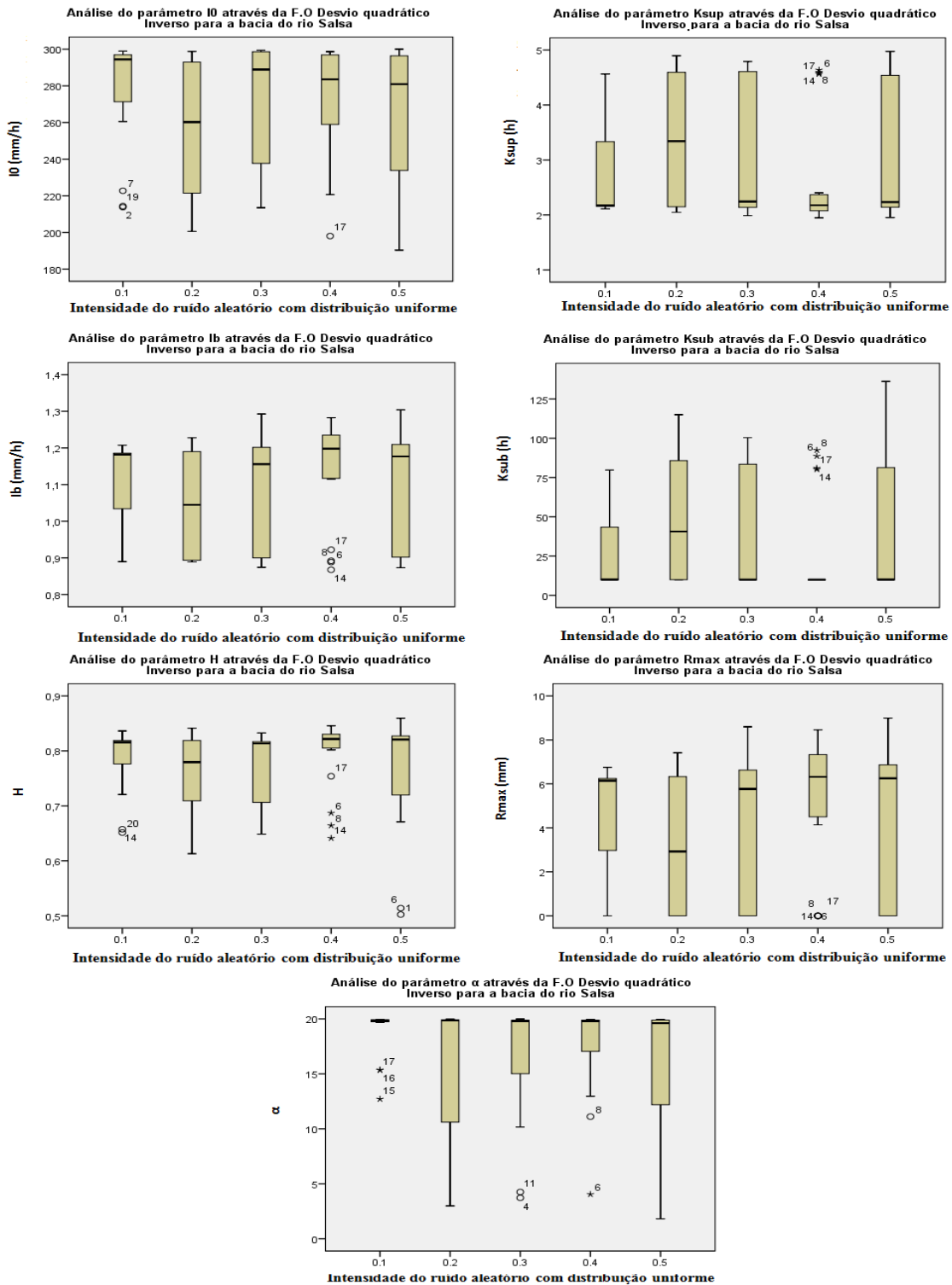


Figura 11.15 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Quadrático Inverso para a bacia do rio Salsa devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Precipitação

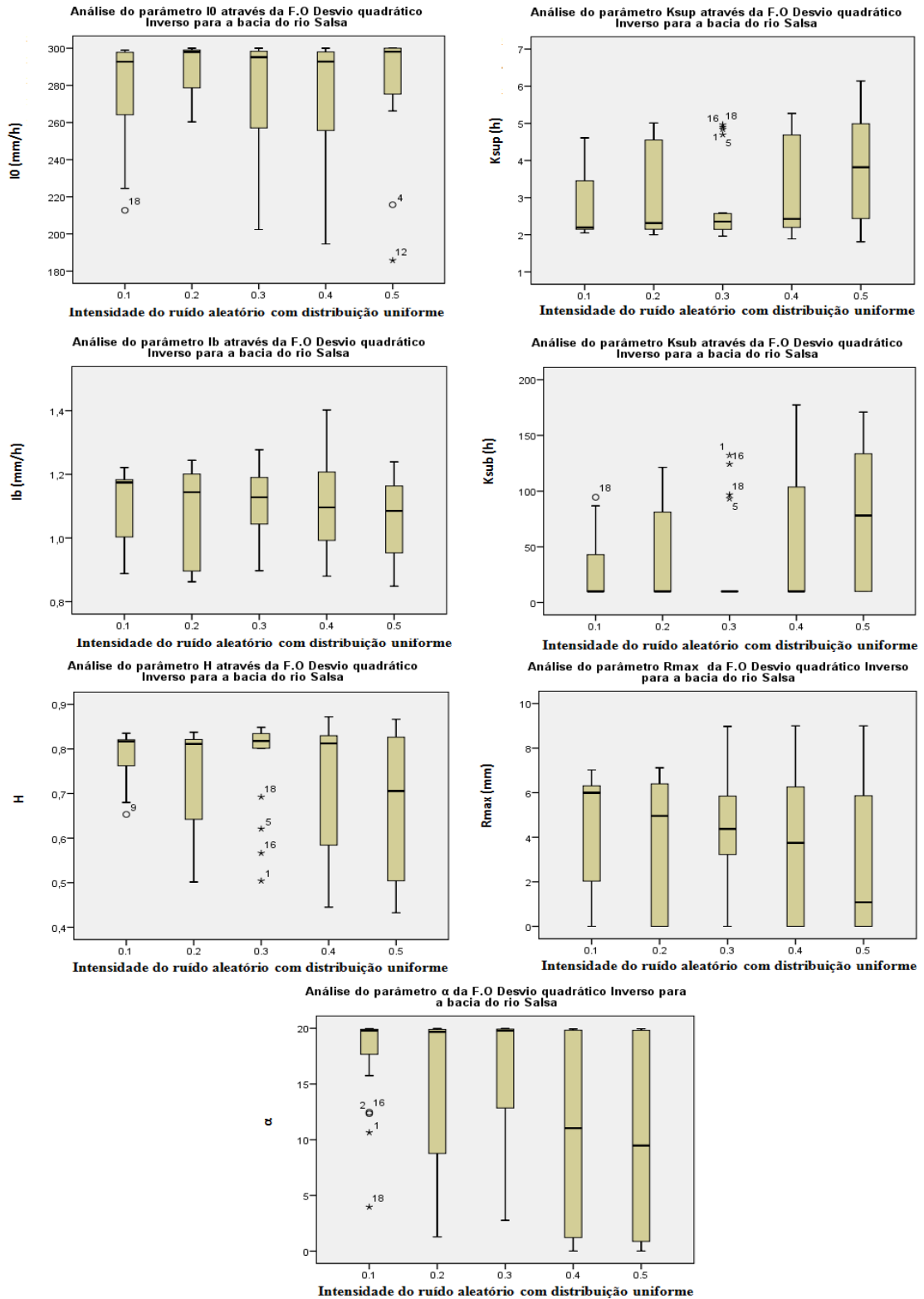


Figura 11.16 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Quadrático Inverso para a bacia do rio Salsa devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Precipitação

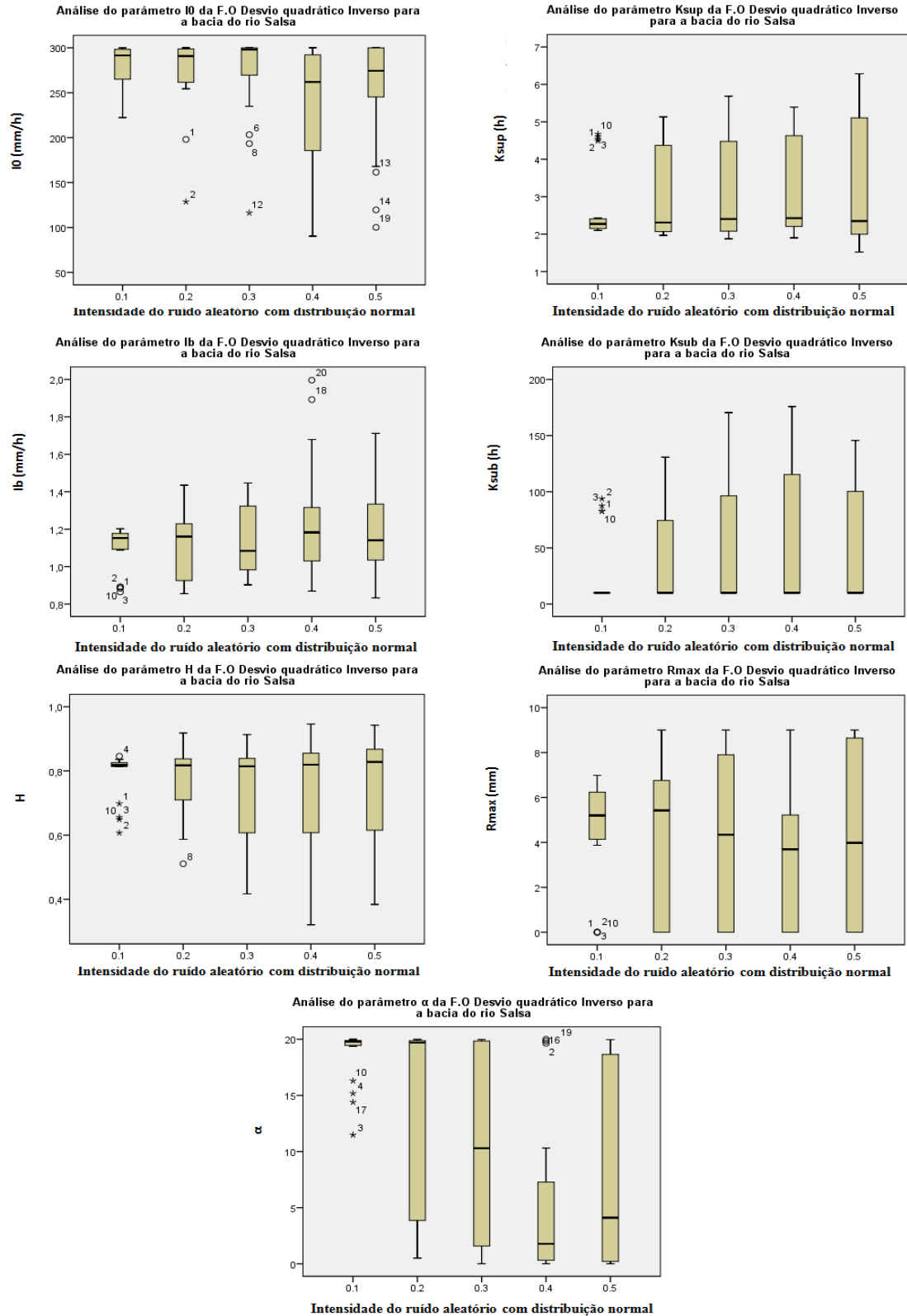


Figura 11.17 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Relativo Médio para a bacia do rio Preto devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Evapotranspiração

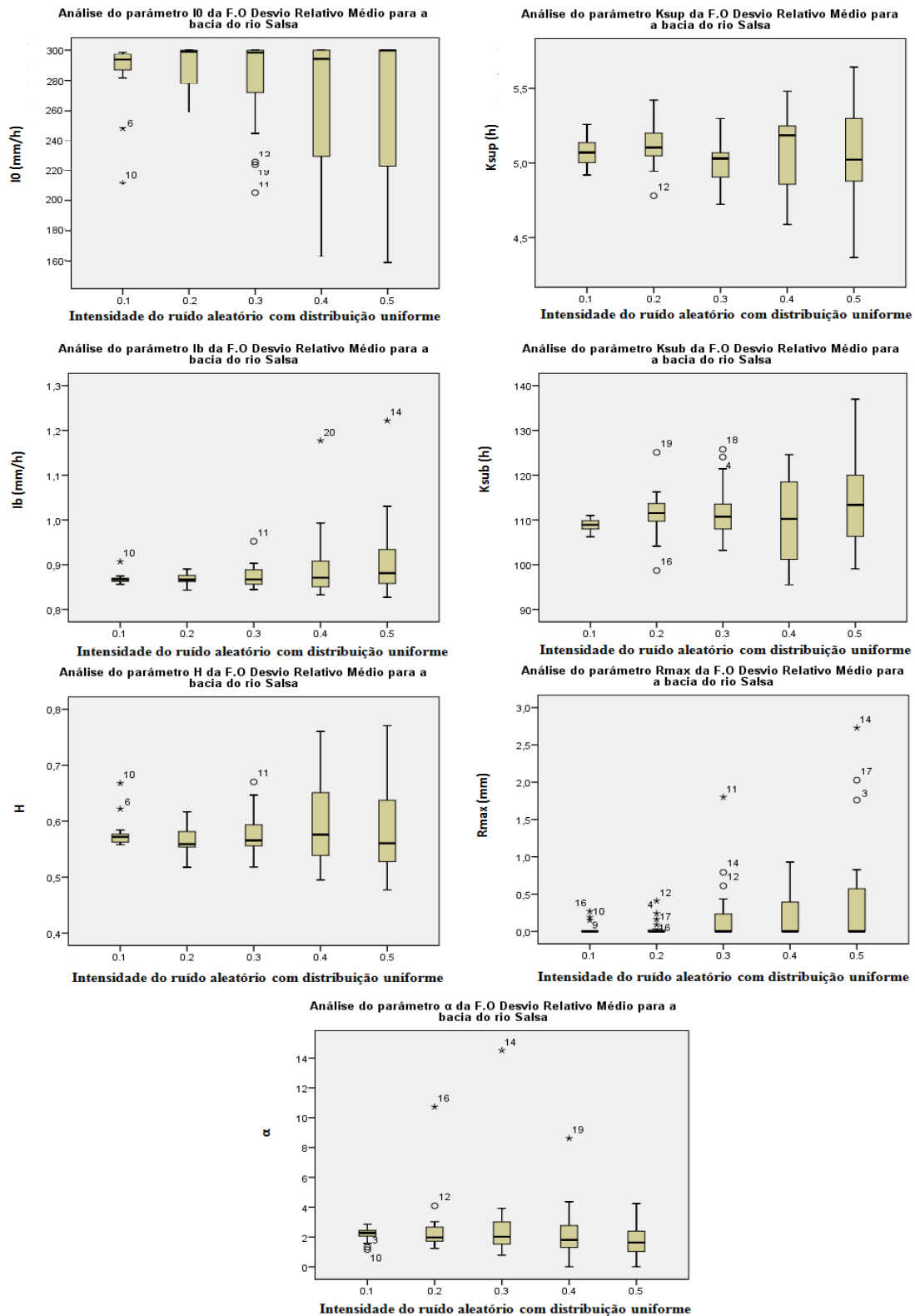


Figura 11.18 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Relativo Médio para a bacia do rio Salsa devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Evapotranspiração

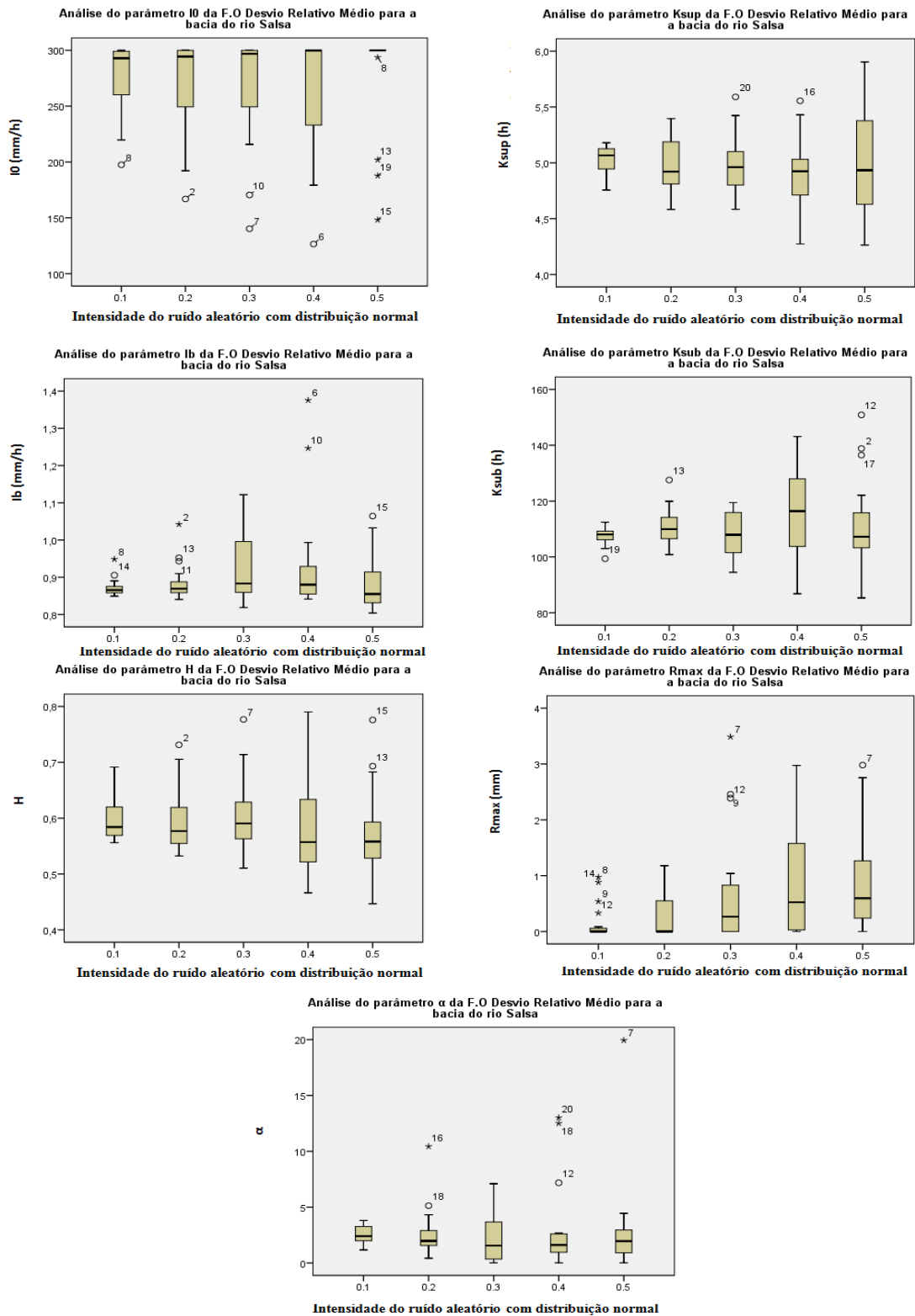
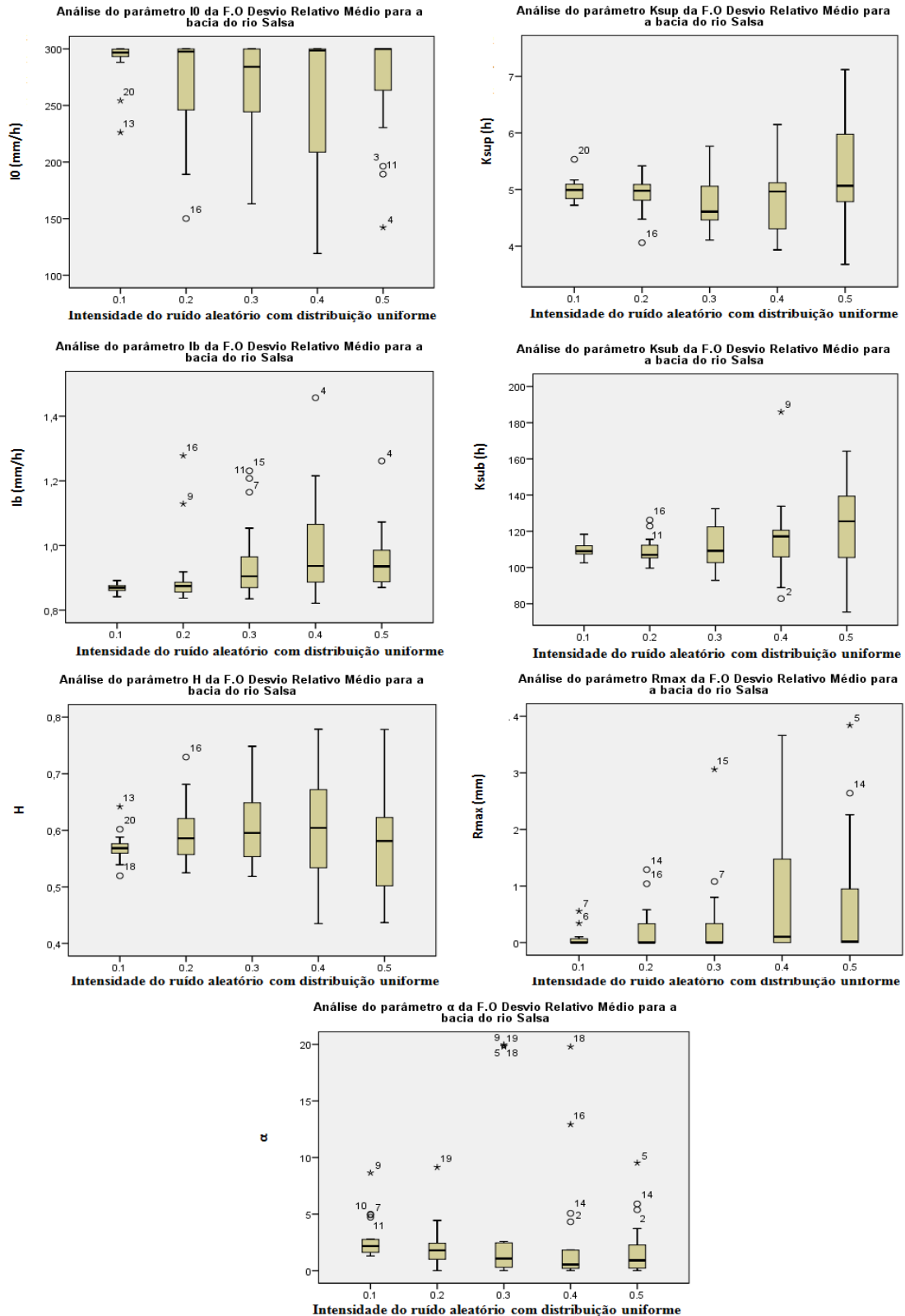


Figura 11.19 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Relativo Médio para a bacia do rio Preto devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Precipitação



12. ANEXO III – Bacia do rio Canoas

O presente tópico apresenta os resultados obtidos com a análise de sensibilidade estática e dinâmica para a bacia do rio Canoas.

Análise de sensibilidade estática

Erro aleatório na evapotranspiração e na precipitação

Figura 12.1 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objetivo, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal nos dados de evapotranspiração para a bacia do rio Canoas devido a análise de sensibilidade estática.

Evapotranspiração

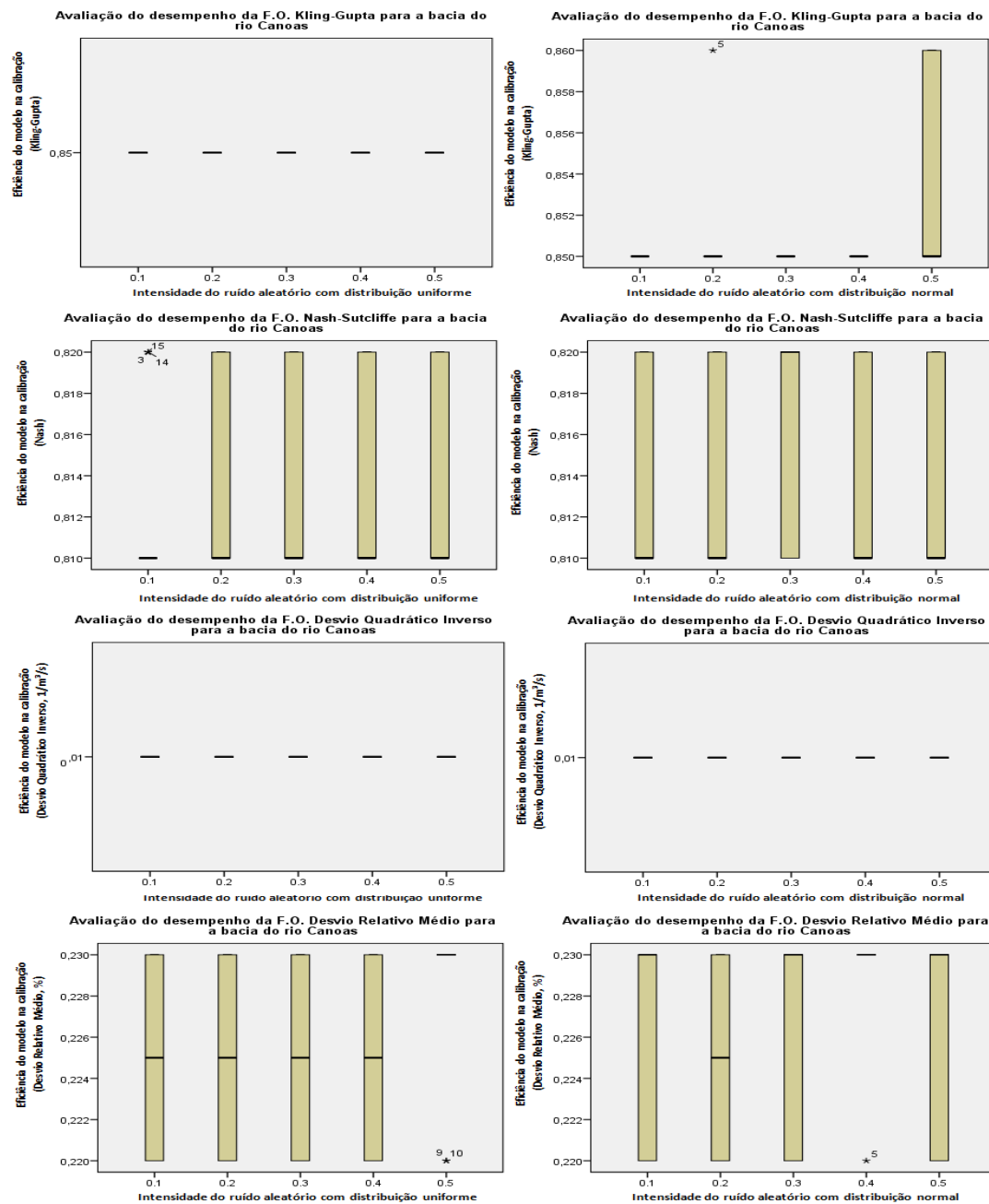
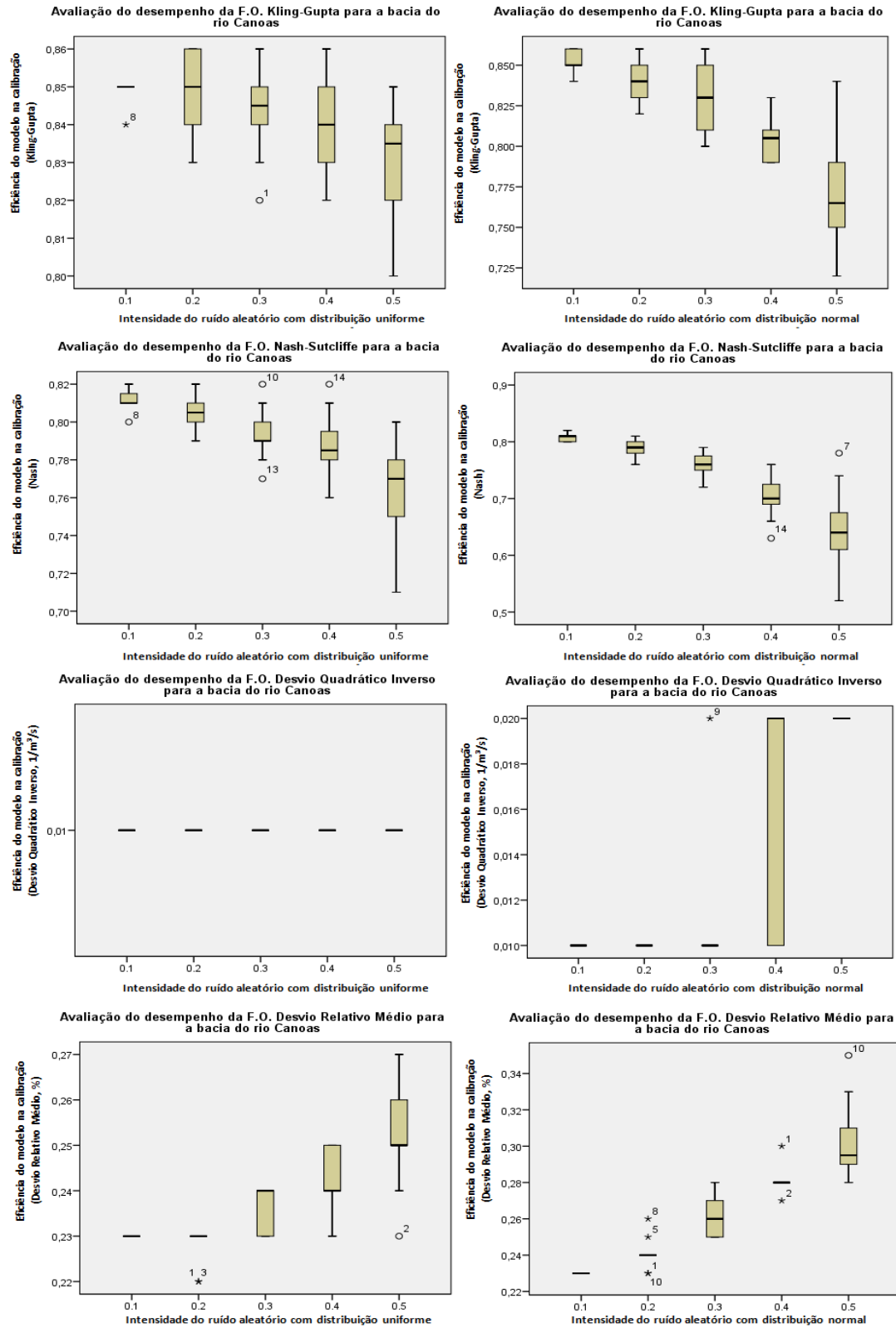


Figura 12.2 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objetivo, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal nos dados de precipitação para a bacia do rio Canoas devido a análise de sensibilidade estática.

Precipitação



Análise de sensibilidade dinâmica

Erro aleatório na evapotranspiração e na precipitação

Figura 12.3 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objetivo, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal nos dados de evapotranspiração para a bacia do rio Canoas devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Evapotranspiração

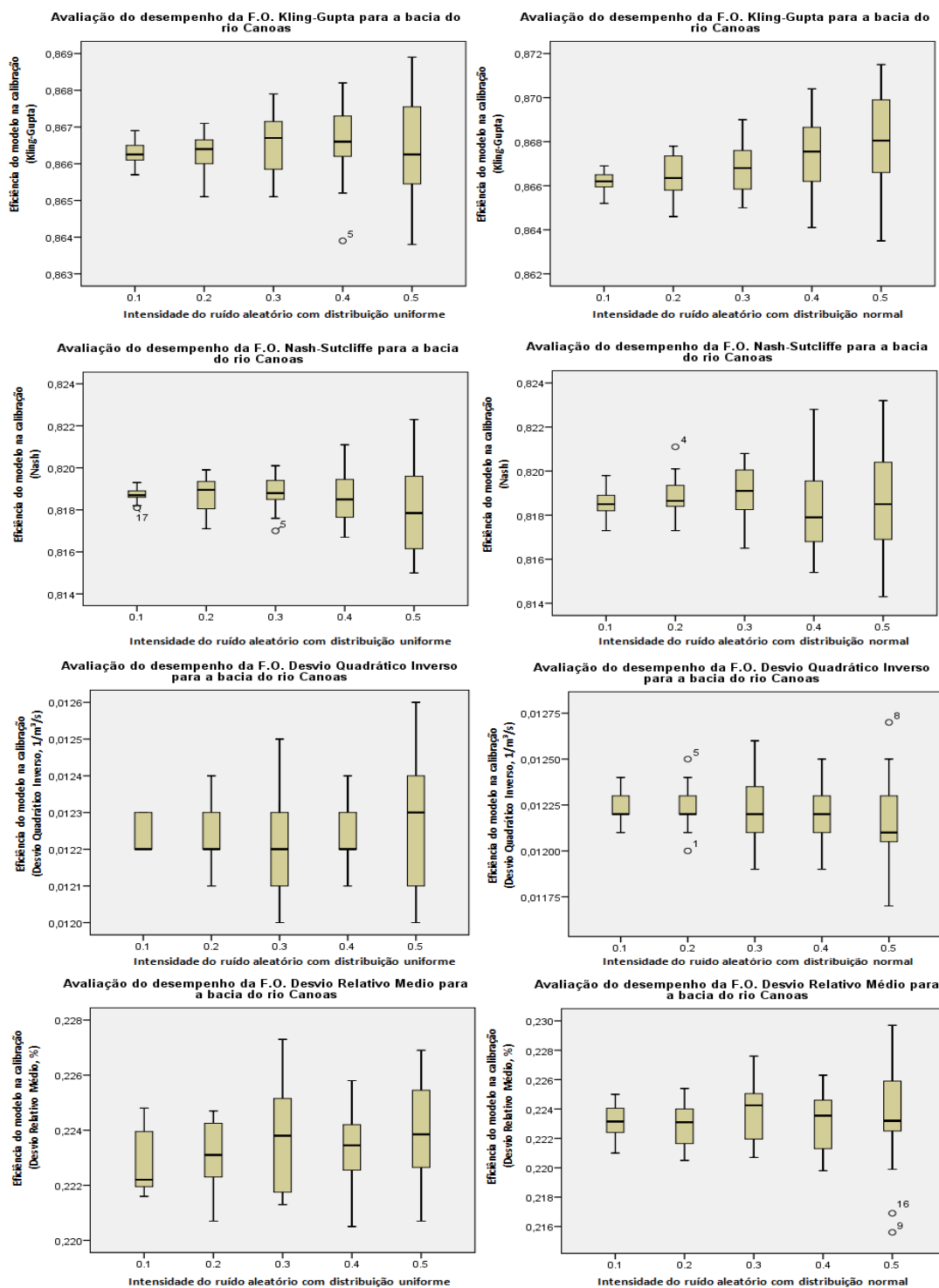
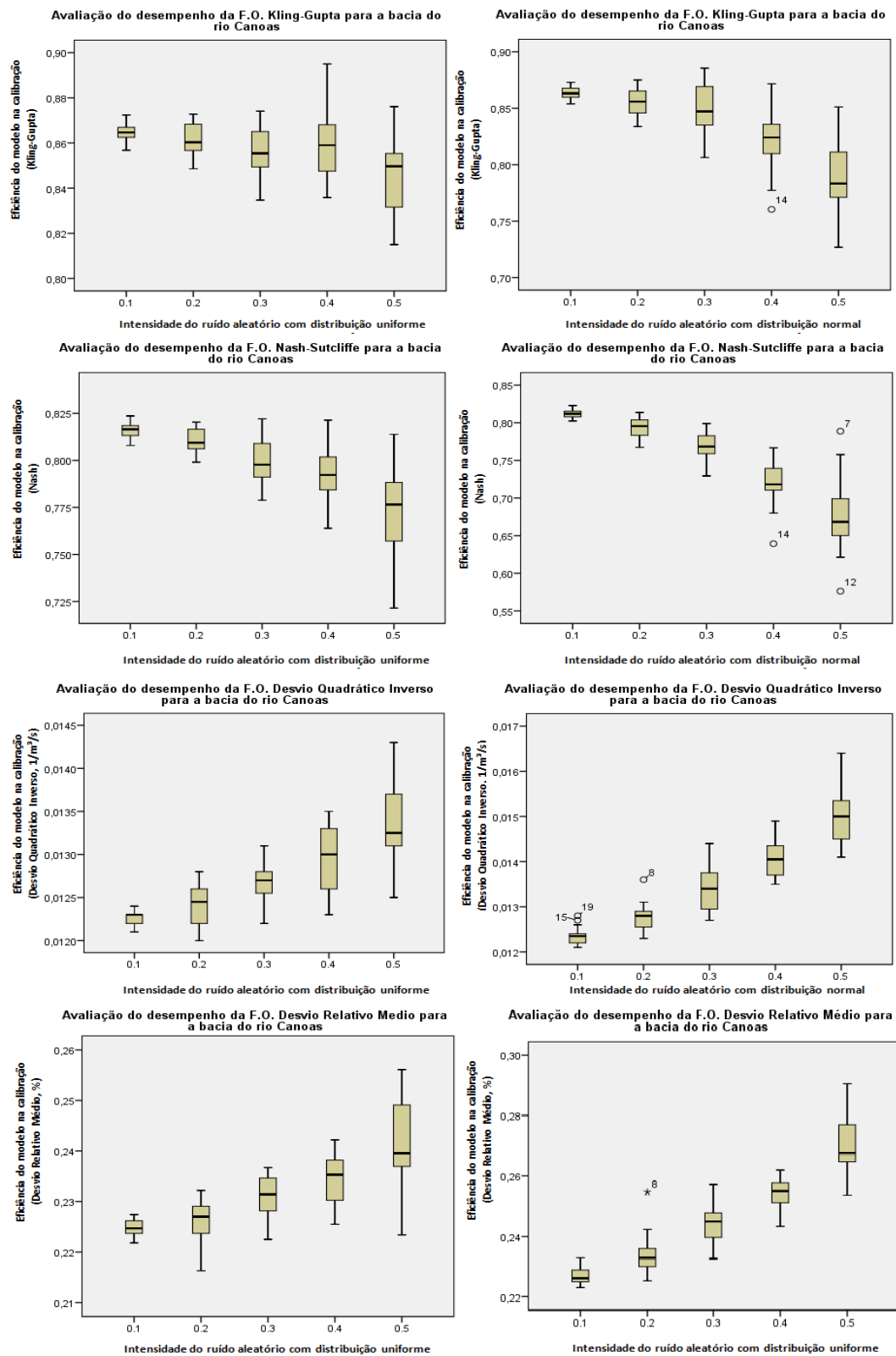


Figura 12.4 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objetivo, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal nos dados de precipitação para a bacia do rio Canoas devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Precipitação



Impacto dos erros nos dados de entrada nos parâmetros do modelo em diferentes funções objetivo.

Figura 12.5 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Kling-Gupta para a bacia do rio Canoas devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Evapotranspiração

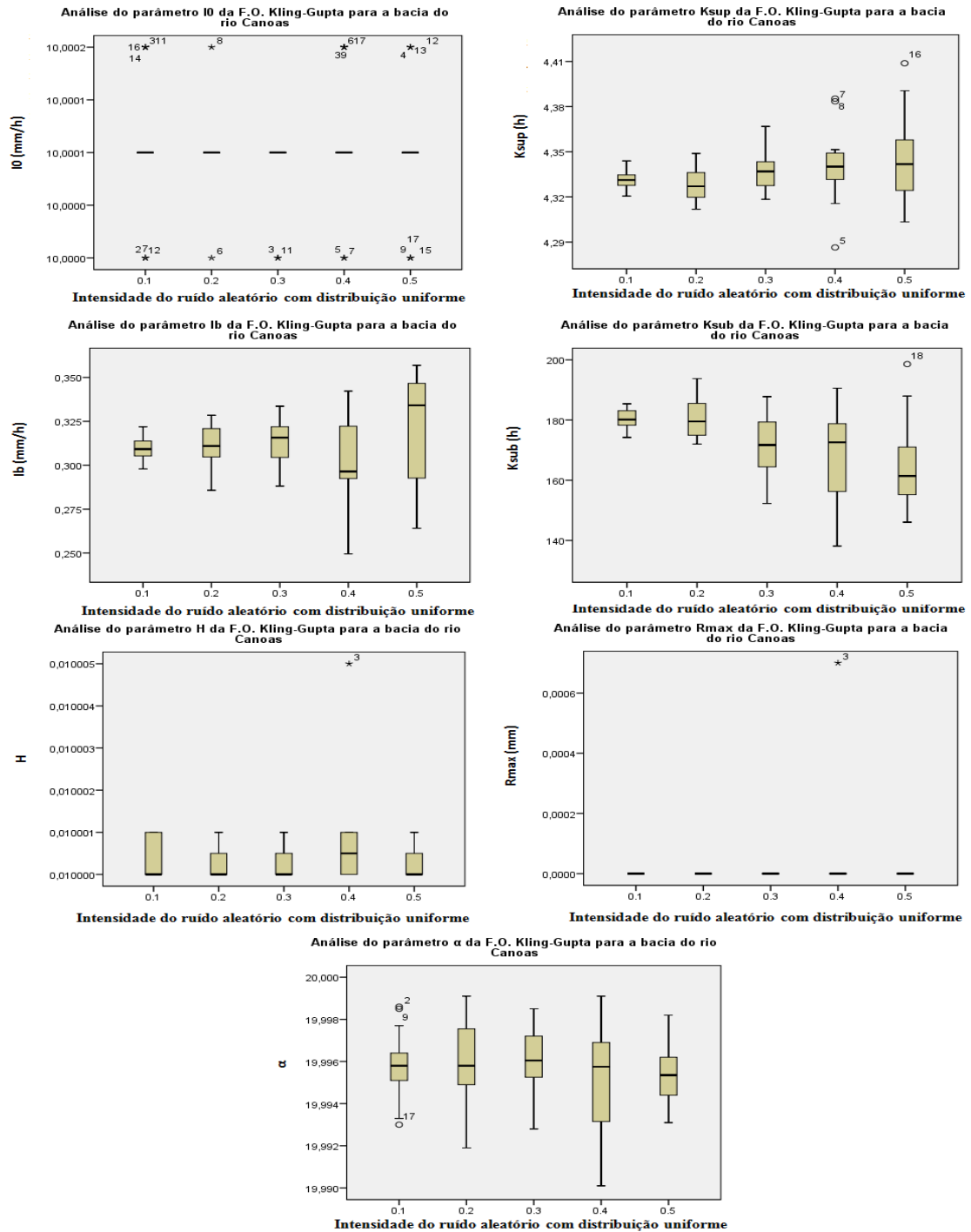


Figura 12.6 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Kling-Gupta para a bacia do rio Canoas devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Evapotranspiração

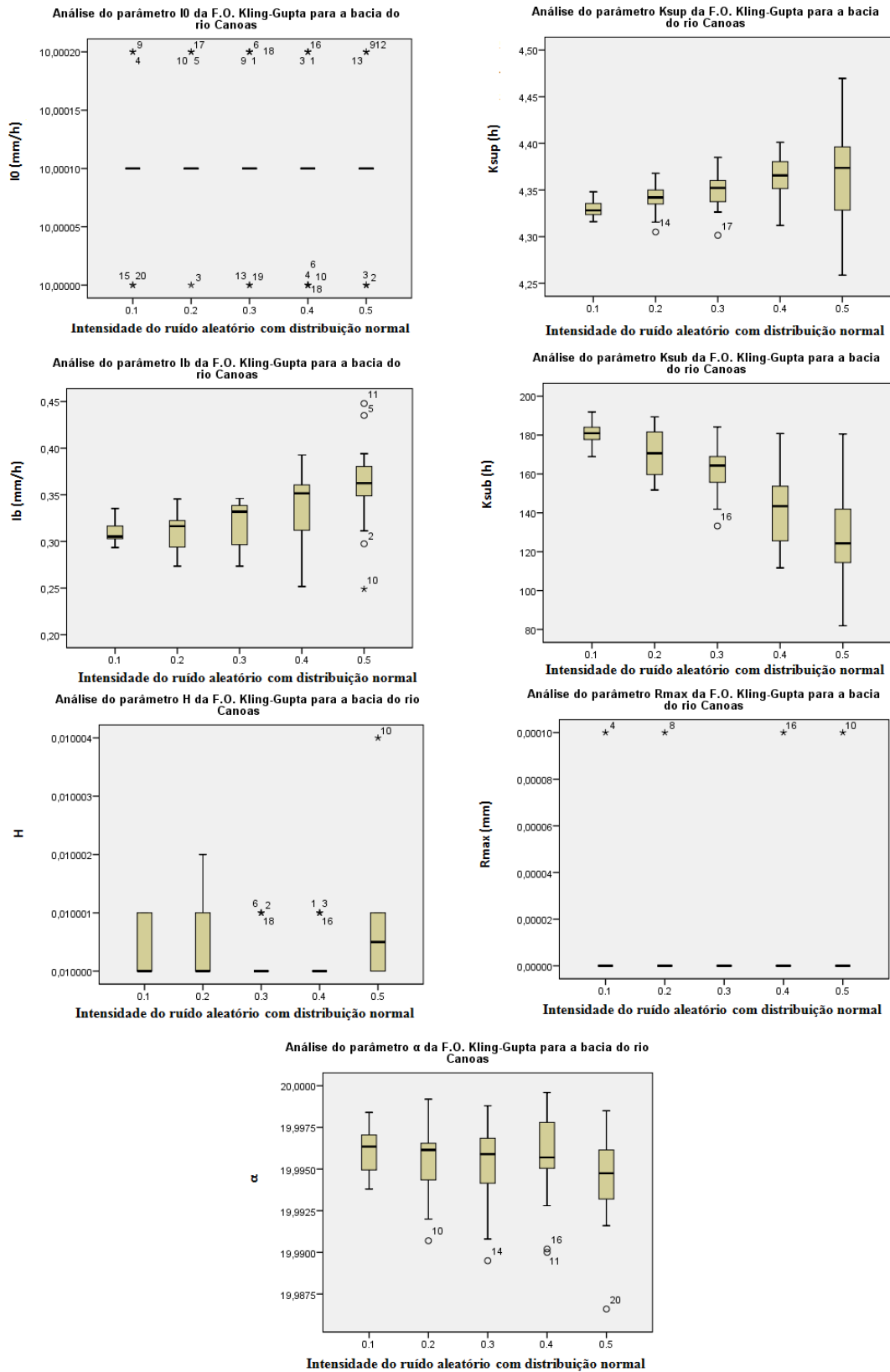


Figura 12.7 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Kling-Gupta para a bacia do rio Canoas devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Precipitação

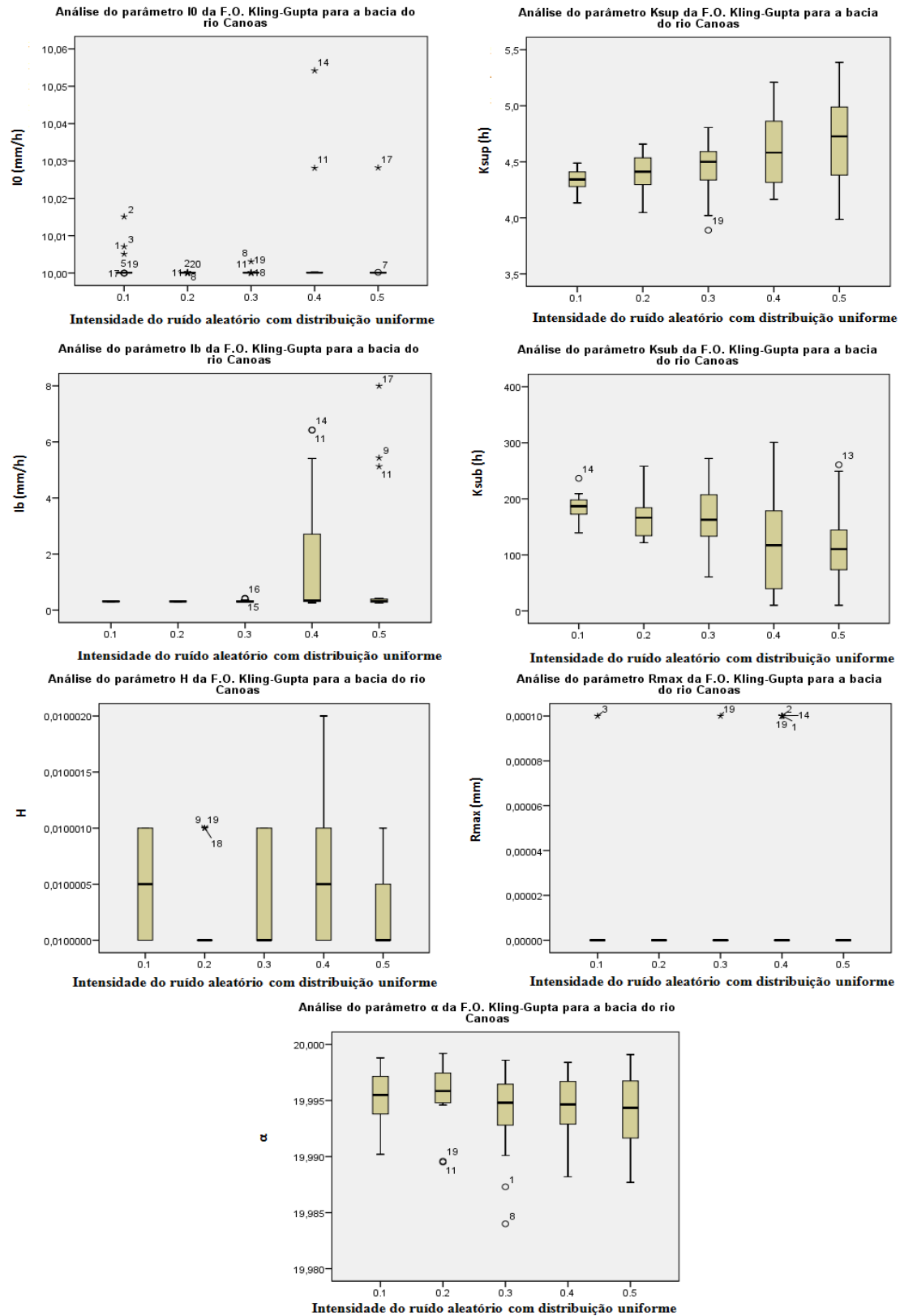


Figura 12.8 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Kling-Gupta para a bacia do rio Canoas devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Precipitação

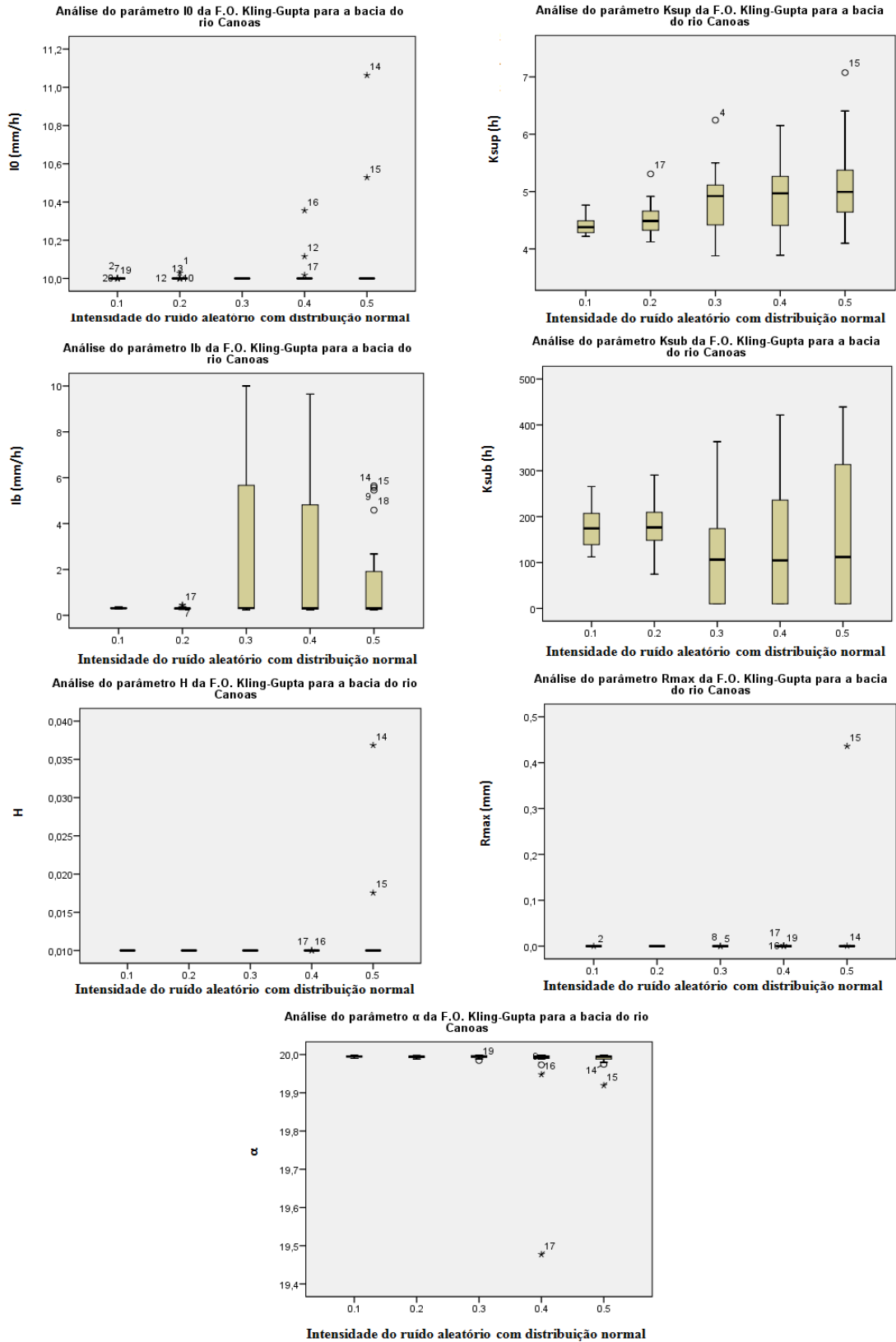


Figura 12.9 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Nash-Sutcliffe para a bacia do rio Canoas devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Evapotranspiração

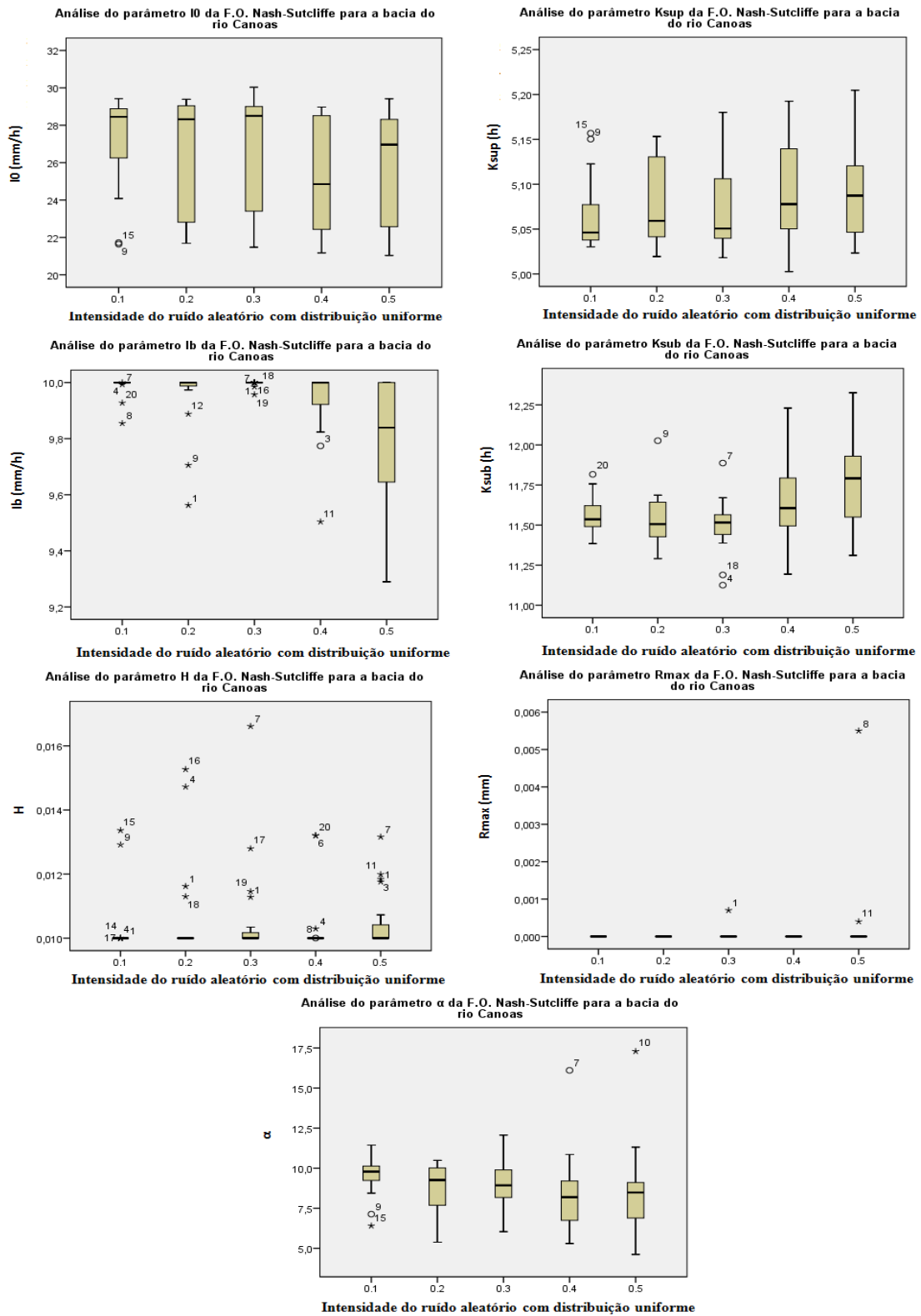


Figura 12.10 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Nash-Sutcliffe para a bacia do rio Canoas devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Evapotranspiração

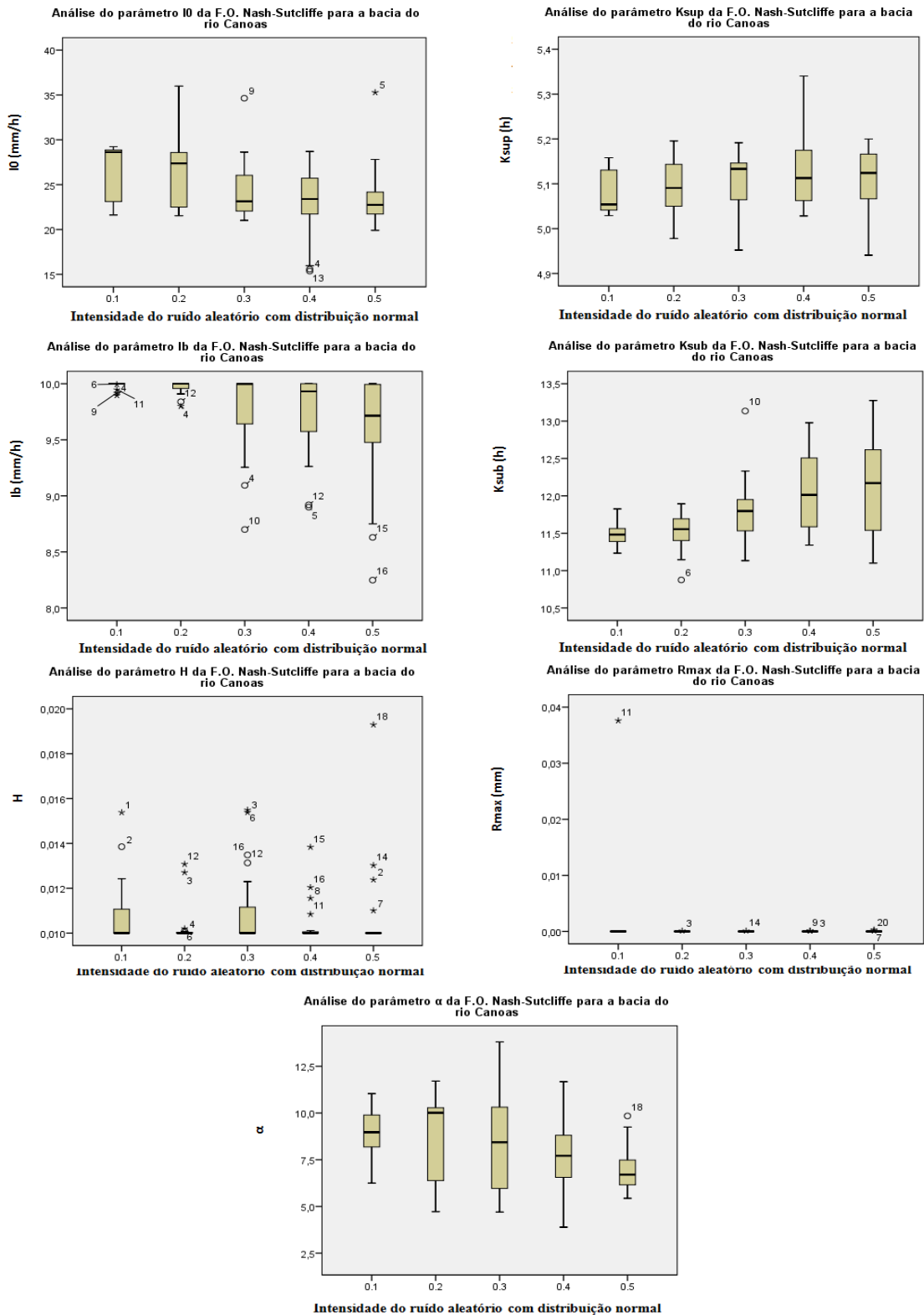


Figura 12.11 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Nash-Sutcliffe para a bacia do rio Canoas devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Precipitação

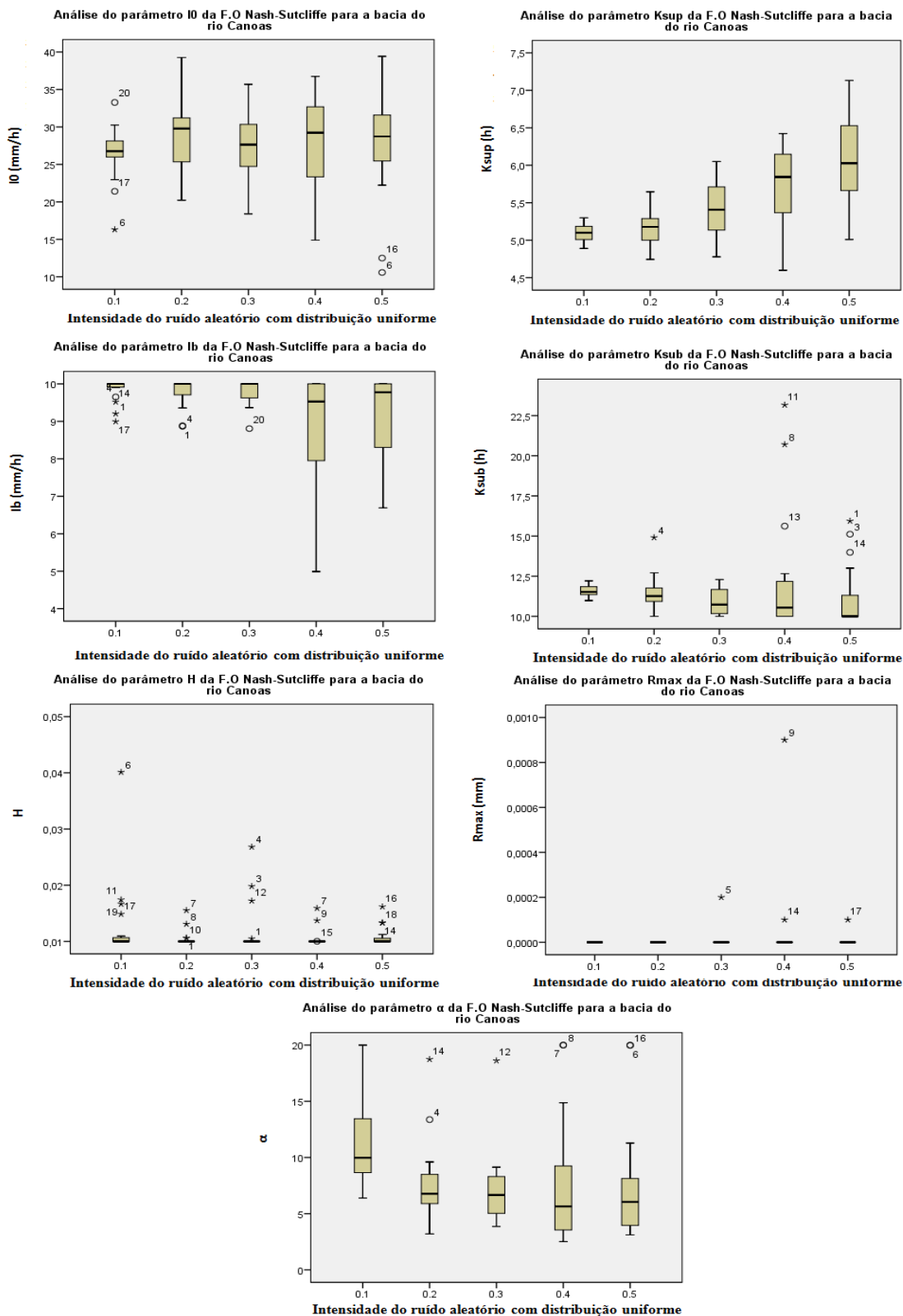


Figura 12.12 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Nash-Sutcliffe para a bacia do rio Canoas devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Precipitação

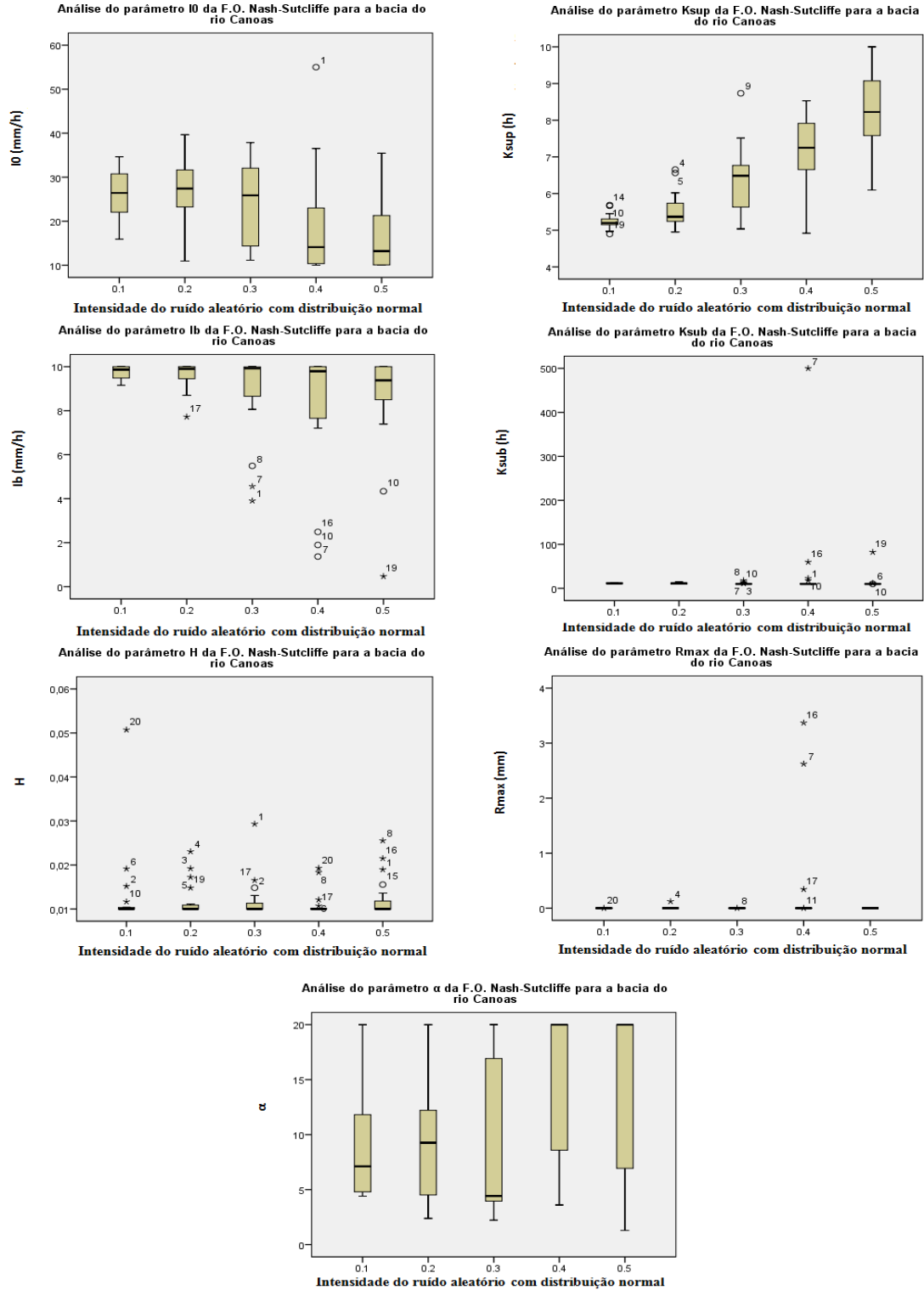


Figura 12.13 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Quadrático Inverso para a bacia do rio Canoas devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Evapotranspiração

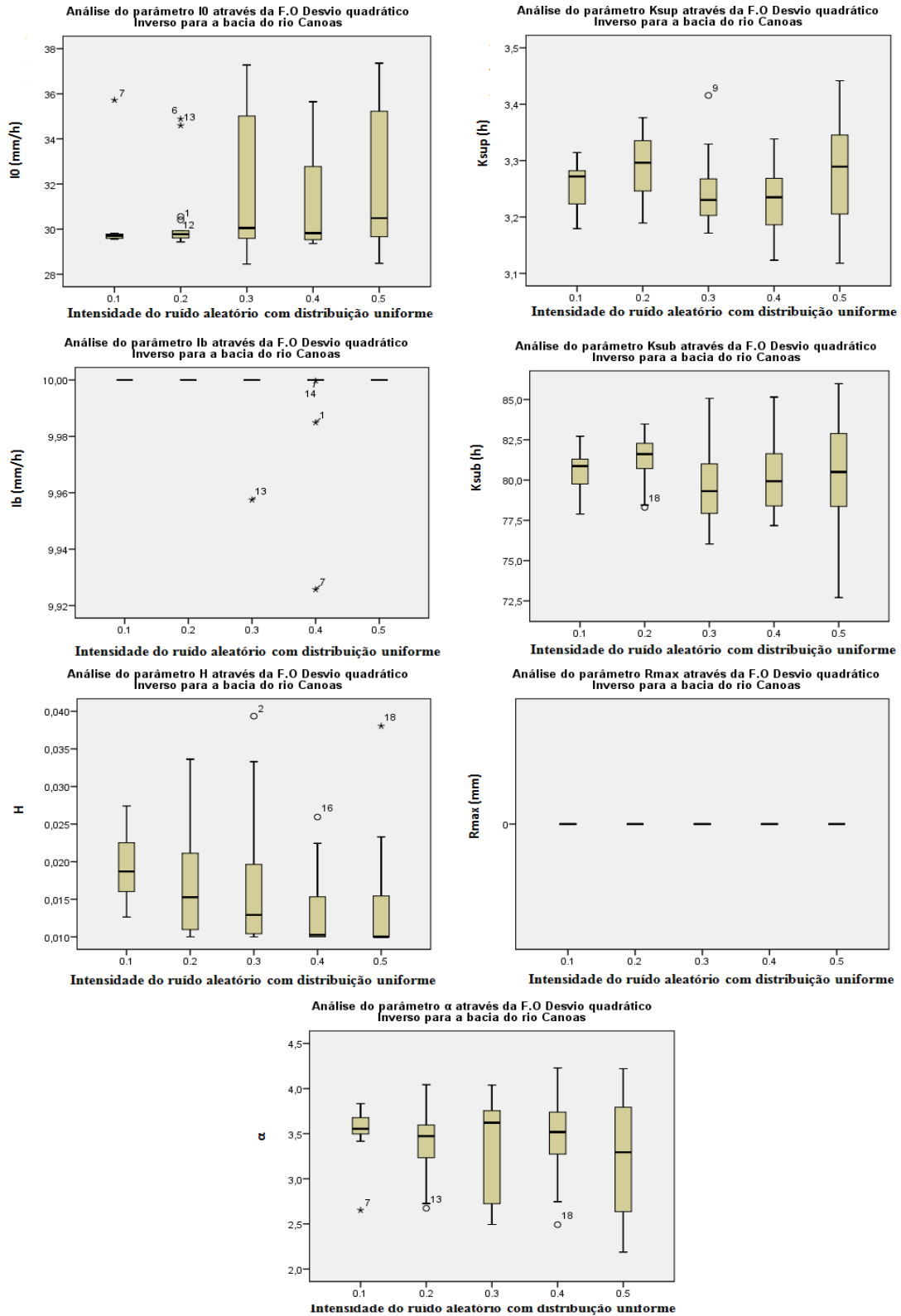


Figura 12.14 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Quadrático Inverso para a bacia do rio Canoas devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Evapotranspiração

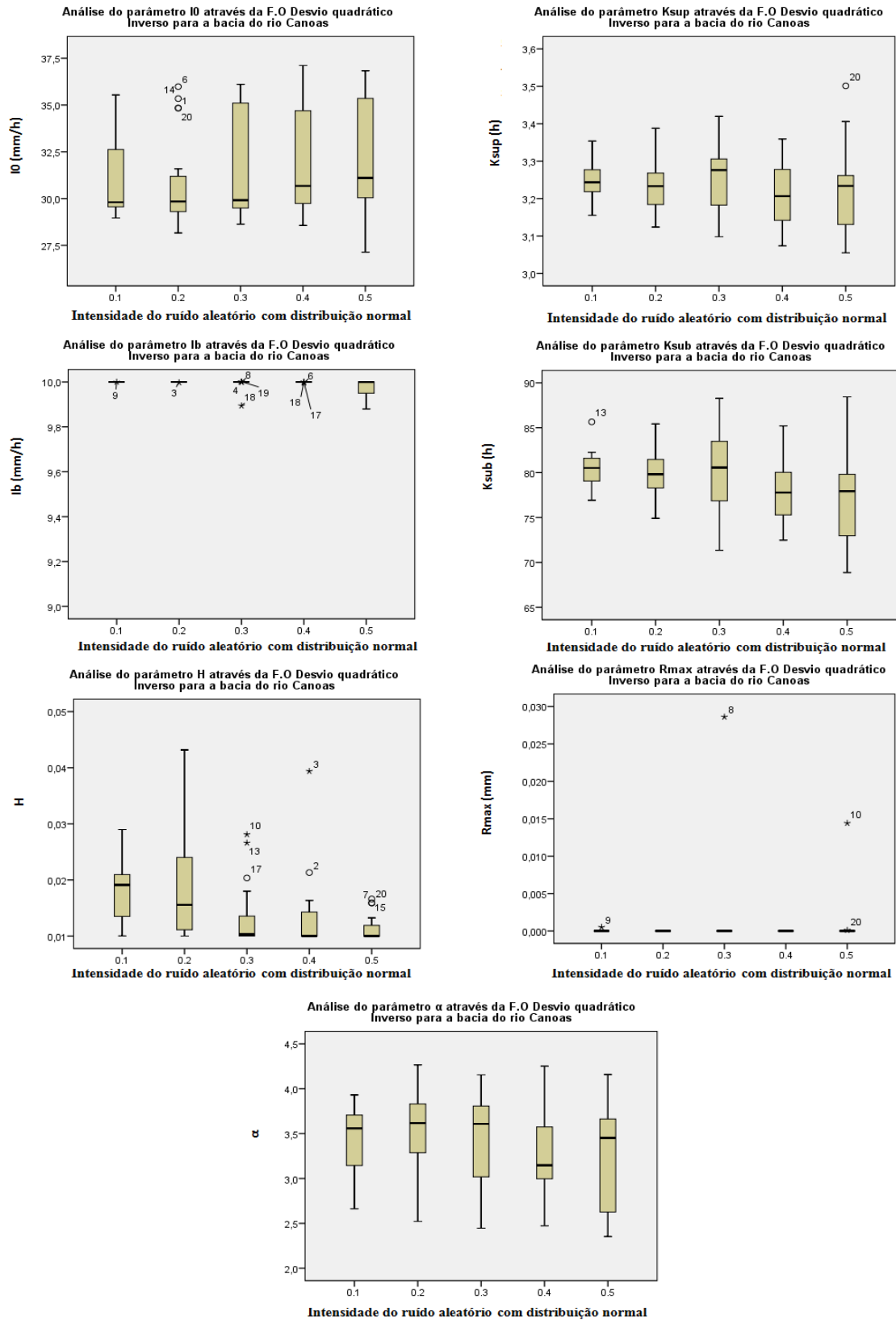


Figura 12.15 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Quadrático Inverso para a bacia do rio Canoas devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Precipitação

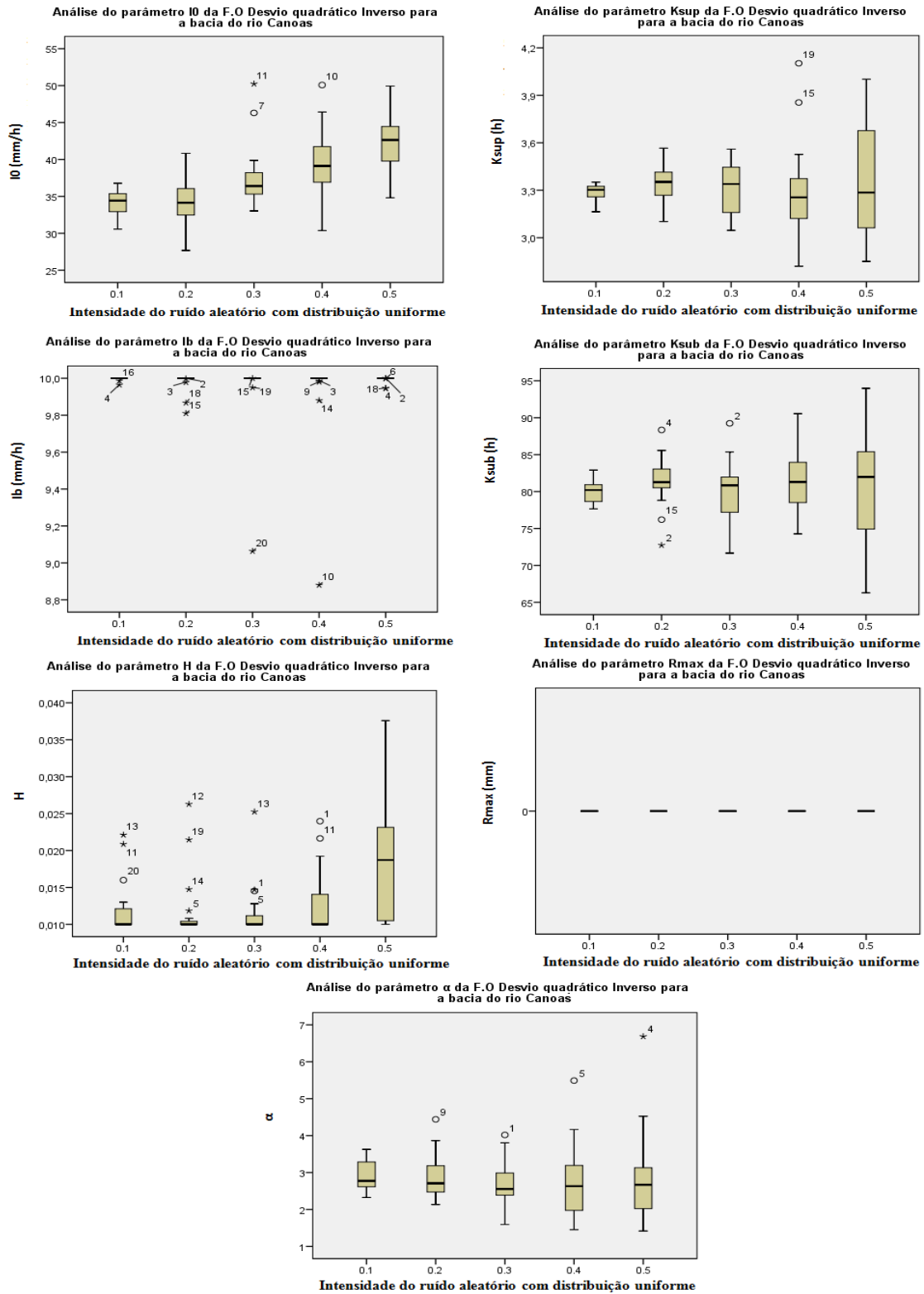


Figura 12.16 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Quadrático Inverso para a bacia do rio Canoas devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Precipitação

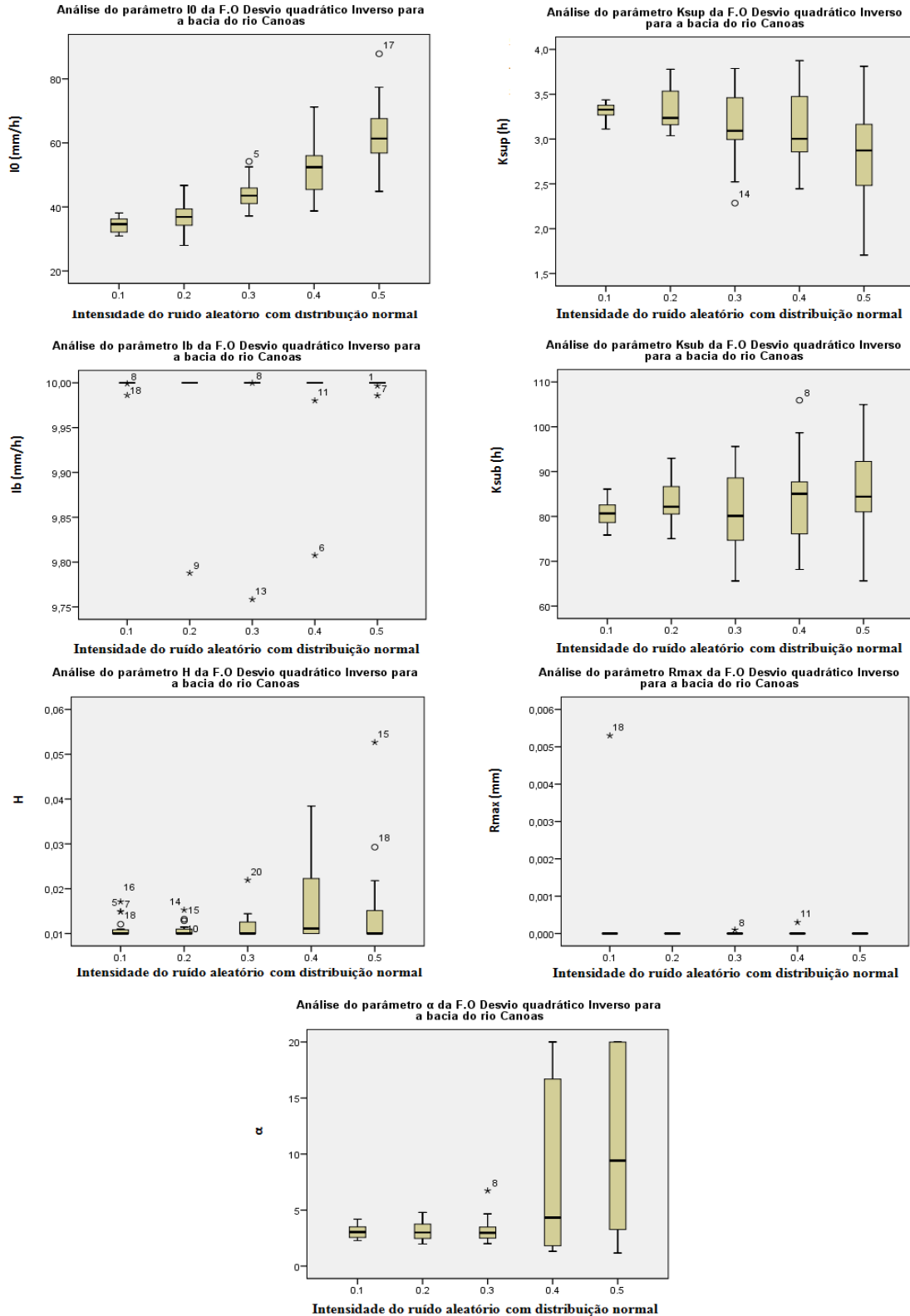


Figura 12.17 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Relativo Médio para a bacia do rio Canoas devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Evapotranspiração

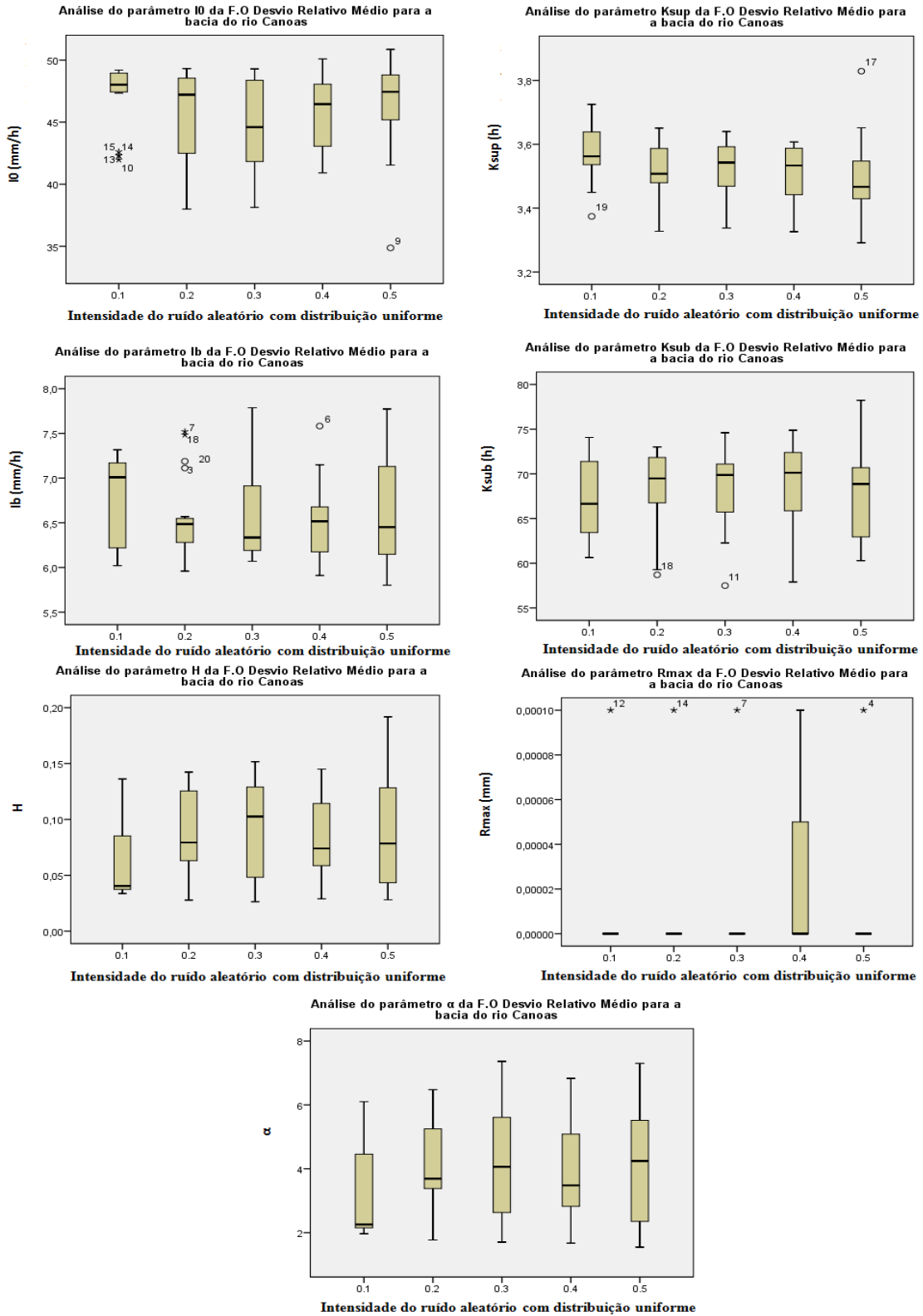


Figura 12.18 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Relativo Médio para a bacia do rio Canoas devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Evapotranspiração

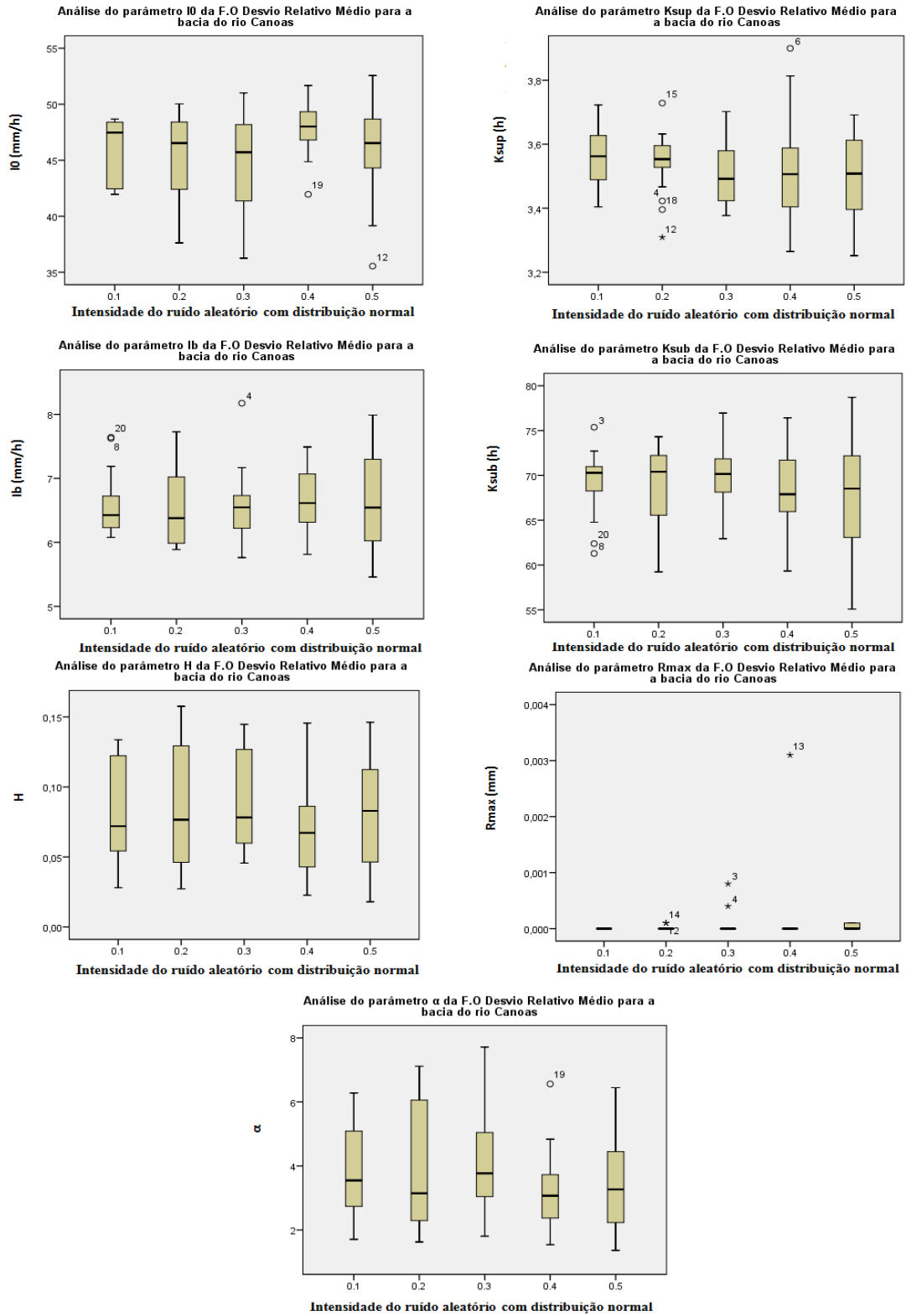


Figura 12.19 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Relativo Médio para a bacia do rio Canoas devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Precipitação

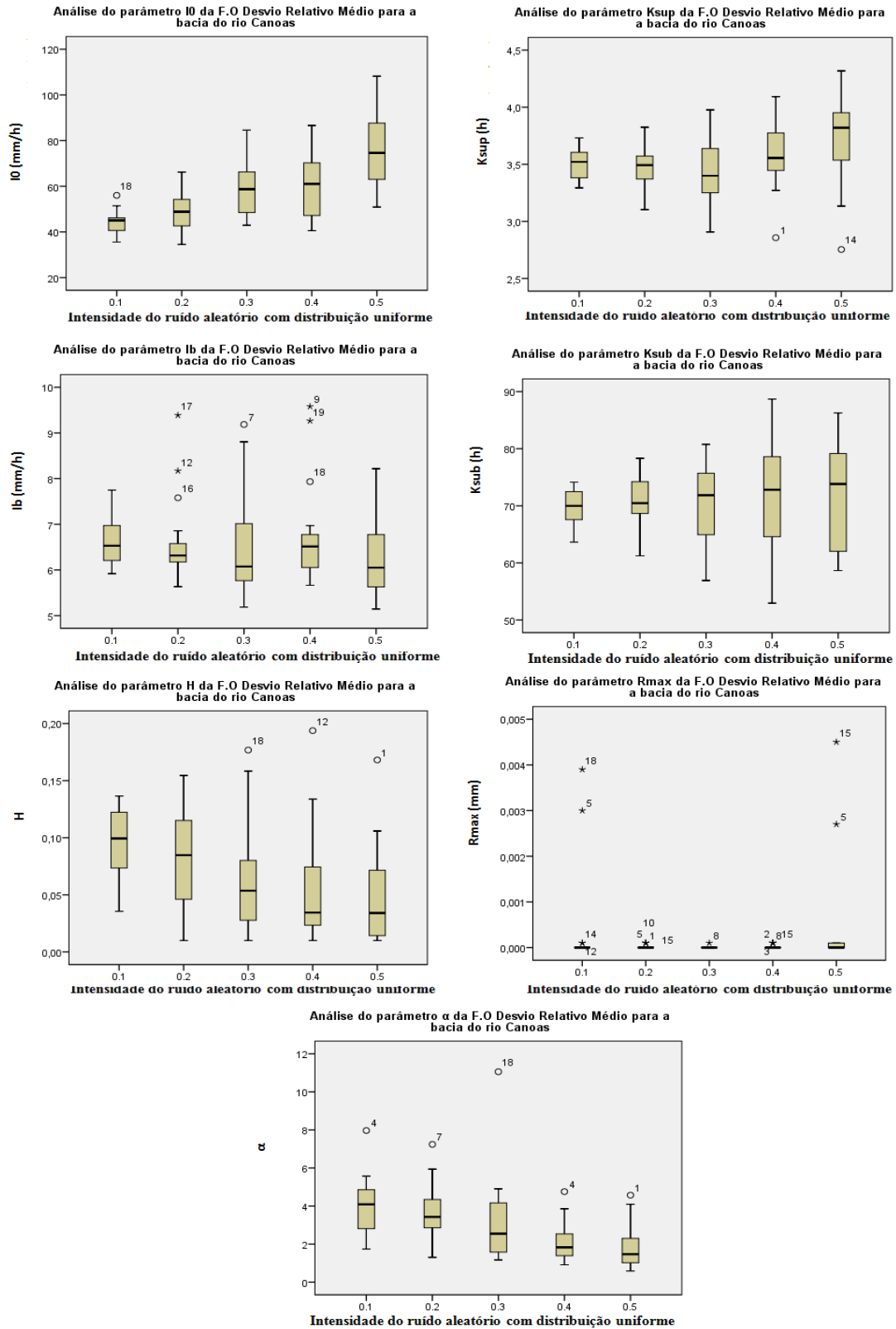
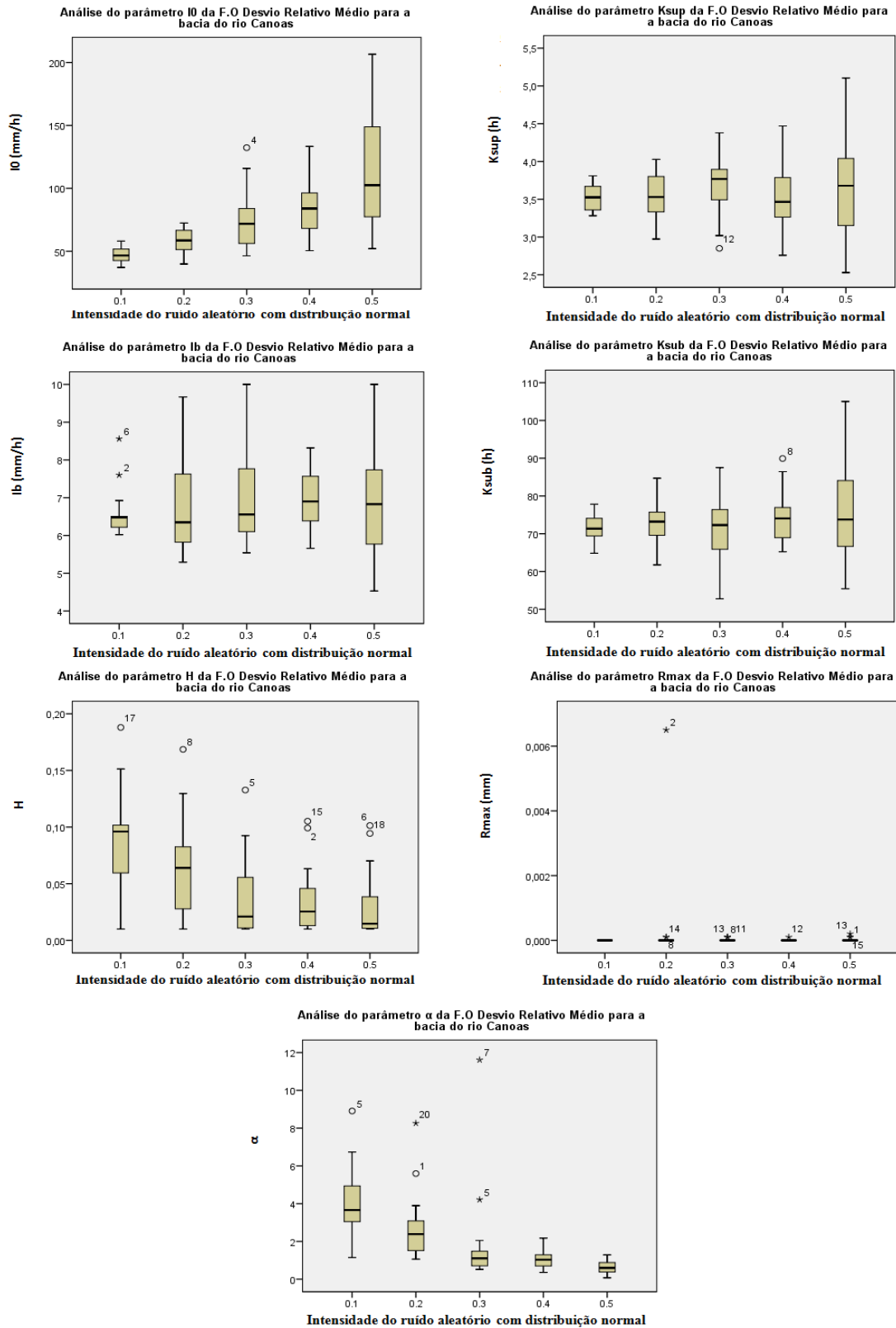


Figura 12.20 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Relativo Médio para a bacia do rio Canoas devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Precipitação



13. ANEXO IV – Bacia do rio Itu

O presente tópico apresenta os resultados obtidos com a análise de sensibilidade estática e dinâmica para a bacia do rio Itu.

Análise de sensibilidade estática

Erro aleatório na evapotranspiração e na precipitação

Figura 13.1 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objetivo, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal nos dados de evapotranspiração para a bacia do rio Itu devido a análise de sensibilidade estática.

Evapotranspiração

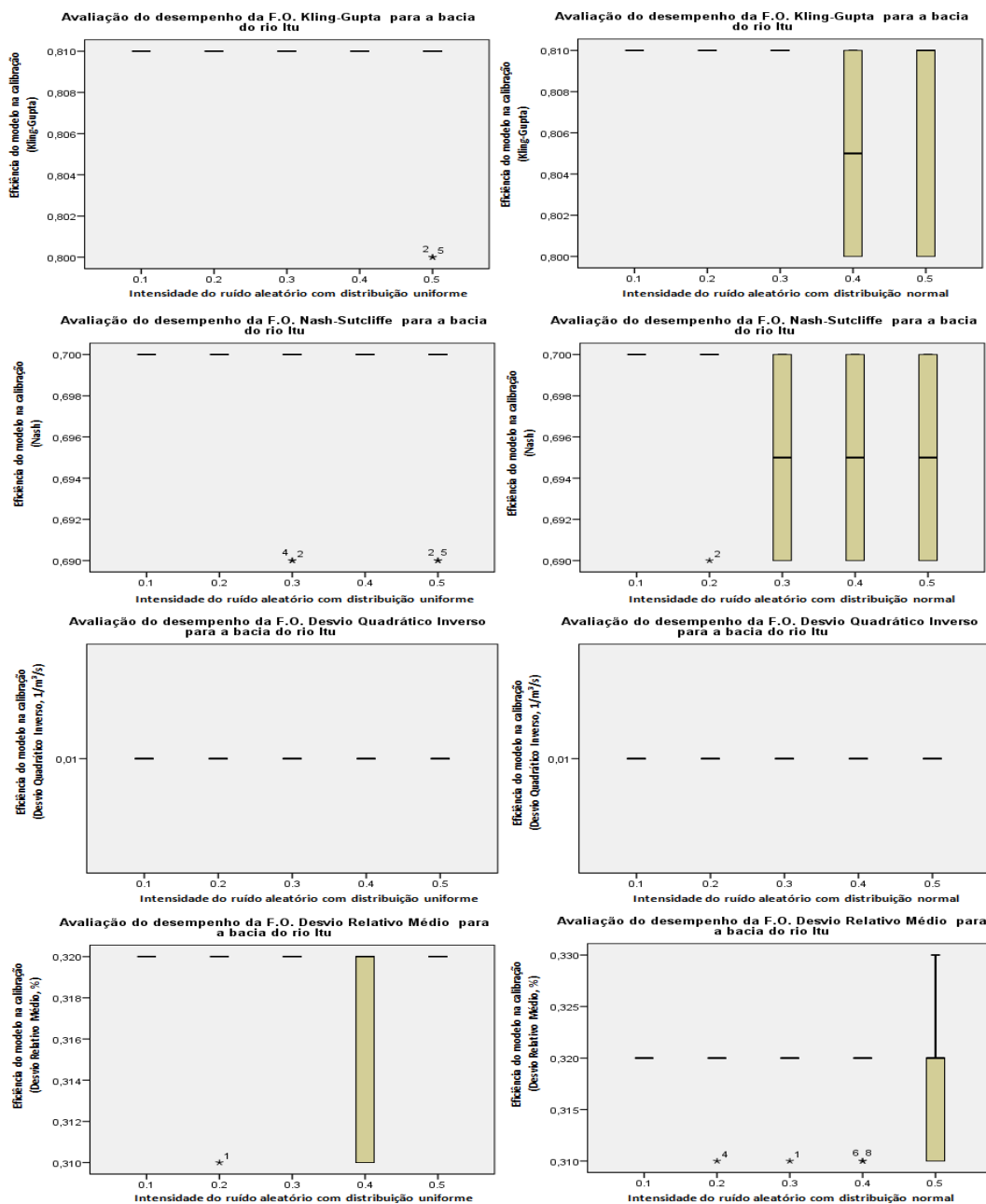
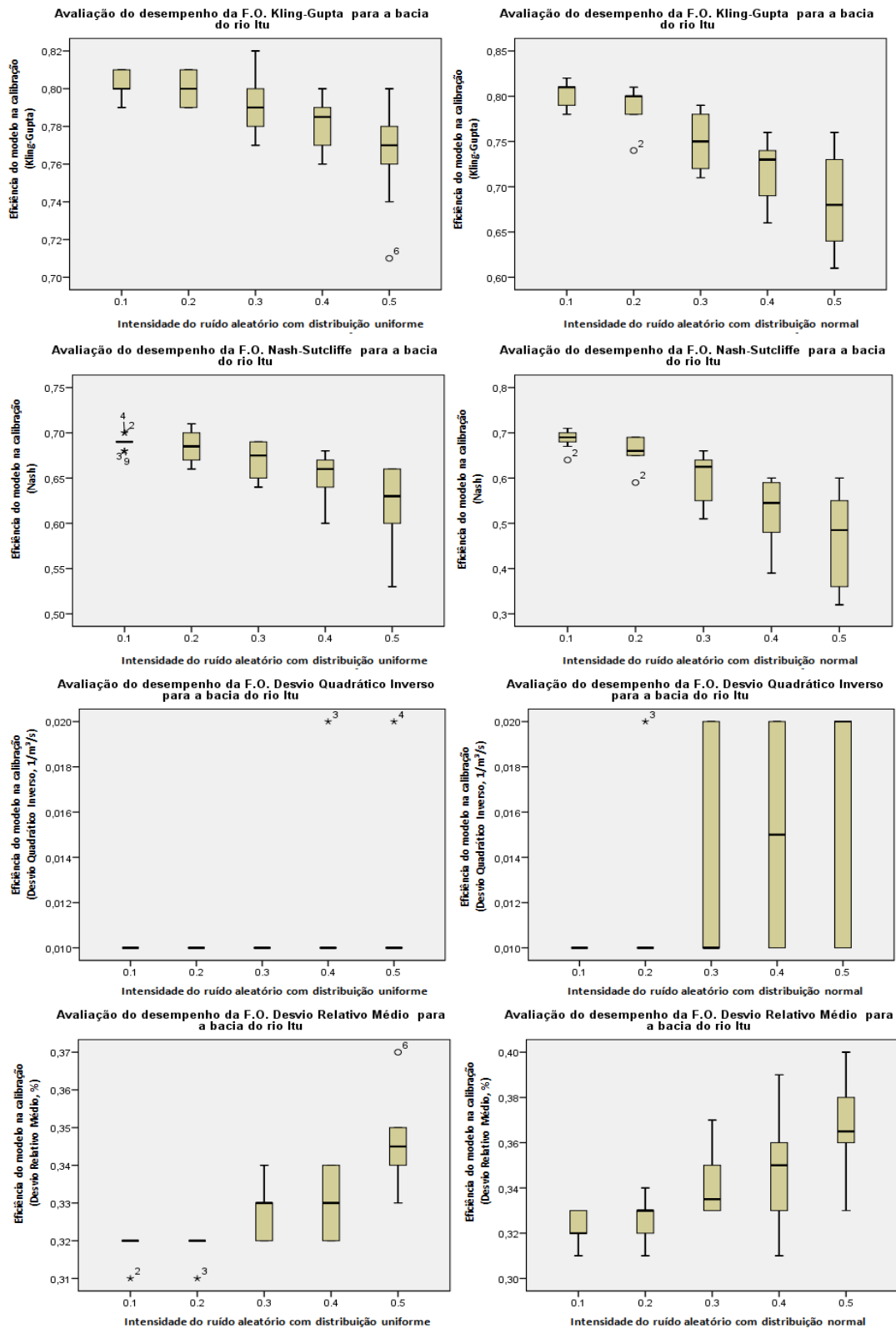


Figura 13.2 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objetivo, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal nos dados de precipitação para a bacia do rio Itu devido a análise de sensibilidade estática.

Precipitação



Análise de sensibilidade dinâmica

Erro aleatório na evapotranspiração e na precipitação

Figura 13.3 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objetivo, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal nos dados de evapotranspiração para a bacia do rio Itu devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Evapotranspiração

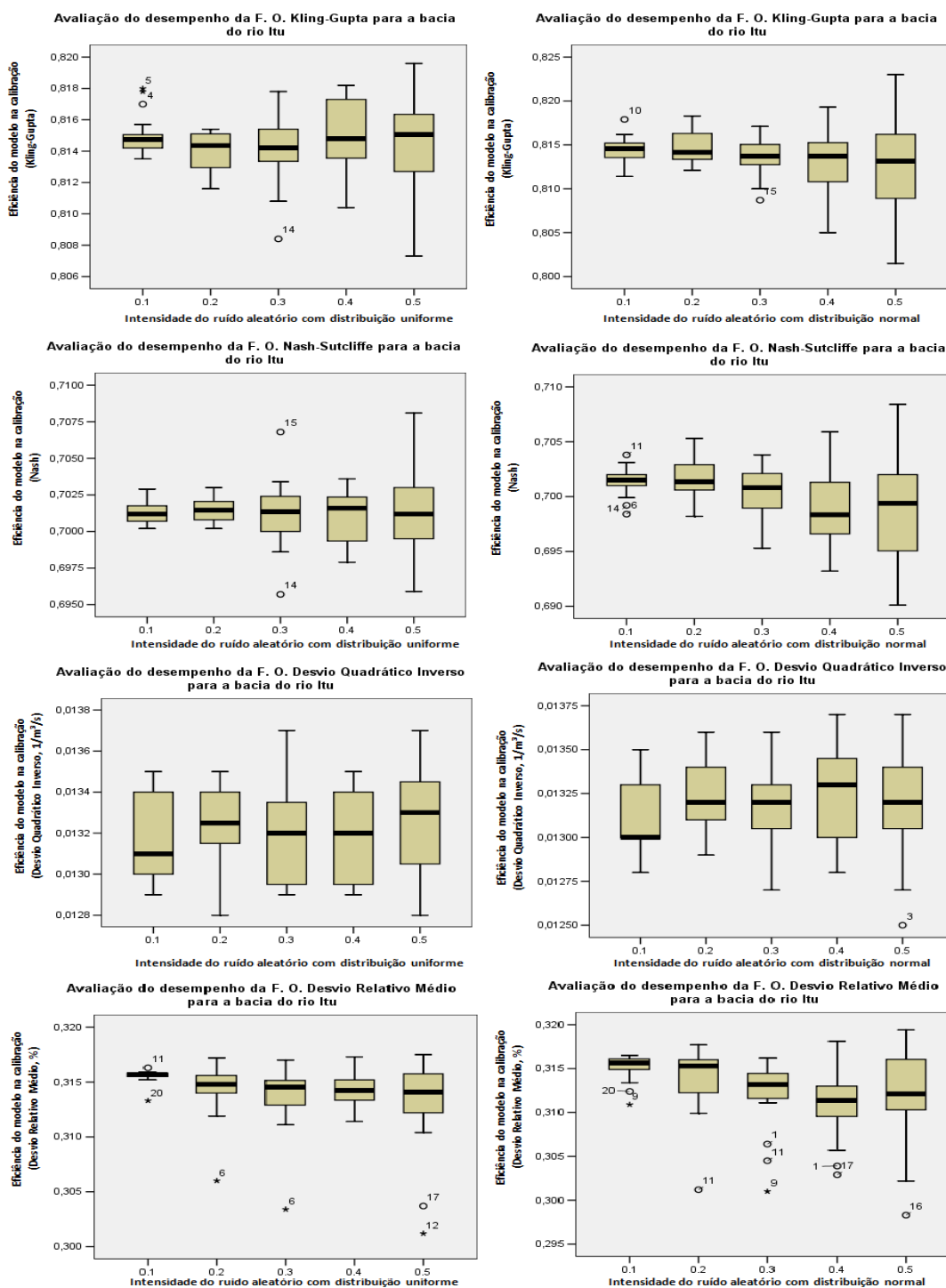
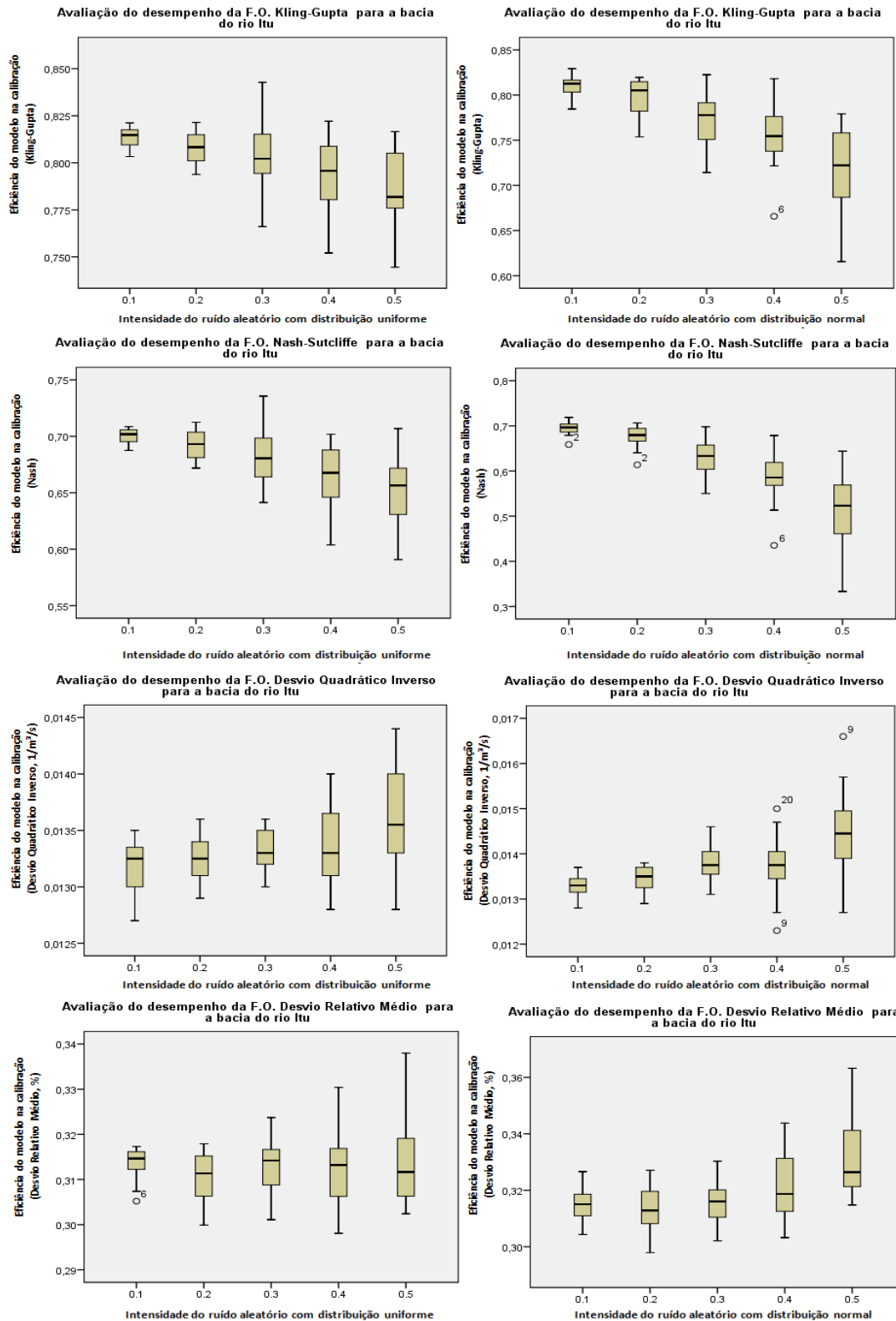


Figura 13.4 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objetivo, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal nos dados de precipitação para a bacia do rio Itu devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Precipitação



Impacto dos erros nos dados de entrada nos parâmetros do modelo em diferentes funções objetivo.

Figura 13.5 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Kling-Gupta para a bacia do rio Itu devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Evapotranspiração

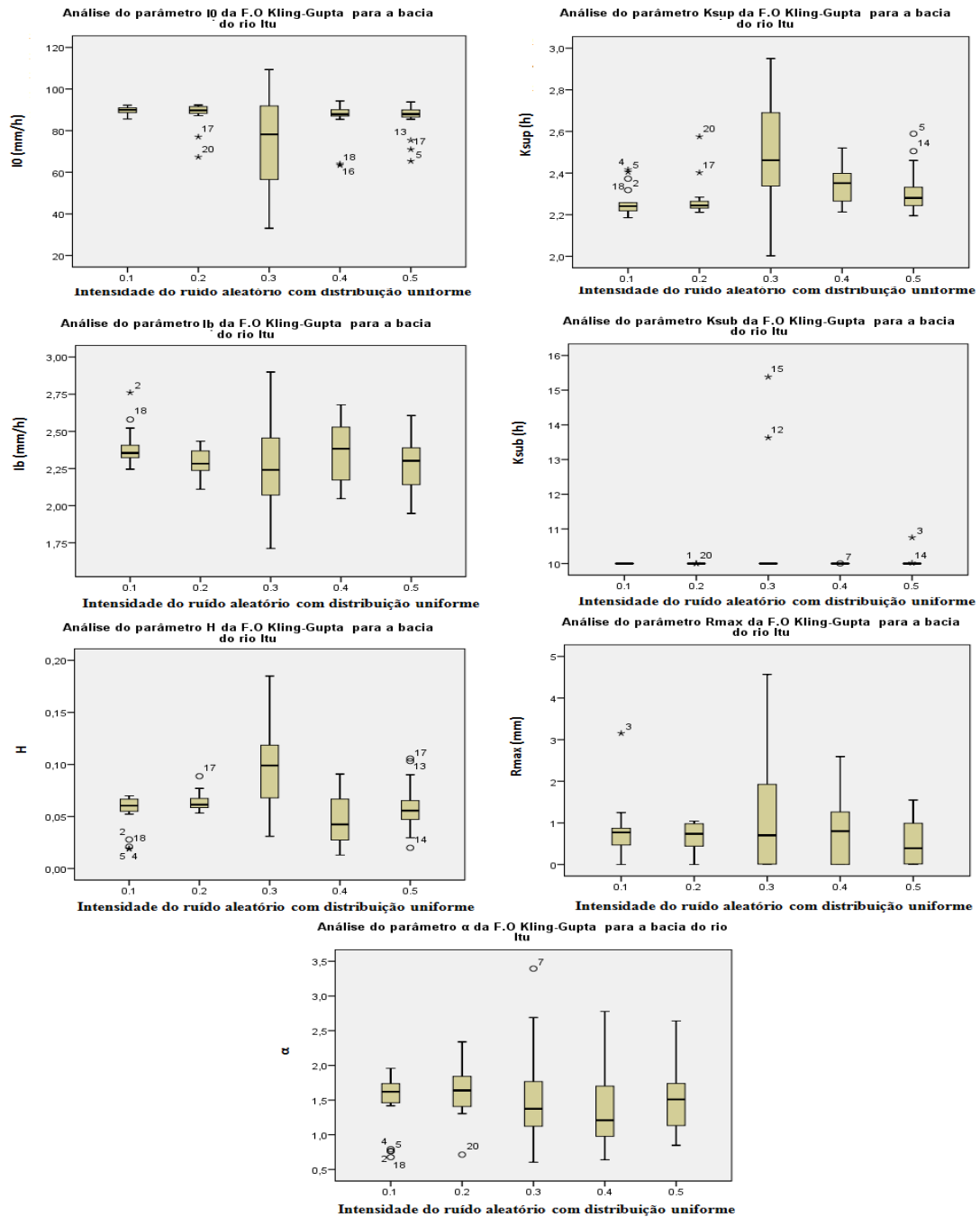


Figura 13.7 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Kling-Gupta para a bacia do rio Itu devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Precipitação

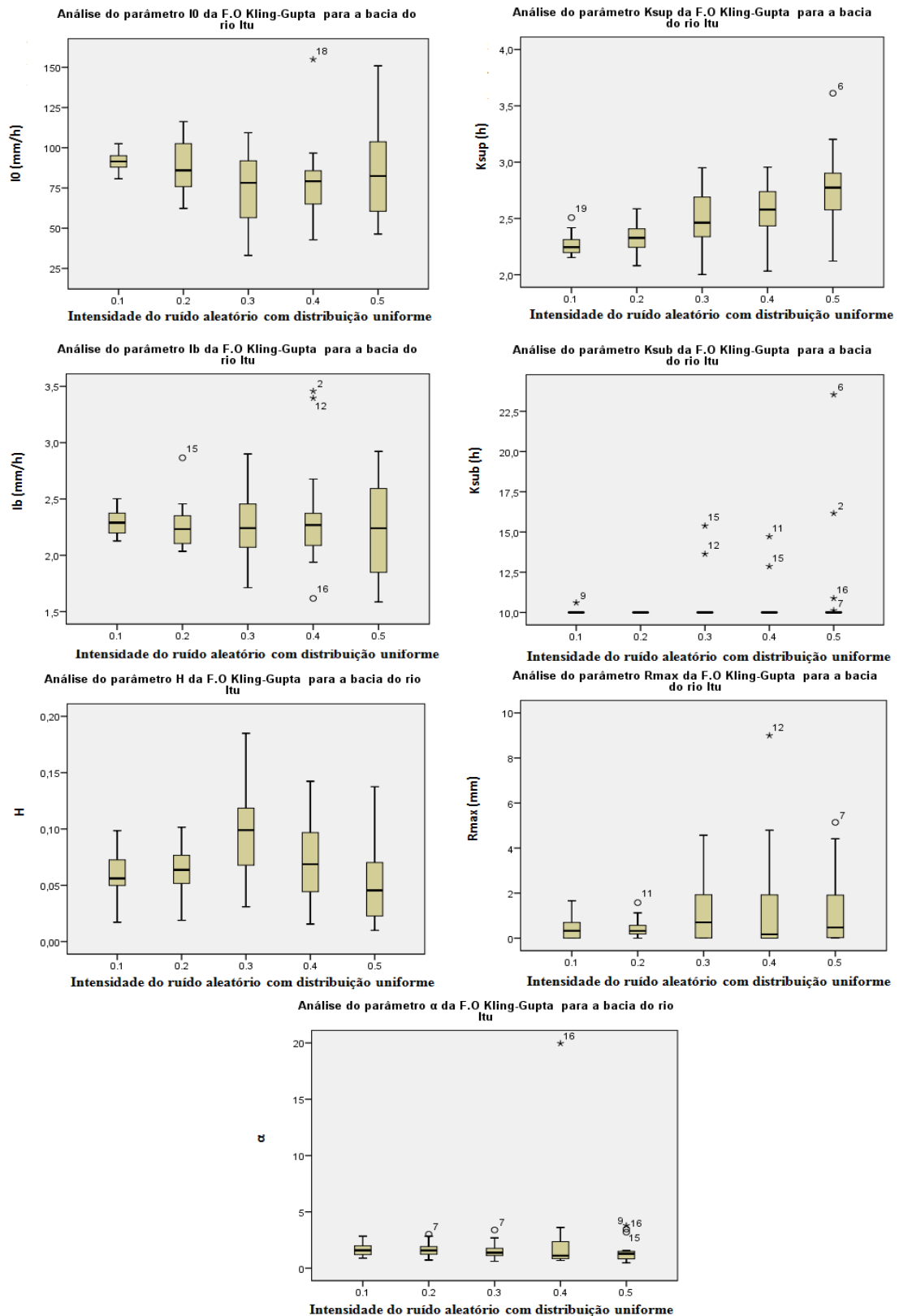


Figura 13.8 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Kling-Gupta para a bacia do rio Itu devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Precipitação

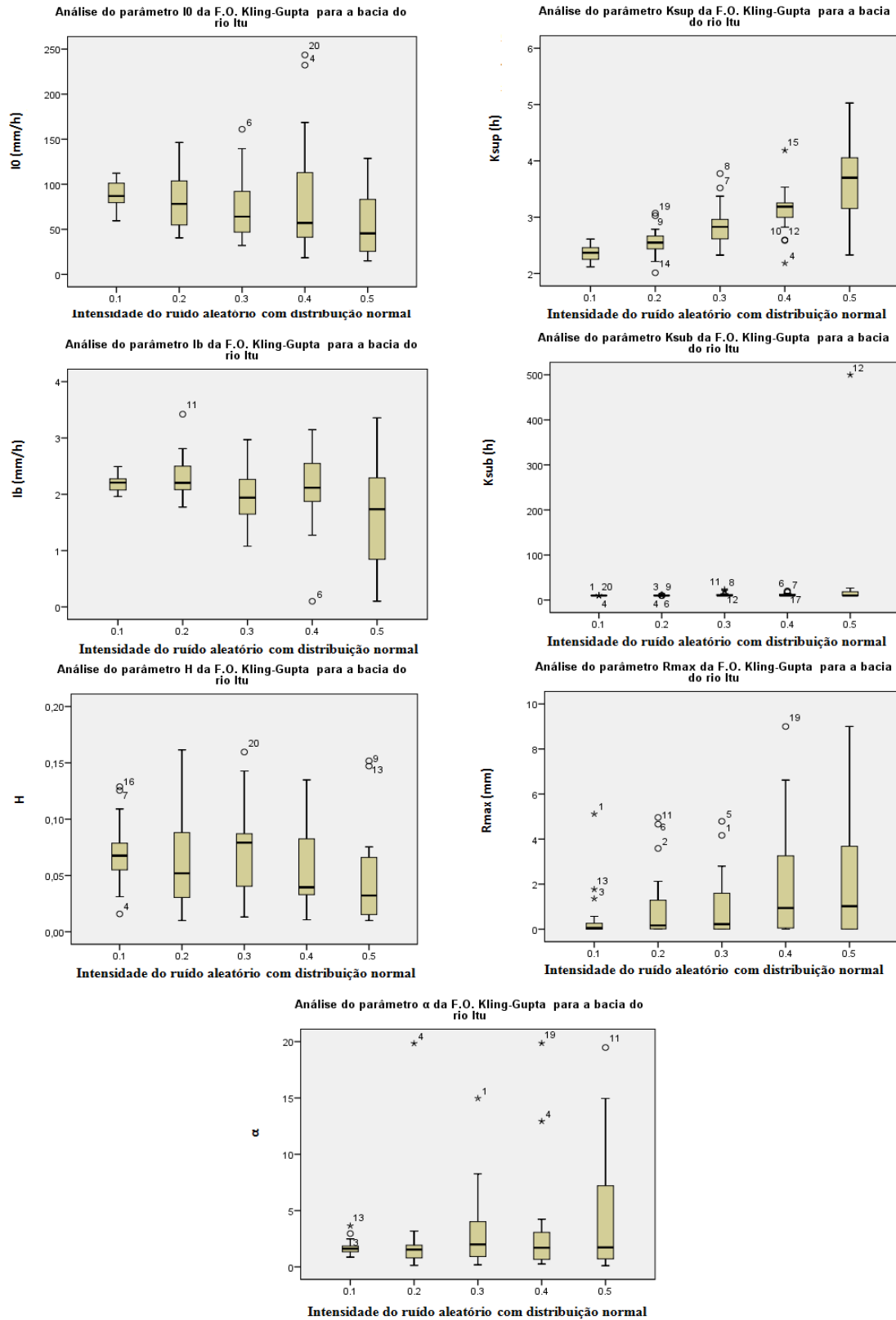


Figura 13.9 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Nash-Sutcliffe para a bacia do rio Itu devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Evapotranspiração

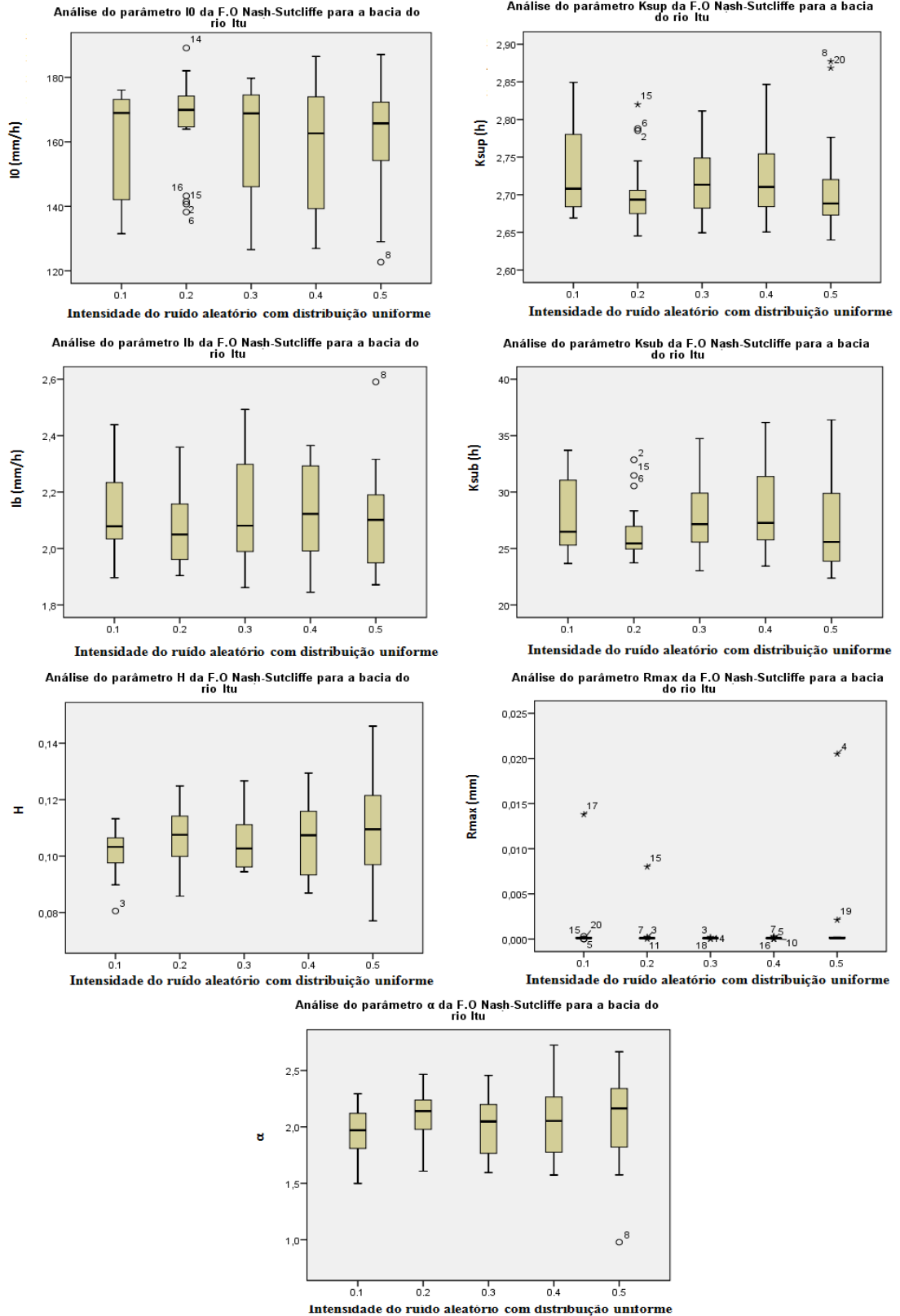


Figura 13.11 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Nash-Sutcliffe para a bacia do rio Itu devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Precipitação

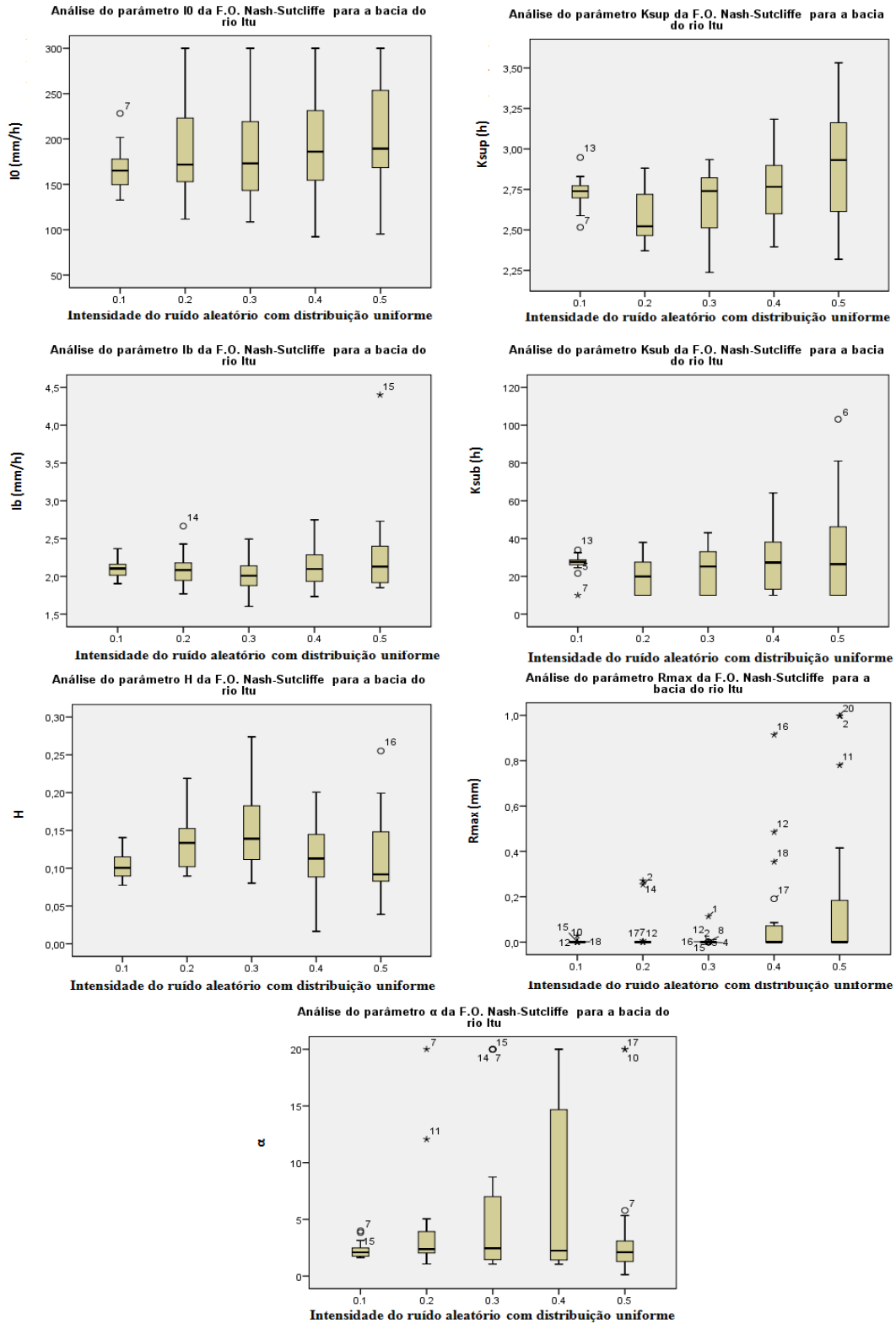


Figura 13.12 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Nash-Sutcliffe para a bacia do rio Itu devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Precipitação

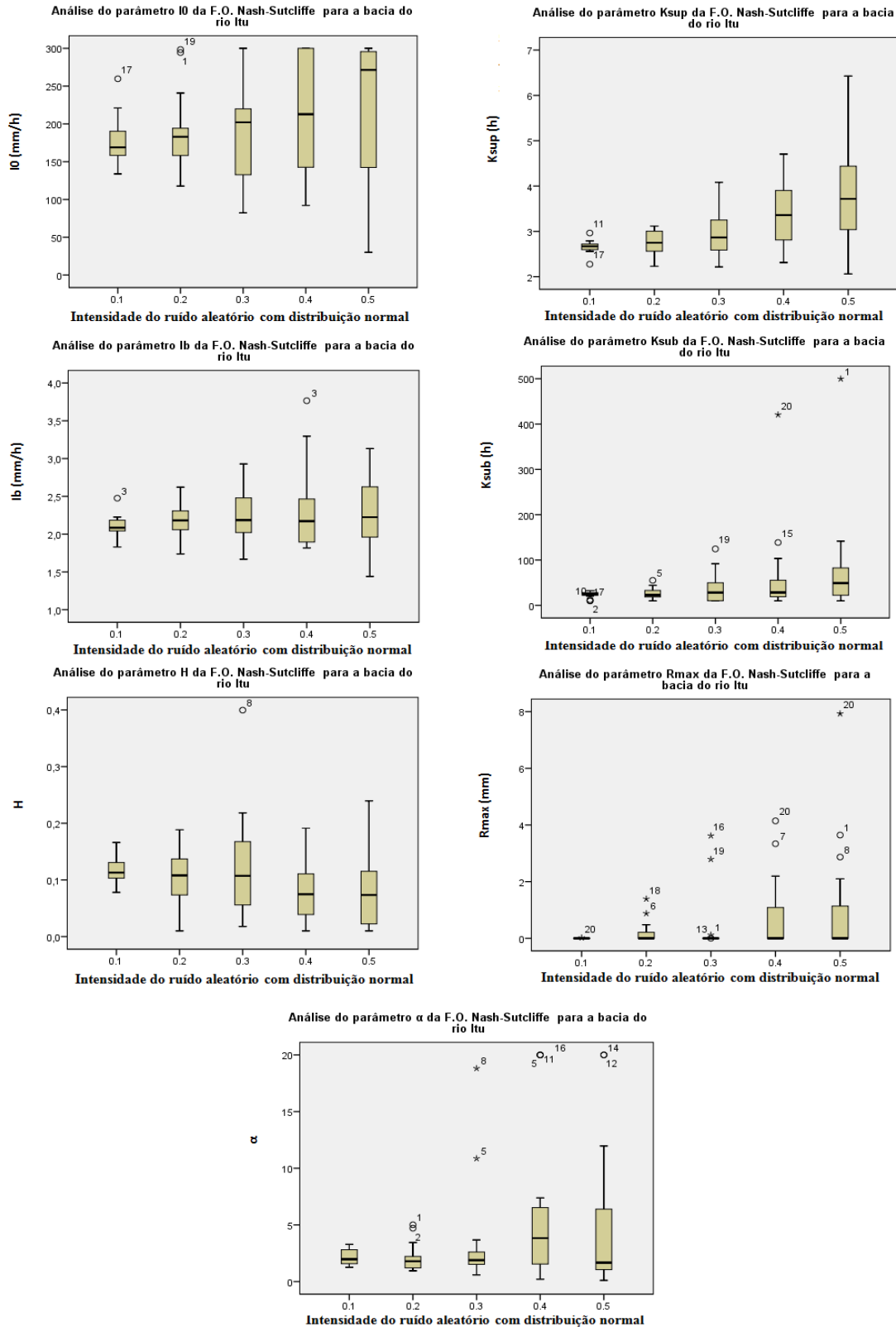


Figura 13.13 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Quadrático Inverso para a bacia do rio Itu devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Evapotranspiração

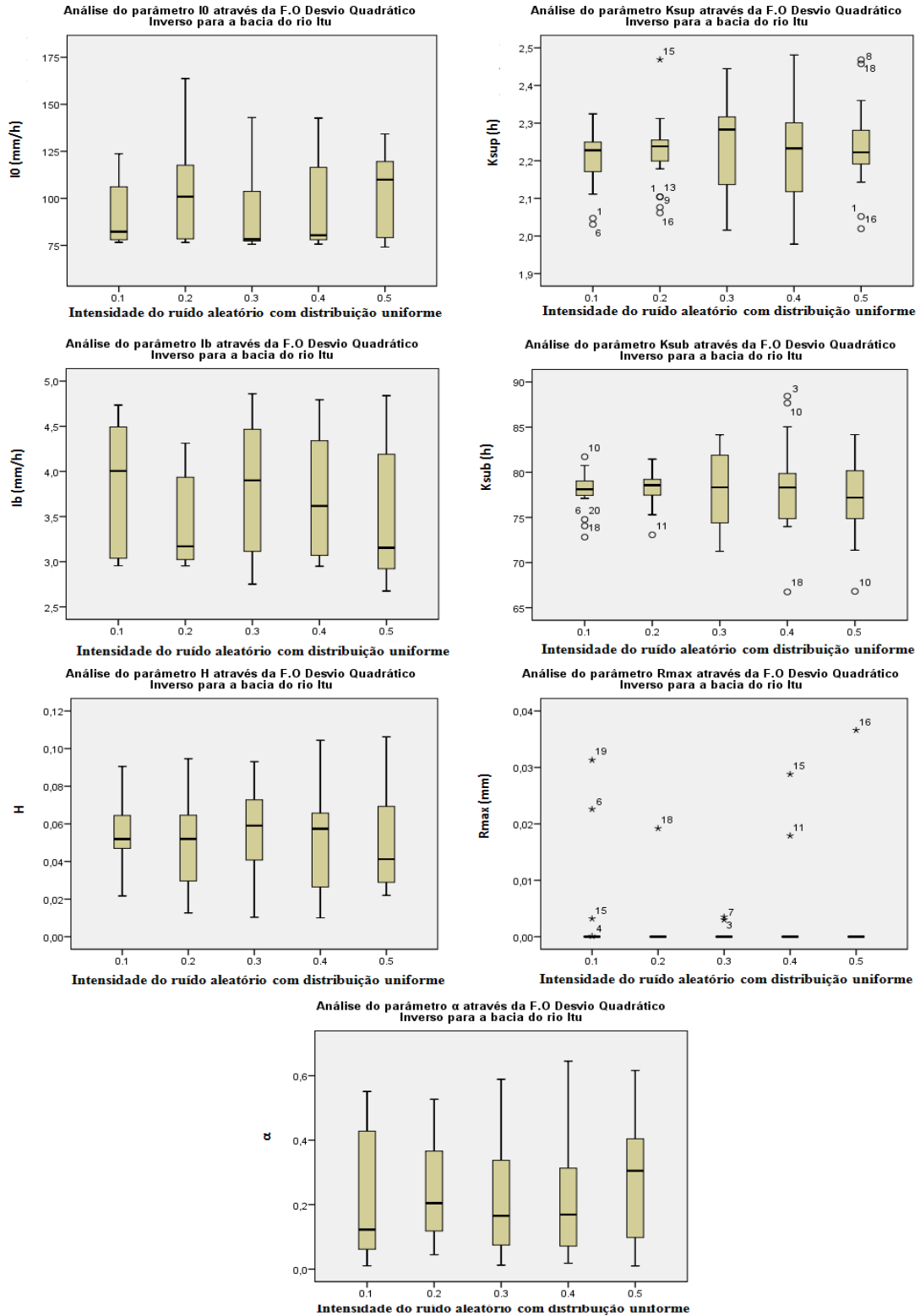


Figura 13.14 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Quadrático Inverso para a bacia do rio Itu devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Evapotranspiração

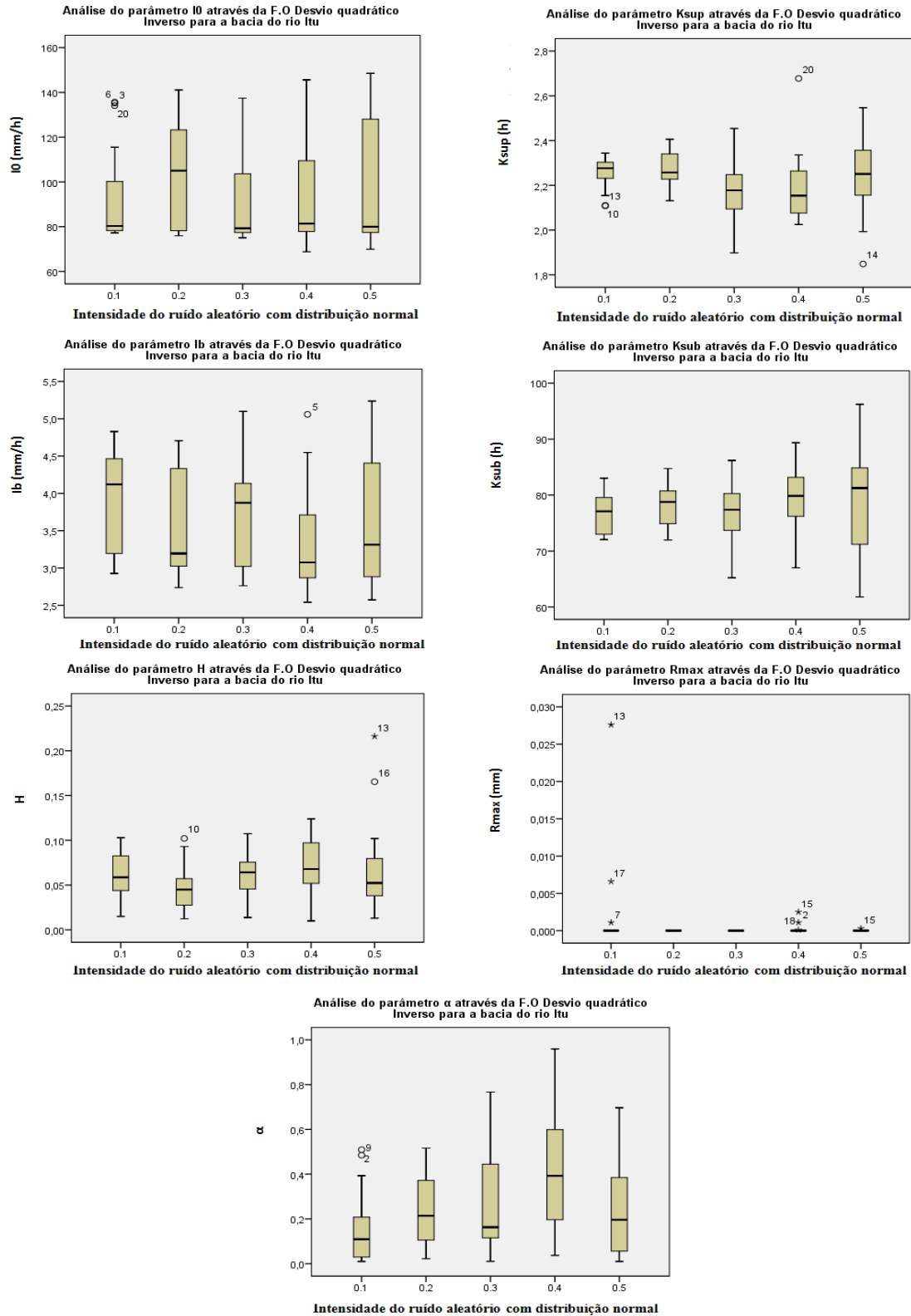


Figura 13.15 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Quadrático Inverso para a bacia do rio Itu devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Precipitação

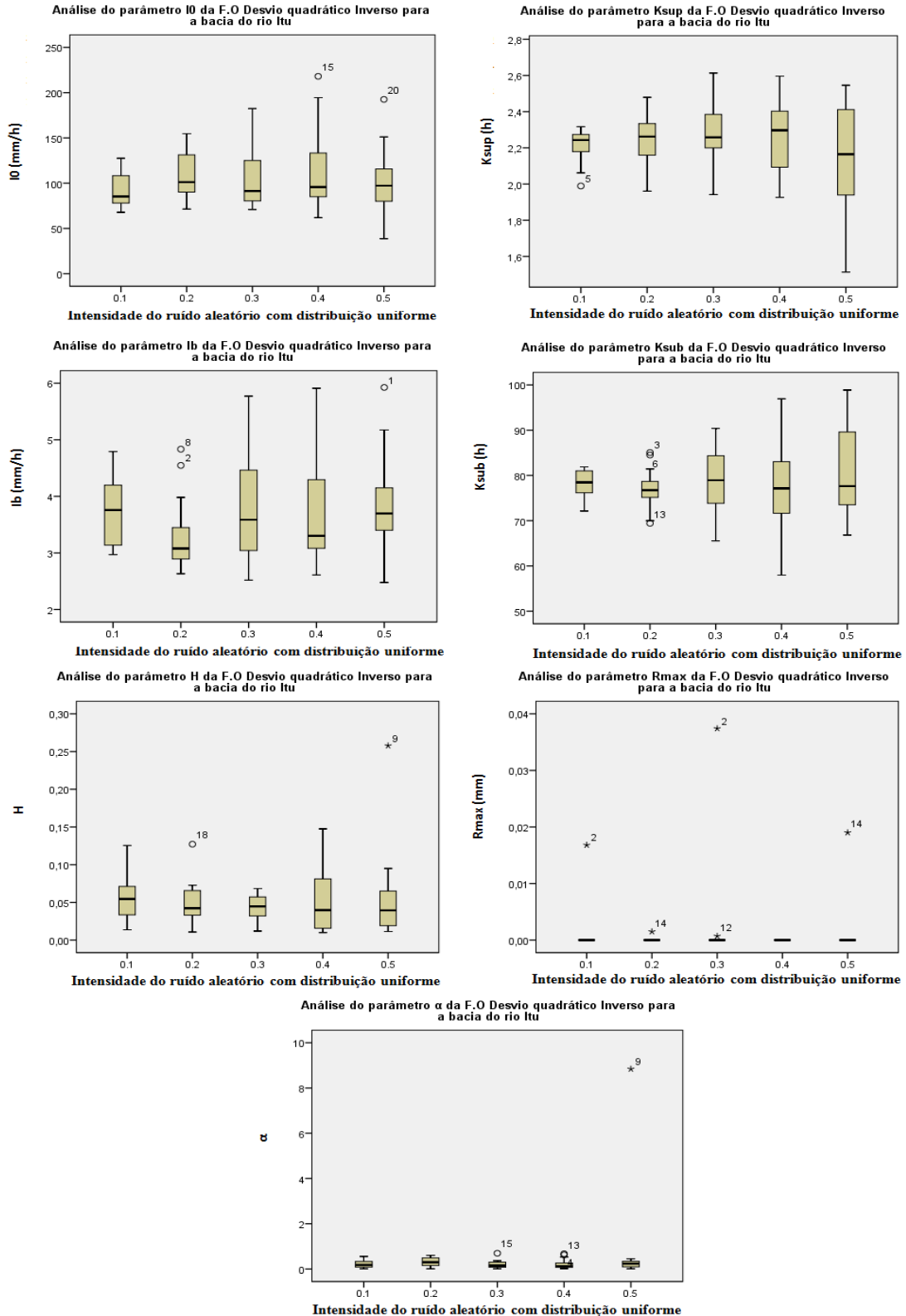


Figura 13.16 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Quadrático Inverso para a bacia do rio Itu devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Precipitação

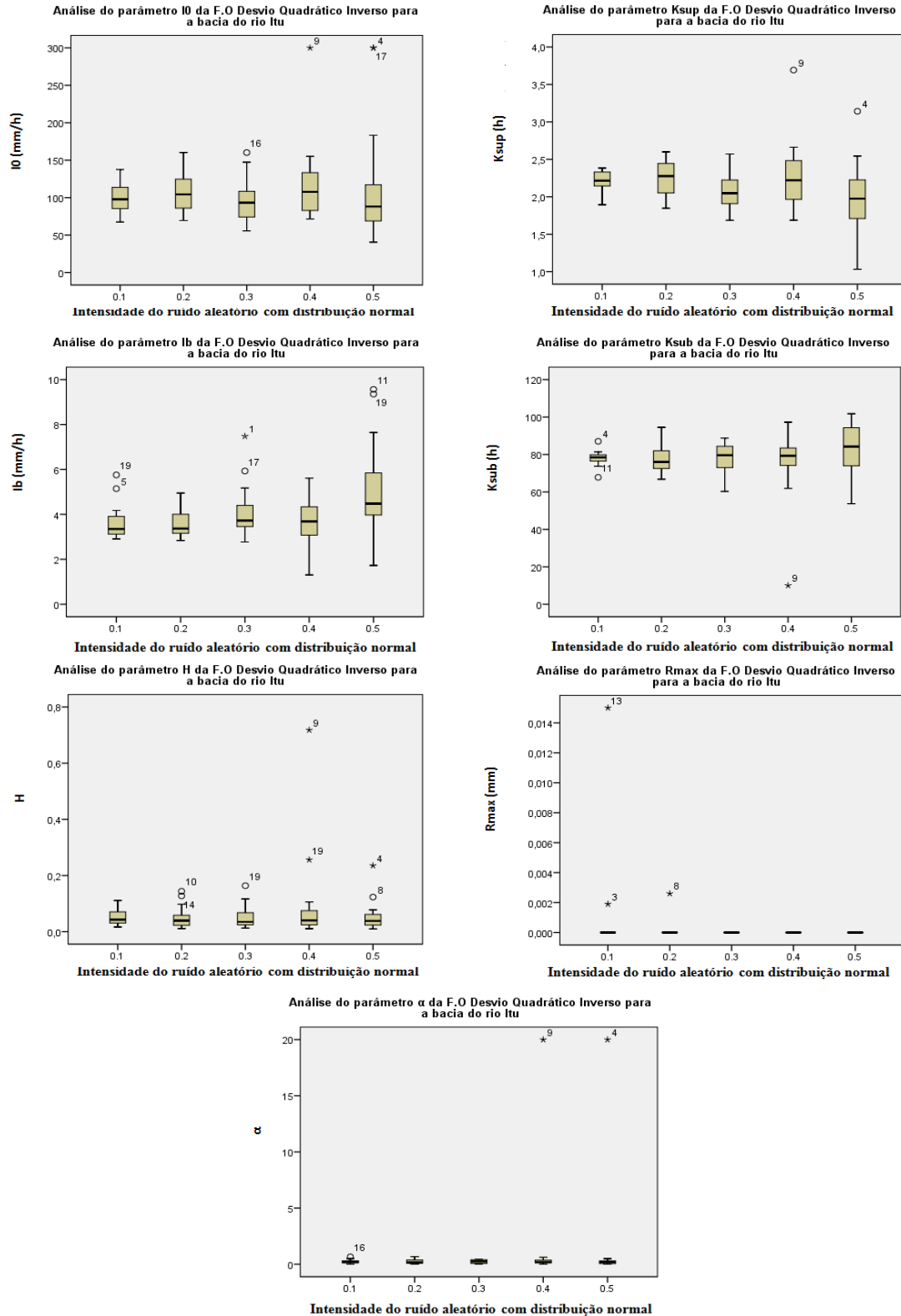


Figura 13.17 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Relativo Médio para a bacia do rio Itu devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Evapotranspiração

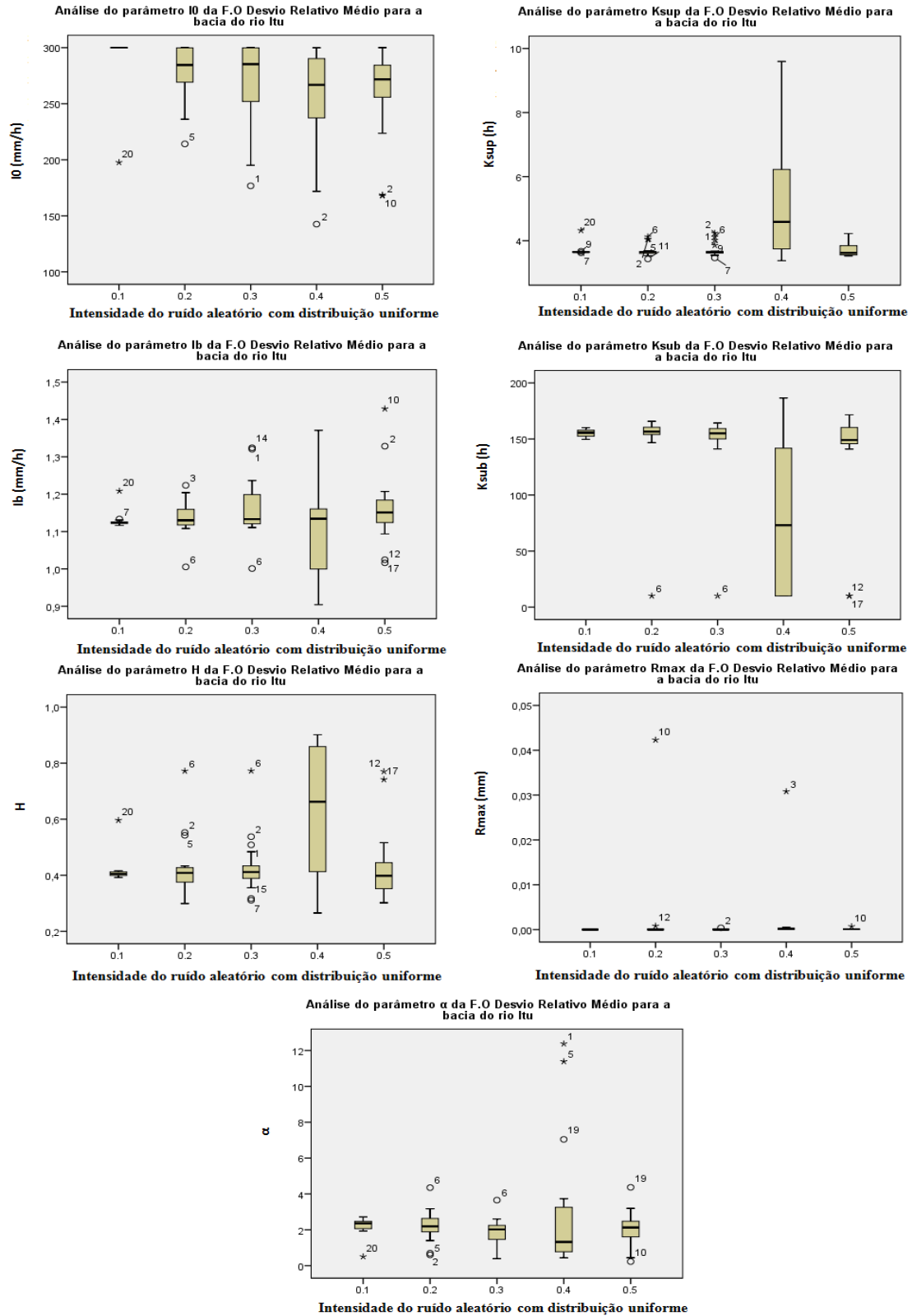


Figura 13.18 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Relativo Médio para a bacia do rio Itu devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Evapotranspiração

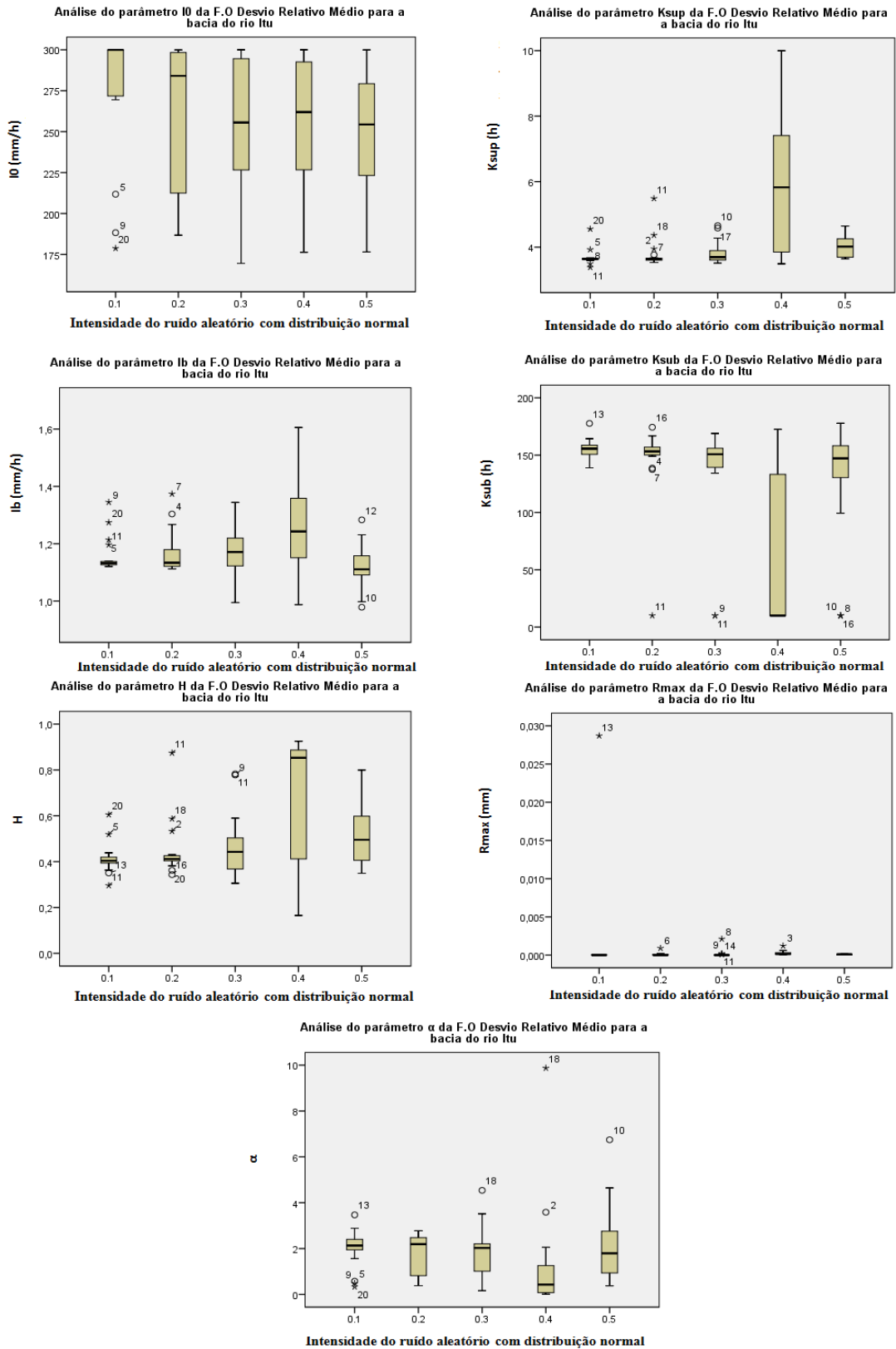


Figura 13.19 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Relativo Médio para a bacia do rio Itu devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Precipitação

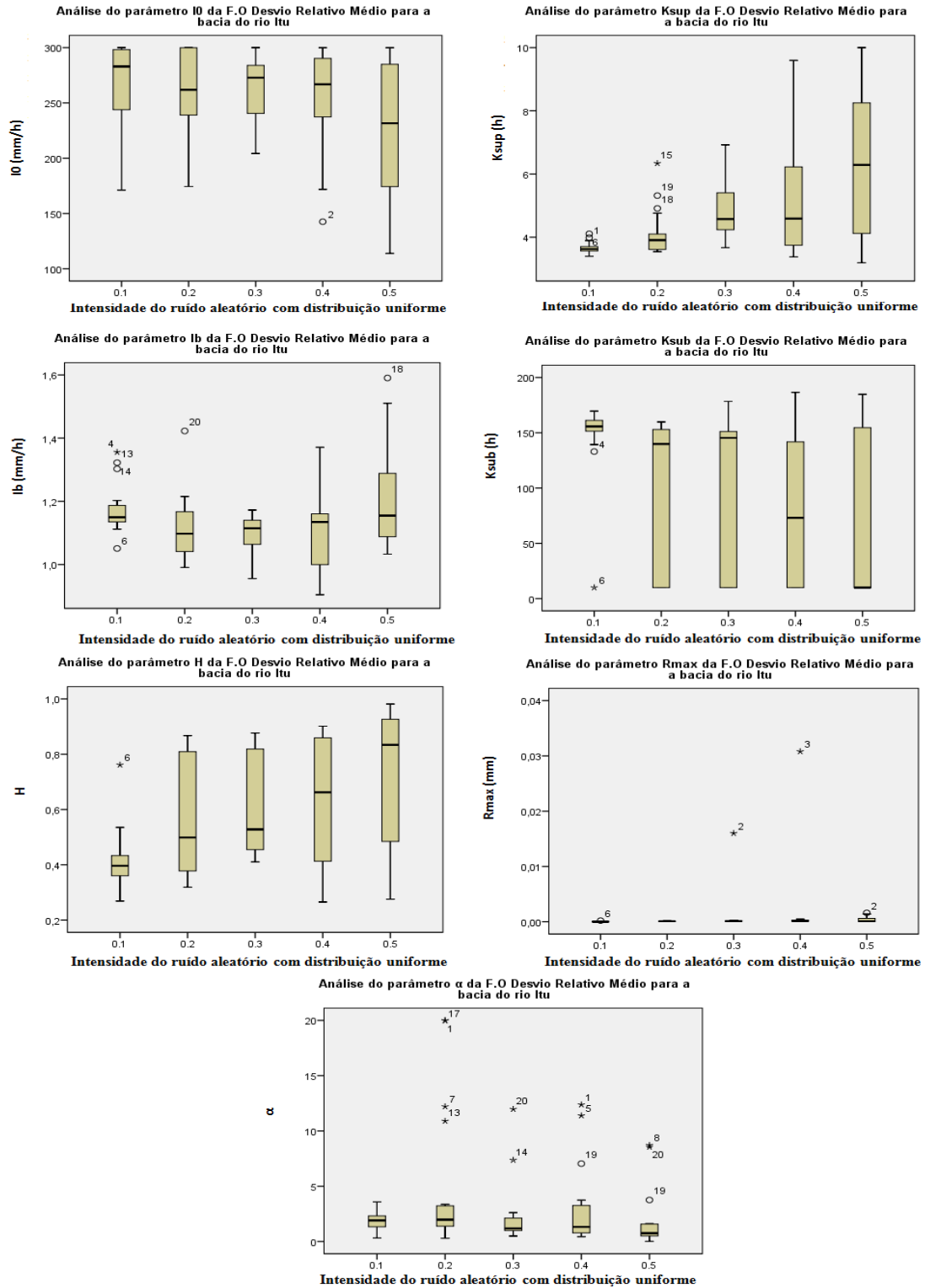
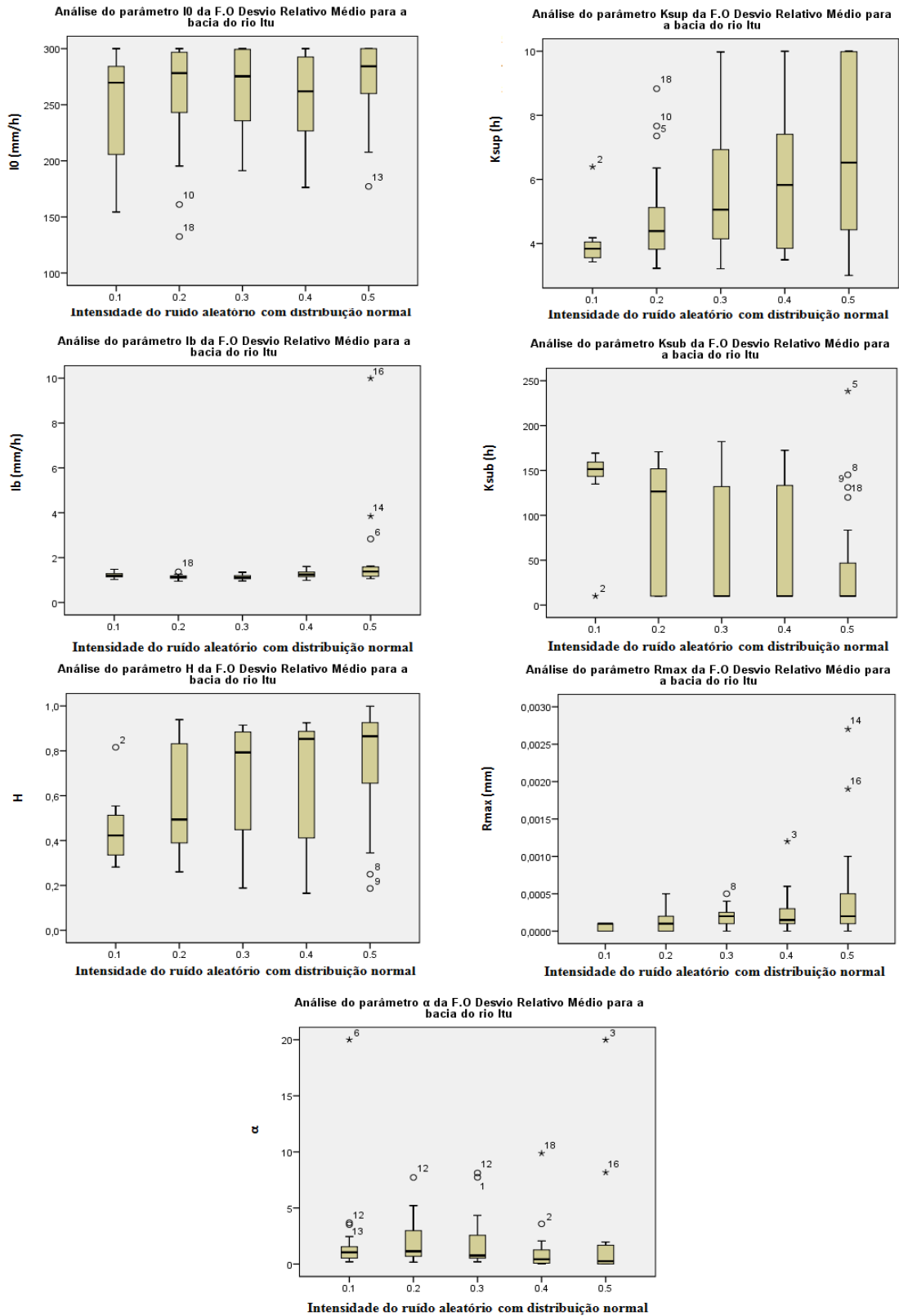


Figura 13.20 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Relativo Médio para a bacia do rio Itu devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Precipitação



14. ANEXO V – Bacia do rio Ijuí

O presente tópico apresenta os resultados obtidos com a análise de sensibilidade estática e dinâmica para a bacia do rio Ijuí.

Análise de sensibilidade estática

Erro aleatório na evapotranspiração e na precipitação

Figura 14.1 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objetivo, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal nos dados de evapotranspiração para a bacia do rio Ijuí devido a análise de sensibilidade estática.

Evapotranspiração

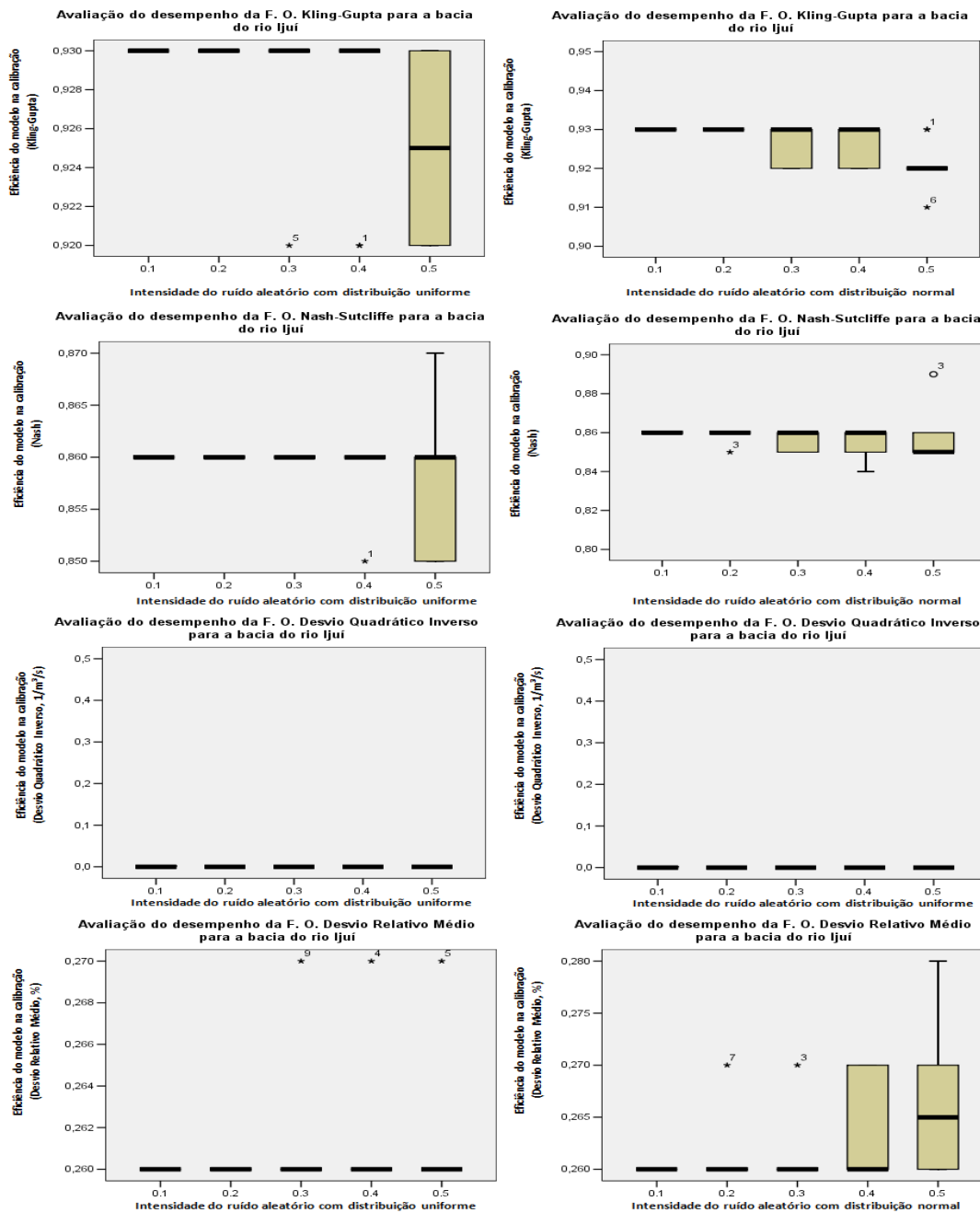
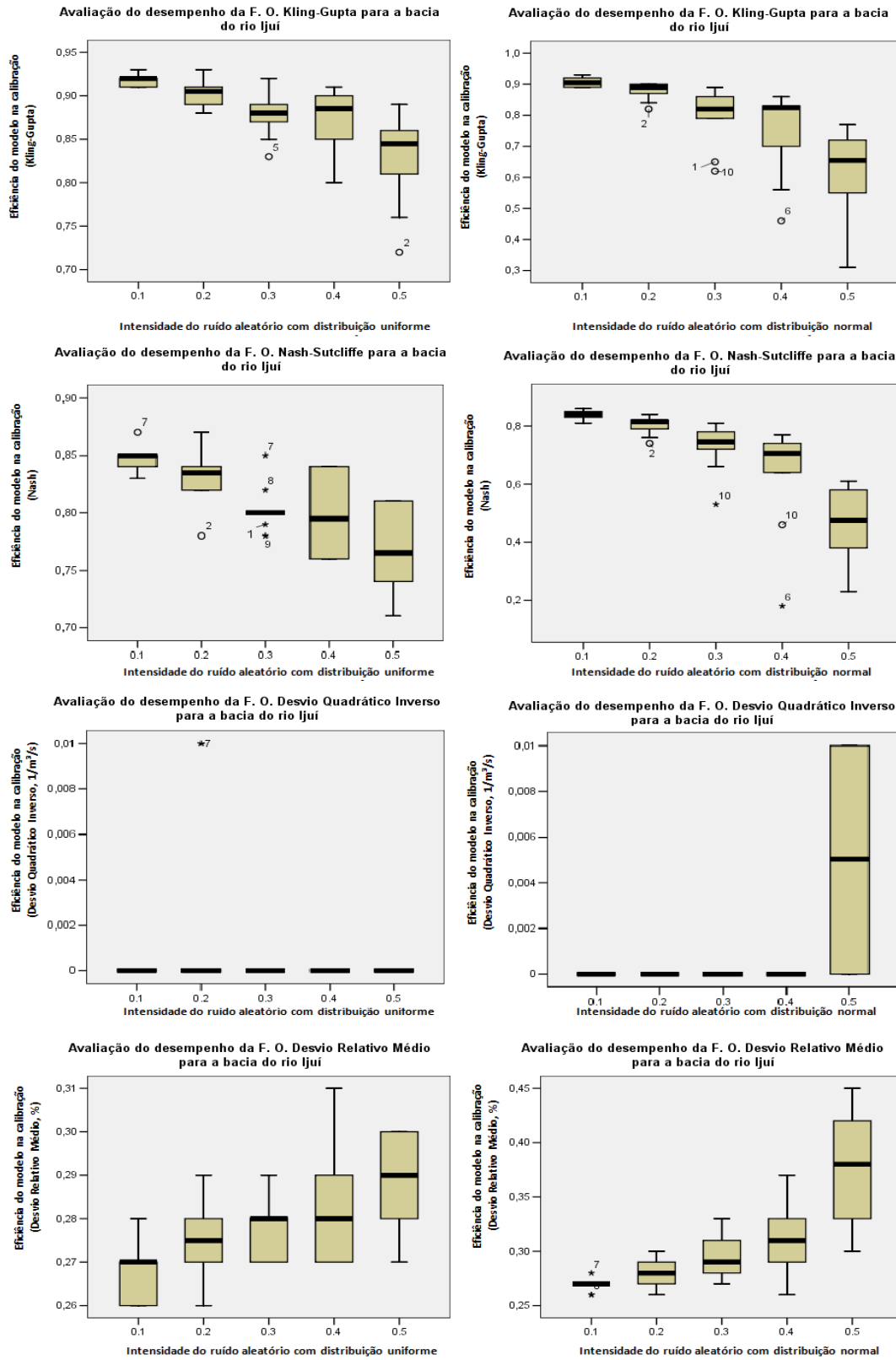


Figura 14.2 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objetivo, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal nos dados de precipitação para a bacia do rio Ijuí devido a análise de sensibilidade estática.

Precipitação



Análise de sensibilidade dinâmica

Erro aleatório na evapotranspiração e na precipitação

Figura 14.3 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objetivo, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal nos dados de evapotranspiração para a bacia do rio Ijuí devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Evapotranspiração

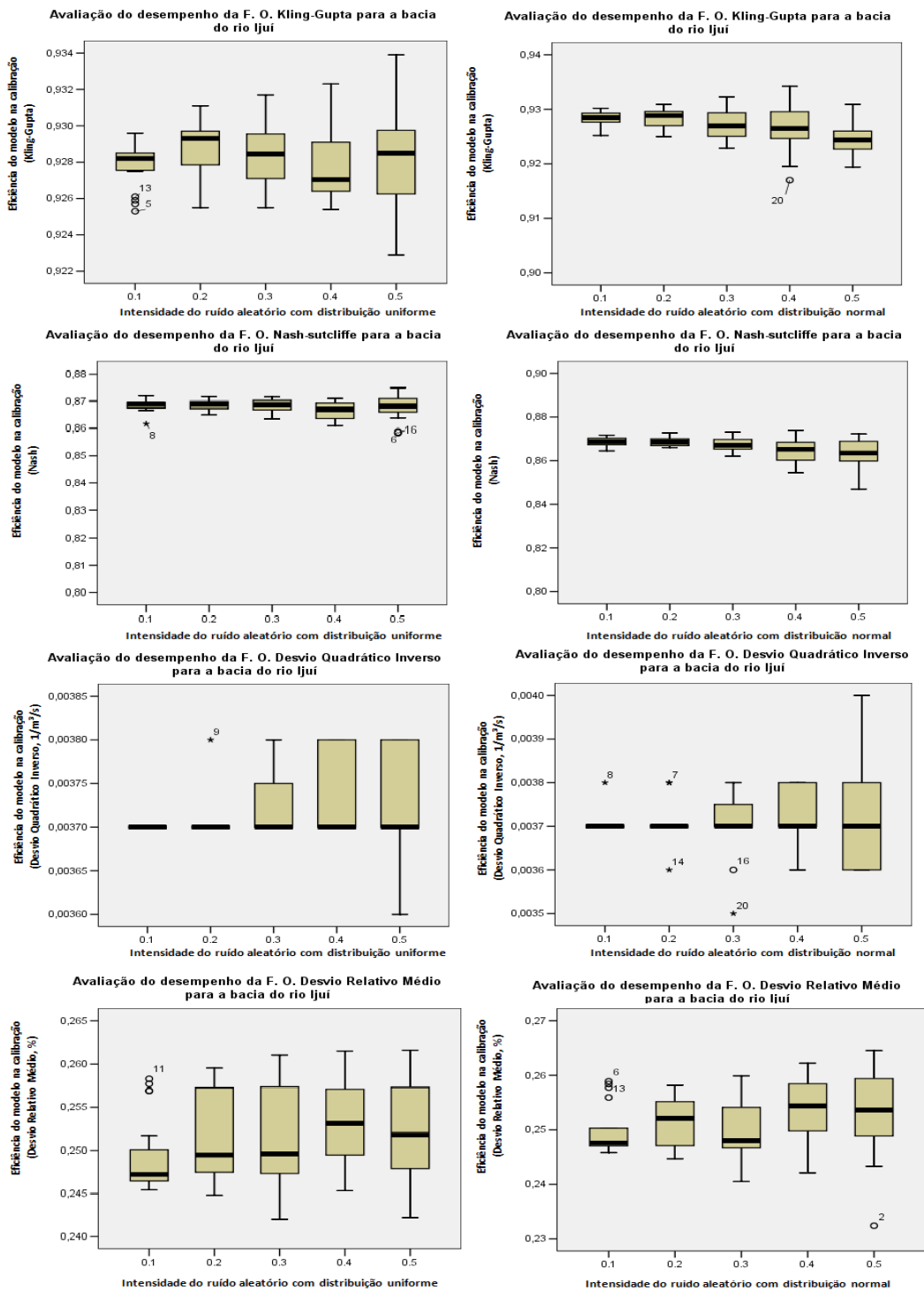
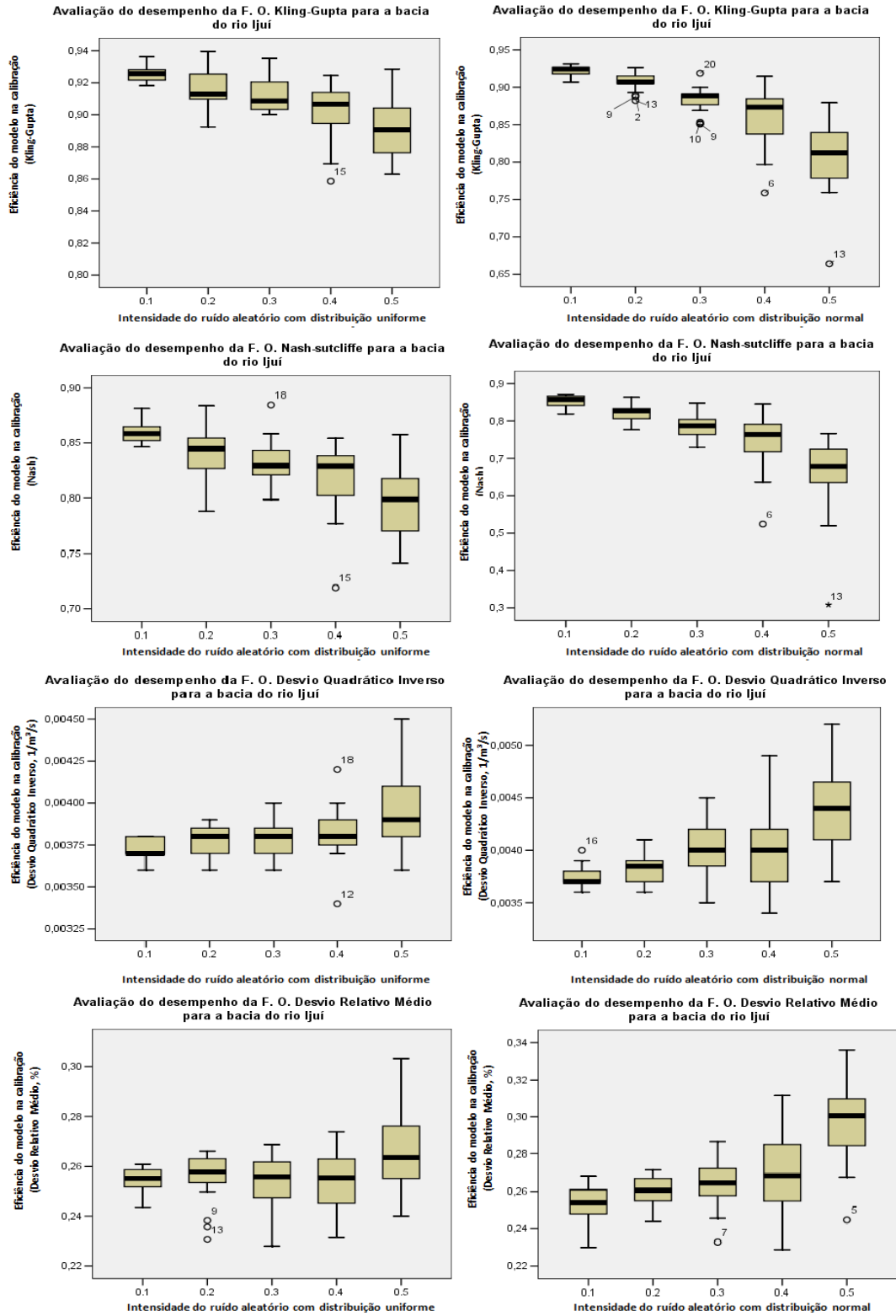


Figura 14.4 - Avaliação do desempenho do modelo IPH II, através das diferentes funções-objeto, sujeito a erro aleatório com distribuição uniforme e normal nos dados de precipitação para a bacia do rio Ijuí devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Precipitação



Impacto dos erros nos dados de entrada nos parâmetros do modelo em diferentes funções objetivo.

Figura 14.5 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Kling-Gupta para a bacia do rio Ijuí devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Evapotranspiração

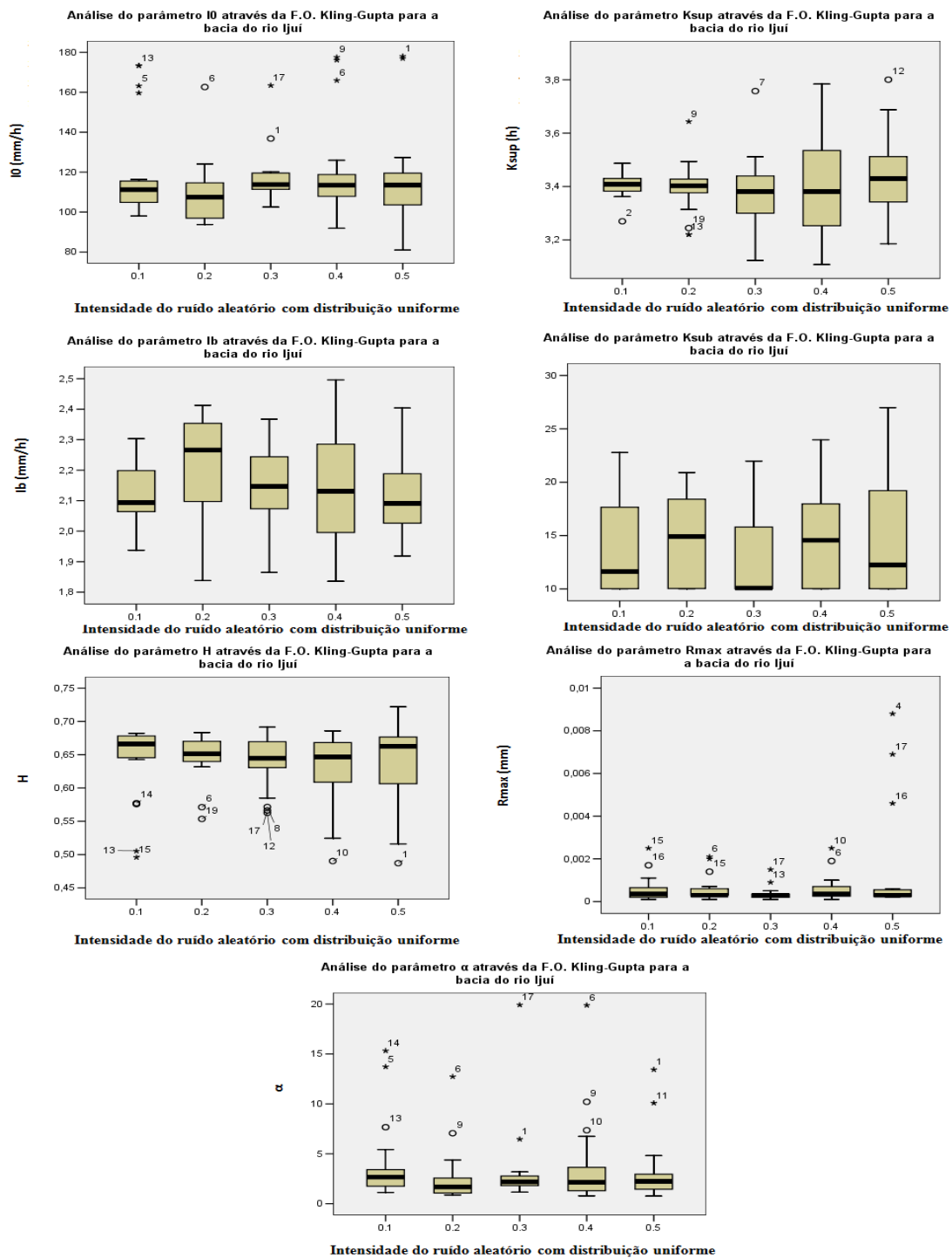


Figura 14.6 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Kling-Gupta para a bacia do rio Ijuí devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Evapotranspiração

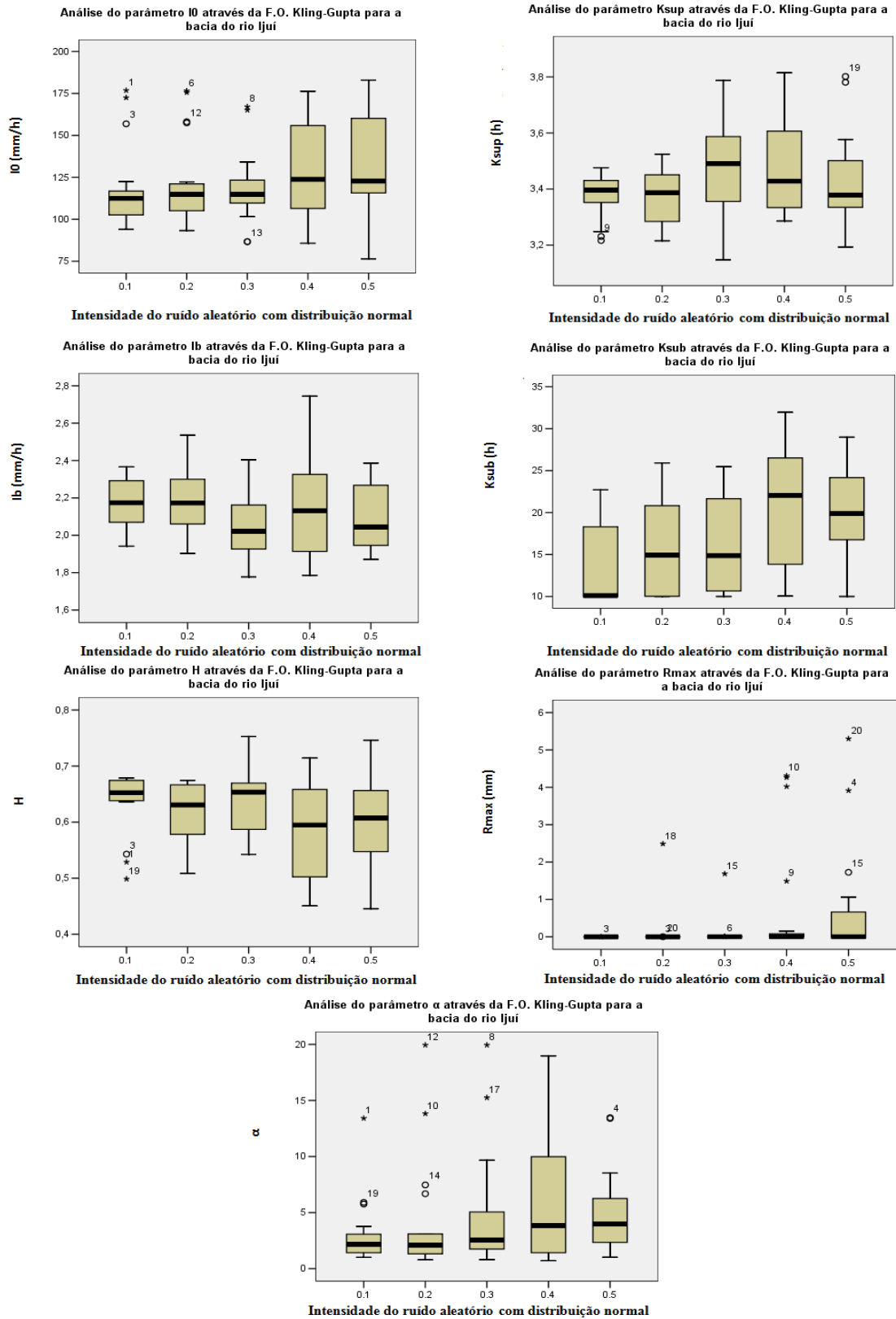


Figura 14.7 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Kling-Gupta para a bacia do rio Ijuí devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Precipitação

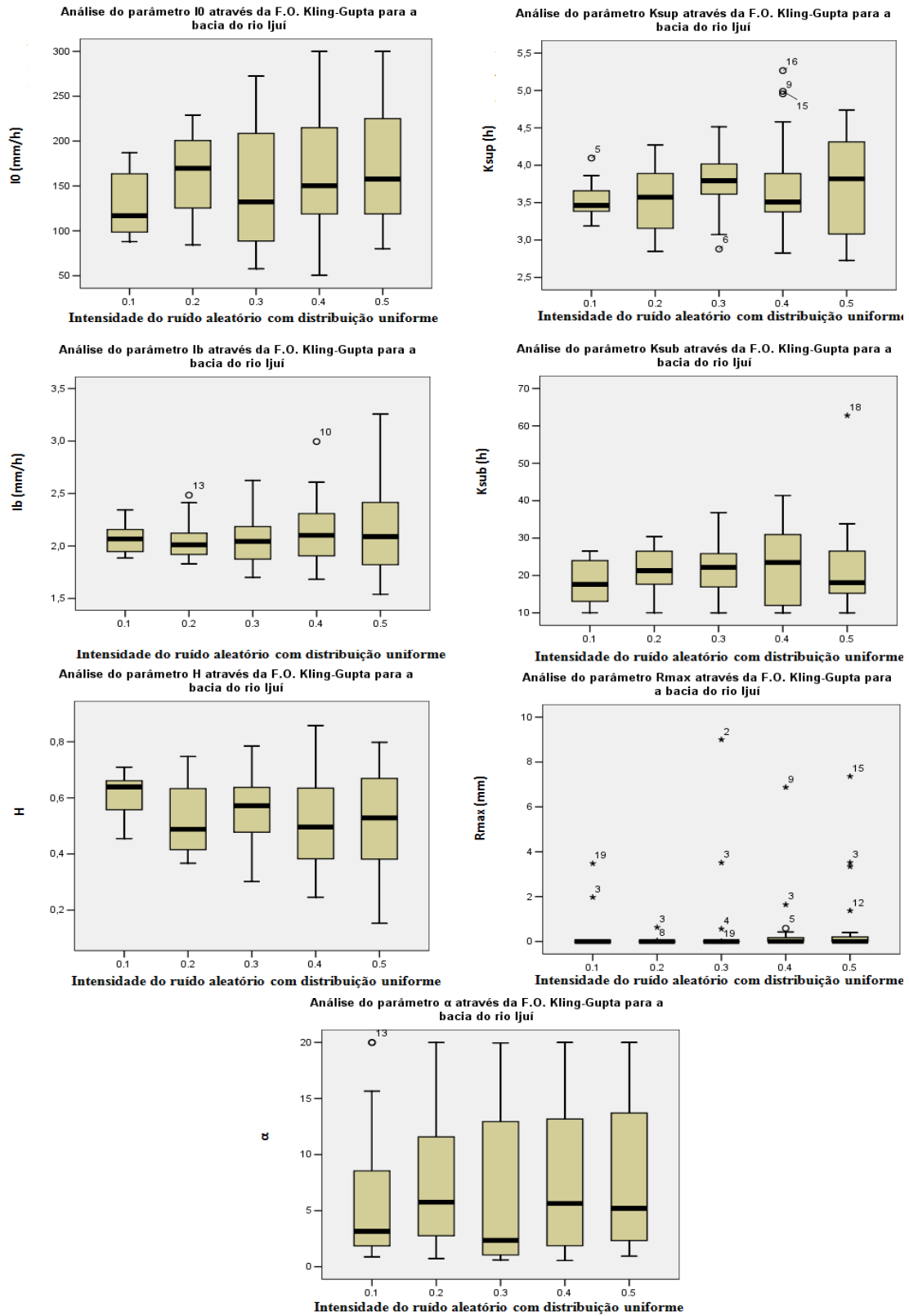


Figura 14.8 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Kling-Gupta para a bacia do rio Ijuí devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Precipitação

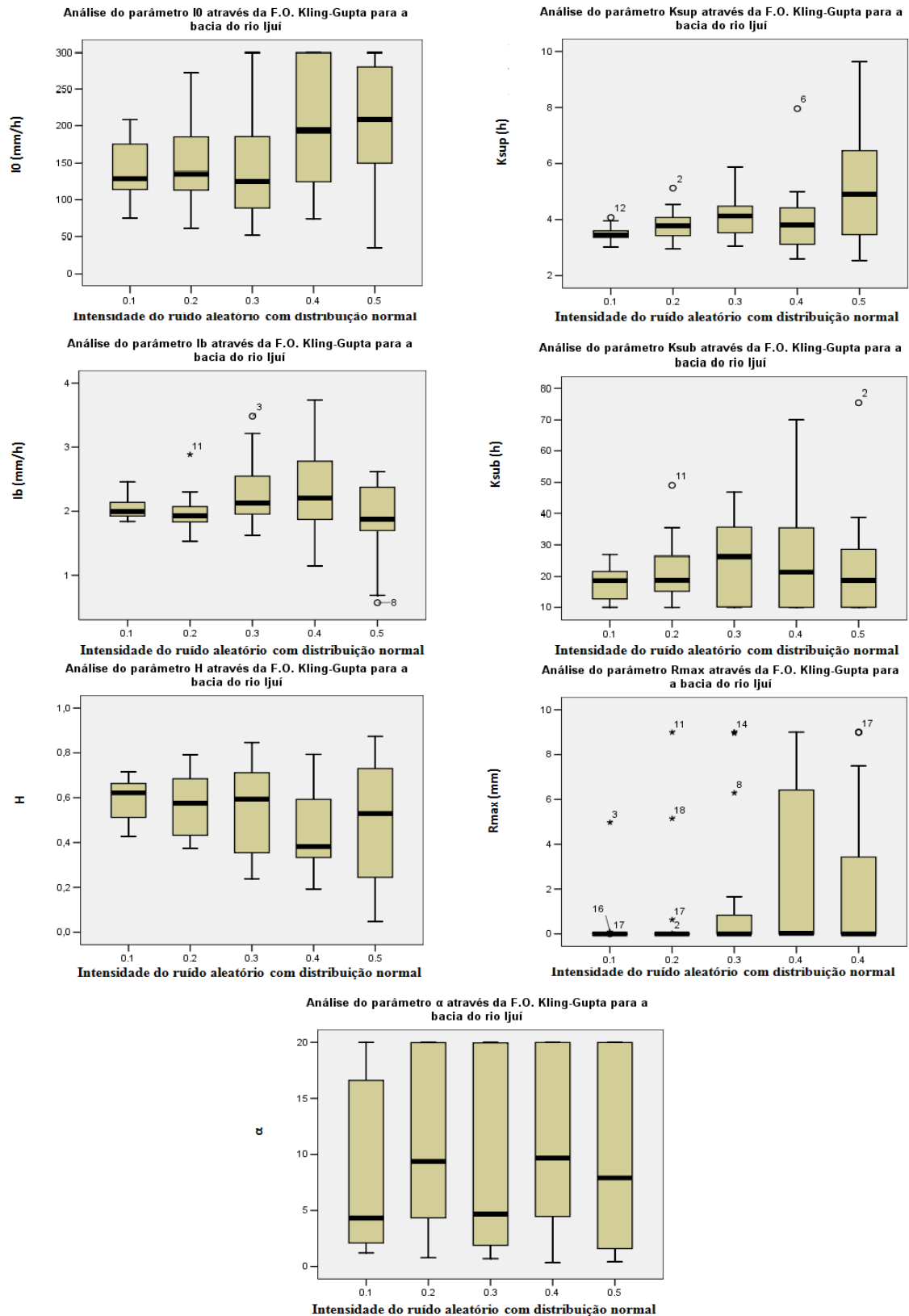


Figura 14.11 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do coeficiente de Nash-Sutcliffe para a bacia do rio Ijuí devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Precipitação

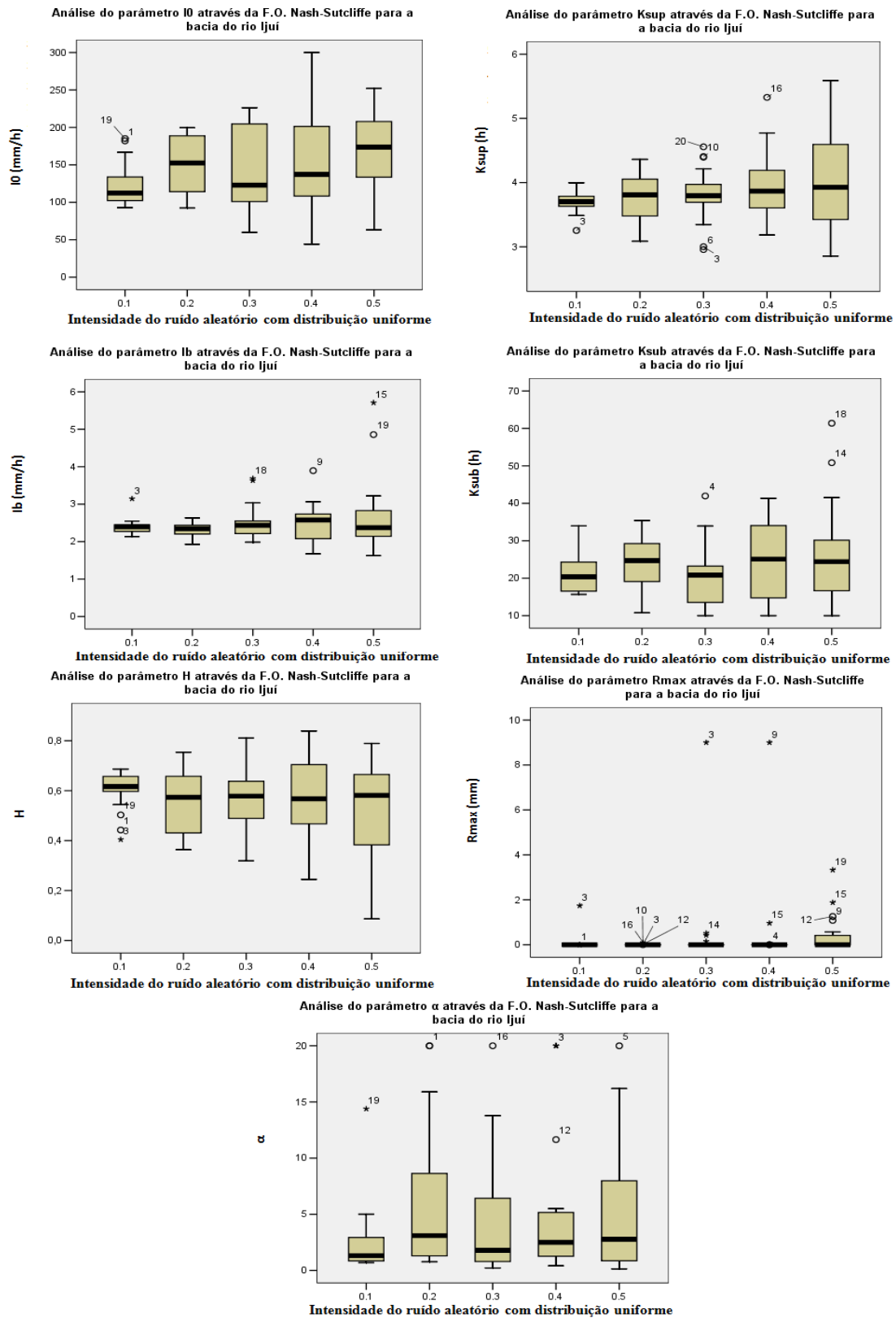


Figura 14.13 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Quadrático Inverso para a bacia do rio Ijuí devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Evapotranspiração

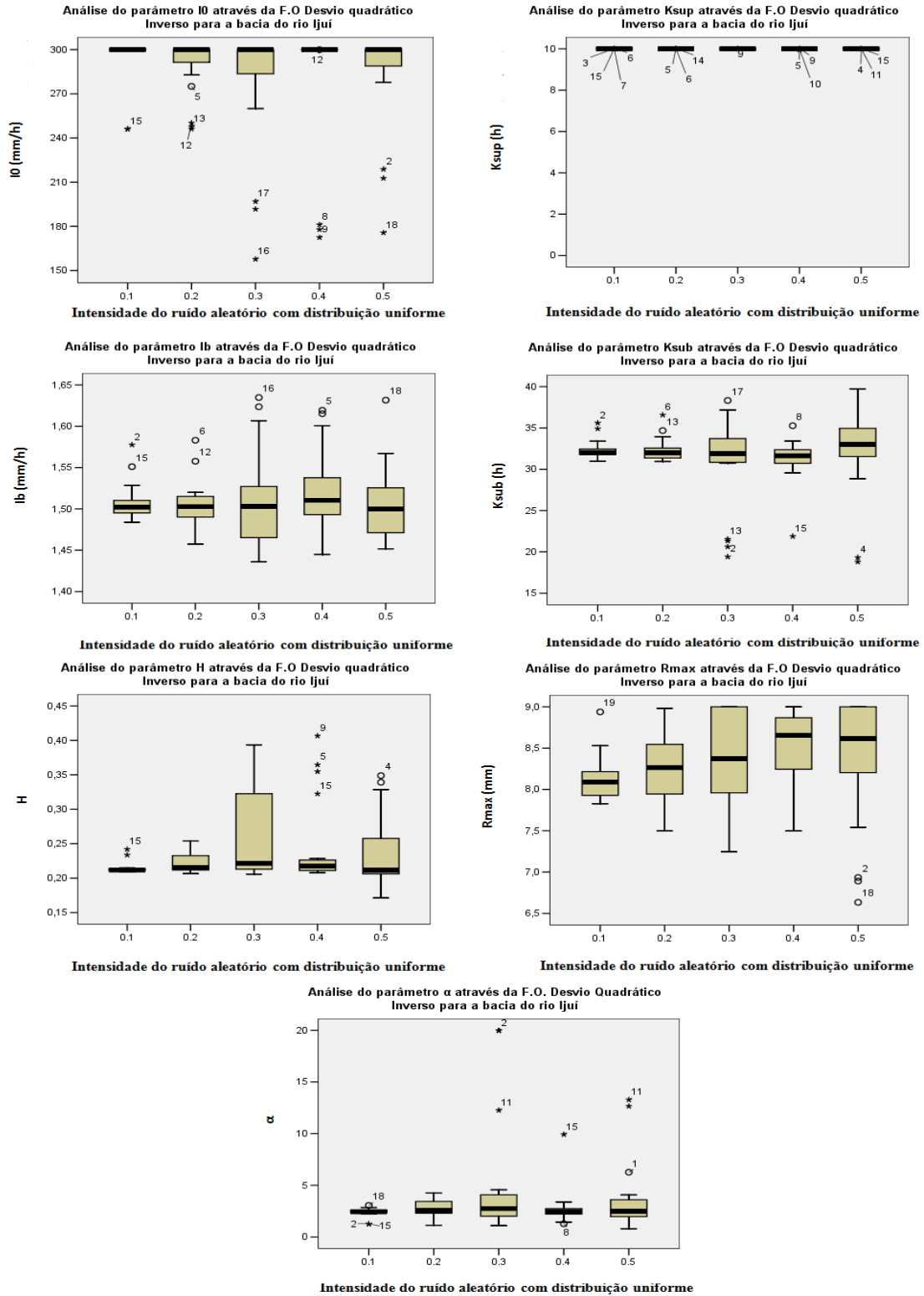


Figura 14.15 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Quadrático Inverso para a bacia do rio Ijuí devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Precipitação

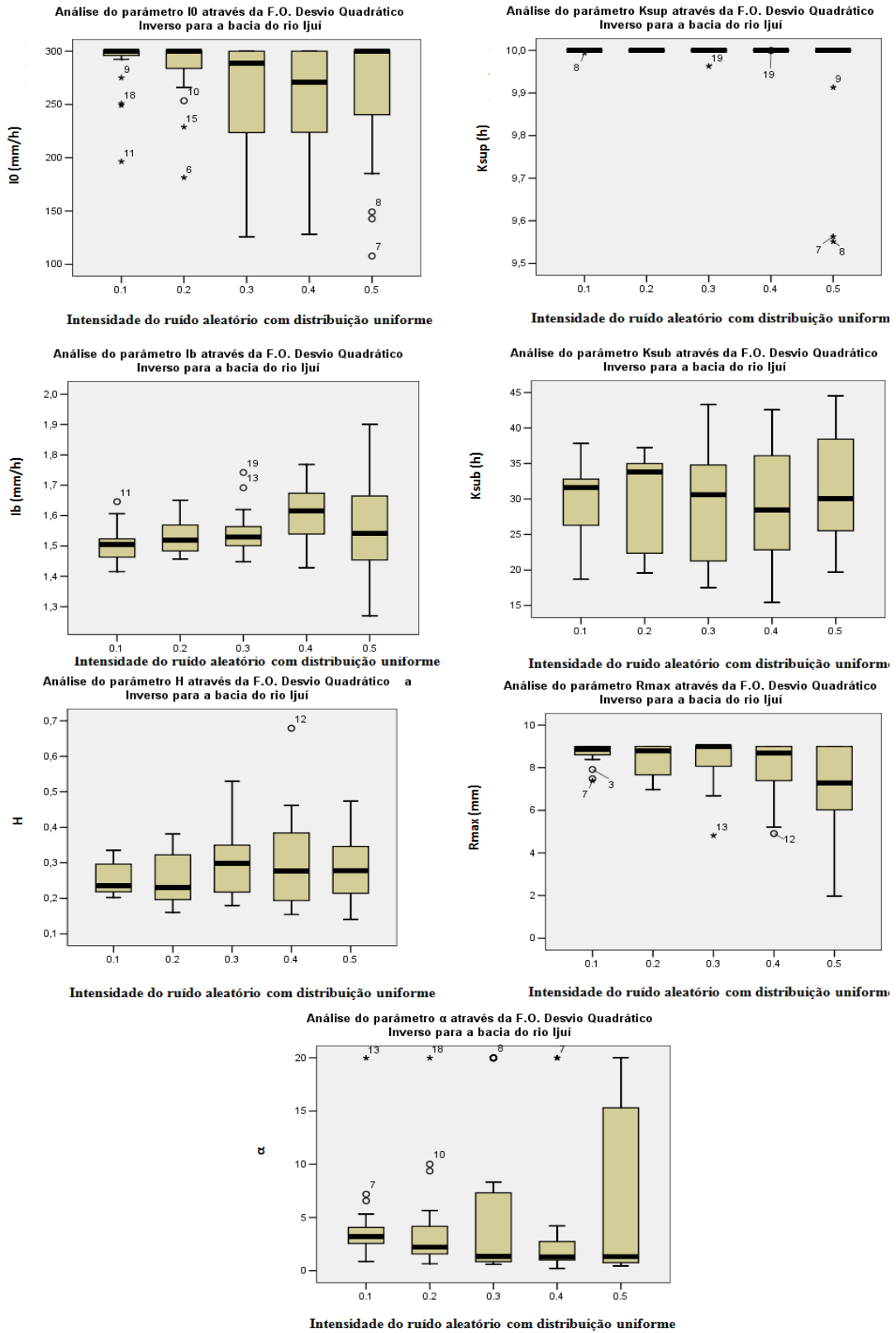


Figura 14.16 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Quadrático Inverso para a bacia do rio Ijuí devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Precipitação

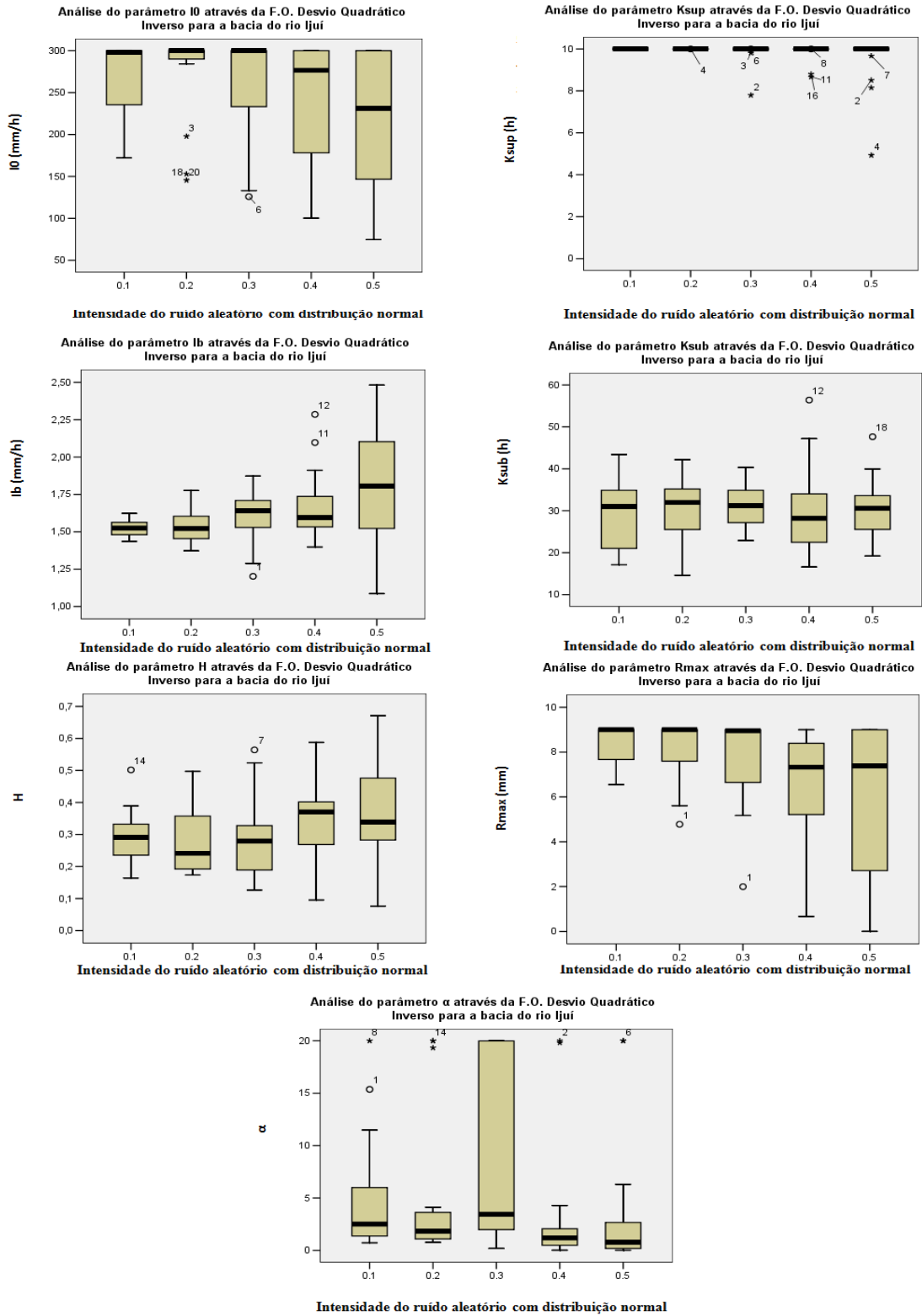


Figura 14.17 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Relativo Médio para a bacia do rio Ijuí devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Evapotranspiração

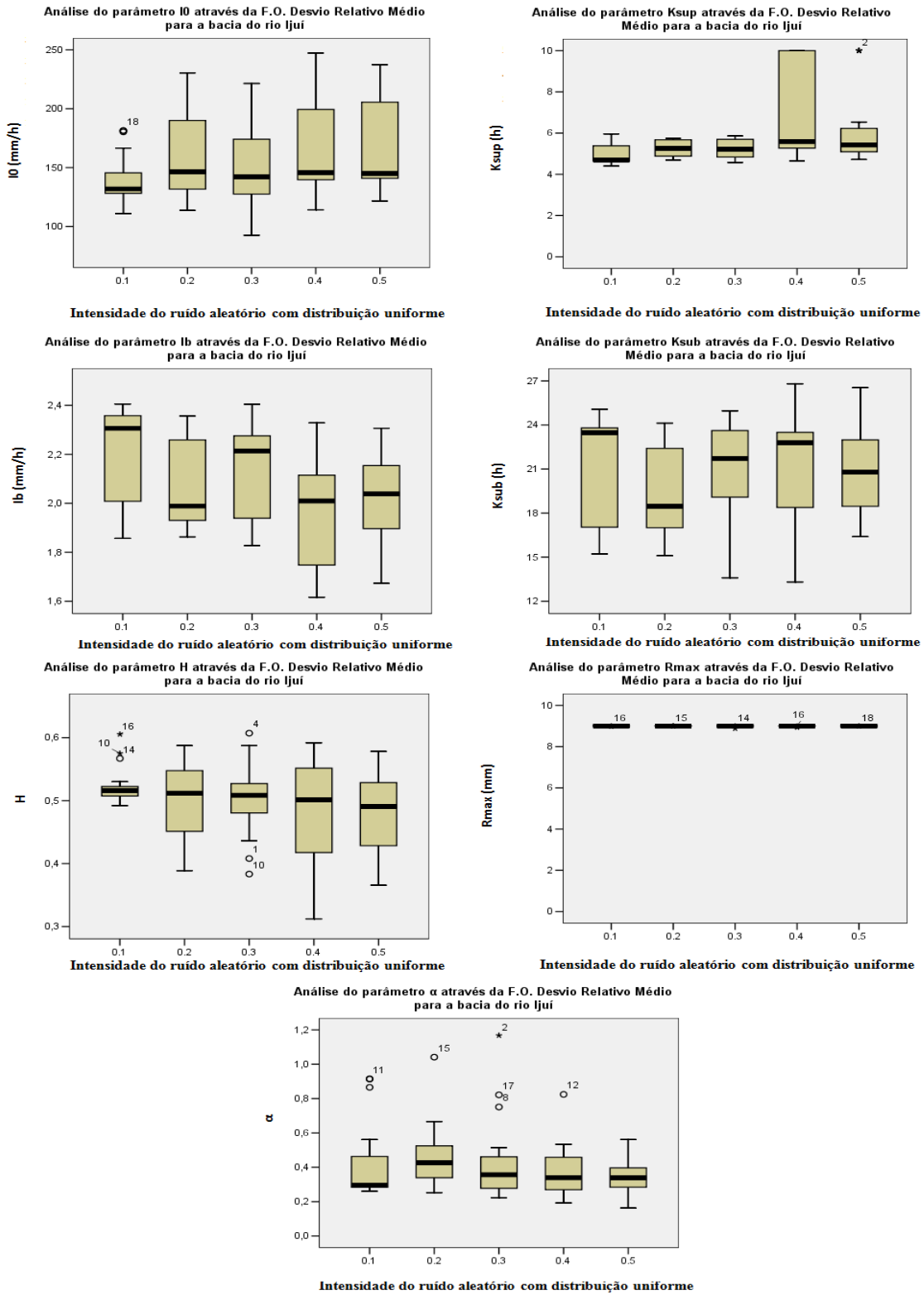


Figura 14.18 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição normal na evapotranspiração, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Relativo Médio para a bacia do rio Ijuí devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Evapotranspiração

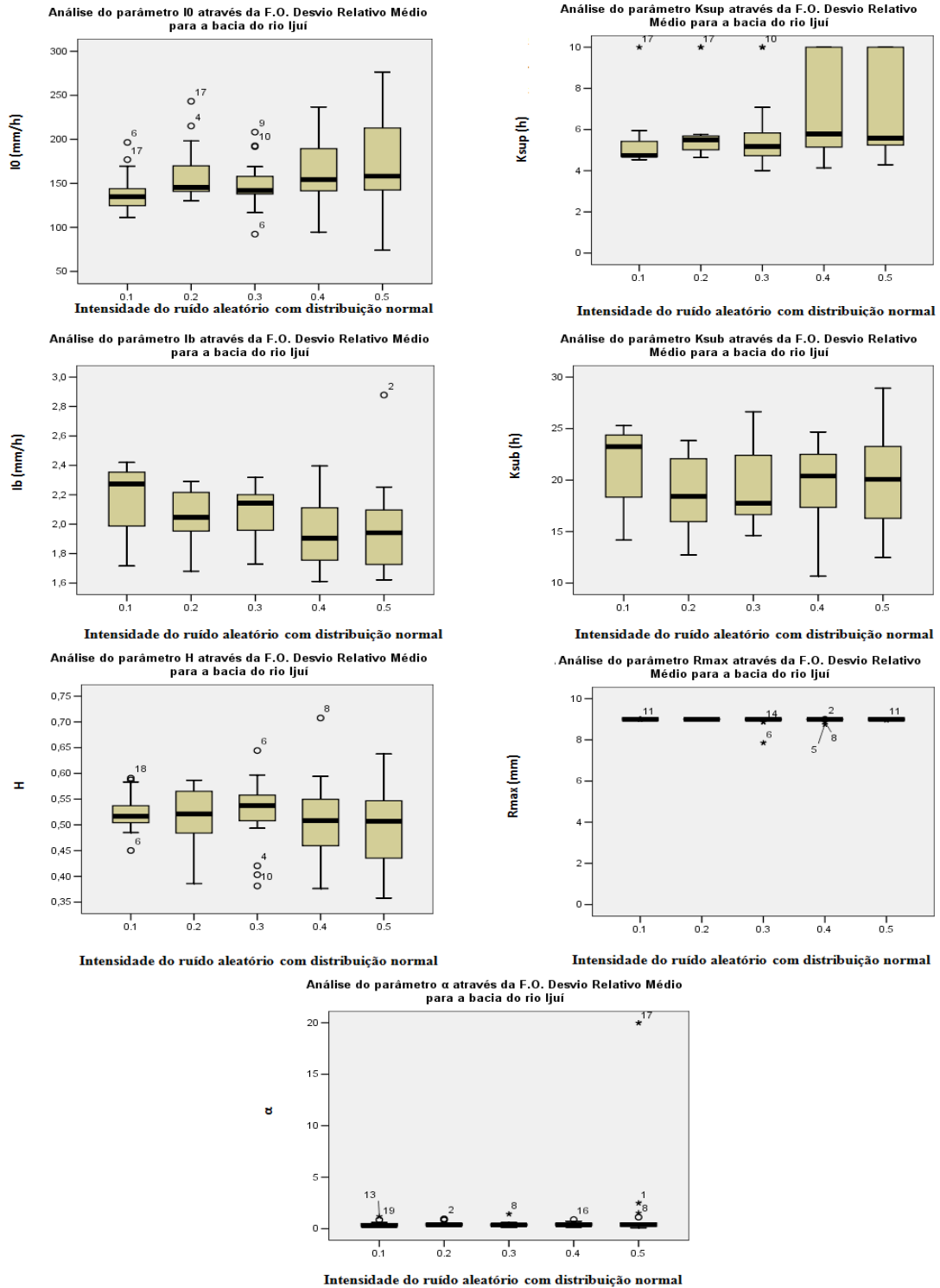


Figura 14.19 - Impacto do incremento de erros aleatórios com distribuição uniforme na precipitação, nos sete parâmetros do modelo IPH II, através do Desvio Relativo Médio para a bacia do rio Ijuí devido a análise de sensibilidade dinâmica.

Precipitação

