

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE UM MODELO MATEMÁTICO DE UMA PEQUENA BACIA DE DRENAGEM

Quantificação da precisão dos resultados

Tiago M. Mota⁽¹⁾; Luís M. David⁽²⁾

RESUMO

No presente artigo avalia-se a qualidade do modelo de uma pequena bacia de drenagem urbana e a contribuição de algumas componentes do sistema para a incerteza dos resultados face às medições. A análise é efetuada através de técnicas estatísticas e gráficas de avaliação dos resultados, que podem ser classificadas em três categorias principais: adimensional (e.g., coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe), índice de erro (e.g., erro quadrático médio) e regressão linear. Propõe-se uma abordagem inovadora que compreende a quantificação da precisão dos resultados de diferentes variáveis dos hidrogramas: volume, caudal de ponta e, por forma a avaliar a forma do hidrograma, volumes máximos associados a diferentes durações. Apesar do modelo existente já apresentar bons resultados, este estudo levou a uma melhoria da sua calibração. A aplicação da metodologia revelou-se simples e útil na compreensão e redução da incerteza do modelo.

PALAVRAS-CHAVE

calibração e validação, drenagem urbana, incerteza, modelos matemáticos, precisão dos resultados

⁽¹⁾ Engenheiro Civil, Bolseiro de investigação, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, tiagomota10@gmail.com

⁽²⁾ Engenheiro Civil, Investigador Auxiliar, LNEC, ldavid@lnec.pt

1. INTRODUÇÃO

A construção de modelos matemáticos de sistemas de drenagem urbana decorre geralmente da necessidade de responder a problemas de controlo de inundações, controlo das descargas para os meios recetores ou para apoio ou otimização da operação dos sistemas. De acordo com os objetivos do trabalho e com a disponibilidade de informação de cadastro e hidrológica, os modelos construídos podem ser distribuídos e fisicamente baseados ou mais agregados e conceptuais (Refsgaard, 1996; David, 2006). Podem limitar-se às componentes hidrológica e hidráulica ou incluir a modelação da qualidade da água, ou ainda incluir a modelação integrada com a estação de tratamento ou com o meio recetor. As exigências de calibração dependem igualmente dos objetivos do estudo, da disponibilidade de dados e do tempo e recursos disponíveis para a sua obtenção. Acresce que a calibração dos parâmetros reflete geralmente os objetivos da utilização do modelo, tendendo a ser mais conservativa para as variáveis mais importantes para a análise em causa. Por exemplo, num modelo desenvolvido para estudar as descargas de tempestade de um sistema de drenagem unitário, é exigido maior rigor na calibração dos volumes dos hidrogramas de cheia do que na calibração dos caudais de ponta, enquanto que num modelo concebido para análise de inundações, a ênfase deverá ser dada na calibração dos caudais de ponta dos eventos de precipitação mais intensos. O número de eventos de precipitação necessários para a calibração e a representatividade dos eventos disponíveis também depende dos objetivos de utilização do modelo.

No entanto, é frequente os modelos desenvolvidos para um determinado propósito serem posteriormente utilizados para outros tipos de análises, acabando por ter um âmbito de utilização muito mais alargado do que aquele para o qual foram calibrados.

Durante a fase de calibração, o modelador ganha conhecimento sobre os parâmetros mais críticos e sobre as principais limitações e potencialidades do modelo, através da análise de sensibilidade dos resultados face à variação dos parâmetros. Para além disso, na utilização e análise dos resultados do modelo, o utilizador deverá ter conhecimento dos principais fatores de incerteza nos resultados e da robustez do modelo para situações fora do domínio de calibração.

A análise da incerteza de modelos hidrológicos é um assunto de investigação que tem merecido bastante atenção na última década (Jin *et al.*, 2010). De uma forma geral, a incerteza na modelação hidrológica pode ser proveniente de diversas fontes: i) a qualidade e quantidade de dados de medição disponíveis, ii) a ausência de dados de medição devido à falta de controlo em certos locais, iii) a falta de conhecimento sobre alguns processos físicos e procedimentos operacionais (parametrização), iv) a natureza aproximada das equações matemáticas utilizadas para simular os processos (estrutura do modelo), v) e a qualidade da análise de sensibilidade do modelo e da calibração (Moriassi *et al.*, 2007; Liu e Gupta, 2007; Chiang *et al.*, 2007). Têm sido utilizados diversos métodos para a análise da incerteza de modelos hidrológicos. Liu e Gupta (2007) identificam vários métodos, destacando que apenas alguns possuem a capacidade de resolver, de uma forma explícita e coesiva, os três aspetos críticos da análise da incerteza na modelação hidrológica: compreensão, quantificação e redução da incerteza. De entre os métodos existentes, Jin *et al.* (2010) comparam as duas abordagens mais utilizadas: a Bayesiana formal MCMC (*Markov Chain Monte Carlo*) - simulações de Monte Carlo via cadeias de Markov; e a Bayesiana informal

GLUE (*Generalized Likelihood Uncertainty Estimation*) - Estimativa da Incerteza de Probabilidade Generalizada, proposta por Beven e Binley (1992). Estes métodos permitem quantificar a incerteza, determinar intervalos de confiança e, no caso particular das abordagens Bayesianas formais, tentam separar o efeito da incerteza de cada elemento na incerteza total, embora sejam complexos, exijam um elevado esforço computacional, possam apresentar problemas de convergência e, no caso da abordagem GLUE, estejam sujeitos a subjetividade (Blasone *et al.*, 2008; Vrugt *et al.*, 2009; Jin *et al.*, 2010).

Na prática, a necessidade de avaliar a incerteza de modelos hidrológicos e hidráulicos é consensual, embora em grande parte dos casos não seja fácil aplicar muitos dos métodos anteriormente referidos. No entanto, existe um conjunto de técnicas gráficas e estatísticas simples que fornecem informações acerca da incerteza dos resultados dos modelos face aos registos de medições (Moriasi *et al.*, 2007).

As estatísticas quantitativas podem ser classificadas em três categorias principais (Moriasi *et al.*, 2007): adimensionais (e.g., coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe); índices de erro (e.g., raiz quadrada do erro quadrático médio) e regressão linear. De acordo com a bibliografia, a avaliação dos modelos deve considerar pelo menos uma técnica gráfica, uma estatística adimensional e um índice de erro (Legates and McCabe, 1999; Moriasi *et al.*, 2007). Legates and McCabe (1999) alertam que as técnicas de correlação, amplamente utilizadas, poderão levar a coeficientes de correlação elevados com modelos de qualidade reduzida, não as recomendando, pelo menos sem a consideração de outros métodos de avaliação. Alternativamente, estes autores propõem a utilização de duas estatísticas mais conservativas, determinadas com base em valores absolutos, em vez de diferenças dos quadrados. Não obstante, a correlação linear apresenta a vantagem de ser amplamente conhecida e intuitiva e de permitir visualizações gráficas dos resultados. O erro quadrático médio é uma estatística de inegável interesse pois, para estimadores não enviesados, corresponde à variância, cuja raiz quadrada corresponde a metade do intervalo de confiança a 95% acima e abaixo do valor esperado.

A aplicação das técnicas estatísticas para a comparação dos resultados do modelo com os registos medidos tem como pressuposto que os dados medidos não estão sujeitos a incertezas de medição, o que não acontece. Harmel *et al.* (2006) discutem e dão recomendações importantes sobre a consideração desta incerteza, enquanto que Harmel e Smith (2007) propõem modificações às técnicas estatísticas mais utilizadas de forma a incorporar a incerteza da medição na análise.

Este artigo tem como objetivos avaliar a qualidade do modelo de uma pequena bacia de drenagem urbana e analisar a contribuição de algumas componentes do sistema para a incerteza dos resultados face às medições. Na secção seguinte faz-se uma descrição apenas das estatísticas utilizadas neste estudo.

2. ESTATÍSTICAS UTILIZADAS

2.1. Coeficiente Nash-Sutcliffe (NSE)

O coeficiente Nash-Sutcliffe (NSE – *Nash-Sutcliffe Efficiency*, equação 1) é provavelmente o coeficiente adimensional mais utilizado para avaliar o desempenho de modelos hidrológicos

urbanos (Legates e McCabe, 1999; Harmel e Smith, 2007; Sun e Bertrand-Krajewski, 2012). Este coeficiente pode ser definido como uma estatística normalizada que compara a magnitude relativa da variância residual com a variância dos dados medidos (Nash e Sutcliffe, 1970) e varia entre menos infinito e 1, com valores mais elevados a indicar um melhor ajuste do modelo aos dados medidos.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (1)$$

em que:

O_i - i-ésimo valor medido da variável em estudo;

P_i - i-ésimo valor simulado da variável em estudo;

\bar{O} - média dos valores medidos da variável em estudo;

n - número total de observações.

2.2. Índice de erro RMSE

A raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE – *Root Mean Square Error*, equação 2) é um índice comumente utilizado para avaliar modelos hidrológicos (e.g., Willmott, 1981; Legates e McCabe, 1999; Harmel e Smith, 2007; Moriasi *et al.*, 2007). Valores reduzidos de RMSE estão associados a menores erros, sendo que o valor nulo representa um modelo que se ajusta perfeitamente aos dados medidos.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} \quad (2)$$

em que as variáveis têm o mesmo significado que as da equação 1.

2.3. Regressão linear

O declive, a ordenada na origem e o coeficiente de determinação (R^2) da reta de regressão linear que melhor ajusta os resultados do modelo aos valores medidos são, em conjunto, indicadores relevantes da qualidade do modelo. Enquanto o declive está associado à relação relativa entre os dados medidos e modelados, a ordenada na origem indica a presença de um enviesamento nos dados (Moriasi *et al.*, 2007). O coeficiente de determinação varia entre 0 e 1 e descreve a quantidade da dispersão observada que é explicada pela regressão (Krause *et al.*, 2005).

2.4. Desvio percentual Pbias

O desvio percentual Pbias (*Percent Bias*) é frequentemente utilizado para avaliar a tendência de subestimação ou sobrestimação dos modelos (equação 3).

$$Pbias = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \times 100\% \quad (3)$$

em que as variáveis têm o mesmo significado que as da equação 1.

Valores reduzidos de Pbias (< ± 10 %) indicam simulações precisas, sendo o valor ótimo 0,0. Valores positivos indicam subestimação e valores negativos indicam sobrestimação (Gupta *et al.*, 1999; Moriasi *et al.*, 2007). Neste artigo, os resultados de Pbias não serão apresentados, dado que foram inferiores a ± 5 % em todas as simulações efetuadas e que a análise gráfica forneceu informação mais esclarecedora sobre a evolução da tendência de sub- ou sobre-estimação do modelo associada a diferentes magnitudes de volumes ou caudais.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Caso de estudo

A área de estudo localiza-se na cidade de Odivelas e tem 102 ha. É constituída por uma bacia de drenagem unitária com 22 ha, cujo coletor principal recebe as águas residuais domésticas de um coletor intercetor, que serve uma bacia parcialmente-separativa com cerca de 80 ha. Em tempo de chuva, o coletor intercetor entra em carga e descarrega o excesso de caudal para uma ribeira, através de descarregadores de tempestade instalados ao longo do percurso.

O sistema de drenagem e a ocupação do solo da bacia unitária foram pormenorizadamente caracterizados e modelados no programa SWMM (Rossman, 2007), tendo a bacia unitária sido modelada com 86 subbacias, 145 nós de ligação e 153 troços de coletor, enquanto que o intercetor foi modelado de forma muito agregada, recebendo contribuições de apenas duas subbacias de drenagem, com 68 ha e 12 ha (Figura 1).

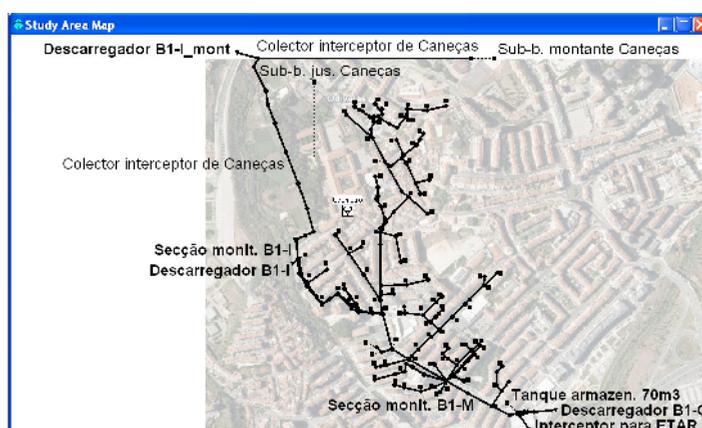


Figura 1. Modelo matemático e secções de monitorização (Cambez *et al.*, 2008)

Dispõe-se de séries de registos de precipitação e caudal com 4 meses e 26 eventos de precipitação. A precipitação foi medida em dois udómetros locais e os caudais em duas secções de medição. A secção de medição de caudal a montante, B1-I, situa-se no coletor

interceptor, a jusante das duas subbacias de drenagem que servem o interceptor e de dois descarregadores de tempestade. A secção de jusante, B1-M, está situada a jusante do sistema estudado, recebendo a mistura dos caudais da bacia unitária e do interceptor.

Os hidrogramas médios do caudal de tempo seco foram calculados para as duas secções de medição (para os dias de semana e para os de fim-de-semana) e foram introduzidos no modelo. A variabilidade dos valores médios diários de tempo seco tem algum significado face aos valores medidos (Figura 2). Em estudos anteriores, o modelo foi cuidadosamente calibrado para ambas as secções, tendo apresentado resultados de verificação bastante próximos dos valores medidos (e.g. Figura 3). O modelo foi utilizado para avaliar as descargas em tempo de chuva, através de análises evento-a-evento e utilizando uma série histórica de precipitações (David, 2006a,b; Cambez *et al.*, 2008).

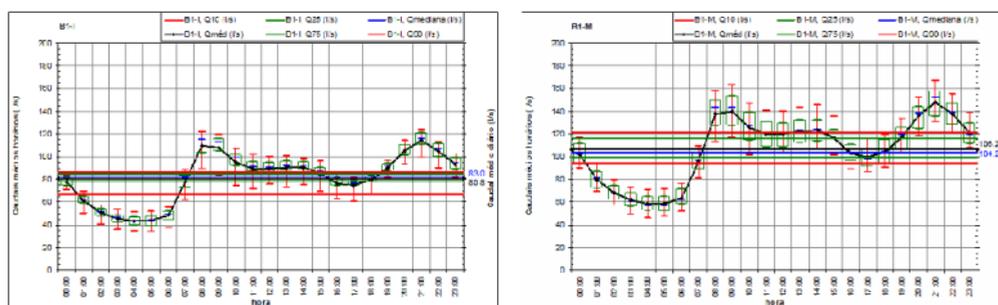


Figura 2. Estatísticas dos caudais médios horários e diários em condições de tempo seco nos dias de semana na secção B1-I e B1-M (David, 2006a)

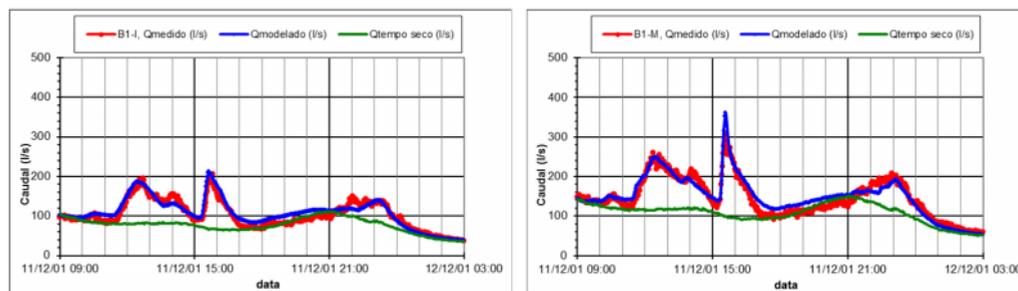


Figura 3. Comparação entre resultados modelados e medidos nas secções B1-I e B1-M

3.2. Metodologia proposta

3.2.1. Técnicas estatísticas e gráficas:

No estudo da avaliação da qualidade dos resultados do modelo considerou-se apenas uma técnica gráfica e uma estatística de cada categoria descrita anteriormente: o coeficiente de Nash-Sutcliffe (adimensional), a raiz quadrada do erro quadrático médio (índice de erro) e a regressão linear. O método gráfico correspondeu a gráficos de barras de comparação direta entre os resultados do modelo e os dados medidos.

3.2.2. Variáveis analisadas:

A abordagem compreende uma análise completa dos resultados para diferentes variáveis dos hidrogramas:

- i) o volume;
- ii) o caudal de ponta;
- iii) e, por forma a avaliar a forma do hidrograma, os volumes máximos associados a diferentes durações do hidrograma (6, 16, 30, 60, 104 e 150 minutos).

O cálculo dos volumes máximos associados a diferentes durações de cada evento foi efetuado através de uma rotina de pesquisa por janela móvel.

Os resultados do modelo para as diferentes variáveis foram comparados evento a evento com os valores medidos correspondentes, tendo sido aplicadas as técnicas estatísticas e gráficas às séries resultantes de 26 eventos de precipitação.

3.2.3. Análises efetuadas:

No estudo, procurou-se analisar:

- i) a qualidade dos resultados e as possibilidades de melhoria da calibração;
- ii) a contribuição da incerteza dos caudais de tempo seco (resultante de flutuações diárias, caudais de infiltração e da incerteza da medição de caudal) na precisão dos resultados nas secções B1-I e B1-M;
- iii) e a influência do modelo do interceptor na precisão dos resultados do modelo global a jusante (B1-M).

Para o efeito, começou-se por analisar a qualidade dos resultados através da metodologia apresentada, nas secções BI-I e em B1-M. Apesar dos bons resultados obtidos, a metodologia revelou um viés que permitiu identificar qual o parâmetro passível de recalibração. O modelo foi recalibrado e a análise repetida, para comparação de resultados entre os dois modelos: inicial e recalibrado.

A análise da contribuição da incerteza dos caudais de tempo seco para a precisão dos resultados do modelo foi efetuada ajustando, evento a evento, o valor médio do caudal de tempo seco, tanto para a secção BI-I como para a B1-M. Os resultados foram comparados com os do modelo sem ajustamento do caudal de tempo seco.

A influência da incerteza do modelo do interceptor na qualidade do modelo a jusante foi estudada através da comparação dos resultados obtidos nas secções B1-I e B1-M.

Assim foi efetuado um conjunto de 7 análises, cujos resultados se apresentam e discutem na secção seguinte, a saber:

- 1) Modelo inicial em B1-I (interceptor)
- 2) Modelo inicial em B1-M (global)
- 3) Modelo recalibrado em B1-I
- 4) Modelo recalibrado em B1-M
- 5) Modelo recalibrado em B1-I com ajuste do caudal de tempo seco em B1-I

- 6) Modelo recalibrado em B1-M com ajuste do caudal de tempo seco em BI-M
- 7) Modelo recalibrado em B1-M com ajuste do caudal de tempo seco em BI-I

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Avaliação do modelo inicial

O Quadro 1 e o Quadro 2 apresentam os resultados estatísticos obtidos para as variáveis volume e caudal de ponta (2 minutos) nas seções B1-I e B1-M, para o modelo inicial. A nomenclatura do cabeçalho tem o seguinte significado: RMSE e NSE – estatísticas descritas em 2.1 e 2.2, respetivamente; Nrº - número da análise (definido em 3.2.3); Seção – seção de monitorização; n - nº de eventos; Média - média dos valores medidos; i95 – calculado simplifadamente por: $2 \times \text{RMSE}$ - intervalo de confiança a 95 % para estimadores não enviesados. Declive, Ord. (ordenada na origem) e R^2 (coeficiente de determinação) são os parâmetros da regressão linear. No final da tabela foi introduzido RMSErel, que relativiza o RMSE pela média dos valores medidos. Ainda para as variáveis volume e caudal de ponta nas seções B1-I e B1-M, no Quadro 3 apresentam-se os gráficos de barras com a comparação dos resultados modelados e os valores medidos (gráfico de baixo) e as diferenças relativas, em relação aos valores medidos (gráfico de cima). No Quadro 4 são apresentados os resultados estatísticos respeitantes aos volumes máximos associados a diferentes durações do hidrograma, para a seção B1-M do modelo inicial, em que se procura analisar a qualidade dos resultados quanto à forma do hidrograma. Este quadro é complementado com a visualização gráfica das retas de regressão linear da Figura 4.

Quadro 1. Resultados estatísticos para a variável volume do modelo inicial

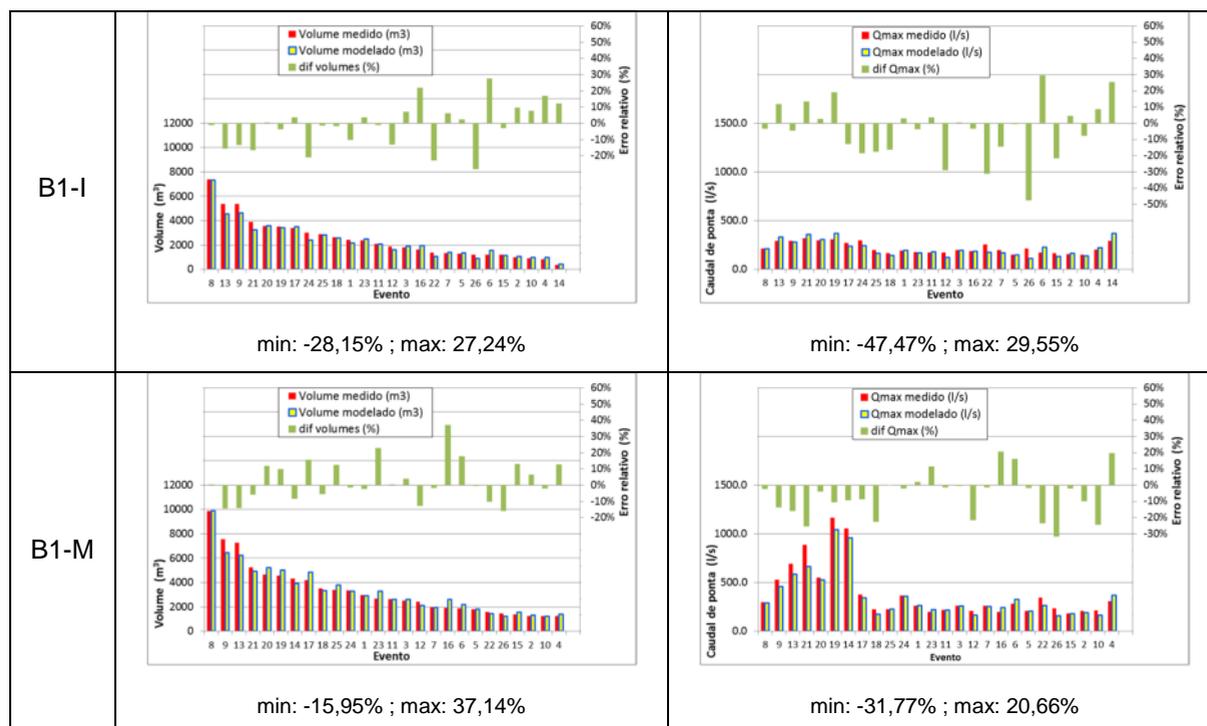
Nrº	Seção	n	Média	RMSE	i95	NSE	Declive	Ord.	R^2	RMSErel
		(-)	(m ³)	(m ³)	(m ³)	(-)	(-)	(m ³)	(-)	(%)
1	B1-I	26	2456,3	325,2	650,3	0,96	0,90	132,0	0,97	13,2%
2	B1-M	26	3334,4	431,7	863,5	0,96	0,92	275,7	0,96	12,9%

Quadro 2. Resultados estatísticos para a variável caudal de ponta do modelo inicial

Nrº	Seção	n	Média	RMSE	i95	NSE	Declive	Ord.	R^2	RMSErel
		(-)	(l/s)	(l/s)	(l/s)	(-)	(-)	(l/s)	(-)	(%)
1	B1-I	26	220,2	40,7	81,4	0,47	1,17	-44,5	0,74	18,5%
2	B1-M	26	382,7	68,6	137,1	0,93	0,84	28,4	0,97	17,9%

Quadro 3. Resultados gráficos para as variáveis volume e caudal de ponta do modelo inicial

Seção	Volume	Caudal de ponta
-------	--------	-----------------



Quadro 4. Resultados estatísticos para os volumes máximos associados a diferentes durações do hidrograma do modelo inicial, em B1-M

dt (min.)	n (-)	Média (m ³)	RMSE (m ³)	i95 (m ³)	NSE (-)	Declive (-)	Ord. (m ³)	R ² (-)	RMSErel (%)
6	26	130,3	19,3	38,7	0,95	0,86	11,0	0,97	14,8%
16	26	314,0	38,3	76,6	0,95	0,89	21,1	0,97	12,2%
30	26	541,1	62,9	125,8	0,94	0,88	40,5	0,95	11,6%
60	26	963,9	99,1	198,2	0,93	0,89	88,1	0,94	10,3%
104	26	1481,9	144,1	288,2	0,92	0,88	173,0	0,93	9,7%
150	26	1979,9	195,6	391,1	0,92	0,86	277,6	0,92	9,9%

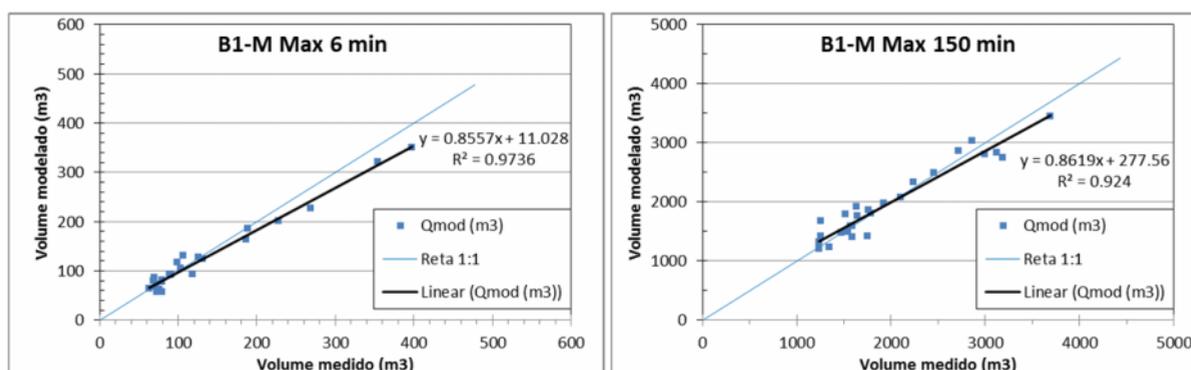


Figura 4. Regressões lineares para os volumes máximos associados às durações de 6 e 150 minutos do hidrograma do modelo inicial, em B1-M

Em geral, o modelo inicial apresenta bons resultados para as variáveis volume e caudal de ponta. No entanto, o caudal de ponta em B1-I apresenta um coeficiente NSE relativamente

baixo (0,47) e parâmetros de regressão linear afastados dos valores ideais (declive unitário, reduzida ordenada na origem e elevado coeficiente de determinação – reta 1:1), apesar de o RMSE relativo indicar que o modelo possui um erro reduzido (18,5%, em relação à média medida). Esta situação está relacionada com o facto de haver descargas de excedentes no interceptor a montante da seção B1-I, as quais são modeladas de forma relativamente simplificada, e dos caudais no interceptor estarem limitados à sua capacidade máxima, que varia entre 200 l/s e 300 l/s ao longo do percurso. Assim, pequenos erros no caudal de ponta tendem a ter um efeito relativo mais pronunciado. Acresce que os caudais de ponta associados a durações de apenas 2 minutos também poderão apresentar maior sensibilidade a instabilidades numéricas.

O Quadro 3 mostra que os desvios dos resultados do modelo não apresentam tendências em relação à dimensão dos eventos.

Os resultados dos volumes máximos associados às diversas durações do hidrograma (forma do hidrograma) evidenciaram um subdimensionamento para os caudais mais elevados (Quadro 4 e Figura 4). A análise de sensibilidade do modelo permitiu identificar que a redução da rugosidade do interceptor, a jusante da seção de monitorização B1-I, e o aumento da inclinação das subbacias da bacia unitária conduziram a melhores resultados do modelo.

4.2. Avaliação do modelo recalibrado

Os resultados estatísticos para o modelo recalibrado apresentam-se no Quadro 5 e no Quadro 6 para as variáveis volume e caudal de ponta, com os respectivos gráficos de barras no Quadro 7. Os resultados que procuram avaliar a qualidade do modelo para a forma do hidrograma ilustram-se no Quadro 8, com as análises estatísticas para diferentes durações, e na Figura 5, com as regressões lineares associadas aos 6 e 150 minutos de duração.

Quadro 5. Resultados estatísticos para a variável volume do modelo recalibrado

Nrº	Seção	n	Média	RMSE	i95	NSE	Declive	Ord.	R ²	RMSErel
		(-)	(m ³)	(m ³)	(m ³)	(-)	(-)	(m ³)	(-)	(%)
3	B1-I	26	2456,3	324,6	649,3	0,96	0,90	135,3	0,97	13,2%
4	B1-M	26	3334,4	409,9	819,8	0,96	0,93	266,4	0,96	12,3%

Quadro 6. Resultados estatísticos para a variável caudal de ponta do modelo recalibrado

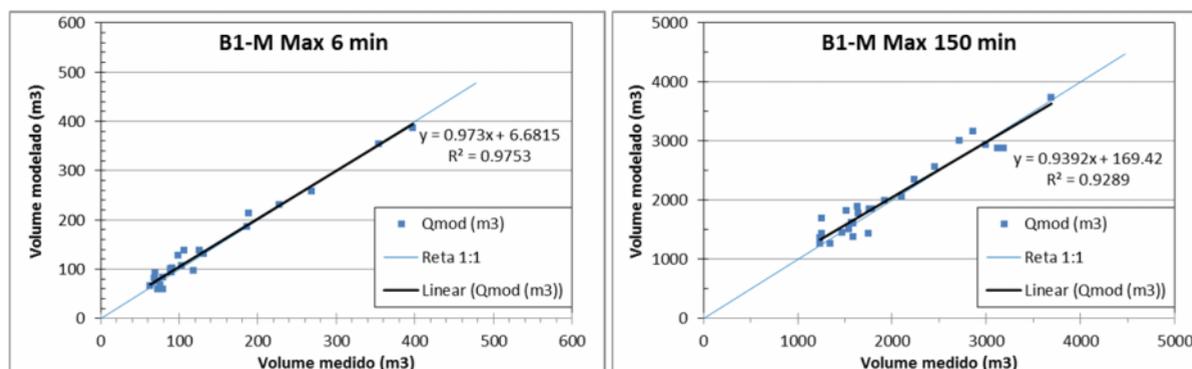
Linha	Seção	n	Média	RMSE	i95	NSE	Declive	Ord.	R ²	RMSErel
		(-)	(l/s)	(l/s)	(l/s)	(-)	(-)	(l/s)	(-)	(%)
3	B1-I	26	220,2	57,3	114,5	-0,04	1,38	-82,6	0,68	26,0%
4	B1-M	26	382,7	46,3	92,7	0,97	0,96	13,3	0,97	12,1%

Quadro 7. Resultados gráficos para as variáveis volume e caudal de ponta do modelo recalibrado

Seção	Volume	Caudal de ponta
B1-I	<p>min: -28,15% ; max: 27,46%</p>	<p>min: -47,47% ; max: 53,02%</p>
B1-M	<p>min: -16,76% ; max: 35,91%</p>	<p>min: -30,24% ; max: 28,87%</p>

Quadro 8. Resultados estatísticos para os volumes máximos associados a diferentes durações do hidrograma do modelo recalibrado, em B1-M

dt	n	Média	RMSE	i95	NSE	Declive	Ord.	R ²	RMSErel
(min)	(-)	(m ³)	(m ³)	(m ³)	(-)	(-)	(m ³)	(-)	(%)
6	26	130,3	14,1	28,3	0,97	0,97	6,7	0,98	10,9%
16	26	314,0	34,0	68,1	0,96	1,02	7,1	0,97	10,8%
30	26	541,1	58,1	116,2	0,95	1,02	12,3	0,96	10,7%
60	26	963,9	100,9	201,9	0,93	1,02	26,0	0,95	10,5%
104	26	1481,9	141,8	283,7	0,93	0,98	76,4	0,94	9,6%
150	26	1979,9	190,7	381,4	0,92	0,94	169,4	0,93	9,6%

**Figura 5.** Regressões lineares para volumes máximos associados às durações de 6 e 150 minutos do hidrograma do modelo recalibrado, em B1-M

Da análise dos resultados verifica-se que a recalibração permitiu diminuir o enviesamento das retas de regressão (Figura 5), aproximar o coeficiente NSE do valor unitário e diminuir o RMSE relativo para a globalidade das durações consideradas.

Verifica-se igualmente que a recalibração conduz a uma ligeira melhoria dos resultados do modelo para o volume. Por exemplo, a comparação do Quadro 5 com o Quadro 1, para a seção B1-M, indica uma diminuição do RMSE de 431,7 m³ para 409,9 m³ (cerca de 5%), a manutenção do NSE em 0,96, e uma ligeira aproximação da reta de regressão à situação ideal (reta 1:1). O caudal de ponta na seção B1-M também beneficia do ajuste, ao contrário da seção B1-I, em que é prejudicado. Esta situação está relacionada com o motivo explicado na seção 4.1. A análise dos gráficos de barras do Quadro 7 mostra que, à semelhança do modelo inicial, o modelo recalibrado também não apresenta tendências do aumento ou diminuição do erro em relação à dimensão dos eventos.

4.3. Influência da incerteza dos caudais de tempo seco na precisão dos resultados

No Quadro 9 e no Quadro 10 apresentam-se os resultados estatísticos obtidos para a análise das variáveis volume e caudal de ponta, respetivamente, considerando o ajuste de caudal de tempo seco nas respetivas seções (i.e., em B1-I com ajuste de caudal de tempo

seco em B1-I; e em B1-M com ajuste de caudal de tempo seco em B1-M) para o modelo recalibrado. Os gráficos de barras ilustram-se no Quadro 11.

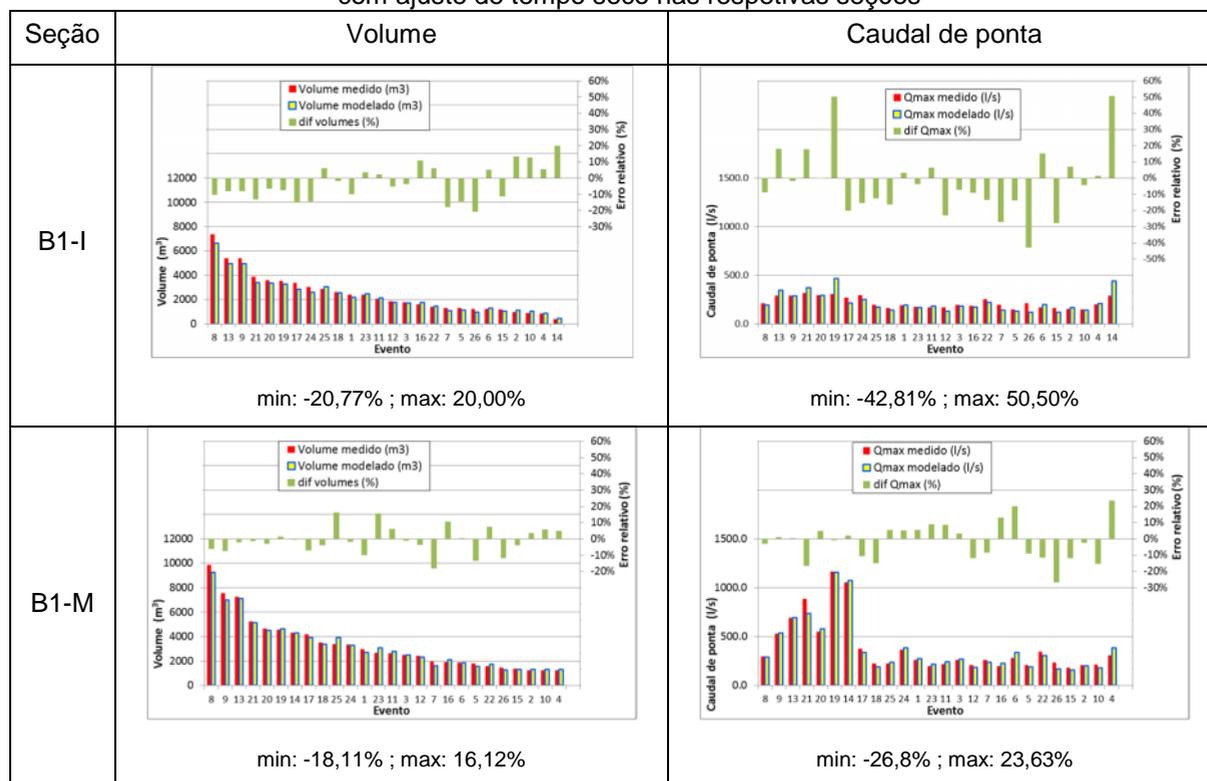
Quadro 9. Resultados estatísticos para a variável volume do modelo recalibrado com ajuste de caudal de tempo seco nas respetivas seções

Nrº	Seção	n	Média	RMSE	i95	NSE	Declive	Ord.	R ²	RMSErel
		(-)	(m ³)	(m ³)	(m ³)	(-)	(-)	(m ³)	(-)	(%)
5	B1-I	26	2456,3	288,6	577,2	0,97	0,88	140,0	0,99	11,7%
6	B1-M	26	3334,4	258,5	517,1	0,99	0,94	142,2	0,99	7,8%

Quadro 10. Resultados estatísticos para a variável caudal de ponta do modelo recalibrado com ajuste de caudal de tempo seco nas respetivas seções

Nrº	Seção	n	Média	RMSE	i95	NSE	Declive	Ord.	R ²	RMSErel
		(-)	(l/s)	(l/s)	(l/s)	(-)	(-)	(l/s)	(-)	(%)
5	B1-I	26	220,2	54,7	109,3	0,05	1,43	-96,3	0,73	24,8%
6	B1-M	26	382,7	41,7	83,3	0,98	0,97	4,0	0,98	10,9%

Quadro 11. Resultados gráficos para as variáveis volume e caudal de ponta do modelo recalibrado com ajuste de tempo seco nas respetivas seções



Verifica-se que a incerteza dos caudais de tempo seco, resultante de flutuações diárias, caudais de infiltração e da incerteza da medição, contribui significativamente para a qualidade dos resultados dos volumes do modelo em B1-M. Ao ajustar o caudal de tempo

seco (comparação entre o Quadro 5 e o Quadro 9 em B1-M), o RMSE é reduzido de 409,9 m³ (cerca de 12% da média) para 258,5 m³ (cerca de 8% da média), correspondendo a uma redução de 37%. Conclui-se que o erro fica reduzido em 37% quando se elimina a incerteza associada ao caudal de tempo seco na secção B1-M.

Na secção B1-I também se observa uma redução do RMSE com o ajustamento do caudal de tempo seco, embora bastante menos pronunciada (de 325 m³ para 290 m³), correspondendo a uma redução de apenas 11%. Apesar da gama de valores do caudal médio de tempo seco ser bastante elevada nesta secção (Figura 2), face aos valores máximos de caudal, os volumes em tempo de chuva têm também uma incerteza significativa (dadas as simplificações assumidas no modelo do intercetor), pelo que a incerteza dos caudais de tempo seco tem menor significado que na secção B1-M. Assim, em B1-I, apenas 11% do erro resulta da incerteza do caudal de tempo seco.

Apesar do coeficiente de Nash-Sutcliffe ter aumentado de 0,96 para 0,99, em B1-M, e de 0,96 para 0,97 em B1-I, o facto dos coeficientes NSE já serem inicialmente significativamente elevados não lhes permitiu serem sensíveis à importante beneficiação dos resultados proveniente do ajuste do caudal de tempo seco.

Os parâmetros da reta de regressão indicaram uma melhoria dos resultados com alguma expressão em B1-M, mas também menos significativa em B1-I.

A Figura 6 apresenta os valores do ajustamento do caudal de tempo seco que foram efetuados em cada uma das secções, deixando em evidência uma relação de causa-efeito entre eles. Dado que o ajuste de tempo seco em B1-I e B1-M foi efetuado de forma independente, estes resultados sugerem que as variações de caudal observadas em tempo seco deverão estar mais relacionadas com flutuações de consumo doméstico de água e caudais de infiltração do que com erros de medição.

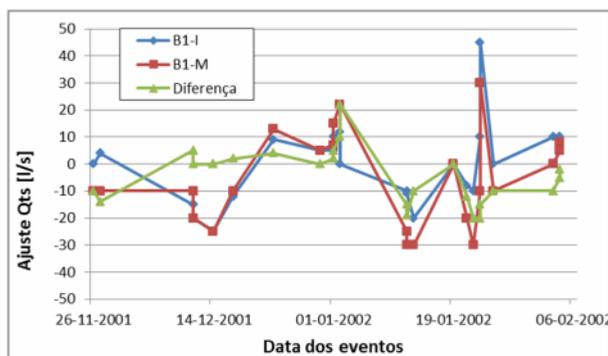


Figura 6. Relação entre os ajustes de caudal de tempo seco em B1-I e B1-M

4.4. Influência do modelo do intercetor no modelo a jusante

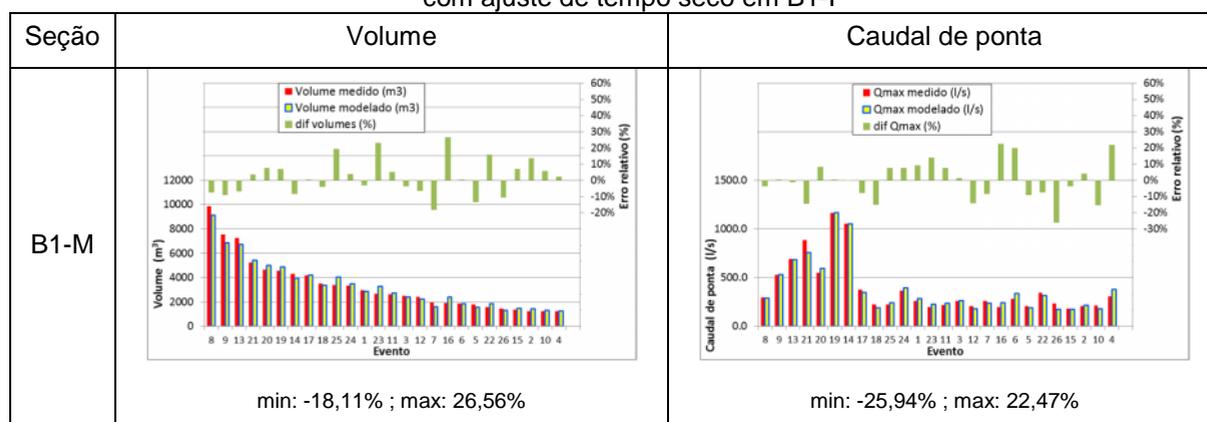
O Quadro 12 e o Quadro 13 apresentam os resultados estatísticos para volume e caudal de ponta na secção B1-M considerando apenas o ajuste do caudal de tempo seco na secção B1-I, isto é sem efetuar o ajustamento na secção B1-M. No Quadro 14 ilustram-se os respetivos gráficos de barras.

Quadro 12. Resultados estatísticos para a variável volume do modelo recalibrado com ajuste de caudal de tempo seco em B1-I

Nrº	Seção	n	Média	RMSE	i95	NSE	Declive	Ord.	R ²	RMSErel
		(-)	(m ³)	(m ³)	(m ³)	(-)	(-)	(m ³)	(-)	(%)
7	B1-M	26	3334,4	347,3	694,6	0,97	0,92	274,9	0,98	10,4%

Quadro 13. Resultados estatísticos para a variável caudal de ponta do modelo recalibrado com ajuste de caudal de tempo seco em B1-I

Nrº	Seção	n	Média	RMSE	i95	NSE	Declive	Ord.	R ²	RMSErel
		(-)	(l/s)	(l/s)	(l/s)	(-)	(-)	(l/s)	(-)	(%)
7	B1-M	26	382,7	39,5	79,0	0,98	0,97	9,6	0,98	10,3%

Quadro 14. Resultados gráficos para as variáveis volume e caudal de ponta do modelo recalibrado com ajuste de tempo seco em B1-I

A comparação dos resultados desta análise (Quadro 12) com o modelo recalibrado em B1-M sem o ajustamento do caudal de tempo seco (Quadro 5) mostra uma redução do RMSE de 409,9 m³ (cerca de 12% da média) para 347,3 m³ (cerca de 10% da média), correspondendo a uma redução de 15%.

Assim, com as reservas inerentes à simplicidade da análise, estes resultados sugerem que cerca de 15% do erro nos volumes calculados em B1-M resultam da incerteza do caudal em tempo seco em B1-I e que os restantes 22% do erro do caudal de tempo seco provêm de B1-M. O facto do caudal de tempo seco da bacia B1-M contribuir mais para o erro do que o do intercetor, apesar de ser muito inferior (24 l/s comparado com 84 l/s), pode justificar-se pela maior incerteza de medição na secção B1-M. De facto, a medição em B1-M foi efetuada num coletor de muito maior dimensão do que em B1-I e em piores condições de medição.

5. CONCLUSÕES

A qualidade de um modelo pode ser avaliada pela quantificação da precisão dos resultados face a medições. De acordo com a bibliografia, a avaliação dos modelos deve considerar pelo menos uma técnica gráfica, uma estatística adimensional e um índice de erro.

Neste artigo avaliou-se a qualidade de um modelo matemático de uma pequena bacia de drenagem (102 ha) utilizando gráficos de barras, para comparação direta dos resultados com as medições, e três técnicas estatísticas: coeficiente de Nash-Sutcliffe, raiz quadrada do erro quadrático médio e regressão linear. A quantificação da precisão incidiu sobre diferentes variáveis dos hidrogramas: o volume, o caudal de ponta e, por forma a avaliar a forma do hidrograma, os volumes máximos associados a diferentes durações. Apesar do modelo existente apresentar bons resultados, esta abordagem permitiu identificar uma melhoria na sua calibração.

Avaliou-se a contribuição da incerteza do caudal de tempo seco (resultante de flutuações diárias, caudais de infiltração e da incerteza da medição) na precisão dos volumes modelados. O ajustamento do caudal de tempo seco na secção de jusante (B1-M) levou a uma redução de 37% do RMSE, ou seja, do intervalo de confiança a 95 % do volume. Verificou-se que apenas 15 % dessa redução resulta da incerteza do caudal de tempo seco da bacia do interceptor de montante (em B1-I), apesar dessa bacia contribuir com perto de 80 % do caudal de tempo seco. Estes resultados apontam para que uma parte significativa da incerteza do caudal de tempo seco em B1-M resulta da medição.

Conclui-se que a metodologia apresentada revela-se simples e útil na compreensão e redução da incerteza do modelo.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) através do Projeto SIMAI – Sistemas de Monitorização e Aviso em Infraestruturas de Drenagem Urbana (PTDC/AAC-AMB/102634/2008). O primeiro autor é financiado por uma bolsa do referido projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Beven, K. J., Binley A. M. (1992). The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction, *Hydrol. Processes*, 6, 279– 298.
- Blasone, R.-S., Vrugt, J., Madsen H., Rosbjerg, D., Robinson B., Zyvoloski G. (2008). Generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) using adaptive Markov Chain Monte Carlo sampling. *Advances in Water Resources*, 31, 630-648.
- Cambez, M.J.; Pinho, J.; David, L. M. (2008). Modelação matemática de um sistema de drenagem urbana com o SWMM. In *13º ENASB*, Covilhã, Outubro de 2008, 15 p. em CD.

- Chiang S., Tachikawa Y., Takara k. (2007). Hydrological model performance comparison through uncertainty recognition and quantification. *Hydrological Processes*. Special Issue: Japan Society of Hydrology and Water Resources - Annual Issue VII, Volume 21, Issue 9, pages 1179–1195, 30 April 2007, Volume 21, Issue 9, p. 1179-1195. doi: 10.1002/hyp.6678.
- David, L.M. (2006a). *Descargas de excedentes de sistemas de drenagem urbana - estudo referenciado em resultados experimentais obtidos em Portugal*. Dissertação para obtenção do grau de doutor em Engenharia Civil, I.S.T./U.T.L., 304 p..
- David, L.M. (2006b). A problemática das ligações indevidas em sistemas de drenagem separativos. In *8º Congresso da Água*, Figueira da Foz, março 2006, APRH, em CD, 14 p..
- Harmel, R.D., Cooper, R.J., Slade, R.M., Haney, R.L., Arnold, J.G. (2006). Cumulative uncertainty in measured streamflow and water quality data for small watersheds. *Trans. ASABE* 49 (3), 689–701.
- Harmel, R.D., Smith P. K. (2007). Consideration of measurement uncertainty in the evaluation of goodness-of-fit in hydrologic and water quality modeling, *Journal of Hydrology*, 337, 326-336.
- Jin, X.-L, Xu, C.-Y, Zhang, Q., Singh, V. (2010). Parameter and modeling uncertainty simulated by GLUE and a formal Bayesian method for a conceptual hydrological model, *Journal of Hydrology*, 383, 147-155.
- Krause, P., Boyle, D. P., Base, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*. 5, pp. 89-97.
- Legates, D. R., McCabe, G. J. (1999). Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Res.* 35(1), 233-241.
- Liu, Y., Gupta H. V. (2007). Uncertainty in hydrologic modeling: Toward an integrated data assimilation framework, *Water Resour. Res.*, 43, W07401
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., Veith, T. L. (2007). Model evaluations guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*. 2007, Vol. 50 (3), pp. 885 - 900.
- Nash, J. E., Sutcliffe J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles. *J. Hydrology* 10(3): 282-290.
- Refsgaard, J. C. (1996). Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology*, 198, 69-97.
- Rossman, L.A. (2007). *Stormwater Management Model User's Manual*, Version 5.0. U.S. Environmental Research Agency. EPA/600/R-05/040 Revised June 2007.
- Sun, S., Bertrand-Krajewski, J.-L. (2012). On calibration data selection: The case of stormwater quality regression models. *Environmental Modelling & Software*, 35, 61-73.
- Vrugt, J.A., ter Braak, C.J.F., Gupta, H.V., Robinson, B.A. (2009). Equifinality of formal (DREAM) and informal (GLUE) Bayesian approaches in hydrologic modeling? *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 23, 1011-1026.
- Willmot, C. J. (1981) On the validation of models. *Physical Geography*, 2, 184–194.