

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS DO MODELO SWMM5 NA GERAÇÃO DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL

Fábio Alex Beling^{1} & Eloiza Maria Cauduro Dias de Paiva² & João Batista Dias de Paiva³*

Resumo – Este artigo apresenta os resultados da análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo SWMM5. O estudo avaliou o impacto da alteração dos parâmetros do modelo em 4 funções objetivo: eficiência de Nash-Sutcliffe, desvios ponderados ao quadrado, vazão de pico e volume total escoado. Foi empregado o método OAT (One At a Time) onde cada parâmetro é variado uma vez e os demais são mantidos fixos. Também foi avaliada a sensibilidade calculada pelo calibrador PEST, onde são computados os coeficientes da matriz jacobiana. A área simulada foi a bacia urbana do Arroio Cancela, 4,95km² com 35% impermeável, localizada em Santa Maria, RS. Ao total foram avaliados 34 eventos de precipitação e vazão. Os resultados indicam que o SWMM5 é mais sensível aos parâmetros relativos às áreas impermeáveis da bacia. Os parâmetros das áreas permeáveis foram mais sensíveis nos eventos de maior magnitude. Já os coeficientes da matriz jacobiana calculada pelo PEST indicam que todos os parâmetros avaliados têm sensibilidade não desprezível, sendo relevantes para o processo de calibração do modelo SWMM5.

Palavras-Chave – SWMM5, Análise de Sensibilidade, Modelagem Hidrológica.

Abstract – This paper presents the results of a sensitivity analysis of the parameters of the SWMM5 model. The study evaluated the impact of changing the parameters of the model for four objective functions: Nash-Sutcliffe efficiency index, squared weighted deviations, runoff peak and total runoff volume. OAT (one at a time) method was used, where each parameter is varied while the others are kept fixed. The sensitivity was also evaluated with the use of the PEST calibrator, which uses the jacobian matrix coefficients. The simulated area was the Arroio Cancela urban basin, with 4.95 km² with 35% of imperviousness, located in Santa Maria, RS. 34 events rainfall-runoff events were evaluated. The results indicated that the SWMM5 model is more sensitive to the parameters that represent the impermeable areas of the basin. The parameters of the permeable areas were more sensitive in the events of greater magnitude. The analysis of the coefficients of the jacobian matrix computed by PEST indicated that all parameters have a sensitivity not negligible, being relevant to the calibration process of the SWMM5 model.

Keywords – SWMM5, Sensitivity Analysis, Hydrological Modeling.

INTRODUÇÃO

O SWMM5 (Storm Water Management Model) é um modelo hidrológico distribuído, possui código fonte aberto, é gratuito e foi desenvolvido em 1971 pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA). Atualmente está disponível na versão 5.0 e é um dos modelos mais empregados no planejamento, projeto e análise de áreas urbanas, sendo capaz de representar os

¹ Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Maria. e-mail: fabiobelting@gmail.com.

² Doutora, Professora da Universidade Federal de Santa Maria. e-mail: eloizadepaiva@gmail.com.

³ Doutor, Professor da Universidade Federal de Santa Maria. e-mail: jbdpaiva@gmail.com.

* Av. Roraima, Camobi, Santa Maria – DESA /Centro de Tecnologia, Campus, UFSM.

processos de precipitação, infiltração, evaporação, escoamento superficial, propagação em canais pelo método hidrodinâmico, dentre outros (ROSSMAN, 2010).

No SWMM5, a área de estudo é representada através de uma série de sub-bacias e canais, que demandam a caracterização de diversos parâmetros cuja determinação nem sempre é trivial. De acordo com Welsh (1989, p. 339), a problemática pode ser solucionada através dos processos de calibração nos casos em que se almeja estimar parâmetros de difícil mensuração. Todavia, o processo de calibração muitas vezes é dispendioso e pode ser otimizado pela redução no número de parâmetros calibrados, se mantidos aqueles de maior impacto no cálculo.

Nesse sentido, os testes de sensibilidade de um modelo têm a função de identificar quais os parâmetros que mais impactam os resultados calculados e que possuem, por conseguinte, maior importância no processo de calibração.

O presente trabalho analisou a sensibilidade dos parâmetros do modelo SWMM5 na geração do escoamento superficial pelo método OAT. Ao total, nove parâmetros foram avaliados quanto ao impacto em diferentes índices.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de Estudo e Eventos Monitorados

A área de estudo do presente trabalho é a bacia hidrográfica do Arroio Cancela, situada na área urbana de Santa Maria, estado do Rio Grande do Sul, conforme ilustra a Figura 1. A bacia possui 4,95 km² de área. Em 2004, a área contava com 35% de áreas impermeáveis.

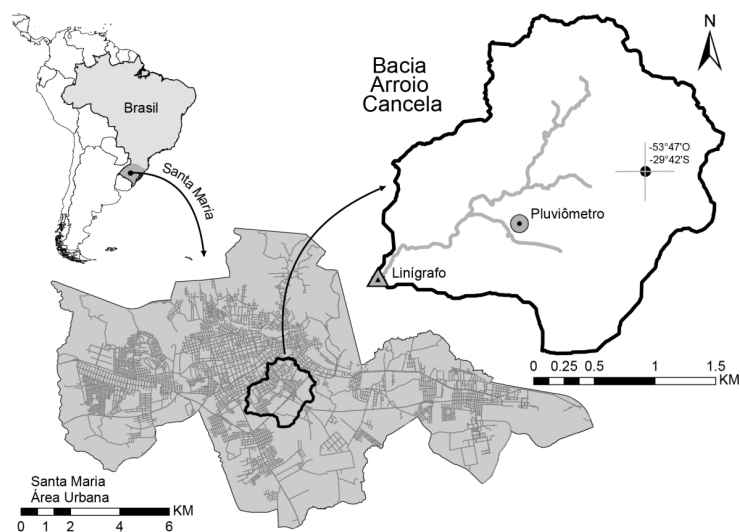


Figura 1 – Área de Estudo, a bacia do Arroio Cancela.

O monitoramento da bacia do Arroio Cancela iniciou-se no ano de 2003 e estendeu-se até 2005, tendo sido instalado um linígrafo na porção final da bacia e um pluviômetro eletrônico, conforme ilustra a Figura 1. A curva-chave da seção do exutório foi determinada por Garcia e Paiva (2006). Do período monitorado, 34 eventos de precipitação e vazão foram empregados na análise de sensibilidade.

Parametrização do modelo SWMM5

Com a bacia fisicamente caracterizada quanto ao relevo, uso e tipo de solo existentes, passou-se a instruir o SWMM5 com os parâmetros necessários à execução do modelo. A bacia foi dividida em 23 sub-bacias e 12 canais abertos de seção irregular, conforme indicado na Figura 2. Todos os parâmetros geométricos das sub-bacias e canais foram determinados com base no modelo numérico de terreno obtido para a região, que contava com curvas de nível de 1 em 1 metro.

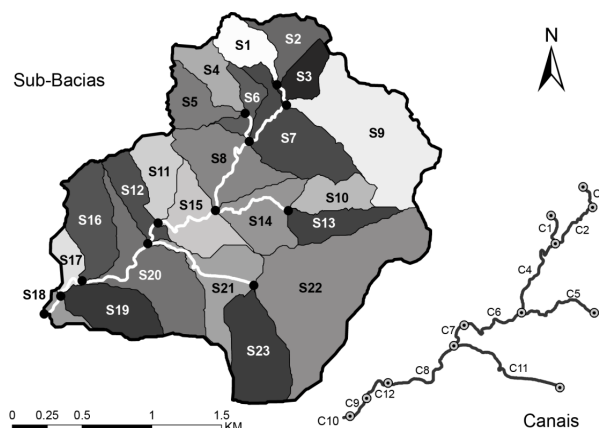


Figura 2 - Discretização da área em sub-bacias e canais.

A percentagem de área impermeável (parâmetro Imp) de cada sub-bacia foi determinada a partir da classificação de imagem de satélite datada de 2004. Os demais parâmetros (Tabela 1) foram ponderados para cada uso e tipo de solo em cada sub-bacia a partir dos dados recomendados pela bibliografia, a exemplo de Rossman (2010, p. 163-164), Bedient et al. (2008, p. 446-448) e Huber e Dickinson (1992, p. 102). O método de Horton foi escolhido para representar o processo de infiltração. Os parâmetros I0, Ib e k foram obtidos de ensaios in-loco (Rauber (2008) e Paiva et al. (2004)) e da correlação da textura com os parâmetros determinados por Rawls et al. (1982).

A propagação do escoamento nos canais foi realizada pelo método hidrodinâmico e a vazão de base foi considerada igual e constante à vazão no início do evento. Essa simplificação é

aceitável, uma vez que esta é relativamente baixa à magnitude das vazões oriundas do escoamento superficial.

Tabela 1 – Parâmetros do modelo SWMM5.

| Ponderado ¹ | Parâmetro |
|------------------------|---|
| Uso Solo | nAI - Manning Áreas Impermeáveis (AI) |
| Uso Solo | nAP - Manning Áreas Permeáveis (AP) |
| - | nCan - Manning dos Canais |
| Uso Solo | dAI - Altura de Retenção das AI (mm) |
| Uso Solo | dAP - Altura de Retenção das AP (mm) |
| Tipo Solo | I0 - Máxima Taxa de Infiltração - Horton (mm/h) |
| Tipo Solo | Ib - Mínima Taxa de Infiltração- Horton (mm/h) |
| Tipo Solo | K - Constante de Decaimento - Horton (h ⁻¹) |

Legenda: 1 – Matriz (uso do solo ou tipo de solo) empregada na ponderação dos parâmetros para cada sub-bacia.

Análise de Sensibilidade

Uma vez caracterizados os parâmetros do modelo SWMM5, é possível a execução de simulações que reproduzem a geração do escoamento superficial da bacia gerado durante eventos chuvosos. Consequentemente, também é possível a análise de sensibilidade.

O método OAT foi empregado na análise de sensibilidade dos parâmetros Imp (percentagem de área impermeável), nAI, nAP, nCan, dAI, dAP, I0, Ib, K (apresentados na Tabela 1). A resposta do modelo SWMM5 foi avaliada através de 4 indicadores: E_{NS} (eficiência de Nash-Sutcliffe), DP (desvio ponderado ao quadrado), pico de vazão e volume total.

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - C_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} = 1 - \frac{\sigma_\varepsilon^2}{\sigma_o^2} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$DP = \sum_{i=1}^n [P_i \cdot (O_i - C_i)]^2 \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde: n – número de intervalos de tempo; C_i – valor calculado no intervalo i; O_i – valor observado no intervalo i; \bar{O} - valor médio observado; \bar{C} - valor médio calculado; σ_ε^2 - variância dos erros; σ_o^2 - variância das observações; E_{ns} – Índice de eficiência de Nash-Sutcliffe.

Foi dado incremento de 10% para cada parâmetro avaliado (enquanto os demais foram mantidos fixos) e as funções objetivo comparadas. Ainda, conforme McCuen (1973) comenta, o gradiente entre a saída do modelo e a perturbação deve ser relativizado ou padronizado, de maneira a ser possível a comparação entre os índices de sensibilidade de diferentes parâmetros. A equação abaixo representa o conceito de índice de sensibilidade padronizado e foi empregado no presente estudo.

$$S_i = \frac{|Z_i - Z_0|}{|X_i - X_0|} \cdot \frac{|X_0|}{|Z_0|} \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde: S_i – Sensibilidade relativa ao parâmetro i com valor x_i ; Z_i – Função objetivo no ponto x_i ; Z_0 – Função objetivo no ponto x_0 ; x_i – Valor do parâmetro; x_0 – Valor do parâmetro.

Todavia, conforme Beven (2001, p. 222-223), o OAT é um método de avaliação local que despreza eventual relação entre os diversos parâmetros (não-linearidade). Dessa forma, há distintos índices de sensibilidade em diferentes pontos do espaço o que os torna válidos num pequeno intervalo de variação de cada parâmetro. Em função disso, esse teste geralmente é realizado próximo à região ótima previamente calibrada de cada parâmetro (BEVEN, 2001).

A fim de aproximar ao máximo os nove parâmetros dos valores que representam a bacia da forma mais próxima à observada (ótimo), uma pré-calibração foi realizada com auxílio do pacote de rotinas de PEST (Parameter Estimator) (DOHERTY, 2010). Como o PEST realiza o cômputo da matriz jacobiana, o PEST fornece um índice de sensibilidade composto computado de acordo com a (Eq. 4). Esses índices também foram empregados na análise de sensibilidade realizada.

$$s_i = \frac{(J^t \cdot Q \cdot J)_{ii}^{1/2}}{m} \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde: S_i – Sensibilidade composta do parâmetro i ; J – Matriz jacobiana (n parâmetros \times m observações); J^t – Matriz jacobiana transposta; Q – Matriz diagonal cujos elementos são os pesos quadráticos de cada observação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A média da sensibilidade dos parâmetros foi computada e os resultados são apresentados na Figura 3. O ranking da sensibilidade é apresentado na Tabela 2 e verifica-se que os parâmetros que mais impactam as saídas do modelo são Imp e dAI.

Conforme ilustra a Figura 3, houve variação da sensibilidade dos nove parâmetros para cada índice de desempenho. Depreende-se da figura que o parâmetro Imp é responsável por mais de 20% das variações em todos os índices. Apesar de Imp não ter ficado em primeiro no ranking da função objetivo E_{NS} , a grande sensibilidade de dAI, 1º do ranking, deve-se principalmente aos eventos de pequena magnitude.

Junto com Imp e dAI, o parâmetro nCan também se mostrou sensível para E_{NS} , DP e para o pico. Já para o volume e para os elementos da matriz jacobiana do PEST, nCan ficou, respectivamente, em penúltimo e último no ranking. Como o coeficiente de Manning dos canais está relacionado à velocidade de translação das ondas de cheia, seu impacto no volume é

desprezível. No entanto, nCan afeta a forma do hidrograma de saída da seção, acentuando e acelerando no tempo os picos. Como E_{NS} é uma função objetivo muito sensível ao tempo (BEVEN, 2001, p. 225), a importância de nCan é evidenciada.

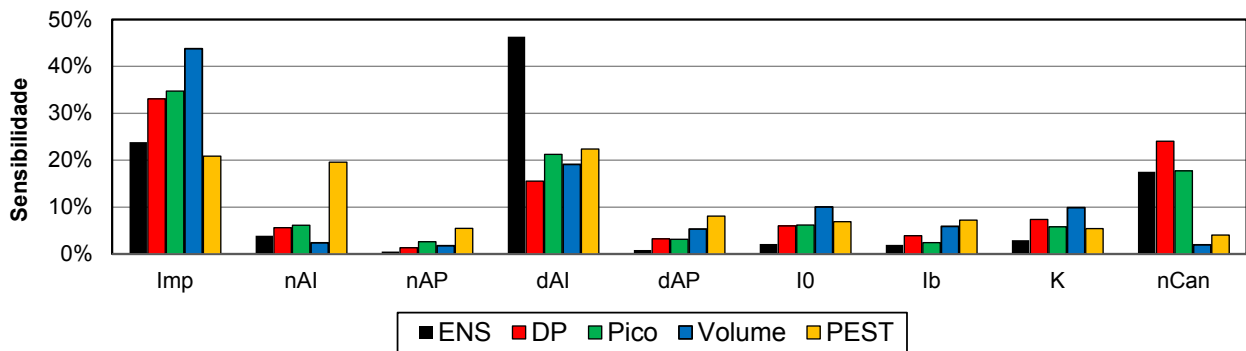


Figura 3 – Sensibilidade relativa média de todos os eventos.

Tabela 2 – Ranking de sensibilidade dos parâmetros.

| Ranking | E_{NS} | DP | Pico | Volume | PEST |
|---------|----------|------|------|--------|------|
| 1 | dAI | Imp | Imp | Imp | dAI |
| 2 | Imp | nCan | dAI | dAI | Imp |
| 3 | nCan | dAI | nCan | I0 | nAI |
| 4 | nAI | K | I0 | K | dAP |
| 5 | K | I0 | nAI | Ib | Ib |
| 6 | I0 | nAI | K | dAP | I0 |
| 7 | Ib | Ib | dAP | nAI | nAP |
| 8 | dAP | dAP | nAP | nCan | K |
| 9 | nAP | nAP | Ib | nAP | nCan |

Os parâmetros de infiltração da equação de Horton (I0, Ib e K) tiveram maior relevância no cômputo do volume. Já nAP e dAP, relacionados às áreas permeáveis, pouco impactaram os resultados, o que indica ser o escoamento superficial gerado nas áreas impermeáveis predominante na discretização adotada. Reforça o exposto o fato de o parâmetro nAI ter ficado na frente de nAP no ranking para todas as funções objetivo. A insensibilidade de nAP e dAP também foi reportada por Krebs *et al.* (2013) e Barco *et al.* (2008).

Cabe ainda analisar a variabilidade dos resultados em diferentes magnitudes de eventos. Nesse sentido, a Figura 4 ilustra a sensibilidade relativa dos parâmetros quanto ao E_{NS} em função dos acumulados de precipitação para cada evento. É possível verificar na figura que os parâmetros relacionados à caracterização das superfícies impermeáveis (Imp, nAI, dAI e nCan) possuem a maior impacto nos eventos de baixa magnitude, o que indica que essas áreas são as responsáveis pela geração do escoamento superficial nessas condições. Já as áreas permeáveis ganham importância na medida em que as pluviosidades incrementam, reforçando a importância dos processos de infiltração.

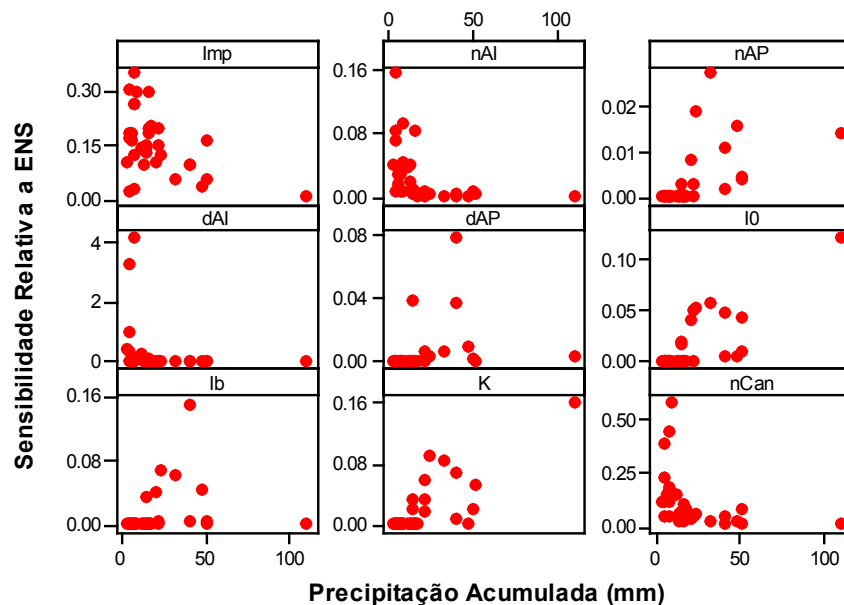


Figura 4 – Variação da sensibilidade relativa ao E_{NS} com a magnitude do evento.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Da análise realizada conclui-se que os parâmetros têm impactos distintos em diferentes índices. Nesse sentido, para o caso do modelo SWMM5, quando o fim da modelagem hidrológica inclina-se para a determinação de volumes, há de ser dada atenção aos parâmetros de infiltração (IO, Ib, e K). No entanto, quando picos de vazão são priorizados, é essencial que haja uma boa representação das características da superfície de escoamento das sub-bacias e canais, especialmente do grau de impermeabilização da superfície, altura de retenção e os coeficientes de Manning das áreas impermeáveis e canais.

Considerando a larga aplicação de E_{NS} na avaliação do desempenho de modelos, é possível afirmar que Imp, dAl e nCan são determinantes para uma boa calibração e, portanto, seriam bons candidatos a compor isoladamente o processo de otimização. Todavia, a sensibilidade da matriz jacobiana computada pelo PEST apresentou a maior dispersão entre os índices, sendo um indicativo da relevância de todos os parâmetros analisados.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq e à FINEP pelo apoio à pesquisa.

REFERÊNCIAS

BARCO, J.; WONG, K.; STENSTROM, M. Automatic Calibration of the U.S. EPA SWMM Model for a Large Urban Catchment. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 134, n. 4, p. 466-474,

2008/04/01 2008. Disponível em: < [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2008\)134:4\(466\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:4(466)) >. Acesso em: 2013/03/28.

BEDIENT, P. B.; HUBER, W. C.; VIEUX, B. E. **Hydrology and Floodplain Analysis**. 4th Ed. New Jersey: Prentice Hall, 2008. 795 p.

BEVEN, K. J. **Rainfall-Runoff Modelling: the primer**. New York: John Wiley & Sons, 2001. 360 p.

DOHERTY, J. **PEST - Model-Independent Parameter Estimation User Manual**. 5° Ed. 2010. Disponível em: < <http://www.pesthomepage.org/getfiles.php?file=pestman.pdf> >. Acesso em: 19/02/2013.

GARCIA, J. I. B.; PAIVA, E. M. C. D. D. Monitoramento Hidrológico e Modelagem da Drenagem Urbana da Bacia do Arroio Cancela - RS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 11, n. 4, Out/Dez 2006. Disponível em: < <http://jararaca.ufsm.br/websites/eloiza/download/Joaquin/Joaquin/ArtigoGarcia.pdf> >. Acesso em: 02/10/2012.

HUBER, W. C.; DICKINSON, R. E. **Storm Water Management Model: Version 4: User's Manual**. Athens, Georgia, USA: U. S. EPA, 1992.

KREBS, G. et al. A high resolution application of a stormwater management model (SWMM) using genetic parameter optimization. **Urban Water Journal**, p. 1-17, 2013. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1080/1573062X.2012.739631> >. Acesso em: 2013/03/27.

MCCUEN, R. H. The Role of Sensitivity Analysis in Hydrologic Modeling. **Journal of Hydrology**, v. 18, n. 1, p. 37-53, 1973. Disponível em: < [http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(73\)90024-3](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(73)90024-3) >. Acesso em: 19/02/2013.

PAIVA, E. M. C. D. D. et al. **Taxa de Infiltração em Pequena Bacia Suburbana**. XXI Congresso Latinoamericano de Hidráulica. IAHR. São Pedro, SP: IAHR: 8 p. 2004.

RAUBER, A. C. C. **Diagnóstico Ambiental Urbano do Meio Físico de Santa Maria – RS**. 2008. 98 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008. Disponível em: < http://cascavel.cpd.ufsm.br/tede/tde_arquivos/20/TDE-2009-03-17T162846Z-1920/Publico/ANACARLACARVALHORAUBER.pdf >. Acesso em: 24/02/2013.

RAWLS, W. J.; BRAKENSIEK, D. L.; SAXTON, K. E. Estimation of Soil Water Properties. In: Transactions of the ASAE. 25 (5): 1316-1320, 1982. ASABE.

ROSSMAN, L. A. **Storm Water Management Model User's Manual Version 5**. U.S. EPA. Cincinnati, OH, p.295. 2010.

WALESH, S. G. **Urban Surface Water Management**. New York: Wiley, 1989. 518 p.