

## XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

### ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA DENSIDADE DE ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS NAS SIMULAÇÕES COM O MODELO SWAT, ESTUDO DE CASO EM SANTA CATARINA

*Tássia Mattos Brighenti*<sup>1</sup>; *Nadia Bernardi Bonumá*<sup>2</sup>; *Yeganantham Dhanesh*<sup>3</sup>; *Raghavan Srinivasan*<sup>4</sup>; & *Pedro Luiz Borges Chaffe*<sup>5</sup>

**RESUMO** – A representação adequada dos processos hidrológicos por meio de modelos requer uma caracterização adequada da precipitação. Neste trabalho foi avaliada a influência da densidade da rede de monitoramento de chuva nas simulações com o modelo Soil and Water Assessment Tool – SWAT, para doze bacias hidrográficas no estado de Santa Catarina. Os processos analisados foram evapotranspiração real e vazão, na escala mensal para um intervalo de 30 anos. Conclui-se que: (i) a vazão é mais sensível que a evapotranspiração real em relação aos padrões espaciais de chuva; (ii) não existe diferença significativa entre os erros acumulados dos anos secos e úmidos; (iii) os padrões iniciais da precipitação nem sempre refletem na resposta das bacias hidrográficas; (iv) o erro total da vazão simulada é maior para as bacias menores e mais declivosas.

**ABSTRACT** – Precipitation is one of the key factors that controls hydrological response in watersheds, therefore should be well represented in its spatial patterns in the hydrological models. In this paper we studied the influence of the rainfall monitoring network density in Soil and Water Assessment Tool – SWAT simulations. The analyzed processes were evapotranspiration and streamflow, at monthly time scale for a 30 years interval. We concluded: (i) the streamflow was more sensitive than the evapotranspiration in relation to the spatial rainfall patterns; (ii) there is no significant difference between the accumulated errors of the dry and wet years; (iii) the initial precipitation patterns do not always reflect the watershed response; (iv) the streamflow error is bigger in the small and with highest slope watersheds.

**PALAVRAS-CHAVE** – *Upscaling*; rede de monitoramento de chuva.

## INTRODUÇÃO

A precipitação é fator chave no controle da resposta hidrológica em uma bacia hidrográfica e deve ser representada adequadamente nas escalas de espaço e tempo (Kim & Kim, 2018, Lobligeois et al., 2014, Nicótina et al., 2008). Apesar dos avanços em sensoriamento remoto, os dados de chuva medidos in loco (redes de monitoramento pluviométrico) continuam sendo o método mais comum para obtenção dos valores de precipitação. A maneira como variabilidade espacial da precipitação influencia na resposta dos modelos, não é consenso na literatura disponível e ainda há espaço para a discussão sobre impacto da resolução espacial das chuvas no desempenho

1) Programa de pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, tassia.brighenti@posgrad.ufsc.br

2) Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, nadia.bonuma@ufsc.br

3) Spatial Sciences Laboratory, Texas A&M University, College Station, Texas, United States; dhaneshy@tamu.edu

4) Spatial Sciences Laboratory, Texas A&M University, College Station, Texas, United States; r-srinivasan@tamu.edu

5) Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, pedro.chaffe@ufsc.br

de modelos hidrológicos (Emmanuel et al., 2015, Kim & Kim, 2018, Nicótina et al., 2008, Saprizazuri et al., 2015).

A mudança na resposta dos modelos hidrológicos em relação variabilidade espacial dos dados de precipitação foi abordada de diferentes maneiras ao longo das últimas décadas. As metodologias disponíveis para esse tipo de investigação possuem uma variedade de categorias, divididas em: análise por entropia (Wang et al., 2018), abordagem bayesiana (Sikorska & Seibert, 2018), suposição por onda cinemática (Kim & Kim, 2018), momentos espaciais (Zoccatelli et al., 2011), cadeia de simulações (Emmanuel et al., 2015) e *upscaling* (Ahrens & Beck, 2008, Nicótina et al., 2008). *Upscaling*, de acordo com Ahrens e Beck, (2008) é quando os processos passam de uma escala fina para uma escala mais grosseira; e esta foi a metodologia escolhida para realização deste estudo. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi investigar a resolução mínima necessária para a representação dos processos de evapotranspiração real e vazão por meio de modelagem hidrológica. Realizamos um experimento simplificado de *upscaling* onde a resolução espacial dos dados de precipitação variam de 10 a 90 km e as bacias hidrográficas entre 303 a 14.935 km<sup>2</sup>. O modelo hidrológico utilizado foi o Soil and Water Assessment Tool - SWAT (Arnold et al., 2012).

## METODOLOGIA

### Área de Estudo

Santa Catarina possui uma área de 95.738 km<sup>2</sup>, localiza-se entre as latitudes 25°57'41 "e 29°23'55" e longitudes 48°19'37 "e 53°50'00", com altitudes variando de 0 a 1800 metros. Tem clima subtropical e chuvas bem distribuídas durante o ano, com uma média anual de 1700 mm. A vegetação é originalmente formada pela Mata Atlântica no litoral, e Floresta de Araucária e campos de altitude no interior do estado. A área de estudo é composta por 12 bacias hidrográficas: Iracema (303,40 km<sup>2</sup>), Cubatão (732,62 km<sup>2</sup>), Tijucas (1.915,62 km<sup>2</sup>), das Almas (1.968,32 km<sup>2</sup>), Timbó (2.692,98 km<sup>2</sup>), Itapocú (2.696,57 km<sup>2</sup>), Pinheirinho (2.907,24 km<sup>2</sup>), Hipólito (3.952,12 km<sup>2</sup>), do Peixe (5.165,55 km<sup>2</sup>), Chapecó (8.297,05 km<sup>2</sup>), Canoas (13.364,73 km<sup>2</sup>) e Itajaí-Açú (14.935,19 km<sup>2</sup>) (Figura 1). As estações de monitoramento de chuvas estão disponíveis no HidroWeb (<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/apresentacao.jsf>); administrado pela Agência Nacional de Águas (ANA), um total de 97 estações pluviométricas foram utilizadas.

### Modelo SWAT

O modelo SWAT um modelo contínuo no tempo e semi-distribuído, sendo desenvolvido para a aplicação em escala de bacia hidrográfica. A fase terrestre do ciclo hidrológico simulado pelo SWAT é baseada na equação do balanço hídrico. Os valores de evapotranspiração real foram calculados pelo método de Hargreaves. A interceptação depende do índice de área foliar (LAI). O

escoamento superficial é calculado pelo método Curva-Número (CN), a propagação do fluxo no canal usando o método de Muskingum. As variações na altura do lençol freático são baseadas: na recarga, no fluxo, e na produção do sistema de águas subterrâneas (Arnold et al., 2012).

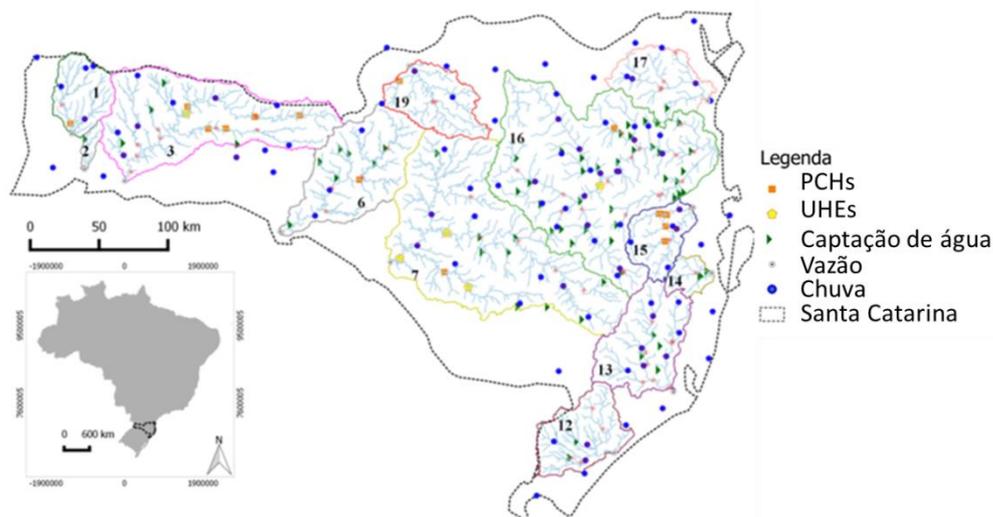


Figura 1 – Representação espacial das 12 bacias hidrográficas localizadas no estado de Santa Catarina. São elas: 1) das Almas, 2) Iracema, 3) Chapecó, 6) do Peixe, 7) Canoas, 12) Pinheirinho, 13) Hipólito, 14) Cubatão, 15) Tijucas, 16) Itajaí-Açu, 17) Itapocú, 19) Timbó. Bem como, as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs), Usinas Hidrelétricas (UHEs), pontos de captação de água, estações de monitoramento chuva (arranjo original) e vazão.

## Processo de Upscaling

Para a realização do processo de *upscaling* é necessário aplicar um gradeamento em toda área de estudo, neste estudo variando de 10 a 90 km. Após o procedimento é verificada a existência de estações de chuva dentro de cada grade, e somente uma estação de chuva permanece. Portanto, com o aumento da rede, há uma diminuição no número de estações (Figura 2). A atualização das estações é feita sempre em relação à grade anterior, por exemplo, para a malha de 50 km são utilizadas as estações que permaneceram na malha de 40 km. O modelo SWAT atribui à estação pluviométrica mais próxima para cada subbacia. Portanto, mesmo que se tenham menos estações no decorrer do processo de *upscaling*, é possível que simulações com malha mais grosseira tenham mais estações atribuídas que a simulação anterior. Porém, a distância relativa entre a estação de chuva e a subbacia aumentará.

## Avaliação do Modelo

O desempenho foi avaliado usando o critério estatístico *Percent Bias* (Pbias) (Gupta et al. 1999) (Equação 1) e o modelo não foi calibrado. O Pbias avalia a tendência que a média dos valores simulados tem em relação aos observados. O valor ideal de Pbias é zero (%), e um bom

desempenho do modelo pode ser de  $\pm 25\%$ . Valores positivos indicam subestimação do modelo e valores negativos a superestimação dos valores.

$$Pbias = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (X_i^{obs} - X_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (X_i^{obs})} \right] * 100 \quad (1)$$

onde,  $X_i^{obs}$  são os valores (vazão ou evapotranspiração real) obtidos a partir das estações originais de chuva e  $X_i^{sim}$  são os valores obtidos das as simulações feitas a partir do processo de *upscaling*.

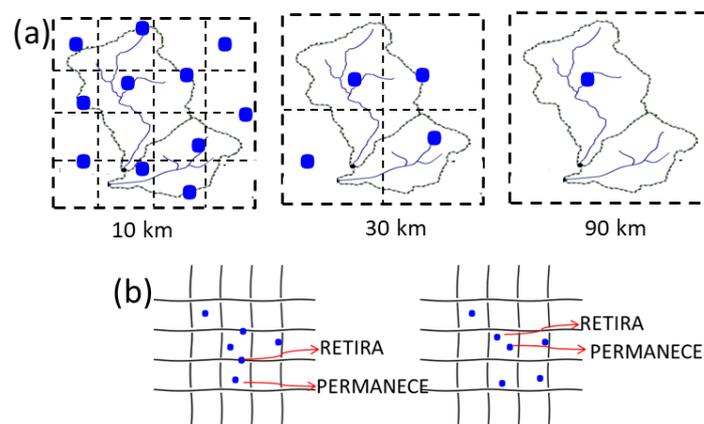


Figura 2 – Apresentação do processo de *upscaling*: (a) a área de estudo é dividida por grades para aplicação do método, o tamanho da grade para este estudo variou de 10 em 10 km; (b) apenas uma estação é permitida dentro de cada grade e a estação mais próxima ao centro permanece.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise dos resultados foi feita seguindo as abordagens: (i) análise da precipitação; (ii) análise dos resultados do modelo para vazão e evapotranspiração real, através da função objetivo  $Pbias$ , e (iii) relação dos resultados com área, declive, e precipitação acumulada para cada bacia. As avaliações são apresentadas em escala mensal, para os 30 anos de simulações. A Tabela 1 lista as bacias hidrográficas selecionadas para a aplicação com o modelo SWAT; as colunas descritas como “gradeamento” representam quantas estações pluviométricas foram utilizadas na simulação. A expressão “s. \_\_\_” significa que o número de estações permanece o mesmo da malha anterior.

A Figura 3 representa para cada bacia hidrográfica estudada a média mensal (Jan-Dez) dos 30 anos de chuva (1985 - 2014). As diferenças são mais aparentes a partir da grade de 40 km. Neste ponto, a quantidade de estações remanescentes mostrou-se insuficiente em representar o padrão geral de precipitação. A linha tracejada representa o valor da precipitação com a quantidade original de estações. Nas bacias w14 e w15 observa-se pequenas diferenças na tendência central desde a

grade 30 km. A bacia hidrográfica que apresenta a maior variação no processo de upscaling é a w02, que também possui a de menor área. As menores variações foram encontradas nas bacias w06 e w19.

Tabela 1 – Apresentação das 12 bacias hidrográficas, código utilizado no texto, área da bacia, e quantidade de estações de chuva utilizadas nas simulações com o modelo SWAT.

Bacias Hidrográficas			Gradeamento (estações de chuva por simulação)						
Nome	Código	Area (km <sup>2</sup> )	Original*	20	30	40	50	60	90
Iracema	w02	304.30	3	s.org	2	2	2	s. 50	1
Cubatão	w14	732.62	4	s.org	3	3	2	3	s. 60
Tijucas	w15	1915.37	6	5	6	4	3	2	s. 60
das Almas	w01	1968.32	5	s.org	4	5	3	s. 50	2
Timbó	w19	2692.98	6	s.org	5	s. 30	5	s. 50	2
Itapocú	w17	2696.57	9	8	7	6	8	4	2
Pinheirinho	w12	2907.24	7	s.org	6	5	4	3	3
Hipólito	w13	3952.12	10	8	s. 20	6	5	5	4
do Peixe	w06	5165.55	7	7	s. 20	6	4	3	2
Chapecó	w03	8297.05	11	s.org	11	9	7	6	6
Canoas	w07	13364.73	15	s.org	13	10	10	6	6
Itajaí-Açu	w16	14935.19	34	29	23	15	17	11	7

\*Original significa que o processo de *upscaling* não foi aplicado, ou seja, todas as estações disponíveis para região são utilizadas na simulação com o modelo SWAT (ver Figura 1).

Para a análise do processo de *upscaling*, os valores obtidos com as simulações para cada grade são comparados com os valores originais, ou seja, com os valores obtidos a partir da simulação feita com todas as estações pluviométricas disponíveis para cada bacia. Os resultados do modelo para evapotranspiração real e vazão foram analisados em escala mensal e pela divisão de anos úmidos e secos. Para a separação dos anos, a série histórica de 30 anos foi ranqueada, e foram analisados os anos extremos de cada bacia, por exemplo, para w01 o ano úmido analisado é 1998 e o ano seco 1988.

Seguindo o padrão da precipitação, o erro na evapotranspiração real aumenta a partir da grade 40 km (Figura 4 e Tabela 2), embora apenas ultrapasse o valor de  $\pm 25\%$  nas grades 60 km e 90 km, na bacia w17. Para as grades 20 km e 30 km, a maioria dos valores do Pbias são próximos de zero, significando ótimas simulações no volume total, exceto para w15, no ano seco. Não foi encontrada diferença significativa entre os erros acumulados dos anos úmidos e secos.

Na análise da vazão, os erros se tornam mais significativos a partir da grade de 30 km, ultrapassando o aceitável de  $\pm 25\%$  nas bacias w14 e w15 para o ano seco (Figura 5 e Tabela 3). Seguindo o padrão da evapotranspiração real, não há diferença relevante entre os erros acumulados

entre anos secos e úmidos. Por fim, a vazão mostrou maior sensibilidade ao processo de *upscaling*, onde, na maioria dos casos o erro no volume total é maior.

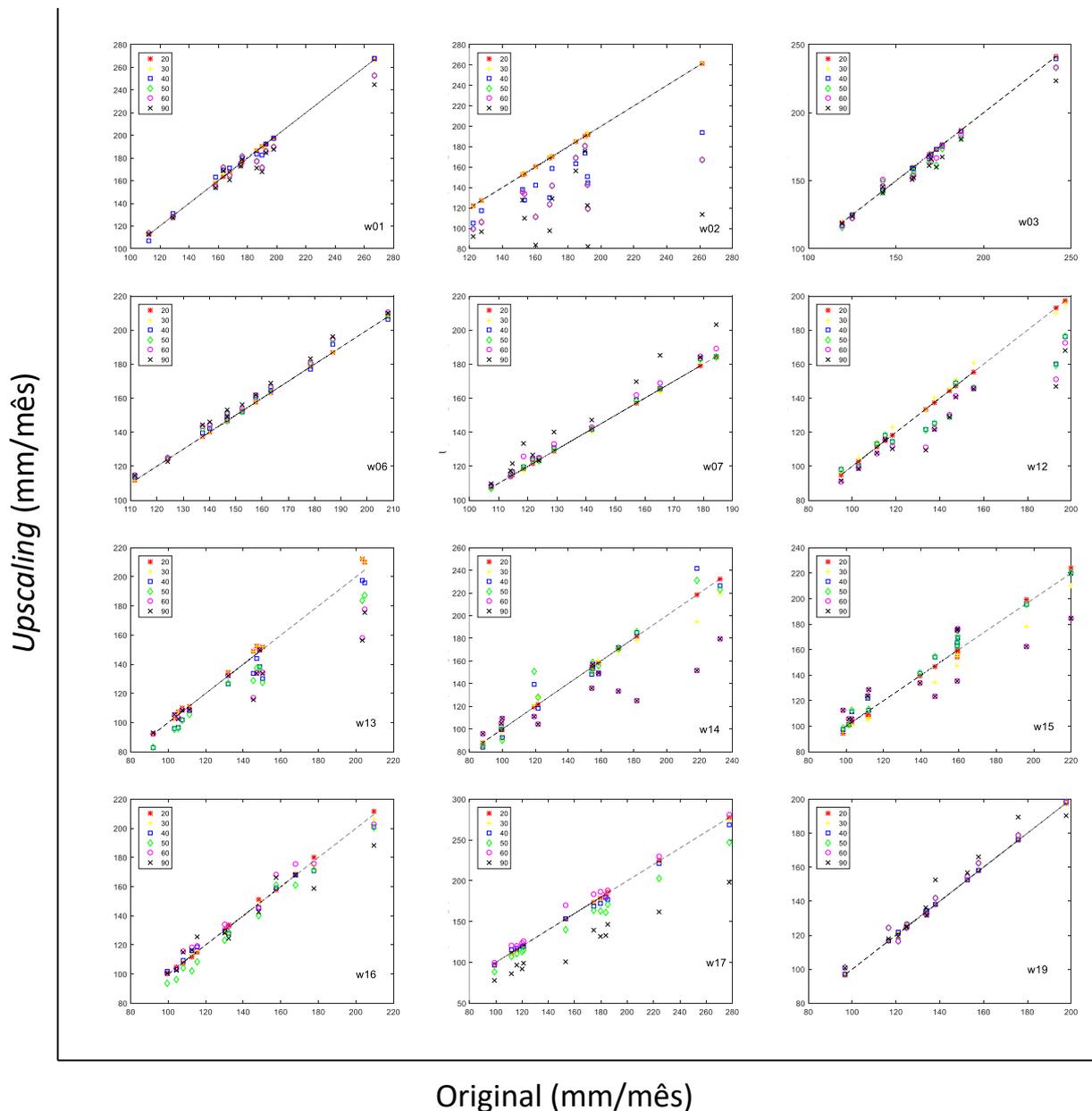


Figura 3 – Média mensal da precipitação por bacia hidrográfica. A linha contínua representa a chuva original; os pontos, a chuva média mensal acumulada para os diferentes gradeamentos obtidos no processo de *upscaling*.

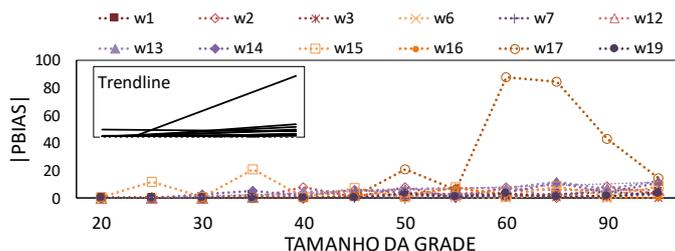


Figura 4 – Resultado dos 30 anos de evapotranspiração real simulada para a função objetivo Pbias.

Tabela 2 – Resultado da evapotranspiração real em relação à função objetivo Pbias para cada gradeamento, com a separação entre anos secos e úmidos. Quanto mais escura a cor dentro das células, mais insatisfatória é a simulação.

Bacia Hidrográfica		20		30		40		50		60		90	
Área	Código	úmido	seco										
304.30	w2	0.0	0.0	-0.4	-0.4	7.7	0.9	7.8	-0.2	7.8	-0.2	8.9	-2.8
732.62	w14	0.0	0.0	2.6	5.6	1.7	-6.0	4.0	-3.1	4.2	11.2	4.2	11.2
1915.37	w15	-1.0	11.6	1.0	21.0	1.0	-7.6	1.1	-8.0	1.6	-8.3	1.6	-8.3
1968.32	w1	0.0	0.0	-1.2	-2.4	-1.2	0.6	0.4	3.3	0.4	3.3	0.5	4.9
2692.98	w19	0.0	0.0	0.3	-0.4	0.3	-0.4	-3.5	-0.7	-3.5	-0.7	-1.3	3.5
2696.57	w17	0.5	0.3	-0.3	0.3	0.2	1.8	20.9	6.3	87.4	84.4	42.7	14.4
2907.24	w12	0.0	0.0	0.3	0.9	3.2	2.9	3.1	3.0	6.4	5.9	6.2	6.0
3952.12	w13	0.0	-0.1	0.0	-0.1	5.0	5.2	6.5	7.4	7.0	11.8	7.0	12.3
5165.55	w6	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.7	-1.2	-0.7	-1.0	-0.4	-2.9	-0.3	-3.4
8297.05	w3	0.0	0.0	0.1	-0.5	0.4	-0.5	1.5	2.5	1.5	1.1	0.2	0.5
13364.73	w7	0.0	0.0	0.1	0.6	-0.1	0.6	0.0	0.9	-1.2	2.9	-4.9	2.3
14935.19	w16	-0.3	1.2	0.2	1.5	0.2	2.0	-2.6	7.5	-2.6	1.1	-0.7	0.4

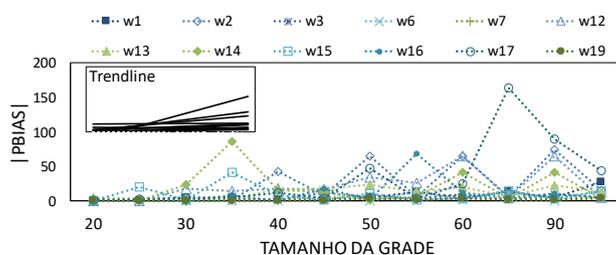


Figura 5 - Resultado dos 30 anos de vazão simulada para a função objetivo Pbias.

Tabela 3 - Resultado da vazão em relação a função objetivo Pbias para cada gradeamento, com a separação entre anos secos e úmidos. Quanto mais escura a cor dentro das células, mais insatisfatória é a simulação.

Bacia Hidrográfica		20		30		40		50		60		90	
Área	Código	úmido	seco	úmido	seco	úmido	seco	úmido	seco	úmido	seco	úmido	seco
304.30	w2	0.0	0.0	-0.1	1.1	42.2	8.5	65.0	6.0	65.0	6.0	74.1	15.7
732.62	w14	0.0	0.0	-23.9	86.2	15.3	-12.6	0.9	-5.7	41.8	3.6	41.8	3.6
1915.37	w15	-0.6	19.6	-1.6	41.4	-8.3	1.2	-10.7	1.1	-3.1	-14.5	-3.1	-14.5
1968.32	w1	0.0	0.0	3.2	3.5	0.7	12.4	4.9	13.6	4.9	13.6	4.4	26.7
2692.98	w19	0.0	0.0	-0.5	-3.3	-0.5	-3.3	-6.4	13.3	-6.4	13.3	2.6	5.5
2696.57	w17	1.4	2.0	4.7	4.3	11.5	3.8	47.7	3.8	-25.1	-164.5	89.5	43.3
2907.24	w12	0.0	0.0	17.3	14.7	17.3	16.0	34.6	25.9	64.5	4.4	64.5	4.4
3952.12	w13	-5.0	-4.1	-5.0	-4.1	16.7	18.3	23.4	12.9	20.2	5.9	22.4	13.1
5165.55	w6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	14.0	0.5	14.5	-1.4	14.2	0.3	14.6
8297.05	w3	0.0	0.0	1.3	0.3	2.9	-1.0	6.7	3.8	9.3	-1.8	9.7	4.3
13364.73	w7	0.0	0.0	0.2	-2.2	1.6	-5.8	2.4	-3.7	-3.2	-3.7	-3.2	-6.3
14935.19	w16	-1.5	1.2	-0.3	8.7	0.5	17.7	-2.3	68.8	-11.3	4.5	-11.0	4.8

Visto que a vazão possui maior sensibilidade à densidade das estações de chuva, a Figura 6 mostra a relação entre o processo de *upscaling* e as características físicas da bacia, área e declividade; também se buscou uma relação com a média mensal acumulada dos 30 anos de precipitação. A relação entre a área da bacia e o erro é inversamente proporcional, ou seja, quanto menor a área, maior o erro; com exceção da grade 20 km, onde a relação parece ser neutra. Neste

sentido, para definição da grade ideal de simulação com o modelo SWAT deve-se sempre levar em consideração a área total da bacia estudada. Quando a declividade média das bacias é analisada, bacias com maior declividade apresentam erros maiores. Para a chuva média mensal, não foi possível estabelecer uma relação clara entre este fator e os erros calculados da vazão.

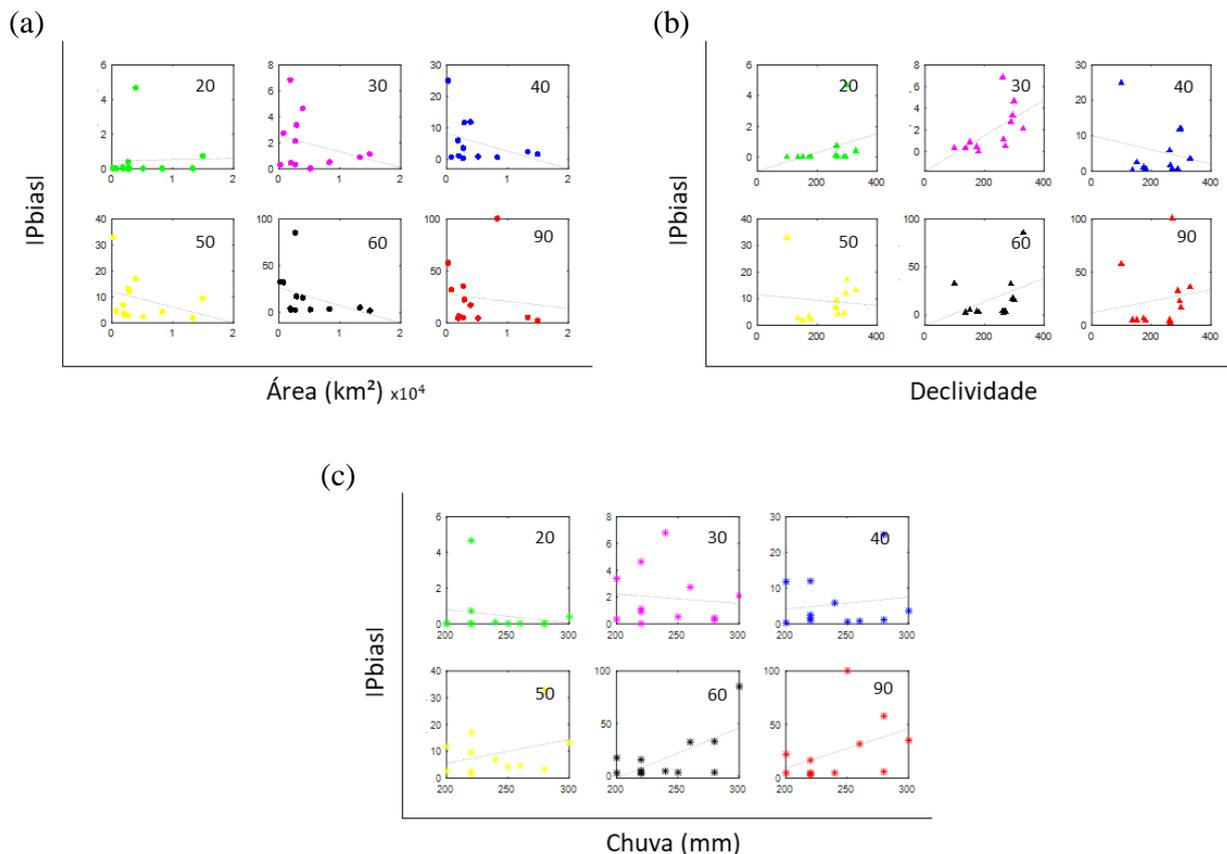


Figura 6 - Relação entre os resultados do processo de *upscaling* e as características físicas das bacias hidrográficas: área (a) e declive (b), e a precipitação anual acumulada (c).

## CONCLUSÕES

A bacia hidrográfica atua como um filtro espaço-temporal com características específicas de amortecimento da precipitação, o que significa que apenas algumas características específicas da organização espacial da chuva serão transformadas em variações nos processos de evapotranspiração real e vazão. O processo de *upscaling* aplicado neste estudo, mostrou-se ser uma ferramenta simples e eficiente para identificar a discretização espacial mínima necessária para representar o sistema hidrológico das bacias hidrográficas. Mais especificamente, temos: (i) a vazão mostrou-se mais sensível que a evapotranspiração real em relação aos padrões espaciais de chuva; (ii) não existe diferença significativa entre os erros acumulados dos anos secos e úmidos; (iii) os

padrões iniciais da precipitação nem sempre refletem na resposta das bacias hidrográficas; (iv) no geral, o erro total da vazão simulada é maior para as bacias menores e mais declivosas.

**AGRADECIMENTOS** – Os autores agradecem ao CNPq pela bolsa de estudos.

## REFERÊNCIAS

- Ahrens, B. & Beck, A. (2008) On upscaling of rain-gauge data for evaluating numerical weather forecasts. *Meteorol. Atmos. Phys.* **99**(3–4), 155–167. doi:10.1007/s00703-007-0261-8
- Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., Santhi, C., et al. (2012) Swat: Model Use, Calibration, and Validation. *Trans. ASABE* **55**(4), 1491–1508.
- Emmanuel, I., Andrieu, H., Leblois, E., Janey, N. & Payrastre, O. (2015) Influence of rainfall spatial variability on rainfall-runoff modelling: Benefit of a simulation approach? *J. Hydrol.* **531**, 337–348. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.jhydrol.2015.04.058
- Gupta, H. V., Sorooshian, S. & Yapo, P. O. (1999) Status Of Automatic Calibration For Hydrologic Models: Comparison With Multilevel Expert Calibration. *J. Hydrol. Eng.* 135–143. doi:10.1002/fut.20174
- Kim, C. & Kim, D.-H. (2018) Effect of rainfall spatial distribution and duration on minimum spatial resolution of rainfall data for accurate surface runoff prediction. *J. Hydro-environment Res.* **10**, 1–8. Elsevier. doi:https://doi.org/10.1016/j.jher.2018.04.001
- Nicótina, L., Alessi Celegon, E., Rinaldo, A. & Marani, M. (2008) On the impact of rainfall patterns on the hydrologic response. *Water Resour. Res.* **44**(12), 1–14. doi:10.1029/2007WR006654
- Sapriza-Azuri, G., Jorge Jodar, V. N., Slooten, L. J., Carrera, J. & Gupta, H. V. (2015) Impacts of rainfall spatial variability on hydrogeological response. *Water Resour. Res.* **51**, 1300–1314. doi:doi:10.1002/2014WR016168
- Sikorska, A. E. & Seibert, J. (2018) Value of different precipitation data for flood prediction in an alpine catchment: A Bayesian approach. *J. Hydrol.* **556**, 961–971. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.jhydrol.2016.06.031
- Wang, W., Wang, D., Singh, V. P., Wang, Y., Wu, J., Wang, L., Zou, X., et al. (2018) Optimization of rainfall networks using information entropy and temporal variability analysis. *J. Hydrol.* **559**, 136–155. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.jhydrol.2018.02.010
- Zocatelli, D., Borga, M., Viglione, A., Chirico, G. B. & Blöschl, G. (2011) Spatial moments of catchment rainfall: Rainfall spatial organisation, basin morphology, and flood response. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **15**(12), 3767–3783. doi:10.5194/hess-15-3767-2011