

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

APLICAÇÃO DE DADOS DE ESCOAMENTO DE BASE EM BACIAS ANINHADAS PARA A VALIDAÇÃO DO *SPIN-UP* DE UM MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUÍDO

*Camyla Innocente dos Santos*¹; *Julian Klaus*²; *Ewerthon Cezar Schiavo Bernardi*³; & *Pedro Luiz Borges Chaffe*⁴

Abstract: Physically based distributed hydrological models are essential for representing surface and subsurface flow processes in watersheds. *Spin-up*, the phase in which the model stabilizes its internal variables from unknown initial conditions, is often evaluated only using measurements at the watershed outlet, which may conceal errors in the correct representation of the watershed. In this study, we assessed the quality of the *spin-up* using baseflow measurements in nested catchments. We applied the ParFlow model and analyzed baseflow data from nine catchments with areas ranging from 0.01 km² to 5.33 km². Results show that the *spin-up* error was higher in smaller sub-catchments, reaching 406% (0.003 m³/s), while at the outlet the error was 2.91% (0.01 m³/s). This highlights that evaluating *spin-up* only at the watershed outlet can be insufficient. Analysis using spatially distributed data is crucial to understanding hydrological processes in different parts of the watershed, ensuring the model accurately represents physical phenomena rather than merely compensating for internal errors.

Resumo: Modelos hidrológicos fisicamente baseados e distribuídos são essenciais para representar os processos de fluxo superficial e subterrâneo em bacias hidrográficas. O *spin-up*, fase em que o modelo estabiliza suas variáveis internas a partir de condições iniciais desconhecidas, costuma ser avaliado apenas pela medição na exutória da bacia, o que pode ocultar erros na correta representação da bacia. Neste estudo, avaliamos a qualidade do *spin-up* usando medições de escoamento de base em bacias aninhadas. Aplicamos o modelo ParFlow e analisamos dados de escoamento de base de nove bacias com áreas entre 0,01 km² e 5,33 km². Os resultados mostram que o erro do *spin-up* foi maior nas sub-bacias menores, atingindo 406% (0,003 m³/s), enquanto na exutória o erro foi de 2,91% (0,01 m³/s). Isso evidencia que avaliar o *spin-up* apenas na exutória da bacia pode ser insuficiente. A análise com dados espacialmente distribuídos é fundamental para entender os processos hidrológicos em diferentes partes da bacia, garantindo que o modelo represente corretamente os fenômenos físicos e não apenas compense erros internos.

Palavras-Chave – ParFlow; *Spin-up*; Escoamento de base

1) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina, camylainnocente@gmail.com

2) Departamento de geografia da University of Bonn – Alemanha, jklaus@uni-bonn.de

3) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina, ewerthon.bernardi@gmail.com

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

INTRODUÇÃO

Compreender os controles da geração de vazão continua sendo um desafio (Fan *et al.*, 2019). Em pequena escala, sob condições climáticas homogêneas, há uma considerável variabilidade espacial da vazão que não é facilmente explicada pela topografia (Karlsen *et al.*, 2016). A estrutura do solo e a formação geológica controlam o armazenamento de água na bacia e o direcionamento do fluxo subterrâneo (Glaser *et al.*, 2020). O controle hidrogeológico mais influente é o tipo (Asano *et al.*, 2020) e a posição do embasamento rochoso da bacia (Iwasaki *et al.*, 2021). Características subterrâneas, como porosidade, profundidade do solo e condutividade hidráulica (Ks), determinam o a capacidade de armazenamento do solo e a velocidade da água subterrânea.

Para compreender melhor a geração de vazão em regiões pouco documentadas, como as áreas tropicais e subtropicais, é necessário testar hipóteses por meio de trabalhos de monitoramento (Burt; McDonnell, 2015). No entanto, é irreal esperar que a maioria dos grupos de pesquisa instale ou mantenha infraestrutura de campo (Tauro *et al.*, 2018), especialmente em países em desenvolvimento, onde os registros de longo prazo são escassos (Wohl *et al.*, 2012). Uma alternativa é usar uma abordagem campo-modelagem, com dados limitados de campo, como campanhas instantâneas, e experimentos virtuais com diferentes cenários (Ameli *et al.*, 2018). ParFlow é uma ferramenta ideal pois simula o fluxo superficial e subterrâneo usando a equação de Richards (Kollet; Maxwell, 2008). ParFlow é um modelo integrado de acesso aberto, testado em problemas variados de superfície e águas subterrâneas em grandes domínios ($6,3 \cdot 10^6 \text{ km}^2$; Maxwell *et al.*, 2016) e pequenas bacias (38,5 há; Fang *et al.*, 2016).

O *spin-up* é uma etapa essencial na modelagem hidrológica que permite que o modelo atinja um estado de equilíbrio interno, ajustando variáveis como umidade do solo, armazenamento subterrâneo e fluxo de base a condições compatíveis com as características da bacia. Como as condições iniciais são geralmente desconhecidas ou arbitrárias, o *spin-up* garante que os resultados da simulação não sejam artificialmente influenciados por essas incertezas. No entanto, avaliar a qualidade desse equilíbrio interno é um desafio. A vazão total na exutória é frequentemente usada para essa validação, mas pode mascarar inconsistências do modelo. Nesse contexto, o escoamento de base, por ser o componente mais estável e menos sensível a eventos extremos, representa a melhor aproximação observável do estado de equilíbrio hidrostático da bacia. Portanto, a análise do escoamento de base, especialmente em diferentes pontos da bacia, oferece uma forma mais precisa e confiável de verificar se o *spin-up* produziu um estado estacionário hidrológico coerente.

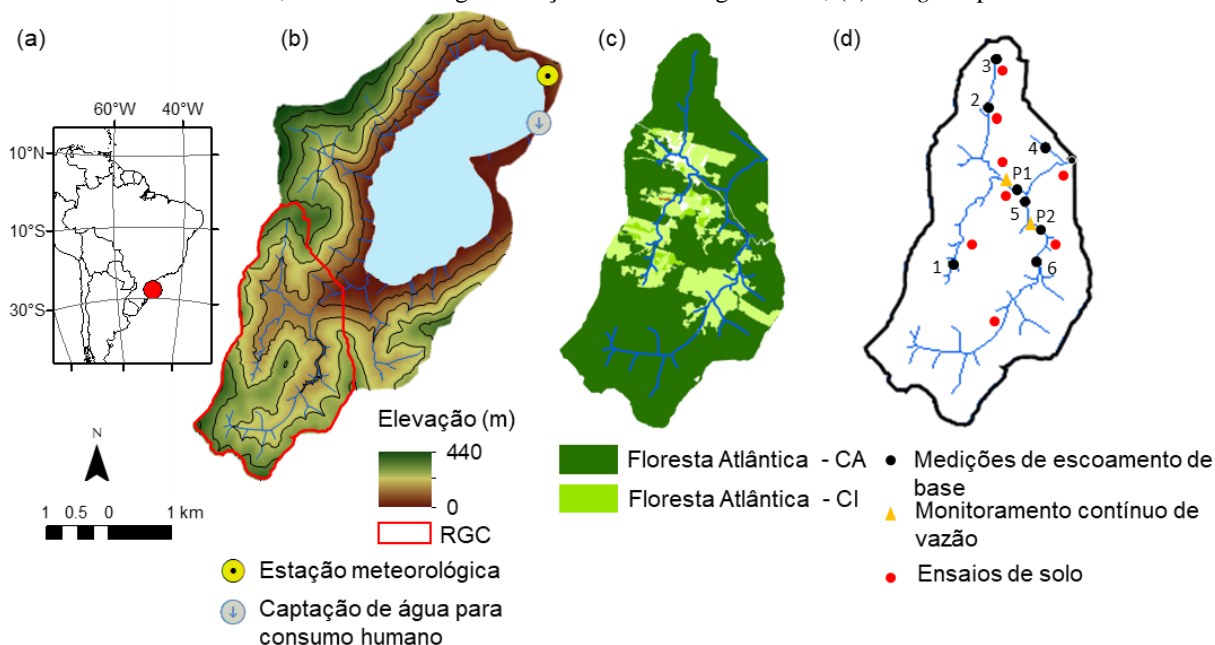
Neste estudo, testamos a qualidade do *spin-up* em dois cenários geológicos na bacia Ribeirão Grande (RGC), sub-bacia da Bacia Hidrográfica da Lagoa do Peri. Nossa área de estudo é uma bacia subtropical caracterizada por granito e dique de diabásio. Nossas questões de pesquisa são: i) Informações de campanhas de escoamento base podem ser úteis para avaliar o *spin-up* de um modelo hidrológico integrado que simula fluxo superficial e subterrâneo? ii) É possível parametrizar adequadamente a geologia e os parâmetros do solo no modelo ParFlow para prever com precisão o estado estacionário hidrológico de uma bacia?

MATERIAIS E MÉTODOS

A Bacia Experimental da Lagoa do Peri, com aproximadamente 20 km^2 , está localizada no sul do Brasil e desempenha um papel fundamental no abastecimento de água da Ilha de Florianópolis. A região apresenta uma precipitação média anual de 1700 mm e temperatura média de 20°C . A geologia local é composta predominantemente por granito e diques de diabásio, sendo a área coberta por remanescentes da Mata Atlântica. A bacia do Ribeirão Grande é a maior sub-bacia, com uma área de

5,33 km² (Figura 1). O monitoramento de base foi realizado em 9 seções transversais, com medições repetidas entre 1 e 15 vezes em diferentes dias. Para a comparação entre os resultados do modelo e as medições de campo, utilizou-se a média dos valores obtidos. Além disso, para a verificação da condutividade hidráulica e da profundidade do solo, foram realizadas nove medições utilizando o método do poço invertido.

Figura 1 -Bacia Experimental da Lagoa do Peri. (a) localização na América do Sul; (b) modelo digital de elevação; (c) cobertura do solo, onde CA é estágio avançado e CI é estágio inicial; (d) *design* experimental.



Definimos dois cenários para respondermos as perguntas científicas (Figura 2). O Cenário 1 (S1) representa a geologia real, com base no mapa geológico da UFSC (2018), composto por granito e diques de diabásio, quatro zonas subsuperficiais (granito, solo residual do granito, diabásio, solo residual do diabásio), profundidades variáveis do solo (obtidas em campo), e parâmetros hidráulicos da literatura e do banco de dados Rosetta. O Cenário 2 (S2) assume uma subsuperfície homogênea, sem distinção entre solo e rocha, com condutividade hidráulica média ponderada de S1. Em ambos, o valor do coeficiente de rugosidade de Manning é $0,04 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$. Utilizamos um modelo digital de elevação (SDS, 2013) com resolução de $15 \times 15 \text{ m}$ para representar nosso domínio. As dimensões do domínio de simulação foram baseadas na região da Bacia do Ribeirão Grande (RGC), excluindo-se áreas que não drenam para a bacia. O domínio foi discretizado em 168 linhas por 279 colunas. A discretização vertical do modelo utilizou espessuras variáveis, com 20 camadas que aumentam com a profundidade, totalizando 10 m.

Figura 2 - Diferentes cenários geológicos para verificar o efeito da geologia na relação de escala da vazão. O cenário 1 representa a geologia real.

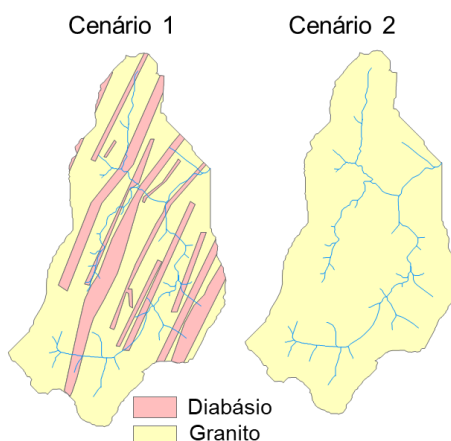


Tabela 1 – Informações geológicas utilizadas para configurar o ParFlow. S2 é o Cenário 2, K é a condutividade hidráulica, \emptyset é a porosidade, α é um parâmetro de Van Genuchten relacionado ao inverso da sucção de entrada de ar, n é um parâmetro de Van Genuchten relacionado à distribuição do tamanho dos poros, Θ_r e Θ_s são parâmetros de Van Genuchten, correspondendo ao teor de água residual e ao teor de água na saturação, respectivamente.

Camada	K [m h ⁻¹]	\emptyset [-]	α [cm ⁻¹]	Θ_r [cm ³ cm ⁻³]	Θ_s [cm ³ cm ⁻³]	n [-]	H [m]
Solo residual de granito	0,690	0,430	0,270	0,088	0,430	1,210	0,50 - 3,00
Solo residual de diabásio	1,050	0,470	0,140	0,093	0,470	1,320	0,20 - 2,80
Granito	0,004	0,100	0,004	0,010	0,100	1,500	9,50 - 7,00
Diabásio	0,036	0,150	0,013	0,010	0,150	1,514	9,80 - 7,20
S2	0,180	0,185	0,050	0,026	0,185	1,455	10

O *spin-up* durou um ano (8640 horas) com fluxo superficial ativado, até que o sistema atingisse estado estacionário. A condição inicial foi uma lâmina d'água de 1 m abaixo da superfície. A convergência foi avaliada pela variação de conteúdo volumétrico de água em menos de 1% entre as últimas duas horas. A validação do *spin-up* do ParFlow foi feita com dados de nove bacias aninhadas durante o escoamento de base.

RESULTADOS

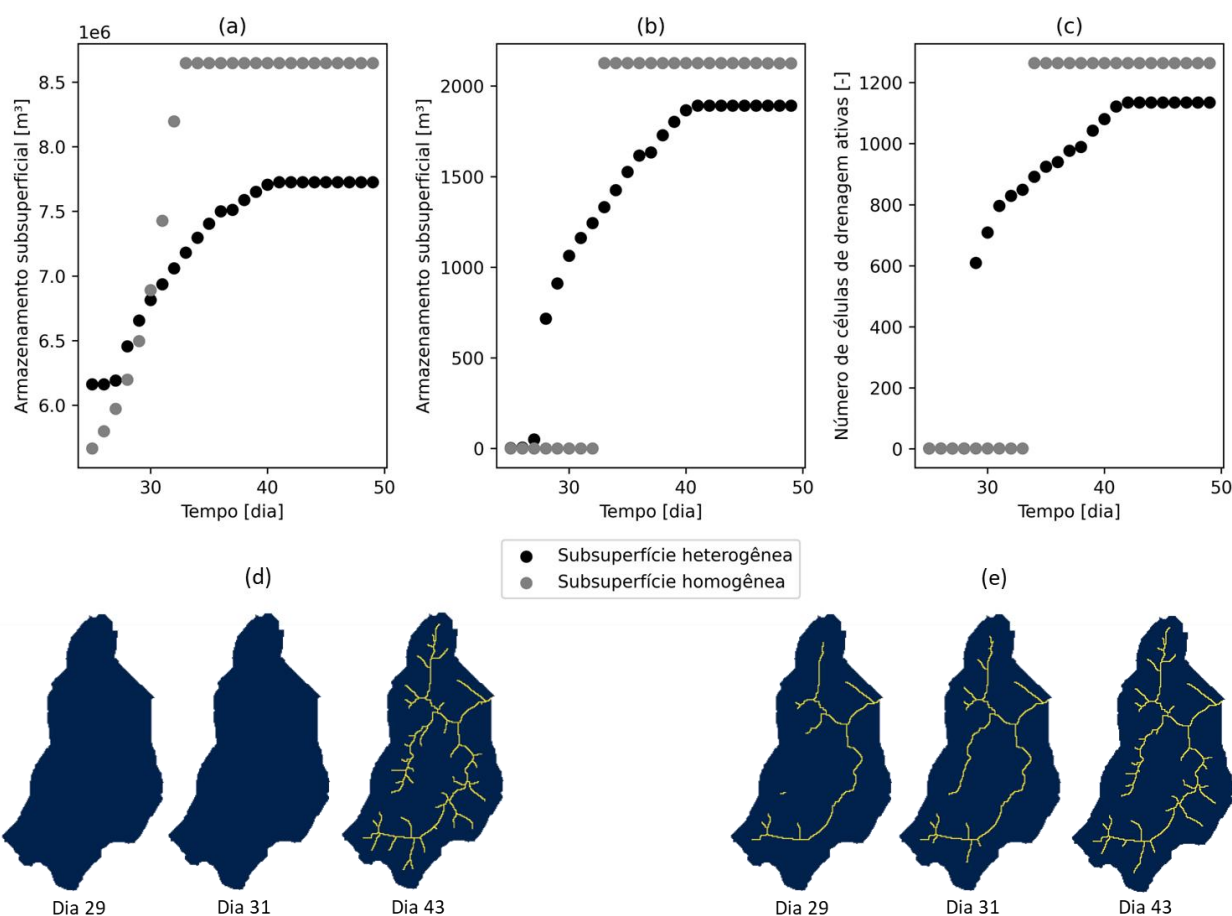
Na Bacia do Ribeirão Grande (RGC), o estado estacionário foi alcançado em 43 dias no Cenário 1 (S1) e em 33 dias no Cenário 2 (S2). Enquanto o S1 é caracterizado por diques de diabásio e granito, o S2 possui uma subsuperfície homogênea. Durante a fase de *spin-up*, o fluxo de água subterrânea e o fluxo de água superficial se estabilizaram simultaneamente no S2. A formação completa da rede de drenagem coincidiu com o dia em que o lençol freático atingiu a superfície, sem flutuações adicionais no armazenamento subsuperficial (Figura 3). Para o S1, a estabilização começou no dia 25 e se estendeu até o dia 43. Embora o armazenamento superficial continuasse aumentando, os cursos d'água se formaram bem antes da estabilização do armazenamento subsuperficial (Figura 3e). No S2, é evidente que tanto o armazenamento superficial quanto a formação da rede de drenagem são diretamente influenciados pelo armazenamento subsuperficial (Figura 3).

Uma vez que o armazenamento subsuperficial atinge sua capacidade, a rede de drenagem se forma e o armazenamento superficial se estabiliza em conformidade. Esse comportamento não é observado em cenários com maior heterogeneidade. Ainda assim, observa-se uma correlação linear entre o armazenamento subsuperficial, o número de células ativas da rede de drenagem e a vazão na saída da bacia (Figura 4a,c). Embora o processo de *spin-up* não reflita diretamente as flutuações da

rede de drenagem devido ao preenchimento contínuo da bacia, a correlação linear observada entre a rede de drenagem e o armazenamento subsuperficial (Figura 4b) é consistente com mapeamentos de campo da rede de drenagem (e.g., Godsey e Kirchner, 2014; Whiting e Godsey, 2016), nos quais a rede de drenagem ativa pode indicar a quantidade de água disponível na bacia, tanto na superfície quanto no subsolo (Figura 4a,b).

A influência da camada geológica na infiltração vertical e no fluxo lateral de água subterrânea contribui significativamente para as diferenças no tempo necessário para alcançar o estado estacionário. Essa influência afeta as redes de drenagem, o armazenamento superficial e a dinâmica das vazões. A heterogeneidade presente na camada geológica do S1 pode também levar à formação de caminhos preferenciais de fluxo, particularmente sensíveis a mudanças significativas nas propriedades do solo. Os diques de diabásio e os solos residuais associados, caracterizados por maior condutividade hidráulica, fizeram com que áreas compostas por granito estabelecessem redes de drenagem mais cedo do que aquelas com diabásio. Esse caminho preferencial, resultante das diferenças na condutividade hidráulica, provocou um atraso na estabilização do estado estacionário. A rede de drenagem formada ao final do *spin-up* é semelhante, mas não idêntica, entre os dois cenários (Figura 3d,e), sendo o número de células de drenagem ativas maior em S2.

Figura 3 – *Spin-up* da Bacia do Ribeirão Grande no ParFlow para diferentes cenários geológicos. (a) Variação do armazenamento subterrâneo ao longo do tempo; (b) Variação do armazenamento superficial ao longo do tempo; (c) Número de células de drenagem ativas ao longo do tempo; (d) Rede de drenagem em diferentes dias na Bacia do Ribeirão Grande parametrizada com geologia homogênea; e (e) Rede de drenagem em diferentes dias na Bacia do Ribeirão Grande parametrizada com geologia heterogênea.



A vazão apresentou pequena variabilidade entre os dois cenários (Figura 5a). De modo geral, a vazão na rede de drenagem foi menor em S1 do que em S2 (Figura 5a), exceto na seção transversal 11 (Tabela 2). Isso ocorre porque condutividades hidráulicas mais elevadas nas camadas superficiais do solo fazem com que a bacia apresente menor vazão em estado estacionário. As diferenças entre as vazões simuladas nos dois cenários foram de 12,77% na saída, 20,75% em P2 e 12,77% em P1 (Figura 5). Os erros em relação aos valores observados no S1 para os pontos P1 e P2 foram da ordem de 50%; para os mesmos pontos no S2, o erro foi da ordem de 75%. O erro em relação ao valor observado na saída foi de -10% em S1 e 3% em S2. As maiores diferenças entre os valores simulados e observados, superiores a 400%, ocorreram nas menores vazões (Figura 5), correspondentes às menores bacias. Embora tenha havido uma tentativa de representar a heterogeneidade subsuperficial, essa representação não foi suficiente para simular corretamente a vazão nas pequenas bacias; contudo, à medida que a bacia se torna maior, a simulação da vazão se torna mais precisa.

Figura 4 – Controles do número de células de drenagem da Bacia do Ribeirão Grande (RGC) no ParFlow para o Cenário 1 durante o *spin-up*. (a) Armazenamento subterrâneo; (b) Armazenamento superficial; e (c) Vazão.

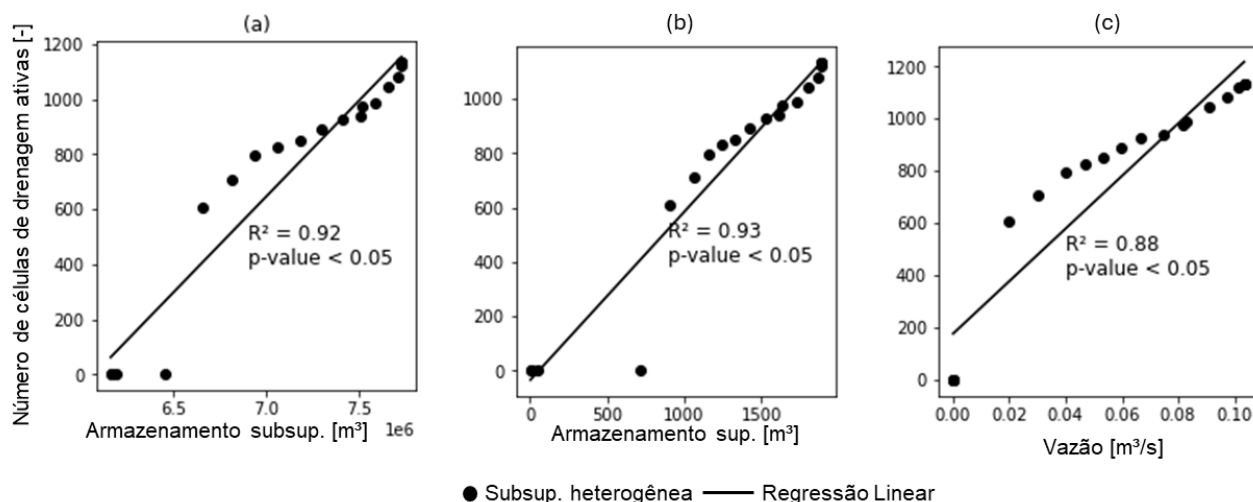
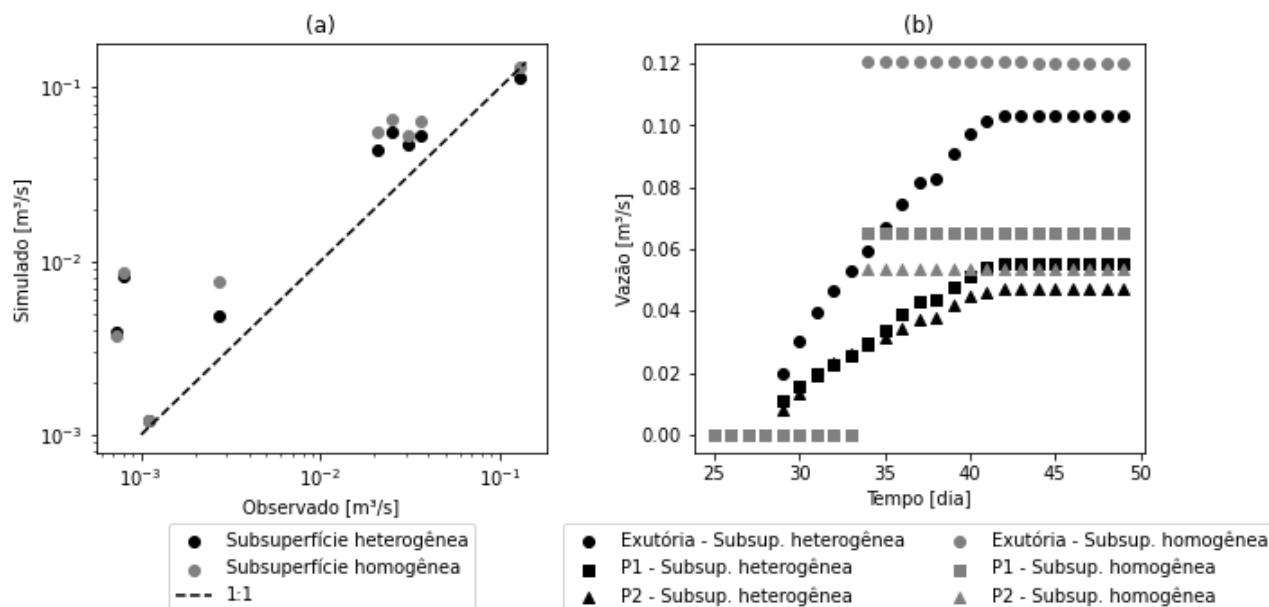


Tabela 2 – Seção transversal monitorada e simulada, onde CS é a seção transversal, number é o número de observações, S1 é o Cenário 1 e S2 é o Cenário 2.

Seção	Número de observações	Observação Média [m³/s]	Simulado S1 [m³/s]	Simulado S2 [m³/s]	Erro S1 [%]	Erro S2 [%]	Diferença entre S1 e S2 [%]
1	1	0,00073	0,00390	0,00370	434,25	406,85	-5,13
2	5	0,02500	0,05500	0,06500	120,00	160,00	18,18
3	2	0,02100	0,04400	0,05500	109,52	161,90	25,00
4	2	0,00270	0,00480	0,00760	77,78	181,48	58,33
5	2	0,00110	0,00081	0,00086	-26,36	-21,82	6,17
6	2	0,00080	0,00120	0,00120	50,00	50,00	0,00
P1	7	0,03100	0,04700	0,05300	51,61	70,97	12,77
P2	4	0,03600	0,05300	0,06400	47,22	77,78	20,75
Exutória	15	0,12800	0,11398	0,13173	-10,96	2,91	15,58

Figura 5 – Vazão durante o *spin-up* da Bacia do Ribeirão Grande (RGC) no ParFlow para diferentes cenários geológicos. (a) Vazão ao longo do tempo; e (b) Vazão observada ao final do *spin-up* versus vazão simulada nos subesgotamentos da RGC durante o escoamento de base.



DISCUSSÃO

O *spin-up* permite que os modelos alcancem uma condição de estado estacionário, na qual os diversos componentes do sistema hidrológico se estabilizam. Além disso, o período de *spin-up* também permite obter insights sobre o comportamento do modelo (Engdahl, 2024). É possível observar a dinâmica da bacia durante o *spin-up*, o que serve como uma oportunidade para comparar os resultados simulados com dados observados, avaliando a precisão das previsões do modelo e identificando áreas onde melhorias podem ser necessárias (Beven, 2012).

Enquanto a execução de quatro meses do ParFlow-CLM no cenário S2 levou três dias inteiros para rodar um ano de *spin-up*, gastar apenas seis horas já forneceu informações que puderam ser comparadas aos dados da bacia durante o escoamento de base. A partir do período de *spin-up*, é possível verificar a distribuição espacial da vazão e da rede de drenagem ativa em toda a bacia. No entanto, geralmente, estudos com modelos validam os dados apenas com base na saída da bacia, o que pode ser um erro. No nosso caso, os erros foram minimizados nas maiores vazões, o que pode dar a impressão de que o modelo representa bem o comportamento da bacia, quando na verdade não representa. Portanto, é essencial que os modelos sejam validados espacialmente durante o *spin-up*, caso o objetivo seja compreender os padrões do processo hidrológico.

No cenário S1, foi possível capturar a formação da drenagem em áreas de granito antes das áreas com diques de diabásio, apesar de estarem localizadas dentro da mesma bacia. Isso sugeriu que a água de escoamento de base proveniente da área de granito era sustentada por maiores volumes de água subterrânea devido à maior permeabilidade do embasamento nas áreas de diabásio. Foi parametrizado que o diabásio apresenta maior permeabilidade do embasamento rochoso do que o granito.

CONCLUSÃO

As principais conclusões, a partir das análises em regime estacionário combinadas com campanhas de medição do escoamento de base, são as seguintes:

(i) Os dados dessas campanhas foram úteis para verificar se, após o *spin-up*, o modelo representa um bom ponto de partida para as simulações. Os resultados destacam a importância da validação espacial, a fim de evitar conclusões enganosas sobre a acurácia do modelo com base apenas na exutória da bacia hidrográfica;

(ii) A representação geoespacial da topografia do embasamento e da superfície pode ser suficiente para melhorar a qualidade das simulações, ao se adotar cenários geológicos heterogêneos em vez de homogêneos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico (CNPq) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), bem como à Fundação Municipal do Meio Ambiente de Florianópolis (FLORAM) pelo apoio em atividades de campo.

REFERÊNCIAS

AMELI, A. A. *et al.* Groundwater subsidy from headwaters to their parent water watershed: A combined Field-Modeling approach. **Water Resources Research**, [s. l.], v. 54, n. 7, p. 5110–5125, 2018.

ASANO, Yuko *et al.* An increase in specific discharge with catchment area implies that bedrock infiltration feeds large rather than small mountain headwater streams. [s. l.], p. 1–19, 2020.

BEVEN, Keith. **Rainfall-Runoff Modelling**. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2012. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1002/9781119951001>.

BURT, T. P.; MCDONNELL, J. J. Whither field hydrology? The need for discovery science and outrageous hydrological hypotheses. **Water Resources Research**, [s. l.], v. 51, n. 8, p. 5919–5928, 2015. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1002/2014WR016839>.

ENGDAHL, Nicholas B. Impacts of Permeability Uncertainty in a Coupled Surface-Subsurface Flow Model Under Perturbed Recharge Scenarios. **Water Resources Research**, [s. l.], v. 60, n. 3, p. e2023WR035975, 2024.

FAN, Y. *et al.* Hillslope Hydrology in Global Change Research and Earth System Modeling. **Water Resources Research**, [s. l.], p. 1–36, 2019.

FANG, Zhufeng *et al.* Scale dependent parameterization of soil hydraulic conductivity in 3D simulation of hydrological processes in a forested headwater catchment. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 536, p. 365–375, 2016.

GLASER, Barbara *et al.* Intra-catchment variability of surface saturation - Insights from physically based simulations in comparison with biweekly thermal infrared image observations. **Hydrology and Earth System Sciences**, [s. l.], v. 24, n. 3, p. 1393–1413, 2020.

GODSEY, S. E.; KIRCHNER, J. W. Dynamic, discontinuous stream networks: Hydrologically driven variations in active drainage density, flowing channels and stream order. **Hydrological Processes**, [s. l.], v. 28, n. 23, p. 5791–5803, 2014.

IWASAKI, Kenta; NAGASAKA, Yu; NAGASAKA, Akiko. Geological Effects on the Scaling Relationships of Groundwater Contributions in Forested Watersheds. **Water Resources Research**, [s. l.], v. 57, n. 7, p. 1–20, 2021.

KARLSEN, R. H. *et al.* The assumption of uniform specific discharge: unsafe at any time?. **Hydrological Processes**, [s. l.], v. 30, n. 21, p. 3978–3988, 2016.

KOLLET, Stefan J.; MAXWELL, Reed M. Capturing the influence of groundwater dynamics on land surface processes using an integrated, distributed watershed model. **Water Resources Research**, [s. l.], v. 44, n. 2, p. 1–18, 2008.

MAXWELL, Reed M *et al.* The imprint of climate and geology on the residence times of groundwater. **Geophysical Research Letters**, [s. l.], v. 43, n. 2, p. 701–708, 2016. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2015GL066916>.

Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico e Sustentável (SDS). **Levantamento Aerofotogramétrico do Estado de Santa Catarina**. Florianópolis: ENGEMAP, 2013.

TAURO, Flavia *et al.* Measurements and observations in the XXI century (MOXXI): Innovation and multi-disciplinarity to sense the hydrological cycle. **Hydrological Sciences Journal**, [s. l.], v. 63, n. 2, p. 169–196, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/02626667.2017.1420191>.

UFSC - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. **Mapa Geológico da Ilha de Santa Catarina**. Florianópolis: [s. n.], 2018. Disponível em: <http://lmo.ufsc.br/mapa-geologico-da-ilha-de-santa-catarina/>. Acesso em: 18 dez. 2018.

WHITING, John A.; GODSEY, Sarah E. Discontinuous headwater stream networks with stable flowheads, Salmon River basin, Idaho. **Hydrological Processes**, [s. l.], v. 30, n. 13, p. 2305–2316, 2016.

WOHL, Ellen *et al.* The hydrology of the humid tropics. **Nature Climate Change**, [s. l.], v. 2, n. 9, p. 655–662, 2012. Disponível em: <http://www.nature.com/doi/10.1038/nclimate1556>.