CONTROLES CLIMÁTICOS E DA VEGETAÇÃO SOBRE O TEMPO DE TRÂNSITO DA ÁGUA NOS BIOMAS BRASILEIROS POR MEIO DE EXPERIMENTOS VIRTUAIS

Camyla Innocente dos Santos [1] & Pedro Luiz Borges Chaffe [2]

Palavras-Chave – ParFlow-EcoSLIM, tempo de trânsito, biomas, experimento virtual

INTRODUÇÃO

Uma métrica que sintetiza todos os fluxos de água dentro da bacia hidrográfica é o tempo de trânsito (TT) da água (Borriero et al., 2023). TT representa o tempo que uma molécula de água leva para percorrer todo o caminho desde o momento em que entra na bacia (como precipitação) até o momento em que sai dela, seja através do escoamento superficial, fluxo subterrâneo ou evapotranspiração. Saber o tempo de trânsito da água pode nos ajudar na prática do País em vários fatores, como: i) Gestão de Recursos Hídricos, onde ajuda a prever quanto tempo a água permanecerá disponível dentro da bacia para consumo humano, agricultura, amortecimento de eventos de seca (Humphrey et al., 2024); ii) Qualidade da Água: pois bacias com longos TT podem interagir mais com o solo e a vegetação, filtrando contaminantes e alterando a composição química (Tetzlaff et al., 2021); e iii) Respostas a Eventos Climáticos: Bacias com TT curtos podem responder rapidamente a chuvas intensas, aumentando o risco de inundações (Peskett et al., 2023).

O TT da água pode ser calculado usando traçadores, no entanto os traçadores são utilizados em pequenas escalas sendo impossível utilizá-los para uma análise continental, em todos os biomas do Brasil. Para ter uma visão do TT pode-se utilizar um modelo numérico que simula o ciclo hidrológico desde a base rochosa até o topo do dossel das plantas, como o ParFlow (Maxwell & Kollet, 2008), acoplado a um modelo de rastreamento de partículas, como o EcoSLIM. O ParFlow-EcoSLIM integra o fluxo tridimensional de águas subterrâneas com o escoamento superficial e os processos das plantas, utilizando equações baseadas em princípios físicos para simular os fluxos de água e energia em sistemas complexos do mundo real (Maxwell & Kollet, 2008).

[1]) Programa de pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina (Brasil), camylainnocente@gmail.com
[2]) Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina (Brasil), pedro.chaffe@ufsc.br

Neste trabalho utilizaremos de uma metodologia de experimentos virtuais em diferentes biomas em modelagem 3D e assim responderemos à pergunta: Como as características de clima e vegetação de cada bioma controla a variabilidade temporal do escoamento e seu TT?

MATERIAIS E MÉTODOS

Modelo de rastreamento de partículas

O modelo ParFlow-EcoSLIM (Maxwell et al., 2019) é um modelo transiente de rastreamento de partículas em uma abordagem Lagrangiana. O modelo utiliza, a cada passo de tempo, informações espacialmente distribuídas fornecidas pelo modelo hidrológico integrado, incluindo pressão, saturação, velocidade do fluxo subterrâneo, fluxos de precipitação e evapotranspiração e estados da superfície terrestre, para inserir, movimentar e remover partículas do domínio. As partículas são adicionadas dinamicamente durante a simulação em resposta a eventos de recarga decorrentes da precipitação. Cada partícula recebe uma posição aleatória na célula, uma idade inicial e uma massa proporcional ao volume de água que representa, permitindo a adequada ponderação de massa nas análises de tempo de residência e de contribuições das águas de origem.

Para avaliar exclusivamente os efeitos do clima e da vegetação sobre a dinâmica hidrológica e os tempos de residência da água, foram realizadas seis simulações representativas dos biomas brasileiros: Amazônia, Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica, Pampa e Pantanal. Em todas as simulações foi adotada uma configuração de encosta sintética idêntica, 10 x 100 células com 10% de inclinação, mantendo inalteradas a geometria do domínio, a discretização espacial e os parâmetros físicos do subsuperficial.

Os dados meteorológicos utilizados foram obtidos a partir de estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2024), selecionadas de modo a representar cada bioma brasileiro, o critério para escolha foi possuir dados contínuos de pelo menos cinco anos consecutivos de observações. As séries meteorológicas foram empregadas como condições de contorno atmosféricas nas simulações, permitindo reproduzir os distintos regimes de precipitação, temperatura, radiação e demanda evaporativa característicos de cada bioma.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A dinâmica da vazão e do tempo de residência da água apresentou variabilidade entre os biomas brasileiros, evidenciando a influência das condições climáticas e da cobertura vegetal (Figura 1). A Caatinga apresentou valores de vazão baixos e pouco variáveis ao longo do ano, acompanhados por tempos de residência mais elevados, em comparação aos outros biomas. Isso indica menor

renovação da água armazenada no sistema, compatível com o regime semiárido caracterizado por precipitações reduzidas e elevada demanda evaporativa. O Cerrado exibiu sazonalidade, com maiores valores de escoamento durante o período chuvoso e uma redução acentuada durante a estação seca. Os tempos de residência também variaram sazonalmente.

Os biomas Pampa, Pantanal e Mata Atlântica apresentaram padrões intermediários. O Pampa mostrou vazão relativamente constante ao longo do ano e tempos de residência com menor amplitude de variação temporal. O Pantanal apresentou menores valores de vazão durante parte do ano e aumento gradual próximo ao final do período analisado, acompanhado por tempos de residência mais elevados, sugerindo maior capacidade de armazenamento. A Mata Atlântica apresentou comportamento semelhante ao do Cerrado.

A Amazônia apresentou o comportamento mais dinâmico entre os biomas analisados. A vazão, em geral, superior ao observado nas demais encostas e apresentou elevada variabilidade temporal, enquanto os tempos de residência permaneceram baixos ao longo do ano. Esse resultado indica uma renovação mais rápida da água no sistema.

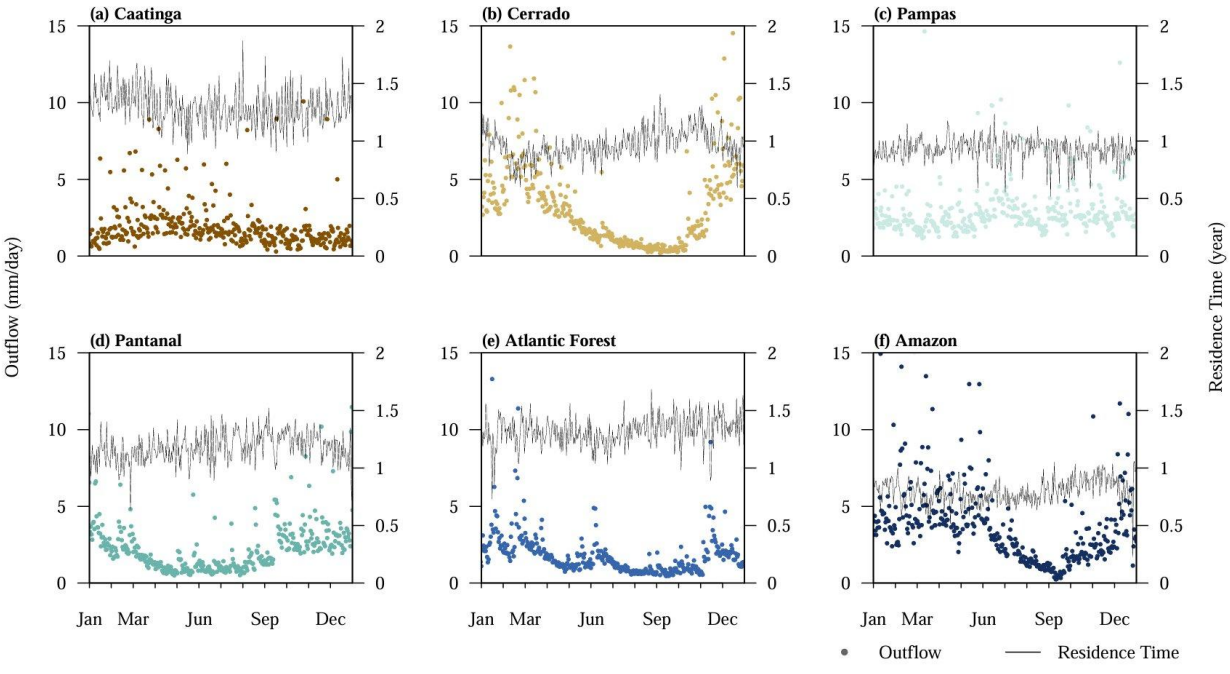


Figure 1 - Variação sazonal do escoamento de saída (outflow, pontos coloridos, eixo esquerdo) e do tempo de residência da água (residence time, linha cinza, eixo direito) ao longo de um ano hidrológico para os seis biomas brasileiros simulados: (a) Caatinga, (b) Cerrado, (c) Pampa, (d) Pantanal, (e) Mata Atlântica e (f) Amazônia.

CONCLUSÕES

De forma geral, os resultados indicam que, mesmo sob uma configuração física idêntica da encosta, os diferentes regimes climáticos e as características da vegetação foram suficientes para

produzir respostas diferentes entre os biomas. Os biomas mais secos, como a Caatinga, apresentaram menores taxas de renovação hídrica e maiores tempos de residência. Em biomas com maior disponibilidade de água, especialmente a Amazônia e a Mata Atlântica, exibiram maior variabilidade temporal dos fluxos e tempos de residência menores, refletindo uma renovação mais rápida da água armazenada.

REFERÊNCIAS

BORRIERO, A.; KUMAR, R.; NGUYEN, T. V.; FLECKENSTEIN, J. H.; LUTZ, S. R. (2023). "Uncertainty in water transit time estimation with StorAge Selection functions and tracer data interpolation". *Hydrology and Earth System Sciences* 27(15), pp. 2989–3004.

HUMPHREY, C. E.; SOLOMON, D. K.; GILMORE, T. E.; MACNAMARA, M. R.; GENEREUX, D. P.; MITTELSTET, A. R.; ZEYREK, C.; ZLOTNIK, V. A.; JENSEN, C. R. (2024). "Spatial Variation in Transit Time Distributions of Groundwater Discharge to a Stream Overlying the Northern High Plains Aquifer, Nebraska, USA". *Water Resources Research* 60(2).

INMET (2024). "Dados histórico anuais". Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos. Acesso em: 06 jul. 2026.

MAXWELL, R. M.; CONDON, L. E.; DANESH-YAZDI, M.; BEARUP, L. A. (2019). "Exploring source water mixing and transient residence time distributions of outflow and evapotranspiration with an integrated hydrologic model and Lagrangian particle tracking approach". *Ecohydrology* 12(1).

MAXWELL, R. M.; KOLLET, S. J. (2008). "Quantifying the effects of three-dimensional subsurface heterogeneity on Hortonian runoff processes using a coupled numerical, stochastic approach". *Advances in Water Resources* 31(5), pp. 807–817.

PESKETT, L. M.; HEAL, K. V.; MACDONALD, A. M.; BLACK, A. R.; MCDONNELL, J. J. (2023). "Land cover influence on catchment scale subsurface water storage investigated by multiple methods: Implications for UK Natural Flood Management". *Journal of Hydrology: Regional Studies* 47, Art. 101398.

TETZLAFF, D.; BUTTLE, J.; CAREY, S. K.; KOHN, M. J.; LAUDON, H.; MCNAMARA, J. P.; SMITH, A.; SPRENGER, M.; SOULSBY, C. (2021). "Stable isotopes of water reveal differences in plant–soil water relationships across northern environments". *Hydrological Processes* 35(1), pp. 1–19.

AGRADECIMENTOS - A primeira autora agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela conceção de bolsa de Bolsa de Pesquisa do Programa Conhecimento Brasil.