

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Centro de Desenvolvimento Tecnológico
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos



Dissertação

**Comportamento temporal do armazenamento de água subterrânea em bacias
hidrográficas de cabeceira**

Victória de Souza Wojahn

Pelotas, 2024

Victória de Souza Wojahn

**Comportamento temporal do armazenamento de água subterrânea em bacias
hidrográficas de cabeceira**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, do Centro de Desenvolvimento Tecnológico, da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos.

Orientador: Carlos Rogério de Mello

Coorientadora: Tamara Leitzke Caldeira Beskow

Pelotas, 2024

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação da Publicação

W837c Wojahn, Victória de Souza

Comportamento temporal do armazenamento de água subterrânea em bacias hidrográficas de cabeceira [recurso eletrônico] / Victória de Souza Wojahn ; Carlos Rogério de Mello, orientador ; Tamara Leitzke Caldeira Beskow, coorientadora. — Pelotas, 2024.

78 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2024.

1. Escoamento base. 2. Armazenamento de água subterrânea. 3. Alterações climáticas. 4. Simulação hidrológica. I. Mello, Carlos Rogério de, orient. II. Beskow, Tamara Leitzke Caldeira, coorient. III. Título.

CDD 627

Victória de Souza Wojahn

Comportamento temporal do armazenamento de água subterrânea em bacias
hidrográficas de cabeceira

Dissertação aprovada, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Recursos Hídricos, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 20/12/2023

Banca Examinadora:

.....
Prof. Dr. Carlos Rogério de Mello (Orientador)
Doutor em Ciência do Solo – Universidade Federal de Lavras

.....
Prof. Dr. Antônio Alves Meira Neto
Doutor em Hidrologia – University of Arizona

.....
Dra. Marcelle Martins Vargas
Doutora em Recursos Hídricos – Universidade Federal de Pelotas

Dedico este trabalho a minha mãe Simone, minha fonte de inspiração diária e a responsável pela pessoa que me tornei.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer aos que me auxiliaram, de alguma forma, a alcançar à conclusão desta etapa tão importante na minha vida acadêmica.

Primeiramente e em especial a minha mãe, Simone, minha base, que sempre me encoraja e me guia em qualquer que seja o caminho, por me proporcionar estudo, apoio e amor. Aos meus irmãos, Milene e Rafael e aos meus dindos Diego e Berenice, por estarem sempre presente me apoiando, incentivando e torcendo por mim.

Ao meu orientador Carlos Rogério de Mello pela orientação, atenção e dedicação voltada ao desenvolvimento desta pesquisa.

À minha coorientadora Tamara Beskow pelo auxílio e atenção voltada a mim e ao meu trabalho, que juntamente aos professores Samuel Beskow e Danielle Bressiani não mediram esforços em me ajudar na minha trajetória, exemplos de pesquisadores e profissionais.

À Marcelle Vargas pelo auxílio no desenvolvimento do segundo capítulo deste trabalho.

Aos meus amigos Leandra, Larissa, Maria Eduarda, Aryane, Laura, Gabriel, Lukas, Retiele, Cyntia e Francine, por me acompanharem e me apoiarem em todo o mestrado e por tantos momentos compartilhados juntos.

Ao Grupo de Pesquisa em Hidrologia e Modelagem Hidrológica, aos colegas integrantes pelos momentos compartilhados de apoio e incentivo durante esta jornada.

Aos demais professores e colegas do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, pelo conhecimento e convivência nesses anos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pelo suporte através da concessão da bolsa de pesquisa.

À Universidade Federal de Pelotas e ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, pela infraestrutura, recursos oferecidos e a oportunidade de realização deste Curso.

E a todos que me incentivaram e torceram por mim.

Meu muito obrigada.

Resumo

WOJAHN, Victória de Souza. **Comportamento temporal do armazenamento de água subterrânea em bacias hidrográficas de cabeceira**. Orientador: Carlos Rogério de Mello. 2023. 76f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2023.

Compreender como as alterações climáticas estão influenciando nos processos hidrológicos em diferentes regiões é de grande importância para mensurar a disponibilidade de água e subsidiar a gestão dos recursos hídricos. Os objetivos deste estudo foram: i) avaliar o comportamento temporal do armazenamento de água subterrânea de quatro bacias hidrográficas de cabeceira, situadas em regiões contrastantes do Brasil (Rio Aiuruoca – Serra da Mantiqueira, MG; Rio Bonito – sul da Bahia; Rio Pelotinhas – Planalto Catarinense, SC; e Arroio Fragata – sul do Rio Grande do Sul); ii) avaliar o comportamento das variáveis hidroclimatológicas desses locais ao longo dos anos; e iii) avaliar os impactos das mudanças climáticas no armazenamento subterrâneo com base na simulação hidrológica da região de cabeceira da bacia hidrográfica do Rio Aiuruoca (BHRA). Os resultados apontam que variações climáticas estão afetando as condições hidrológicas e climáticas de forma distinta nas diferentes regiões, com tendência de redução no armazenamento de água subterrânea nas bacias hidrográficas dos Rios Aiuruoca e Rio Bonito, e de aumento no Rio Pelotinhas, enquanto a do Arroio Fragata não apresentou tendência significativa. A precipitação, dentre as 3 variáveis testadas (precipitação, evapotranspiração e temperatura) foi a variável climática que apresentou maior correlação com o armazenamento de água subterrânea nessas bacias hidrográficas, indicando que alterações nos padrões pluviométricos afetam diretamente a recarga e disponibilidade de água nos aquíferos. A modelagem hidrológica a partir do modelo *Lavras Simulation of Hydrology* (LASH), introduzido em linguagem de programação R (F-LASH), apresentou bons resultados nos processos de calibração e validação, evidenciando ser um modelo robusto para representar as condições hidrológicas na região sul de Minas Gerais. A partir da simulação hidrológica com dados projetados de clima futuro, foram observados longos períodos de seca e chuva abaixo da média, principalmente para o final do século XXI, o que influencia diretamente na redução de escoamentos na BHRA e, conseqüentemente, no armazenamento de água subterrânea. Esses resultados demonstram que, em algumas regiões do Brasil, o armazenamento de água subterrânea está diminuindo, impactando diretamente no desenvolvimento socioeconômico, sugerindo a necessidade de ações que possam reduzir o impacto das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos.

Palavras-chave: Escoamento base. Armazenamento de água subterrânea. Alterações climáticas. Simulação hidrológica.

Abstract

WOJAHN, Victória de Souza. **Groundwater storage trends in headwater river basin**. Advisor: Carlos Rogério de Mello. 2023. 76f. Dissertation (Master degree in Water Resources) - Technological Development Center, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2023.

Understanding how climate change is influencing hydrological processes in different regions is of great importance for measuring water availability and supporting the management of water resources. The objectives of this study were i) to evaluate the temporal behavior of groundwater storage in four headwater river basins located in contrasting regions of Brazil (Rio Aiuruoca – Serra da Mantiqueira, MG; Rio Bonito – southern Bahia; Rio Pelotinhas – Planalto Catarinense, SC; and Arroio Fragata – south of Rio Grande do Sul); ii) evaluate the behavior of hydro climatological variables in these locations over the years and iii) evaluate the impacts of climate change on groundwater storage based on hydrological simulation in the headwater region of the Aiuruoca River basin. The results indicate that climatic variations are affecting hydrological and climatic conditions differently in different regions, with a tendency to reduce groundwater storage in the river basins of the Aiuruoca and Rio Bonito Rivers and an increase in the Rio Pelotinhas. At the same time, the Arroio Fragata did not show a significant trend. Precipitation, among the 3 variables tested (precipitation, evapotranspiration and temperature), was the climate variable that showed the highest correlation with groundwater storage in these river basins, indicating that changes in rainfall patterns directly affect water recharge and availability in aquifers. The hydrological modeling carried out using the LASH model introduced in the R programming language (F-LASH) presented good results in the calibration and validation processes, proving to be a robust model to represent the hydrological conditions in the southern Minas Gerais. From the hydrological simulation with projected future climate data, long periods of drought and below-average rainfall were observed, mainly towards the end of the 21st century, which reduces the runoff in the BHRA and, consequently, the groundwater storage. These results demonstrate that groundwater storage in some regions of Brazil is decreasing, directly impacting socioeconomic development, suggesting the need for actions that can reduce the impact of climate change on water resources.

Keywords: Baseflow. Groundwater storage. Climate change. Hydrological simulation.

Lista de Figuras

Figura 1	Mapa com a localização geográfica e altitude das bacias hidrográficas: (a) Arroio Fragata, RS, (b) Rio Pelotinhas, SC, (c) Rio Aiuruoca, MG, e (d) Rio Bonito, BA.....	13
Figura 2	Mapas de uso e ocupação e tipos de solos das bacias hidrográficas (a) Arroio Fragata, (b) Rio Pelotinhas, (c) Rio Aiuruoca e (d) Rio Bonito.....	15
Figura 3	Resultado do teste de Mann-Kendall para as variáveis climáticas (precipitação anual e sazonal, e temperatura média anual.....	21
Figura 4	Resultado do teste de Mann-Kendall para as variáveis hidrológicas.....	23
Figura 5	Relação entre $\log(-dy/dt)$ e $\log(y)$ para (a) Bacia hidrográfica do Arroio Fragata, (b) Rio Pelotinhas, (c) Rio Aiuruoca e (d) Rio Bonito.....	25
Figura 6	Teste de tendência temporal aplicado ao armazenamento de água subterrânea para os dois períodos temporais analisados.....	27
Figura 7	Matriz de correlação das variáveis hidroclimatológicas e o armazenamento nas bacias hidrográficas (a) Arroio Fragata, (b) Rio Pelotinhas, (c) Rio Aiuruoca e (d) Rio Bonito.....	30
Figura 8	Localização da BHRA e das estações de pluviométricas e climatológica	37
Figura 9	Mapas de altitude, uso e ocupação do solo e tipo de solo para as 21 subbacias.....	38
Figura 10	Hietograma e hidrogramas diários dos dados observados e estimados para o período de calibração e validação.....	45
Figura 11	Vazões máximas, médias e mínimas anuais observada versus estimada pelo modelo F-LASH.....	46
Figura 12	Comportamento da Q7 observada versus estimada pelo modelo F-LASH.....	47
Figura 13	Armazenamento anual de água subterrânea na BHRA-EA projetado pela média dos modelos para o cenário futuro RCP8.5.....	49
Figura 14	Projeção da precipitação total anual (PTA) e do armazenamento de água subterrânea (S) ao longo do século.....	50

Lista de Tabelas

Tabela 1	Informações topográficas, climáticas, hidrológicas e hidrogeológicas das bacias hidrográficas.....	13
Tabela 2	Porcentagem dos usos e ocupações do solo nas bacias hidrográficas.....	15
Tabela 3	Valores de referência para parâmetros de uso e cobertura do solo obtidos da literatura para cada classe encontrada na BHRA-AE....	39
Tabela 4	Valores de referência para parâmetros de solo obtidos da literatura para cada classe encontrada na BHRA-AE.....	39
Tabela 5	Classificação da performance do modelo com base em intervalos de valores para as medidas estatísticas adotadas.....	41
Tabela 6	Calibração dos parâmetros do modelo F-LASH.....	43

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Objetivo Geral	2
1.2	Objetivos Específicos	2
1.3	Hipóteses	3
2	Revisão de Literatura	4
2.1	Gestão de bacias hidrográficas.....	4
2.2	Água subterrânea.....	4
2.3	Armazenamento de água subterrânea.....	5
2.4	Métodos para quantificar o armazenamento de água subterrânea.....	6
2.4.1	Impactos das mudanças climáticas projetados sobre o armazenamento subterrâneo.....	7
Capítulo 1 - Comportamento temporal do armazenamento de água subterrânea em bacias hidrográficas de cabeceira em diferentes biomas e climas do Brasil.....		
1	Introdução	9
2	Material e métodos.....	12
2.1	Bacias hidrográficas e base de dados.....	12
2.2	Análise de tendências.....	17
2.3	Separação do fluxo de base.....	18
2.4	Estimativa do armazenamento de água subterrânea.....	19
3	Resultados e discussão	20
3.1	Comportamento temporal das variáveis climáticas.....	20
3.2	Comportamento temporal das variáveis hidrológicas.....	23
3.3	Característica temporal do processo de drenagem.....	25
3.4	Comportamento do armazenamento de água subterrânea.....	26
4	Conclusões	32
Capítulo 2 - Impactos de mudanças climáticas no armazenamento subterrâneo com base em simulação hidrológica.....		
1	Introdução	35
2	Metodologia	37

2.1	Área de estudo	37
2.2	Base de dados temporais e espaciais.....	38
2.3	Calibração e validação do modelo hidrológico LASH.....	40
2.4	Simulação hidrológica com base em projeções do clima futuro.....	42
3	Resultados e Discussão	43
3.1	Calibração e validação do modelo LASH.....	43
3.2	Simulação hidrológica e projeção do cenário futuro do armazenamento de água subterrânea.....	48
4	Conclusões	52
3	Considerações finais	53
	Referências	54

1 Introdução

A água subterrânea é um recurso natural indispensável para a manutenção da vida e tem sido um tema de grande interesse, não só do ponto de vista ambiental, mas também social e econômico (CORDEIRO et al., 2021), considerando que em muitas regiões do mundo este recurso é a única fonte de água potável (CARRARD et al., 2020). Sua disponibilidade está começando a ser afetada pelas mudanças climáticas (PEREIRA et al., 2022), que estão ocorrendo de forma mais rápida devido, em parte, ao aumento das atividades humanas. Há necessidade de uma avaliação dos impactos das alterações climáticas nos recursos hídricos em escala regional e de bacia, para desse modo, tentar auxiliar na formulação de estratégias de adaptação afim de mitigar seus efeitos sobre os recursos hídricos superficiais e subterrâneos (SHUKLA et al., 2021).

Muitos estudos têm sido conduzidos sobre os impactos de um clima mais quente e menos chuvoso nos processos hidrológicos em bacias hidrográficas, contudo, a maioria tem focado em vazões médias. No entanto, este indicador é limitado no contexto de impactos do clima sobre a variabilidade e o comportamento temporal das vazões e da produção de água. Estudos como os de Knox (2000) e Kormos et al. (2016) demonstraram que impactos sobre o escoamento oriundos de variabilidade climática são mais confiáveis e efetivos quando os estudos são baseados em indicadores hidrológicos com menor frequência de ocorrência. Neste caso, vazões associadas ao escoamento subterrâneo são as mais indicadas uma vez que carregam uma memória de longo termo da variabilidade do clima sobre o armazenamento de água subterrânea, sendo as mais indicadas para detectar tanto a variabilidade quanto sinais de tendência em escala temporal de décadas.

As zonas de recarga, localizadas em regiões de cabeceira de bacias hidrográficas, são importantes para abastecer e manter o fluxo de água subterrânea nos aquíferos, portanto, identificar os padrões de recarga, bem como os fatores que influenciam no armazenamento de água desses locais auxiliam na melhor compreensão do ciclo hidrológico como um todo (FOSTER et al., 2013). O conhecimento de variações no armazenamento de água subterrânea é de grande relevância para o uso sustentável dos recursos hídricos, além de auxiliar na prevenção

de problemas sociais e econômicos que podem ser causados pela redução das águas nos aquíferos (YIN et al., 2021).

O Brasil apresenta uma disponibilidade hídrica privilegiada, pois possui mais da metade da água disponível na América do Sul e cerca de 13,8% do total mundial, porém enfrenta problemas com distribuição errática desse recurso (COSTA; CIRILO, 2011). A água subterrânea se tornou uma fonte indispensável para os mais diversos usos como abastecimento público e agropecuária, abastecendo aproximadamente 52% dos municípios brasileiros (ANA, 2010; HIRATA et al., 2019; PEREIRA et al., 2022). Diante disto, compreender a dinâmica do armazenamento subterrâneo é essencial para prever a disponibilidade de água nos próximos anos, e avaliar como as alterações climáticas estão impactando a recarga dos aquíferos é de grande importância para a adequada gestão dos recursos hídricos no país.

1.1 Objetivo Geral

Analisar o comportamento temporal do armazenamento de água subterrânea em bacias hidrográficas de cabeceira nas últimas décadas em diferentes biomas brasileiros, bem como simular o escoamento base em cenário futuro de mudanças climáticas.

1.2 Objetivos Específicos

- I. Avaliar a existência de tendências nas séries hidrológicas das bacias hidrográficas do Arroio Fragata, no estado do Rio Grande do Sul, do Rio Aiuruoca, no estado de Minas Gerais, do Rio Pelotinhas, no estado de Santa Catarina, e do Rio Bonito, no estado da Bahia;
- II. Identificar o comportamento do armazenamento de água subterrânea nas bacias hidrográficas supracitadas;
- III. Avaliar se as bacias hidrográficas têm sido impactadas pelas alterações climáticas no tocante ao armazenamento de água subterrânea e vazões dos rios;
- IV. Simular o comportamento do escoamento base na região de cabeceira da bacia hidrográfica do Rio Aiuruoca, influenciadas pelas mudanças climáticas

projetadas por modelos de circulação global e cenário de mudanças projetados pelo International Panel on Climate Change (IPCC), e avaliar os impactos climáticos projetados sobre o armazenamento subterrâneo.

1.3 Hipóteses

- I. O armazenamento de água subterrânea vem sendo impactado pelas mudanças climáticas;
- II. As alterações de aumento ou diminuição do armazenamento de água subterrânea ocorrem de forma distinta entre as bacias hidrográficas analisadas como fruto dos diferentes impactos de mudanças climáticas.

2 Revisão de Literatura

2.1 Gestão de bacias hidrográficas

De acordo com Tucci (1997), uma bacia hidrográfica é considerada uma área de captação natural da água de precipitação gerando escoamento para um único ponto de saída. Estudos que são realizados em suas delimitações permitem observar em detalhes a variação dos diferentes processos que ocorrem em seu interior, e que, com base no registro das variáveis hidrológicas envolvidas, é possível compreender melhor os fenômenos. Por isso, é importante avaliar os processos hidrológicos que ocorrem em escala de bacia hidrográfica para o melhor planejamento e gestão dos recursos hídricos (RODRIGUES et al., 2019).

De acordo com Wang et al., (2016), um dos princípios básicos da gestão de bacias hidrográficas é a compreensão das inter-relações entre solo e água, além do comportamento dos recursos hídricos em áreas a montante e jusante. O autor afirma que mudanças físicas podem resultar em uma variedade de eventos de curto prazo como inundações e deslizamentos, e de longo prazo, como a degradação do solo e o esgotamento de água.

Nyssen et al. (2010) avaliaram que uma boa gestão da bacia hidrográfica pode reduzir os impactos do escoamento superficial direto e aumentar a taxa de infiltração, auxiliando no processo de recarga dos aquíferos. A gestão eficiente dos aquíferos subterrâneos é fortemente influenciada pela estimativa precisa da recarga, que atua diretamente no armazenamento de água subterrânea (DHUNGEL e FIELDER, 2016). O planejamento inadequado e a falta de monitoramento das águas subterrâneas pode resultar no esgotamento do lençol freático, fenômeno ao qual bacias hidrográficas, principalmente as localizadas nas regiões semiáridas, estão mais vulneráveis, criando um desafio a sustentabilidade (BHANGAONKAR e FENNELL, 2021).

2.2 Água subterrânea

Cerca de 97% da água presente no mundo está nos oceanos e apenas 3% em terra, sendo que esse valor se subdivide em 0,01% em corpos hídricos superficiais, como rios e lagos, 0,61% em água subterrânea, enquanto o restante (2,38%), estão

armazenadas nas geleiras e no solo (HARTER, 2001). Águas subterrâneas são aquelas encontradas abaixo da superfície do solo, preenchendo completamente os poros das rochas e sedimentos, assim constituindo os aquíferos. Desempenha um papel fundamental nos processos hidrológicos, pois auxilia na manutenção da umidade do solo e do fluxo de rios e lagos. São consideradas importantes para a segurança hídrica global, tendo em vista que representam cerca de 97% das águas doces e líquidas do planeta, o que torna os aquíferos os maiores reservatórios de água potável do mundo (BORGHETTI et al., 2004; HIRATA et al., 2019).

A disponibilidade e fácil acesso a água subterrânea Auxiliam no processo de rápida expansão urbana, industrial e agrícola, particularmente em zonas semiáridas, onde esse recurso hídricos é crucial para o desenvolvimento econômico (VRIES e SIMMERS, 2002). Dentre as inúmeras vantagens desse recurso, uma das mais relevantes é que é uma fonte segura de água em períodos de estiagem, quando as águas superficiais ficam escassas devido a sua grande capacidade de armazenamento (CONICELLI, 2014).

2.3. Armazenamento de água subterrânea

O armazenamento de água subterrânea é controlado pelo balanço entre a recarga do aquífero, proveniente da água armazenada no solo gerada pela precipitação ou pelo escoamento de rios, e a descarga, caracterizada como a perda de água para corpos hídricos de superfície (FREEZE; CHERRY, 1979).

Diversos fatores podem influenciar o armazenamento de água subterrânea, mas em particular, a precipitação pode modificar os padrões de recarga dos aquíferos, impactando na dinâmica do armazenamento de água subterrânea. Monitorar as mudanças em seu armazenamento, especialmente a longo prazo, é de grande relevância para o desenvolvimento social e econômico, e pode auxiliar na compreensão sobre o impacto das mudanças climáticas na hidrologia regional (LIU et al., 2021).

Informações sobre a capacidade de armazenamento e recarga dos aquíferos são essenciais para o entendimento, proteção e otimização dos recursos hídricos (SOARES, 2010), porém, apesar da importância para a população, a água subterrânea é pouco monitorada em todo o mundo, dificultado o processo de

quantificar as mudanças em seu armazenamento (CHEN et al., 2015; FAMIGLIETTI et al., 2011).

2.5 Métodos para quantificar o armazenamento de água subterrânea

Alguns métodos são utilizados para quantificar o armazenamento de água subterrânea em uma bacia hidrográfica. O primeiro consiste de poços de observação do lençol freático (SAFDARI et al., 2022), que embora seja o mais adequado e apresente dados de confiança, tais poços são insuficientes para cobrir espacialmente uma bacia hidrográfica, suas leituras não remontam a décadas e possuem um custo muito elevado para monitoramento.

Outro procedimento consiste do uso de imagens de satélite, especificamente o “*Gravity Recovery and Climate Experience*” ou GRACE. Estes produtos de sensores remotos são muito úteis à hidrologia, especialmente para estimar as mudanças no armazenamento de água subterrânea (XIE et al., 2018). Contudo, seus dados se referem a períodos mais recentes, não detectando a variabilidade ao longo de um período mínimo de análise (usualmente > 30 anos) e também numa escala muito grosseira para estudos em bacias de cabeceira uma vez que apresentam produtos cobrindo áreas superiores a 150.000 km² (McCABE et al., 2017).

Uma outra opção são os modelos hidrológicos, no entanto o maior problema destes modelos são as incertezas nos processos de calibração, uma vez que a maioria não é capaz de promover uma calibração consistente do ponto vista físico para as bacias, especialmente as tropicais. O modelo hidrológico *Lavras Simulation of Hydrology* (LASH) tem sido usado com excelentes resultados nas diferentes regiões do Brasil (MELLO et al., 2008; BESKOW et al., 2013; CALDEIRA et al., 2019; ANDRADE et al., 2020).

A quarta possibilidade consiste do uso de dados de vazões diárias, contudo, construindo séries históricas de vazões mínimas em 7 dias consecutivos (Q_{min,7}). De acordo com Brutsaert (2008) e Brutsaert (2012), vazões mínimas anuais em 7 dias consecutivos são capazes de demonstrar as tendências no armazenamento subterrâneo da bacia no longo prazo, especialmente em bacias com mínima antropização. Isso significa que tais vazões são indicadores indiretos, mas confiáveis

dos sinais de alteração no comportamento temporal da produção de água nas bacias hidrográficas.

A vazão $Q_{min,7}$ tem sido aplicada para detectar impactos de alterações no clima sobre os processos hidrológicos, especialmente o armazenamento subterrâneo de longo termo, mostrando um significativo sucesso em várias regiões do planeta. Destacam-se estudos nos Estados Unidos (CAO et al., 2019), Austrália (ZHANG et al., 2014), Taiwan (LIN; YEH, 2017), Japão (MICHIAKI; BRUTSAERT, 2009), e Sibéria (TAKAHASHI et al., 2012).

2.6 Impactos das mudanças climáticas projetadas sobre o armazenamento subterrâneo

Estimar os possíveis impactos das alterações climáticas nos recursos hídricos é um desafio enfrentado pelos gestores de água. Devido ao grande interesse em tais projeções, vários estudos foram publicados recentemente sobre o tema, porém a grande maioria se concentra em águas superficiais, e geralmente simplifica a participação das águas subterrâneas no ciclo hidrológico, embora esse recurso seja a principal fonte de abastecimento de água em muitas partes do mundo (GODERNIAUX et al., 2009).

Para a avaliação do impacto hidrológico oriundos de alterações climáticas, os modelos hidrológicos são ferramentas essenciais que auxiliam a compreender as mudanças no escoamento em escala de bacia hidrográfica (NAJAFI et al., 2011). Neste contexto, Viola (2011) ressalta que a simulação hidrológica representa uma importante ferramenta no que se refere à gestão de recursos hídricos, especialmente para a determinação de vazões de outorga e avaliação dos impactos nos recursos hídricos de uma bacia hidrográfica frente às diferentes pressões, tais como alterações no uso do solo e mudanças climáticas. Inúmeros são os estudos que buscam avaliar, via modelagem hidrológica, o impacto das mudanças climáticas sobre diversos indicadores hidrológicos em bacias hidrográficas, dentre eles, pode-se mencionar Caldeira (2019), Mello et al. (2021), Melo et al. (2022) e Carvalho et al. (2022).

Mello et al. (2021) avaliaram os impactos das alterações climáticas na Bacia hidrográfica do Rio Grande a montante da Usina hidrelétrica de Furnas, afim de

investigar se alterações no clima estão impactando na geração de escoamento do reservatório. A partir da simulação hidrológica para cenário de clima futuro, os autores identificaram redução de precipitação no período chuvoso, impactando diretamente da redução do escoamento superficial e aumentando os anos consecutivos de seca na região, impactando negativamente nos âmbitos sociais, econômicos e ambientais da região.

Melo et al. (2022) quantificaram os impactos hidrológicos causados pelas mudanças climáticas e antrópicas em nove bacias da região da Bacia Hidrográfica do Alto Rio Grande (BHARG) e avaliaram potenciais impactos futuros sobre o escoamento com base em projeções de modelos climáticos. Os autores identificaram uma forte influência das mudanças climáticas e dos usos do solo no regime hidrológico, também indicando redução no escoamento médio da bacia hidrográfica e um clima mais seco na região sul do estado de Minas Gerais.

Carvalho et al. (2022) avaliaram o impacto das mudanças climáticas na bacia hidrográfica do Rio Verde, também situada em Minas Gerais. Os autores constataram uma redução significativa de precipitação para a região, especialmente para o final do século XXI, indicando alta vulnerabilidade da região em relação aos usos da água no futuro, impactando negativamente a disponibilidade de água, a produção agrícola e pecuária e no potencial de geração hidrelétrica.

Capítulo 1 - Comportamento temporal do armazenamento de água subterrânea em bacias hidrográficas de cabeceira em diferentes biomas e climas do Brasil

1 Introdução

A disponibilidade hídrica está associada às alterações climáticas globais, pois estas podem afetar seu padrão e distribuição. Nas últimas décadas, estudos foram realizados a fim de compreender o impacto das mudanças climáticas nos fatores relacionados aos recursos hídricos, porém um grande desafio é avaliar essa influência no comportamento do armazenamento de aquíferos, devido a dificuldade de se obter dados em escala espacial e temporal compatíveis (CORDEIRO et al., 2021; GREEN et al., 2011).

Águas subterrâneas provenientes de aquíferos não confinados sustentam o escoamento em períodos de seca (SMAKHTHIN, 2001) e são de extrema relevância para o desenvolvimento social, pois abastecem praticamente um terço da população mundial (RAHMATI et al., 2018), e econômico, considerando sua importância para atividades relacionadas à agricultura como irrigação e abastecimento público (SIEBERT et al. 2010). A recarga de água subterrânea é controlada, em parte, pelos processos de precipitação e evaporação, portanto, alterações no clima podem influenciar significativamente sua dinâmica, tanto em termos de qualidade quanto de quantidade (SOWERS et al., 2011; ATAWNEH et al., 2021). Pesquisas comprovam que o aumento de temperatura e mudança nos padrões de precipitação afetam significativamente a acessibilidade e recarga de águas subterrâneas (SALEM et al., 2018; REGOTO et al., 2021). Diante disto, se torna cada vez mais necessário compreender os processos hidrológicos e sua relação com o clima, visando sua gestão adequada para assegurar a disponibilidade hídrica (SHAHID et al., 2017).

Diferentes metodologias podem ser empregadas para avaliar o comportamento da recarga e do armazenamento de águas subterrâneas, tais como poços de observação (SAFDARI et al., 2022) e uso de sensores remotos, e.g. GRACE (HUO et al., 2016; NAZARI et al., 2022). Porém, essas metodologias apresentam limitações ao representar temporalmente o armazenamento da água subterrânea, sendo que poços de observação podem não ser representativos quantitativamente em uma bacia hidrográfica (LIN e YEH, 2017), enquanto satélites disponibilizam informações somente a partir de abril de 2002 e para uma escala espacial muito alta, portanto, referem-se a dados mais recentes de observações da dinâmica temporal e não representam adequadamente o armazenamento de água em bacias de menor porte

(NAZARI et al., 2022). Assim, Brutsaert (2008) propôs um método para estimar o armazenamento de água subterrânea em escala de bacia hidrográfica, utilizando dados diários de vazão (LIU et al., 2021), que vem sendo aplicado em diversos locais do mundo, tais como China (GAO et al., 2015; LIN et al., 2020; YI et al., 2021), Austrália (ZHANG et al., 2014) e Taiwan (LIN e YEH, 2017).

Gao et al. (2017) avaliaram as mudanças no armazenamento de água subterrânea em bacias hidrográficas situadas no Loess Plateau da China. Eles observaram que a maioria das bacias analisadas apresentaram tendência de redução no armazenamento, corroborando com outras pesquisas que apontam que mudanças nos padrões climatológicos estão causando a diminuição de precipitação e consequentemente de vazão nos cursos d'água da região. Zhang et al. (2014) aplicaram essa metodologia a bacias hidrográficas na Austrália e observaram que a grande maioria apresentou tendência de redução do armazenamento de água subterrânea. Além disso, foi avaliado que esse armazenamento apresentou variações em diferentes períodos analisados, indicando que a variabilidade climática de curto prazo pode afetar significativamente o comportamento temporal do armazenamento de água subterrânea. Lin e Yeh (2017) identificaram que as tendências no armazenamento de água subterrânea variaram de acordo com as regiões de Taiwan, sendo de aumento no armazenamento a noroeste do país e de redução no nordeste, indicando ainda que outros fatores podem influenciar essa dinâmica.

É importante destacar que para aplicação do método de Brutsaert (2008), que tem como objetivo detectar os impactos hidrológicos oriundos essencialmente da variabilidade climática, se faz necessário que a bacia hidrográfica apresente baixa interferência antrópica, i.e., se aproxime da condição de *Pristine Catchments* (POTYONDY e GEIER, 2011). Bacias hidrográficas de cabeceira, caracterizadas por possuir as principais nascentes dos cursos d'água e apresentarem a principal área de recarga da bacia, são ambientalmente mais sensíveis a alterações em sua paisagem (KRECEK e HAIGH, 2000), normalmente protegidas pela legislação ambiental no Brasil (TAMBOSI et al., 2015). Assim, esta metodologia deve ser aplicada em locais com mínima antropização, pois atividades relacionadas aos usos do solo e usuários de água podem interferir nos resultados da análise, não permitindo conclusões efetivas sobre os impactos do clima no comportamento da bacia hidrográfica.

De acordo com Shahid et al. (2017), os impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos subterrâneos irão variar entre as diversas regiões do planeta, tendo em vista as diferentes condições climáticas de cada uma. O Brasil apresenta uma grande variabilidade nessas condições, desde zonas de clima tropical/equatorial na região norte até clima subtropical no sul, passando pelas zonas de clima semiárido no Nordeste (ALVARES et al., 2013). Diante disto, o objetivo deste estudo é avaliar o comportamento temporal do armazenamento de água subterrânea em quatro bacias hidrográficas de cabeceira situadas em diferentes regiões no Brasil, utilizando o método proposto por Brutsaert (2008). Além disso, avaliar a existência de tendência temporal nos dados de vazão, precipitação, evapotranspiração e temperatura dessas bacias, com o intuito de analisar se as mudanças climáticas estão afetando os indicadores hidroclimatológicos nas diferentes regiões.

2 Material e métodos

2.1 Bacias hidrográficas e base de dados

Para este estudo foram analisadas quatro bacias hidrográficas de cabeceira em diferentes regiões do país (Figura 1): i) a bacia hidrográfica do arroio Fragata, delimitada a montante da estação Passo dos Carros (BHAF); ii) a bacia hidrográfica do rio Pelotinhas, delimitada a montante da estação Coxilha Rica (BHRP); iii) a bacia hidrográfica do rio Aiuruoca, delimitada a partir da estação Aiuruoca (BHRA); e iv) a bacia hidrográfica do rio Bonito, delimitada a partir da estação Rio Bonito (BHRB). As principais características fisiográficas destas quatro bacias hidrográficas estão apresentadas na Tabela 1.

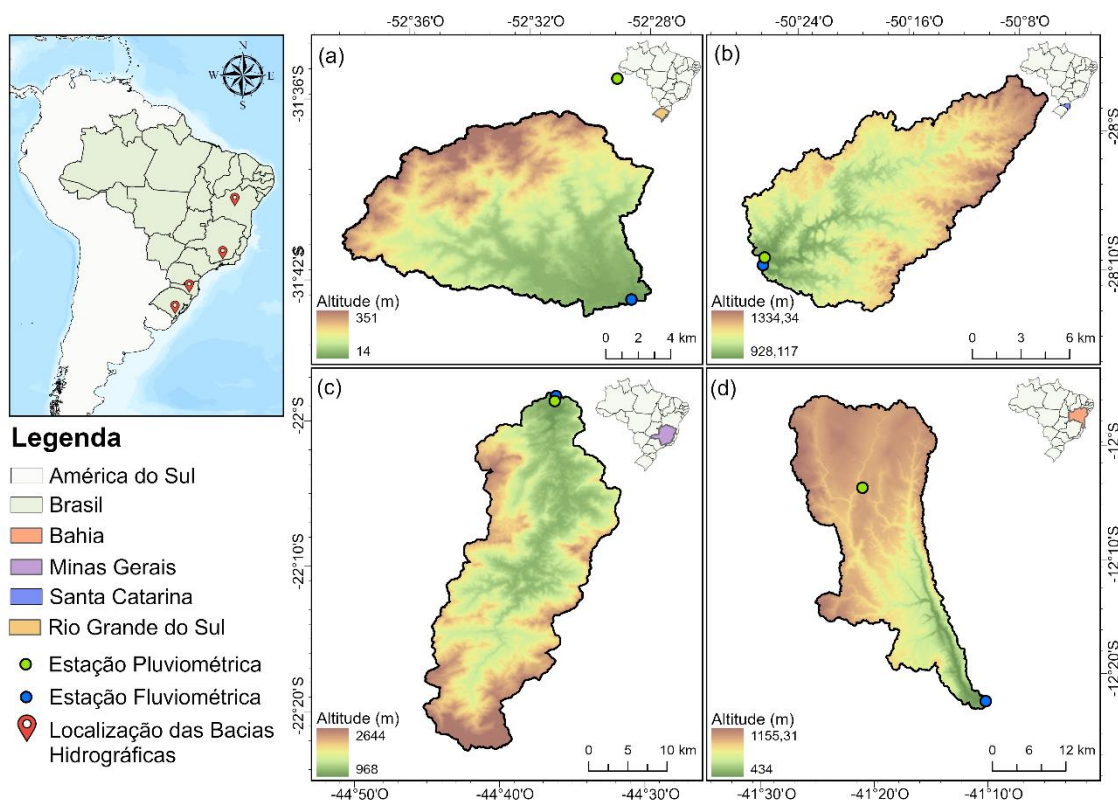


Figura 1 – Mapa com a localização geográfica e altitude das bacias hidrográficas: (a) Arroio Fragata, RS, (b) Rio Pelotinhas, SC, (c) Rio Aiuruoca, MG, e (d) Rio Bonito, BA.

Tabela 1 – Informações topográficas, climáticas, hidrológicas e hidrogeológicas das bacias hidrográficas.

Bacia hidrográfica	Arroio Fragata	Rio Pelotinhas	Rio Aiuruoca	Rio Bonito
Área (km ²)	129,4	551	532	756
Altitude média(m)	130,20	1111,28	1539,22	883,59
Declividade (%)	10,3	9,56	31,4	9,92
Estação fluviométrica ¹ (período analisado)	88750000 (1980 - 2021)	7050000 (1945 - 2022)	61024000 (1925 - 2013)	51166000 (1991 - 2018)
Estação pluviométrica ² (período analisado)	3152016 (1980 - 2020)	2850004 (1959 - 2022)	2144018 (1941 - 2021)	1241027 (1992 - 2022)
Estação climatológica ³ (período analisado)	A887 (1980 - 2021)	83891 (1970 - 2016)	83736 (1944 - 2021)	83242 (1973 - 2022)
Precipitação média anual (mm)	1417,92	1380,16	1461,33	634,77
Q média anual (m ³ /s; ls ⁻¹ km ⁻²)	3,1; 23,96	16,79; 30,47	19,45; 36,56	1,20; 1,59

Temperatura média anual (°C)	18,2	15,9	19,4	23,4
Solos	Argissolos vermelho-amarelo e Planossolos háplicos	Cambissolos hapláticos	Cambissolos húmicos	Latossolos amarelos
Hidrogeologia	Aquífero poroso constituído por uma sucessão de areais finas e argilas com produtividade localmente baixa	Aquífero fraturado e descontínuo com produtividade média	Aquífero fissurado de extensão regional com produtividade e baixa	Aquífero fraturado com produtividade baixa
Classificação climática	Tipo “Cfa”, caracterizado temperado úmido e com verões quentes.	Tipo “Cfb” caracterizado como temperado, sem estação seca e verão suave.	Tipo “Cwb” caracterizado o como temperado, com inverno frio e seco e verão suave e úmido.	Tipo “Aw”, caracterizado como savana tropical.

Fonte: As condições hidrogeológicas foram extraídas do mapa hidrogeológico do Brasil, disponibilizado pelo Serviço Geológico do Brasil - CPRM; Classificação climática de Köppen - Geiger (Beck et al. 2018).

^{1,2} Fonte: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA)

³ Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia (INMet)

Os critérios para a escolha das bacias hidrográficas foram de que apresentassem no mínimo 20 anos de monitoramento de dados diários de chuva e vazão, e que fossem em regiões de cabeceira com a menor influência antrópica possível, seja por alterações no uso do solo e/ou por usuários de água. O mapa de uso e ocupação do solo (Figura 2) foi utilizado para extrair as informações necessárias para avaliar o nível de antropização das bacias hidrográficas, sendo que quanto maior a porcentagem de formações florestais naturais, mais adequada as bacias hidrográficas estão para aplicar a metodologia com o objetivo deste estudo. As informações sobre o uso e ocupação dos solos estão apresentadas na Tabela 2. As

classes de solos de cada bacia hidrográfica foram obtidas através da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2020), e apresentadas na Figura 2. Essa informação é importante para estudos sobre a recarga e armazenamento de água subterrânea, tendo em vista que os diferentes tipos de solo influenciam de formas distintas nos processos de infiltração de água no solo (THOMAS et al., 2016).

Tabela 2 – Porcentagem dos usos e ocupações do solo nas bacias hidrográficas.

Uso	BHAF	BHRP	BHRA	BHRB
	Porcentagem (%)			
Formação florestal	33,82	6,93	50,75	48,58
Formação savânica	-	-	-	33,38
Formação campestre	38	77,32	4,05	2,28
Afloramento rochoso	-	-	4,85	-
Pastagem	-	0,34	17,28	7,64
Agricultura	28,18	15,41	23,07	8,12

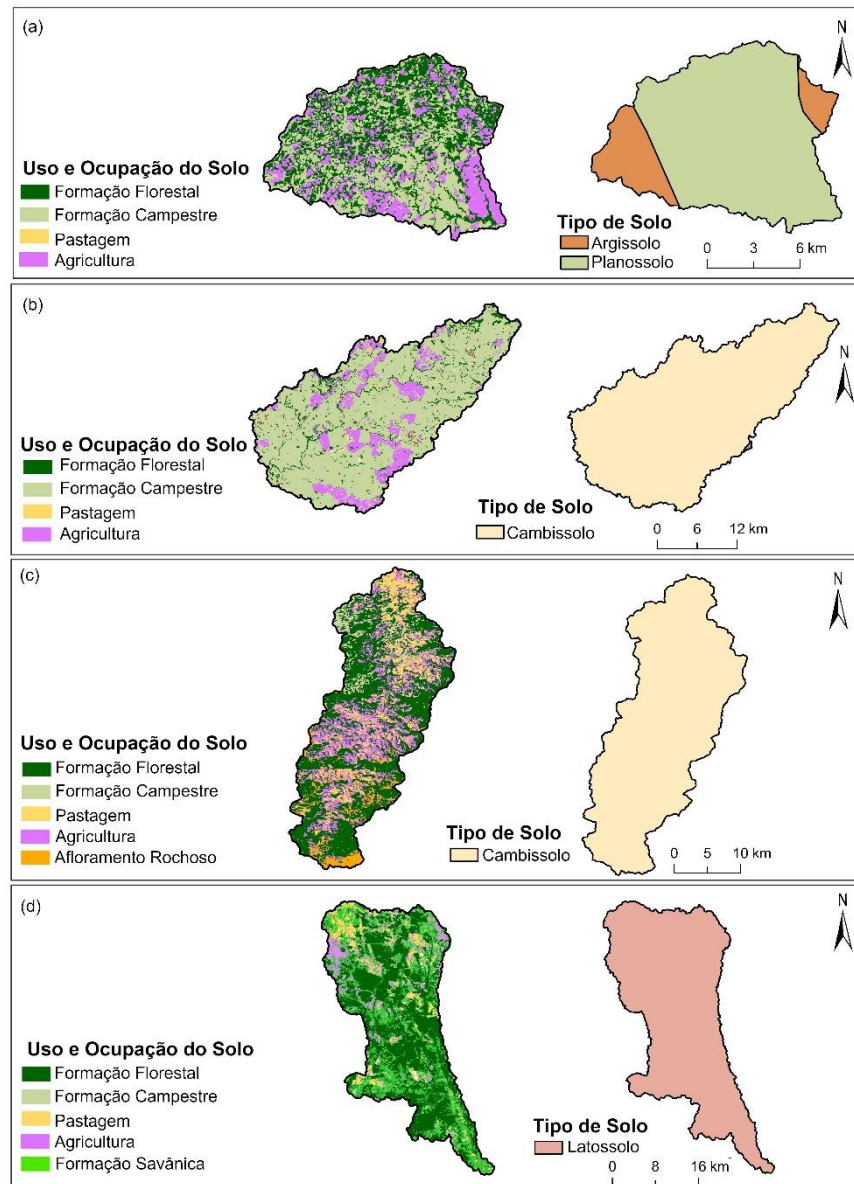


Figura 2 – Mapas de uso e ocupação e tipos de solos das bacias hidrográficas (a) Arroio Fragata, (b) Rio Pelotinhas, (c) Rio Aiuruoca e (d) Rio Bonito.

Os dados de vazão e precipitação foram obtidos no portal hidroweb da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), sendo as estações fluviométricas e pluviométricas utilizadas apresentadas na Tabela 1. Esses dados possuem nível 2 de consistência hidrológica e são os mais utilizados para pesquisa hidrológica no Brasil, apresentando elevada confiabilidade (HUANG et al., 2023; VALENTINI et al., 2023). A partir dos dados de vazão média diária foram obtidas as séries de vazão média anual e vazão mínima consecutiva de 7 dias (Q7). Com os dados de precipitação, foram constituídas as séries de precipitação total anual e as séries de precipitação

sazonal (Verão: dezembro, janeiro e fevereiro; Outono: março, abril e maio; Inverno: junho, julho e agosto; Primavera: setembro, outubro e novembro).

Também foram analisados dados de temperatura, que foram obtidos de estações climatológicas próximas de cada bacia hidrográfica no portal BDMEP do Instituto Nacional de Meteorologia (INMet). A série de temperatura analisada foi a de temperatura média anual.

A evapotranspiração potencial foi obtida pelo método de Thornthwaite, o qual tem suas equações baseadas no balanço hídrico de bacias hidrográficas e em medidas de evapotranspiração realizadas em lisímetros, que utilizam a temperatura do ar como variável independente. A escolha deste método se baseia no fato de que há várias falhas em dados de radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa, impossibilitando o uso de métodos mais robustos como Penman-Monteith.

As equações que representam o método de Thornthwaite são:

$$ETPp = 16 \left(10 \frac{Ti}{I} \right)^a \quad Ti > 0^\circ C \quad (1)$$

Onde Ti é a temperatura média mensal para um ano qualquer.

$$a = 6,75 * 10^{-7} I^3 - 7,71 * 10^{-5} I^2 + 1,7912 * 10^{-2} I + 0,49239 \quad (2)$$

$$I = \sum_{i=1}^{12} (0,2Ti)^{1,514} \quad Ti > 0^\circ C \quad (3)$$

Ti é a temperatura média mensal normal climatológica ($^\circ C$), que assim como os parâmetros I e a , que representam índices de calor, variam de acordo com a região. Para estimar a evapotranspiração mensal foi aplicado o fator de correção, conforme mostrado na Equação 4.

$$ETp = ETPp * \frac{N}{12} * \frac{ND}{30} \quad (4)$$

Onde N é o fotoperíodo médio mensal e ND o número de dias do período.

Também foi avaliado o excedente hídrico, representado como:

$$R = P - ETp \quad (5)$$

Onde P é a precipitação, ETp é a evapotranspiração potencial e R é o excedente hídrico, caracterizado por ser a parte da precipitação que não retorna diretamente para a atmosfera por meio da evapotranspiração (VOGELS et al., 2020).

2.2 Análise de tendências

Para avaliar o comportamento das séries de dados do presente estudo, o teste não paramétrico de Mann Kendall (MANN 1945; KENDALL 1975) ao nível de significância de 5% foi utilizado a fim de detectar possíveis tendências nas séries temporais hidrometeorológicas. O teste de Mann Kendall começa a ser definido pelo teste estatístico S, conforme representado na Equação 6.

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i), \text{ onde } \text{sgn}(\theta) = \begin{cases} +1 & \theta > 0 \\ 0 & \theta = 0 \\ -1 & \theta < 0 \end{cases} \quad (6)$$

Onde x_j e x_i são os valores dos dados nos tempos j e i, e n é o comprimento do conjunto de dados analisados.

O teste de Mann Kendall (Z) e as estatísticas de variância V(S) são apresentadas conforme Equações 7 e 8.

$$Z = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{v(s)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{s+1}{\sqrt{v(s)}} & S < 0 \end{cases} \text{ se } \begin{cases} S > 0 \\ S = 0 \\ S < 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$V(S) = \frac{1}{18} [n(n-1)(2n+5)] \quad (8)$$

O teste de Mann Kendall aceita a hipótese nula se $-Z \leq Z_{cr} \leq Z$ é o valor crítico das estatísticas normalizadas a 5% do nível de confiança. Este teste possui dois parâmetros importantes para a detecção de tendências, sendo o primeiro o nível de significância, e o segundo a estimativa da magnitude, que indica se a tendência é negativa ou positiva, bem como sua taxa de variação (GAO et al., 2015).

O teste de Mann Kendall foi aplicado ao nível de significância de 5% para as séries anuais de temperatura e evapotranspiração, e para os dados de precipitação e vazão, além das séries anuais, também foram avaliadas as séries de precipitação sazonal, vazão mínima consecutiva de 7 dias (Q7) e o armazenamento de água

subterrânea. Para avaliar a magnitude das mudanças de tendências estatísticas, o teste de Sen'slope (SEN, 1968) foi utilizado para avaliar o aumento ou diminuição nas séries temporais. Este teste não-paramétrico é amplamente utilizado em análises de séries temporais hidrometeorológicas e é descrito conforme Equação 9.

$$T_i = \frac{X_j - X_k}{j - k} \text{ para } i = 1, 2, 3 \dots N \quad (9)$$

Onde x_j e x_k são os dados no tempo j e k ($j < k$). A mediana nos valores de N é calculada como:

$$\beta = \begin{cases} T_{\frac{N+1}{2}} & N \text{ é ímpar} \\ \frac{1}{2} \left(T_{\frac{N}{2}} + T_{\frac{N+1}{2}} \right) & N \text{ é par} \end{cases} \quad (10)$$

2.3 Separação do fluxo de base

Diversas metodologias são utilizadas para separar o escoamento, porém o filtro digital recursivo de Eckhardt (2005) vem sendo amplamente utilizado em diversos estudos (ZHANG et al., 2012; HE et al., 2022), pois reflete a relação linear entre a descarga e o armazenamento de águas subterrâneas em uma bacia hidrográfica (YANG et al., 2021). O filtro digital de Eckhardt pode ser expresso conforme Equação 11.

$$BF_k = \frac{(1 - BFI_{m\acute{a}x}) \alpha b_{k-1} + (1 - \alpha) BFI_{m\acute{a}x} y_k}{1 - \alpha BFI_{m\acute{a}x}} \quad (11)$$

Onde BF_k é o escoamento de base, y é a vazão e k é o intervalo de tempo. O parâmetro α é a constante de recessão e controla a forma do hidrograma do fluxo de base, e o $BFI_{m\acute{a}x}$ é caracterizado como o valor máximo do índice do fluxo de base e está intimamente relacionado com o fluxo de base total (ECKHARDT, 2012; YI et al., 2021).

2.4 Estimativa do armazenamento da água subterrânea

O armazenamento de água subterrânea foi estimado pela metodologia proposta por Brutsaert (2008), que teve suas bases desenvolvidas por Brutsaert e Nieber (1977) para análise do armazenamento subterrâneo em aquíferos não confinados e seu comportamento temporal. A Equação é apresentada como:

$$S = Ky_{min7} \quad (12)$$

Onde S refere-se ao armazenamento subterrâneo ou lâmina armazenada, em mm, y é a vazão mínima consecutiva de 7 dias transformada para lâmina (mm/dia) e K é um parâmetro associado às características físicas da bacia. Vale ressaltar que S não representa o total de água armazenada no aquífero, mas apenas o armazenamento acima do nível do lençol freático (ZHANG et al., 2014; GAO et al., 2015).

Para estimar o armazenamento de água subterrânea é necessário conhecer a característica temporal do processo de drenagem subterrânea (K), que é calculado em dias. Neste estudo, o parâmetro K foi determinado a partir de dados diários do escoamento de base (BRUTSAERT e NIEBER, 1997).

$$y = - \frac{dS}{dt} \quad (13)$$

Onde dS/dt é a taxa de variação do volume de armazenamento da água subterrânea por unidade de área de captação nos aquíferos contribuintes a montante na bacia hidrográfica.

Os dados de vazão utilizados para estimar K devem consistir apenas em escoamento de base, o que representa apenas a saída de águas subterrâneas dos aquíferos (LIU et al., 2020). Uma condição necessária para caracterizar o valor de K para uma bacia hidrográfica é fazer um detalhamento cuidadoso sobre a ocorrência de precipitação nos dias anteriores (GAO et al. 2015), sendo que Brutsaert (2008) recomenda estruturar as séries de escoamento base eliminando-se os valores de vazão após ocorrência de chuva, além de outras considerações para se evitar que haja escoamento superficial direto combinado ao subterrâneo na análise. Para obtenção do parâmetro K, desenvolve-se um gráfico log-log de $-dy/dt$ a partir dos dados da Equação 14.

$$\frac{dy}{dt} = - \frac{(y_{i-1} - y_{i+1})}{2} \quad (14)$$

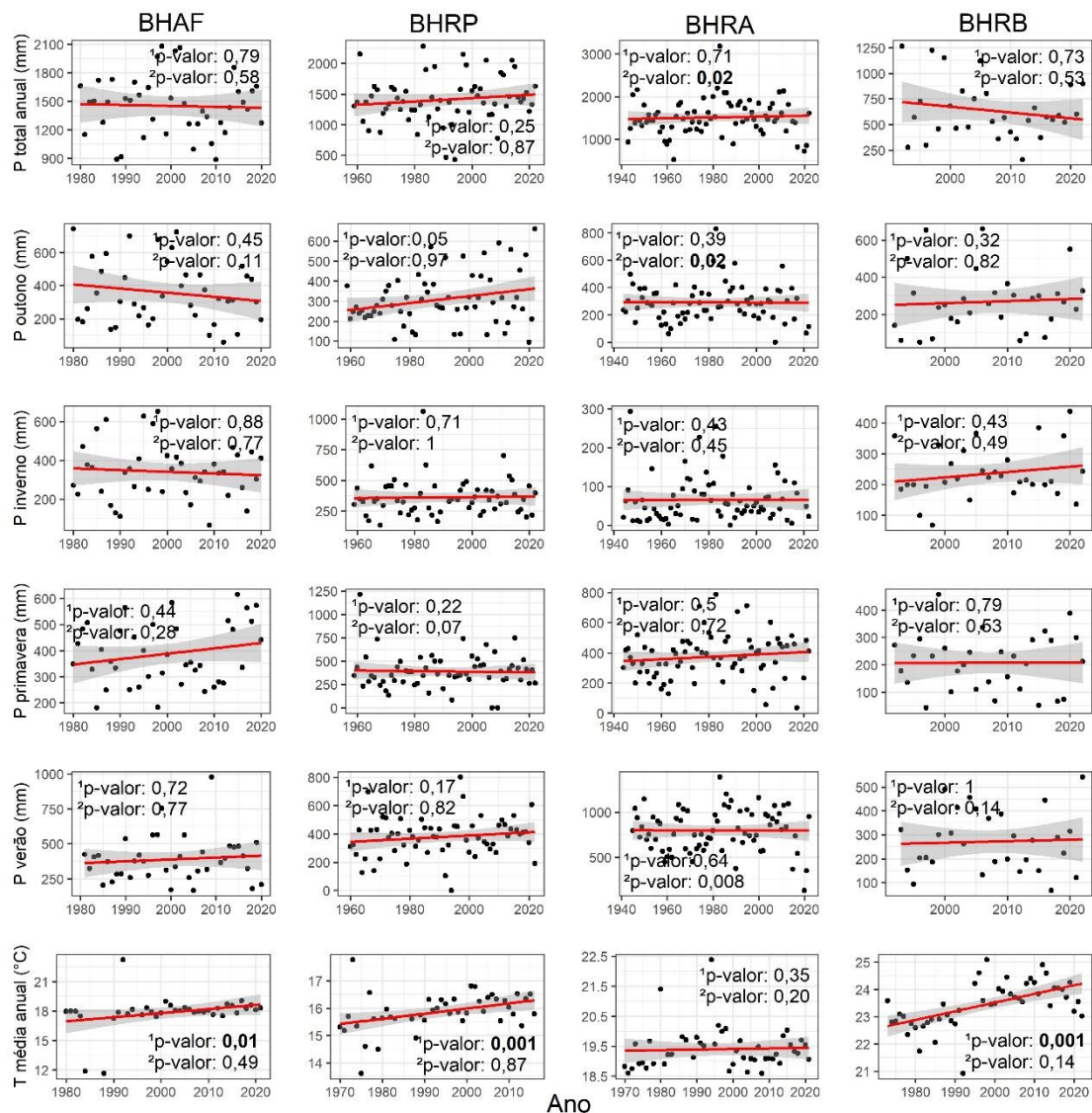
Onde dy/dt é a mudança temporal no fluxo de base durante a recessão e y é o escoamento de base (m^3/s).

Somente dados de vazão que atenderam aos critérios de vazão subterrânea foram utilizados (BRUTSAERT, 2008), sendo os demais excluídos. Após os pontos de baixa vazão serem identificados, estes foram plotados no gráfico log-log ($-dy/dt$). Para determinar o valor de K uma linha reta foi traçada afim de envelopar os dados de modo que aproximadamente 5% dos pontos plotados fiquem abaixo da reta (TROCH et al., 1993; GAO et al., 2015) sendo o valor de K determinado a partir do coeficiente angular da reta de envelopamento.

3 Resultados e Discussão

3.1 Comportamento temporal das variáveis climáticas

Para avaliar o comportamento temporal das variáveis hidroclimatológicas das bacias hidrográficas do presente estudo, o teste de Mann Kendall foi aplicado à toda série histórica disponível e aos últimos 20 anos de dados, a fim de detectar possíveis influências das mudanças climáticas sobre esses fatores nas décadas mais recentes. É importante mencionar que a série histórica de vazões para a BHRA é limitada a 2013 enquanto a de precipitação vai até 2021. Este aspecto tem que ser levado em consideração na análise desta bacia. A Figura 3 apresenta o resultado do teste para as séries climáticas de precipitação e temperatura.



Legenda: 1 p-valor do período completo; 2 p-valor para o período dos últimos 20 anos; P = precipitação; T = temperatura.

Figura 3 - Resultado do teste de Mann-Kendall para as variáveis climáticas (precipitação anual e sazonal, e temperatura média anual).

A precipitação total anual apresentou tendência significativa apenas para a BHRA, e nos últimos 20 anos, a uma taxa de redução de 48mm/ano. O mesmo ocorre com as séries sazonais de precipitação, apontando tendência negativa para as estações do outono e verão, de 11,8 mm/ano e 35 mm/ano, respectivamente. O período chuvoso para esta região ocorre de outubro a março, compreendendo os meses de verão e um mês de outono, evidenciando diminuição de chuva para esta época, a qual é fundamental para o processo de recarga subterrânea na bacia uma vez que aproximadamente 85% da precipitação ocorre neste período. Esta bacia

hidrográfica está localizada em uma área de alto relevo, portanto seus padrões de precipitação podem ser influenciados pelas condições topográficas da região, tendo em vista que essas condições afetam as circulações atmosféricas locais (LIU et al., 2014), especialmente as precipitações orográficas. A temperatura pode ser um dos diversos fatores que influenciam a precipitação (MALEDE et al., 2022), porém não foi identificada tendência na série de temperatura média anual para esta bacia hidrográfica. Contudo, de acordo com outros estudos realizados na região, é possível inferir que variações climáticas estão afetando os padrões pluviométricos da região (MELLO et al., 2021; SILVA et al., 2022), possivelmente afetando a disponibilidade de água, considerando a importância da precipitação para a produção de água e hidroeletricidade nesta região (CARVALHO et al., 2022).

Os padrões pluviométricos das demais bacias hidrográficas não estão sofrendo alterações significativas ao longo dos anos, conforme apresentado na Figura 3, indicando que possivelmente as variações climáticas não estão impactando diretamente no regime de chuva dessas regiões. De acordo com Regoto et al. (2021), a região Nordeste, onde está a BHRB, indica tendência de se tornar mais seco, e a região sul, onde as BHAF e BHRP estão localizadas, tendência de aumento da precipitação.

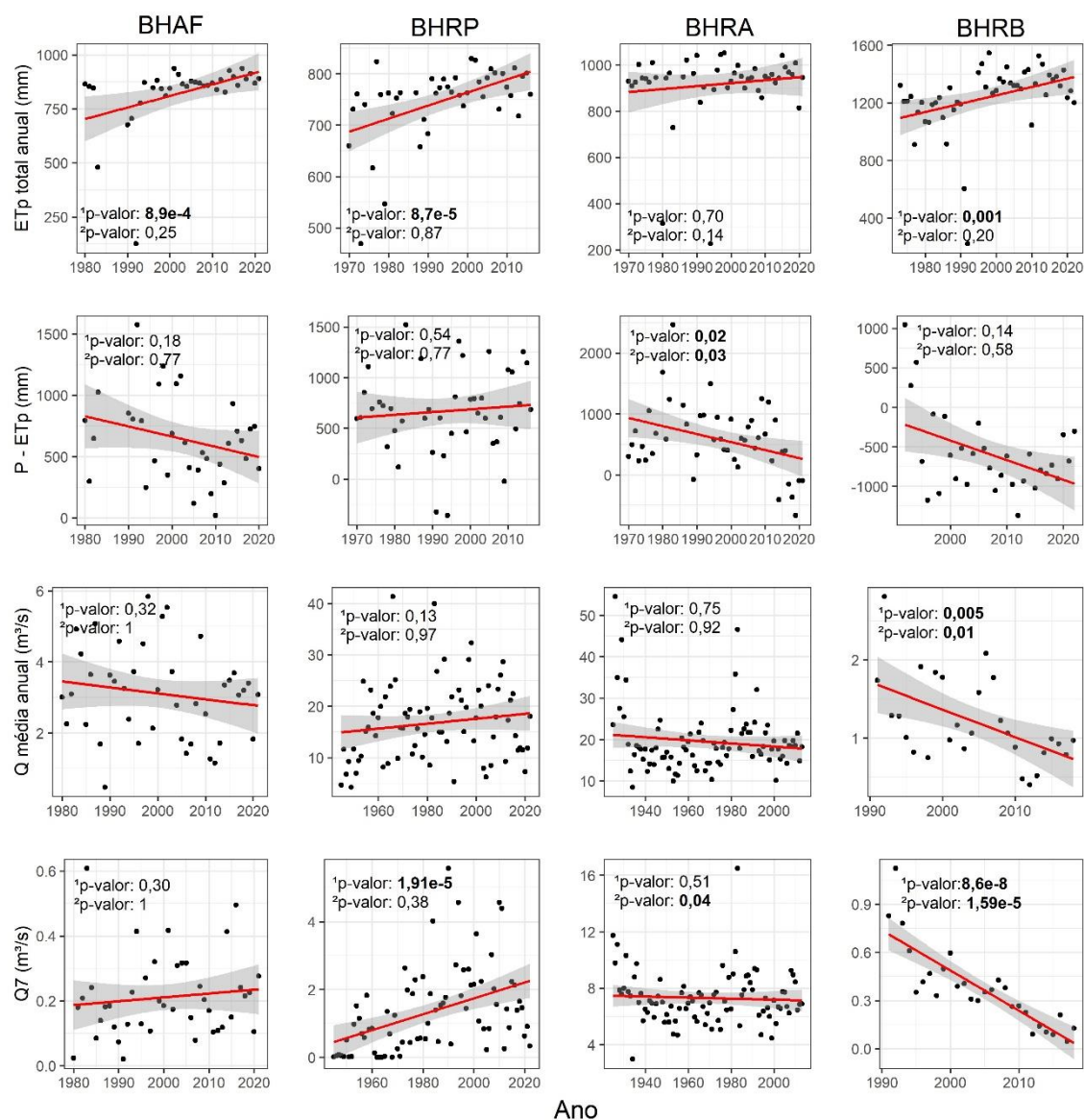
Em relação a temperatura média anual das bacias hidrográficas, a BHRB apresentou tendência de aumento de 0,03 °C/ano, corroborando com o estudo realizado por Carvalho et al. (2020), que obtiveram tendência de aumento de temperatura nos próximos anos para as regiões situadas no Nordeste do Brasil, alertando sobre possíveis impactos ambientais devido a essas alterações. Embora essa taxa de aumento pareça não ser expressiva, o comportamento geral está de acordo com os resultados encontrados por Regoto et al. (2021), que indicam que mudanças nos padrões climáticos no Brasil estão influenciando no aumento de temperatura das diferentes regiões.

As bacias BHAF e BHRP também apresentaram tendência de aumento na temperatura média anual para o período completo de 0,02 °C/ano, apontando que os padrões de temperatura na região sul do Brasil também estão sendo alterados. As bacias hidrográficas que apresentaram tendência significativa de aumento de temperatura foram encontradas para o período temporal completo, porém os resultados encontrados por Regoto et al. (2021) apontam que mudanças nos padrões

de temperatura em todas as regiões do Brasil são mais pronunciadas nas últimas duas décadas do que em todo o período histórico.

3.2 Comportamento temporal das variáveis hidrológicas

Os resultados do teste de tendência para as variáveis hidrológicas estão apresentados na Figura 4.



Legenda: 1 p-valor do período temporal completo; 2 p-valor para o período dos últimos 20 anos; P = precipitação; ETp = evapotranspiração potencial; Q = vazão.
Figura 4 - Resultado do teste de Mann-Kendall para as variáveis hidrológicas.

A partir dos resultados apresentados na Figura 4, é possível observar que a evapotranspiração potencial apresentou tendência de aumento para a BHAF, BHRP

e BHRB para as séries do período completo, indicando que esse acréscimo é fruto do aumento significativo de temperatura verificado nas mesmas e que pode estar relacionado às mudanças climáticas (Yang et al., 2019). Costa et al. (2021) também identificaram tendência de aumento da ETp para a região onde a BHRB está localizada, associando esse fato ao aumento significativo de temperatura que vem ocorrendo ao longo dos últimos anos no Nordeste do Brasil, em especial no semi-árido. O aumento de ETp nas bacias hidrográficas localizadas no sul do Brasil estão associados ao aumento de temperatura encontrados no teste de tendência, corroborando com os resultados encontrados por Neto et al. (2016), que avaliaram a influencia das mudanças climáticas com cenários futuros nos processos hidrológicos, apontando para o aumento da ETp para a região sul do Brasil.

A BHRA foi a única que apresentou tendência de diminuição no excedente hídrico nos dois períodos analisados, indicando para esta bacia hidrográfica que essa variável está sofrendo alterações significativas ao longo dos anos, o que está associado a redução de precipitação, especialmente no período chuvoso, apontando diminuição na recarga hídrica subterrânea.

Os dados de Q média anual e Q7 apresentaram tendência de redução apenas para a BHRB, para os dois períodos temporais analisados. Esta redução está claramente associada às alterações climáticas, tendo em vista o aumento de temperatura (Figura 3) e da evapotranspiração (Figura 4), corroborando com o estudo realizado por Beck et al. (2018), indicando que o clima na região da BHRB vem sofrendo alterações significativas produzidas pelo aquecimento global. Oliveira et al. (2017) identificaram tendência significativa de redução na precipitação para a região Nordeste do Brasil, impactando diretamente os padrões climatológicos, e consequentemente, hidrológicos da região.

Por outro lado, a BHRA apresentou uma tendência de aumento para a Q7 quando avaliada para o último período de 20 anos, i.e., de 1994 a 2013, apesar de indicar tendência de redução da precipitação total anual para o mesmo período. As vazões Q7 estão associadas ao escoamento base (subterrânea) e à capacidade de armazenamento natural da bacia, significando que são influenciadas por recargas de anos hidrológicos anteriores. Na região da BHRA, Mello et al. (2019), baseando-se em dados observados numa pequena bacia inteiramente ocupada por Mata Atlântica, obtiveram armazenamento de água superior a 500 mm, fruto de recarga de ao menos

2 anos hidrológicos anteriores. Assim, o comportamento da Q7 não é explicado apenas pela precipitação, mas por fatores hidrogeológicos relacionados a produtividade e movimento da água nos aquíferos, especialmente em áreas com elevada produção hídrica.

O aumento identificado na Q7 para a BHRP nos últimos 20 anos corrobora com os resultados encontrados por Souza e Reis (2022), onde os autores avaliaram tendências nas séries de vazão extremas, i.e., máximas e mínimas, para as diferentes regiões hidrográficas do Brasil, identificando que as vazões dos cursos d'água apresentam tendência crescente apenas para a região sul do país. Com base nestes resultados, é de grande importância avaliar e compreender as implicações das tendências das variáveis hidrológicas e climáticas, visando compreender seus impactos ecológicos, sociais e econômicos.

3.3 Características temporais do processo de drenagem (K)

Os valores da característica temporal do processo de drenagem (K), estimado pelo método de Brutsaert (2008), estão apresentados na Figura 5.

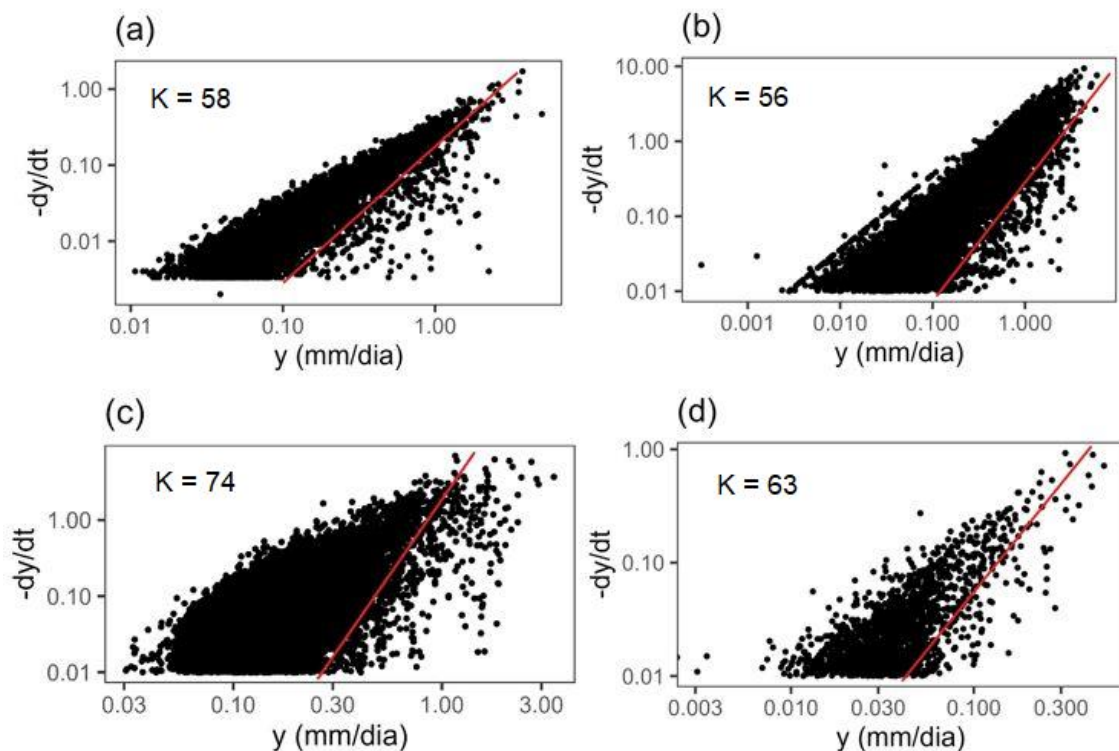


Figura 5 – Relação entre $\log(-dy/dt)$ e $\log(y)$ para (a) Bacia hidrográfica do Arroio Fragata, (b) Rio Pelotinhas, (c) Rio Aiuruoca e (d) Rio Bonito.

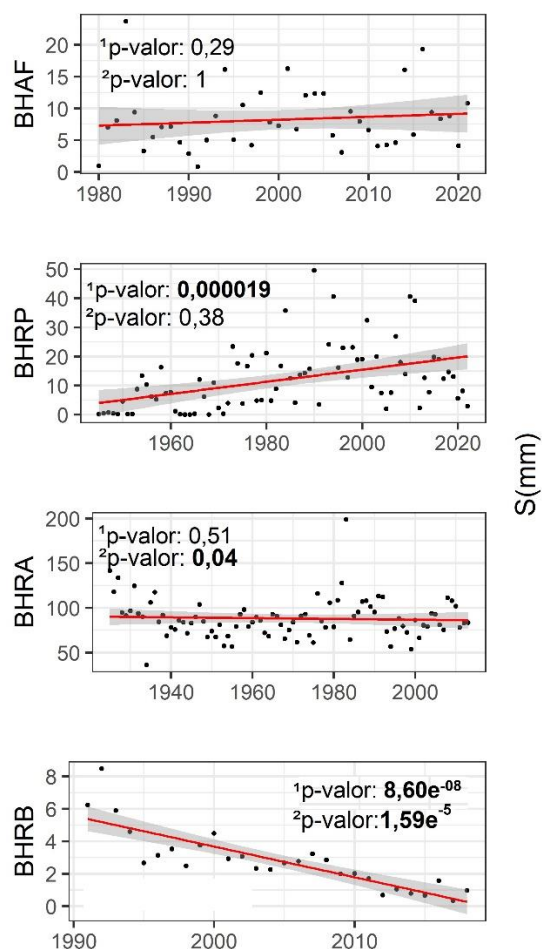
Brutsaert (2008) inferiu que a estimativa do parâmetro K é pouco sensível em grandes bacias hidrográficas e que seu valor é de aproximadamente 45 ± 15 dias. Embora os valores de K encontrados neste trabalho sejam ligeiramente superiores aos obtidos em outras bacias (LIU et al., 2020; GAO et al., 2015), deve ser levado em consideração as características pedológicas e hidrogeológicas de cada região, além de fatores como elevação e declividade, que também podem exercer influência no processo de drenagem de uma bacia hidrográfica (Sugita e Brutsaert, 2009).

A BHRP e BHRA foram as bacias hidrográficas que apresentaram menor e maior valores de K, 56 e 74 dias, respectivamente. Essas bacias apresentam relativamente a mesma área de drenagem, mesmo REmédio, mesma unidade pedológica (Cambissolos) e não variam consideravelmente em altitude. Com isso pode-se inferir que a declividade foi um dos fatores que influenciou o parâmetro K para essas bacias hidrográficas, considerando que a BHRA, com a declividade mais acentuada, foi o que apresentou o maior valor de K. Para as bacias hidrográficas avaliadas por Sugita e Brutsaert (2009), a altitude foi o fator que influenciou no valor de K, indicando que este parâmetro por ser afetado por fatores topográficos de cada região. A hidrogeologia também explica o menor valor encontrado na BHRP, sendo que esta região é constituída por aquífero de produtividade média, o que associado ao aumento da Q7 observada ao longo dos anos, exercendo maior influência no escoamento de água subterrânea

Para as demais bacias, a hidrogeologia auxilia a explicar os valores de K encontrados, sendo que a BHAF possui aquífero poroso, definido pela alta permeabilidade e maior fluxo de água (POETER et al., 2020). A BHRB é caracterizada por possuir aquífero fraturado, que consiste em aquíferos rochosos desprovidos de porosidade primária, onde o fluxo e armazenamento de águas subterrâneas ocorrem por meio de fraturas e porosidade secundária das rochas criadas pelo processo de intemperismo (GONZÁLEZ et al., 2021), assim com menor fluxo de água, fazendo com que o processo de drenagem ocorra de forma mais lenta.

3.4 Comportamento do armazenamento de água subterrânea

Os resultados do teste de tendência para o armazenamento de água subterrânea estão apresentados na Figura 6.



Legenda: 1 p-valor do período temporal completo; 2 p-valor para o período dos últimos 20 anos; S = Armazenamento de água subterrânea.

Figura 6 - Teste de tendência temporal aplicado ao armazenamento de água subterrânea para os dois períodos temporais analisados.

O comportamento temporal do armazenamento de água subterrânea variou entre tendências de aumento (BHRP e BHRA), dependendo do período temporal analisado, e tendência de redução (BHRB) em ambos os períodos. Esses resultados demonstram que o armazenamento de água subterrânea apresenta diferentes comportamentos nas regiões onde estas bacias hidrográficas estão localizadas, associando sua variação e seu comportamento com as características climáticas, hidrológicas, pedológicas e de uso e cobertura do solo particulares de cada região.

A BHRP apresentou tendência significativa de aumento no armazenamento de água subterrânea para o período completo, entre os anos de 1945 e 2022. Esta bacia

hidrográfica apresentou tendência de aumento de precipitação para o mesmo período, mas não é um aumento expressivo que explique esse acréscimo no armazenamento do aquífero. Como esse aumento foi identificado no período de longo prazo, significa que o mesmo pode estar associado ao uso e cobertura do solo, que apresenta aproximadamente 77% de vegetação nativa (Tabela 2), indicando que esta bacia hidrográfica possui antropização marginal, além dos aspectos hidrogeológicos mencionados. Liu et al. (2020) também identificaram aumento no armazenamento de água subterrânea em suas análises e atribuíram este resultado à ampliação de áreas vegetadas nas últimas décadas. Isto indica que houve alterações positivas no contexto do processo de infiltração de água no solo, o que contribui diretamente na recarga de água subterrânea. Outra característica encontrada na BHRP que auxilia no processo de recarga do aquífero é a baixa declividade (9,56%), corroborando com os resultados encontrados por Lentswe e Molwalefhe (2020), que também identificaram que locais com declividades menos acentuadas são caracterizados pelo alto potencial de recarga de aquíferos, pois permitem que a água superficial tenha mais tempo para o processo de infiltração no solo.

A BHRA apresentou leve tendência positiva no armazenamento de água subterrânea para o período dos últimos 20 anos, embora tenha sido identificada redução de precipitação e aumento de evapotranspiração para o mesmo período. Além dos aspectos mencionados sobre a Q7 nesta bacia, este resultado pode estar associado ao período temporal das séries históricas avaliadas, uma vez que há limitação na atualização dos dados de vazão, que vão até 2013, enquanto os dados de precipitação e evapotranspiração remontam ao ano mais recente de 2021. Por isso, para compreender a relação da precipitação média anual com a vazão nesta bacia hidrográfica, foi realizado novamente o teste de Mann Kendall para os últimos 20 anos, porém, para o mesmo período de dados de vazão, i.e., de 1994 a 2013. Foi encontrado o p-valor de 0,029, indicando tendência significativa de aumento na precipitação média anual de 2,71 mm/ano a partir do teste de Sen's slope. Este resultado demonstra um fato importante para a BHRA, pois indica a correlação da precipitação com o armazenamento de água subterrânea, e, portanto, para os anos mais recentes é altamente provável que o armazenamento está diminuindo tendo em vista a redução de precipitação encontrada para a série mais recente. A região sul de Minas Gerais, onde a bacia está localizada, sofreu com secas severas entre os anos de 2013 e 2020,

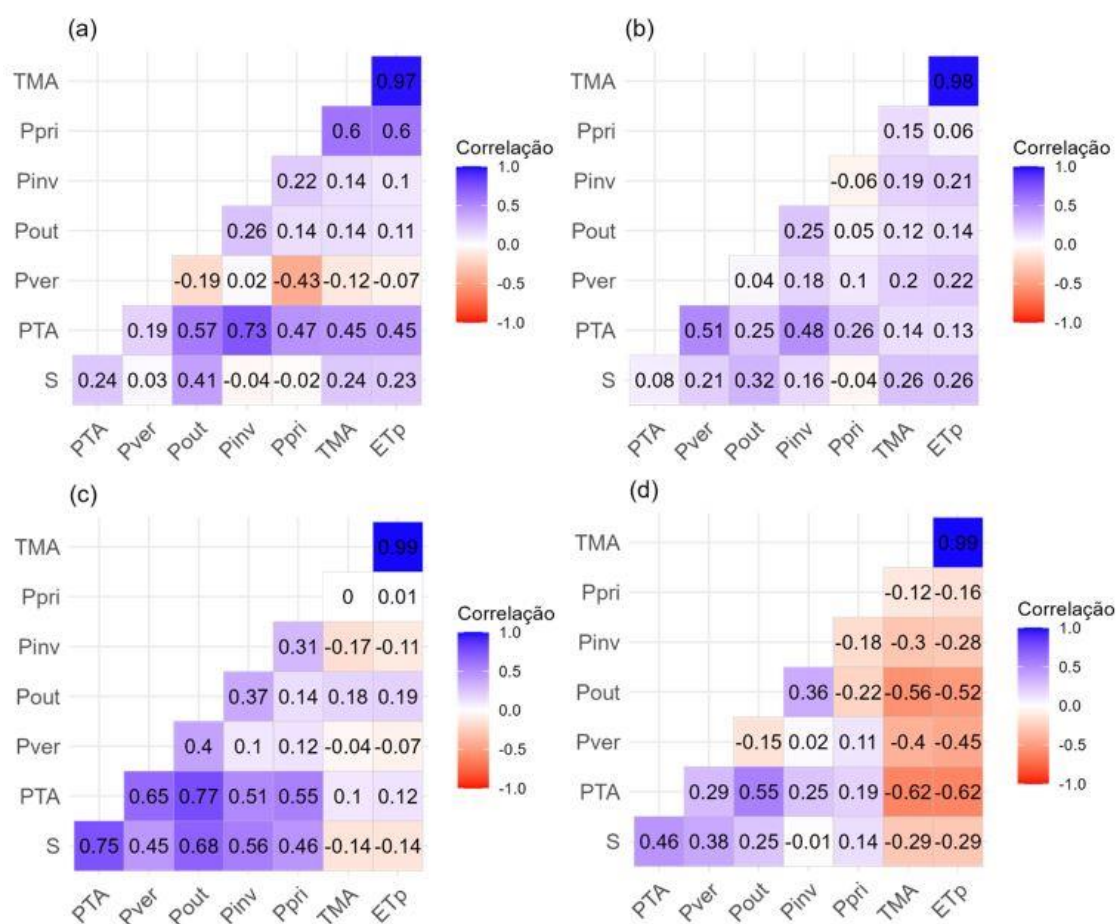
sendo o período mais seco já registrado na região nos últimos 100 anos (SILVA e MELLO, 2021). As nascentes desta bacia hidrográfica estão localizadas na Serra da Mantiqueira, e possuem relação direta com o clima da região que apresenta alta pluviosidade no período chuvoso, e baixa evapotranspiração pela temperatura amena (clima Cwb), o que associado à cobertura dominante da Mata Atlântica, apresenta boas condições para infiltração e recarga subterrânea (PINTO et al., 2015), sendo os responsáveis por contribuir no processo de recarga do aquífero influenciando na dinâmica do armazenamento subterrâneo.

A BHRB apresenta tendência de diminuição do armazenamento de água subterrânea para ambos os períodos analisados, indicando que essa redução está fortemente associada às alterações identificadas no clima, como o aumento de temperatura e evapotranspiração. Como diversos estudos estão identificando mudanças nos padrões climáticos onde esta bacia hidrográfica está localizada (RAO et al., 2016; BECK et al., 2018), é de grande importância compreender os fatores que influenciam na recarga e armazenamento dos aquíferos, pois a redução da água subterrânea pode levar a escassez de água superficial nesses locais, resultando em estresse socioeconômico e no aumento da vulnerabilidade às mudanças climáticas, prejudicando diretamente a segurança hídrica e alimentar dessas regiões (CHINNASAMY E AGORAMOORTHY, 2015).

A BHAF foi a única bacia hidrográfica deste estudo que não apresentou tendência significativa no armazenamento de água subterrânea para nenhum período analisado. Ela está localizada no extremo sul do Brasil, e de acordo com os resultados encontrados por Regoto et al. (2021) esta região é a única do país que não apresenta tendência significativa de alteração nos padrões climatológicos. Contudo, no presente estudo foi encontrado um aumento estatisticamente significativo da temperatura média anual, demonstrando que a BHAF pode estar sendo impactada por alterações no clima.

Para identificar quais fatores apresentam maior correlação com o armazenamento de água subterrânea de cada bacia hidrográfica, foi realizado o teste de correlação de Pearson, conforme apresentado na Figura 7, a qual apresenta uma matriz de correlação entre as variáveis climáticas e hidrológicas avaliadas neste estudo com o armazenamento de água subterrânea. Para esta análise foram considerados apenas os anos que apresentaram dados para todas as variáveis, afim

de reduzir possíveis erros e compreender melhor o comportamento das variáveis hidroclimatológicas entre si para cada bacia hidrográfica. A interpretação de dados climatológicos possibilita uma melhor compreensão das mudanças climáticas que ocorrem ao longo dos anos, além de auxiliar no entendimento sobre como essas mudanças afetam a recarga subterrânea e, conseqüentemente, a disponibilidade de água armazenada nos aquíferos (CORDEIRO et al., 2021).



Legenda: S = armazenamento de água subterrânea (mm/ano); PTA = Precipitação total anual (mm); Pver = Precipitação de verão (mm/ano); Pout = Precipitação de outono (mm/ano); Pinv = Precipitação de inverno (mm/ano); Ppri= Precipitação de primavera (mm/ano); TMA = Temperatura média anual (°C) e ETp = Evapotranspiração potencial média anual (mm).

Figura 7 – Matriz de correlação das variáveis hidroclimatológicas e o armazenamento nas bacias hidrográficas (a) Arroio Fragata, (b) Rio Pelotinhas, (c) Rio Aiuruoca e (d) Rio Bonito.

A partir da Figura 7 é possível analisar que a precipitação foi a variável que apresentou maior correlação com o armazenamento de água subterrânea, sendo para a BHRA e BHRB a precipitação total anual, enquanto para a BHAF e BHRP a

precipitação de outono, corroborando com diversos estudos que avaliaram os fatores que influenciam na recarga de aquíferos em diversas regiões do planeta, e identificaram a precipitação como sua principal fonte (MOECK et al., 2020; SILVA et al., 2021). Foram encontradas correlações mais fortes ($>0,6$) entre o armazenamento de água subterrânea e a precipitação na BHRA, enquanto BHRB e BHAF apresentaram correlação moderada ($0,4 - 0,59$), e a BHRP apresentou correlações mais fracas ($<0,39$), indicando que a dinâmica do armazenamento de água subterrânea não é essencialmente em resposta aos fatores climatológicos da região.

Afim de avaliar se essa correlação é significativa, foi calculado o p-valor da melhor correlação com o armazenamento de água subterrânea para cada bacia hidrográfica. As BHRA e BHRB apresentam maior correlação com a precipitação total anual, e o p-valor para essas correlações foi de 0,02 para a BHRB, e $1,13e-7$ para a BHRA, indicando uma correlação linear significativa para estas bacias hidrográficas. Isto indica que os anos que apresentaram alta pluviosidade, os níveis de vazão também foram relativamente mais altos e, conseqüentemente, o fluxo de base e o armazenamento de água subterrânea. Com isso, a análise minuciosa dos dados de precipitação anual pode fornecer uma explicação parcial para a compreensão do comportamento do armazenamento da água subterrânea e como o clima está afetando esses processos hidrológicos (SUGITA e BRUTSAERT, 2009).

As bacias BHAF e BHRP apresentaram maior correlação com a precipitação de outono, também apontando correlação significativa (p-valor de 0,046, e 0,044, respectivamente) o que indica para estas bacias hidrográficas, que a precipitação que ocorre no outono é a que mais contribui para a recarga e o armazenamento de água subterrânea. No estudo de Yang et al. (2021), a precipitação de verão é a que mais influencia na recarga do armazenamento de água subterrânea, sendo as características de recarga associadas à umidade do solo antecedente aos eventos de precipitação do período chuvoso, indicando que a circulação das águas subterrâneas está fortemente relacionada com as condições climáticas de cada região.

O método proposto por Brutsaert (2008) permite de forma simples e eficaz compreender os processos hidrológicos que envolvem a água subterrânea, como seu armazenamento e disponibilidade a partir de dados diários de vazão. Entretanto, para representar de forma significativa o armazenamento de água subterrânea e obter resultados confiáveis, este método deve ser empregado em bacias hidrográficas que

possuam baixo nível de antropização (*Pristine Catchment*), e que possuam série histórica de vazões consistente para representar temporalmente as variações no armazenamento da água subterrânea. Estas condições limitam as bacias hidrográficas que podem ser avaliadas pela aplicação desta metodologia, porém estudos como este podem auxiliar na gestão adequada dos recursos hídricos subterrâneos e superficiais (MOECK et al., 2020). Futuras aplicações desta metodologia são necessárias para ampliar o conhecimento sobre a disponibilidade de água nos aquíferos, tendo em vista que esse recurso é muitas vezes a única fonte de água para muitas regiões brasileiras.

4 Conclusões

Neste estudo, mudanças no comportamento de variáveis climáticas e hidrológicas foram analisadas com o intuito de avaliar se o armazenamento de água subterrânea em bacias hidrográficas de cabeceira, localizadas em diferentes regiões do Brasil, estão sofrendo alterações em função de mudanças no clima. Assim, foi possível concluir que:

a. os padrões hidroclimatológicos de algumas dessas bacias hidrográficas estão sendo alterados, e com isso, a recarga e o armazenamento de água nos aquíferos de 3 das 4 bacias analisadas estão sofrendo variações ao longo dos anos. A BHRB, situada da região nordeste do Brasil, foi a que mais indicou variações significativas nas séries de evapotranspiração, temperatura e vazão, enquanto a BHAF, localizada no extremo sul do país, não apresentou tendências expressivas para estas variáveis. As BHRP e BHRA indicaram tendência de aumento no armazenamento de água subterrânea, porém a forte correlação deste fator com o clima na BHRA e a divergência nos anos das séries históricas de vazão e precipitação desta bacia hidrográfica podem indicar que esse armazenamento está diminuindo nos anos mais recentes.

b. Dentre as variáveis climáticas e hidrológicas analisadas, foi possível observar a correlação com a precipitação total anual para a BHRA e BHRB, e com a precipitação de outono para a BHAF e BHRP, indicando que esta variável é a responsável pela recarga e armazenamento de água subterrânea nas diferentes regiões. Os resultados demonstram que mudanças no clima estão alterando os

indicadores hidroclimatológicos de diferentes formas nas regiões avaliadas neste estudo, e serve como um alerta importante para os gestores e tomadores de decisão, principalmente as bacias hidrográficas que indicam tendência de redução no armazenamento de água subterrânea, o que pode prejudicar de forma significativa o desenvolvimento socioeconômico dessas regiões.

Capítulo 2 – Impactos de mudanças climáticas no armazenamento subterrâneo com base em simulação hidrológica

1 Introdução

Compreender o comportamento dos processos hidrológicos e as suas implicações na disponibilidade de água é de extrema importância para o planejamento e gestão adequada dos recursos hídricos (GEBREMICAEL et al., 2019). O entendimento dos diversos fenômenos naturais associados ao ciclo hidrológico possibilitou o desenvolvimento de modelos matemáticos aplicados à hidrologia, conhecidos como modelos chuva-vazão. Tais modelos são uma representação de um sistema hidrológico do mundo real, e são utilizados para prever o comportamento do sistema e fornecer uma avaliação consistente de possíveis impactos ao meio ambiente (VIOLA et al., 2013; DEVIA et al., 2015).

As alterações climáticas globais estão entre os maiores desafios para a sociedade uma vez que se trata de uma questão ambiental crítica do século XXI, que tem impacto significativo nos recursos hídricos e no meio ambiente como um todo (AAWAR e KHARE, 2020). Diversos estudos estão sendo realizados afim de avaliar e compreender de que forma essas alterações irão afetar os componentes do ciclo hidrológico nos próximos anos, utilizando como ferramenta cenários futuros de projeções climáticas (BHATTA et al., 2019; POKHREL et al., 2021). Modelos climáticos com projeções futuras associados a modelos hidrológicos estão sendo cada vez mais utilizados para planejamento e gestão futura dos recursos hídricos, e servem como ferramentas de suporte para combater a escassez de água em diversos países (CHOKKAVARAPU e MANDLA, 2019).

Diversos modelos hidrológicos são utilizados atualmente para avaliar os complexos processos que ocorrem no interior de uma bacia hidrográfica. Dentre eles, o modelo LASH (*Lavras Simulation of Hydrology*), caracterizado por ser um modelo hidrológico determinístico, semiconceitual, espacialmente distribuído e de longo prazo, tem se mostrado um modelo robusto em representar as condições hidrológicas em diferentes regiões do Brasil (VIOLA et al., 2013; CALDEIRA et al., 2019; ANDRADE et al., 2020; CUNHA et al., 2023). Este modelo se destaca por necessitar de um pequeno número de variáveis de entrada e de parâmetros a serem calibrados, sendo aplicável a bacias hidrográficas com escassez de dados (CALDEIRA et al., 2019; VARGAS et al., 2023).

A implementação de modelos hidrológicos em linguagens de programação interpretadas tem ganhado espaço e repercussão, permitindo a utilização de dispositivos robustos, principalmente associados à calibração tais como algoritmos de otimização multiobjetivo, e alternativas para o desempenho de processamento de alto nível (VARGAS et al., 2023). O modelo LASH foi originalmente apresentado por Mello et al. (2008) e posteriormente aprimorado por Beskow et al. (2009) e Caldeira et al. (2016). Mais recentemente, Vargas et al. (2023) introduziram o modelo em linguagens de programação em R (F-LASH) e MATLAB® (M-LASH). O M-LASH foi utilizado por Cunha et al. (2023) para simulação de cenários de uso do solo e seus impactos na bacia hidrográfica do Rio Xingú, demonstrando resultados animadores.

De acordo com Silva et al. (2022) projeções futuras indicam que a região sul do estado de Minas Gerais sofrerá com vários anos consecutivos de seca ao longo do século XXI, impactando diretamente na disponibilidade de água e colocando em risco a economia e a sociedade da região. As cabeceiras de bacias hidrográficas são um componente importante das redes fluviais, pois possuem as principais nascentes dos cursos d'água e apresentam a principal área de recarga da bacia (KRECEK e HAIGH, 2000). A bacia hidrográfica do Rio Aiuruoca está localizada na cabeceira da bacia hidrográfica do Rio Grande, possui grande importância ambiental e socioeconômica na região, pois o deflúvio produzido nessa bacia hidrográfica é uma das principais fontes de abastecimento de água para usos múltiplos em muitas cidades. Além disso, a bacia possui uma importância significativa para a geração de energia do Alto Rio Grande, alimentando diretamente o reservatório da usina hidrelétrica de Camargos, o qual alimenta as usinas de Itutinga e Funil, ambas a fio d'água, e Furnas, que é o maior reservatório do Sudeste brasileiro (VIOLA et al., 2013; SILVA et al., 2022; MELLO et al. 2021).

Assim, os objetivos deste estudo foram: i) avaliar o desempenho do modelo hidrológico LASH introduzido na linguagem de programação em R (F-LASH) ao calibrar e validar o modelo para a bacia hidrográfica de cabeceira do Rio Aiuruoca (BHRA); ii) realizar simulações de cenários futuros forçado pelos *outputs* dos Modelos Climáticos Globais (GCMs) HadGEM2-ES, MIROC5, CANESM e BESM regionalizados pelo modelo ETA/CPTEC, considerando o cenário de mudanças climáticas RCP8.5 do 5º Relatório de Avaliação (Fifth Assessment Report – AR5)

projetados pelo IPCC; iii) avaliar os impactos das mudanças climáticas no tocante ao armazenamento de água subterrânea nesta bacia hidrográfica.

2 Metodologia

2.1 Área de estudo

O estudo foi conduzido na região de cabeceira da bacia hidrográfica do Rio Aiuruoca, considerando como seção de controle para delimitação do divisor de águas a estação fluviométrica Aiuruoca, constituindo assim a Bacia Hidrográfica do Rio Aiuruoca à montante da Estação Aiuruoca (BHRA-EA). A bacia encontra-se localizada no estado de Minas Gerais (Figura 8), possui área de drenagem de aproximadamente 532 km² e sua altitude varia entre 968 m e 2644 m. A precipitação média anual na BHRA-EA é de 1461,33 mm, e seu clima é Cwb, caracterizado por apresentar inverno frio e seco e verão suave e úmido (BECK et al., 2018), com temperatura média anual de 19,4 °C.

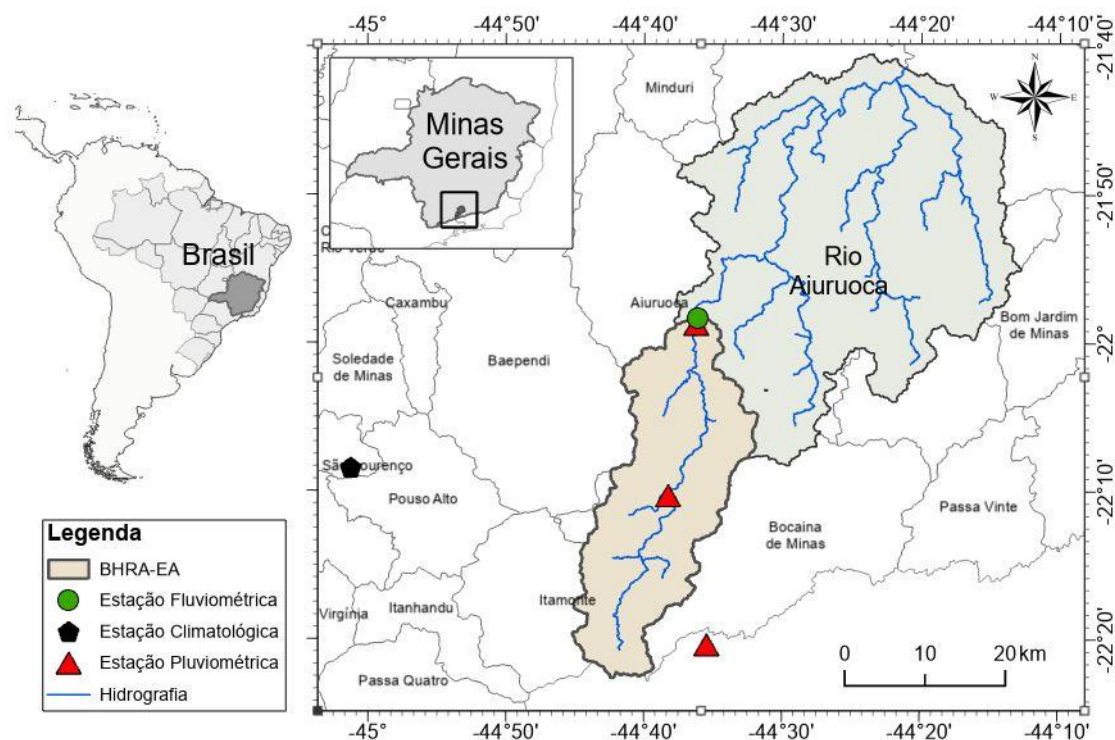


Figura 8 – Localização da BHRA e das estações de pluviométricas e climatológica.

2.2 Base de dados temporais e espaciais

As bases de dados temporais e espaciais foram constituídas a partir das informações requeridas pela versão F-LASH (VARGAS, 2023) do modelo hidrológico LASH, a qual foi escolhida para esse estudo.

Para compor a base de dados temporais foram empregadas séries históricas de: i) vazão média diária, observada na estação fluviométrica Aiuruoca (código 61024000), da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA); ii) chuva total diária, observada nas estações pluviométricas Aiuruoca (código 2144018), Alagoa (código 2244065) e Fazenda Agulha Negra (código 2244039), da ANA; e iii) de temperaturas máxima e mínima diária, observadas na estação meteorológica São Lourenço, do Instituto Nacional de Meteorologia (INMet). A localização das estações pode ser visualizada na Figura 8.

A base de dados espaciais contemplou relevo, solo e uso do solo. O mapa hipsométrico da BHRA-EA (Figura 9a) foi constituído com base no Modelo Digital de Elevação (MDE) SRTM com resolução de 30m disponibilizado pelo *United States Geological Survey* (USGS). A partir do MDE e de processamentos em ambiente de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), obteve-se a rede de drenagem numérica e procedeu-se a divisão da BHRA-EA em 21 sub-bacias, com área de drenagem entre 2,32 e 101,48 km². Tal divisão foi necessária porque a modelagem hidrológica foi conduzida de forma distribuída por sub-bacias hidrográficas.

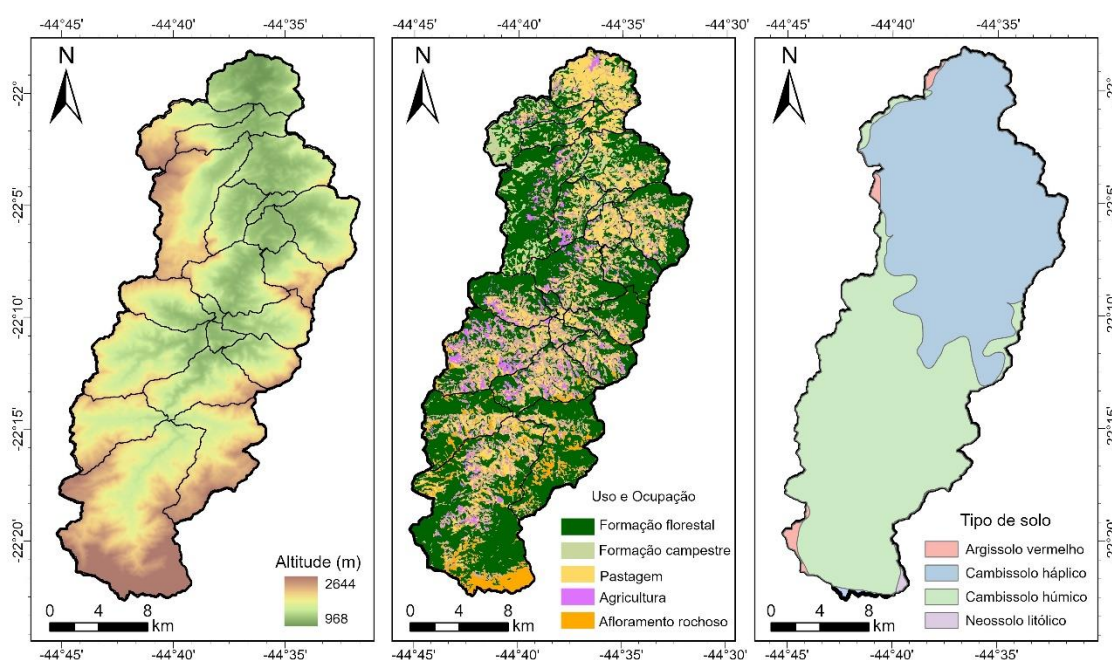


Figura 9 – Mapas de altitude, uso e ocupação do solo e tipo de solo para as 21 subbacias.

O mapa de uso e ocupação do solo da BHRA-EA (Figura 2b) foi obtido junto à Coleção 7 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil do MapBiomas (2021). A BHRA-EA possui 50,75% da área coberta por formação florestal, 23,07% por agricultura, 17,28% por pastagem, 4,85% por afloramento rochoso e 4,05% por formação campestre. Considerando os dados requeridos pelo modelo F-LASH, para cada classe de uso e ocupação do solo mencionada foram obtidos na literatura valores de referência para Índice de Área Foliar (IAF), profundidade do sistema radicular e o coeficiente de cultura (kc) (Tabela 3).

Tabela 3 – Valores de referência para parâmetros de uso e cobertura do solo obtidos da literatura para cada classe encontrada na BHRA-AE

Classe de uso e ocupação	IAF (m ² m ⁻²)	Profundidade do sistema radicular (mm)	Kc
Formação florestal	6,25	2000	1
Agricultura	0,3 – 7	500	0,3 a 1,15
Pastagem	1,86-3,99	600	0,3 a 1
Afloramento rochoso	0	500	0,3
Formação campestre	1,9	2000	0,7

O mapa de solos da BHRA-EA (Figura 9c) foi obtido em CETEC, FEAM, UFV, UFLA (2010), a partir do mapa de solos de Minas Gerais. Predominam na bacia Cambissolo Húmico e Cambissolo Háplico, estando o primeiro em regiões de maiores altitudes e, o segundo, de menores altitudes. Ainda são encontrados fragmentos de Argissolo vermelho e Neossolo litólico, porém, como correspondem a áreas relativamente pequenas, tais classes foram desconsideradas nesse estudo. Assim, valores de referência para profundidade do solo e umidade do solo nos pontos de murcha permanente (θ_{PMP}) e de saturação (θ_{sat}) foram obtidos da literatura para as classes predominantes (Tabela 4).

Tabela 4 – Valores de referência para parâmetros de solo obtidos da literatura para cada classe encontrada na BHRA-AE

Classe de solo	θ_{PMP} (cm ³ cm ⁻³)	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	Profundidade do solo (mm)
Cambissolo Háplico	0,171	0,597	1000
Cambissolo Húmico	0,159	0,571	1000

Fonte: Junqueira Júnior et al. (2009) e Viola et al. (2009).

2.3 Calibração e validação do modelo hidrológico LASH

A modelagem hidrológica foi realizada considerando o período de 1999 a 2013. O ano de 1999 foi empregado para aquecimento do modelo F-LASH, tendo em vista a redução das incertezas associadas as condições hidrológicas iniciais (OLIVEIRA et al., 2023). Dados de 2000 a 2006 foram utilizados para calibração do modelo, enquanto os dados de 2007 a 2013 foram empregados na validação.

A calibração do modelo F-LASH consistiu no ajuste de 6 parâmetros: i) coeficiente de abstração inicial (λ); ii) condutividade hidráulica do reservatório subsuperficial (K_{ss} ; mm/dia); iii) condutividade hidráulica do reservatório subterrâneo (K_b ; mm/dia); iv) parâmetro de tempo de resposta do reservatório superficial (C_s); v) parâmetro de tempo de resposta do reservatório subsuperficial (C_{ss}); e vi) parâmetro de tempo de retardo do escoamento de base (C_b ; dias). A estratégia de calibração adotada a concentrada, ou seja, o ajuste de um único valor para cada parâmetro de modo representativo para a bacia como um todo. A calibração foi mono-objetivo e a maximização do coeficiente de Nash-Sutcliffe (CNS, Equação 15) foi a função escolhida. O CNS varia de $-\infty$ a 1 e quantificar a eficiência do modelo na estimativa do hidrograma especialmente em períodos de cheia.

$$C_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{obs_t} - Q_{est_t})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs_t} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (15)$$

Onde Q_{obs_t} é a vazão observada no tempo $t=i$, Q_{est_t} é a vazão estimada no tempo $t=i$, $\overline{Q_{obs}}$ é a vazão média observada, $\overline{Q_{est}}$ é a vazão média estimada e N é o número de ordenadas do hidrograma.

A etapa de validação se baseou no *Split Sample Test* (KLEMEŠ, 1986). Empregou-se os parâmetros calibrados com base em dados observados entre 2000 e 2006 para estimar o hidrograma entre 2007 e 2013. O hidrograma estimado foi comparado ao hidrograma observado através das medidas estatísticas CNS, sua versão para valores logaritmizados (CNS-LOG, Equação 16), o coeficiente de

tendência (Pbias, Equação 17) e a raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE), Equação 18.

$$C_{NS-LOG} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\log(Q_{Obs_t}) - \log(Q_{Est_t}))^2}{\sum_{i=1}^N (\log(Q_{Obs_t}) - \log(\overline{Q_{Obs}}))^2} \quad (16)$$

$$P_{BIAS} = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{Obs_t} - Q_{Est_t})}{\sum_{i=1}^N (Q_{Obs_t})} \cdot 100 \quad (17)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (Q_{Obs_t} - Q_{Est_t})^2} \quad (18)$$

Onde Q_{Obs_t} é a vazão observada no tempo $t=i$, Q_{Est_t} é a vazão estimada no tempo $t=i$, $\overline{Q_{Obs_t}}$ é a vazão média observada, $\overline{Q_{Est_t}}$ é a vazão média estimada e N é o número de ordenadas do hidrograma.

Os limites destas estatísticas de precisão são: PBIAS $(-\infty - +\infty)$ e RMSE $[-\infty - +\infty)$. O CNS-LOG $(-\infty$ a 1) possibilita verificar a capacidade do modelo em estimar vazões de estiagem. O PBIAS $(-\infty$ a $+\infty)$ pode ser empregado de forma complementar, sendo que seu valor ideal é 0, indicando a simulação precisa do modelo. Além disso, valores positivos indicam superestimativa e valores negativos, subestimativa e, de acordo com Moriasi et al. (2015), pode ser usado para determinar quão bem o modelo simula as magnitudes médias das vazões. Em suma, o PBIAS avalia erros no balanço hídrico com capacidade para identificar, caso haja, baixo desempenho do modelo (MORIASI et al., 2007). O RMSE $(-\infty$ a $+\infty)$ também foi adotado porque adiciona às métricas de desempenho uma estatística de índice de erro absoluto, estimando a variância residual (Moriasi et al., 2007) e pode ser avaliado, segundo Singh et al. (2005), em comparação com o desvio padrão (DP) dos dados observados, de modo que podem ser considerados baixos valores de RMSE aqueles menores que a metade do DP dos dados observados. As métricas acima podem ser classificadas conforme os intervalos apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Classificação da performance do modelo com base em intervalos de valores para as medidas estatísticas adotadas

Índice estatístico	Classificação da performance		
	Muito bom	Bom	Satisfatório
C_{NS}^*	$>0,65$	$0,54 - 0,65$	$<0,54$
C_{NS-LOG}^*	$>0,65$	$0,54 - 0,65$	$<0,54$
PBIAS**	$< \pm 10\%$	$\pm 10\% - \pm 15\%$	$\pm 15\% - \pm 25\%$

*Classificação de Moriasi et al. (2007); **Classificação de Kouchi et al. (2017).

2.4 Simulação hidrológica com base em projeções do clima futuro

Uma vez calibrado e validado o modelo F-LASH, foi realizada a etapa de simulação com base em projeções do clima futuro. Essas projeções foram obtidas junto a plataforma PROJETA – Projeções de Mudanças do Clima para a América do Sul regionalizadas pelo Modelo Eta (CHOU et al., 2014). A plataforma disponibiliza projeções de diversas variáveis climáticas geradas por regionalização (*downscaling*) pelo Modelo Climático Regional (MCR) Eta dos Modelos Climáticos Globais (MCG's) MIROC5, HadGEM2-ES, CanESM2 e BESM. Nesse estudo foram utilizadas projeções baseadas no cenário 8.5 do 5º Relatório de Avaliação (Fifth Assessment Report – AR5) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2014), o qual, apesar de ser entendido como mais pessimista em relação à emissão de gases do efeito estufa, pois considera um aumento contínuo da temperatura média até o final do século XXI, é o que vem sendo observado na última década na maior parte do Brasil (BRITO et al., 2023; BRITO et al., 2022). As projeções de chuva diária entre 2006 e 2099 foram obtidas pontualmente para as coordenadas de latitude e longitude das estações pluviométricas consideradas, conforme Figura 1. As projeções de temperatura mínima e máxima diária para o mesmo período foram obtidas para as coordenadas de latitude e longitude da estação meteorológica.

De acordo com Melo et al. (2022) ao analisar os modelos separadamente é possível avaliar uma gama de possíveis resultados de cenários futuros, portanto, para reduzir as incertezas dos processos de parametrização e estrutura de cada modelo, é indicado fazer uma média multi-modelo do conjunto, denominada como “Ensemble” (IPCC 2007). Não foi realizada a correção de viés para os dados dos modelos obtidos para este estudo.

Os impactos de mudanças climáticas projetadas pelos MCG's serão avaliados no contexto do escoamento base, aplicando-se o procedimento de Brutsaert (2008) (conforme descrito no capítulo anterior) para analisar o comportamento do armazenamento de água subterrânea na BHRA-EA.

3 Resultados e Discussão

3.1 Calibração e validação do modelo LASH

A Tabela 6 apresenta a otimização dos parâmetros de maior sensibilidade do modelo LASH calibrados para a BHRA-EA.

Tabela 6 – Calibração dos parâmetros do modelo F-LASH.

Parâmetro	Unidade	Variação	Valor final
λ	-	0,01 - 0,20	0,01
Kss	mm/dia	0,10 - 180	147,23
Kb	mm/dia	0,10 - 6	6
Cs	-	-	60,14
Css	-	-	1281,59
Cb	dia	-	100,83

O parâmetro λ está diretamente relacionado com a parcela da precipitação que ocorre antes do início da geração do escoamento superficial direto (CALDEIRA et al., 2019) (abstração inicial da chuva). Sendo que tende a variar de acordo com os diferentes tipos de solo e uso e ocupação das sub-bacias (VARGAS et al., 2023), pois está associado à interceptação pelo dossel e infiltração de água no solo. O valor de λ de 0,01 ficou no limite inferior da taxa de variação do parâmetro para a calibração, porém Andrade et al. (2020), que aplicou outra versão do modelo LASH para a mesma região em Minas Gerais, também encontrou valores próximos a 0,01 para áreas agrícolas em Cambissolos e Neossolos Litólicos, em locais com declividade mais elevada, como em regiões de cabeceira, o que acaba influenciando na geração do escoamento superficial direto.

Os parâmetros Kss e Kb estão relacionados a condutividade hidráulica dos reservatórios subsuperficiais e subterrâneos, respectivamente, e são dependentes

dos tipos de solo existentes na bacia hidrográfica (CALDEIRA et al., 2019; VARGAS et al., 2023). O alto valor encontrado na calibração para o parâmetro K_{ss} está relacionado às boas condições de infiltração de água no solo encontradas na região onde a BHRA-EA está localizada conforme relatado por Pinto et al. (2015), o que está associado à condutividade hidráulica do solo. Na análise de sensibilidade do modelo LASH realizada por Viola et al. (2013) o parâmetro K_b foi um dos que mostrou maior sensibilidade, o que os autores associaram à elevada parcela de contribuição do escoamento de base para as bacias hidrográficas da região Alto Rio Grande. Andrade et al. (2020) encontraram os maiores valores de K_b em áreas nativas, corroborando com os resultados encontrados neste estudo, pois a BHRA-EA é majoritariamente constituída por áreas de formação florestal, e por isso o parâmetro K_b corresponde ao maior valor na taxa de variação para calibração (6).

Os parâmetros C_s , C_{ss} e C_b estão relacionados ao esvaziamento dos reservatórios superficial, sub-superficial e subterrâneo, exercendo influência na dinâmica do fluxo tanto em magnitude como no tempo (VARGAS et al., 2023). O valor do parâmetro C_s calibrado de 60,14 está relacionado ao tempo de concentração das sub-bacias, sendo que as que apresentam maior declividade tendem a gerar escoamento superficial direto mais rápido (ANDRADE et al., 2020), influenciando em valores elevados de C_s e C_{ss} . Apesar do valor elevado de C_{ss} em comparação aos parâmetros C_s e C_b , Vargas et al. (2023) também encontraram um valor alto no C_{ss} , e explicam que o valor é fisicamente possível, sendo que o C_{ss} é um fator multiplicativo do tempo de concentração do escoamento subterrâneo. O parâmetro C_b é particularmente importante para compreender o comportamento do escoamento de base (CALDEIRA et al., 2019), tendo sido encontrado o valor de aproximadamente 100 dias. Este resultado é semelhante ao encontrado por Oliveira et al. (2023), com C_b de 105 dias para a bacia hidrográfica do Rio Verde, também no sul de Minas Gerais.

Os hidrogramas observado e estimado para os períodos de calibração e validação, bem como suas estatísticas de precisão, podem ser visualizados na Figura 10.

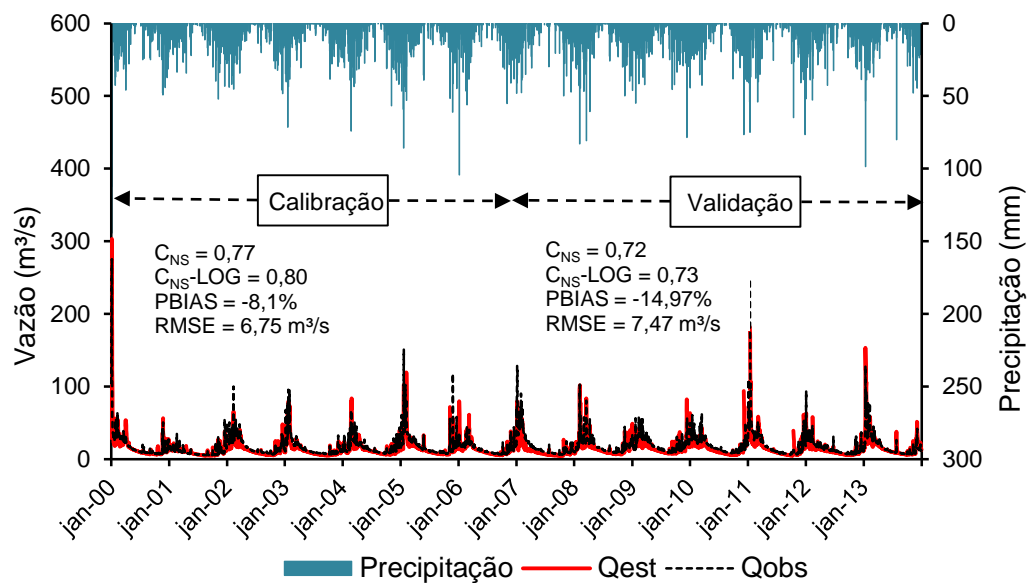


Figura 10 – Hietograma e hidrogramas diários dos dados observados e estimados para o período de calibração e validação.

É possível observar que o modelo F-LASH simulou de forma adequada as vazões na BHRA-EA, apresentando boas estatísticas para os períodos de calibração e validação. Ao classificar a performance dos índices estatísticos de ambos os períodos, a calibração apresentou resultados classificados como muito bons para todos os índices (Figura 7). Para o período de validação, os índices classificados como muito bons foram o CNS, CNS-LOG e RMSE, com valores de 0,71, 0,73 e 7,47 respectivamente, enquanto o valor de PBIAS -14,97 foi classificado como bom. As estatísticas para o período de calibração foram similares aos resultados encontrados por Viola et al., (2013), que utilizou outra versão do modelo LASH também na bacia hidrográfica do rio Aiuruoca, porém em uma estação de monitoramento a jusante, cobrindo uma área de aproximadamente 2.000 km². Os valores encontrados pelos autores para os índices de CNS e CNS-LOG foram, respectivamente, de 0,76 e 0,78 para a calibração e de 0,78 e 0,83 para a validação. Os resultados encontrados neste estudo foram ligeiramente superiores para o período de calibração, porém inferiores para a validação do modelo. Essas diferenças podem estar associadas ao período analisado, sendo que Viola et al. (2013) utilizaram o período entre 1990 e 2003, na consistência dos dados das séries históricas de vazão de cada estação de

monitoramento, e da versão do modelo LASH utilizada. Porém, ambos estudos apresentaram bons índices estatísticos, indicando que o modelo LASH em suas diferentes versões se mostrou adequado para representar as variáveis hidrológicas na região sul de Minas Gerais.

Na Figura 10, pode-se observar a boa concordância entre os dados observados e estimados pelo modelo, contudo, para o ano de 2011 foi encontrada a maior discrepância entre os dados observados e simulados, sendo que a vazão observada foi superior a vazão estimada. Este comportamento pode ter influenciado nos valores dos índices estatísticos para o período de validação, os quais foram inferiores aos da calibração. Para a melhor compreensão das vazões máximas, médias e mínimas anuais, a Figura 11 apresenta o gráfico 1:1 das vazões observadas *versus* simuladas separadas para o período de calibração e validação.

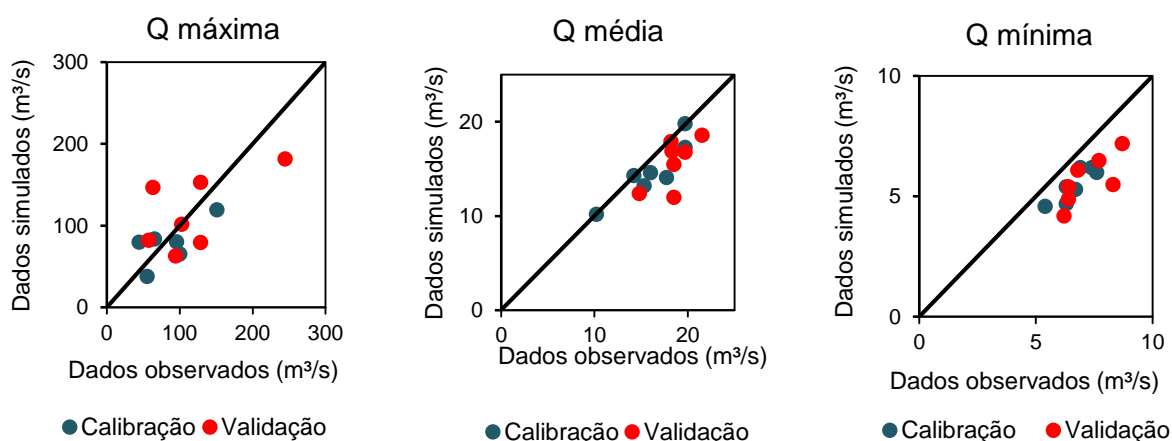


Figura 11 – Vazões máximas, médias e mínimas anuais observada *versus* estimada pelo modelo F-LASH.

A partir da Figura 8, observa-se que as vazões médias e mínimas anuais simuladas representaram de forma satisfatória os dados observados na BHRA-EA, em ambos os períodos. Porém, pode-se notar que o modelo subestimou alguns picos de vazão, principalmente para o período de validação. No estudo realizado por Carvalho et al. (2022), o modelo LASH foi capaz de representar de forma adequada os fluxos na bacia hidrográfica do Rio Verde, também situada no sul de Minas Gerais, porém com alguns picos de vazão subestimados. Os autores associaram esses desvios à discretização espacial dos dados de entrada do modelo, sendo que eles consideraram a precipitação média diária constante em toda a bacia hidrográfica. De

acordo com Viola et al. (2009) a subestimação dos picos de vazão é comum na modelagem hidrológica, pois os modelos hidrológicos apresentam limitações decorrentes de inúmeros fatores, desde a variabilidade espacial dos dados de entrada e o intervalo de tempo adotado no modelo. O comportamento do escoamento base, representada pela vazão mínima consecutiva de 7 dias (Q_7), está representado na Figura 12.

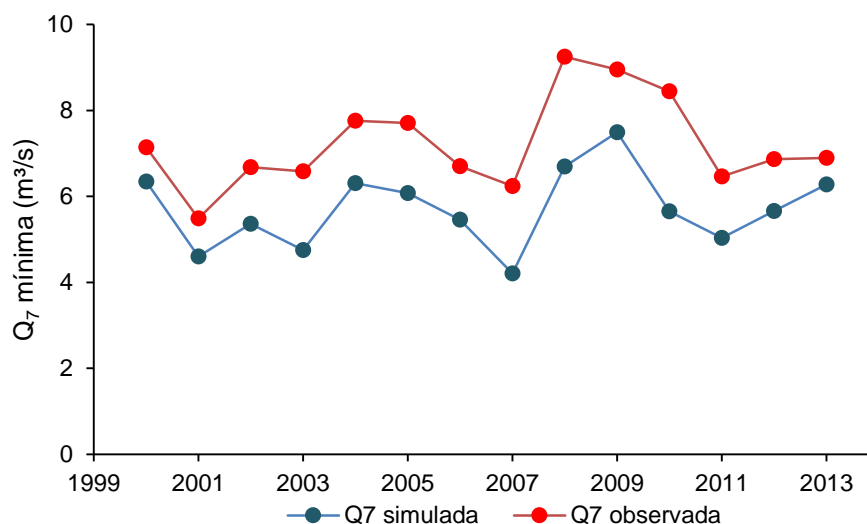


Figura 12 – Comportamento da Q_7 observada *versus* estimada pelo modelo F-LASH.

Observa-se que o modelo foi capaz de representar de forma satisfatória o comportamento da Q_7 na BHRA-EA, especialmente no período o final do período de validação. Embora os dados simulados tenham sido subestimados, Cheng et al. (2020) explicam que essa subestimativa pode estar associada a incertezas no processo de calibração do parâmetro relacionado ao escoamento de base, considerando que a função objetivo de calibração foi mono-objetivo considerando o parâmetro C_{NS} . De acordo com Lo et al. (2008) é difícil representar de forma precisa o fluxo de base separado do escoamento total a partir de um modelo hidrológico, mas ao identificar concordância no comportamento e valores relativamente semelhantes, principalmente para a validação, o modelo se mostra capaz de simular de forma adequada o escoamento base.

Embora os resultados das estatísticas de precisão do modelo tenham se mostrado ligeiramente inferiores quando comparadas a outros trabalhos que utilizaram o modelo LASH na mesma região, é importante destacar que a versão F-

LASH requer menos variáveis climáticas de entrada do que outras versões do modelo. Por exemplo, em versões anteriores, a evapotranspiração é calculada a partir da equação de Penman-Monteith (BESKOW et al., 2011; VIOLA et al., 2013), que requer dados de radiação solar, umidade relativa do ar e velocidade do vento, enquanto na versão F-LASH do modelo utiliza a equação de Hargreaves e Samani (1985), que necessita apenas das temperaturas máxima e mínima diária.

3.2 Simulação hidrológica e projeção do cenário futuro do armazenamento de água subterrânea

Para avaliar o comportamento futuro do armazenamento de água subterrânea (S), a vazão mínima consecutiva de 7 dias (Q7) foi extraída da série de vazões diárias simuladas a partir dos dados dos modelos climáticos para o cenário RCP8.5, para o período entre 2006 e 2099, considerando o ensemble dos modelos climáticos. Posteriormente, para aplicar o método de Brutsaert (2008), a Q7 foi multiplicada pela característica temporal do processo de drenagem (K) de 78 dias para a BHRA-EA, conforme descrito no capítulo anterior. O armazenamento anual de água subterrânea na BHRA-EA para a projeção de cenário futuro está representado na Figura 13.

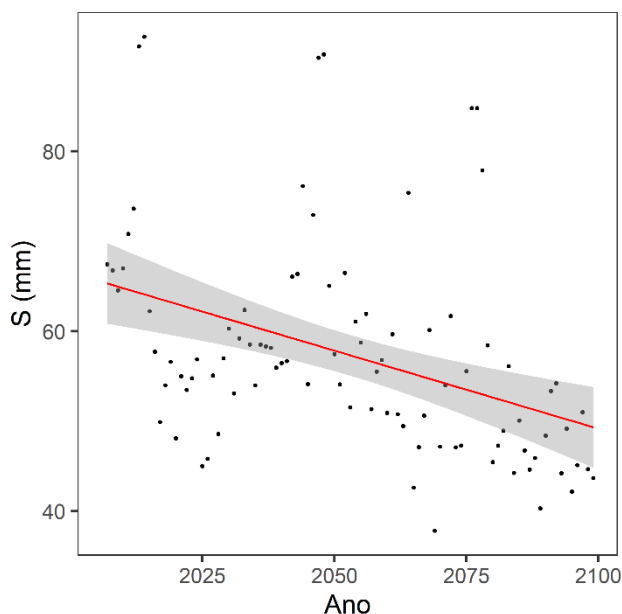


Figura 13 – Armazenamento anual de água subterrânea na BHRA-EA projetado pela média dos modelos para o cenário futuro RCP8.5.

É possível observar uma tendência de redução do armazenamento de água subterrânea ao longo dos anos, principalmente entre o período entre 2080 e 2099. O teste de Mann-Kendall foi aplicado ao nível de significância de 5% para avaliar se a tendência é significativa, e o p-valor encontrado foi de $6,87 \times 10^{-6}$, indicando que essa tendência é relevante no cenário futuro projetado para a BHRA-EA. O teste de Sen'slope foi utilizado para quantificar a que taxa essa redução poderá ocorrer, e foi encontrado o valor de 0,16 mm/ano, indicando uma redução significativa no armazenamento de água na região ao longo do século, o que poderá afetar diretamente os setores social, econômico e ambiental.

A redução de armazenamento de água subterrânea para a BHRA-EA implica na diminuição da disponibilidade de água, tendo em vista sua relação direta com o escoamento de base. Ao avaliar as sub-bacias que compreendem a região de cabeceira da bacia hidrográfica do Alto Rio Grande – Furnas (BHARG-F), dentre elas a BHRA, os resultados encontrados por Mello et al. (2021) demonstram que o escoamento de base é o componente dominante na BHRA, e possui um elevado potencial de produção de água que vêm sendo utilizada para produção de energia elétrica. Portanto, a redução no armazenamento de água subterrânea irá afetar não somente questões ambientais na região, mas também sociais e econômicas, tendo em vista a redução de vazão projetada ao decorrer do século.

Tendo em vista a correlação do armazenamento de água subterrânea com a precipitação na BHRA-EA encontrada no capítulo anterior, a precipitação total anual projetada pela média dos modelos climáticos para o cenário RCP8.5 também foi avaliada para o período entre 2006 e 2099 afim de auxiliar a compreensão da redução no armazenamento de água subterrânea, conforme apresentado na Figura 14.

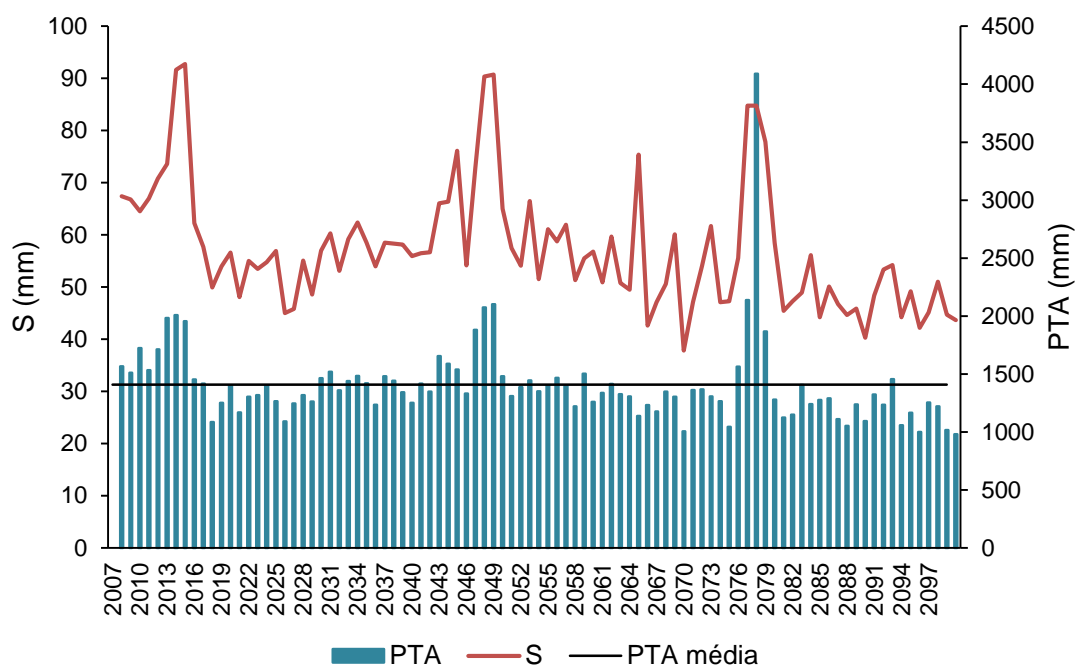


Figura 14 – Projeção da precipitação total anual (PTA) e do armazenamento de água subterrânea (S) ao longo do século.

Os anos em que a precipitação total anual foi maior do que a média calculada para as projeções, de 1409,24mm, foram os que apresentaram as maiores taxas de armazenamento de água subterrânea, com valores de armazenamento variando entre 92mm em 2014, 90mm em 2046 e 84,79mm em 2078.

Contudo, nota-se a projeção de períodos longos de precipitação abaixo da média como de 2016 a 2028, 2061 a 2076, e a mais pronunciada no fim do século entre 2080 e 2099. Segundo Silva e Mello (2021) a região sul de Minas Gerais sofreu com fortes secas entre os anos de 2013 e 2020, corroborando com as projeções deste período e indicando que os próximos anos tendem a continuar com índice pluviométrico anual abaixo da média projetada. A partir do ano de 2080 é possível observar a redução significativa de precipitação até o ano de 2099, o que influenciará consequentemente na diminuição de vazões no curso d'água e no armazenamento de água subterrânea. Esse resultado corrobora com os encontrados por Mello et al. (2021) que também encontraram redução de escoamento, principalmente o de base, com redução mais pronunciada para o final do século (2071-2099) pelo cenário RCP8.5 ocasionado pela redução de precipitação para o período chuvoso da região (dezembro, janeiro, fevereiro, março e abril).

No Brasil poucos estudos avaliam o impacto das mudanças climáticas sobre a água subterrânea, tendo em vista que esse recurso é, em muitos locais do país, a única fonte de água potável. No estudo de Bettencourt et al. (2022), realizado na bacia hidrográfica do Rio São Francisco com cenário futuro de escassez hídrica, os autores identificaram que a água subterrânea permaneceu mais estável do que as águas superficiais, podendo ser a fonte principal de água para suprir a demanda da região até o ano de 2035. No entanto, os autores afirmam que a falta de conhecimento sobre esse recurso cria incertezas sobre seu adequado uso e exploração. Para a região norte do estado do Rio de Janeiro, Cordeiro et al. (2021) identificaram redução de recarga e, conseqüentemente, armazenamento de água subterrânea para o cenário futuro de mudança climática RCP8.5 projetada pelo modelo HadGEM-2ES até o ano de 2070, que aponta que a região tende a ficar mais quente e seca até o final do século. Os autores explicam que para melhorar a manutenção e avaliação da água subterrânea, medidas devem ser tomadas por parte do setor público e privado assegurando trabalhos de campo e investindo em equipamentos que melhorem as perspectivas de modelagem desses recursos, além de investir em políticas de gestão que sejam eficazes para assegurar a disponibilidade hídrica no futuro.

De acordo com Peterson-Perlman et al. (2022), embora a compreensão dos sistemas hídricos subterrâneos tenha aumentado nos últimos anos, os avanços governamentais não acompanharam o ritmo da adequada gestão dos recursos hídricos, tendo em vista sua importância para assegurar a disponibilidade hídrica futura. Em estudos que demonstram a efetividade de planos governamentais visando compreender os processos de recarga e armazenamento de água subterrânea, como o realizado por Zheng et al. (2020), onde autores demonstram que políticas públicas eficazes podem auxiliar a reduzir o impacto de mudanças climáticas e de usos do solo nas águas subterrâneas, através da redução de áreas agrícolas atrelado a gestão adequada do solo e dos recursos hídricos. Com isso, destaca-se a importância de estudos sobre o impacto das mudanças climáticas nos recursos hídricos subterrâneos, haja vista sua relevância para o desenvolvimento econômico e social nas mais diversas regiões do Brasil.

É importante destacar que este estudo apresenta limitações em sua metodologia que podem gerar incertezas nos resultados. Uma delas está relacionada com a baixa densidade de estações meteorológicas na região sul do estado de Minas

Gerais, conforme relatado por Melo et al. (2022), influenciando na baixa representatividade dos processos climatológicos da região, o que reflete nos processos associados à modelagem hidrológica. O uso de projeções climáticas de cenários futuros também apresenta limitações, sendo que modelos climáticos possuem incertezas relacionadas a sua formulação e regionalização dos dados (*downscaling*) (OLIVEIRA et al., 2017). Embora a metodologia apresente limitações, os resultados deste estudo corroboram com outras pesquisas que indicam redução de precipitação na região sul de Minas Gerais (MELLO et al., 2021; SILVA e MELLO, 2021), o que possibilita inferir que o armazenamento de água subterrânea na BHRA-EA irá diminuir no decorrer do século XXI, indicando redução na disponibilidade hídrica da região.

4. Conclusões

Este estudo buscou avaliar o desempenho da versão do modelo LASH na linguagem de programação em R (F-LASH) em prever o escoamento da BHRA-EA, situada no sul do estado de Minas Gerais, para posteriormente simular o impacto das mudanças climáticas no armazenamento de água subterrânea na bacia hidrográfica a partir dos dados dos modelos climáticos (MCG's) HadGEM2-ES, MIROC5, CANESM e BESM para o cenário de projeções futuras RCP8.5. Diante disto, foi possível concluir que:

a. a versão F-LASH simulou de forma satisfatória o escoamento na BHRA-EA, apresentando boas performances dos índices estatísticos, especialmente para o período de calibração (CNS 0,77, CNS-LOG 0,80, PBIAS -8,71% e RMSE 6,75 m³/s), enquanto a validação apresentou índices menores (CNS 0,72, CNS-LOG 0,73, PBIAS -14,97 e RMSE 7,47 m³/s). O modelo apresentou boa concordância entre os dados observados e simulados, e por necessitar de menos variáveis de entrada, se mostra como uma excelente ferramenta de modelagem hidrológica em regiões com escassez de dados.

b. os dados projetados pelos MCG's indicam redução de precipitação ao longo do século XXI para a BHRA-EA, e conseqüentemente para o armazenamento de água subterrânea, com diminuição de 0,16mm/ano. Esta bacia apresenta grande

importância para o desenvolvimento socioeconômico da região, pois abastece diversos municípios e faz parte da região de cabeceira da bacia hidrográfica do Rio Grande, que possui um dos maiores reservatórios do sudeste do país. Diante disto, destaca-se a importância do planejamento e gestão adequados dos recursos hídricos na região, visando assegurar a disponibilidade de água diante de cenário de mudanças no clima, tendo em vista a forte correlação da vazão neste curso d'água com a precipitação. Os resultados deste estudo podem auxiliar no entendimento de como as alterações climáticas irão afetar a região e direcionar esforços para que as consequências sejam as menores possíveis tanto para a sociedade quanto para o meio ambiente.

Considerações finais

Compreender os processos hidrológicos de uma região é importante para auxiliar na gestão adequada dos recursos hídricos, visando assegurar sua disponibilidade para as gerações futuras. Alterações no clima estão sendo cada vez mais evidenciadas em diversos locais do mundo, gerando danos ambientais, sociais e econômicos. O armazenamento de água subterrânea é relevante no contexto dos impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos, sendo o escoamento de base, proveniente de aquíferos não confinados, o responsável por manter os rios em épocas de estiagem. No Brasil muitas regiões são abastecidas unicamente por águas subterrâneas, porém poucos são os estudos que avaliam sua recarga e armazenamento.

Este estudo avaliou o comportamento temporal do armazenamento de água subterrânea, utilizando apenas dados diários de vazão, em 4 bacias hidrográficas localizadas em diferentes regiões do Brasil, com características climáticas, topográficas e hidrológicas distintas. Diante dos resultados encontrados, foi possível inferir que as alterações climáticas globais estão impactando 3 das 4 bacias hidrográficas analisadas, variando entre tendências de aumento no armazenamento de água subterrânea (BHRP), e de redução, evidenciando ainda um clima mais quente e seco para as BHRA e BHRB.

A simulação hidrológica com base em projeção de cenário futuro de mudanças climáticas é uma excelente ferramenta que possibilita compreender os possíveis danos ambientais e sociais em um cenário futuro de clima mais quente. Foi identificado na região de cabeceira da BHRA longos períodos de precipitação abaixo da média, resultando em anos consecutivos de seca, o que implica na redução dos escoamentos na região, principalmente o de base.

Com isso, destaca-se a importância de estudos que avaliem o impacto das mudanças no clima sobre os recursos hídricos nas diferentes regiões do Brasil. Cabe salientar que nesta pesquisa foram avaliadas apenas 4 bacias hidrográficas com características climatológicas locais, sugerindo-se assim, a avaliação de outras regiões para a maior compreensão dos impactos das alterações climáticas nos diversos ambientes encontrados no Brasil, podendo ser um espaço interessante para futuras pesquisas.

Referências

- AAWAR, T., KHARE, D. Assessment of climate change impacts on streamflow through hydrological model using SWAT model: a case study of Afghanistan. *Model. Earth Syst. Environ.* 6, 1427–1437 (2020). <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00759-0>
- Agência Nacional de Aguas (ANA). Atlas Brasil: abastecimento urbano de água: panorama nacional/Agência Nacional de Aguas. Engecorps/Cobrape: Engecorps/Cobrape—Brasília: ANA, 2010.
- ALVARES, C. A., STAPE, J. L., SENTELHAS, P. C., SPAROVEK, J. L. M. G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorol Z* 22(6):711–728, 2013. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- ANDRADE, N.P.V.; VIOLA, M.R.; BESKOW, S.; CALDEIRA, T.L.; GUO, L.; MELLO, C.R. Assessment of Spatial and Temporal Soil Water Storage Using a Distributed Hydrological Model. *Water Resour. Manag.* 34, 5031 – 5046, 2020.
- ATAWNEH, D. A., CARTWRIGHT, N., BERTONE, E. Climate change and its impact on the projected values of groundwater recharge: A review, *Journal of Hydrology*, Volume 601, 2021, 126602, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126602>.
- BECK, H. E., N. E. ZIMMERMANN, T. R., MCVICAR, N., VERGOPOLAN, A., BERG, E. F. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data* 5:180214, doi:10.1038/sdata.2018.214 (2018)
- BHATTA, B., SHRESTHA, S., SHRESTHA, P., TALCHABHADEL, R. Evaluation and application of a SWAT model to assess the climate change impact on the hydrology of the Himalayan River Basin. *Catena*, v. 181, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104082>.
- BHANGAONKAR, R., FENNELL, S. Role of knowledge in the management of groundwater-use for irrigation in micro-watersheds of semi-arid India. *Water resources development*, 38:5, 861-879. 2021. DOI: 10.1080/07900627.2021.1921710
- BESKOW, S. LASH Model: a hydrological simulation tool in GIS framework. 2009. 118p. *Tese* (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Lavras. Lavras, Minas Gerais.
- BESKOW, S.; MELLO, C.R.; NORTON, L.D.; SILVA, A.M. Performance of a distributed semi-conceptual hydrological model under tropical watershed conditions. *Catena* 2011, 86, 160–171
- BETTENCOURT, P., OLIVEIRA, R. P., FULGÊNCIO, C., CANAS, A., WASSERMAN, J. C. Prospective Water Balance Scenarios (2015–2035) for the Management of São Francisco River Basin, Eastern Brazil. *Water* 2022, 14(15), 2283; <https://doi.org/10.3390/w14152283>

BORGHETTI, N. R. B.; BORGHETTI, J. R.; ROSA FILHO, E. F. **Aquífero Guarani: a verdadeira integração dos países do MERCOSUL**. Curitiba: Imprensa Oficial, 2004.

BRITO, A. L., VEIGA, J. A. P., CORREIA, F. W. S., MICHILES, A. A. Impacts of greenhouse gases and deforestation in Amazon Basin climate extreme indices. **Clim Res** 2022, 88:39-56. <https://doi.org/10.3354/cr01694>

BRITO, A. L., P. VEIGA, J. A., CORREIA, F. S., MICHILES, A. A., CAPISTRANO, V. B., CHOU, S. C., LYRA, A., & MEDEIROS, G. Impacts of increasing greenhouse gas concentrations and deforestation on extreme rainfall events in the Amazon basin: A multi-model ensemble-based study. **International Journal of Climatology**, 2023, 43(12), 5512-5535. <https://doi.org/10.1002/joc.8158>

BRUTSAERT, W. Long-term groundwater storage trends estimated from streamflow records: Climatic perspective. **Water Resources Research**, 44(2): W02409, 2008.

BRUTSAERT, W., NIEBER, J.L. Regionalized Drought Flow Hydrographs from a Mature Glacial Plateau. **Water Resources Research**, 13(3): 637-643, 1977.

CALDEIRA, T.L.; MELLO, C.R.; BESKOW, S.; TIMM, L.C.; VIOLA, M.R. LASH hydrological model: An analysis focused on spatial discretization. **Catena** 2019, 173, 183–193

CAO, Q., CLARK, E.A., MAO, Y., LETTENMAIER, D.P. Trends and interannual variability in terrestrial water storage over the eastern United States, 2003-2016. **Water Resources Research**, 533 55(3): 1928-1950, 2019.

CARRARD, N., FOSTER, T., WILLETTS, J. Groundwater as a Source of Drinking Water in Southeast Asia and the Pacific: A Multi-Country Review of Current Reliance and Resource Concerns. **Water** 2020, 12(1), 1605; <https://doi.org/10.3390/w11081605>

CARVALHO, A. A., MONTEIRO, A. A. A., SILVA, H. P., LOPES, I., MORAIS, J. E. F., SILVA, T. G.F. Trends of rainfall and temperature in Northeast Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.24, n.1, p.15-23, 2020. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n1p15-23>

CARVALHO, V. S. O., CUNHA, Z. A., ALVARENGA, L. A., BESKOW, S., MELLO, C. R., MARTINS, M. A., OLIVEIRA, C. M. M. Assessment of land use changes in the Verde River basin using two hydrological models. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 118, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103954>

CETEC, FEAM, UFV, UFLA, 2010. Mapa de solos do Estado de Minas Gerais, 1. In: Secretaria do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. Fundação Estadual do Meio Ambiente - FEAM, Belo Horizonte.

CHEN, J., FAMIGLIETTI, J. S., SCANLON, B. R., RODELL, M. Groundwater storage changes: Present status from GRACE observations. *Remote Sensing and Water Resources*, pp 207-227. 2015.

CHINNASAMY, P., AGORAMMORTHY, G. Groundwater Storage and Depletion Trends in Tamil Nadu State, India. **Water Resources Management**, (2015) 29:2139–2152. Doi: 10.1007/s11269-015-0932-z

CONICELLI, B. P. Gestão das águas subterrâneas na bacia hidrográfica do Alto Tietê (SP). **Tese de doutorado**. Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia. Universidade de São Paulo, 2014.

CORDEIRO, M. LA P., JUNIOR, G. C. DA S., DEREZYNSKI, C. P., CHRISPIM, Z. M. P., MELO, M. T. C. Analysis of indicators of climate extreme and projection of groundwater recharge in the northern part of the Rio de Janeiro state, Brazil. **Environment, Development and Sustainability**, v. 23(12):1-26. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01441-w>

COSTA, M. R.; CIRILO, J.A. **Análise do potencial de uso das águas subterrâneas na semi-árida do estado de Pernambuco**. II Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo. São Paulo, SP. Anais. 2011

COSTA, J. A., NAVARRO-HEVIA, J., COSTA, C. A. G., ARAÚJO, J. C. Temporal dynamics of evapotranspiration in semiarid native forests in Brazil and Spain using remote sensing. **Hydrological Processes**. 2021; 35:e14070. <https://doi.org/10.1002/hyp.14070>

CUNHA, Z. A., MELLO, C. R., BESKOW, S., VARGAS, M. M., GUZMAN, J. A., MOURA, M. M. A modeling approach for analyzing the hydrological impacts of the agribusiness land-use scenarios in an Amazon Basin. **Land**, 12, 1422, 2023. <https://doi.org/10.3390/land12071422>

DEVIA, G. K., GANASRI, B. P., AND DWARAKISH, G. S.: A review on hydrological models, **Aquat. Proced.**, 4, 1001–1007, <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.126>, 2015.

DHUNGEL, R., FIEDLER, F. Water balance to recharge calculation: **Implications for watershed management using systems dynamics approach**. *Hydrology*, 3(1), 13. 2016. <https://doi.org/10.3390/hydrology3010013>

ECKHARDT, K. How to construct recursive digital filters for base flow separation. **Hydrological Process**, 19, 507-515, 2005.

FAMIGLIETTI J. S., LO, M., HO, S. L., BETHUNE, J., ANDERSON, K. J., SYED, T. H., SWENSON, S. C., LINAGE, C. R., RODELL, M. Satellites measure recent rates of groundwater depletion in California's Central Valley. **Geophys Res Lett**, 38, 2011. doi:10.1029/2010GL046442

FREEZE, R.A. AND CHERRY, J.A. **Groundwater**. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, Vol. 7632, 604.1979.

GAO, Z., ZHANG, LU., CHENG, L., ZHANG, X., COWAN, T., CAI, W., BRUTSAERT, W. Groundwater storage trends in the Loess Plateau of China estimated from streamflow records. **Journal of Hydrology** 530 (2015) 281–290. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.09.063>

GEBREMICAEL, T. G., MOHAMED, Y. A., VAN DER ZAAG, P. Attributing the hydrological impact of different land use types and their long-term dynamics through combining parsimonious hydrological modelling, alteration analysis and PLSR analysis, **Science of The Total Environment**, v660, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.085>.

GODERNIAUX, P., BROUYERE, S., FOWLER, H. J., BLENKINSOP, S., THERRIEN, R., ORBAN, P., DASSARGUES, A. Large scale surface–subsurface hydrological model to assess climate change impacts on groundwater reserves. **Journal of hydrology**, 373, 2009. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.04.017

GONZÁLEZ, J. A. M., COMTE, J. C., LEGCHENKO, A., OFTERDINGER, U., HEALY, D. Quantification of groundwater storage heterogeneity in weathered/fractured basement rock aquifers using electrical resistivity tomography: Sensitivity and uncertainty associated with petrophysical modelling. **Journal of Hydrology**, v. 593, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125637>

GREEN, T. R., TANIGUCHI, M., KOOI, H., GURDAK, J J., ALLEN, D. M., HISCOCK, K. M., TREIDEL, H., AURELI, A. Beneath the surface of global change: Impacts of climate change on groundwater. **Journal of Hydrology**, 405, pp. 532-560. 2011.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 01, n. 02, p. 96-99, 1985.

HARTER, T. **Groundwater Hydrology**. California Department of Water Resources, pp. 1-2.2001.

HE, S., YU, K., TANG, Z., YAN, Y., ZHANG, F. Impacts of parameter uncertainty on baseflow separation by a two-parameter recursive digital filter. **Hydrological Processes**, 36(3), e14512. <https://doi.org/10.1002/hyp.14512>

HIRATA, R., SUHOGUSOFF, A., MARCELLINI, S. S., VILLAR, P. C., MARCELLINI, L. **As águas subterrâneas e sua importância ambiental e socioeconômica para o Brasil**. Universidade Federal de São Paulo. Instituto de Geociências, 2019. ISBN digital 978-85-63124-07-4 doi:10.11606/9788563124074

HUANG, P., WANG, G., GUO, L., MELLO, C. R., LI, K., MA, J., & SUN, S. Most global gauging stations present biased estimations of total catchment discharge. **Geophysical Research Letters**, 50, 2023. <https://doi.org/10.1029/2023GL104253>

HUO, A., PENG, J., CHEN, X. et al. Groundwater storage and depletion trends in the Loess areas of China. **Environ Earth Sci** 75, 1167 (2016). <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5951-4>

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007. IPCC, Cambridge

JUNQUEIRA JÚNIOR, J.A. Escoamento de Nascentes Associado à Variabilidade Espacial de Atributos Físicos e Uso do solo em uma Bacia Hidrográfica de Cabeceira do Rio Grande, MG. Ph.D **Thesis**, Federal University of Lavras, Lavras, Brazil, 2006.

KENDALL, M.G. **Rank correlation Methods**. 4.ed. Londres: Charles Griffin, 1975.

KLEMEŠ, V. Operational testing of hydrological simulation models. **Hydrol. Sci. J.**, 31, pp. 13-24. 1986. <https://doi.org/10.1080/02626668609491024>

KNOX, J. C. Sensitivity of modern and Holocene floods to climate change. **Quaternary Science Review**, 19(1-5): 439-457, 2000.

KORMOS, P. R., LUCE, C.H., WENGER, S. J., BERGHUIJS, W. R. Trends and sensitivities of low streamflow extremes to discharge timing and magnitude in Pacific Northwest mountain streams. **Water Resources Research**, 52(7): 4990-5007, 2016.

KOUCHI, D. H., ESMAILI, K., FARIDHOSSEINI, A., SANAEINEJAD, S. H., KHALILI, D., ABBASPOUR, K. C. Sensitivity of Calibrated Parameters and Water Resource Estimates on Different Objective Functions and Optimization Algorithms. **Water** 2017, 9(6), 384; <https://doi.org/10.3390/w9060384>

KRECEK, J., HAIGH, M. Reviewing the contexts of headwater control. Environmental Reconstruction in Headwater Areas, Kluwer, Dordrecht, NL. NATO Science Series 2: **Environmental Security**, 9-24, 2000.

KORMOS, P.R.; LUCE, C.H.; WENGER, S.J.; BERGHUIJS, W.R. Trends and sensitivities of low streamflow extremes to discharge timing and magnitude in Pacific Northwest mountain streams. **Water Resources Research**, 52(7): 4990-5007, 2016.

LANGAT, P.K., KUMAR, L., KOECH, R. Temporal variability and trends of rainfall and streamflow in Tana River Basin, Kenya. **Sustainability** 9. 2017. doi:10.3390/su9111963.

LENTSWE, G. B., MOLWALEFHE, L. Delineation of potential groundwater recharge zones using analytic hierarchy process-guided GIS in the semi-arid Motloutse watershed, eastern Botswana. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 28, 2020. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100674>

LI, B., RODELL, M., SHEFFIELD, J. Long-term, non-anthropogenic groundwater storage changes simulated by three global-scale hydrological models. **Sci Rep** 9, 10746 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47219-z>

LIN, L., GAO, M., LIU, J., WANG, J., WANG, S., CHEN, X., LIU, H. Understanding the effects of climate warming on streamflow and active groundwater storage in na

alpine catchment: the upper Lhasa River. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, 24, 1145–1157, 2020. <https://doi.org/10.5194/hess-24-1145-2020>

LIN, K.; YEH, H. Baseflow recession characterization and groundwater storage trends in northern Taiwan. **Hydrology Research**, 48(6): 1745-1756, 2017.

LIU, M., X. XU, AND A. SUN. Decreasing spatial variability in precipitation extremes in southwestern China and the local/large-scale influencing factors. **Journal geophys. res.atmos.**, 120, 6480–6488, 2014. doi:10.1002/2014JD022886

LIU, X., LIU, C., & BRUTSAERT, W. Mutual consistency of groundwater storage changes derived from GRACE and from baseflow recessions in the Central Yangtze River basin. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, 125, 2020. e2019JD031467. <https://doi.org/10.1029/2019JD031467>

MANN, H.B. Non-parametric tests against trend. **Econometria**, v. 13, p. 245-259, 1945.

MALEDE, D. A.; AGUMASSIE, T. A.; KOSGEI, J. R.; LINH, N. T. T.; ANDUALEM, T. G. Analysis of rainfall and streamflow trend and variability over Birr Riber watershed, Abbay basin, Ethiopia. **Environmental Challenges**, v.7, 2022.

MELLO, C.R., AVILA, L.F., LIN, H., TERRA, M.C.N.S., Chappell, N. Water balance in a neotropical forest catchment of southeastern Brazil. **Catena**, 173, 9-21. 2019.

MELLO, C.R., VIOLA, M.R.; NORTON, L.D.; SILVA, A.M.; WEIMAR, F.A. Development and application of a simple hydrologic model simulation for a Brazilian headwater basin. **Catena** 75: 235-247, 2008.

MELLO, C.R.; VIEIRA, N.P.A.; GUZMAN, J.A.; VIOLA, M.R.; BESKOW, S.; ALVARENGA, L.A. Climate Change Impacts on Water Resources of the Largest Hydropower Plant Reservoir in Southeast Brazil. **Water**, 13, 2021.

MELO, P. A., ALVARENGA, L. A., TOMASELLA, J., MELLO, C. R., MARTINS, M. A., COELHO, G. Analysis of hydrological impacts caused by climatic and anthropogenic changes in Upper Grande River Basin, Brazil. **Environmental Earth Sciences**, 81:504, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10631-2>

MICHIKAKI, S.; BRUTSAERT, W. Recent Low-Flow and Groundwater Storage Changes in 645 Upland Watersheds of the Kanto Region, Japan. **Journal of Hydrological Engineering**, 14(3): 280-285, 2009

MOECK, C., GRECH-CUMBO, N., PODGORSKI, J., BRETZLER, A., GURDAK, J. J., BERG, M., SCHIRMER, M. A global-scale dataset of direct natural groundwater recharge rates: A review of variables, processes and relationships. **Sci Total Environ**, 2020. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137042

MORIASI, D.N.; ARNOLD, J.G.; VAN LIEW, M.W.; BINGNER, R.L.; HARMEL, R.D.; VEITH, T.L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Trans. ASABE**, 50, 885-900, 2007

NAJAFI, M. R., MORADKHANI, H., JUNG, I. W. Assessing the uncertainties of hydrologic model selection in climate change impact studies. **Hydrological Processes**, v. 25, 2011. <https://doi.org/10.1002/hyp.8043>

NAZARI, A., ZARYAB, A. & AHMADI, A. Estimation of groundwater storage change in the Helmand River Basin (Afghanistan) using GRACE satellite data. **Earth Sci Inform** 16, 579–589 (2022). <https://doi.org/10.1007/s12145-022-00899-0>

NYSSSEN J, CLYMANS W, DESCHEEMAER K, POESEN J, VANDECASTEELE I, VANMAERCKE M, ZENEBE A, VAN CAMP M, HAILE M, HAREGEWEYN N, MOEYERSONS J. Impact of soil and water conservation measures on catchment hydrological response a case in north Ethiopia. **Hydrological Processes** 24(13):1880-1895. 2010

OLIVEIRA, P.T., SANTOS E SILVA, C.M. & LIMA, K.C. Climatology and trend analysis of extreme precipitation in subregions of Northeast Brazil. **Theor Appl Climatol** 130, 77–90 (2017). <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1865-z>

OLIVEIRA, C. M. M., ALVARENGA, L. A., BESKOW, S., CUNHA, A. C., VARGAS, M. M., MELO, P. A., TOMASELLA, J., SANTOS, A. C. N., CARVALHO, V. S. O., SILVA, V. O. Hydrological Model Performance in the Verde River Basin, Minas Gerais, Brazil. **Resources** 2023, 12(8), 87; <https://doi.org/10.3390/resources12080087>

NETO, A. R., PAZ, A. R., MARENGO, J. A., CHOU, S. C. Hydrological processes and climate change in hydrographic regions of Brazil. **Journal of Water Resource and Protection**, v.8, n.12, 2016. Doi: 10.4236/jwarp.2016.812087

PEREIRA, B. H. F., DEREZYNSKI, C., JUNIOR, G. C. S., MARQUES, E. A. G. Projected climate change impacts on groundwater recharge in the Urucuia aquifer system, Brazil. **Internacional journal of climatology**, 42, 2022. DOI: 10.1002/joc.7773

PERTERSEN-PERLMAN, J. D., AGUILAR-BARAJAS, I., MEGDAL, S. B. Drought and groundwater management: Interconnections, challenges and policy responses. **Curr. Opin. Environ.**, 28, 2022. 10.1016/j.coesh.2022.100364

PINTO, L. A., MELLO, C. R., OWENS, P. R., NORTON, L. D., CURI, N. Role of Inceptisols in the Hydrology of Mountainous Catchments in Southeastern Brazil. **Journal Hydrological Engineering**, v. 21, 2015, 05015017-1

POETER, E., FAN, Y., CHERRY, J., WOOD, W., MACKAY, D. Groundwater in our water cycle – getting to know Earth’s most important fresh water source, Eileen Poeter, Ying Fan, John Cherry, Warren Wood, and Douglas Mackay – Guelph, Ontario, Canada, 2020. Doi: <https://doi.org/10.21083/978-1-7770541-1-3>

POKHREL, Y., FEFELANI, F., SATOH, Y., BOULANGE, J., BUREK, P., GADEKE, A., GERTEN, D., GOSLING, S. N., GRILLAKIS, M., GUDMUNDSSON, L., HANASAKI, N., KIM, H., KOUTROLIS, A., LIU, J., PAPADIMITRIOU, L., SCHEWE, J., SCHMIED, H. M., STACKE, T., TELTEU, C. E., THIERY, W., VELDKAMP, T., ZHAO, F., WADA, Y. Global terrestrial water storage and drought severity under climate change. **Nat. Clim. Chang.** 11, 226–233 (2021).
<https://doi.org/10.1038/s41558-020-00972-w>

POTYONDY, J. P., GEIER, T. W. **Watershed condition classification technical guide**. United States Department of Agriculture (USDA), Forest service. 2011.

Projeto MapBiomass – Coleção 7 da série anual de mapas de cobertura e uso da terra do Brasil, acessado em 25 de setembro de 2023 através do link:
<https://brasil.mapbiomas.org/map/colecao-7/>

RAHMATI, O., NAGHIBI, S. A., SHAHABI, H., BUI, D. T., PRADHAN, B., AZAREH, A., RAFIEI-SARDOOI, E., SAMANI, A. N., MELESSE, A. M. Groundwater spring potential modelling: Comparing the capability and robustness of three different modeling approaches, **Journal of Hydrology**, v.565, p.248-261, 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.08.027>.

RAO, V.B.; FRANCHITO, S.H.; SANTO, C.M.E; GAN, M.A. An update on the rainfall characteristics of Brazil: seasonal variations and trends in 1979-2011. **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 1, p. 291-302, 2016.

REGOTO, P., DERECHYNSKI, C., CHOU, S. C., BAZZANELA, A. C. Observed changes in air temperature and precipitation extremes over Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 41, 5125-5142, 2021. <https://doi.org/10.1002/joc.7119>

RODRIGUES, J. A. M., VIOLA, M. R., ALVARENGA, L. A., MELLO, C. R. de., CHOU, S. C., OLIVEIRA, V. A. de., UDDAMERI, V., MORAIS, M. A. V. Climate change impacts under representative concentration pathway scenarios on streamflow and droughts of basins in the Brazilian Cerrado biome. **International Journal of Climatology**, v. 40, p.2511-2526. 2019.

SALEM, G. S. A., SO KAZAMA, S., SHAMSUDDIN SHAHID, S., NEPAL C. DEY, N. C. Impacts of climate change on groundwater level and irrigation cost in a groundwater dependent irrigated region. **Agricultural Water Management**, v. 208, 2018, p 33-42, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.06.011>.

SAFDARI, Z., NAHAVANDCHI, H., JOODAKI, G. Estimation of groundwater in Iran's catchments using well data. **Water**, v.14, Issue 1, 2022. Doi: 10.3390/w14010131

SEN, P.K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau. **J Am Stat Assoc** 63(324):1379–1389, 1968. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>

SHAHID, S., ALAMGIR, M., WANG, X., ESLAMIAN, S. Climate change impacts on and adaptation to groundwater. **Handbook of Drought and Water Scarcity**:

Environmental Impacts and Analysis of Drought and Water Scarcity. pp.108-120, 2016.

SHARMA, P. J.; PATEL, P.L.; JOTHIPRAKASH, V. Impact of rainfall variability and anthropogenic activities on streamflow changes and water stress conditions across Tapi Basin in India. **Science of the Total Environment**. 2019

SHUKLA, S., JAIN, S. K., KANSAL, M. L. Hydrological modelling of a snow/glacier-fed western Himalayan basin to simulate the current and future streamflows under changing climate scenarios. **Science of the total environment**, v. 795, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148871>

SIEBERT, S., BURKE, J., FAURES, J.M., FRENKEN, K., HOOGEVEEN, J., DOLL, P., PORTMANN, F.T., Groundwater use for irrigation – a global inventory. **Hydrol. Earth Syst. Sci.** 14. (10), 1863–1880, 2010.

SILVA, M. V., PANDORFI, H., JARDIM, A. M. R. F., OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F., DIVINCULA, J. S., GIONGO, P. R., SILVA, T. G. F., ALMEIDA, G. L. P., MOURA, G. B. A., LOPES, P. M. O. Spatial modeling of rainfall patterns and groundwater on the coast of northeastern Brazil. **Urban Climate**, 38, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100911>

SILVA, V.O., MELLO, C.R. **Meteorological droughts in part of southeastern Brazil: Understanding the last 100 years**. Anais da Academia Brasileira de Ciências, v.93, 2021, artigo número e20201130.

SILVA, V. O., MELLO, C. R., CHOU, S. C. Projections of severe droughts in future climate in Southeast Brazil: a case study in Southern Minas Gerais State, Brazil. **Theor Appl Climatol** 148, 1289–1302, 2022. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-03993-x>

SINGH D, SINGH A, GANJU A. Weather prediction using nearest neighbour model. **Current Science**, 2005, 88: 1283–1289

SMAKHTIN, V. U. Low flow hydrology: a review. **Journal of Hydrology**, 240(3–4):147–86, 2001. [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00340-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00340-1).

SOARES, R. C. V., Caracterização do fluxo subterrâneo das águas na porção sudoeste da bacia representativa de Juatuba. **Dissertação de mestrado**. Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio ambiente e Recursos Hídricos. Universidade Federal de Minas Gerais. 2010.

SOUZA, S. A., REIS, D. S. Trend detection in annual streamflow extremes in Brazil. **Water** v. 14(11), 1805, 2022. <https://doi.org/10.3390/w14111805>

SOWERS, J., VENGOSH, A., WEINTHAL, E. Climate change, water resources, and the politics of adaptation in the Middle East and North Africa. **Climatic Change**, 104 (3–4) (2011), pp. 599-627, 10.1007/s10584-010-9835-4

SUGITA, M., BRUTSAERT, W. Recent Low-Flow and Groundwater Storage Changes in Upland Watersheds of the Kanto Region, Japan. **Journal of Hydrologic Engineering**, 14, 3. 2009. Doi:10.1061/(ASCE)1084-0699(2009)14:3(280)

TAKAHASHI, K.; SUZUKI, K.; TSUKATANI, Y. The determination of permafrost thawing trends from long-term streamflow measurements with an application in eastern Siberia. **Journal of Geophysical Research Atmosphere**, 117(D22): 0148-0227, 2012.

TAMBOSI, L. R.; VIDAL, M. M.; FERRAZ, S. F. DE B.; METZGER, J. P. Funções Eco-hidrológicas das Florestas Nativas e o Código Florestal. **Estudos Avançados**, v. 29, n. 84, maio/ago, 2015.

THOMAS, B. F., BEHRANGU, A., FAMIGLIETTI, J. S. Precipitation intensity effects on groundwater recharge in the Southwestern United States. **Water**, 8, 90, 2016. doi:10.3390/w8030090

TROCH, P.A., DE TROCH, F.P., BRUTSAERT, W., 1993. Effective water table depth to describe initial conditions prior to storm rainfall in humid regions. **Water Resour. Res.** 29, 427–434.

TUCCI, C. E. M. 1997. **Hidrologia: ciência e aplicação** 2.ed. Porto Alegre: ABRH/Editora da UFRGS. (Col. ABRH de Recursos Hídricos, v.4), 1997.

VALENTINI, M.H.K., BESKOW, S., DA SILVA, M.E.S., MELLO, C. R., BESKOW, T.L.C., DA SILVEIRA, J.P.M. Overview on the historical series of annual maximum streamflows in Brazil: analysis based on temporal and statistical criteria. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 2023, 16(2), pp. 837–846

VARGAS, M. M. WebLASH: uma Plataforma web para o modelo hidrológico LASH. 2023. **Tese** (Doutorado em Recursos Hídricos). Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, Rio Grande do Sul.

VARGAS, M., BESKOW, S., MELLO, C. R., MOURA, M. M., CUNHA, Z. A., BESKOW, T. L. C., TIMM, L. C. M-LASH: Hydrological and computacional enhancements of the LASH model. **Environmental modelling & software**, v.167, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2023.105774>

VIOLA, M.R. Simulação Hidrológica na Cabeceira da Bacia Hidrográfica do Rio Grande de Cenários de usos do solo e Mudanças Climáticas A1B. Ph.D **Thesis**, Federal University Federal of Lavras, Lavras, Brazil, 2011.

VIOLA, M.R.; MELLO, C.R.; BESKOW, S.; NORTON, L.D. Applicability of the LASH Model for hydrological simulation of the Grand River Basin, Brazil. **J. Hydrol. Eng.** 18, 1639-1652, 2013.

VOGELS, M. F. A., JONG, S. M., STERK, G., WANDERS, N., BIERKENS, M. F. P., ADDINK, E. A. An object-based image analysis approach to asses irrigation-water

consumption from MODIS products in Ethiopia. **Int J Appl Earth Geoinformation**, 88, 2020. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102067>

VRIES, J. J., SIMMERS, I. Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. **Hydrogeology Journal**, 10: 5-17. 2002.

VRZEL, J., SOLOMON, K. D., BLAŽEKA, Ž., OGRINC, N., The study of the interactions between groundwater and Sava River water in the Ljubljansko Polje aquifer system (Slovenia). **Journal of Hydrol** 556:384–396, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.11.022>

WANG, G., MANG, S., CAI, H., LIU, S., ZHANG, Z., WANG, L., INNES, J. L. Integrated watershed management: evolution, development and emerging trends. **J. For. Res.** 27, 967–994. 2016. <https://doi.org/10.1007/s11676-016-0293-3>

WOJAHN, V. S., BARTELS, G. K., COLLARES, G. L. Temporal stability of soil moisture in a small watershed in the subtropical region of Brazil. **Environ Earth Sci** 82, 61 (2023). <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10744-8>

XIANG, L.; WANG, H.; STEFFEN, H.; WU, P.; JIA, L.; JIANG, L. Groundwater storage 693 changes in the Tibetan Plateau and adjacent areas revealed from GRACE satellite gravity 694 data. **Earth Planet Scientific Letters**, 449: 228-239, 2016.

XIE, X.; XU, C.; WEN, Y.; LI, W. Monitoring Groundwater Storage Changes in the Loess Plateau Using GRACE Satellite Gravity Data, Hydrological Models and Coal Mining Data. **Remote Sense-Basel**, 10(4): 605, 2018.

YANG, W., XIAO, C., ZHANG, Z., AND LIANG, X. Can the two-parameter recursive digital filter baseflow separation method really be calibrated by the conductivity mass balance method? **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, 25, 1747–1760, 2021. <https://doi.org/10.5194/hess-25-1747-2021>

YANG, W., XIAO, C., ZHANG, Z., AND LIANG, X., FANG, Z. Estimation of the groundwater balance of a mountainous basin based on long-term streamflow data: a case study of the Tao'er River Basin, China. **Environmental Earth Sciences**, 80:689, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09974-z>

YANG, Z., ZHANG, Q., HAO, X., YUE, P. Changes in evapotranspiration over global semiarid regions 1984–2013. **Journal of Geophysical Research-Atmospheres**, 124, 1–18, 2019. <https://doi.org/10.1029/2018JD029533>

ZHANG, R., LI, Q., CHOW, T. L., LI, S., DANIELESCU, S. Baseflow separation in a small watershed in a New Brunswick, Canada, using a recursive digital filter calibrated with the conductivity mass balance method. **Hydrological Processes**, v 27, p. 2659-2665, 2013. <https://doi.org/10.1002/hyp.9417>

ZHANG, L., BRUTSAERT, W., CROSBIE, R., POTTER, N. Long-term annual groundwater storage trends in Australian catchments. **Advances in Water Resources**, v 74, p. 156-165, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.09.001>

ZHENG, L., PAN, Y., GONG, H., HUANG, Z., ZHANG, C. Comparing groundwater storage changes in two main grain producing areas in China: Implications for sustainable agricultural water resources management. **Remote Sens.** 12(13), 2020. <https://doi.org/10.3390/rs12132151>