

ANÁLISE HIDROLÓGICA E IMPACTOS DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NA BACIA DO RIO VERDE/MG: AVALIAÇÃO A PARTIR DO MODELO GR4J

HYDROLOGICAL ANALYSIS AND IMPACTS OF LAND USE AND OCCUPATION IN THE RIO VERDE/MG BASIN: EVALUATION USING THE GR4J MODEL

Matheus de Lima Magalhães
matheusdelimamagalhaes@gmail.com

RESUMO: A bacia hidrográfica do Rio Verde, com uma área de 6.891 km², é influenciada por características geológicas e climáticas. O conhecimento do regime de vazão da bacia do Rio Verde, localizada no Sul/Sudoeste de Minas Gerais, é essencial para a agropecuária, geração de energia e fornecimento de água potável. Os dados foram coletados de estações fluviométricas e pluviométricas, destacando a importância da integração entre uso da terra e comportamento hidrológico para previsões hidrológicas mais precisas. O modelo hidrológico GR4J pode ser utilizado para avaliar a relação chuva-vazão a fim de caracterizar e estabelecer uma variação acerca do regime hídrico de uma bacia. A calibração do modelo, realizada entre 1989 e 1992, resultou em um NSE de 0,51, indicando capacidade moderada de replicar o comportamento hidrológico, embora com dificuldades em capturar picos de vazão. Na validação, de 1993 a 1994, o desempenho melhorou, com NSE de 0,68 e KGE de 0,84, demonstrando maior precisão nos padrões de escoamento. A análise do uso do solo na década de 90 revelou a predominância de pastagens, ocupando cerca de 29,8% da área em 1991, o que pode ter elevado o escoamento superficial.

Palavras-chave: Modelagem hidrológica. Vazão. Escoamento superficial.

ABSTRACT: The Verde River basin, with an area of 6,891 km², is influenced by geological and climatic characteristics. Knowledge of the flow regime of the Verde River basin, located in the south/southwest of Minas Gerais, is essential for agriculture, energy generation and the supply of drinking water. Data was collected from fluviometric and pluviometric stations, highlighting the importance of integrating land use and hydrological behavior for more accurate hydrological forecasts. The GR4J hydrological model can be used to evaluate the rainfall-runoff relationship in order to characterize and establish a variation in the water regime of a basin. The model's calibration, carried out between 1989 and 1992, resulted in an NSE of 0.51, indicating a moderate ability to replicate hydrological behavior, although with difficulties in capturing peak flows. In validation, from 1993 to 1994, performance improved, with an NSE of 0.68 and a KGE of 0.84, demonstrating greater accuracy in the flow patterns. Analysis of land use in the 1990s revealed the predominance of pastures, occupying around 29.8% of the area in 1991, which may have increased surface runoff.

Keywords: Hydrological modeling. Flow. Surface runoff.

1 INTRODUÇÃO

A previsão de vazão é um dos principais desafios relacionados ao conhecimento integrado da climatologia e hidrologia. O conhecimento antecipado da vazão de uma bacia hidrográfica é usado mais comumente para previsão de cheias, para previsão de umidade de solo agricultável, para prever os níveis de água de um rio navegável e para o conhecimento da disponibilidade hídrica no abastecimento de água para irrigação e produção de energia elétrica (TUCCI et al. 2002).

Os modelos hidrológicos podem ser considerados como uma ferramenta desenvolvida para representar o comportamento da bacia hidrográfica, prever condições futuras e/ou simular situações hipotéticas no intuito de avaliar impactos de alterações. A simulação hidrológica é limitada pela heterogeneidade física da bacia e dos processos envolvidos, o que muito tem contribuído para o desenvolvimento de muitos modelos (OLIVEIRA, 2003). Esses, no entanto, se diferenciam entre si em função dos objetivos a serem alcançados, dos dados que utilizam e das prioridades que são estabelecidas na representação dos processos físicos.

Com o desenvolvimento de tecnologias acerca do estudo de vazão de bacias hidrográfica, foram desenvolvidos diversos modelos hidrológicos como os modelos SMAP (SILVA et al, 2001), TOPMODEL (BEVEN E KIRKBY, 1979), ARNO (TODINI, 1996) e AÇUMOD (PASSERAT DE SELANS et al, 2000).

O modelo conceitual GR4J (Perrin et al., 2003) desenvolvido na França possui representatividade devido à implementação em diferentes países da Europa, Austrália, Brasil e Rússia, apresentando resultados promissores em regiões com características climáticas, geológicas, pedológicas e de cobertura vegetal variadas (OUDIN et al., 2010; PONCELET et al., 2017; PAGANO et al., 2010; NETO et al., 2021; AYZEL et al., 2019). Outra vantagem desse modelo é a dependência de poucos parâmetros e o uso de dois dados de entrada, que são: as séries de precipitação média da bacia e de evapotranspiração potencial. Tais vantagens foram de extrema importância para a escolha da aplicação do modelo GR4J no presente estudo.

A área de estudo consiste na Bacia Hidrográfica do Rio Verde, uma bacia extensa no sul do estado de Minas Gerais. A bacia tem uma área de aproximadamente 6.800 km², contemplando 31 municípios e 600 mil pessoas. A bacia é de extrema importância social e econômica para a região, sendo utilizada para abastecimento humano, recreação, dessedentação animal, pesca e irrigação. Considerando os múltiplos usos das águas da bacia hidrográfica do Rio Verde, é necessário compreender a vazão nos rios e suas variações.

2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na calibração a vazão mínima foi 5.814m³/h, a vazão média foi 27.610m³/h e a máxima foi 533.040. A média da temperatura mínima diária foi 14°C e a média da temperatura máxima foi 27°C.

2.1 CALIBRAÇÃO

A calibração do modelo GR4J, realizada no período de 01/12/1989 a 01/12/1992 (FIGURA 1) apresentou desempenhos variados nos índices de eficiência. O NSE (Eficiência de Nash-Sutcliffe) atingiu 0,51, indicando uma capacidade moderada do modelo em replicar o comportamento hidrológico da bacia. Este valor, embora aceitável, sugere que o modelo não reproduz perfeitamente os picos de vazão, o que é corroborado pela visualização gráfica, onde a simulação (linha laranja) falha em capturar adequadamente a magnitude de eventos extremos. A versão do NSE para o fluxo com raiz quadrada foi de 0,63, indicando que o modelo simula melhor as vazões médias e baixas, mostrando uma suavização dos desvios observados nas altas vazões.

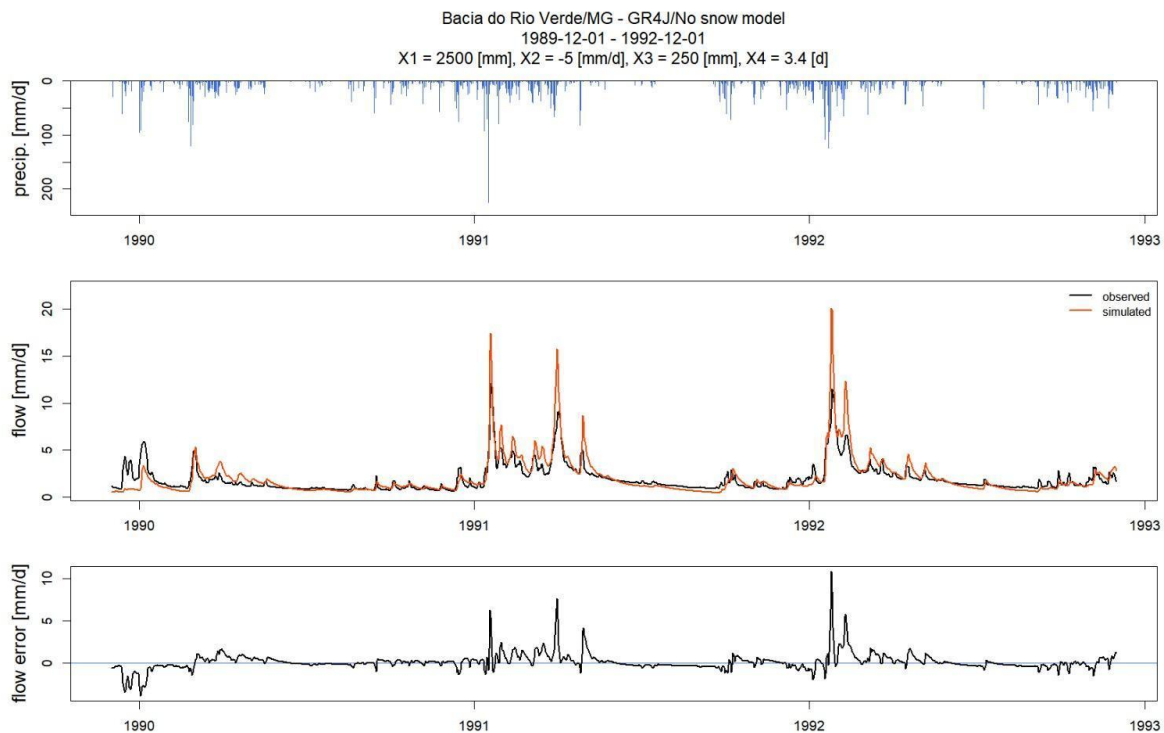
O índice KGE (Eficiência de Kling-Gupta) apresentou um valor de 0,55, o que sinaliza um desempenho razoável, balanceando correlação, viés e a variabilidade das vazões. Ao aplicar a raiz quadrada dos fluxos, o KGE melhorou para 0,69, reforçando a conclusão de que o modelo tem maior precisão em vazões mais moderadas, enquanto mostra dificuldades em eventos de cheia. O gráfico corrobora esses resultados, com as simulações se aproximando das observações (Qobs) na maior parte do período, mas divergindo principalmente durante os picos extremos.

O bias de 1,07 aponta para uma leve superestimação das vazões simuladas em comparação às observadas, sugerindo que o modelo tende a prever mais fluxo do que o registrado, especialmente em momentos de pico. Esses resultados são comuns em modelos conceituais como o GR4J, que simplificam processos hidrológicos e podem apresentar limitações na modelagem de eventos extremos. A análise visual do gráfico também indica que o modelo é eficaz em capturar o padrão sazonal de vazões, mas precisa de ajustes adicionais para melhorar a simulação dos extremos.

O NSE de 0,51 e o KGE de 0,55 apresentados estão alinhados com resultados relatados por Andrade et al. (2022) na modelagem hidrológica da bacia do rio Piranhas-Açu, onde o NSE variou de 0,42 a 0,68, dependendo do período e das condições de calibração. No caso deste estudo, as dificuldades também foram observadas em picos de vazão, atribuídas a limitações intrínsecas do GR4J em representar eventos extremos (ANDRADE et al., 2022).

No estudo de Astorayme et al. (2015), na bacia do rio Chillón no Peru, foram relatados valores de NSE superiores, próximos a 0,75, o que pode ser explicado pelo enfoque semidistribuído adotado, que melhora a representação espacial das variáveis hidrológicas, demonstrando a importância da configuração inicial do modelo. Já em Andrade (2024), ao analisar bacias no Nordeste brasileiro, encontrou-se um bias similar ao seu trabalho, indicando tendências de superestimação que corroboram a necessidade de ajustar os parâmetros para diferentes climas e características fisiográficas.

Figura 1: Calibração do modelo GR4J na sub-bacia do Rio Verde/ MG no período de 1989 a 1992.



Fonte: Os autores.

2.2 VALIDAÇÃO

A validação do modelo GR4J, realizada no período de 01/06/1993 a 01/06/1994 (FIGURA 2), apresenta resultados significativamente melhores do que os obtidos na calibração. O NSE (Eficiência de Nash-Sutcliffe) de 0,68 demonstra que o modelo agora reproduz de maneira mais eficaz os padrões de escoamento, o que é visível no gráfico, onde as linhas simuladas (Q_{sim}) e observadas (Q_{obs}) estão bastante próximas, exceto por algumas variações menores nos picos de vazão. O NSE aplicado à raiz quadrada dos fluxos também apresenta um valor ligeiramente inferior, 0,61, indicando que o modelo mantém uma boa capacidade de representar tanto as vazões médias quanto as baixas.

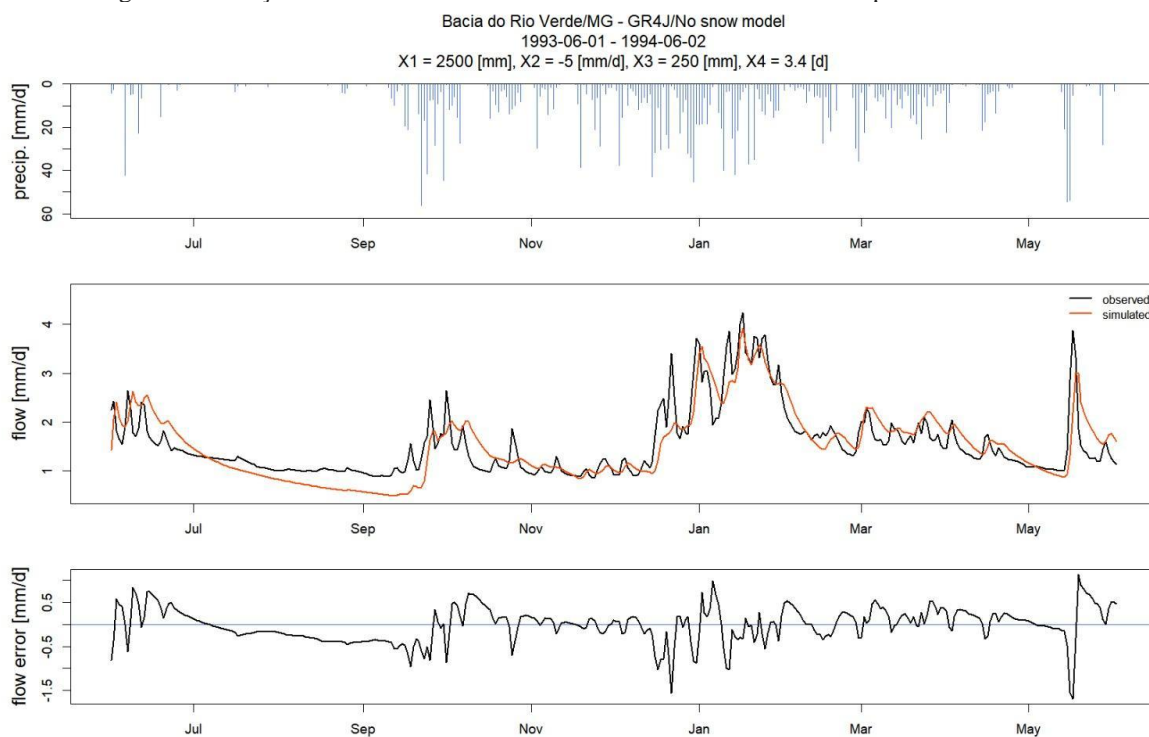
O índice KGE (Eficiência de Kling-Gupta) alcançou 0,84, representando uma melhora substancial em relação à calibração (KGE de 0,55), o que sugere que o modelo agora captura de forma mais precisa a correlação, o viés e a variabilidade das vazões. Isso pode ser visualmente corroborado pela proximidade entre as linhas de simulação e observação ao longo de quase todo o período de validação. O valor de KGE para a raiz quadrada dos fluxos foi de 0,78, o que reforça a melhoria do modelo na previsão de vazões médias.

Finalmente, o bias de 0,99 indica que o modelo está praticamente sem tendência de superestimação ou subestimação, o que é uma melhora significativa em relação ao bias de 1,07 observado na calibração. Essa convergência entre as vazões simuladas e observadas mostra que os ajustes feitos no modelo durante a calibração resultaram em um melhor desempenho na fase de validação, especialmente em termos de precisão nos fluxos e menor erro nos eventos de cheia.

No trabalho de Andrade et al. (2022), também foi observado que, após ajustes na calibração, os índices de eficiência como NSE e KGE apresentaram melhorias expressivas durante a validação, com valores de NSE variando de 0,60 a 0,72, próximos ao valor de 0,68 encontrado no presente estudo. A redução no bias (de 1,07 para 0,99) e o aumento no KGE para 0,84 na validação destacam um desempenho mais equilibrado do modelo, similar aos resultados de Andrade (2024), que encontrou valores de KGE entre 0,80 e 0,86 ao validar o GR4J em bacias nordestinas, destacando sua eficácia na simulação sazonal de vazões.

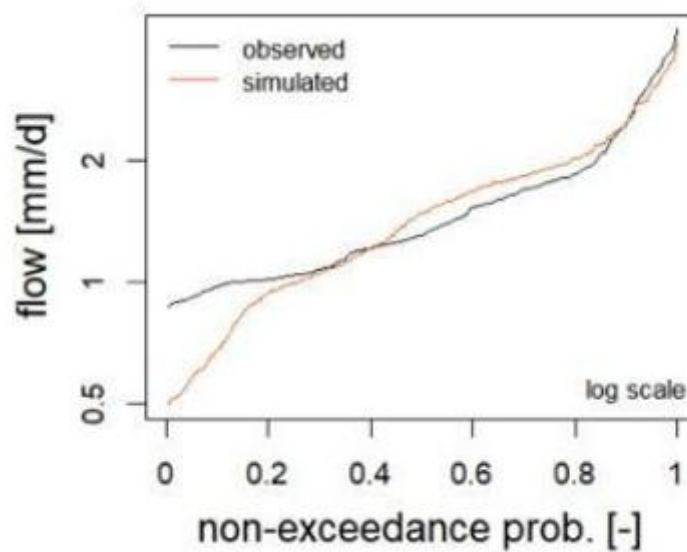
No estudo de Astorayme et al. (2015), utilizando o modelo em condições climáticas distintas na bacia do rio Chillón, resultados semelhantes na validação mostraram uma melhoria nos índices com ajustes adequados, reforçando que a fase de validação se beneficia de uma calibração detalhada. Assim, a validação realizada reforça a robustez do GR4J ao capturar padrões hidrológicos e reduzindo discrepâncias em eventos de pico, embora suas limitações ainda sejam notadas em alguns eventos extremos.

Figura 2: Validação do modelo GR4J na sub-bacia do Rio Verde/ MG no período de 1993 a 1994.



Fonte: Os autores.

Figura 3: Curva de permanência da vazão na bacia estudada no período de 1993 a 1994.



Fonte: Os autores.

2.3 PARÂMETROS DO MODELO GR4J

Durante o processo de calibração e validação do modelo GR4J, os parâmetros X1, X2, X3 e X4 desempenharam um papel crucial na simulação dos fluxos observados na bacia do Rio Verde/MG. O parâmetro X1, referente à capacidade de armazenamento de produção, foi fixado em 2.500 mm tanto na calibração quanto na validação. Esse valor elevado indica uma grande capacidade de armazenamento de água no solo, o que é consistente com regiões onde a infiltração e o armazenamento subterrâneo são predominantes. A alta capacidade de armazenamento de produção reflete a importância das reservas hídricas subterrâneas no controle do escoamento superficial em períodos de chuvas intensas e secas prolongadas, suavizando os picos de vazão observados no gráfico.

O parâmetro X2, que corresponde ao coeficiente de troca entre bacias hidrográficas, foi ajustado para -5 mm/dia nas duas fases, indicando uma perda constante de água para bacias vizinhas ou áreas subterrâneas. Esse valor negativo sugere que há um fluxo de água saindo da bacia, o que pode estar relacionado a características geológicas que permitem a percolação ou drenagem para regiões adjacentes. Essa transferência de água ajuda a reduzir o volume de escoamento e pode explicar as subestimações observadas durante os picos de vazão, pois o modelo perde uma parte do volume que deveria permanecer na bacia.

Já o X3, que representa a capacidade de armazenamento de roteamento, foi mantido em 250 mm. Esse valor controla a capacidade de armazenamento na zona de transferência do escoamento para o rio principal. Uma capacidade intermediária de roteamento como essa sugere que o tempo de resposta entre a precipitação e a vazão nos rios não é imediato, permitindo uma drenagem gradual. Isso explica a suavização

dos picos de vazão e o fato de que o modelo consegue captar bem as fases de recessão dos eventos chuvosos, mas ainda apresenta pequenas divergências nos maiores picos.

O X4, que se refere à constante de tempo do hidrograma unitário, foi fixado em 3,4 dias nas duas etapas. Esse valor médio indica um tempo de resposta moderado da bacia aos eventos de precipitação. Ou seja, o escoamento atinge seu pico aproximadamente 3,4 dias após o evento de chuva, o que corresponde bem ao comportamento observado no gráfico, onde as respostas às chuvas intensas ocorrem com algum atraso, suavizando a curva de escoamento e reduzindo a variabilidade instantânea do fluxo.

Esses valores de calibração e validação refletem uma bacia com grande capacidade de armazenamento, moderado tempo de resposta e interação significativa com sistemas hídricos adjacentes. As variações mínimas nos picos de vazão podem ser atribuídas à necessidade de ajustes mais refinados, especialmente no parâmetro X2, para melhorar a representação das trocas entre bacias.

2.4 USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

A análise dos dados de uso e ocupação do solo (FIGURA 4) na bacia do Rio Verde, mostra que, durante os períodos de calibração (1991-1992) e validação (1993-1994) do modelo GR4J, a pastagem foi a classe de uso predominante, ocupando aproximadamente 29,8% da área total em 1991 e variando de forma marginal até 29,5% em 1994 (TABELA 1). Essa predominância de pastagem tem implicações diretas no comportamento hidrológico da bacia, já que áreas de pastagem, devido à sua menor capacidade de infiltração em comparação com florestas, promovem maior escoamento superficial. Isso pode justificar os picos de vazão observados durante os eventos de chuva mais intensos, refletidos nos resultados da calibração e validação, onde a resposta rápida da bacia indicou uma baixa capacidade de retenção de água.

Em contraste, as formações florestais mantiveram-se estáveis em torno de 13,4% durante todo o período, contribuindo de forma limitada para a moderação do escoamento. A presença de vegetação florestal geralmente aumenta a capacidade de infiltração, retarda o escoamento e estabiliza o regime hídrico da bacia. No entanto, a baixa proporção de cobertura florestal na bacia pode ter reduzido a capacidade de amortecer os picos de escoamento, influenciando o desempenho do modelo, que mostrou respostas hidrológicas rápidas em ambos os períodos.

Outro fator relevante é o mosaico de usos, que aumentou de 3,5% em 1991 para 4,2% em 1994. Essa classe reflete uma paisagem diversificada, com fragmentos de áreas agrícolas e vegetação natural, o que pode gerar variabilidade espacial no escoamento. Áreas com uso misto podem dificultar a previsão de escoamentos devido à heterogeneidade das condições de infiltração e escoamento, influenciando tanto a calibração quanto a validação do modelo.

Além disso, a área urbanizada, embora pequena, passando de 0,22% em 1991 para 0,30% em 1994, ainda contribui para a impermeabilização do solo, podendo intensificar escoamentos localizados e rápidos

durante eventos de precipitação. Este aumento na impermeabilização pode ter um efeito pontual, mas significativo, no aumento do escoamento superficial em regiões específicas da bacia.

O cultivo de café, que reduziu de 2,34% em 1991 para 1,98% em 1994, e as outras lavouras perenes e temporárias tiveram pequenas variações, indicando uma leve diminuição das áreas agrícolas mais intensivas. Essas mudanças podem ter impactos moderados no escoamento, uma vez que as lavouras temporárias têm menor capacidade de retenção de água em comparação com as perenes, contribuindo para variações no regime de escoamento observadas durante os períodos de calibração e validação.

Assim, a associação entre as mudanças no uso e ocupação do solo e os resultados hidrológicos reflete a importância de considerar o manejo da terra nas simulações hidrológicas. A alta proporção de pastagem, combinada com a limitada cobertura florestal, desempenha um papel crucial na rápida resposta da bacia durante eventos de precipitação, enquanto áreas urbanizadas e o mosaico de usos geram variabilidade adicional. Esses fatores influenciam significativamente o desempenho do modelo GR4J nos períodos de calibração e validação, ressaltando a necessidade de uma análise integrada entre uso da terra e comportamento hidrológico para aprimorar a acurácia das previsões.

A análise do uso e ocupação do solo na bacia do Rio Verde aponta para implicações diretas no comportamento hidrológico, corroborando achados de estudos semelhantes. Por exemplo, Andrade et al. (2022) destacaram a influência de áreas de pastagem no aumento do escoamento superficial em bacias do semiárido, onde a menor capacidade de infiltração reduz a retenção hídrica e intensifica picos de vazão. Esses resultados são congruentes com a predominância de pastagem na bacia do Rio Verde, que ocupava cerca de 29% do território, contribuindo para respostas rápidas durante eventos de chuva intensa. Além disso, estudos como o de Andrade (2024) evidenciam a importância das formações florestais na moderação do regime hídrico, atribuindo às florestas maior capacidade de infiltração e atenuação de vazões extremas. Na bacia do Rio Verde, a limitada proporção de cobertura florestal (13,4%) contribui parcialmente para amortecer os picos de escoamento, mas não em escala suficiente para equilibrar a predominância de usos mais intensivos, como pastagens e áreas urbanizadas.

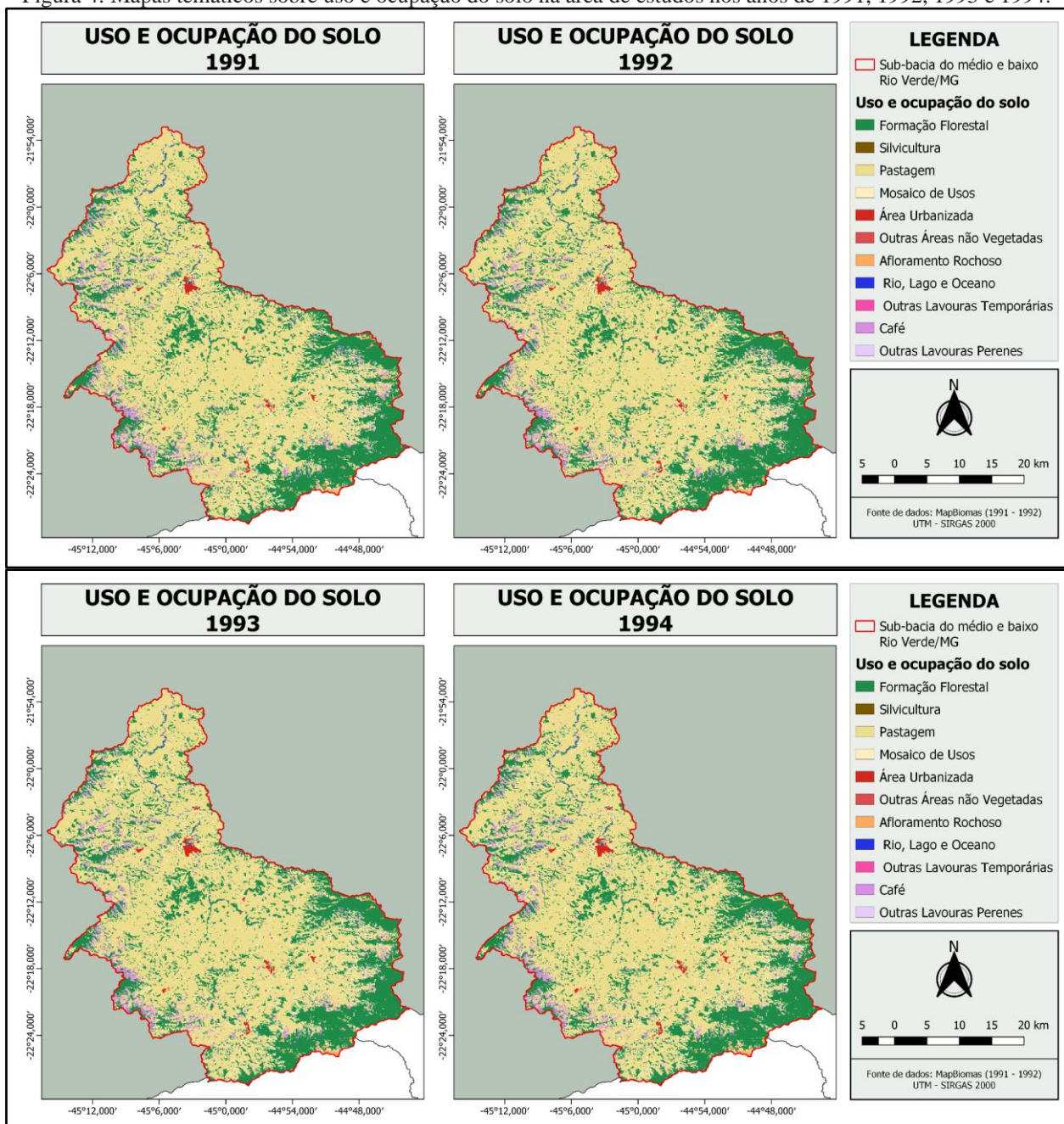
As áreas urbanizadas, embora pequenas, têm papel significativo na impermeabilização do solo, efeito também observado por Astorayme et al. (2015) na bacia do rio Chillón, onde o aumento da urbanização gerou escoamentos localizados mais intensos. No caso do Rio Verde, o crescimento urbano de 0,22% para 0,30% entre 1991 e 1994 provavelmente intensificou escoamentos pontuais, afetando a capacidade do modelo GR4J de capturar padrões de escoamento complexos. Por outro lado, o mosaico de usos e as lavouras perenes, cujas variações foram pequenas, geram heterogeneidade espacial no escoamento, alinhando-se aos resultados de estudos como os de Andrade (2024), que indicam desafios adicionais na modelagem hidrológica em paisagens diversificadas.

Este trabalho contribui para a compreensão da relação entre uso do solo e respostas hidrológicas, reforçando a necessidade de considerar características de ocupação na calibração de modelos hidrológicos como o GR4J. As análises realizadas destacam a importância do manejo integrado da terra para aprimorar a previsão hidrológica, proporcionando subsídios para políticas de uso sustentável do solo e gestão de recursos hídricos.

Tabela 1: Tabela de uso e ocupação do solo em área (Km) e porcentagem da região de estudo.

Uso e ocupação do solo	1991		1992		1993		1994	
	KM	%	KM	%	KM	%	KM	%
Formação Florestal	496.1398 3	13.4491%	495.69 811	13.4360 %	494.452 00	13.4002 %	496.429 67	13.4531 %
Silvicultura	0.29265	0.0079%	0.2561 1	0.0069%	0.17404	0.0047 %	0.18811	0.0051 %
Pastagem	1100.603 19	29.8165%	1103.9 1043	29.9115 %	1099.90 192	29.7971 %	1086.75 250	29.4482 %
Mosaico de Usos	129.9241 3	3.5204%	134.39 040	3.6427%	143.673 87	3.8945 %	154.285 18	4.1816 %
Área Urbanizada	8.23567	0.2231%	8.4977 5	0.2303%	10.2110 6	0.2767 %	11.0824 7	0.3003 %
Outras Áreas não vegetadas	0.22906	0.0062%	0.2348 6	0.0064%	0.23653	0.0064 %	0.22074	0.0060 %
Afloramento Rochoso	7.79270	0.2111%	7.7802 3	0.2108%	7.74460	0.2098 %	7.73549	0.2096 %
Rio, Lago e Oceano	4.16593	0.1129%	4.2306 2	0.1146%	4.12354	0.1117 %	4.02056	0.1090 %
Outras Lavouras Temporárias	0.21409	0.0058%	0.2414 0	0.0065%	0.27120	0.0073 %	0.30605	0.0083 %
Café	86.45159	2.3439%	78.795 66	2.1359%	73.2551 2	1.9842 %	72.9883 2	1.9777 %
Outras Lavouras Perenes	0.71619	0.0194%	0.7294 6	0.0198%	0.72117	0.0195 %	0.75595	0.0205 %

Figura 4: Mapas temáticos sobre uso e ocupação do solo na área de estudos nos anos de 1991, 1992, 1993 e 1994.



Fonte: Os autores.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

O Rio Verde tem sua nascente na região de fronteira entre os municípios de Passa Quatro e Itanhandu, na vertente ocidental da Serra da Mantiqueira, a uma altitude de aproximadamente 2.600 metros, próximo à divisa entre os estados de Minas Gerais, São Paulo e Rio de Janeiro. A partir de sua nascente, o rio segue em direção oeste, percorrendo a encosta da serra até desaguar na represa de Furnas, localizada na divisa dos municípios de Elói Mendes e Três Pontas, atingindo uma altitude de cerca de 800 metros. Durante seu percurso, o Rio Verde recebe diversos afluentes significativos, como o Rio Passa Quatro, Ribeirão do

Carmo, Rio Lambari, Rio São Bento, Ribeirão do Aterrado, Rio Palmela, Ribeirão Caeté, Rio Capivari, Rio Baependi, Rio do Peixe, além dos ribeirões Pouso Alto e Espera (IGAM, 2010). A bacia hidrográfica do Rio Verde (Figura 5) está integralmente localizada no estado de Minas Gerais, entre os paralelos 21º 20' a 22º 30', latitude sul, e 44º 40' a 45º 40', longitude oeste, abrangendo uma área de 6.891 km² e banhando 31 municípios na mesorregião sul/sudoeste do estado (IGAM, 2010). Segundo o censo de 2022 do IBGE, aproximadamente 618.544 habitantes vivem na área dessa bacia. A cobertura vegetal natural é composta por campos, cerrados, veredas e remanescentes de floresta estacional semidecidual. Contudo, a silvicultura, especialmente o plantio de eucalipto, tem modificado substancialmente essa vegetação (TESE, 2008). O relevo é caracterizado por cristas assimétricas, escarpas, rampas coluvionares, "mares de morro", colinas convexas, vertentes íngremes e vales encaixados, típicos da geomorfologia da Serra da Mantiqueira (BEATO et al., 1999). Geologicamente, a região é composta predominantemente por rochas pré-cambrianas dos complexos Amparo, Andrelândia, Paraisópolis, Varginha e São João Del Rei, com a presença de quartzitos em várias formações e um extenso complexo de granito-gnaiss. As formações quaternárias, compostas por depósitos sedimentares aluviais e coberturas indiferenciadas, ocupam áreas menores da bacia.

O clima na área é caracterizado como mesotérmico, com temperaturas moderadas e umidade elevada, apresentando três meses de estiagem. A temperatura média anual varia entre 18 e 19 °C, correspondendo majoritariamente ao tipo climático Cwa, embora, nas áreas de cabeceira, seja possível observar condições típicas de clima Cwb. A porção superior do Rio Verde está situada nas proximidades do município de São Lourenço, em uma região dominada por encostas íngremes e solos pouco profundos. Já o baixo curso do rio, na região de Varginha, situa-se em altitudes que variam entre 900 e 1.000 metros (IGAM, 2010).

Figura 5: Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: Os autores.

3.2 DADOS

Foram utilizados dados de vazão da estação fluviométrica de Conceição do Rio Verde, Minas Gerais (código 61460000), localizada na bacia do Rio Verde, abrangendo o período de 1933 a 2023. As informações de georreferenciamento foram obtidas a partir da Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IDE-Sisema, 2023). Adicionalmente, foram utilizados dados de estações fluviométricas e pluviométricas fornecidos pela Agência Nacional de Águas (ANA, 2019), bem como dados climáticos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2022). Para a análise de temperatura e evaporação, foram considerados os dados da estação meteorológica de São Lourenço/MG, além de informações pluviométricas de 10 estações localizadas na área de estudo, todas com séries históricas superiores a 20 anos.

A delimitação da área da bacia hidrográfica e a seleção das estações com séries de dados adequadas foram realizadas utilizando o software QGIS (QGIS.org, 2024). Posteriormente, os dados de precipitação, evapotranspiração e vazão foram processados por meio do software R (R Development Core Team, 2024), permitindo a conversão e o preenchimento de lacunas nas séries temporais.

3.3 MODELAGEM HIDROLÓGICA COM O MODELO GR4J

O GR4J (Modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journalier) é um modelo hidrológico de precipitação-escoamento diário amplamente utilizado para simulação de fluxos em bacias hidrográficas. Este modelo opera com quatro parâmetros principais: X1, que corresponde à capacidade máxima de armazenamento de produção em milímetros; X2, relacionado ao coeficiente de troca de águas subterrâneas; X3, que representa a capacidade máxima de um dia de armazenamento no reservatório de transferência em milímetros; e X4, que define o tempo de base do hidrograma unitário (Perrin et al., 2003; de Andrade et al., 2022). O GR4J pertence à categoria dos modelos de balanço hídrico, sendo projetado para captar a dinâmica do solo e sua interação com a precipitação e evapotranspiração.

O modelo utiliza como entradas diárias a precipitação (P) e a evapotranspiração potencial (E), ambos expressos em milímetros. Sua estrutura é composta por dois reservatórios principais, que simulam os processos de armazenamento da precipitação líquida, percolação e infiltração no solo. Esses reservatórios permitem que o GR4J capture de maneira eficaz o comportamento hidrológico da bacia, considerando as complexas interações entre a superfície e o subsolo (de Andrade et al., 2022; Astorayme et al., 2015).

3.4 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO

A propriedade do modelo hidrológico GR4J foi realizada utilizando o pacote AirGR (Coron et al., 2018) no ambiente de programação R (R Development Core Team, 2024). O processo de mobilidade baseado no método proposto por Michel (1991), no qual se utiliza o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) como função objetivo. O NSE, mede a precisão das simulações em relação aos dados observados, com valores variando entre $-\infty$ e 1, sendo 1 a pontuação ideal (Schönfelder et al., 2017).

Além do NSE, foram utilizados outros indicadores de desempenho para validar o modelo, incluindo o erro médio quadrático (RMSE), o percentual (Pbias), o coeficiente de demonstração de Pearson (r) e o índice de Kling-Gupta (KGE). O RMSE fornece uma medida da magnitude média dos erros nas estimativas de vazão, enquanto o Pbias avalia a tendência das simulações, diminuindo se o modelo tende a subestimar ou superestimar os valores observados. O coeficiente de transparência de Pearson (r) quantifica a relação linear entre as vazões simuladas e observadas, variando entre -1 e 1, com 1 representando uma representação perfeita. O KGE, por sua vez, combina o coeficiente de demonstração, o viés e a variabilidade, sendo uma métrica abrangente de desempenho do modelo (Kling et al., 2012).

O modelo considera processos como percolação e infiltração no solo, utilizando dois reservatórios para armazenar a água precipitada. A quantidade líquida, quando superior à evapotranspiração, é armazenada no reservatório de produção, enquanto, em condições de evapotranspiração predominantemente, o modelo ajusta a evaporação a partir do nível de umidade no solo (Perrin et al., 2003).

O escoamento direto e a percolação restrita para o volume de água que atinge o reservatório de roteamento, sendo este último responsável pela simulação dos fluxos retardados e rápidos, que são tratados por hidrogramas unitários com tempos de base variáveis, conforme as configurações X3 e X4 (Nayak et al., 2021).

Ao final do processo de verificação, o modelo foi validado com base em dados históricos de vazão, utilizando as métricas de desempenho para garantir que as simulações representem de forma satisfatória as condições hidrológicas da bacia científica.

3.5 MAP BIOMAS

Para este estudo, foram utilizados dados do MapBiomas para os anos de 1991 a 1994, acessados diretamente do portal da plataforma MapBiomas Collection 8.0 (MapBiomas, 2023), que disponibiliza mapas anuais de cobertura e uso da terra para todo o território brasileiro. As imagens correspondentes a cada ano foram processadas e analisadas utilizando o software QGIS (QGIS.org, 2024). O foco esteve na avaliação da dinâmica de uso e cobertura do solo na bacia do Rio Verde, Minas Gerais, com ênfase em alterações na vegetação nativa e nas áreas agrícolas.

A relevância dessa abordagem reside no fato de que mudanças no uso do solo impactam diretamente os processos hidrológicos em bacias hidrográficas, afetando fatores como escoamento superficial, infiltração e recarga de aquíferos, conforme demonstrado por estudos como os de Vieira et al. (2020) e Oliveira et al. (2018). Associar os dados do MapBiomas à análise hidrológica permitiu identificar correlações entre a dinâmica de uso do solo e os padrões de vazão e qualidade da água na bacia do Rio Verde. Esta metodologia amplia o entendimento dos impactos das atividades antrópicas na sustentabilidade hídrica e fornece subsídios para a gestão integrada de recursos hídricos (Oliveira *et al.*, 2018).

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil. Brasília: ANA, 2019.
- ANDRADE, J. M. D. Estudos hidrológicos com base em grandes amostras e deep learning: contribuições para aplicações em bacias hidrográficas no Brasil (Master's thesis, Universidade Federal de Pernambuco). 2024.
- ANDRADE¹, J. M.; NETO¹, A. R.; CUNHA, J. E. D. B. L.; ALENCAR, U.; BEZERRA, S. M. G. L. M. XVI SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE 15º SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LÍNGUA PORTUGUESA. 2022.
- ASTORAYME VALENZUELA, M. A.; GARCÍA HERNÁNDEZ, J.; SUAREZ, W.; FELIPE, O.; HUGGEL, C.; MOLINA, W. Modelización Hidrológica con un enfoque semidistribuido en la cuenca del río Chillón, Perú. *Revista Peruana Geo-Atmosférica (RPGA)*, v. 4, p. 109-124, 2015.
- AYZEL, G.; VARENTSOVA, N.; ERINA, O.; SOKOLOV, D.; KUROCHKINA, L.; MOREYDO, V. OpenForecast: The First Open-Source Operational Runoff Forecasting System in Russia. *Water*, v. 11, n. 1546, 2019.
- BEATO, D.A.C; OLIVEIRA, F.A.R.; VIANA, H.S. Projeto Circuito das Águas do Estado de Minas Gerais: Estudos Geoambientais das fontes hidrominerais de Cambuquira, Caxambu, Conceição do Rio Verde, Lambari e São Lourenço. COMIG/CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Belo Horizonte, MG. 142p. 1999.
- COLLARES, E. G.; ARAUJO, E. de; SILVA, B. C. B.; GONÇALVES, G. G.; SILVA, A. C. N. Análise comparativa entre vazão medida e vazão regionalizada em três pares de bacias hidrográficas morfometricamente semelhantes do estado de Minas Gerais. *Revista Mineira de Recursos Hídricos*, Belo Horizonte, v. 3, n. 1, p. e022007, 2022. DOI: 10.59824/rmrh.v3i.224. Disponível em: <https://periodicos.meioambiente.mg.gov.br/NM/article/view/224>.
- CORON, L.; PERRIN, C.; DELAIGUE, O.; THIREL, G. and MICHEL, C. airGR: Suite of GR Hydrological Models for Precipitation-Runoff Modelling. R package version 1.0.10.11. URL: [link do site]. 2018.
- IDE-SISEMA. Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Licenças ambientais emitidas pelo Sistema de Licenciamento Ambiental da Semad. Belo Horizonte: Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, 2023. Dado em formato vetorial (shapefile). Disponível em: [link do site].
- INMET - Instituto Nacional de Meteorologia (2022). “Normais Climatológicas do Brasil (1991- 2020) – Banco de Dados Meteorológicos”. Brasília - DF.
- INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. Resumo Executivo do Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Verde/Instituto Mineiro de Gestão das Águas; Consórcio EcoPLAN Lume. Belo Horizonte, 2010. 75p.
- KLING, H.; FUCHS, M.; PAULIN, M. Runoff conditions in the upper Danube basin 434 under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of Hydrology*, v. 424-425, p. 264-277, 2012. doi:10.1016/j.hydrol.2012.01.011.

LE LAY, M. Modémisation hydrologique dans un contexte de variabilité hydro-climatique. Une approche comparative pour l'étude du cycle hydrologique à méso-échelle au Bénin. Hydrologie. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2006. Français. ffNNT. p. 251. disponível em: [link do site].

MapBiomias (2024). Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD). MapBiomias General "Handbook". Collection 9, version 1. p. 61.

MICHEL, C. Hydrologie appliquée aux petits bassins ruraux, Hydrology handbook. Cemagref, Antony, France. 1991.

NAYAK, A. K.; BISWAL, B.; SUDHEER, K. P. Role of hydrological model structure in the assimilation of soil moisture for streamflow prediction. Journal of Hydrology, v. 598, p. 126465, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126465>.

NETO, J V F, Aplicacao do Modelo KWM - Kentucky Watershed Model - em Bacias da Regiao Semi-arid a do Nordeste do Brasil. Dissertacao (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Paraiba, Campina Grande, 1995.

OLIVEIRA, L C. K., Papel do Monitoramento e da Previsao de Vazoes no Gerenciamento de Bacias Hidrograficas. Dissertacao (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

OLIVEIRA, V. A. de .; MELLO, C. R. de .; VIOLA, M. R.; SRINIVASAN, R. LAND-USE CHANGE IMPACTS ON THE HYDROLOGY OF THE UPPER GRANDE RIVER BASIN, BRAZIL. CERNE, v. 24, n. 4, p. 334–343, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/01047760201824042573>.

LOUDIN, L.; KAY, A.; ANDRÉASSIAN, V.; PERRIN, C. Are seemingly physically similar catchments truly hydrologically similar? Water Resources Research, v. 46, n. W11558, 2010.

PAGANO, T.; HAPUARACHCHI, P.; WANG, Q. Continuous rainfall-runoff model comparison and short-term daily streamflow forecast skill evaluation. CSIRO Tech. Rep. (EP103545), CSIRO, Austrália, 2010.

PASSERAT DE SILANS, A. M. B; ALMEIDA, C. N., ALBUQUERQUE, D. J. S.; PAIVA, A. E. D. B, Aplicacao do modelo hidrologico distribuido A^UMOD a bacia hidrografica do rio do Peixe - Estado da Paraiba, Revista Brasileira de Recursos Hidricos, v. 5, n. 3, 2000.

PERRIN, C.; MICHEL, C.; ANDRÉASSIAN, V. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. Journal of hydrology, v. 279, n. 1-4, p. 275-289, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00225-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00225-7).

PONCELET, C.; MERZ, R.; MERZ, B.; PARAJKA, J.; LOUDIN, L.; ANDRÉASSIAN, V.; PERRIN, C. Process-based interpretation of conceptual hydrological model performance using a multinational catchment set. Water Resour. Res., v. 53, p. 7247–7268, 2017.

PROJETO MAPBIOMAS – Coleção [8] da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil, acessado em [29/09/2024] através do link: https://storage.googleapis.com/mapbiomas-public/initiatives/brasil/collection_8/lclu/coverage/brasil_coverage_2023.tif.

QGIS.org. QGIS 3.34. Geographic Information System Developers Manual. QGIS Association. Electronic document: https://docs.qgis.org/3.34/en/docs/developers_guide/index.html 2024.

R Development Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing; R Foundation for Statistical Computing: Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>. 2024.

SCHÖNFELDER, L. H.; BAKKEN, T. H.; ALFREDSEN, K.; ADERA, A. G. Application of HYPE in Norway, Assessment of the hydrological model HYPE as a tool to support the implementation of EU Water Framework Directive in Norway, SINTEF Energy Research, report no. 2017:00737. Disponível em: <https://sintef.brage.unit.no/sintef-xmlui/handle/11250/2499427>. 2017.

TECNOLOGIA EM DISTEMAS ESPACIAIS LTDA (TESE). Plano Diretor da Bacia Hidrográfica do Rio Pará. Associação de Usuários da Bacia Hidrográfica do rio Pará/Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco e Parnaíba – CODEVASF. 2008.

TODINI, E. The ARNO rainfall-runoff model. *J. Hydrology*, v. 175, p. 339-382, 1996.

TUCCI, C. E. M. Regionalização de Vazões. ABRH - Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre - RS. 2002.

VIEIRA, M. J.; COSTA SANTOS, L. A.; LIMA SILVA, A. C. de; SILVA-NETO, C. de M. e. O Uso do solo e os impactos na qualidade da água da bacia hidrográfica do ribeirão Vereda. *Revista Brasileira De Geografia Física*, v. 16, n. 5, p. 2690–2703, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.5.p2690-2703>.