

DOI: <https://doi.org/1059824/rmrh.v6.322>

CALIBRAÇÃO DE UM MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUÍDO À BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO A PARTIR DE CHUVA ESTIMADA POR SATÉLITE

Calibration of a distributed hydrological model for the São Francisco river basin using satellite-based precipitation estimates

Iago de Carvalho Mello¹Camila Coelho Welerson²Filipe Otávio Passos^{3*}Flávia Santos Ferraz⁴Fabiane de Cássia dos Santos⁵Benedito Claudio da Silva⁶

RESUMO

A bacia do rio São Francisco é uma das principais bacias hidrográficas brasileiras, com uma extensão territorial que percorre seis estados desde o Sudeste até o Nordeste do país. Seu principal curso d'água, o rio São Francisco, é essencial tanto para atividades industriais quanto para a irrigação agrícola, além de desempenhar um papel significativo no setor hidroelétrico nacional. Dessa forma, a gestão eficaz dos recursos hídricos é crucial para enfrentar secas e enchentes e garantir a produção de energia. Ciente dessa importância, o presente estudo visa contribuir para aprimorar a gestão hídrica por meio do ajuste do Modelo de Grandes Bacias (MGB-IPH), visando a estimativa e previsão de vazões em toda área da bacia. Para realizar a

¹ Mestrando em Engenharia Hídrica pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Graduado em Engenharia Hídrica pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) – e-mail: iagomello98@gmail.com

² Doutoranda em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Mestre em Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Graduada em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) – e-mail: camilawelerson@ufmg.br

³ Doutorando em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Mestre em Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Graduado em Engenharia Hídrica pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) – e-mail: lip_pas@hotmail.com* Autor correspondente

⁴ Mestranda em Engenharia Hídrica pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Graduada em Engenharia Hídrica pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) – e-mail: flaviaferraz.unifei@gmail.com

⁵ Mestranda em Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Graduada em Engenharia Hídrica pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) – e-mail: fabianecassia@unifei.edu.br

⁶ Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Graduado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Professor Adjunto da Universidade Federal de Itajubá – e-mail: silvabenedito@unifei.edu.br

calibração foram utilizados dados de precipitação diária estimados por satélite, gerados pelo produto MERGE do CPTEC/INPE. A bacia foi dividida em 66 sub-bacias para calibração, visando-se uma boa representação das vazões em todas as regiões da bacia. Os resultados demonstram que o modelo apresentou ajuste classificado como muito bom e bom para a maioria das sub-bacias, com menor desempenho nas regiões semiáridas. De modo geral, o modelo MGB-IPH é uma ferramenta valiosa para a gestão dos recursos hídricos, com potencial para contribuir para um planejamento mais eficaz da disponibilidade hídrica e antecipação de eventos climáticos extremos.

Palavras-chave: Modelo de Grandes Bacias (MGB-IPH); Gestão de recursos hídricos; Sensoriamento remoto; Simulação hidrológica.

ABSTRACT

The São Francisco River basin is one of Brazil's most significant hydrographic basins, spanning six states from the Southeast to the Northeast of the country. Its main watercourse, the São Francisco River, is vital for industrial activities and agricultural irrigation and plays a key role in the national hydroelectric sector. Effective water resource management is, therefore, essential for mitigating droughts and floods and ensuring energy production. This study seeks to enhance water resource management by calibrating the Large Basin Model (MGB-IPH) to improve the estimation and forecasting of river flows across the basin. For the calibration process, daily satellite-based precipitation data from the MERGE product by CPTEC/INPE were utilized. The basin was divided into 66 sub-basins to ensure accurate representation of flows across its various regions. The results indicate that the model achieved classifications of "very good" and "good" adjustments in most sub-basins, with relatively lower performance observed in semi-arid regions. Overall, the MGB-IPH model proves to be a valuable tool for water resource management, with the potential to facilitate more effective water availability planning and advance the anticipation of extreme weather events.

Keywords: Large Basin Model (MGB-IPH); Water resources management; Remote sensing; Hydrological simulation.

Data de submissão: 27/09/2024

Data de aprovação: 26/12/2024

1 INTRODUÇÃO

A bacia do rio São Francisco abrange parte de seis estados e do Distrito Federal (DF), sendo o mais extenso rio a escoar exclusivamente em território brasileiro. Também conhecido como “o rio da integração nacional”, é destaque no cenário nacional pela diversidade

de atividades que dependem de seus recursos hídricos e pelos conflitos cada vez mais frequentes entre seus diversos usuários (Ferrarini, 2020). Nas últimas décadas o potencial de conflitos tem aumentado, devido ao acentuado crescimento das áreas de irrigação, a necessidade de maior eficiência na geração das grandes usinas hidrelétricas e abastecimento das populações das áreas urbanas (Silva *et al.*, 2021). Além disso, devido às suas grandes dimensões, de acordo com Petrucci (2022), a precipitação na bacia apresenta um comportamento variado tanto no tempo quanto no espaço, pois em geral, na região das cabeceiras, a precipitação é elevada devido às altas taxas de umidade, mas diminui à medida que se aproxima do norte da Bahia, uma área semiárida. Conforme Maillard *et al.*(2022), essas mudanças tornam a região particularmente vulnerável a eventos extremos, como enchentes, e principalmente por secas severas e de longa duração (Freitas *et al.*, 2021).

Diante da forte variabilidade climática e da importância econômica, ambiental e social da bacia do rio São Francisco, é fundamental desenvolver ferramentas que auxiliem nas tomadas de decisão sobre recursos hídricos na bacia, sobretudo em situações de criticidade hídrica. Antecipar a ocorrência de eventos hidrológicos extremos, em diferentes horizontes de antecedência, é uma das soluções com potencial para contribuir no aumento da resiliência em relação aos recursos hídricos. Entretanto, a execução e aplicação de previsões de vazão no Brasil, de forma planejada e rotineira, é tradicionalmente realizada somente pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), para a operação das usinas hidrelétricas do Sistema Interligado Nacional (SIN) (Silva *et al.*, 2021).

São poucas as experiências brasileiras de previsões de vazão, ou nível dos rios, voltadas para finalidades fora do setor elétrico, como alerta para inundações e estiagens severas, que sejam feitas de forma operacional. Um exemplo é o sistema de Alerta de Eventos Críticos (SACE)⁷, que acompanha e emite alerta para algumas bacias no território nacional, mas em um formato pouco automatizado, que não incorpora a ampla gama de dados e tecnologias disponíveis atualmente. Em países onde a previsão hidrológica é mais desenvolvida, os sistemas estão integrados com a previsão meteorológica, a exemplo de como é feito no setor elétrico do Brasil (ONS, 2009).

A baixa disponibilidade de dados de precipitação e vazão em tempo real é uma das principais dificuldades para implementação de um sistema de previsão de vazão no Brasil (Jiménez; Collischonn, 2015). Em relação à vazão, a rede de estações telemétricas melhorou

⁷ www.sgb.gov.br/sace/

nos últimos anos, mas é muito reduzida a quantidade dessas estações em nossas bacias, principalmente em rios de médio ou pequeno porte com cidades impactadas por inundações. Apesar disso, na maioria das bacias, a rede convencional existente é suficiente para ajustar razoavelmente modelos hidrológicos destinados à previsão. Do ponto de vista da precipitação, o monitoramento por estações em solo é fundamental, mas as estações telemétricas também são insuficientes em muitas áreas. Entretanto, as estimativas por satélite apresentaram grande avanço nos últimos anos, com diversos produtos sendo disponibilizados em resoluções espaciais e temporais cada vez mais refinadas (Hinge *et al.*, 2022).

A partir dos produtos de satélite é possível obter com facilidade, dados atualizados de chuva cobrindo grandes áreas, em formatos adequados para serem aplicados em modelos hidrológicos de transformação chuva-vazão (Mahmoud *et al.*, 2021). Com dados atualizados de chuva e um modelo hidrológico ajustado, torna-se viável gerar previsões de vazão para a tomada de decisão antecipada em casos de eventos extremos.

Portanto, pode-se afirmar que há disponibilidade de dados e da tecnologia necessária para se operacionalizar um sistema de previsão baseado em modelos hidrológicos. O primeiro passo para construção desse sistema é ajustar um modelo de transformação chuva-vazão, que possa incorporar dados oriundos de sensoriamento remoto e modelos atmosféricos. No caso das previsões operacionalizadas pelo ONS, para as usinas hidrelétricas do SIN, diferentes modelos já foram utilizados, incluindo modelos estocásticos, modelos com embasamento físico (conceituais) e baseados em técnicas de inteligência artificial (Aquila *et al.*, 2023).

Recentemente o ONS (2018) adotou o modelo *Soil Moisture Accounting Procedure* (SMAP) como o padrão para todas as usinas do SIN. O SMAP é um modelo conceitual e concentrado, que possui a vantagem de ter uma estrutura simples e bem adaptada ao sistema de previsão do ONS. Por ser do tipo concentrado, é um modelo que pode ser usado para gerar previsões para alerta em cidades que sofrem inundações, mas não é adequado quando se necessita gerar simulações ou previsões em vários pontos dentro da bacia. Neste caso, um modelo do tipo distribuído como no caso do Modelo de Grandes Bacias (MGB) se mostra mais adequado (Collischonn *et al.*, 2007). O MGB também já foi utilizado em previsões operacionais do ONS e, por ser do tipo distribuído, possui a vantagem de incorporar melhor as variabilidades físicas e climáticas da bacia hidrográfica (Fan *et al.*, 2015).

Além da aplicação em previsões de vazão, o MGB já foi usado para finalidades como avaliação de impactos de mudanças climáticas, mudanças nos usos e cobertura do solo, dentre outras aplicações, em bacias de toda América do Sul (Brêda *et al.*, 2023). Para a bacia do rio São Francisco, o MGB já foi ajustado para prever vazões, mas focado nas usinas hidrelétricas, não atendendo as necessidades de outros setores de usuários de recursos hídricos (Silva, 2005). Além disso, sempre houve a dificuldade de operacionalização do modelo, devido às carências de dados hidrometeorológicos.

Por este motivo, e devido às mais recentes fontes de dados de grande escala, neste trabalho é apresentado um ajuste do modelo MGB à bacia do rio São Francisco através da incorporação de dados de precipitação estimada por satélite, com o objetivo de ser uma ferramenta de auxílio à tomada de decisões que atenda à maior diversidade possível de aplicações. O modelo assim ajustado, poderá ser utilizado para realizar a estimativa de vazões em toda a extensão da bacia, preenchendo lacunas ou gerando vazões para bacias sem dados, e também para a previsão de vazões que atendam à diferentes setores de usuários e à sistemas de alerta de eventos climáticos extremos, além de impactos de alterações antrópicas e mudanças climáticas globais.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Modelagem hidrológica

A modelagem hidrológica é uma ferramenta de muito valor para a gestão eficiente dos recursos hídricos, pois permite que tomadores de decisão compreendam e prevejam o comportamento de bacias hidrográficas sob diferentes condições climáticas e de uso da terra. A previsão de vazões é uma das principais aplicações desses modelos, sendo vital para várias áreas, como a operação de reservatórios, a mitigação de enchentes e a alocação de recursos hídricos (Yuan *et al.*, 2016). Com a crescente variabilidade climática e os impactos das mudanças no clima, prever com precisão os fluxos de água torna-se ainda mais crítico para garantir a segurança hídrica e a sustentabilidade dos sistemas aquáticos.

Os modelos hidrológicos são ferramentas utilizadas para realizar a representação dos processos que ocorrem em uma bacia hidrográfica. Esses modelos visam determinar, com eficiência e precisão, os componentes do ciclo hidrológico na bacia, além de estimar

eficientemente o comportamento e a magnitude da água (Marinho Filho *et al.*, 2012). Com os modelos, é possível representar, através de equações matemáticas, os diversos processos físicos que ocorrem em uma bacia, como a transformação de chuva em escoamento, a evapotranspiração, propagação de ondas de cheia, as reservas subterrâneas, sendo muito útil em diversas análises hidrológicas (Pontes *et al.*, 2015).

Segundo Ferreira (2019), no Brasil os eventos climáticos extremos mais frequentes estão relacionados aos fenômenos hidrometeorológicos, e as projeções climáticas para o futuro sugerem um aumento na intensidade e quantidade de eventos extremos associados à precipitação. Nesse contexto, a modelagem hidrológica surge como uma ferramenta de grande relevância para o estudo desses fenômenos, pois permite a avaliação dos processos hidrológicos em diversas escalas espaciais e temporais. Dessa forma, o uso de modelos hidrológicos se tornou amplamente difundido, mostrando resultados promissores na representação do comportamento de bacias hidrográficas. Estes modelos demonstram eficácia tanto na simulação e previsão de cenários hipotéticos para a avaliação de impactos, quanto como ferramentas na elaboração de projetos hidrológicos e/ou hidráulicos (Marinho Filho *et al.* 2012).

Os modelos hidrológicos podem ser classificados levando em conta diversos aspectos. Podem ser estocásticos ou determinísticos, quando se considera ou não algum componente probabilístico na estrutura do modelo ou nas variáveis de entrada. Empíricos ou conceituais, dependendo do tipo de equacionamento utilizado para representar os processos hidrológicos. Discretos ou contínuos, quanto a forma de representação dos dados. Concentrados ou distribuídos, quanto à forma de representar a variabilidade espacial das características físicas da bacia. E podem ser estacionários ou dinâmicos quanto a existência de dependência temporal (Moreira, 2005).

Do ponto de vista da representação espacial da bacia, os modelos concentrados, não consideram a variabilidade espacial das variáveis hidrológicas envolvidas no processo modelado. Nessa modelagem, todas as variáveis do sistema são avaliadas em termos de média espacial, ou seja, que chuva, evaporação, infiltração, vazões e outras variáveis são consideradas em termos médios na bacia (Almeida; Serra, 2017). Por outro lado, de acordo com Ma *et al.* (2016), os modelos distribuídos tem uma estrutura modular, tendo sua estrutura tridimensional, com capacidade de representar a variabilidade espacial das características físicas de uma bacia hidrográfica, refletindo a heterogeneidade das direções horizontal e vertical dos fluxos de água, baseado nas leis de conservação de massa, energia e o momento. Nas direções verticais destaca-

se os fluxos atmosfera-solo, solo-aquífero e solo/vegetação-atmosfera. Já nas direções horizontais destaca-se o escoamento interno nas unidades elementares da bacia e de escoamento ao longo da rede de drenagem (Collischonn *et al.*, 2020).

Existem diversos softwares que abrangem essas características, como, Sistema de Modelagem Hidrológica (HEC-HMS), desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército Americano; e o SWAT, um modelo hidrológico de domínio público, desenvolvido pelo *Agricultural Research Service (ARS)*, no *Grassland, Soil and Water Research Laboratory*, em Tempe, Texas, EUA (Brito Neto *et al.*, 2021).

O MGB-IPH em comparação com outros modelos existentes, ressalta a capacidade do modelo de lidar com grandes conjuntos de dados, além da possibilidade de descrever completamente os principais processos hidrológicos dinâmicos de uma bacia. Um modelo criado no Brasil, que permite a recuperação automática de dados de solo e vegetação, por intermédio de imagens de satélite (Ma *et al.*, 2016; Brito Neto *et al.*, 2021). Segundo Paiva *et al.* (2024), o modelo MGB-IPH pode simular o processo de transformação de precipitação em vazão, voltado para aplicações em grandes bacias hidrográficas, tendo em vista o baixo monitoramento de dados ambientais e a duração limitada dos registros hidrológicos disponíveis.

Um dos grandes desafios, em relação aos modelos hidrológicos distribuídos, é a quantidade de dados de entrada envolvidos para um ajuste adequado, sejam dados hidrometeorológicos ou características físicas da bacia. Pela falta expressiva desses dados, como acontece em muitos casos, é preciso buscar por novas tecnologias de estimativa. Neste sentido, o sensoriamento remoto por satélites tem-se mostrado um instrumento fundamental, permitindo estimar fluxos como evapotranspiração, umidade do solo e precipitação, que podem ser usados como entrada ou para calibração de modelos hidrológicos (Paiva *et al.* 2024).

2.2 Estimativa de chuva por satélite

A precipitação desempenha um papel fundamental no ciclo hidrológico, visto que atua como mecanismo de retorno da água para a superfície. Segundo Wang *et al.* (2023), do ponto de vista hidrológico, a precipitação representa a principal fonte de água nas bacias hidrográficas, desempenhando um papel fundamental na formação das vazões dos rios. Assim, prever a ocorrência de precipitação, incluindo sua intensidade e distribuição espacial, é um

requisito crucial em sistemas de gerenciamento de recursos hídricos, especialmente quando se busca previsões com antecedência superior ao tempo de concentração da bacia.

Para obter dados de precipitação, pode-se utilizar dados de pluviômetros, uma das ferramentas mais antigas de medição. O monitoramento exige a instalação e manutenção de pluviômetros e/ou pluviógrafos em uma região, necessita de uma grande densidade de pontos bem distribuídos espacialmente, além de buscar uma escala de medição representativa (Toledo; Andrade, 2021).

No entanto, de acordo com Camparotto *et al.* (2013), esses equipamentos apresentam a desvantagem de não cobrir grandes áreas, também limitados em questão de uma rede de monitoramento e necessidade de manutenção preventiva. Além disso, conforme Falck *et al.* (2016), a rede convencional de pluviômetros e pluviógrafos existente é espacial e temporalmente deficiente, o que resulta em simulações com resultados inadequados devido à espacialização imprecisa dos dados (Collischonn *et al.*, 2007).

Segundo Silva (2022), o Brasil conta com uma rede de 2.767 estações pluviométricas, gerenciadas pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e 400 estações meteorológicas convencionais e automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), ainda é um número baixo de estações, considerando toda a extensão continental do país. Essa quantidade não consegue representar com detalhes a variabilidade temporal e espacial da precipitação em todo o território brasileiro. Além disso, por mais que o Brasil tenha 100 anos de observações, a maior parte das estações pluviométricas possuem apenas dados mais recentes, o que acaba dificultando a obtenção de séries históricas mais longas.

Tecnologias para monitoramento dos dados de precipitação tiveram avanços importantes com a utilização de sensoriamento remoto, se mostrando uma ferramenta útil e com forte aperfeiçoamento nas últimas décadas. Sensores a bordo de satélites fornecem informações detalhadas sobre a variabilidade da precipitação em escala global (Toledo; Andrade, 2021).

De acordo com Collischonn *et al.* (2007), Ochoa-Rodriguez *et al.* (2019) e Sokol *et al.* (2021), uma outra possível alternativa para obtenção de dados de chuva são os radares meteorológicos, que cobrem uma área menor que os satélites, mas geram dados mais detalhados, tanto em escala espacial como temporal. Entretanto, a cobertura de radares no Brasil ainda é baixa, sendo insuficiente para atender aplicações em bacias de grande escala, como a do rio São Francisco. Assim, a utilização de estimativas de precipitação por satélites mostra-se

como a opção mais promissora, face à ampla cobertura espacial e temporal dos produtos atualmente disponíveis.

Além disso, através da utilização dos satélites é possível estimar parâmetros e fluxos ligados aos processos hidrológicos, tais como umidade do solo, evapotranspiração, precipitação, dentre outros (Silva, 2022). Segundo Xia *et al.* (2023), foram obtidos resultados promissores, em nível mundial, na integração entre modelos atmosféricos e hidrológicos em aplicações de previsão.

Atualmente, há disponível uma ampla variedade de sensores presentes nos mais diversos satélites, o satélite *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM), lançado em 1997, foi a primeira missão dedicada à precipitação (Kidd e Huffman, 2011). Posteriormente, no início de 2014, como produto de uma parceria entre a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e a *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA), foi lançado o observatório central da missão *Global Precipitation Measurement* (GPM) para substituir o TRMM, com o objetivo de aprimorar a estimativa de precipitação. O satélite GPM disponibiliza diversos produtos de estimativas de precipitação denominadas por *Integrated Multi-satellite Retrievals* (GPM-IMERG), que possui resolução temporal e espacial de 30 minutos e 0,1°, respectivamente (Gadêlha, 2018).

Com base nas medições do TRMM e, posteriormente, do GPM, o Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), desenvolveu o produto MERGE, obtido a partir da combinação entre a precipitação observada e a precipitação estimada por satélite (Rozante, *et al.*, 2020). Atualmente o CPTEC utiliza as estimativas de precipitação do *Global Precipitation Measurement* (GPM). O MERGE-CPTEC-GPM também é disponibilizado diariamente, tendo como variável a precipitação acumulada em 24 horas (das 12h às 12h UTC), cobrindo a América do Sul e oceanos adjacentes (90°W-26°W e 57°S-06°N) (Rozante, *et al.*, 2020).

Os produtos de precipitação baseados em satélite têm facilitado cada vez mais a estimativa de precipitação em grande parte do globo e se tornaram uma alternativa complementar para aplicações hidrometeorológicas e estudos climáticos em regiões não medidas. De acordo com Ali *et al.* (2023), a estimativa de chuva por satélite melhora a performance dos modelos hidrológicos distribuídos como ferramentas valiosas para compreensão da dinâmica hidrológica e para avaliar capacidades hídricas em uma bacia muito grande como do rio São Francisco.

Estudos recentes demonstraram de maneira satisfatória a eficácia da utilização de dados de precipitação por satélite em modelagens hidrológicas, aplicadas tanto em estudos relacionados a desastres naturais quanto no aprimoramento dos serviços ecossistêmicos. Em seus estudos, Hinge *et al.* (2022) revisaram de forma abrangente, o uso de produtos de precipitação por satélite, incluindo o TRMM, IMERG e CMORPH, em modelagem hidrológica para simulação e previsão de enchentes. Os autores concluíram que produtos baseados em micro-ondas, como o TRMM, geralmente têm melhor desempenho do que aqueles baseados em infravermelho. Além disso, destacaram que o IMERG, sucessor do TRMM, demonstrou ser ainda mais preciso e com maior potencial para aplicações em estudos de inundações. Já Thanabalan *et al.* (2023) analisaram o uso de dados de satélite, incluindo TRMM, para entender as condições de seca na Índia. Em seus estudos, correlacionaram os dados de precipitação do TRMM com a temperatura da superfície terrestre (LST) e o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), derivados de outros satélites, concluindo que a integração desses dados permitiu uma melhor compreensão da seca e sua relação com a biomassa vegetal.

Para a bacia do alto Blue Nile, Lakew *et al.* (2020) avaliaram o desempenho de diferentes produtos de precipitação global, incluindo o TRMM 3B42v7, utilizando o modelo hidrológico distribuído CREST. O estudo comparou o desempenho dos produtos de precipitação com dados de pluviômetros, concluindo que o TRMM 3B42v7 demonstrou um desempenho satisfatório na simulação de fluxo. Ainda, Rasheed *et al.* (2024) analisaram a influência da resolução de dados de entrada, incluindo dados climáticos, na precisão do modelo hidrológico SWAT. Em seus estudos, mencionaram o uso de produtos de precipitação de satélite, como o TRMM, como alternativa em situações com dados limitados de pluviômetros, ressaltando a importância de se considerar a resolução espacial e temporal dos dados de precipitação para obter resultados mais precisos.

Entretanto, o uso de dados de precipitação de satélite em modelagem hidrológica requer atenção às suas limitações. Os produtos de precipitação de satélite, apesar de oferecerem ampla cobertura espacial e temporal, sofrem com erros sistemáticos e aleatórios, como subestimação da precipitação orográfica, dificuldade em penetrar nuvens densas e baixa resolução espacial em comparação aos pluviômetros; por outro lado, as observações de pluviômetros, embora precisas, são pontuais e podem não representar adequadamente a variabilidade espacial da precipitação (Belay *et al.*, 2022). Ainda segundo os autores, a integração de dados terrestres com dados de satélite permite obter resultados mais precisos e confiáveis, e a escolha do método

mais adequado para essa combinação depende das características específicas da área de estudo, da disponibilidade de dados e dos objetivos da modelagem.

2.3 Desafios para a simulação da Bacia do Rio São Francisco

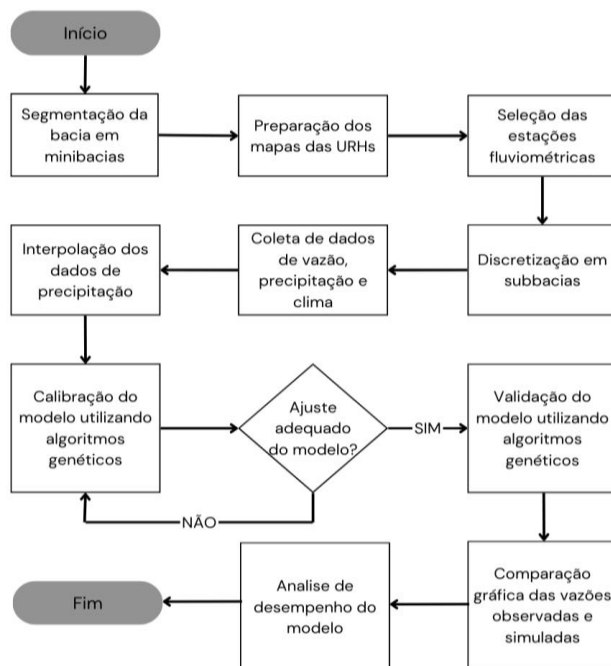
Realizar a simulação hidrológica na bacia do rio São Francisco é um desafio com certo grau de dificuldade, em função da grande variabilidade de características fisiográficas e climáticas da bacia. Outro complicador é a existência de muitos barramentos nos cursos d'água, seja para geração de energia, mas também para outros usos da água, visto que a região é muito suscetível a eventos de seca e de cheia. Esses barramentos alteram significativamente o comportamento dos dados de vazão e precipitação, tornando sua interpretação mais difícil pelos modelos existentes.

Para a bacia do rio São Francisco, embora trabalhos anteriores tenham relatado que os dados disponíveis tenham sido suficientes para um bom ajuste de modelo hidrológico, constatou-se que existem deficiências importantes de dados pluviométricos e climatológicos, principalmente nas regiões semiáridas (Fan *et al.*, 2014; Oliveira *et al.*, 2020). Essas deficiências de dados atrapalham o ajuste do modelo, gerando resultados ruins para algumas regiões da bacia. Além disso, em aplicações que dependem de dados em tempo real, como a previsão de vazões, a baixíssima disponibilidade de dados de estações pluviométricas telemétricas compromete muito os resultados, reforçando a importância do uso de estimativas por satélite.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia de ajuste do modelo MGB-IPH consiste no processamento dos dados de entrada, atualmente realizado através de uma interface com o software QGIS. Parte-se do modelo digital de elevação da bacia, para gerar a divisão de minibacias e sub-bacias, em função da disponibilidade de estações fluviométricas. Com os mapas de usos e cobertura do solo e tipos de solo são geradas as unidades de resposta hidrológica (URHs). Todos os dados, incluindo precipitação e dados meteorológicos são processados para gerar os arquivos de entrada, a partir dos quais o modelo é calibrado pela técnica de algoritmos genéticos. O Fluxograma 1 ilustra detalhadamente a metodologia adotada.

Fluxograma 1 – Processo metodológico de ajuste do modelo MGB-IPH

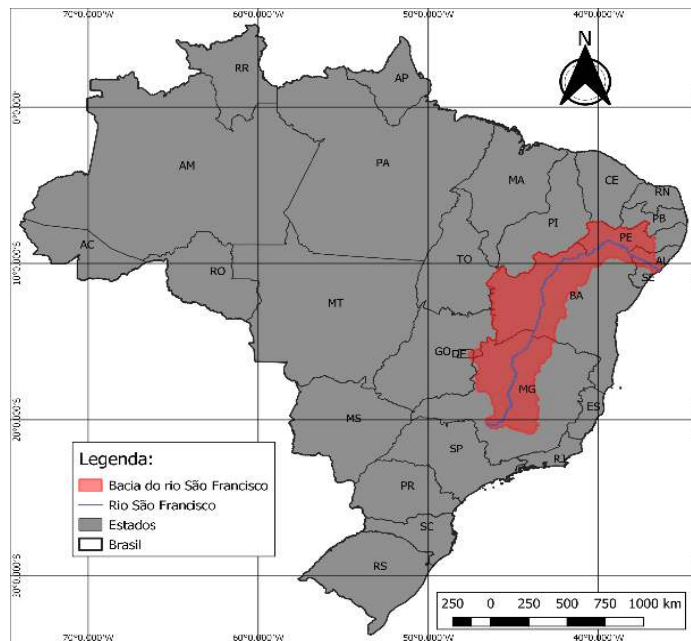


Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

3.1. Área de estudo

O rio São Francisco possui grande importância nacional, sendo um dos maiores corpos hídricos do Brasil (MAPA 1). A bacia hidrográfica do Rio São Francisco possui uma área de drenagem de aproximadamente 640.000 km², com uma extensão de 2.900 km, com sua nascente na Serra da Canastra, no estado de Minas Gerais e a sua foz no Oceano Atlântico, entre os estados de Alagoas e Sergipe (Souza Neto *et al.*, 2023). Ela abrange estados como, Bahia (48,2%), Minas Gerais (36,8%), Pernambuco (10,9%), Alagoas (2,2%), Sergipe (1,2%), Goiás (0,5%), e o Distrito Federal (0,2%), acomodando um total de 505 municípios, cerca de 9% do total de municípios do país (Silva; Pereira, 2023). Está contida por uma parte significativa no polígono das secas, a qual é uma área propícia para que haja chuvas abaixo da média e longos períodos de estiagem.

Mapa 1 – Localização da bacia hidrográfica do Rio São Francisco no território brasileiro



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

De acordo com Silva, Tucci e Collischonn (2005) o clima regional apresenta uma variabilidade associada à transição do úmido para o árido, com temperatura média anual variando de 18 a 27° C e, ainda, um baixo índice de nebulosidade e grande incidência de radiação solar. Os fenômenos *El Niño* e *La Niña* interferem sensivelmente no clima da região, proporcionando períodos de secas e períodos úmidos com frequência irregular. A precipitação apresenta média anual de 1.036 mm, sendo os mais altos valores na ordem de 1.400 mm – verificados nas nascentes do rio São Francisco e os mais baixos – cerca de 350 mm – entre Sento Sé (BA) e Paulo Afonso (BA). A evapotranspiração média é de 896 mm/ano, apresentando valores elevados em toda região: entre 1.400 mm (verificada no submédio São Francisco) e 840 mm (no Alto). As maiores declividades no curso principal do São Francisco são encontradas nas cabeceiras e nas proximidades da foz, e são nesses trechos que estão localizados os principais aproveitamentos hidrelétricos.

3.2 O Modelo Hidrológico de Grandes Bacias (MGB-IPH)

O modelo hidrológico MGB-IPH (Modelo de Grandes Bacias do Instituto de Pesquisas Hidráulicas) é um modelo de simulação já testado com sucesso em bacias de todas

as regiões brasileiras, devido à sua capacidade de representar detalhadamente os processos hidrológicos, além de ser uma ferramenta gratuita e de fácil manipulação (Pontes, *et al.*, 2015). Desenvolvido no Brasil, o MGB-IPH é um modelo distribuído, o que significa que ele divide a bacia em células menores, permitindo simular as diferentes características físicas e de uso do solo em cada uma delas. Isso torna o modelo capaz de capturar as heterogeneidades espaciais da bacia, resultando em uma previsão de vazões mais precisa, especialmente em regiões com grande variabilidade topográfica e de cobertura vegetal (Ávila *et al.*, 2022).

A partir da versão de 2011, o modelo MGB divide a bacia em pequenas unidades denominadas minibacias. No interior de cada célula é considerada a variabilidade de características físicas, como a cobertura vegetal e os tipos de solo. O intervalo de tempo de cálculo é diário ou horário. A variabilidade espacial da precipitação é considerada através da interpolação dos dados dos postos pluviométricos para cada uma das minibacias. As variabilidades do relevo, dos tipos de solos e do seu uso e cobertura vegetal são consideradas através da utilização de planos de informação classificados a partir de imagens de satélite, ou mapas digitalizados.

O balanço de água no solo é realizado utilizando uma metodologia baseada na geração de escoamento superficial por excesso de capacidade de armazenamento, porém com uma relação probabilística entre a umidade do solo e a fração de área de solo saturada. A evapotranspiração é estimada através do método de Penmann–Monteith. A propagação da vazão nos rios é realizada utilizando o método de Muskingum-Cunge linear e/ou não-linear. A propagação de vazão no interior de cada célula é realizada utilizando a metodologia do reservatório linear simples, em três processos paralelos: escoamento superficial, escoamento subsuperficial e escoamento subterrâneo.

Embora alguns processos sejam representados de forma conceitual, o modelo hidrológico conta com uma forte base física, o que fortalece a relação entre os parâmetros e as características físicas da bacia. Tucci e Collischonn (2001) apresentam maiores detalhes sobre o modelo MGB-IPH.

3.3 Preparação de dados e ajuste do modelo

A bacia foi segmentada em 5.078 minibacias, definidas por trechos de 20 km da rede de drenagem. Seguindo essa etapa, foi preparado o mapa das URHs, constituído da

combinação de classes de tipo e usos do solo. Utilizou-se o mapa de URHs desenvolvido por Fan *et al.* (2022) e os dados foram extraídos para a área da bacia do rio São Francisco. Para a construção das sub-bacias, foram selecionadas 65 estações fluviométricas de um total de 170 existentes na bacia. A escolha das estações priorizou aquelas com dados telemétricos, sempre que possível, e com base na seleção de trabalhos anteriores (Silva, 2005).

A partir das coordenadas das estações fluviométricas selecionadas, foi gerado um mapa das sub-bacias, resultando em 66 sub-bacias discretizadas, incluindo a foz. Os dados de vazão foram obtidos da plataforma Hidroweb da Agência Nacional de Águas, sendo utilizados 58 postos fluviométricos, e séries temporais de 7 usinas hidrelétricas do Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR). Como dado de precipitação foi utilizado o produto MERGE do CPTEC/INPE⁸, que abrange todo o território brasileiro. Os dados de precipitação foram interpolados utilizando o método do inverso da distância. Os dados climáticos foram obtidos da base de dados climatológica do INMET, resultando na localização de 39 postos climatológicos.

Os dados abrangem o período de 01/01/2010 a 31/12/2021, sendo que o período até 31/12/2018 foi utilizado para calibração e o restante para validação do ajuste. Escolheu-se o período de ajuste em função da disponibilidade de dados, principalmente das precipitações por satélite, e também por ser um período mais recente. Pretende-se que o modelo ajustado seja empregado para gerar previsões de forma operacional. Dessa forma, é importante ajustá-lo para um período mais recente, a fim de minimizar possíveis reduções no desempenho das previsões a serem realizadas.

Para otimização da calibração do modelo é empregada a técnica de algoritmos genéticos, com a utilização das funções objetivo: coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS), o coeficiente de Nash-Sutcliffe do logaritmo das vazões e (NSlog) os erros de volumes dos hidrogramas (EV). Salienta-se que essas funções objetivo foram escolhidas por já estarem incluídas no código do modelo e por se mostrarem eficientes para o seu ajuste, de acordo com a experiência de aplicação do MGB-IPH em bacias das mais diversas características, em toda América do Sul. Além disso, são coeficientes amplamente testados para ajustar modelos hidrológicos (Moriasi *et al.*, 2007).

Com base no coeficiente NS ou NSlog, a calibração pode ser classificada conforme os critérios propostos por Moriasi *et al.* (2007) (TABELA 1). Com base nessa classificação,

⁸ <https://ftp.cptec.inpe.br/modelos/tempo/MERGE/GPM>

espera-se que os ajustes obtidos estejam entre muito bom e bom, principalmente para o coeficiente NS, uma vez que este avalia melhor as vazões mais elevadas. Já o coeficiente NSlog mostra uma indicação do desempenho para as vazões de estiagem. Normalmente há uma pequena redução nos valores das funções objetivo calculadas para o período de validação, desde que sejam mantidas a qualidade dos dados de entrada e que não haja grandes alterações no regime hidrológico.

Tabela 1 – Critérios de classificação de ajuste do modelo hidrológico de acordo com o coeficiente de Nash-Sutcliffe

Classificação	NS ou NSlog
Muito bom	$> 0,75$ e $\leq 1,00$
Bom	$> 0,65$ e $\leq 0,75$
Satisfatório	$> 0,50$ e $\leq 0,65$
Não satisfatório	$\leq 0,50$

Fonte: MORIASI *et al.* (2007)

Destaca-se que alguns postos fluviométricos definidos como sub-bacias do modelo não possuem uma série histórica no período de calibração, por serem postos de telemétricos instalados em anos recentes. Mesmo não possuindo dados para calibração, esses postos são importantes por terem dados em tempo real e em breve terão uma série temporal mínima para calibração do modelo. Como são poucos postos com esta situação, não haverá prejuízos ao ajuste do modelo, uma vez que para esses casos são adotados os parâmetros obtidos nos postos mais próximos, com dados disponíveis para calibração.

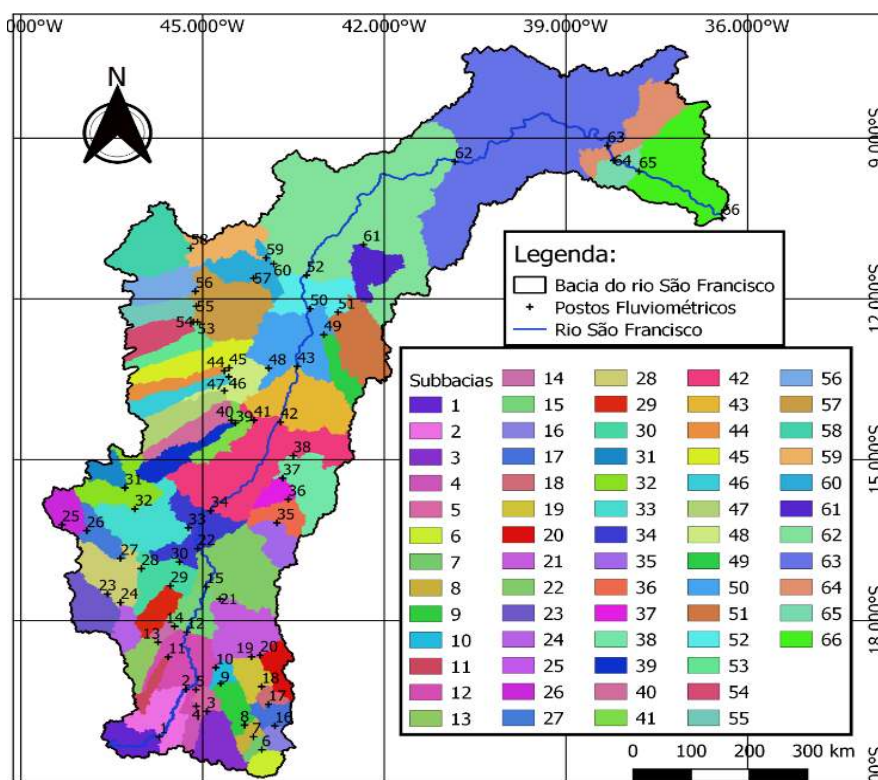
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No Mapa 2 é apresentado a divisão da bacia do rio São Francisco em 66 sub-bacias para calibração. Na Tabela 1 é apresentada a relação das sub-bacias e o resumo dos valores das funções objetivo, para os períodos de calibração e validação do modelo hidrológico. Na Tabela 2 observa-se que, de maneira geral, o ajuste do modelo no período de calibração é muito bom ou bom na grande maioria das sub-bacias, ou seja, 37 delas. Com ajuste satisfatório foram 7 sub-bacias e insatisfatório 15, sendo ainda que 7 não foram otimizadas devido à falta de vazões observadas nos períodos.

Na região da parte alta da bacia, dentro de Minas Gerais, as funções NS e NSlog têm valores sempre acima de 0,80 e os erros de volumes são muito baixos. No trecho entre o posto São Francisco e a foz do Rio Grande houve maior dificuldade para o ajuste, principalmente nas sub-bacias da margem direita, caracterizadas por rios intermitentes. Neste caso, mesmo para a bacia do rio Verde Grande o ajuste foi considerado muito bom.

Nas sub-bacias a jusante da foz do rio Grande (BA), quando os afluentes do rio São Francisco são analisados individualmente se verifica que o modelo não apresenta bom desempenho. Nas demais bacias desse trecho os resultados são bons devido às vazões do rio São Francisco, que recebe muito pouca contribuição lateral. No período de validação os resultados se mantêm muito semelhantes na maioria das sub-bacias, indicando que pode ser aplicado para períodos diferentes com a calibração obtida.

Mapa 2 – Divisão de sub-bacias adotada para a bacia do rio São Francisco, correspondentes a postos fluviométricos ou barramentos de usinas hidrelétricas



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Tabela 2 – Sub-bacias consideradas para calibração do modelo MGB-IPH e resultados dos coeficientes de ajuste, sendo *calib* - período de calibração e *valid* – período de validação

(Continua)

Nº	Nome	Código	Área (km ²)	NS ^{calib}	NSlog ^{calib}	EV ^{calib}	NS ^{valid}
1	Iguatama	40050000	4846	0,837	0,838	8,291	0,834
2	Porto das Andorinhas	40100000	14000	0,872	0,885	1,177	0,782
3	Velho da Taipa	40330000	7350	0,666	0,597	0,078	0,66
4	CGH João de Deus Jusante 2	40410200	2010				
5	PCH Gafanhoto Porto Pará	40450001	11300	0,712	0,082	1,442	-0,05
6	Belo Vale	40710000	2770	0,659	0,564	-2,927	0,589
7	Alberto Flores	40740000	4120	0,8	0,831	-5,504	0,448
8	Ponte Nova do Paraopeba	40800001	5690	0,851	0,847	-4,619	0,74
9	UHE Três Marias P. Mesq.	40865001	10200,2				
10	UHE Retiro Baixo	40865480	10415	0,591	-0,102	77,83	-0,335
11	UHE Três Marias P. Indaiá	40963000	2214,8				
12	UHE Três Marias	40990080	50651,4	0,857	0,789	-7,005	0,879
13	Porto do Passarinho	41075001	4130	0,364	0,482	-9,321	0,113
14	PCH Salto do Paraopeba	41090002	5186,2				
15	Pirapora Barreiro	41135000	62200	0,847	0,837	-10,712	0,836
16	Raposos	41200430	1930	0,732	0,8	-2,132	0,824
17	Ponte Raul Soares	41340000	4860	0,866	0,227	1,36	0,606
18	Jequitibá	41410000	7080	0,847	0,628	3,538	0,476
19	Ponte do Licínio Jusante	41650002	10700	0,846	0,779	4,498	0,827
20	Presidente Juscelino Jusante	41780002	3980	0,839	0,848	-0,87	0,846
21	Várzea da Palma	41990000	26500	0,824	0,764	-6,623	0,782
22	Cachoeira da Manteiga	42210000	107000	0,916	0,883	4,455	0,786
23	Ponte da BR-040 – Paracatu	42290000	7750	0,802	0,809	-1,949	0,68
24	Ponte da BR-040 – Prata	42365000	3350	0,514	0,162	-4,868	
25	UHE Queimado Barramento	42459080	3657	0,736	0,482	-6,033	0,718
26	UHE Queimado Jusante	42480500	5412				
27	Porto dos Poções	42600001	10100	0,767	0,806	8,535	0,611
28	Porto da Extrema	42690001	30100	0,867	0,225	10,121	0,797
29	Cachoeira das Almas	42850000	4390	0,674	0,721	-8,062	0,602
30	Porto Alegre	42980000	41300	0,878	0,423	3,261	0,766
31	Fazenda Carvalho	43300000	3160	0,681	0,729	13,026	0,569
32	Arinos Montante	43429998	11800	0,788	0,685	19,992	0,661
33	Barra do Escuro	43980002	24600	0,851	0,753	5,457	0,776
34	São Francisco	44200000	184000	0,926	0,874	10,761	0,761
35	Barra do Rio Verde	44630500	3750	0,748	0,442	2,616	0,612
36	Fazenda Alegre	44640000	9450	0,528	0,423	31,82	0,409
37	Colônia do Jaíba	44670000	12200	0,445	-0,059	47,626	-0,98
38	Gado Bravo	44940000	22900	0,335	-0,781	32,221	0,018

(Conclusão)							
Nº	Nome	Código	Área (km ²)	NS ^{calib}	NSlog ^{calib}	EV ^{calib}	NS ^{valid}
39	São Gonçalo	45131000	6020	0,846	0,879	-1,174	0,784
40	Fazenda Porto Alegre	45170001	5850	0,567	0,127	-3,044	0,275
41	Juvenilia	45260000	16300	0,825	0,811	5,664	0,553
42	Carinhanha	45298000	254000	0,897	0,719	13,417	0,359
43	Bom Jesus da Lapa	45480000	271000	0,861	0,838	14,718	-0,322
44	Correntina	45590000	3900	-0,551	-0,185	20,262	-5,734
45	Mocambo	45740001	7950	-2,589	-1,219	58,616	-2,831
46	Arrojado	45770000	5540	0,586	0,634	-5,619	0,187
47	Gatos	45840000	7130	0,577	0,428	-12,154	0,562
48	Porto Novo	45960001	31000	0,314	0,317	23,951	-0,834
49	Tamburil	46110000	4420	0,461	-0,928	19,199	0,834
50	UHE Sobradinho Mont,	46150001	323000				
51	Ponte da BR-242	46295000	12600	0,284	-2,477	25,43	0,66
52	Morpará	46360000	345000	0,787	0,812	17,452	
53	Sítio Grande	46415000	4950	0,432	0,377	-16,598	-0,05

Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

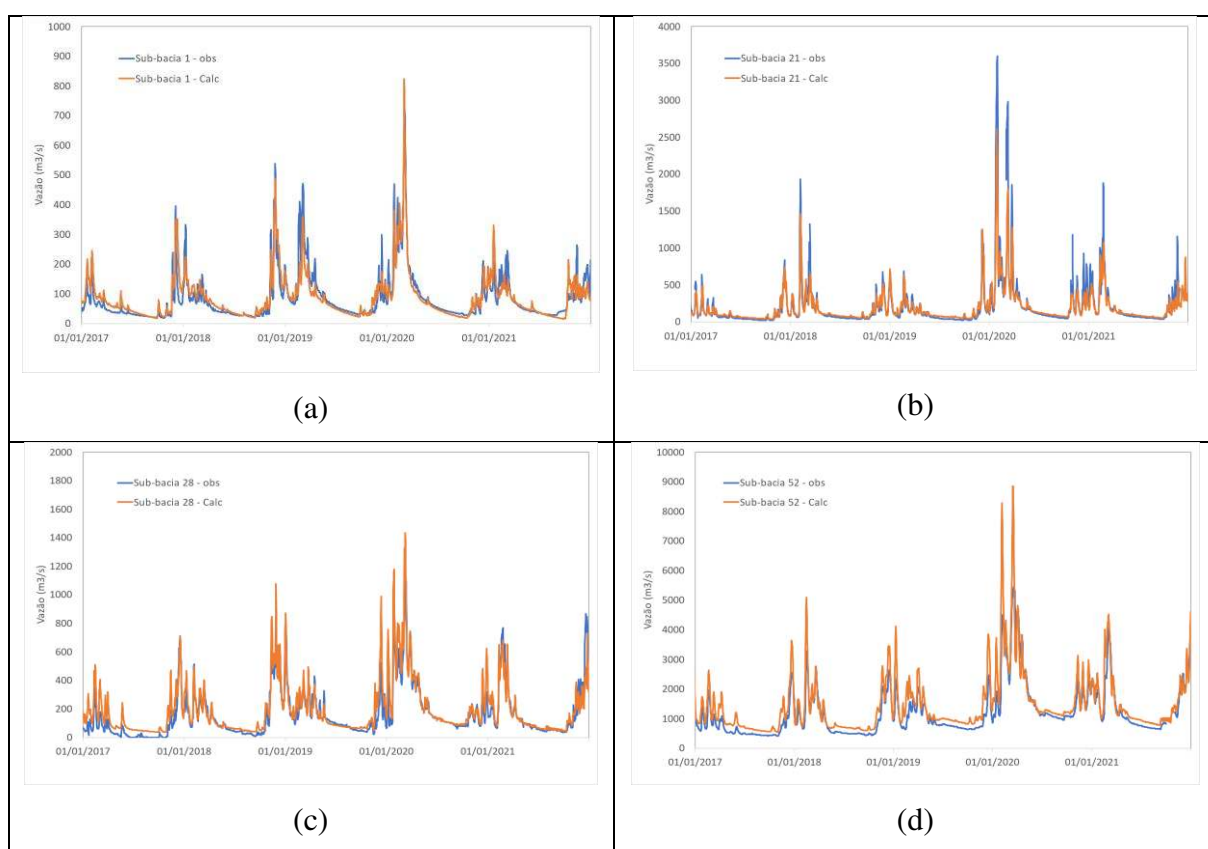
O Gráfico 1(a) apresenta os hidrogramas calculado e observado no rio São Francisco no posto fluviométrico Porto das Andorinhas. Observa-se que há alguns eventos de cheias subestimados e outros superestimados, porém o comportamento geral dos hidrogramas observados é muito bem representado pelo modelo. Um comportamento semelhante é apresentado para o posto Várzea da Palma no Rio da Velhas, Gráfico 1(b), e Porto da Extrema no rio Paracatu (GRÁFICO 1c).

Um posto fluviométrico muito importante ao longo do rio São Francisco é o posto Morpará, que está localizado a montante do reservatório de Sobradinho. Entre Morpará e a barragem de Sobradinho existe apenas um afluente importante ao rio São Francisco, o Rio Grande. Ou seja, o posto fluviométrico Morpará permite estimar, com razoável precisão, a vazão afluente ao reservatório de Sobradinho. O Gráfico 1(d) apresenta os hidrogramas observado e calculado no posto fluviométrico Morpará, no período de calibração, onde observa-se que o ajuste é bom, mas com uma tendência de superestimativa das vazões.

Os resultados mostram que o modelo é capaz de representar adequadamente a maioria das sub-bacias do rio São Francisco. As bacias com piores resultados são aquelas localizadas em regiões semiáridas. Considerando somente a parte da bacia dentro de Minas Gerais, foram nessas sub-bacias que foram obtidos os melhores resultados. Ainda há

possibilidade de melhorar os ajustes, mas esses resultados já são adequados para muitas aplicações. Comparando-se os resultados com calibrações que utilizaram dados de estações pluviométricas, como no caso de Silva (2005), os resultados do presente ajuste em termos de valores de NS foram um pouco inferiores em praticamente todas as estações. Este resultado tem relação direta com o dado de precipitação estimado por satélite, mas deve-se considerar também o fato de serem períodos diferentes de ajuste, além de outros fatores que podem ser minimizados.

Gráfico 1 – Resultado de calibração do modelo MGB-IPH para algumas sub-bacias



Legenda: (a) sub-bacia 1, Rio São Francisco em Iguatama;
(b) sub-bacia 21, Rio das Velhas em Várzea da Palma;
(c) sub-bacia 28, Rio Paracatu em Porto da Extrema;
(d) Rio São Francisco em Morpará

Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

O aprimoramento dos ajustes pode ser obtido a partir de medidas como: i) atualização do mapa de URHs, gerado a partir de mapas de tipo e usos do solo mais detalhados. As informações de solos têm grande influência sobre os resultados, mas os mapas de solos no Brasil ainda são pouco detalhados. A incorporação de mapas de escala mais refinada, mesmo

que para partes da bacia, poderão melhorar os resultados de ajuste; ii) utilização de outros produtos de precipitação por satélite. Há outras fontes de dados de precipitação disponíveis atualmente, sendo cada qual com características distintas. O desempenho do modelo MGB-IPH com esses produtos pode ser testado, a fim de definir aqueles que são melhores para diferentes regiões da bacia. iii) calibração focada em representar faixas específicas de vazões, como mínimas ou valores da curva de permanência. Isso pode ser implementado utilizando funções objetivo diferentes das que foram aqui usadas, para que o modelo possa então gerar resultados focados em aplicações de interesse específico; iv) incorporação de outros produtos de sensoriamento remoto, como evapotranspiração e umidade do solo. Ainda incipientes, os usos desses produtos podem melhorar os resultados de ajuste, substituindo os cálculos realizados internamente pelo modelo.

5 CONCLUSÃO

Considerando que o ajuste de modelos hidrológicos distribuídos é fortemente dependente da qualidade dos dados disponíveis, incluindo a distribuição espacial e temporal dos mesmos, o presente estudo teve como objetivo avaliar o desempenho do modelo MGB-IPH na bacia do rio São Francisco, utilizando dados observados e estimados por satélite para calibração e validação. Na bacia do rio São Francisco, embora os dados disponíveis tenham sido suficientes para um bom ajuste do modelo MGB-IPH, constatou-se que existem deficiências importantes de dados pluviométricos, principalmente nas regiões semiáridas do médio e baixo São Francisco.

A grande carência de dados climatológicos também é destacada, assim como acontece na maioria das bacias brasileiras. Nessa pesquisa foram usadas médias mensais históricas de alguns postos. Isso não traz grandes prejuízos em aplicações de previsão, uma vez que as estimativas para o futuro obrigam o uso de valores médios. Mas, em aplicações para avaliação de alterações no uso do solo e mudanças climáticas, por exemplo, os dados climatológicos são de grande importância e exigem o uso de séries observadas de boa qualidade. Quanto aos dados físicos obtidos para a bacia, podem ser considerados de boa qualidade e possibilitaram determinar os mapas de grupos de tipos de solos e grupos de uso do solo e cobertura vegetal adequados às necessidades do modelo.

De maneira geral, os resultados do ajuste do modelo com uso de precipitação estimada por satélite, calibração e verificação, mostram que o desempenho é plenamente satisfatório para os objetivos inicialmente propostos, com coeficientes de ajuste (NS e NSlog) superiores a 0,7 em grande parte das sub-bacias, especialmente nas regiões de cabeceira e em bacias com monitoramento fluviométrico mais denso, como aquelas dentro do estado de Minas Gerais.

Com base nesses resultados, o modelo se mostra uma ferramenta robusta para aplicações no gerenciamento dos recursos hídricos, como previsão de vazões para a operação de reservatórios, simulações de cenários de expansão de áreas agrícolas e desenvolvimento de alertas hidrológicos para eventos extremos.

REFERÊNCIAS

- ALI, M. H. *et al.* Remote sensed and/or global datasets for distributed hydrological modelling: A review. **Remote Sensing**, Switzerland, v. 15, n. 6, p. 1-43, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/15/6/1642>. Acesso em: 05 jun. 2024.
- ALMEIDA, L; SERRA, J. C. V. Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas. **Revista da FAE**, Curitiba, v. 20, n. 1, p. 129-137, 2017. Disponível em: <https://revistafae.fae.edu/revistafae/article/view/113/435>. Acesso em: 06 jun. 2024.
- AQUILA, G. *et al.* An overview of short-term load forecasting for electricity systems operational planning: machine learning methods and the brazilian Experience. **Energies**, Switzerland, v. 16, n. 21, p. 1-35, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/21/7444>. Acesso em: 18 maio 2024.
- ÁVILA, L. *et al.* Comparative evaluation of five hydrological models in a large-scale and tropical river basin. **Water**, Switzerland, v. 14, n. 19, 21p., 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/14/19/3013>. Acesso em: 13 jun. 2024.
- BELAY, H. *et al.* Merging satellite products and rain-gauge observations to improve hydrological simulation: a review. **Earth**, Switzerland, v. 3, n. 4, p. 1275-1289, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2673-4834/3/4/72>. Acesso em: 19 jun. 2024.
- BRÊDA, J. P. L. F. *et al.* Assessing climate change impact on flood discharge in South America and the influence of its main drivers. **Journal of Hydrology**, Glendale, v. 619, p. 129284, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169423002263>. Acesso em: 25 maio 2024.

BRITO NETO, R. L. *et al.* Aplicação do modelo MGB-IPH na bacia hidrográfica do Rio Pardo em diferentes cenários de uso e ocupação do solo. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 31, n. 1, p. 191-213, jan./mar. 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cflo/a/9f687j593p4TMXhzmGmct/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 14 abr. 2024.

CAMPAROTTO, L. B. *et al.* Validação de dados termopluiométricos obtidos via sensoriamento remoto para o Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 6, p. 665-671, 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/rbwkkmmYV7x8bbzkzxBL4Vt/>. Acesso em: 26 maio 2024.

COLLISCHONN, B. *et al.* Desempenho do Satélite TRMM na estimativa de precipitação sobre a Bacia do Paraguai Superior. **Revista Brasileira de Cartografia**, Uberlândia, v. 59, n. 1, 2007. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/26468083_Desempenho_do_Satelite_TRMM_na_Estimativa_de_Precipitacao_Sobre_a_Bacia_do_Paraguai_Superior. Acesso em: 30 abr. 2024.

COLLISCHONN, W. *et al.* **Apostila 2**: manual de referência teórica do MGB. Porto Alegre: UFRGS, 2020. 45 p. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/hge/mgb/downloads/mgb-4-6-2/>. Acesso em: 25 abr. 2024.

FALCK, A. S. *et al.* Avaliação de um modelo estocástico de erro multidimensional aplicado à estimativas de precipitação por satélite. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 31, n. 1, p. 52-63, 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbmet/a/TST43WSLYc3nFHMxXZNP3f/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 30 abr. 2024.

FAN, F. M. *et al.* Ensemble streamflow forecasting experiments in a tropical basin: The São Francisco river case study. **Journal of Hydrology**, Glendale, v. 519, p. 2906-2919, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169414003126>. Acesso em: 25 jun. 2024.

FAN, F. M. *et al.* Verification of inflow into hydropower reservoirs using ensemble forecasts of the TIGGE database for large scale basins in Brazil. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, Amsterdam, v. 4, p. 196-227, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214581815000567>. Acesso em: 12 maio 2024.

FAN, F. M. *et al.* Um mapa de unidades de resposta hidrológica para a América do Sul. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS 21., 2015, Brasília. **Anais [...]** Porto Alegre: ABRhidro, 2015. Disponível em: <https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/4/PAP019919.pdf>. Acesso em: 12 maio 2024.

FERRARINI, A. S. F. *et al.* Water demand prospects for irrigation in the São Francisco River: Brazilian public policy. **Water Policy**, London, v. 22, n. 3, p. 449-467, 2020. Disponível em: <https://iwaponline.com/wp/article/22/3/449/73871/Water-demand-prospects-for-irrigation-in-the-Sao>. Acesso em: 15 de abr. 2024.

FERREIRA, G. R. **Eventos extremos de precipitação nas bacias hidrográficas dos rios doce e Paraíba do Sul**. 2019. 47 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Aplicada) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2019. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.posmet.ufv.br/wp-content/uploads/2020/03/DISSERTACAO-GABRIELA-REGINA-FERREIRA.pdf>. Acesso em: 18 maio 2024.

FREITAS, A. A. *et al.* Drought assessment in São Francisco river basin, Brazil: characterization through SPI and associated anomalous climate patterns. **Atmosphere**, London, v. 13, n. 1, p. 41-61, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4433/13/1/41>. Acesso em: 15 jun. 2024.

GADÊLHA, A. N. **Análise da missão GPM (Global Precipitation Measurement) na estimativa da precipitação sobre o território brasileiro**. 2018. 83p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018. Disponível em: https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/13132?locale=pt_BR. Acesso em: 25 de abr. 2024.

HINGE, G. *et al.* Hydrologic utility of satellite precipitation products in flood prediction: a meta-data analysis and lessons learnt. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 612, p. 1-14, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169422006783>. Acesso em: 25 maio 2024.

JIMÉNEZ, K. Q.; COLLISCHONN, W. Método de combinação de dados de precipitação estimados por satélite e medidos em pluviômetros para a modelagem hidrológica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 20, n. 1, p. 202 - 217, mar. 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/305306500_Metodo_de_combinacao_de_dados_de_precipitacao_estimados_por_satelite_e_medidos_em_pluviometros_para_a_modelagem_hidrolologica. Acesso em: 13 jun. 2024.

KIDD, C.; HUFFMAN, G. Global precipitation measurement. **Meteorological Applications**, New Jersey, v. 18, p. 334-353, 2011. Disponível em: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/met.284>. Acesso em: 17 jun. 2024.

LAKEW, H. B. *et al.* Hydrological performance evaluation of multiple satellite precipitation products in the upper Blue Nile basin, Ethiopia. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, Amsterdam, v. 27, p. 1-12, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214581818302520>. Acesso em: 12 maio de 2024.

MA, L. *et al.* MIKE SHE modeling of ecohydrological processes: merits, applications, and challenges. **Ecological Engineering**, Amsterdam, v. 9, p. 137-149, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857416300088>. Acesso em: 15 maio 2024.

MAHMOUD, M. T. *et al.* Performance of the IMERG precipitation products over high-latitudes region of Finland. **Remote Sensing**, Switzerland, v. 13, n. 11, p. 1-26, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/13/11/2073>. Acesso em: 30 abr. 2024.

MAILLARD, P. *et al.* Challenges of defining the floodplain through the “mean ordinary flood line” approach using remote sensing in Brazil: a case study of the São Francisco River. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 27, p. 1-20, 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbrh/a/H6stKYxzh7SNcQcn4P4nMHv/abstract/?lang=en>. Acesso em: 24 jun. 2024.

MARINHO FILHO, G. M. *et al.* Modelos hidrológicos: conceitos e aplicabilidades. **Revista de Ciências Ambientais**, Rio de Janeiro, v. 6, p. 35-47, 2012. Disponível em: <https://revistas.unilasalle.edu.br/index.php/Rbca/article/view/268>. Acesso em: 02 jun. 2024.

MOREIRA, I. A. **Modelagem hidrológica chuva-vazão com dados de radar e pluviômetros**. 2005. 81f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambientais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/2576>. Acesso em: 23 maio 2024.

MORIASI, D. N. *et al.* Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **American Society of Agricultural and Biological Engineer**, Michigan, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/43261199_Model_Evaluation_Guidelines_for_Systematic_Quantification_of_Accuracy_in_Watershed_Simulations. Acesso em: 29 jun. 2024.

OCHOA-RODRIGUEZ, S. *et al.* A review of radar-rain gauge data merging methods and their potential for urban hydrological applications. **Water Resources Research**, New Jersey, v. 55, n. 8, p. 6356-6391, 2019. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2018WR023332>. Acesso em: 19 maio 2024.

OLIVEIRA, D. H. M. C. *et al.* Rainfall and streamflow extreme events in the São Francisco hydrographic region. **International Journal of Climatology**, New Jersey, v. 41, n. 2, p. 1279-1291, 2021. Disponível em: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/joc.6807>. Acesso em: 26 jun. 2024.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (Brasil). **Recursos hídricos e meteorologia: visão geral**. Rio de Janeiro: ONS, 2009. Disponível em: <http://www.ons.org.br>. Acesso em: 12 jul. 2024.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (Brasil). **Aplicação do modelo SMAP/ONS para previsão de vazões no âmbito do SIN**. ONS 0097/2018-RV3. Rio de Janeiro: ONS, 2018. Relatório Técnico. Disponível em: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://antigo.mme.gov.br/c/document_library/get_file?uuid=4737f06f-525a-223d-ee9f-04c17b11058e&groupId=36070. Acesso em: 17 jun. 2024.

PAIVA, M. H. R. *et al.* Validation of the MGB-IPH hydrological model for flows simulation in paired watershed in Minas Gerais, Brazil. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 491, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304380024000875>. Acesso em: 28 maio 2024.

PETRUCCI, E. **Análise espacial da precipitação pluvial e eventos extremos secos na bacia hidrográfica do Rio São Francisco – Brasil, Série histórica de 1985 a 2018**. 2022. 271p. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/36343>. Acesso em: 25 maio 2024.

PONTES, P. R. M. *et al.* Modelagem hidrológica e hidráulica de grande escala com propagação inercial de vazões. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, São Paulo, v. 20, n. 4, p. 888-904, 2015. Disponível em: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/156/d1794a9de01a2cda0ade3e472de558fb_544aa821f14776ee2092f3dd967d8aeb.pdf. Acesso em: 30 jun. 2024.

RASHEED, N. J. *et al.* Survey on the resolution and accuracy of input data validity for SWAT-based hydrological models. **Heliyon**, Cambridge, v. 10, n. 19, p. 1-15, 2024. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/384269011_Survey_on_the_Resolution_and_Accuracy_of_Input_Data_Validity_for_SWAT-Based_Hydrological_Models. Acesso em: 22 jun. 2024.

ROZANTE, J. R. *et al.* Performance of precipitation products obtained from combinations of satellite and surface observations. **International Journal of Remote Sensing**, Abingdon, v. 41, n. 19, p. 7585-7604, 2020. Disponível em: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://ftp.cptec.inpe.br/modelos/tempo/MERGE/GPM/Rozante_et.al.2020.pdf. Acesso em: 27 maio 2024.

SILVA, A. C. M.; PEREIRA, F. F. Assessment of Drought Occurrence and Severity in the São Francisco River Basin between the years 1961 to 2019. **Revista de Geociências do Nordeste**, Caicó, RN, v. 9, n. 2, p. 56-68, 2023. Disponível em: <https://periodicos.ufrn.br/revistadoregne/article/view/32622>. Acesso em: 19 jun. 2024.

SILVA, B. C. **Previsão hidroclimática de vazão para a Bacia do Rio São Francisco**. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/253714>. Acesso em: 21 jun. 2024.

SILVA, B. C.; TUCCI, C. M.; COLLISCHONN, W. Previsão de vazão de longo prazo na Bacia do Rio São Francisco II: ajuste do modelo hidrológico. **Revista brasileira de recursos hídricos**, São Paulo, v. 10, n. 4, p. 43-59, 2005. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/237743426_Previsao_de_Vazao_de_Longo_Prazo_na_Bacia_do_Rio_Sao_Francisco_II_Ajuste_do_Modelo_Hidrologico. Acesso em: 11 abr. 2024.

SILVA, M. V. M. *et al.* Impacto dos cenários de mudanças climáticas e demandas consuntivas no desempenho dos reservatórios do rio São Francisco, Brasil. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS*, 24., Belo Horizonte, 2021. **Anais [...]**. Belo Horizonte: ABRhidro, 2021. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=13446>. Acesso em: 24 abr. 2024.

SILVA, P. N. **Avaliação da precipitação estimada pelo satélite GPM para a bacia hidrográfica do rio Sapucaí**. 2022. 77 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2022. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/3204>. Acesso em: 22 maio 2024.

SOKOL, Z. *et al.* The role of weather radar in rainfall estimation and its application in meteorological and hydrological modelling -A review. **Remote Sensing**, Abingdon, v. 13, n. 3, p. 351, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/13/3/351>. Acesso em: 15 jun. 2024.

SOUZA NETO, P. F. *et al.* Evaluation of cumulus parameterization of the regional climate model in the São Francisco River Basin. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 38, 15p., 2023. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbmet/a/xrLtfyyxn5zBPpgqk74GVXK/abstract/?lang=en>. Acesso em: 23 jun. 2024.

THANABALAN, P. *et al.* Time-series analysis of MODIS (LST and NDVI) and TRMM rainfall for drought assessment over India. **Applied Geomatics**, Berlin, v. 15, n. 2, p. 383-405, 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12518-023-00505-y>. Acesso em: 31 maio 2024.

TOLEDO, B. H. C.; ANDRADE A. R. Validação estatística de dados do Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) para a bacia hidrográfica do Rio Jordão – Paraná – Brasil. **Entre-Lugar**, v. 13, n. 24, p. 367-387. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/entre-lugar/article/view/15115>. Acesso em: 26 maio 2024.

TUCCI, C. E. M.; COLLISCHONN, W. Simulação hidrológica de grandes bacias. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, São Paulo, v. 6, n. 1, p. 95-118, 2001. Disponível em: <https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=1&ID=42&SUMARIO=625>. Acesso em: 25 maio 2024.

WANG, J. *et al.* Hydrological model adaptability to rainfall inputs of varied quality. **Water Resources Research**, New Jersey, v. 59, n. 2, p. 1-20, 2023. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2022WR032484>. Acesso em: 21 jun. 2024.

XIA, Q. *et al.* A review on the development of two-way coupled atmospheric-hydrological Models. **Sustainability**, Switzerland, v. 15, n. 3, p. 1-16, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/3/2803>. Acesso em: 11 jun. 2024.

YUAN, X. *et al.* An experimental seasonal hydrological forecasting system over the yellow river basin – part 1: understanding the role of initial hydrological conditions. **Hydrology and Earth System Sciences**, Madri, v. 20, n. 6, p. 2437-2451, 2016. Disponível em: <https://hess.copernicus.org/articles/20/2437/2016/>. Acesso em: 18 maio 2024.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG e do Instituto Mineiro de Gestão das Águas IGAM, por meio do financiamento do projeto de pesquisa APQ-01096-22.