

Análise da segurança hídrica do rio São Francisco considerando a evolução das demandas de água a curto e médio prazo

Analysis of water security in rio São Francisco considering the evolution of water demands in the short and medium term

Rodrigo Saldanha Xavier da Silva¹ , Cássia Juliana Fernandes Torres² ,
Andrea Sousa Fontes¹ , Yvonilde Dantas Pinto Medeiros¹ 

¹Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, Brasil. E-mails: rssaldanha91@gmail.com, asfontes@gmail.com, yvonilde.medeiros@gmail.com

²Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, BA, Brasil. E-mail: cassia.torres@ufrb.edu.br

Como citar: Silva, R. S. X., Torres, C. J. F., Fontes, A. S., & Medeiros, Y. D. P. (2023). Análise da segurança hídrica do rio São Francisco considerando a evolução das demandas de água a curto e médio prazo. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, 20, e26. <https://doi.org/10.21168/rega.v20e26>

RESUMO: A segurança hídrica é um conceito, que ao ser operacionalizado, não favorece a redução dos riscos de maneira homogênea entre os setores usuários da água. Desta forma, a segurança hídrica de alguns setores será proporcionada pela insegurança de outros. No Brasil, a bacia hidrográfica do rio São Francisco vivenciou um longo período de estiagem entre os anos de 2012 e 2018, o qual se configurou como a pior situação hidrológica dos registros de vazões do rio. Diante os efeitos da seca vivenciada, houve a necessidade de adaptar a operação dos reservatórios do rio São Francisco a um novo referencial hidrológico e meteorológico, que culminou na publicação de novas regras operativas do sistema hídrico de reserva de água através da Resolução ANA nº 2.081/2017. Associado aos fatores hidrológicos, a evolução das demandas a curto e médio prazo previstas no Plano da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco - PBHSF 2016-2025 e as obras do Plano Nacional de Segurança Hídrica - PNSH podem pressionar ainda mais o seu sistema hídrico. Diante do exposto, esta pesquisa tem como objetivo analisar a segurança hídrica no rio São Francisco considerando os usos múltiplos da água internos e externos a sua bacia hidrográfica. A metodologia adotada para este estudo foi desenvolvida em três etapas: caracterização e projeção das demandas a curto e médio prazo; análise dos cenários de evolução da demanda hídrica do rio São Francisco; avaliação do impacto da evolução das demandas de água a curto e médio prazo no sistema hídrico. No que se refere ao crescimento da demanda, pôde-se observar que houve um aumento de 7% nos cenários de menor taxa de crescimento da demanda sem o PNSH, de até 109% no cenário de maior demanda com o PNSH para o horizonte de 2025, e de 13% até 166% para os mesmos cenários, respectivamente, no horizonte de 2030. Estas evoluções das demandas aumentam o risco de não atendimento, principalmente nos anos mais secos, onde essa falha do sistema pode chegar a 50% do tempo. No que se refere a segurança hídrica do rio São Francisco, o atendimento dos usos consuntivos e da geração de energia hidrelétrica é favorecido pela insegurança do ecossistema aquático.

Palavras-chave: Segurança Hídrica; Rio São Francisco; Demanda pelo Uso da Água; Estudos de Cenários.

ABSTRACT: Water security is a concept that, when operationalized, does not favor the reduction of risks homogeneously among the water user sectors. In this way, the water security of some sectors will be provided by the insecurity of others. In Brazil, the São Francisco river basin experienced a long period of drought between 2012 and 2018, which was configured as the worst hydrological situation in the river flow records. In view of the effects of the drought experienced, there was a need to adapt the operation of the São Francisco to a new hydrological and meteorological reference, which culminated in the publication of new operating rules for the water reserve water system through ANA Resolution No. 2,081/2017. Associated with hydrological factors, the evolution of demands in the short and medium term foreseen in the Basin Plan (2016-2025) and the PNSH works may put even more pressure on the São Francisco water system. Given the above, this research aims to analyze water security in the São Francisco River considering the multiple uses of water internal and external to its watershed. The methodology adopted for this

Recebido: Junho 04, 2023. Revisado: Agosto 08, 2023. Aceito: Novembro 17, 2023.



Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

study was developed in three stages: characterization and projection of demands in the short and medium term; construction and simulation of scenarios for the evolution of water demand on the São Francisco River; evaluation of the impact of the evolution of water demands in the short and medium term on the São Francisco water system. With regard to demand growth, there was an increase of 7% in the scenarios of lower growth rate without the PNSH, of up to 109% in the scenario of greater demand with the PNSH for the horizon of 2025, and of 13% until 166% for the same scenarios, respectively, in the horizon of 2030. These changes in demands increase the risk of non-compliance, especially in the driest years, where this system failure can reach 50% of the time. With regard to the water security of the São Francisco River, the fulfillment of consumptive uses and the generation of hydroelectric energy is funded by the insecurity of the aquatic ecosystem.

Keywords: Water Security; São Francisco River; Demand for Water Use; Scenario Studies.

INTRODUÇÃO

A sustentabilidade hídrica é uma meta ambiciosa e complexa, uma vez que a escassez dos recursos hídricos é um dos principais problemas do século XXI. A escassez da água não está necessariamente ligada à ausência ou a baixa disponibilidade hídrica (escassez de primeira ordem), podendo também ser relacionada diretamente com os elementos sociais e políticos necessários para se adaptar a ausência do recurso natural, definida como escassez de segunda ordem (Ohlsson & Turton, 2000; Pereira et al., 2009).

Nos últimos anos, devido a possibilidade da ocorrência de uma crise hídrica a nível global, houve um aumento das discussões na comunidade científica de recursos hídricos referentes a segurança hídrica. Este é considerado um paradigma emergente, o qual está associado a uma combinação da vulnerabilidade relacionada à água e a capacidade adaptativa das sociedades, ou seja, sua resiliência a tais vulnerabilidades (Tarlock & Wouters, 2010; Cook & Bakker, 2012).

A segurança hídrica é um conceito, que ao ser operacionalizado, não favorece a redução dos riscos de maneira homogênea entre os setores usuários da água. Desta forma, a segurança hídrica de alguns setores será proporcionada pela insegurança de outros, principalmente, em países em desenvolvimento, cujas metas de crescimento econômico e social são incompatíveis com algumas metas ambientais (Zeitoun, 2011; Swain & Yang-Wallentin, 2020). No entanto, acredita-se que a garantia do desenvolvimento sustentável está associada a segurança hídrica, uma vez que a gestão da água permeia diversos setores, que direta ou indiretamente dependem dos recursos hídricos para a sua manutenção (Varis et al., 2017).

No Brasil, a bacia hidrográfica do rio São Francisco vivenciou um longo período de estiagem entre os anos de 2012 e 2018, o qual se configurou como a pior situação hidrológica dos registros de vazões do rio, cuja ausência de regras, prioridades ou planos de alocação de água potencializou a instalação dos conflitos em virtude da baixa disponibilidade hídrica. Assim, coube a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), a constituição de uma sala de crise do São Francisco no ano de 2013, que promoveu a articulação entre os diversos atores da bacia e viabilizou as tomadas de decisão para mitigação dos impactos da escassez.

Diante dos efeitos da seca observada a partir de 2012, houve a necessidade de adaptar a operação dos reservatórios do rio São Francisco a um novo referencial hidrológico e meteorológico, associado a necessidade de garantir a segurança hídrica do rio em sua área de influência, tanto em situação de normalidade quanto em períodos de escassez hídrica, que culminou na publicação de novas regras operativas do sistema hídrico através da Resolução ANA nº 2.081/2017 (Agência Nacional de Águas, 2017, p. 1).

A elaboração das novas regras de operação dos reservatórios propostas pela ANA ocorreu através da sala de crise com os diversos atores da bacia, entre eles, o Comitê da Bacia Hidrográfica do São Francisco (CBHSF), que estabeleceu uma nova dinâmica hídrica para o rio São Francisco. É importante salientar, que a versão vigente do Plano da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco - PBHSF (2016-2025) foi aprovada em 2015, (Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, 2016), ou seja, os programas e projetos propostos no plano não foram analisados considerando as novas regras propostas pela Resolução nº 2.081/2017.

No ano de 2019, a ANA lançou o Plano Nacional de Segurança Hídrica (PNSH), em função dos diversos cenários de insegurança hídrica, que culminaram em uma crise que afetou o país associada a diversos fatores que desequilibram o balanço hídrico, como a ausência de planejamento e ações institucionais coordenadas e a ausência de investimentos em infraestrutura hídrica (Agência Nacional de Águas, 2019b). Desta forma, o PNSH se propõe a atuar de modo tradicional mediante a implantação de infraestruturas hídricas.

Algumas das obras propostas pelo PNSH visam o desenvolvimento regional mediante a captação e distribuição das águas do rio São Francisco, porém, a maioria delas estão na etapa de planejamento,

de forma que ainda serão realizados os estudos de viabilidade dessas intervenções. Sendo assim, ainda não foram verificados os impactos das mesmas na dinâmica hídrica do rio São Francisco. Associado aos fatores hidrológicos, a evolução das demandas a curto e médio prazo previstas no PBHSF (2016-2025) e as obras do PNSH podem pressionar ainda mais o sistema hídrico do São Francisco, cujas séries históricas de vazões naturais sofreram reduções a partir da década de 1990. Diante do exposto, o presente artigo tem por objetivo analisar a segurança hídrica no rio São Francisco considerando os usos múltiplos da água, atuais e futuros mediante ao comportamento do seu sistema hídrico, de acordo com o PBHSF (2016-2025) e com o Plano Nacional de Segurança Hídrica.

MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia do estudo é composta por cinco etapas: (I) Caracterização da área de estudo; (II) Caracterização e projeção das demandas a curto e médio prazo; (III) Construção dos cenários de evolução da demanda hídrica do rio São Francisco; (IV) Simulação do sistema hídrico do São Francisco considerando os cenários propostos; e (V) Avaliação do impacto da evolução das demandas de água a curto e médio prazo no sistema hídrico do São Francisco.

Caracterização da área de estudo

A bacia hidrográfica do rio São Francisco drena aproximadamente 640.000 km² do território brasileiro, cuja extensão perpassa os territórios de sete unidades federativas do país: Minas Gerais, Goiás, Distrito Federal, Bahia, Pernambuco, Alagoas e Sergipe (Figura 1).

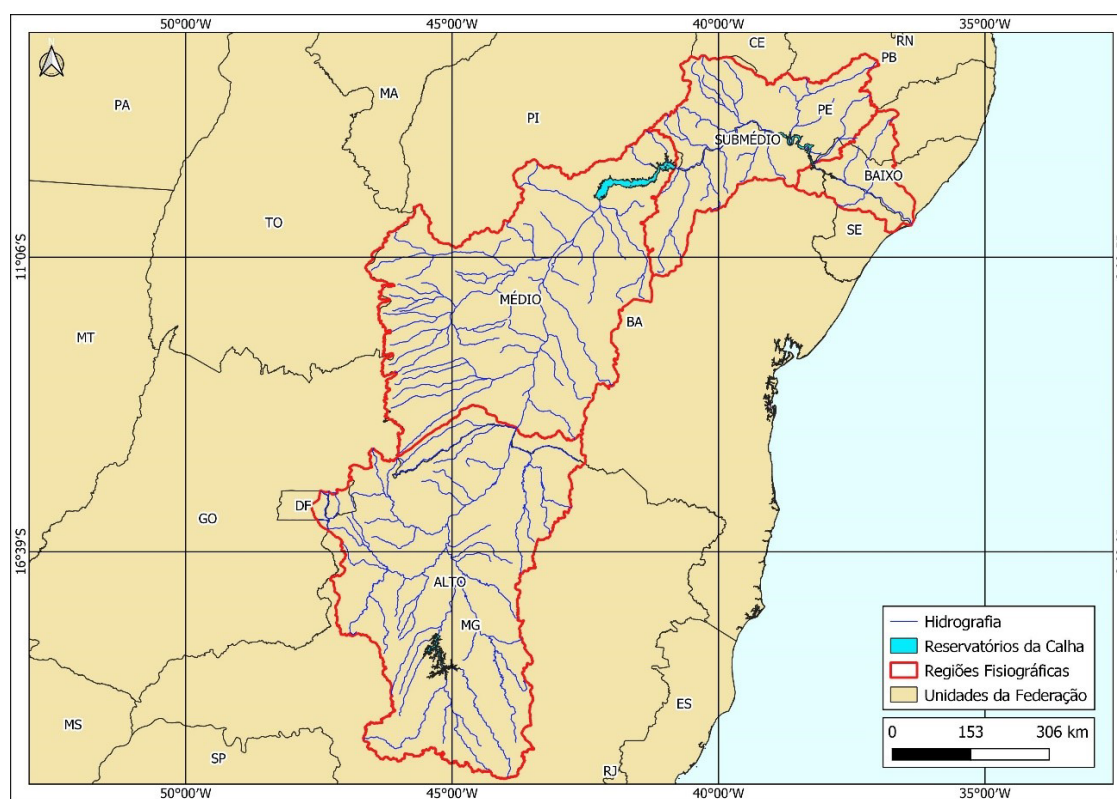


Figura 1 - Regiões fisiográficas da bacia do rio São Francisco.

O rio São Francisco nasce em Minas Gerais, na Serra da Canastra, e deságua no Oceano Atlântico, na divisa dos estados de Alagoas e Sergipe, com extensão total de 2.697 km. A bacia é dividida em quatro regiões fisiográficas, as quais são as principais unidades de estudos e planejamento, sendo elas: Alto São Francisco (16% da área da bacia), Médio São Francisco (63%), Submédio São Francisco (17%) e Baixo São Francisco (4%) (Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, 2016).

O sistema hídrico do rio São Francisco é caracterizado pela operação das Usinas Hidrelétricas de Três Marias, Sobradinho, Luiza Gonzaga (Itaparica), Apolônio Sales (Moxotó), Paulo Afonso I, Paulo Afonso II, Paulo Afonso III, Paulo Afonso IV e Xingó. A existência desses reservatórios possibilita a alocação dos

recursos hídricos disponíveis a diversos usos, controlar as cheias e gerir períodos de secas (Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, 2016). Vale ressaltar, que a operação dos reservatórios e a geração de energia das Usinas Hidrelétricas (UHE's) do rio São Francisco dependem do Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, sendo esse o órgão responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN).

O ano de 2012 marcou o início de uma grande seca na bacia do rio São Francisco. Com a precipitação abaixo das médias históricas, houve uma redução significativa nas vazões afluentes aos reservatórios, acarretando nos níveis mais baixos já registrados na operação dos seus reservatórios, o que colocou em risco o atendimento continuado aos usos múltiplos (Agência Nacional de Águas, 2020b). A ausência de uma regra de alocação de água para a bacia, associada à condição de escassez prolongada potencializaram a crise hídrica. A ANA como órgão gestor e regulador dos recursos hídricos de dominialidade da União, assume o gerenciamento da crise através da mediação dos conflitos, instalando a Sala de Crise do São Francisco em 2013. O objetivo da sala é “promover a articulação entre os diferentes atores com atuação na bacia e, com a tempestividade necessária, viabilizar a tomada de decisão para a mitigação dos impactos resultantes” (Agência Nacional de Águas, 2020b).

Basto (2018) discute a crise hídrica na bacia do rio São Francisco e as consequências dela na operação das vazões defluentes dos reservatórios de forma detalhada, incluindo os registros das alterações das vazões defluentes mínimas no sistema hídrico no decorrer da crise. A discussão registrada pelo autor é um retrato do processo de gestão da crise hídrica na bacia, que culminou na construção da Resolução ANA nº 2.081, de 4 de dezembro de 2017, que dispõe sobre as condições para a operação do Sistema Hídrico do Rio São Francisco. A proposta da Resolução ANA nº 2.081/2017 é estabelecer uma alocação estratégica entre os volumes dos reservatórios de acumulação do rio São Francisco, visando minimizar as perdas devido à evaporação da água em Três Marias, Sobradinho e Luiz Gonzaga (Itaparica).

Caracterização e projeção das demandas a curto e médio prazo

Esta etapa do estudo visa analisar as demandas hídricas atuais e futuras do rio São Francisco de acordo com o PBHSF (2016-2025) e com o PNSH. Para isso, foram levantadas inicialmente as demandas outorgadas do rio São Francisco. Através do referido levantamento foi possível estabelecer o consumo de água que foi adotado nesta pesquisa. É importante salientar, que essa não é a estimativa real do consumo do rio, pois não é possível garantir que todos os usuários de água estão regularizados. Esses dados estão disponíveis no banco de dados de outorgas da ANA (Agência Nacional de Águas, 2020a), tendo sido adotados no estudo dois critérios de seleção: (I) outorgas de direito de uso para captação superficial, onde não são contempladas nesse grupo as outorgas preventivas, os usos de pouca expressão e as outorgas revogadas; e (II) outorgas válidas, sendo aquelas com data de vencimento a partir de 2019. Para melhor organização dos dados, as outorgas foram agrupadas por trecho, de acordo com a região fisiográfica adotada no PBHSF (2016-2025). Além da divisão por trechos, as demandas foram agrupadas em: usos prioritários; agropecuária; indústria e outras finalidades.

Uma vez concluída a seleção das outorgas, seguindo os critérios supracitados, foi realizado o levantamento das demandas do PNSH, publicado no ano de 2019, onde apresenta uma série de ações de infraestrutura que visam minimizar os riscos associados à escassez de água e o controle de cheias (Agência Nacional de Águas, 2019b). Nesta fase do estudo, foram identificadas as obras propostas e potenciais no PNSH que captam água no rio São Francisco. Foram considerados isoladamente os seguintes pontos de captação: Captação da Companhia de Saneamento de Sergipe - DESO, que abastece a região metropolitana de Aracajú; as obras do Plano Nacional de Segurança Hídrica (Canal do Sertão Alagoano, canal do Sertão Pernambucano, canal do Xingó, canal do Sertão Baiano/Eixo do Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional (PISF); canal de Integração do Sertão Piauiense/Eixo Oeste do PISF); PISF Eixo Norte – Usos Prioritários; PISF Eixo Norte – Volume adicional; PISF Eixo Leste – Usos Prioritários; e PISF Eixo Leste – Volume adicional.

Uma vez selecionadas as outorgas da bacia e as demandas apontadas no PNSH, foram calculadas as taxas de evolução das demandas hídricas a partir dos valores estabelecidos no PBHSF 2016-2025, cujos horizontes considerados nesta pesquisa foram:

- **Curto prazo:** Projeções de evolução da demanda para o ano de 2025, o qual é o horizonte final do plano da bacia em vigência;
- **Médio prazo:** Projeções da demanda para o ano de 2030, o qual é o horizonte da agenda 2030, que estabelece os objetivos do desenvolvimento sustentável.

Construção dos cenários de evolução das demandas

Esta fase do estudo visou analisar o atendimento das demandas hídricas atuais e futuras considerando o comportamento do sistema hídrico do rio São Francisco. A metodologia adotada para analisar o atendimento das demandas hídricas atuais e futuras foi a construção de cenários de evolução de demandas de água propostas no Plano da Bacia 2016-2025, considerando as novas regras de operação dos reservatórios propostas pela Resolução ANA nº 2.081/2017, para os horizontes de 2020, 2025 e 2030.

O horizonte de demandas do ano de 2020 é o cenário de referência, onde foram aplicadas no Sistema Hídrico do Rio São Francisco as regras operativas da Resolução ANA nº 2.081/2017, que passou a vigorar a partir de 1º de maio de 2019 (Agência Nacional de Águas, 2019a). Neste cenário de 2020, são consideradas as outorgas válidas do rio São Francisco, sendo desconsideradas aquelas cujo vencimento ocorreu anterior a 2019. Além do cenário de referência para o ano de 2020, foi simulado um cenário com as mesmas condições do cenário de referência considerando a liberação de pulsos de vazão pelo reservatório de Xingó, em conformidade com o hidrograma ambiental do Baixo São Francisco proposto por Medeiros et al. (2013) e adaptado por Basto et al. (2020). Para os anos de 2025 e 2030 foram propostos cenários de evolução das demandas para o rio São Francisco considerando as regras operativas da Resolução ANA nº 2.081/2017. As projeções propostas são baseadas em três cenários alternativos de evolução da demanda (em termo da vazão de retirada) futura de água do PBHSF (2016-2025).

As cenas apresentadas pelo Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (2016) são: (A) consumo mais moderado de água, o qual poderia estar associado a uma trajetória de menor desenvolvimento social e econômico da bacia; (B) resulta das dinâmicas instaladas nas diversas sub-bacias e setores usuários, sendo considerado como central ou tendencial; e (C) de maior desenvolvimento e de alta demanda em termos de consumo de água.

Para projeção das demandas dos anos 2025, 2030 e 2035 foram calculadas as taxas de crescimentos para os respectivos anos a partir do PBHSF (2016-2025) e aplicadas nas demandas outorgadas do cenário de referência (ano 2020).

Associadas aos cenários de evolução das demandas A (consumo moderado de água), B (consumo tendencial) e C (maior consumo de água) foram consideradas três condições aplicadas em cada um dos cenários propostos para os horizontes de 2025 e 2030:

1. As projeções das demandas sem considerar as obras propostas e potenciais (ainda em fase de estudos de viabilidade) no Plano Nacional de Segurança Hídrica, cujas captações ocorrem na calha do rio São Francisco ou em seus reservatórios. As obras em questão são o Canal do Sertão Alagoano, o Canal do Sertão Pernambucano, o Canal do Xingó, o Canal do Sertão Baiano/Eixo do PISF e o Canal de Integração do Sertão Piauiense/Eixo Oeste do PISF;
2. As projeções das demandas considerando as obras propostas no Plano Nacional de Segurança Hídrica, cujas captações ocorrem na calha do rio São Francisco ou em seus reservatórios;
3. As projeções das demandas considerando as obras propostas no Plano Nacional de Segurança Hídrica, cujas captações ocorrem na calha do rio São Francisco ou em seus reservatórios, e a liberação de dois pulsos de vazão pelo reservatório de Xingó.

No total, foram simulados 18 cenários de evolução da demanda para o rio São Francisco para o horizonte de 2025 e 2030 e 2 cenários para o ano de 2020, conforme demonstrado na Figura 2.



Figura 2 - Síntese dos cenários evolução demanda de simulação.

Simulação dos cenários propostos

A representação da dinâmica hídrica de uma bacia ou rio através de um modelo de simulação permite prever os impactos causados pela construção de uma obra ou pela alteração da política operacional sobre um sistema existente (Azevedo & Porto, 2002). A simulação dos cenários possibilitou verificar a distribuição dos recursos hídricos nas condições descritas neste trabalho, o que permitiu fazer a análise do atendimento das demandas atuais e as projetadas com base no PBHSF (2016-2025) e no PNSH.

O modelo adotado para simulação dos cenários da pesquisa foi o WEAP - Sistema de Avaliação e Planejamento Hídrico, que utiliza uma abordagem integrada para o planejamento de recursos hídricos. O WEAP é um modelo de fluxo e otimização, o qual foi desenvolvido pelo Instituto do Meio Ambiente de Estocolmo. O detalhamento técnico do modelo foi descrito por Yates et al. (2005). Deve-se ressaltar, que a ferramenta adotada foi amplamente utilizada em diversas regiões, para estudos de planejamento dos recursos hídricos (Li et al., 2015; Maliehe & Mulungu, 2017). Há diversas aplicações do WEAP para simulação de cenários de gerenciamento dos recursos hídricos e alocação de água considerando diferentes temáticas, entre elas, mudanças climáticas, uso do solo, transposição de bacias, construção e operação de barragens (Strzepek et al., 1999; Li et al., 2015; Brambilla et al., 2017; Maliehe & Mulungu, 2017; Mousavi et al., 2017; Basto et al., 2020).

O WEAP foi selecionado para representar os cenários por ser um sistema integrado de planejamento dos recursos hídricos, que possui uma interface gráfica de fácil manipulação, permiti a definição de variáveis e equações pelo usuário, com licença gratuita para estudantes de países em desenvolvimento.

Para simulação dos cenários no modelo WEAP, além dos dados de demandas descritos nas etapas anteriores, foi preciso levantar outras informações necessárias, tais como: vazão, dados dos reservatórios e demandas energéticas. Para simulação foi necessário também determinar as prioridades de uso da água no modelo, conforme consta na Tabela 1. O modelo foi calibrado com base nas estações fluviométricas de Santa Maria da Boa Vista (48290000) e a estação de Piranhas (49330000).

Tabela 1 - Prioridades definidas no modelo.

Demandas/ Reservatórios	Prioridades
Vazão de restrição mínima	1
Demanda Usos Prioritários	1
Captação DESO	1
Usos Prioritários PISF Eixos Norte e Leste	1
Demanda Agropecuária, Indústria e Outras Finalidades	2
Canal do Sertão Alagoano	2
Canal do Sertão Pernambucano	2
Canal do Xingó	2
Reservatório de Três Marias	3
Geração de Energia Três Marias	3
Reservatório de Sobradinho	4
Reservatório de Luiz Gonzaga	4
Geração de Energia Sobradinho/Luiz Gonzaga/Complexo Paulo Afonso/ Xingó	4
Demanda Adicional PISF Eixos Norte e Leste	5
Demanda PISF Eixos Oeste e Sul	5

Os dados coletados descritos a seguir foram organizados na escala mensal, sendo essa uma escala usual na simulação da operação de reservatórios. Optou-se por trabalhar com a série de dados de 2001 a 2019 por abranger a estiagem de 2012 a 2018 e um período anterior à estiagem. Na sequência, estão apresentados os dados necessários para simulação do sistema hídrico do rio São Francisco, no modelo de rede fluxo.

Dados de Vazão - Os dados de vazões naturalizadas afluentes aos reservatórios do sistema hídrico foram obtidos através do Sistema de Acompanhamento de Reservatórios da ANA, sendo essa uma plataforma web que permite de forma prática e eficiente o acompanhamento da operação dos principais reservatórios do Brasil. Foram calculadas as vazões incrementais para os reservatórios de Sobradinho, Luiz Gonzaga, Complexo Paulo Afonso e Xingó a partir das vazões naturalizadas e essas

foram inseridas no modelo para a simulação. A nível de verificação da consistência dos resultados simulados pelo modelo são adotadas as vazões observadas das estações fluviométricas Santa Maria da Boa Vista (48290000), a jusante de Sobradinho, e Piranhas (49330000), a jusante de Xingó. Os dados das estações são obtidos na plataforma *HidroWeb*, que é um sistema para visualização e disponibilização de dados e informações hidrológicas, vinculado ao Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos, coordenado pela ANA. Optou-se pelas estações Santa Maria da Boa Vista e Piranhas devido à localização a jusante dos referidos reservatórios, sendo importantes pontos de comparação entre os valores simulados no modelo de rede fluxo e os observados, uma vez que as defluências desses reservatórios são estabelecidas de acordo o seu volume como definido na Resolução ANA nº 2.081/2017.

Dados dos Reservatórios e Geração de Energia - Os dados de operação dos reservatórios e o total de energia gerada nas UHE's são obtidos através do sistema de informação do Sistema Interligado Nacional (SIN), disponibilizado e coordenado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2020). Na simulação foram adotados os dados de evaporação líquida, que é a diferença entre a evaporação real do reservatório e a evapotranspiração real da bacia hidrográfica no local do reservatório antes da sua implantação, calculados pelo ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2004). As características estruturais e operacionais das UHE's e dos reservatórios são obtidas (capacidades de armazenamento, capacidade hidráulica, entre outras) através das publicações da ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2019a, 2019b).

Análise do impacto da evolução das demandas de água a curto e médio prazo no sistema hídrico

A última etapa do estudo consiste em analisar o impacto da evolução das demandas de água a curto e médio prazo no sistema hídrico do São Francisco. Logo, foram definidos parâmetros e critérios de análise, a qual deve ocorrer de forma integrada onde são verificados os atendimentos dos usos múltiplos e o risco de não atendimento categorizados com base nas três dimensões do desenvolvimento sustentável: (I) Dimensão Social: Usos prioritários, obras do PNSH para usos prioritários e captação da DESO; (II) Dimensão Econômica: Agropecuária, indústria, outras finalidades, obras do PNSH e a geração de energia hidrelétrica; e (III) Dimensão Ambiental: As defluências da UHE de Xingó para manutenção do ecossistema aquático do Baixo São Francisco.

A natureza dos cenários de evolução da demanda (A, B e C) propostos no PBHSF 2016-2025 (Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, 2016), também está pautada nos aspectos socioeconômicos, uma vez que refletem projeções do menor ao maior consumo de água a partir de cenários de desenvolvimento. Vale ressaltar que a análise está baseada nos percentuais de atendimento (índice de atendimento), onde o aspecto do risco de não atendimento considerado é o da ANA, que adota nos seus procedimentos de outorga o risco de 5% de não atendimento das demandas, sendo esse um valor médio entre os riscos que se considera toleráveis pelos diversos setores usuários (Agência Nacional de Águas, 2013).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados os resultados encontrados da pesquisa distribuídos nos seguintes itens: (I) análise das demandas do uso da água: demandas dos usos consuntivos, demandas do PNSH e demandas projetadas; (II) apresentação dos dados para modelagem – pulsos de cheia do baixo São Francisco, geração de energia hidroelétrica das usinas da calha principal e vazões afluentes aos reservatórios; (III) ajuste do modelo de alocação de água; (IV) resultados das simulações considerando as demandas outorgadas e demandas projetadas 2025 e 2030; e (V) análise do impacto das simulações dos cenários na geração de energia e atendimento a demanda ambiental.

Demandas do uso da água

O volume de água outorgado anual no rio São Francisco é de 6.343.514.555 m³ (6.343,51 Hm³), sendo que 78% são consumidos pelo segmento da agropecuária (Tabela 2). Entre os trechos levantados, o maior consumo está no trecho entre as UHE de Sobradinho e Luiz Gonzaga (Tabela 3), localizado no trecho da região fisiográfica do Submédio, seguido dos trechos localizados entre as barragens Três Marias e Sobradinho, que juntos representam aproximadamente 33% do consumo de água do rio, sendo 21% no trecho do alto e 12% no trecho do médio. Considerando a escala de tempo mensal, os meses que mais consomem água na bacia são outubro, setembro, agosto e novembro. Enquanto que, os meses de junho e fevereiro são os de menor consumo.

Tabela 2 - Consumo de água outorgado por uso no rio São Francisco.

Usos	Vol. (m ³ /ano)	Percentual
Agropecuária	4.936.969.452	77,8%
Indústria	9.820.998	0,2%
Outras Finalidades	34.158.405	0,5%
Usos Prioritários	390.626.180	6,2%
PISF Eixo Leste - UHE Luiz Gonzaga	84.201.120	1,3%
PISF Eixo Norte - Jusante Sobradinho	55.188.000	0,9%
Canal do Sertão Alagoano - UHE Apolônio Sales (Moxotó)	250.816.320	4,0%
Captação DESO - Jusante Xingó	581.734.080	9,2%
Total	6.343.514.555	100%

Fonte dos dados: Agência Nacional de Águas (2020a).

Tabela 3 - Consumo de água por trecho no rio São Francisco.

Trecho	Vol. (m ³ /ano)	Percentual
Montante Três Marias - Alto São Francisco	67.113.821	1%
Três Marias - Alto São Francisco	410.121.951	6%
Jusante Três Marias - Alto São Francisco	1.317.805.586	21%
Jusante Três Marias - Médio São Francisco	751.916.888	12%
Sobradinho - Médio São Francisco	577.431.667	9%
Jusante Sobradinho - Submédio São Francisco	1.786.809.601	28%
Luiz Gonzaga (Itaparica) - Submédio São Francisco	538.813.001	8%
Complexo Paulo Afonso - Submédio São Francisco	205.113.738	3%
Xingó - Baixo São Francisco	74.042.492	1%
Jusante Xingó - Baixo São Francisco	614.345.810	10%
Total	6.343.514.555	100%

Fonte dos dados: Agência Nacional de Águas (2020a).

Além das demandas das outorgas analisadas acima, foram levantadas as demandas de água do PNSH que derivam água diretamente do rio São Francisco (Tabela 4). Essas obras foram denominadas de “Projetos do tipo Supply Driven”, que são projetos para indução do desenvolvimento regional, porém, requerem ainda estudos de detalhamento de planos de desenvolvimento regional que promovam uma atualização e análise integrada da factibilidade das demandas associadas a todas essas intervenções (Agência Nacional de Águas, 2019c).

Tabela 4 - Demandas propostas no PNSH que derivam água do rio São Francisco.

Intervenções do tipo Supply Driven	Manancial	Capacidade (m ³ /s)
Canal do Sertão Pernambucano	UHE Sobradinho	71,5
Canal do Xingó	UHE Paulo Afonso IV	33
Canal do Sertão Baiano/Eixo Sul PISF	UHE Sobradinho	32
Canal de Integração do Sertão Piauiense/Eixo Oeste PISF	UHE Sobradinho	30
Canal do Sertão Alagoano	UHE Apolônio Sales	32

Fonte dos dados: Agência Nacional de Águas (2019c).

O conjunto de projetos de desenvolvimento proposto para bacia totaliza uma demanda de 198,5 m³/s, a qual somada à capacidade total do PISF Norte e Leste, de 126,3 m³/s, atinge 324,8 m³/s. Sendo assim, o porte das infraestruturas hídricas propostas a partir do São Francisco, somado aos Eixos Norte e Leste do PISF, é maior do que a capacidade total (206 m³/s) dos perímetros de irrigação em operação na bacia nos últimos 50 anos (Agência Nacional de Águas, 2019).

No entanto, o plano alerta para duas questões importantes com relação ao conjunto de obras da bacia: (I) em relação à demanda, a hipótese do aproveitamento de 80% da capacidade dessa infraestrutura proposta necessitaria da implantação de aproximadamente 1.400 mil hectares irrigados, sendo esse superior a área irrigada nos perímetros públicos (110 mil ha) e maior que a área total irrigada na bacia (779 mil ha), a qual inclui os empreendimentos privados; e (II) além da factibilidade da demanda a ser suprida, a oferta hídrica da bacia do rio São Francisco é objeto de atenção. De acordo com o próprio PNSH, o Índice de Segurança Hídrica demonstra que a bacia apresenta níveis de segurança hídrica baixo e mínimo em grande parte da sua área, o que revela a complexidade do seu balanço hídrico.

Deve-se mencionar que a abordagem estruturada pelo PNSH se limita a uma perspectiva reducionista, a qual não contempla questões como a governança e abordagens integradas entre os diferentes setores que dependem diretamente dos recursos hídricos. O PNSH tem como foco ações pautadas na infraestrutura hídrica de caráter regional e tem como objetivo evitar soluções que não tenham aderência com os problemas de oferta de água identificados.

Após análise das demandas outorgadas e do PNSH, foram calculadas as demandas projetadas para os cenários de evolução apresentados na metodologia do estudo (Etapa III). As demandas foram agrupadas em usos prioritários, agropecuária, indústria e outras finalidades em função das demandas do PBHSF (2016-2025) estarem agrupadas em demandas urbanas, rural, agropecuária e indústria. As taxas (Tabela 5) para os usos prioritários foram consideradas a partir do somatório das demandas urbanas e rurais. Já para outras finalidades, as taxas foram calculadas a partir do somatório das demandas urbanas, rurais e da indústria. Para a agropecuária e a indústria foram consideradas as mesmas taxas de evolução das demandas do plano.

Tabela 5 - Taxas de evolução da demanda dos usos consuntivos calculadas a partir do PBHSF 2016-2025.

Região	Cenário	Usos Prioritários		Região	Cenário	Agropecuária	
		Taxas (%)				Taxas (%)	
		2025	2030			2025	2030
Alto	A	4	7	Alto	A	21	34
	B	5	11		B	33	53
	C	7	14		C	47	74
Médio	A	5	11	Médio	A	11	24
	B	7	14		B	16	35
	C	9	17		C	38	67
Submédio	A	8	13	Submédio	A	-15	-23
	B	5	15		B	-11	-16
	C	7	16		C	-8	-9
Baixo	A	6	13	Baixo	A	0	0
	B	10	13		B	4	9
	C	6	13		C	8	17
Região	Cenário	Indústria		Região	Cenário	Outras Finalidades	
		Taxas (%)				Taxas (%)	
		2025	2030			2025	2030
Alto	A	18	41	Alto	A	11	24
	B	21	47		B	13	29
	C	26	60		C	16	36
Médio	A	31	69	Médio	A	9	20
	B	44	100		B	13	27
	C	47	112		C	15	32
Submédio	A	25	58	Submédio	A	11	22
	B	31	77		B	10	26
	C	46	115		C	14	34
Baixo	A	14	43	Baixo	A	8	18
	B	29	57		B	13	21
	C	43	86		C	13	26

Observa-se que o setor com as maiores taxas de crescimento refere-se à indústria, enquanto o setor da agropecuária, que representa 78% do consumo outorgado do rio São Francisco, tem suas

maiores taxas de crescimento no Alto e no Médio São Francisco, verificando que há taxas de decaimento da demanda no Submédio e nulas no Baixo. A evolução das demandas para as obras do Plano Nacional de Segurança Hídrica, com exceção do Canal do Sertão Baiano/Eixo Sul do PISF, já estava estipulada no PBHSF 2016-2025, dentro das demandas dos grandes projetos de irrigação que eram acrescidos a demanda agropecuária. As demandas do Canal do Sertão Alagoano, do Canal do Sertão Pernambucano, do Canal do Xingó e do Canal de Integração do Sertão Piauiense/Eixo Oeste do PISF foram retidas do total da demanda agropecuária e aplicadas separadamente. Para o Canal do Sertão Baiano/Eixo do Sul do PISF foram aplicadas as mesmas condições de evolução da demanda do Canal de Integração do Sertão Piauiense/Eixo Oeste do PISF (Tabela 6).

As demandas das transposições já em operação no Submédio (PISF Eixo Norte e Leste) e no Baixo São Francisco (Captação Deso), foram projetadas de acordo com a Tabela 6, onde a partir da outorga emitida para os Eixos Norte e Leste do Projeto de Integração das Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional (PISF) foi considerada apenas a vazão de 26,4 m³/s, disponível para bombeamento nos dois eixos a qualquer tempo, para consumo humano e dessedentação animal (Tabela 6).

Tabela 6 - Demandas projetadas para as obras do PNSH e para as transposições implantadas.

Intervenção	Cenário	Vazões (m ³ /s)		Intervenção	Cenário	Vazões (m ³ /s)	
		2025	2030			2025	2030
Canal do Sertão Pernambucano	A	11,8	11,8	Captação Deso	A	2,8	2,8
	B	23,6	23,6		B	3	3
	C	71,5	71,5		C	3,5	3,5
Canal do Xingó	A	12,1	12,1	PISF Eixo Norte - Uso Prioritário	A	18,4	18,4
	B	24,2	24,2		B	18,4	18,4
	C	36,3	36,3		C	18,4	18,4
Canal do Sertão Alagoano	A	10,7	10,7	PISF Eixo Leste - Uso Prioritário	A	7,95	7,95
	B	21,3	21,3		B	7,95	7,95
	C	32	32		C	7,95	7,95
PISF Eixo Oeste	A	0	0	PISF Eixo Norte - Demanda Adicional	A	2,85	5,05
	B	0	0		B	13,1	21
	C	0	30		C	33	52
PISF Eixo Sul	A	0	0	PISF Eixo Leste - Demanda Adicional	A	2,05	2,45
	B	0	0		B	4,25	6,05
	C	0	32		C	8,65	12,8

Fonte dos dados: Agência Nacional de Águas (2019c); Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (2016)

A captação da vazão máxima diária de 114,3 m³/s para os dois Eixos, ficou condicionada na outorga, quando o nível de água do Reservatório de Sobradinho estiver acima do menor valor entre o nível correspondente ao armazenamento de 94% do volume útil e o nível correspondente ao volume de espera para controle de cheias (Agência Nacional de Águas, 2019b). Destaca-se, que no PBHSF 2016-2025 a demanda da Captação da Deso e a vazão de 26,4 m³/s do PISF são consideradas igualmente as demandas internas da bacia, uma vez que são para consumo humano e dessedentação animal.

Ao projetar as demandas para os horizontes de 2025 e 2030 sem as obras do PNSH as demandas anuais variaram entre 6.763.179.425 m³ no cenário A (consumo moderado de água) em 2025 até 10.502.370.502 m³ no cenário C (maior consumo de água) em 2030 (Tabela 7). Esse crescimento de demanda quando comparado as demandas atuais, do cenário de 2020, representa respectivamente 7% e 66% (Tabela 8).

Nos cenários que consideram as obras do PNSH a variação do volume anual é entre 7.852.519.954 m³, no cenário A, e 16.864.758.502 m³ no cenário C (Tabela 8). Os percentuais de crescimento passam a variar entre 24% a 166% nos cenários projetados (Tabela 9). O crescimento da demanda varia drasticamente entre os cenários A (consumo moderado de água), B (consumo tendencial) e C (maior consumo de água) para os horizontes dos anos 2025 e 2030 e ao considerar a implantação das obras do PNSH (Tabelas 7 e 8). A concretização desses cenários poderá pressionar ainda mais o sistema hídrico do São Francisco, de forma que poderão se instalar inúmeros conflitos pelo uso da água entre usos e usuários ao longo da calha do mesmo.

Tabela 7 - Demandas sem as Obras do PNSH.

Meses	2025 A	2025 B	2025 C	2030 A	2030 B	2030 C
Jan	539.205.805	598.897.455	708.149.593	564.610.647	664.783.313	834.703.186
Fev	506.959.213	563.239.383	664.074.708	532.292.477	626.155.073	783.109.430
Mar	521.445.680	582.510.947	691.052.891	550.571.949	651.176.205	819.973.280
Abr	560.229.405	624.751.882	737.628.874	595.060.638	700.736.598	875.975.182
Mai	556.518.046	620.780.619	736.175.517	590.829.559	696.446.021	875.134.759
Jun	507.147.252	566.856.933	675.167.713	538.303.342	636.400.545	804.041.628
Jul	551.324.899	616.039.390	731.044.929	586.888.520	692.706.622	870.855.751
Ago	638.520.808	710.014.562	834.537.855	680.147.172	797.313.556	990.373.524
Set	645.747.378	715.190.846	837.742.520	684.591.041	799.714.094	989.807.975
Out	643.278.203	710.959.307	833.589.445	677.324.628	790.945.212	981.217.231
Nov	557.540.831	617.634.645	725.798.487	582.237.160	683.309.378	851.903.134
Dez	535.261.904	594.513.858	701.752.453	558.603.405	658.083.810	825.275.420
Total	6.763.179.425	7.521.389.828	8.876.714.986	7.141.460.540	8.397.770.428	10.502.370.502

Nos cenários que consideram as obras do PNSH a variação do volume anual é entre 7.852.519.954 m³, no cenário A, e 16.864.758.502 m³ no cenário C (Tabela 08). Os percentuais de crescimento passam a variar entre 24% a 166% nos cenários projetados (Tabela 9). O crescimento da demanda varia drasticamente entre os cenários A (consumo moderado de água), B (consumo tendencial) e C (maior consumo de água) para os horizontes dos anos 2025 e 2030 e ao considerar a implantação das obras do PNSH (Tabela 7 e 8). A concretização desses cenários poderá pressionar ainda mais o sistema hídrico do São Francisco, de forma que poderão se instalar inúmeros conflitos pelo uso da água entre usos e usuários ao longo da calha do mesmo.

Tabela 8 - Percentuais de crescimento da demanda com relação a 2020 (%).

CENÁRIOS	2025 A	2025 B	2025 C	2030 A	2030 B	2030 C
SEM PNSH	7	19	40	13	32	66
COM PNSH	24	53	109	30	67	166

Tabela 9 - Demandas com as Obras do PNSH.

Meses	2025 A	2025 B	2025 C	2030 A	2030 B	2030 C
Jan	631.725.137	783.916.675	1.082.455.993	657.129.980	849.802.533	1.375.070.386
Fev	590.525.062	730.353.517	1.002.157.908	615.858.326	793.269.207	1.271.183.030
Mar	613.965.013	767.530.167	1.065.359.291	643.091.282	836.195.425	1.360.340.480
Abr	649.764.243	803.802.740	1.099.860.874	684.595.476	879.787.456	1.398.911.182
Mai	649.037.379	805.799.839	1.110.481.917	683.348.892	881.465.241	1.415.501.959
Jun	596.682.090	745.907.791	1.037.399.713	627.838.180	815.451.403	1.326.977.628
Jul	643.844.232	801.058.610	1.105.351.329	679.407.853	877.725.842	1.411.222.951
Ago	731.040.141	895.033.782	1.208.844.255	772.666.505	982.332.776	1.530.740.724
Set	735.282.216	894.241.704	1.199.974.520	774.125.879	978.764.952	1.512.743.975
Out	735.797.536	895.978.527	1.207.895.845	769.843.961	975.964.432	1.521.584.431
Nov	647.075.669	796.685.503	1.088.030.487	671.771.998	862.360.236	1.374.839.134
Dez	627.781.237	779.533.078	1.076.058.853	651.122.738	843.103.030	1.365.642.620
Total	7.852.519.954	9.699.841.935	13.283.870.986	8.230.801.069	10.576.222.535	16.864.758.502

Apresentação dos dados para modelagem – Pulsos de cheia e geração de energia

Finalizado o processo de análise das demandas, foram verificados outros dados necessários para simulação dos cenários propostos, sendo eles, os pulsos de cheia do baixo trecho do rio São Francisco, conforme prevê a Resolução ANA nº 2.081/2017, e a geração de energia. Na simulação, foi considerada a liberação da vazão média mínima de 2.218 m³/s para o pulso de cheia praticado no mês de fevereiro, quando o reservatório de Sobradinho estiver acumulando no mínimo 50% do seu volume útil, considerando a manutenção da vazão mínima média de 1.300 m³/s para o mês de janeiro. Os valores considerados para o pulso de cheia e o período foram definidos a partir da proposta que o IBAMA fez na 10ª Reunião de Acompanhamento do Sistema Hídrico do rio São Francisco no ano de 2020, (Agência Nacional de Águas, 2020c), considerando o hidrograma ambiental proposto por Medeiros et al. 2013

e adaptado por Basto et al. (2020), na sala de situação da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Na simulação não foi considerada a média móvel para liberação dos pulsos, uma vez que há uma limitação do modelo WEAP para inserir os condicionantes vinculando-os individualmente a cada mês da série (exemplo: fevereiro de 2003, fevereiro de 2004, etc.).

Quanto à geração de energia, ressalta-se que a definição das condições de operação de reservatórios por agentes públicos e privados é uma atribuição da ANA e no caso de reservatórios de aproveitamentos hidrelétricos, a definição será efetuada em articulação com o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Nesse caso, o agente do sistema elétrico tem um importante papel na definição da operação dos reservatórios para atendimento da demanda energética, não só para os subsistemas em que as usinas estão localizadas, mas considerando toda a demanda energética do SIN.

O sistema hídrico do São Francisco é complexo em função da alta competitividade entre os usos consuntivos, principalmente a irrigação, e a geração de energia. Isso ocorre, em função dessas atividades utilizarem a água com diferentes níveis de garantia (Asfora & Cirilo, 2005). Na bacia hidrográfica do rio São Francisco o aumento dos usos consuntivos compete diretamente com a geração de energia hidrelétrica, de forma que o crescimento do consumo de água na bacia implica diretamente na perda da geração de energia (Braga & Lotufo, 2008; Siegmund-Schultze et al., 2015).

O total de energia hidrelétrica gerado pelas hidrelétricas do rio São Francisco, de outubro de 2002 a setembro de 2019, foi 652.264.617 MWh, onde a geração média se foi 38.368.507 MWh. A produção total das usinas do rio São Francisco ao longo dos anos hidrológicos 2017/2018 foi o ano com menor geração de energia 13.661.979 MWh e 2006/2007 foi o ano com maior produção 58.517.770 MWh.

Calibração do modelo de alocação de água

O ajuste do modelo WEAP foi realizado com base em dois parâmetros, vazões e volume dos reservatórios. Para isso, foram adotadas as estações fluviométricas Santa Maria da Boa Vista (48290000) e Piranhas (49330000) e os volumes observados dos reservatórios (Três Marias, Sobradinho e Luiz Gonzaga) ao longo da série histórica simulada. O período da simulação definido no estudo corresponde de 2001 a 2019, tendo o primeiro ano apenas para "aquecimento" da simulação, sendo esse um requisito do próprio modelo.

As Figuras 3 e 4 ilustram os resultados encontrados para os parâmetros verificados. Observa-se que ao comparar os dados das estações fluviométricas com as vazões simuladas pelo modelo, foi observado um comportamento similar das curvas dos gráficos da Figura 3 para cada um dos trechos analisados, de forma que há sobreposição entre as curvas na maior parte do período, onde o R^2 das linhas de tendência são 0,8494 para a estação Santa Maria da Boa Vista, e 0,9277 para a estação Piranhas.

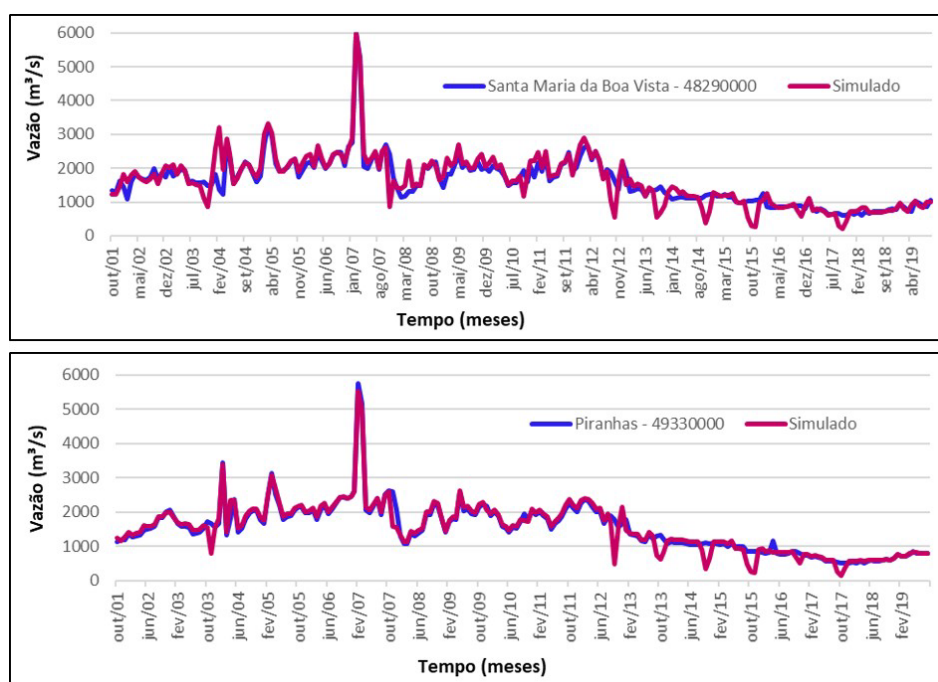


Figura 3 - Vazões observadas e simuladas para o trecho das estações Santa Maria da Boa Vista e Piranhas (m³/s).

Quanto aos volumes, pode-se perceber que houve melhor representação do volume do reservatório de Três Marias ($R^2=0,9414$) no período mais seco da série, entre outubro de 2014 e setembro de 2019. No período úmido, o volume do reservatório foi subestimado e apesar da amplitude entre a curva do volume observado e o simulado entre 2003 e 2014, as curvas possuem comportamentos similares ($R^2 = 0,6881$). A linha de tendência do período de outubro de 2002 a setembro de 2019 tem $R^2 = 0,4446$.

A operação dos reservatórios do rio São Francisco depende de vários fatores, uma vez que além do abastecimento dos usos consuntivos, os mesmos possuem como finalidade a geração de energia e o controle de cheias, de forma que a representação desta realidade em um modelo matemático é extremamente complexa. Dentre os reservatórios simulados, o reservatório de Luiz Gonzaga possui a maior complexidade na representação uma vez que sua operação está diretamente relacionada com a operação de Sobradinho. Diante disso, o comportamento das curvas dos volumes do reservatório de Luiz Gonzaga (Itaparica) foi diferente dos demais, onde houve um melhor ajuste em determinados períodos dos anos úmidos.

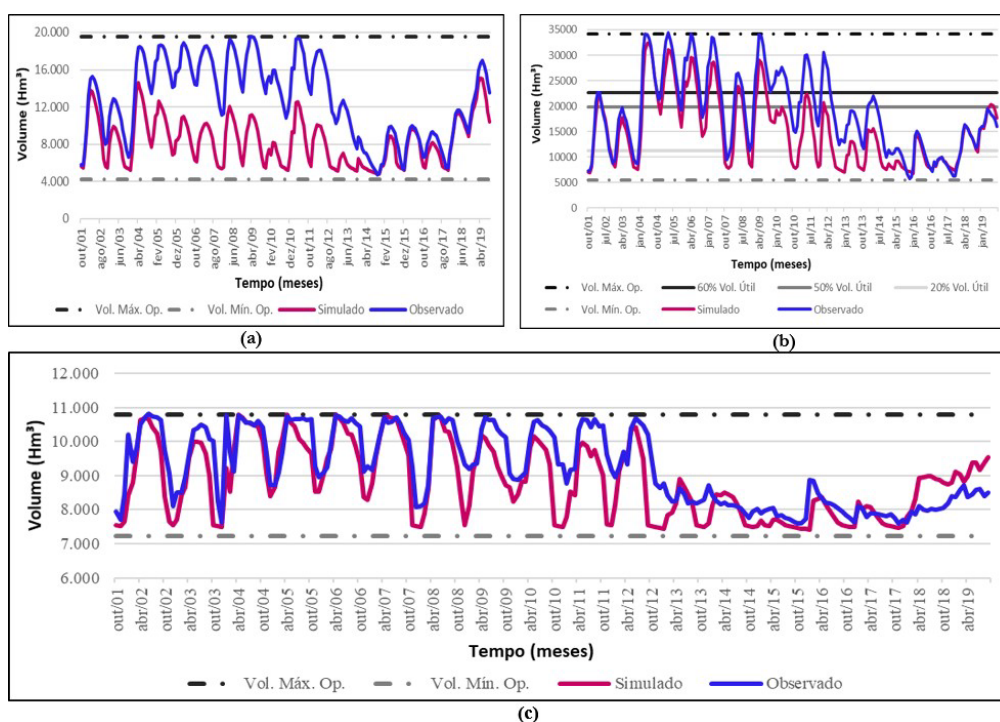


Figura 4 - Volumes observados e simulados dos reservatórios (Hm³). (a) Três Marias. (b) Sobradinho. (c) Luiz Gonzaga.

Resultados das simulações com as demandas outorgadas (Cenários de referência)

Neste tópico serão apresentados os resultados das simulações dos cenários de referência, onde foram consideradas as demandas outorgadas válidas e as regras operativas da Resolução ANA nº 2.081/2017, que estabelece as vazões defluentes mínimas para Três Marias, Sobradinho e Xingó. Foram realizadas duas simulações: a primeira sem os pulsos de vazões (Cenário de Referência) para o Baixo São Francisco e a segunda considerando os pulsos de 1.300 m³/s para o mês de janeiro e 2.218 m³/s para o mês de fevereiro (Cenário de Referência com pulso), quando o volume útil do reservatório de Sobradinho estiver com o mínimo de 50% da sua capacidade.

Considerando a aplicação das regras da Resolução ANA nº 2.081/2017, os usos consuntivos outorgados do rio São Francisco levantados foram totalmente atendidos ao longo dos 17 anos simulados nos dois cenários simulados nesta etapa. Ao aplicar a regra da referida Resolução foi perceptível que o sistema hídrico do rio São Francisco reservou mais água em seus reservatórios, de forma que houve o atendimento total dos usos consuntivos que captam água no manancial em toda a série simulada. Na Figura 5, pode-se observar que não houve a necessidade de liberação de água pelo reservatório de Três Marias no cenário com a liberação dos pulsos de Sobradinho, uma vez que não houve alteração do volume quando comparado com o cenário de referência sem os pulsos.

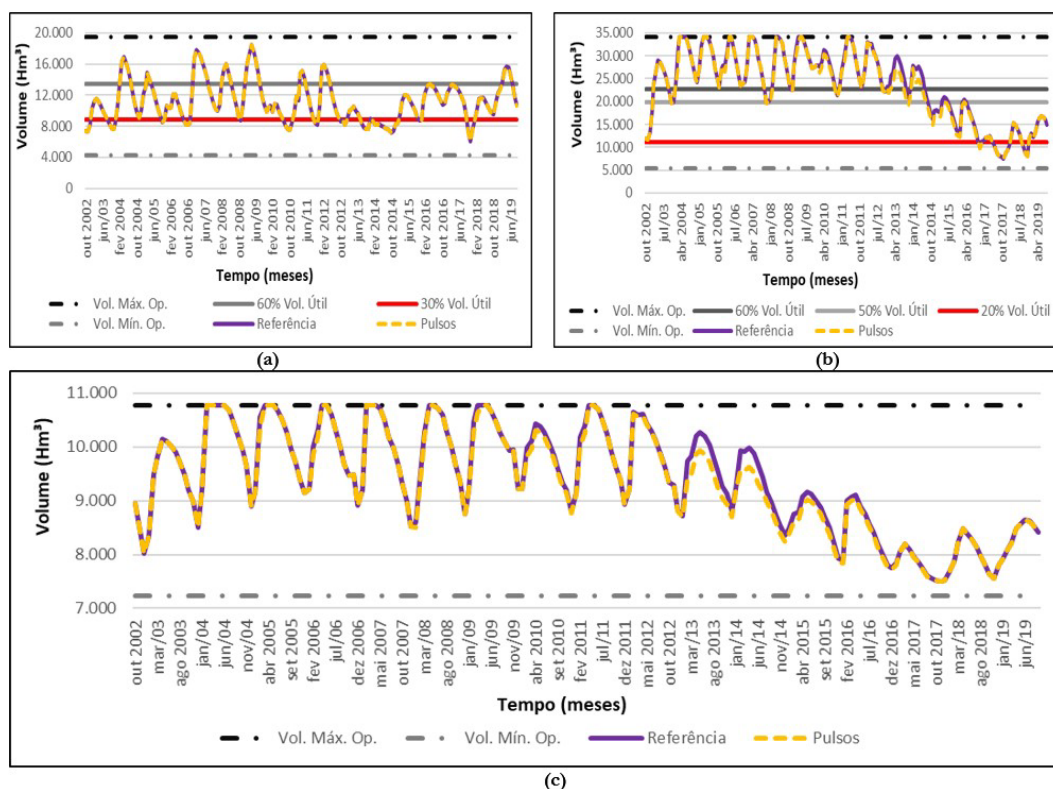


Figura 5 - Volumes dos reservatórios (Hm³) para Simulação dos Cenários de Referência. (a) Três Marias. (b) Sobradinho. (c) Luiz Gonzaga.

As curvas do volume de Sobradinho para os cenários de Referência e com a liberação dos pulsos tiveram um comportamento similar, sendo possível verificar a sobreposição entre ambas em quase todo o período da simulação. Desta forma, a liberação dos pulsos não impactou significativamente o volume acumulado, de forma que além do atendimento aos usos consuntivos foi possível favorecer uma melhor condição ao ecossistema aquático.

O ano de 2010 e o intervalo de 2012 e 2015, mostraram uma queda no volume de Sobradinho no cenário dos Pulsos, quando comparado ao de Referência, mas esta redução não compromete o atendimento dos usos consuntivos. Dos 17 anos simulados o reservatório estaria abaixo dos 50% do volume útil no mês de fevereiro em 7 anos, sendo estes 2003, 2008, de 2015 a 2019 (Figura 5). Já o reservatório Luiz Gonzaga, se comportou de forma similar ao reservatório de Sobradinho (Figura 5).

A implantação do reservatório de Xingó provocou uma série de mudanças hidrológicas no regime de vazões do baixo São Francisco, de forma que houve redução das vazões médias (31%), das vazões mínima (21%) e das vazões máximas (35%). Com isso, as enchentes que ocorriam na região do Baixo estão menos frequentes e com menor magnitude (Vasco et al., 2019). A aplicação das regras da Resolução ANA nº 2.081/2017 reduziu 31,9% as vazões praticadas a jusante de Xingó para o período de outubro de 2002 a setembro de 2019, ao comparar as defluências da praticadas na verificação (regras operativas anteriores à Resolução) com o cenário de Referência, e 32,4% para o Cenário que considera os Pulsos nos meses de janeiro e fevereiro. Contudo, no período da escassez, no início dos anos hidrológicos 2014-2015 e 2015-2016 e entre janeiro de 2017 e setembro de 2019, houve o aumento das vazões, onde as mesmas se mantiveram na faixa entre 700 e 800 m³/s (Figura 6).

Resultados das simulações com as demandas outorgadas projetadas para 2025

As simulações realizadas para o ano de 2025, além das regras operativas da Resolução da ANA, foram consideradas os cenários de evolução das demandas A (consumo moderado de água), B (consumo tendencial) e C (maior consumo de água) e três condições aplicadas em cada um dos cenários de evolução da demanda propostos: 1- projeções das demandas sem considerar as obras propostas no Plano Nacional de Segurança Hídrica; 2- projeções das demandas considerando as obras propostas no PNSH; 3- projeções das demandas considerando as obras propostas no PNSH e a liberação de dois pulsos de vazão pelo reservatório de Xingó.

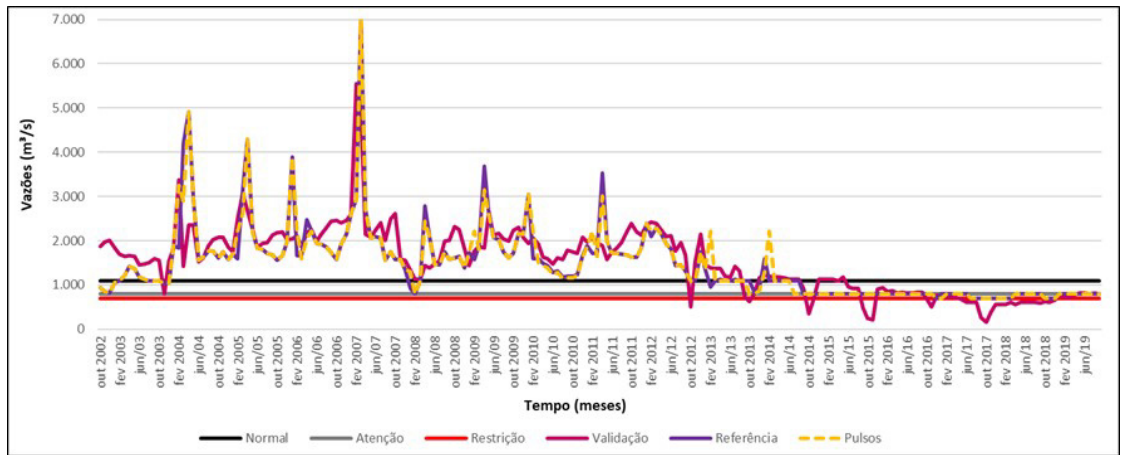


Figura 6 - Defluências da UHE Xingó (m³/s) para Simulação dos Cenários de Referência.

A Figura 7 traz as demandas projetadas para o horizonte de 2025, onde é possível verificar que as demandas foram atendidas em sua totalidade ao longo de 14 anos da série simulada em todos os 9 cenários, com exceção das demandas adicionais do PISF (Eixo Norte e Leste) que tinham menor prioridade no atendimento, a qual foi estabelecida a partir das condições da outorga de direito de uso dos recursos hídricos (Agência Nacional de Águas, 2019b).

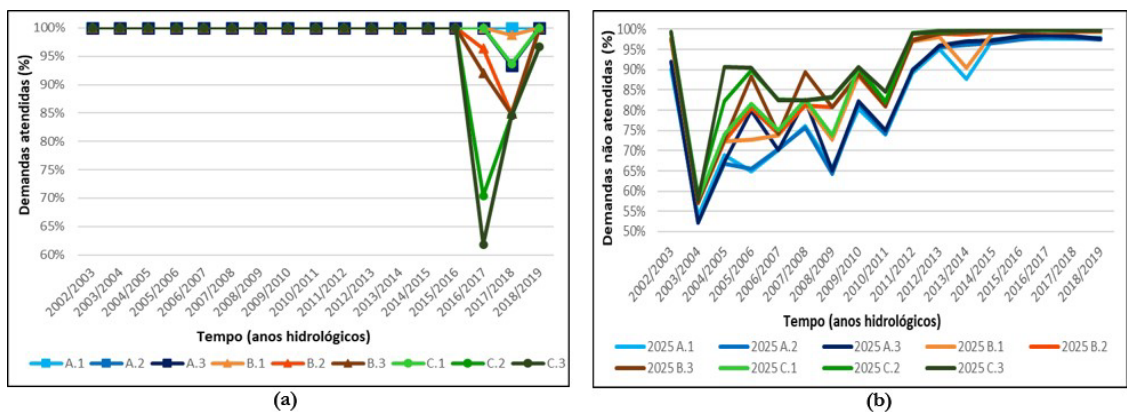


Figura 7 - Resultados das Simulações para projeção 2025. (a) Percentual das demandas atendidas, com exceção do PISF Adicional. (b) Percentual de não atendimento as demandas do PISF Adicional.

As demandas adicionais do PISF (Eixo Norte e Leste) tiveram altas taxas de não atendimento, chegando a aproximadamente 100% de não atendimento na maioria dos cenários simulados a partir do ano hidrológico 2011-2012. No aspecto de risco, essas curvas apresentaram valores de riscos intoleráveis, vinte vezes maior que o 5% tolerável pela ANA (Agência Nacional de Águas, 2013). A partir da simulação dos cenários, percebeu-se que a concentração do não atendimento das demandas esteve entre outubro de 2016 a setembro de 2019, de forma que o crescimento das demandas causou maior pressão no sistema hídrico do São Francisco neste período, que culminou em resultados de maior insegurança hídrica para o sistema. O ano hidrológico 2017/2018 foi o mais impactado com a evolução das demandas no rio São Francisco, uma vez que 2017 foi o ano mais seco de toda a série histórica monitorada do rio São Francisco.

Os cenários que não consideram a implantação das obras do Plano Nacional de Segurança Hídrica apresentaram os menores índices de não atendimento, estando os cenários 2025 A.1 (100%) e 2025 B.1 dentro do risco de 5% adotado pela ANA, com exceção do cenário 2025 C.3, que tem atendimento total de 93,7% e somente os usos prioritários estão dentro da faixa de risco. A sustentabilidade da segurança hídrica deve estar pautada no equilíbrio do atendimento das demandas, onde devem ser considerados os três pilares do desenvolvimento sustentável (econômico, social e ambiental). Os usos consuntivos analisados nesta pesquisa estão associados aos pilares econômicos e sociais, onde os usos prioritários (abastecimento humano e dessedentação animal) tem um apelo humanitário e social, pela manutenção da vida. Enquanto os demais usos estão fortemente conectados com a dimensão econômica.

As maiores taxas de não atendimento foram registradas, nos cenários C, onde há o maior consumo de água, no qual o Plano da Bacia (2016-2025) considera uma projeção maior desenvolvimento econômico. Houve o aumento do não atendimento para três anos nos cenários C.2 e C.3, chegando a aproximadamente 40% de não atendimento no ano 2016/2017.

Quanto aos volumes, observa-se que as curvas do reservatório de Três Marias tiveram o mesmo comportamento até outubro de 2015. A partir de 2015, foi possível verificar que as curvas dos cenários de maior consumo (C.2 e C.3) têm um maior rebaixamento em comparação aos demais cenários e chegam próximas ao volume mínimo operacional no mês mais seco da série, novembro de 2017 (Figura 8).

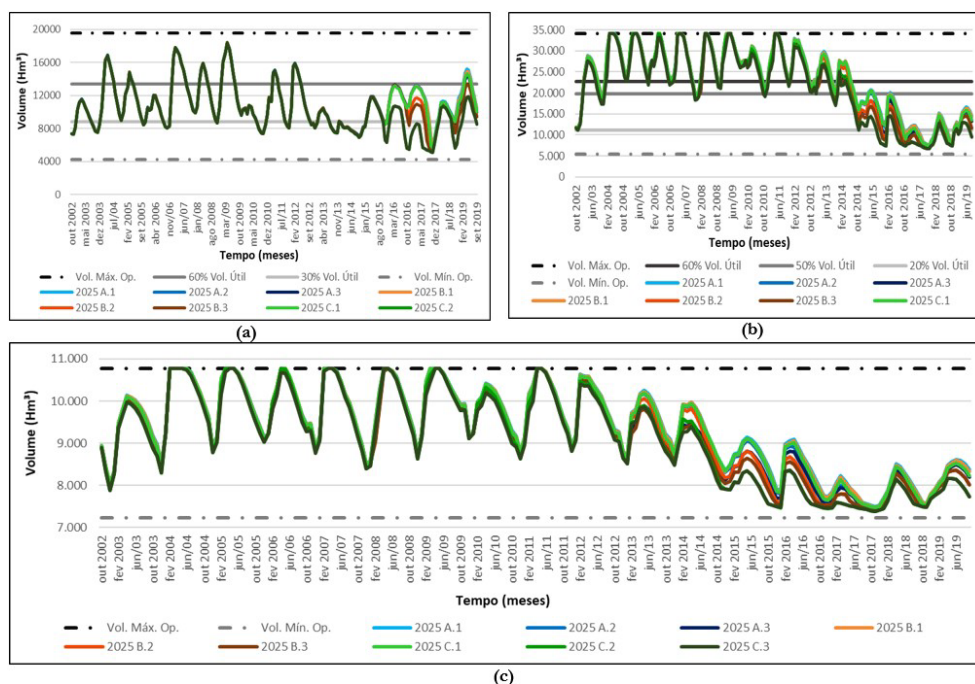


Figura 8 - Volumes dos reservatórios (Hm³) para Simulação das demandas projetadas 2025. (a) Três Marias. (b) Sobradinho. (c) Luiz Gonzaga.

Referente as defluências de Xingó, os pulsos foram praticados nos meses de fevereiro dos anos de 2004 a 2014 para os cenários A.3, B.3 e C.3, porém, no cenário C.3 não houve pulso para os anos de 2008 e 2013 (Figura 8). O aumento das demandas resultou em um impacto significativo nas defluências de Xingó nos meses de setembro, outubro e novembro de 2017, onde foram registradas vazões inferiores a mínima (700 m³/s) estabelecida pela Resolução ANA nº 2.081/2017.

Resultados das simulações com as demandas outorgadas projetadas para 2030

Semelhante às simulações realizadas nas projeções de 2025, para 2030 foram considerados as mesmas simulações alterando apenas as demandas projetadas. Para atendimento as demandas, foi observado que o período de outubro de 2016 a setembro de 2018 registra uma queda no atendimento dos usos consuntivos (Figura 9), de forma que o percentual de atendimentos diminuiu em todos os cenários, com exceção do cenário A.1 (99%), os demais estão acima do percentual de risco de não atendimento maiores que 5%, sendo esse considerado tolerado entre os setores usuários (Agência Nacional de Águas, 2013).

A partir de 2030, foram consideradas as demandas do Canal de Integração do Sertão Piauiense/Eixo Oeste do PISF nos cenários C.2 e C.3 (maior consumo de água), conforme previsto no Plano da Bacia (2016-2025), adotando-se o mesmo critério para o Canal do Sertão Baiano/Eixo do Sul do PISF. Ao considerar estas obras, houve uma queda significativa no atendimento destes cenários, uma vez que o sistema hídrico não as atende. É importante ressaltar, que no período de outubro de 2002 a setembro de 2016, as demais demandas destes dois cenários foram atendidas, com exceção do PISF adicional dos Eixos Norte e Leste. Com o crescimento da demanda entre as projeções de 2025 e 2030, as taxas de não atendimento do PISF adicional Eixo Norte e Leste aumentaram, desta forma, mesmo considerando os anos úmidos do período simulado, o sistema não atendeu plenamente as demandas das transposições destes dois eixos, uma vez que até o momento só foram atendidas as demandas do Eixo Norte e Leste consideradas como usos prioritários entre os anos de 2002 e 2016.

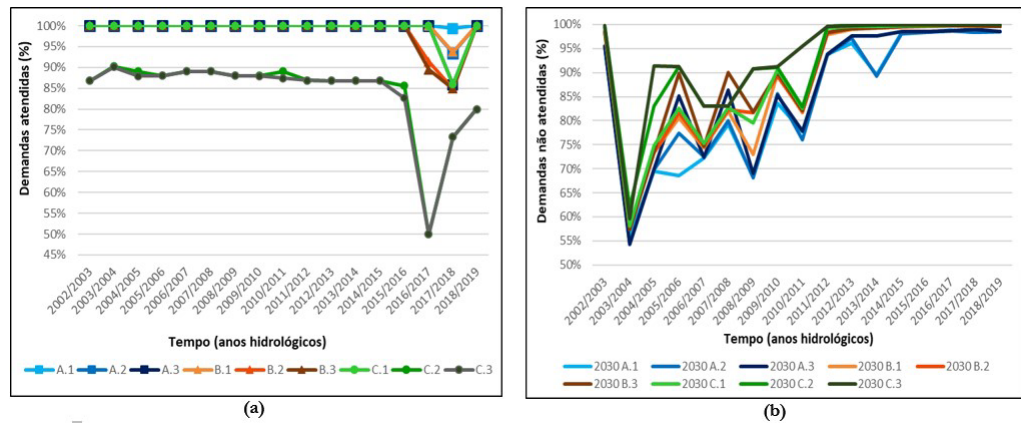


Figura 9 - Resultados das Simulações para projeção 2030. (a) Percentual das demandas atendidas, com exceção do PISF Adicional. (b) Percentual de não atendimento as demandas do PISF Adicional.

Ao considerar as obras do PNSH, nos cenários C.2 e C.3, verificou-se o não atendimento total em quatro anos, sendo que 2015/2016 é o ano de maior pressão no sistema hídrico, onde as demandas chegaram aproximadamente a 50% de não atendimento. O atendimento do pulso de fevereiro de 2014 reduziu o atendimento do ano de 2015/2016, de 85,6% no cenário C.2 para 82,7% no cenário C.3. Referente ao volume do reservatório, tem-se que as curvas dos volumes dos reservatórios de regularização mantiveram o mesmo comportamento do horizonte de demandas para o ano de 2025, a diferença é com o crescimento do consumo de água no horizonte de 2030, houve o rebaixamento dos volumes armazenados (Figura 10). Vale destacar, a variação do volume de Sobradinho entre os cenários sem as obras do PNSH e os cenários com as obras, principalmente nos anos iniciais do período de estiagem por volta de 2012.

Os reservatórios de Sobradinho (Figura 10) e Luiz Gonzaga (Figura 10) seguiram sem muita variação nas acumulações entre os 9 cenários até o início do ano hidrológico de 2011-2012, onde as curvas dos volumes não mais se sobrepõem. Já Três Marias, só apresentou variação nas acumulações entre os cenários simulados a partir do ano hidrológico de 2015-2016. Vale lembrar, que a variação do consumo de água foi entre 7.141.460.540 m³/ano a 10.502.370.502 m³/ano, sem considerar as obras do PNSH, e entre 8.230.801.069 m³/ano a 16.864.758.502 m³/ano considerando as obras que captam água na calha do rio São Francisco, para os cenários de evolução das demandas A (consumo moderado de água), B (consumo tendencial) e C (maior consumo de água).

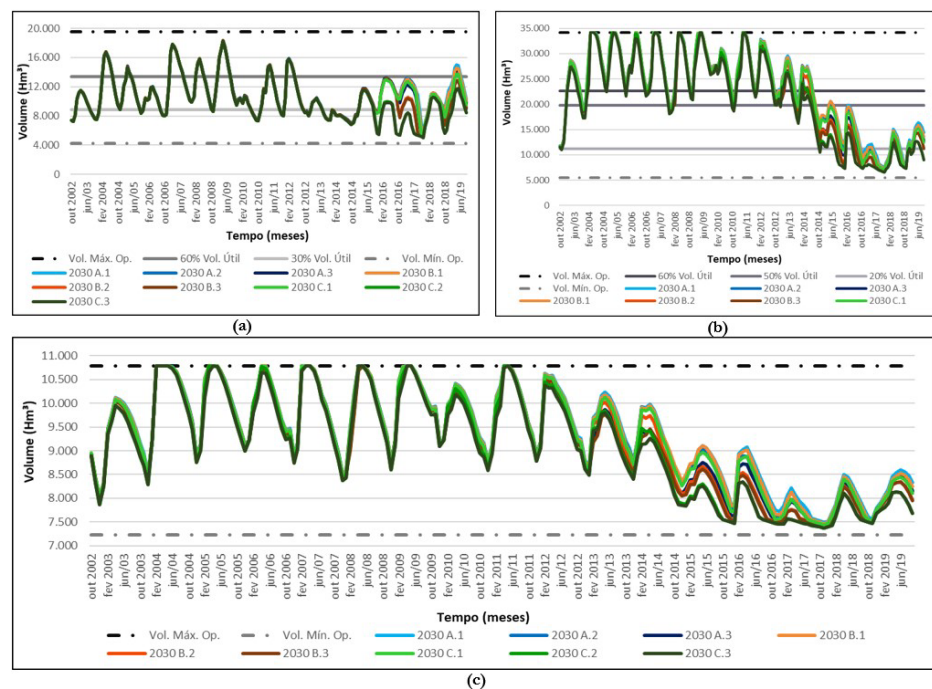


Figura 10 - Volumes dos reservatórios (Hm³) para Simulação dos Cenários projetados 2030. (a) Três Marias. (b) Sobradinho. (c) Luiz Gonzaga.

Para as defluências de Xingó, os resultados apontaram que um novo aumento das demandas projetadas nos cenários simulados tencionou ainda mais o sistema hídrico do São Francisco no período de outubro de 2016 a setembro de 2019, de forma que a vazão praticada no Baixo São Francisco chegou a 109 m³/s nos cenários C.2 e C.3, 133 m³/s no cenário B.3 e 136 m³/s no B.2 no mês de outubro de 2017.

Geração de Energia Hidrelétrica

A partir da simulação dos cenários de evolução das demandas A (consumo moderado de água), B (consumo tendencial) e C (maior consumo de água) e com as três condições aplicadas em cada um dos cenários propostos para os horizontes de 2025 e 2030, foi possível verificar o impacto na geração hidrelétrica no sistema hídrico do rio São Francisco (Tabela 10).

Tabela 10 - Geração de Energia - Cenários de evolução das demandas (1000 MWh).

Horizonte	A.1	A.2	A.3	B.1	B.2	B.3	C.1	C.2	C.3
2025	585.429	577.380	579.508	582.047	565.824	567.538	576.203	542.412	543.061
2030	582.568	574.318	576.890	576.648	560.498	561.921	567.705	532.415	533.767

A energia produzida nos cenários simulados foi inferior a demanda energética requerida pelas usinas do rio São Francisco para o período simulado. Houve uma redução ao longo dos horizontes de 2025 e 2030 simulados em função do crescimento das demandas dos usos consuntivos. A condição da liberação dos pulsos favoreceu a geração de energia elétrica, de forma que os cenários A.3, B.3 e C.3 produziram mais energia que os cenários A.2, B.2 e C.2. As obras do Plano Nacional de Segurança Hídrica implicaram na redução da geração de energia de aproximadamente 1,5% para os cenários A (consumo moderado de água), de 3% para os cenários B (consumo tendencial) e de 7% para os cenários C (maior consumo de água).

A demanda por energia elétrica tende a aumentar nos próximos anos, de acordo com o Plano Nacional de Energia (PNE), que atualmente está em fase de atualização para ampliação do horizonte de 2050 para 2055. No PNE são apresentados vários cenários, dentre os quais estão: Estagnação, Efeitos das Mudanças Climáticas (Redução de Disponibilidade Hídrica) e Potencial Inventariado Total exceto UHEs em áreas de interferência com Unidades de Conservação (UC). O setor elétrico funciona de forma interligada, de forma que a definição da operação das usinas do São Francisco é definida a partir das demandas do SIN.

A diferença entre as escalas do setor elétrico e do setor de recursos hídricos potencializa a alta competitividade já existentes entre os usos consuntivos e a geração de energia descrita por Asfora & Cirilo (2005), as quais já existem em função das atividades utilizarem a água com diferentes níveis de garantia. A baixa disponibilidade hídrica põe em risco não só a segurança energética, mas a segurança alimentar regiões do semiárido devido ao colapso agrícola. Os conflitos entre estes usos serão potencializados ainda mais a médio e longo prazo, uma vez que as projeções climáticas mostram um aumento da área sob condição de estresse hídrico no nordeste brasileiro (Marengo et al., 2012).

Hidrograma Ambiental

A aplicação das regras da Resolução ANA nº 2.081/2017 associadas as projeções da evolução das demandas reduziram as vazões disponíveis no Baixo São Francisco, principalmente nos anos críticos mais críticos do período simulado, a partir de 2016. Através das simulações, foi possível constatar que o sistema hídrico não atendeu as vazões dos hidrogramas ambientais para ano úmido e seco propostos por Medeiros et al. (2013). Basto et al. (2020) ajustou o hidrograma de ano seco proposto por Medeiros et al. (2013) para padrão de vazões de anos muito secos, ocorridos a partir de 2013. Dos 204 meses simulados, 71% a 79% deste foram enquadrados nas condições dos hidrogramas seco, seco ajustado ou em condições inferiores aos hidrogramas propostos. Com isso, o rio São Francisco permanecerá estacionado em condições de períodos secos.

Na Figura 11, é possível verificar através da sobreposição dos hidrogramas supracitados nas defluências de Xingó, que há apenas 1 ano hidrológico (2006-2007) da série em que foram praticadas aproximadamente as vazões do hidrograma de ano úmido proposto por Medeiros et al. (2013). O ano 2011-2012 foi o único ano em que se praticou as vazões do hidrograma de ano seco sem ajuste. Verificou-se que a partir de outubro de 2014 não foram praticadas as vazões de pico do hidrograma ajustado por Basto et al. (2020).

Os cenários de evolução de demandas simulados não ofereceram segurança hídrica ao ecossistema do Baixo São Francisco, uma vez que os resultados encontrados expressam uma condição hídrica que não favorece a vida no ambiente aquático.

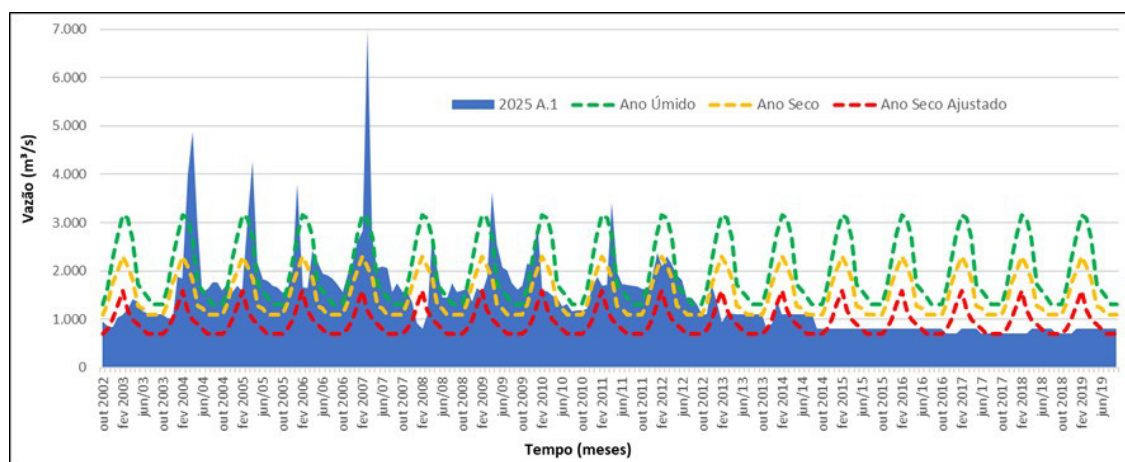


Figura 11 - Defluências de Xingó do Cenário 2025A.1 x Hidrogramas Ambientais (m³/s).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo se propôs a analisar o impacto do crescimento das demandas propostas no Plano da Bacia (2016/2025) e a implementação das obras previstas e potenciais do Plano Nacional de Segurança Hídrica, ao longo do tempo, associados as regras operativas da Resolução ANA nº 2.081/2017 na segurança hídrica do rio São Francisco. Diante dos resultados encontrados, pode-se inferir que:

- As regras da Resolução ANA nº 2.081/2017 não assegura disponibilidade hídrica para o atendimento da evolução das demandas dos usos consuntivos, principalmente nos anos estiagem, onde foram observados índices de não atendimentos de até 50% das demandas hídricas;
- Não há disponibilidade hídrica para atender plenamente as obras do Plano Nacional de Segurança Hídrica que derivam água do rio São Francisco, cujo objetivo é promover o desenvolvimento regional, de forma que as taxas de atendimento chegaram a 59,1% (2025 C.3) e 54,8% (2030 C.3) para as obras de demanda hídrica internas e o não atendimento total para obras de demandas externas de água. Esse aspecto deve ser observado na análise integrada dos empreendimentos elencados no PNSH, conforme previsto no próprio plano;
- Os índices de não atendimento das demandas verificados na simulação dos cenários A, B e C, mostraram que as projeções do cenário C foram as que mais pressionaram o sistema hídrico do São Francisco, de forma que registraram as maiores taxas de não atendimento no período mais seco simulado;
- Os cenários tendenciais (B.1, B.2 e B.3), apesar de serem mais realistas com relação ao crescimento econômico, apresentaram também pressão sobre o sistema hídrico. Com isso, é preciso investir em ações de gerenciamento e governança de forma que seja possível minimizar os efeitos dos conflitos nos períodos mais secos, uma vez que na maioria dos cenários simulados verificou-se o risco de atendimento maior que o risco aceitável de 5% (Agência Nacional de Águas, 2013);
- A evolução das demandas dos usos consuntivos simuladas impactou diretamente a geração de energia e a redução das vazões dos fluxos ecossistêmicos principalmente no período mais crítico entre outubro de 2014 a setembro de 2019, uma vez que as demandas de geração de energia hidrelétrica não foram supridas na maior parte dos cenários e foram observadas nas simulações no Baixo São Francisco vazões inferiores a mínima estabelecida na Resolução ANA nº 2.081/2017;
- A segurança hídrica do atendimento aos usos consuntivos e da geração de energia hidrelétrica é viabilizada pela insegurança do ecossistema, o qual foi penalizado, de forma que foi observada a redução das defluências da UHE Xingó nas simulações dos cenários de evolução da demanda e a ausência de sazonalidade no fluxo, o que impacta diretamente as funções ecossistêmicas, de acordo com Bunn & Arthington (2002).

AGRADECIMENTOS

Este trabalho agradece ao Mestrado em Meio Ambiente, Águas e Saneamento – MAASA da Universidade Federal da Bahia/Brasil por todo apoio técnico e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pelo suporte financiamento das pesquisas.

REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Águas. (2013). *Manual de procedimentos técnicos e administrativos de outorga de direito de uso de recursos hídricos*. Brasília: ANA.
- Agência Nacional de Águas. (2017). Resolução nº 2.081, de 4 de dezembro de 2017. Dispõe sobre as condições para a operação do Sistema Hídrico do Rio São Francisco, que compreende os reservatórios de Três Marias, Sobradinho, Itaparica (Luiz Gonzaga), Moxotó, Paulo Afonso I, II, III, IV e Xingó. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília.
- Agência Nacional de Águas. (2019a). Ofício Circular nº 1/2019/AA-CD-ANA, de 30 de abril de 2019. Comunicado sobre a entrada em vigor da Resolução nº 2.081, de 4 de dezembro de 2017 a partir de 1º de maio de 2019. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília.
- Agência Nacional de Águas. (2019b). Resolução nº 3.082, de 26 de dezembro de 2019. Outorga o Ministério do Desenvolvimento Regional o direito de uso de recursos hídricos do Rio São Francisco, para a execução do Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília.
- Agência Nacional de Águas. (2019c). *Plano Nacional de Segurança Hídrica*. Brasília: ANA.
- Agência Nacional de Águas. (2020a). *Planilha de outorgas*. Recuperado em 2 de maio de 2020, de <https://www.ana.gov.br/ana/pt-br/assuntos/regulacao/principais-servicos/outorgas-emitidas-e-fiscalizacao/outorga/outorgas-emitidas>
- Agência Nacional de Águas. (2020b). *Sala de situação São Francisco*. Recuperado em 7 de maio de 2020, de <https://www.ana.gov.br/ana/pt-br/sala-de-situacao/sao-francisco/sao-francisco-saiba-mais>
- Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. (2020c). *10ª reunião de acompanhamento do Sistema Hídrico do Rio São Francisco em 2020 - 06/10/2020*. Recuperado em 10 de outubro de 2020, de <https://www.youtube.com/watch?v=oiAfAXkFw4U&t=2235s>
- Asfora, M. C., & Cirilo, J. A. (2005). Reservatórios de regularização: alocação de água para usos múltiplos com diferentes garantias. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, 2(2), 27-38.
- Azevedo, L. G. T., & Porto, R. L. L. (2002). Modelos de simulação e de rede de fluxo. In: Porto, R. L. (Org.), *Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos* (2. ed.). Porto Alegre: UFRGS/ABRH.
- Basto, I. D. R. G. (2018). *Estudo das regras de defluência do sistema de reservatórios no rio São Francisco e suas consequências para o atendimento às demandas da irrigação e outros usos da água* (Dissertação de mestrado). Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia. Salvador.
- Basto, I. D. R. G., Fontes, A. S., & Medeiros, Y. D. P. (2020). Effects of an outflow regime adoption of the São Francisco River reservoir system to meet water demands for multiple uses. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 25, e31.
- Braga, B. P. F., & Lotufo, J. G. (2008). Integrated river basin plan in practice: the São Francisco River Basin. *International Journal of Water Resources Development*, 24(1), 37-60.
- Brambilla, M., Fontes, A. S., & Medeiros, Y. D. P. (2017). Cost-benefit analysis of reservoir operation scenarios considering environmental flows for the lower stretch of the São Francisco River (Brazil). *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 22, e34.
- Bunn, S. E., & Arthington, A. H. (2002). Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity. *Environmental Management*, 30(4), 492-507.
- Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. (2016). *Plano de recursos hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco - PBHSF (2016-2025): diagnóstico consolidado da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco*. Alagoas: CBHSF.
- Cook, C., & Bakker, K. (2012). Water security: debating an emerging paradigm. *Global Environmental Change*, 22(1), 94-102.
- Li, X., Zhao, Y., Shi, C., Sha, J., Wang, Z.-L., & Wang, Y. (2015). Application of Water Evaluation and Planning (WEAP) model for water resources management strategy estimation in coastal Binhai New Area, China. *Ocean and Coastal Management*, 106, 97-109.

- Maliehe, M., & Mulungu, D. M. M. (2017). Assessment of water availability for competing uses using SWAT and WEAP in South Phuthiatsana catchment, Lesotho. *Physics and Chemistry of the Earth*, 100, 305-316.
- Marengo, J. A., Chou, S. C., Kay, G., Alves, L. M., Pesquero, J. F., Soares, W. R., Santos, D. C., Lyra, A. A., Sueiro, G., Betts, R., Chagas, D. J., Gomes, J. L., Bustamante, J. F., & Tavares, P. (2012). Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTEC/HadCM3 climate change projections: climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Paraná River basins. *Climate Dynamics*, 38, 1829-1848.
- Medeiros, Y. D. P., Freitas, I. M. P., Stifelman, G. M., Freire, R. R., & O'Keeffe, J. (2013). Social participation in the environmental flow assessment: the São Francisco River case study. *Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais*, 1(1), 122-130.
- Mousavi, S. J., Anzab, N. R., Asl-Rousta, B., & Kim, J. H. (2017). Multi-objective optimization-simulation for reliability-based inter-basin water allocation. *Water Resour Manage*, 3445-3464.
- Ohlsson, L., & Turton, R. (2000). The turning of a screw – social resource scarcity as a bottle-neck in adaptation to water scarcity. Occasional Paper Series, School of Oriental and African Studies Water Study Group, University of London.
- Operador Nacional do Sistema Elétrico. (2004). *Evaporações líquidas nas usinas hidrelétricas*. Rio de Janeiro: ONS.
- Operador Nacional do Sistema Elétrico. (2019a). *Manual de procedimentos da operação: cadastro de informações operacionais hidráulicas da Bacia do rio São Francisco*. Rio de Janeiro: ONS.
- Operador Nacional do Sistema Elétrico. (2019b). *Manual de procedimentos da operação: controle dos reservatórios da região hidrográfica do São Francisco - Bacia do rio São Francisco*. Rio de Janeiro: ONS.
- Operador Nacional do Sistema Elétrico. (2020). *Resultados da operação: histórico da operação*. Recuperado em 14 de abril de 2020, de <http://www.ons.org.br/paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao>
- Pereira, L. S., Cordery, I., & Iacovides, I. (2009). *Coping with water scarcity: addressing the challenges*. Paris: Springer. 382 p.
- Siegmund-Schultze, M., Rodorff, V., Köppel, J., & Sobral, M. C. (2015). Paternalism or participatory governance? Efforts and obstacles in implementing the Brazilian water policy in a large watershed. *Land Use Policy*, 48, 120-130.
- Strzepek, K. M., Major, D. C., Rosenzweig, C., Iglesias, A., Yates, D. N., Holt, A., & Hillel, D. (1999). New methods of modeling water availability for agriculture under climate change: the U.S. Cornbelt. *Journal of the American Water Resources Association*, 35(6), 1639-1655.
- Swain, R. B., & Yang-Wallentin, F. (2020). Achieving sustainable development goals: predicaments and strategies. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 27(2), 96-106.
- Tarlock, A. D., & Wouters, P. (2010). Reframing the water security dialogue. *Journal of Water Law*, 20(2-3), 53-60.
- Varis, O., Keskinen, M., & Kummu, M. (2017). Four dimensions of water security with a case of the indirect role of water in global food security. *Water Security*, 1, 36-45.
- Vasco, A. N., Aguiar Netto, A. O., & Silva, M. G. (2019). The influence of dams on ecohydrological conditions in the São Francisco River Basin, Brazil. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 19(4), 556-565.
- Yates, D., Sieber, J., Purkey, D., & Huber-Lee, A. (2005). WEAP21 – a demand-, priority-, and preference-driven water planning model part 1: model characteristics. *Water International*, 30(4), 487-500.
- Zeitoun, M. (2011). The global web of national water security. *Global Policy*, 2(3), 286-296.

Contribuições dos autores:

Rodrigo Saldanha Xavier da Silva: elaboração de todos os itens do artigo, incluindo resumo, introdução, metodologia, resultados e discussão, conclusão e referências bibliográficas.

Cássia Juliana Fernandes Torres: auxílio na estruturação da metodologia do artigo e discussão dos resultados.

Andrea Sousa Fontes: auxílio na estruturação e revisão do artigo, especialmente nas considerações finais.

Yvonilde Dantas Pinto Medeiros: auxílio na estruturação e revisão do artigo, especialmente nas considerações finais.