

## XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

### **RESERVATÓRIOS E USO DO SOLO NA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO: DESAFIOS À SEGURANÇA HÍDRICA NO SEMIÁRIDO**

*Débora da Silva Morais\*<sup>1</sup>; Caline Cecília Oliveira Leite\*<sup>2</sup>; Glauber da Rocha Medeiros\*<sup>3</sup>; Maria Julia Pedroso\*<sup>4</sup>; Luiza Jardim Machado\*<sup>5</sup>; Igor Luz Gonçalves\*<sup>6</sup>; Marília de Oliveira Felten\*<sup>7</sup>; Heitor de Sousa Pantarotto\*<sup>8</sup>; Celso Oviedo da Silva Lopes\*<sup>9</sup>; Jhonata Soares dos Santos\*<sup>10</sup>; Marcos Gabriel C. Da Silva\*<sup>11</sup>; Tainan Rodrigues Corrêa\*<sup>12</sup>; Dorcey P. M. Boussamba Mughesa\*<sup>13</sup>; Barbara Aiala Silva \*<sup>14</sup> & Eduardo Mario Mendiondo \*<sup>15</sup>*

**Abstract:** The São Francisco River Basin plays a strategic role in supplying water and supporting development in Brazil's semiarid regions. In light of population growth and the intensification of economic activities, this study analyzes the adequacy of the basin's reservoir infrastructure in meeting water demands, considering the evolution of storage capacity, urban expansion, and land use and land cover changes. The methodology is based on the analysis of historical series (1992–2022) using data from MapBiomas, IBGE, and ANA, supported by geoprocessing tools. The basin was regionalized into four physiographic subunits, enabling the identification of distinct patterns of land occupation and water pressure. The results reveal extensive conversion of natural areas into agricultural and pastoral uses, particularly in the Sub-middle São Francisco, where major irrigation schemes and key reservoirs such as Sobradinho, Itaparica, and Xingó are located. A decline in water storage volume per capita has also been observed since the 1990s, indicating a mismatch between infrastructure and increasing demands. The study concludes that the effectiveness of reservoirs is increasingly conditioned by territorial and climatic dynamics, highlighting the need for integrated water resources management policies. The findings reinforce the importance of aligning land use planning with water governance, especially in scenarios of scarcity and climatic vulnerability.

**Resumo:** A bacia hidrográfica do rio São Francisco exerce papel estratégico para o abastecimento e o desenvolvimento de regiões semiáridas do Brasil. Diante do crescimento populacional e da intensificação das atividades econômicas, este trabalho analisa a adequação da infraestrutura de reservatórios ao atendimento das demandas hídricas da bacia, considerando a evolução da capacidade de armazenamento, a expansão urbana e as mudanças no uso e cobertura do solo. A metodologia baseou-se na análise de séries históricas (1992–2022) a partir de dados do MapBiomas, IBGE e ANA, com apoio de técnicas de geoprocessamento. A bacia foi regionalizada em quatro subunidades fisiográficas, permitindo identificar padrões diferenciados de ocupação e pressão sobre os recursos hídricos. Os resultados revelam uma intensa conversão de áreas naturais em usos agropecuários,

<sup>1</sup>) Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Av. Trabalhador São Carlense, 400, Parque Arnold Schmidt, São Carlos – SP, (16) 3373 – 9571, [morais.debora@usp.br](mailto:morais.debora@usp.br)<sup>1</sup>, [calineleit@usp.br](mailto:calineleit@usp.br)<sup>2</sup>, [glaubermedeiros@usp.br](mailto:glaubermedeiros@usp.br)<sup>3</sup>, [mariajulia.pedroso@usp.br](mailto:mariajulia.pedroso@usp.br)<sup>4</sup>, [luizaljm@usp.br](mailto:luizaljm@usp.br)<sup>5</sup>, [igorluz@usp.br](mailto:igorluz@usp.br)<sup>6</sup>, [mariliafelten@usp.br](mailto:mariliafelten@usp.br)<sup>7</sup>, [heitor.pantarotto@usp.br](mailto:heitor.pantarotto@usp.br)<sup>8</sup>, [celso.lopes@usp.br](mailto:celso.lopes@usp.br)<sup>9</sup>, [jhonatasoares@usp.br](mailto:jhonatasoares@usp.br)<sup>10</sup>, [mgabrielcs@usp.br](mailto:mgabrielcs@usp.br)<sup>11</sup>, [tainan@usp.br](mailto:tainan@usp.br)<sup>12</sup>, [dorcey@usp.br](mailto:dorcey@usp.br)<sup>13</sup>, [barbaraaiala91@gmail.com](mailto:barbaraaiala91@gmail.com)<sup>14</sup>, [emm@sc.usp.br](mailto:emm@sc.usp.br)<sup>15</sup>.

sobretudo no Submédio São Francisco, onde se concentram perímetros irrigados e reservatórios estratégicos como Sobradinho, Itaparica e Xingó. Observou-se ainda uma redução do volume de reserva hídrica por habitante desde os anos 1990, evidenciando um descompasso entre a infraestrutura existente e o crescimento das demandas. Conclui-se que a efetividade dos reservatórios está cada vez mais condicionada às dinâmicas territoriais e climáticas, exigindo políticas integradas de gestão dos recursos hídricos. O estudo reforça a necessidade de articulação entre planejamento do uso do solo e governança hídrica, especialmente em contextos de escassez e vulnerabilidade climática.

**Palavras-Chave** – Reservatórios; Uso e cobertura do solo; Segurança hídrica.

## INTRODUÇÃO

A disponibilidade hídrica é um elemento estratégico para o desenvolvimento socioeconômico de qualquer localidade (Paiva e Scahettini, 2021). Em regiões semiáridas, onde a escassez de chuvas e a elevada evaporação limitam a oferta natural de água, estruturas que possibilitam o armazenamento hídrico tornam-se fundamentais para garantir a sustentabilidade das atividades humanas. A implementação de medidas estruturais, como reservatórios, representa uma das principais alternativas para enfrentar a variabilidade climática e assegurar a segurança hídrica de populações vulneráveis (Mady *et al.*, 2020).

No Brasil, o semiárido concentra-se majoritariamente na região Nordeste, ocupando cerca de 70% de seu território (Jardim *et al.*, 2022). O bioma dessa região, denominado Caatinga, caracteriza-se por sua vegetação adaptada à seca e por baixos índices pluviométricos anuais, geralmente inferiores a 800 mm (Mendes *et al.*, 2023). Historicamente, essa região foi negligenciada pelas políticas públicas e marcada por um ciclo de estiagens recorrentes, que impactaram severamente a economia local e as condições de vida da população (Pereira *et al.*, 2025).

Nesse contexto, o rio São Francisco assume papel estratégico. Por ser o maior curso de água perene a atravessar a Caatinga, ele representa uma fonte vital de recursos hídricos para diversos usos, como abastecimento humano, irrigação, geração de energia e navegação (Maneta *et al.*, 2020). A bacia hidrográfica do rio São Francisco abrange partes de sete unidades da federação: Minas Gerais, Goiás, Distrito Federal, Bahia, Pernambuco, Sergipe e Alagoas. A bacia também abrange áreas de outros biomas além da Caatinga, sendo eles o Cerrado e a Mata Atlântica. Sua importância vai além da oferta hídrica, a bacia é eixo estruturante para o desenvolvimento regional e integração territorial (Empinotti *et al.*, 2018).

Com o passar das décadas, a ocupação da bacia e o crescimento das atividades produtivas trouxeram à tona a necessidade de uma gestão eficiente dos recursos hídricos, sobretudo diante do aumento das demandas (Maneta *et al.*, 2020). A construção de reservatórios, e consequente aumento da capacidade de armazenamento da bacia, se deu principalmente para a produção de eletricidade (de Carvalho Barreto *et al.*, 2020) e atualmente exercem também a função de regulação de vazões para garantir disponibilidade hídrica em períodos de escassez (De Jong *et al.*, 2018). No entanto, ainda é necessário investigar se a infraestrutura de reservatórios da bacia do rio São Francisco tem sido eficaz, com base em séries históricas de vazões, na regulação hídrica e no atendimento das demandas em períodos de escassez prolongada.

Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo geral analisar a adequação da infraestrutura de reservatórios da bacia do rio São Francisco ao atendimento das demandas hídricas, considerando a evolução da capacidade de armazenamento, o crescimento populacional e as mudanças nos padrões

de uso e ocupação do solo. Para isso, serão levantados e sistematizados dados históricos sobre a capacidade de armazenamento dos principais reservatórios da bacia do rio São Francisco, relacionando-os com o crescimento populacional e as demandas de abastecimento de água. Além disso, serão avaliadas as mudanças nos padrões de uso e ocupação do solo nas áreas atendidas e suas implicações nas demandas por recursos hídricos.

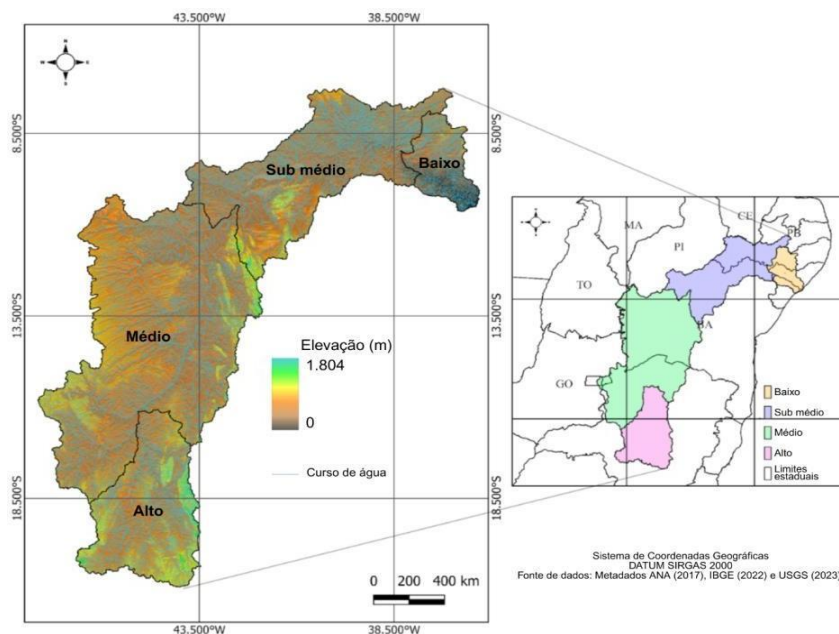
## **METODOLOGIA**

Este estudo adota uma abordagem descritiva e analítica, fundamentada em dados geoespaciais e séries temporais de uso e cobertura do solo, com o objetivo de avaliar a eficiência dos reservatórios da bacia do rio São Francisco diante das pressões antrópicas e hidrológicas recentes. A metodologia foi estruturada em três etapas principais: (i) delimitação e caracterização espacial da bacia; (ii) análise temporal do uso e ocupação do solo; e (iii) avaliação qualitativa da relação entre alterações antrópicas e o funcionamento da infraestrutura hídrica.

### **Delimitação e regionalização da bacia**

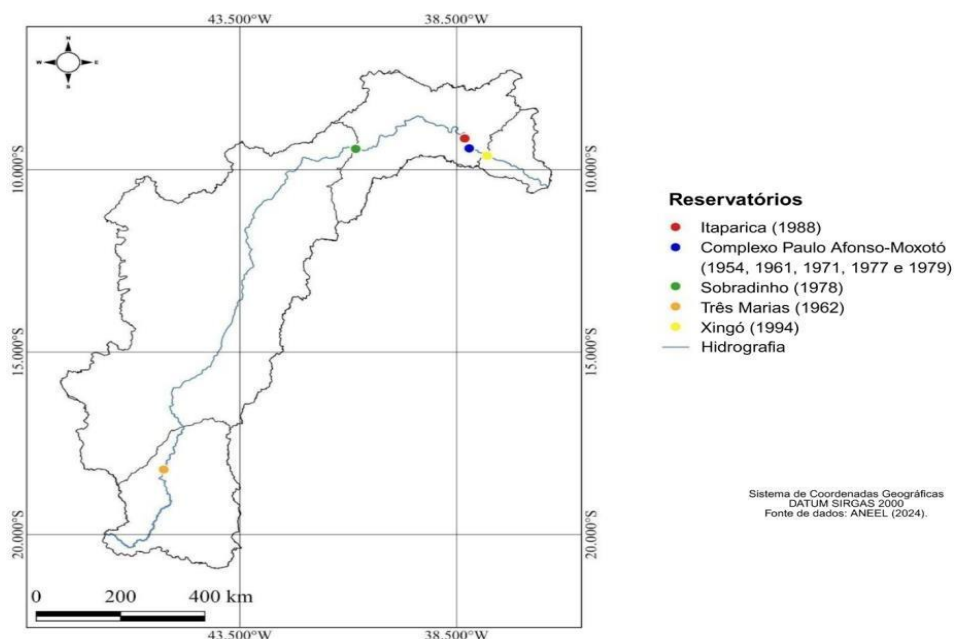
A Bacia do Rio São Francisco (Figura 1) possui uma área de aproximadamente 640.000 km<sup>2</sup> e estende-se por sete unidades federativas: Minas Gerais, Bahia, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Goiás e o Distrito Federal. O trecho principal possui cerca de 2.700 km, percorrendo da nascente principal localizada na Serra da Canastra (MG) até sua foz no Oceano Atlântico, entre Alagoas e Sergipe. A bacia foi delimitada com base nos metadados da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2017), é composta por quatro unidades fisiográficas: Alto, Médio, Submédio e Baixo São Francisco, apresentando variações significativas no regime hidrológico e na morfologia fluvial. Esta divisão permitiu regionalizar as análises e reconhecer padrões regionais diferenciados. O rio apresenta um regime predominantemente pluvial, com grande variabilidade sazonal, o que influencia diretamente sua vazão e dinâmica sedimentar.

Figura 1 – Bacia do Rio São Francisco



O trecho superior, no Alto São Francisco, tem regiões de relevo mais acidentado e clima úmido, com predominância de rios encaixados e com maior energia fluvial. Já o trecho médio (Médio e Submédio), é mais amplo e com planícies aluviais, favorecendo a formação de meandros e a instalação de grandes reservatórios, como o de Sobradinho. Por fim, o trecho inferior (Baixo São Francisco) é caracterizado por vales profundos e cânions, com destaque para as quedas d'água utilizadas em usinas hidrelétricas, como Paulo Afonso e Xingó (Figura 2).

Figura 2 – Reservatórios no curso principal do Rio São Francisco



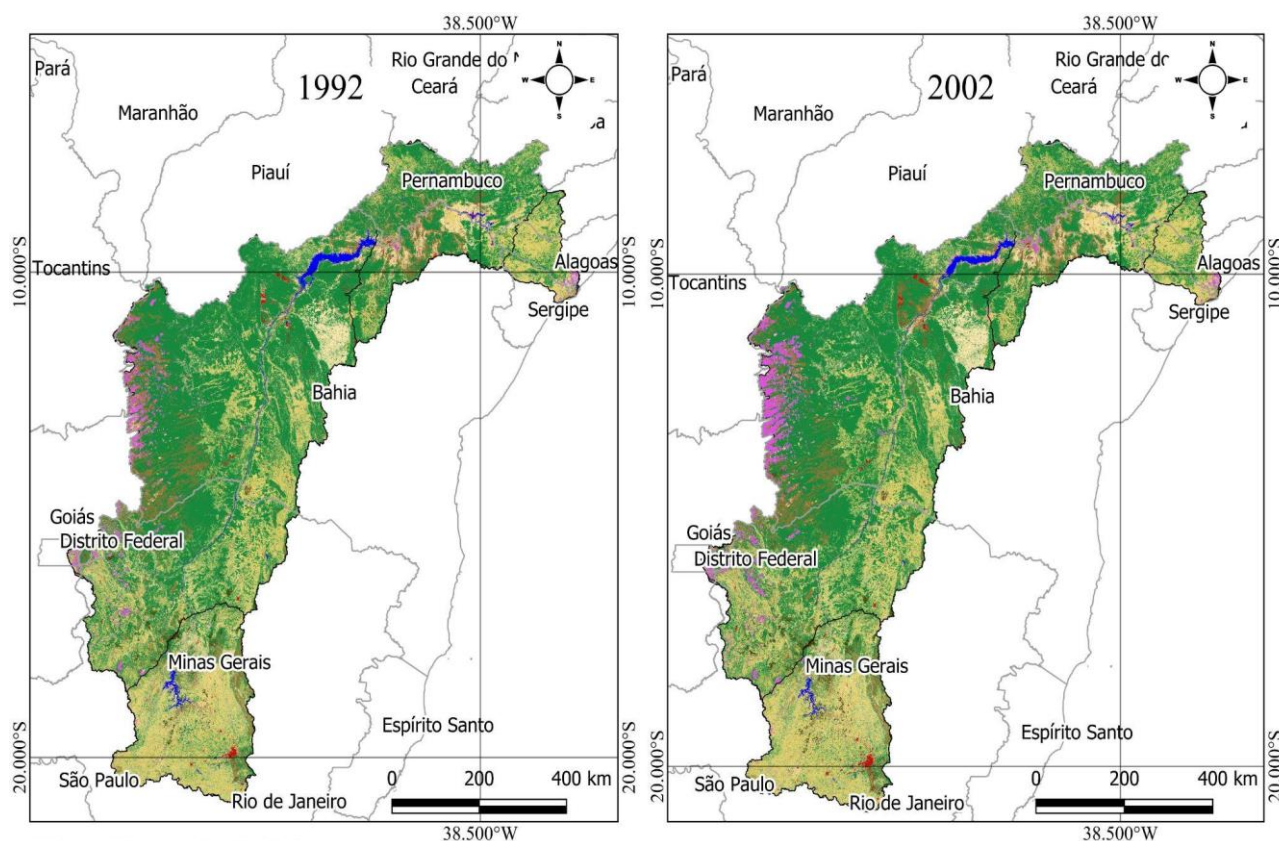


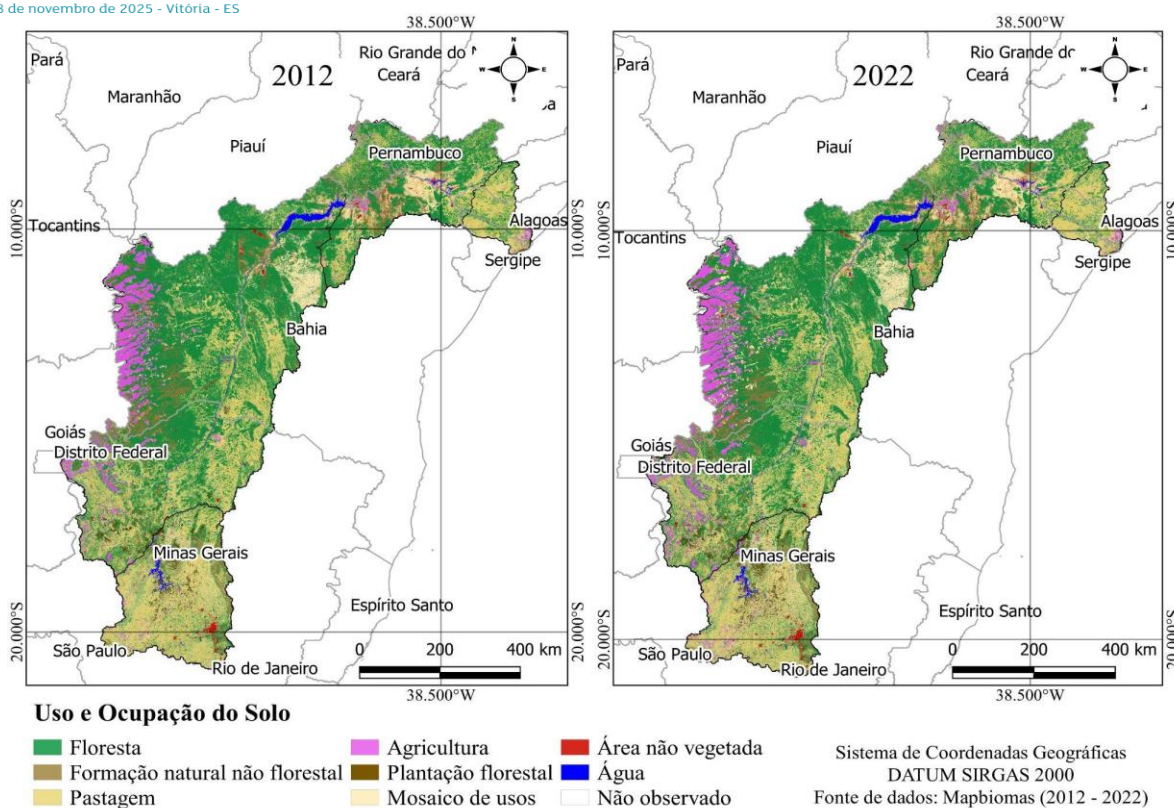
### Análise do uso e cobertura do solo

As análises buscaram identificar tendências de substituição de coberturas naturais por atividades antrópicas, com ênfase nas regiões onde há maior presença de agricultura irrigada e pastagens extensivas.

Para a observação da dinâmica de uso e cobertura do solo, foram utilizados dados do Projeto MapBiomas - Coleção 8 (MAPBIOMAS, 2022), referentes aos anos de 1992, 2002, 2012 e 2022. Esses dados foram processados em um ambiente SIG, usando o software QGIS, permitindo a espacialização e a quantificação das mudanças entre as seguintes classes: floresta, formações naturais não florestais, pastagens, agricultura, mosaico de usos, áreas não vegetadas e corpos d'água (Figura 3).

Figura 3 – Alterações no uso e ocupação do solo na bacia





## Análise qualitativa da eficiência da infraestrutura de reservatórios

Com base na sobreposição dos dados de uso e ocupação do solo e da rede hídrica regulada, foi realizada uma análise qualitativa da eficiência da infraestrutura de reservatórios frente às pressões antrópicas observadas. Consideraram-se aspectos como o posicionamento dos reservatórios nas sub-bacias, a expansão agrícola nas regiões de influência direta dos açudes, e as transformações ambientais que potencialmente afetam a regularização hídrica, sobretudo em contextos de escassez e variabilidade climática.

Esta abordagem permitiu discutir o papel da infraestrutura de armazenamento não apenas como regulador físico de vazões, mas como elemento dependente da dinâmica territorial e da gestão integrada do uso do solo na bacia.

## RESULTADOS

A análise das transformações no uso e ocupação da terra, com base em dados do MapBiomas (1992-2022), revela importantes alterações antrópicas na bacia (Figura 3). Em 1992, predominava a cobertura florestal e formações naturais não florestais, especialmente nas regiões do Alto e Médio São Francisco. Contudo, a partir dos anos 2000, observa-se uma intensificação da conversão dessas áreas em pastagens e agricultura, principalmente na porção ocidental da bacia (Médio do São Francisco) e na faixa entre o Submédio e o Baixo São Francisco.

Entre 1992 e 2022, destaca-se a expansão significativa da agricultura irrigada e de sequeiro, representada pela cor magenta, sobretudo no Submédio São Francisco - região que abriga importantes perímetros irrigados e áreas de fruticultura voltadas à exportação. A intensificação do uso agrícola

nessas regiões coincide com a instalação de infraestrutura hídrica de grande porte, como os reservatórios de Sobradinho (1978), Itaparica (1988) e Xingó (1994), conforme indicado na Figura 2. Este processo reflete a dependência da bacia de estruturas de armazenamento para garantir o abastecimento em regiões de alta demanda hídrica, em especial no contexto do semiárido nordestino.

Apesar do avanço na construção de reservatórios até meados do século XX, a pressão populacional crescente e a intensificação das atividades antrópicas (especialmente o uso agrícola intensivo) geraram um desequilíbrio entre oferta e demanda hídrica, conforme demonstrado na Figura 4. A redução do volume de reservação per capita a partir dos anos 1990 é indicativa de potencial comprometimento da segurança hídrica na bacia, especialmente diante de eventos extremos como secas prolongadas.

Figura 4a – Aumento populacional na Bacia do São Francisco

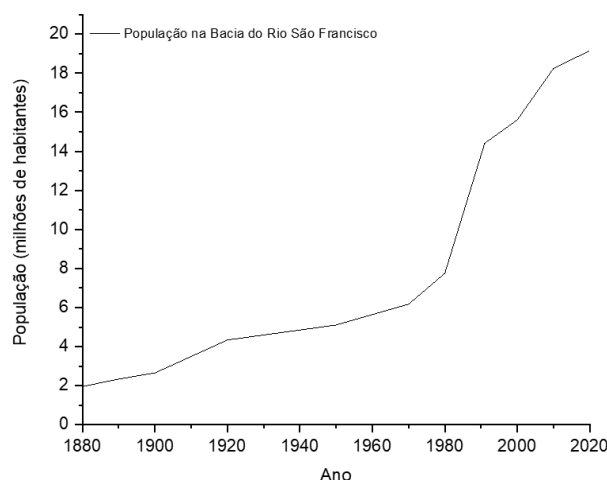


Figura 4b – Volume de reservação ao longo dos anos

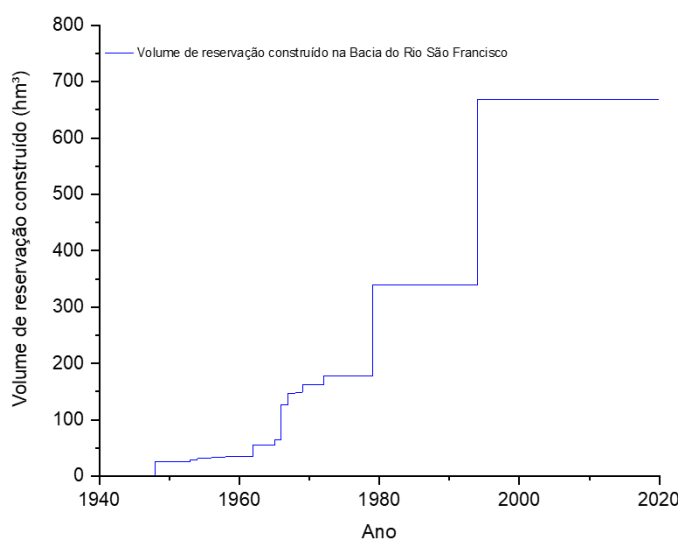
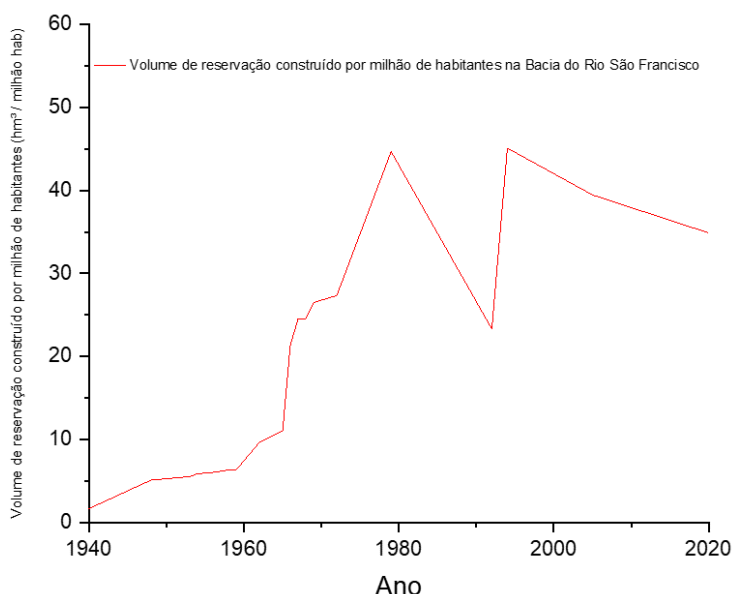


Figura 4c – Volume de reservação construído per capita



Em 2018, o volume total de vazão outorgada na bacia do rio São Francisco foi de aproximadamente 6.290.493 L/s. A irrigação representou o principal uso da água, correspondendo a 73,4% do total, seguida pelo abastecimento público (12,4%) e pela indústria (6,3%). Além disso, observou-se que a maior parte da água outorgada (92,2%) é proveniente de captação superficial, com apenas 7,8% sendo oriunda de fontes subterrâneas, com poços. Esses dados evidenciam a forte dependência da bacia São Francisco da reservação e captação direta em corpos hídricos superficiais para a manutenção das atividades econômicas e abastecimento humano.

## DISCUSSÃO

A conversão de formações naturais (florestais e não florestais) em pastagens e áreas agrícolas, especialmente a partir dos anos 2000, evidencia um processo de antropização acelerada na bacia do São Francisco. Essa transformação territorial ocorre de forma espacialmente desigual, sendo mais intensa nas regiões do Médio e Submédio São Francisco, onde se concentra a maior parte da infraestrutura hídrica e dos sistemas de irrigação (Dionízio *et al.*, 2020). Esse padrão sugere uma relação causal entre a disponibilidade hídrica artificial, viabilizada por grandes reservatórios, e a expansão da agricultura irrigada, implicando pressões crescentes sobre os recursos hídricos da bacia.

A construção dos reservatórios de Sobradinho (1978), Itaparica (1988) e Xingó (1994) desempenhou papel estratégico ao permitir o desenvolvimento socioeconômico em áreas com déficit hídrico natural, especialmente no contexto do semiárido nordestino. No entanto, essa dependência de estruturas de armazenamento acarreta vulnerabilidades sistêmicas, sobretudo em face da redução da precipitação e da recarga hídrica em cenários de variabilidade climática acentuada e de mudanças climáticas (De Jong *et al.*, 2018). Esse contexto levanta dilemas relevantes entre segurança hídrica e segurança alimentar, considerando que o setor agrícola é o principal consumidor de água no Brasil, representando cerca de 70% da demanda total (ANA, 2020).

A redução do volume de reservação per capita observada desde os anos 1990 constitui um



indicador sintético da pressão crescente sobre os recursos hídricos, resultante do aumento populacional, da intensificação das demandas antrópicas e da maior frequência de secas prolongadas (Costa *et al.*, 2021). Esse dado pode ser interpretado como um sinal de alerta para a sustentabilidade hídrica da bacia, sobretudo diante das projeções climáticas que indicam redução de até 30% na precipitação e aumento de até 4 °C na temperatura média no semiárido brasileiro até meados do século XXI (IPCC, 2022).

A análise dos dados de outorga evidencia a forte dependência da bacia do São Francisco da captação superficial, o que reforça o papel estratégico dos reservatórios na garantia da oferta hídrica. A predominância do uso para irrigação (mais de 70% da demanda total) também corrobora a influência direta da expansão agrícola sobre os recursos hídricos da bacia (ANA, 2019). Quando comparadas às regiões que apresentam maior crescimento de áreas agrícolas irrigadas nas últimas décadas, observa-se uma correlação entre o aumento da demanda hídrica e as alterações no uso e ocupação do solo, especialmente no Submédio São Francisco. A baixa representatividade da captação subterrânea pode indicar uma subutilização desse potencial ou restrições geológicas e operacionais, além de reforçar a vulnerabilidade da bacia em cenários de estiagem prolongada.

Nesse cenário, a intensificação do uso agrícola, especialmente de caráter empresarial, aliada à diminuição da reservação per capita, amplia o risco de conflitos pelo uso da água, em especial entre grandes empreendimentos e usuários difusos, como agricultores familiares e sistemas de abastecimento urbano (Silva *et al.*, 2021). Tais tensões reforçam a necessidade de políticas públicas de gestão integrada e participativa da água, que conciliem o uso racional dos recursos hídricos, a conservação da vegetação nativa remanescente e o ordenamento do território.

## CONCLUSÕES

Os resultados evidenciam que a Bacia do São Francisco passou por profundas transformações antrópicas nas últimas décadas, impulsionadas principalmente pela expansão da agricultura irrigada e pela instalação de infraestrutura hídrica de grande porte. Essa dinâmica foi particularmente intensa nas regiões do Médio e Submédio São Francisco, onde a disponibilidade hídrica artificial viabilizou atividades produtivas em áreas naturalmente deficitárias em água.

Contudo, a crescente dependência de reservatórios, aliada à intensificação do uso da terra e ao aumento das demandas hídricas, tem provocado um desequilíbrio entre oferta e demanda, como demonstrado pela redução do volume de reservação per capita desde os anos 1990. Esse indicador revela um cenário de crescente vulnerabilidade hídrica, agravado pela maior frequência e intensidade de secas, associadas à variabilidade e às projeções climáticas futuras.

Nesse contexto, os dilemas entre segurança hídrica e segurança alimentar tornam-se centrais, sobretudo diante da predominância do setor agrícola na demanda por água. A intensificação do uso, especialmente por empreendimentos irrigados de grande escala, tende a acirrar conflitos pelo uso da água, em especial com agricultores familiares e sistemas urbanos de abastecimento.

Diante desse cenário, torna-se urgente a implementação de políticas públicas de gestão integrada dos recursos hídricos, que considerem não apenas a regulação do uso da água, mas também o ordenamento do território e a preservação da vegetação nativa. A adaptação da bacia às mudanças climáticas exige uma abordagem preventiva, participativa e baseada em evidências, com foco na sustentabilidade dos usos múltiplos da água e na equidade no acesso a esse recurso essencial.

## REFERÊNCIAS

- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Metadados espaciais das bacias hidrográficas brasileiras. Brasília: ANA, 2017.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Conjuntura dos Recursos Hídricos. Brasília, ANA, 2020.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Sistema Nacional de

Informações sobre Recursos Hídricos – SNIRH. Brasília: ANA, 2023.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Outorga de direito de uso de recursos hídricos: conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2019: encarte temático. Brasília: ANA, 2019. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br>. Acesso em: 5 ago. 2025.

DE CARVALHO BARRETO, Ikaro Daniel *et al.* Complexity analyses of São Francisco river streamflow: influence of dams and reservoirs. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 25, n. 10, p. 05020036, 2020.

DE JONG, Pieter *et al.* Hydroelectric production from Brazil's São Francisco River could cease due to climate change and inter-annual variability. *Science of the Total Environment*, v. 634, p. 1540-1553, 2018.

DIONIZIO, Emily Ane *et al.* Carbon stocks and dynamics of different land uses on the Cerrado agricultural frontier. *PLoS One*, v. 15, n. 11, p. e0241637, 2020.

EMPINOTTI, Vanessa Lucena; GONTIJO, Wilde Cardoso; DE OLIVEIRA, Vanessa Elias. Federalism, water, and (de) centralization in Brazil: The case of the São Francisco River water diversion. *Regional Environmental Change*, v. 18, p. 1655-1666, 2018.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Demográfico 2022: resultados preliminares. Rio de Janeiro: IBGE, 2022.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/chapter/chapter-12/>. Acesso em: 2 jun. 2025.

JARDIM, Alexandre Maniçoba da Rosa Ferraz *et al.* Using remote sensing to quantify the joint effects of climate and land use/land cover changes on the caatinga biome of northeast Brazilian. *Remote Sensing*, v. 14, n. 8, p. 1911, 2022.

MADY, Bassem *et al.* Distribution of small seasonal reservoirs in semi-arid regions and associated evaporative losses. *Environmental Research Communications*, v. 2, n. 6, p. 061002, 2020.

MANETA, Marco P. *et al.* Water demand and flows in the São Francisco River Basin (Brazil) with increased irrigation. *Agricultural Water Management*, v. 96, n. 8, p. 1191-1200, 2009.

MAPBIOMAS. Coleção 8 da Série Anual de Mapas de Uso e Cobertura da Terra do Brasil, 1985–2022. São Paulo: MapBiomass, 2022.

MENDES, Keila R. *et al.* Interannual Variability of Energy and CO<sub>2</sub> Exchanges in a Remnant Area of the Caatinga Biome under Extreme Rainfall Conditions. *Sustainability*, v. 15, n. 13, p. 10085, 2023.

PAIVA, Bárbara P.; SCHETTINI, Carlos AF. Circulation and transport processes in a tidally forced salt-wedge estuary: The São Francisco river estuary, Northeast Brazil. *Regional Studies in Marine Science*, v. 41, p. 101602, 2021.

PEREIRA, Bruno Silva *et al.* Hydrological heritage: A historical exploration of human–water dynamics in northeast Brazil. *Hydrological Sciences Journal*, n. just-accepted, 2025.

SILVA, Andréa Leme da *et al.* Water appropriation on the agricultural frontier in western Bahia and its contribution to streamflow reduction: revisiting the debate in the Brazilian Cerrado. *Water*, v. 13, n. 8, p. 1054, 2021.

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. Earth Explorer. Washington: USGS, 2023.