

AVALIAÇÃO NA FOZ DE BACIAS HIDROGRÁFICAS COM BARRAGENS: O RISCO DA OCUPAÇÃO DE REGIÕES COSTEIRAS EM FUNÇÃO DOS EFEITOS ANTRÓPICOS NA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO

Msc. Kelvin Sojo Villalba¹

Dr. Antonio Puentes Torres²

PhD. Dr. Mario Jorge de Souza Gonçalves³

Miguel Gabriel Moraes Santos⁴

INTRODUÇÃO

A construção de barragens tem sido amplamente debatida na literatura acadêmica em virtude de seus benefícios, como a geração de energia hidrelétrica e o controle de enchentes, bem como pelos impactos adversos no ambiente físico-natural e nas comunidades locais (BARTABURU, 2022). As barragens promovem alterações significativas na dinâmica hidrológica e sedimentar das bacias hidrográficas, afetando a conectividade hidrológica essencial até a foz dos rios. A evolução morfodinâmica das áreas de foz é um processo complexo que envolve a interação de diversos fatores naturais e antrópicos, incluindo a dinâmica das marés, a sedimentação, a erosão e a influência de estruturas artificiais (SOUZA; FERNANDES, 2019).

Estudos indicam que em sistemas altamente regulados, como o rio Colorado nos Estados Unidos, as barragens reduziram drasticamente a quantidade de sedimentos que chegam às planícies de inundação, resultando em erosão significativa das margens e perda de habitats ripários (GRAF, 2006). De forma semelhante, no rio Yangtzé, na China, a construção da barragem de Três Gargantas alterou profundamente a dinâmica fluvial, reduzindo a sedimentação a jusante e aumentando os riscos de erosão costeira (WANG et al., 2011).

No Brasil, há uma extensa rede de reservatórios, como açudes e barragens, que permite o armazenamento de grandes quantidades de água para abastecimento humano, uso agropecuário e geração de energia hidrelétrica. As pesquisas realizadas na bacia do rio São

¹ Doutorado em Geografia da Universidade Federal da Bahia, kelvillalba@gmail.com

² Engenheiro Florestal, Professor do Curso em Geografia, Universidade Federal da Bahia, puentes@ufba.br

³ Geólogo, Especialista em Meio Ambiente e Recursos Hídricos no Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos, mariotaboca@gmail.com

⁴ Mestrado em Agronomia, Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Universidade Federal Rural da Amazônia, miguel.gms31@gmail.com

Francisco destacam os impactos ambientais causados por esses empreendimentos, como a redução na biodiversidade aquática, o assoreamento dos corpos d'água e a modificação dos regimes de cheias, que afetam diretamente as comunidades ribeirinhas e a agricultura de subsistência (BARBOSA; FILIZOLA; NASCIMENTO, 2020).

As barragens construídas ao longo do Rio São Francisco, com a finalidade principal de geração de energia, impactaram a região de sua foz devido à significativa retenção de sedimentos coesivos e não coesivos dentro dos reservatórios. A redução do aporte continental de sedimentos e modificações na hidrodinâmica fluvial e estuarina resultaram em erosões nas margens e na costa da região do baixo São Francisco. A pesquisa de Bandeira et al. (2013) mostra uma coleção de imagens de satélites obtidas desde a década de 1980, mapas antigos e fotos aéreas, e descreve as mudanças morfológicas na foz do Rio São Francisco causadas pela retenção de sedimentos devido às diversas barragens construídas na sua bacia hidrográfica desde 1955. Além disso, apresentam-se resultados semiquantitativos da regressão da linha de costa e a variação temporal de seu alinhamento, considerando a interface entre a vegetação e a areia como referência do processo erosivo (BANDEIRA et al., 2013).

O trabalho de Diniz et al. (2019) mostra que, nos últimos anos, a planície fluviomarinha tem apresentado mudanças relacionadas ao processo de erosão marinha e atividades de carcinicultura, resultantes de alterações na dinâmica do Rio São Francisco. A diminuição da vazão e do aporte sedimentar no curso do rio, atribuída à construção de barragens como a de Xingó, tem intensificado o processo de erosão na margem direita da sua foz. Como resultado, observa-se a erosão das praias, recuo da linha de costa e deposição de grandes volumes de sedimentos praias arenosos na planície fluviomarinha, provocando o soterramento e morte do mangue.

Essas modificações no regime hídrico, no comportamento de descarga e no transporte de carga sólida do São Francisco vêm contribuindo para um forte desequilíbrio, ocasionando impactos ambientais negativos, principalmente no baixo curso do rio até a foz, que apresenta maior vulnerabilidade ambiental. A operação desses reservatórios contribui para o desenvolvimento da região, mas também gera um grande passivo ambiental e socioeconômico, causando impactos negativos no ecossistema fluvial e estuarino e na vida da população ribeirinha.

O objetivo deste estudo é analisar a influência da construção de barragens nas áreas da foz do rio São Francisco, com enfoque nas consequências para as zonas costeiras. Esta análise

oferece uma perspectiva compreensiva sobre os efeitos ambientais e socioeconômicos dessas estruturas.

METODOLOGIA

Para a elaboração dos mapas de: a) clima, b) uso e cobertura do solo, e c) geologia e litologia da bacia do rio São Francisco, foram utilizados dados espaciais organizados em diferentes formatos. Para a classificação climática de Köppen, empregaram-se dados em formato vetorial referentes ao Brasil, conforme Alvares et al. (2013). Os dados de cobertura e uso do solo, em formato raster, foram obtidos por meio do MapBiomas (2023), com suporte de imagens dos satélites Landsat. Por fim, a composição do mapa de geologia e geomorfologia baseou-se em dados vetoriais disponibilizados pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB) (2021).

Após a obtenção dos arquivos, realizou-se o recorte espacial correspondente à delimitação da bacia hidrográfica, seguido do tratamento e análise dos dados para a confecção dos mapas. Todas as etapas foram realizadas com o auxílio do software Quantum GIS v. 3.34.6 Prizren, garantindo precisão e qualidade na representação cartográfica.

Os dados utilizados neste estudo foram obtidos a partir de estações fluviométricas disponíveis no portal HydroWeb, vinculado ao Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) da Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico (ANA). As informações coletadas incluem séries históricas de cotas, vazões e curvas de descarga, as quais foram essenciais para a realização das análises propostas.

A análise foi conduzida com base na metodologia de Hidrologia Avançada Experimental (HAE), conforme proposta por Gonçalves (2020). Esta técnica fundamenta-se na utilização de modelos matemáticos para descrever o comportamento da vazão fluvial em função de variáveis hidrológicas, como cota e vazão. Os modelos empregados foram ajustados a partir de dados observados de vazão e de outras variáveis pertinentes, o que permitiu uma análise precisa do comportamento hidrológico antes e após a construção das barragens.

A dimensão espacial deste estudo compreendeu a barragem de Xingó, situada na bacia hidrográfica do rio São Francisco. Para a análise, foram utilizados dados de monitoramento periódico obtidos na estação fluviométrica localizada a jusante dessa barragem e imagens de satélite da foz do Rio São Francisco.

REFERENCIAL TEÓRICO

A paisagem, enquanto categoria central da geografia, é fundamental para a compreensão das dinâmicas espaciais e das interações entre os elementos naturais e culturais. Bertrand (1968) define a paisagem como um complexo de elementos físicos, biológicos e culturais que coexistem no espaço. Essa definição é ampliada por Santos (1996), que enfatiza a dimensão temporal da paisagem, sugerindo que ela é o resultado das transformações históricas e sociais ao longo do tempo. Assim, a paisagem deve ser vista como uma construção dinâmica, reflexo das interações contínuas entre sociedade e natureza.

Para Corrêa (1999), a paisagem representa um produto da interação entre processos naturais e ações humanas, configurando-se como um objeto de análise que integra aspectos físicos e sociais. Nessa perspectiva, Cavalcanti (2002) destaca a relevância da paisagem na análise dos impactos das barragens sobre as bacias hidrográficas, uma vez que a construção dessas estruturas modifica tanto o fluxo dos rios quanto as condições ecológicas e sociais das áreas afetadas. Silva (2010) reforça que as paisagens são moldadas pelas intervenções humanas, como a construção de barragens, que alteram a geomorfologia fluvial e criam novas dinâmicas ecológicas.

As bacias hidrográficas, enquanto unidades naturais de planejamento e gestão, são formadas por rios e seus afluentes, sendo influenciadas pela geologia e topografia locais. Tricart (1977) argumenta que as bacias hidrográficas permitem a observação integrada dos processos geomorfológicos e hidrológicos. Strahler (1957) conceitua a bacia hidrográfica como uma área geográfica definida pela topografia, onde toda a água precipitada converge para um único ponto de saída. Essa configuração física é determinante para a dinâmica hidrológica e a gestão dos recursos hídricos.

A construção de barragens constitui uma interferência significativa nas bacias hidrográficas, alterando o fluxo natural dos rios e impactando a paisagem fluvial. Christofolletti (1999) observa que essas construções influenciam diretamente os processos de erosão e assoreamento.

A erosão, de acordo com Tricart e Kilian (1959), refere-se ao desgaste e transporte de partículas do solo e rocha pela ação da água, vento ou gelo, sendo um processo que pode ser exacerbado pela intervenção humana, como a construção de barragens. O assoreamento, por

sua vez, ocorre quando os sedimentos transportados pelo rio se depositam em seu leito, elevando-o e reduzindo a capacidade de fluxo, conforme discutido por Scheidegger (1976). Esses processos geomorfológicos são amplamente afetados pela retenção de sedimentos em barragens, o que pode resultar em mudanças significativas na morfologia fluvial e na qualidade ambiental das bacias.

Além disso, as barragens afetam a conectividade hidrológica, conceito central discutido por Ab'Saber (2003), que ressalta sua importância para a manutenção dos ecossistemas fluviais. A conectividade hidrológica, segundo Lexartza-Artza e Wainwright (2009), envolve a interligação dos componentes hidrológicos, essencial para a troca de água entre diferentes partes do sistema fluvial, como rios e oceanos.

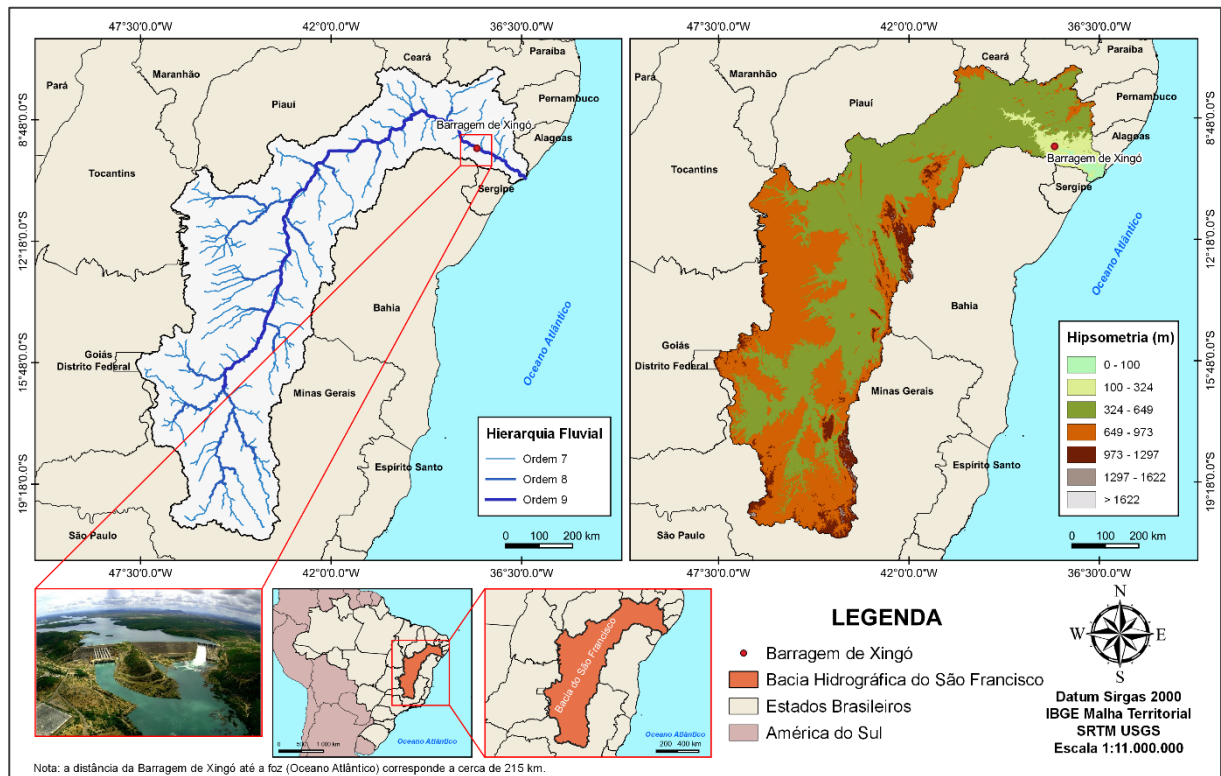
A fragmentação da conectividade hidrológica, frequentemente causada pela construção de barragens, pode levar à fragmentação de habitats e à perda de biodiversidade, conforme discutido por Brierley e Fryirs (2005). Esses autores destacam que a interrupção do fluxo natural dos rios pode comprometer tanto os elementos bióticos quanto os serviços ecossistêmicos vitais para as comunidades humanas. Rossetti (2008) aponta que as barragens não apenas interrompem a conectividade, mas também provocam mudanças na dinâmica sedimentar, na qualidade da água e na distribuição de matéria orgânica, acarretando processos como erosão, assoreamento e salinização.

Dessa forma, é evidente que a compreensão da paisagem, das bacias hidrográficas, da construção de barragens e de seus impactos ambientais está interligada de maneira complexa. As barragens, ao modificar a paisagem das bacias hidrográficas, exercem influências significativas na conectividade hidrológica e nos ecossistemas, exigindo uma análise aprofundada dos desafios relacionados à gestão dos recursos hídricos e à preservação dos ambientes aquáticos.

CARACTERIZAÇÃO GEOAMBIENTAL

A bacia hidrográfica do rio São Francisco, com aproximadamente 640.000 km², abrange sete estados brasileiros: Minas Gerais, Bahia, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Goiás e o Distrito Federal. O rio nasce na Serra da Canastra (MG) e percorre cerca de 2.863 km até desaguar no Oceano Atlântico, entre Sergipe e Alagoas. A bacia está inserida na Região Hidrográfica do Atlântico Leste, como apresentado na figura 1, que destaca sua localização geográfica (BRASIL, 2021).

Figura 1: Mapa de Localização geográfica, hierarquização fluvial e hipsometria bacia rio São Francisco.

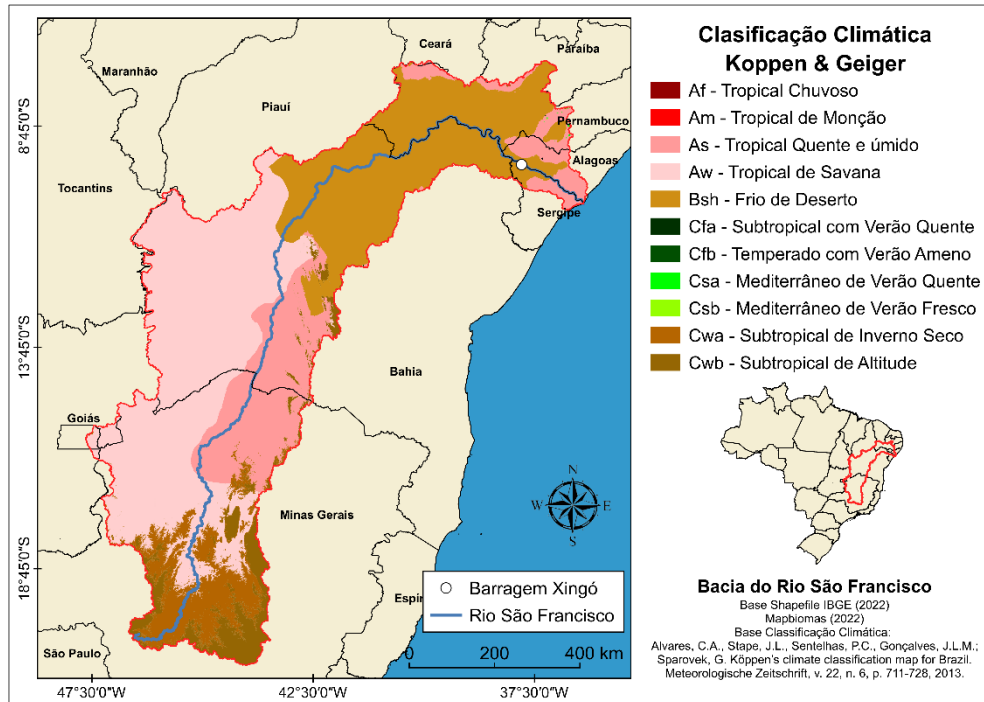


Fonte: IBGE, 2020. Produzido pelos autores.

A bacia possui um formato alongado no sentido sul-norte. A hipsometria da bacia varia entre 0 e 1.622 metros, representando a transição entre áreas planas próximas à foz e os planaltos elevados na região das nascentes. Essa variação altimétrica influencia diretamente a hierarquização fluvial da bacia, onde os rios são classificados em ordens de 7 a 9, refletindo a complexidade da rede hidrográfica. Essas relações estão evidenciadas na figura 1, que apresenta a hipsometria e a hierarquização fluvial da bacia (IBAMA, 2021).

Segundo a classificação climática de Köppen e Geiger, a bacia é caracterizada por climas tropicais (Af, Am, Aw) e subtropicais (Cfa, Cwa, Cwb), com influência de clima de monção, savana e áreas semiáridas. Essas variações climáticas impactam diretamente a disponibilidade hídrica e as atividades humanas, como apresentado na figura 2, que ilustra os climas predominantes da região (IBAMA, 2021).

Figura 2: Mapa de Classificação climática Bacia Hidrográfica do São Francisco.

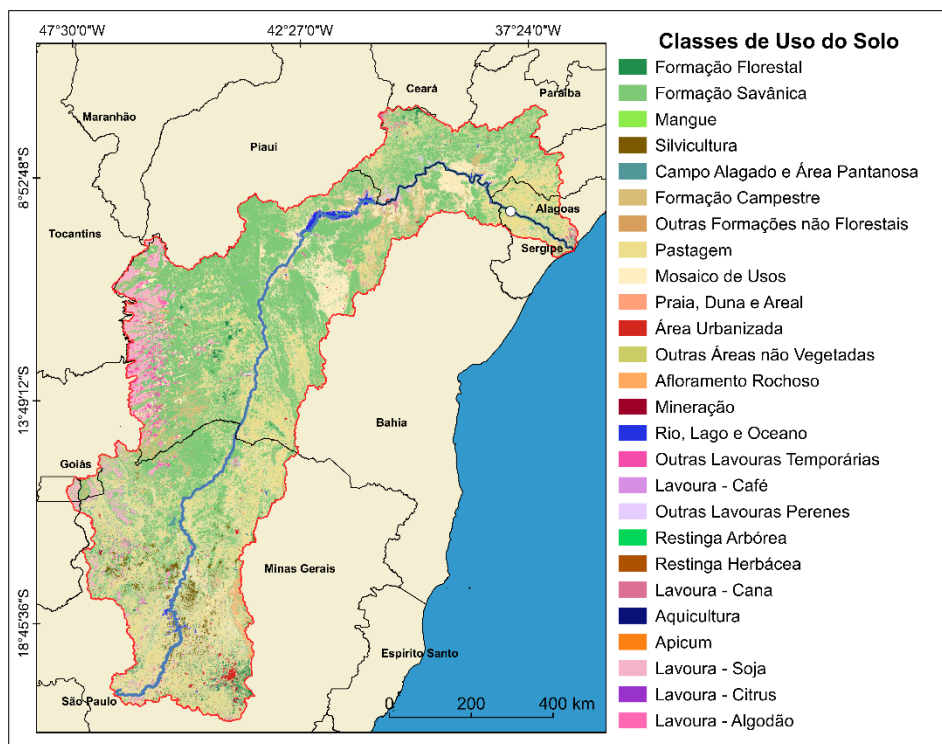


Fonte: IBGE, 2022. Produzido pelos autores.

A cobertura vegetal é composta por biomas como Caatinga, Cerrado e fragmentos de Mata Atlântica. O uso do solo concentra-se em atividades agrícolas (55%), vegetação nativa (28%) e pastagens (12%), além de áreas urbanas e corpos d'água. Essas características estão representadas na figura 3, que mostra a cobertura vegetal e os usos do solo (UTFPR, 2021).

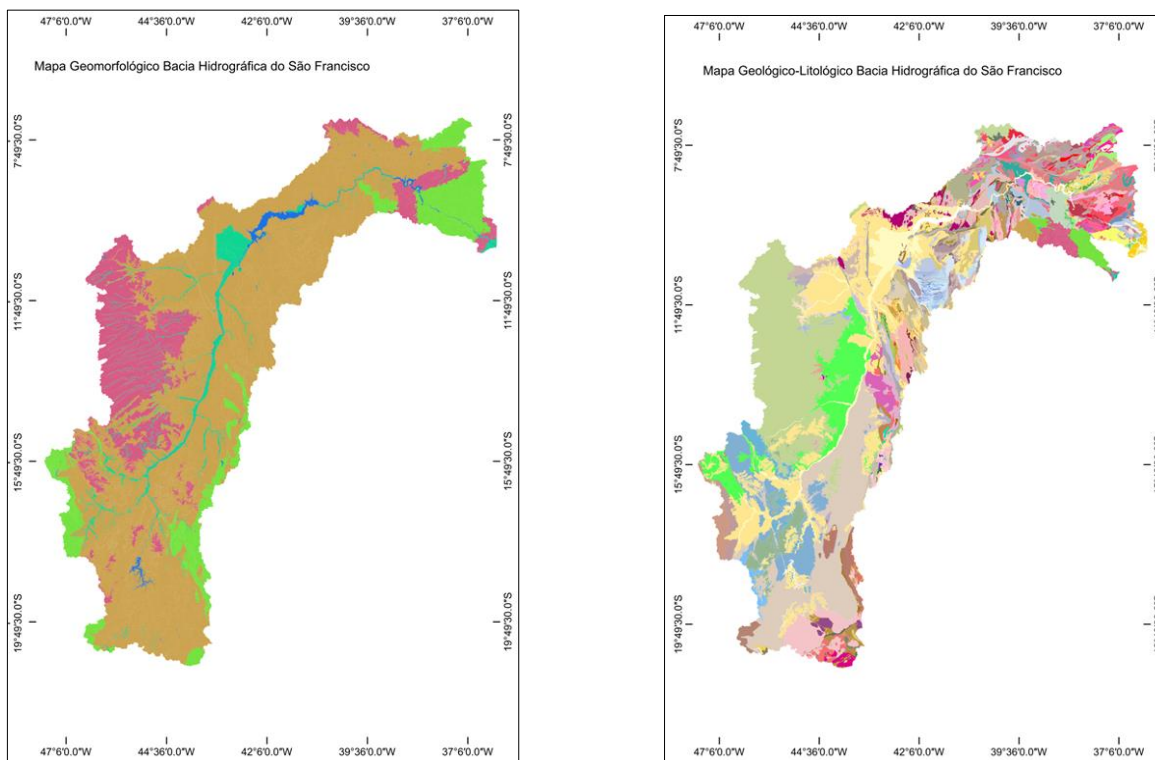
Em termos geomorfológicos, a bacia apresenta relevos variados: planaltos e vales no setor superior, áreas mais dissecadas no intermediário e relevos planos no inferior. Essa diversidade é influenciada pela geologia local, que combina formações sedimentares e cristalinas, onde falhas e fraturas geológicas condicionam a morfologia fluvial. Tais aspectos são evidenciados na figura 4 e 5, que destaca as formações geomorfológicas e geológicas da bacia (LIBRARY, 2021).

Figura 3: Mapa Cobertura e classes de uso do solo Bacia Hidrográfica do São Francisco.



Fonte: IBGE, 2022. Produzido pelos autores.

Figura 4 e 5: Mapa Geomorfológico e Geológico-Litológico Bacia Hidrográfica do São Francisco.

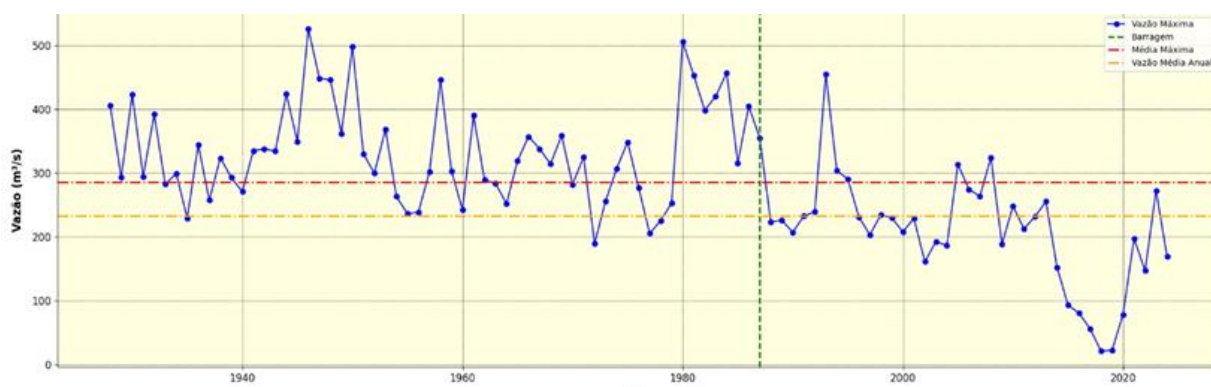


Fonte: IBGE, 2022. Produzido pelos autores.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise das vazões máxima, média máxima e média anual na Estação 49370000 do Rio São Francisco, localizada no município de Pão de Açúcar, a jusante da barragem de Xingó, no período de 1927 a 2023, revela padrões hidrológicos distintos que refletem a influência da regulação artificial imposta pela barragem. A figura 6 demonstra uma notável variabilidade nas vazões máximas ao longo das décadas, com picos significativos antes da construção da barragem, alcançando valores próximos ou superiores a 500 m³/s.

Figura 6: Gráfico Vazão Máxima, Média Máxima e Média anual na Estação 49370000 Município Pão de Açúcar do Rio São Francisco para o período de 1927 a 2023



Fonte: ANA, 2023. Produção própria dos autores.

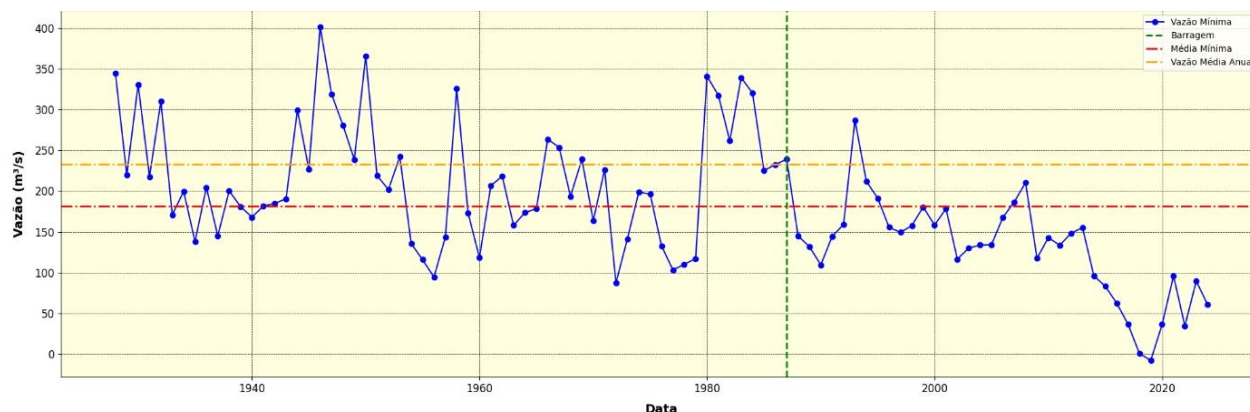
A média máxima das vazões permanece em torno de 300 m³/s, enquanto a vazão média anual situa-se ligeiramente acima de 200 m³/s. No entanto, a partir do final da década de 1980, período correspondente ao início da construção da barragem de Xingó, observa-se uma redução considerável na amplitude dos picos de vazão máxima. Este comportamento sugere que a barragem desempenhou um papel crucial na atenuação dos eventos de vazão máxima, provavelmente devido ao controle do fluxo hídrico a montante, resultando em uma menor variabilidade interanual nas vazões.

Essa modificação no regime de vazões pode ter implicações significativas para a dinâmica fluvial e para os ecossistemas aquáticos a jusante, uma vez que a redução dos picos de vazão pode afetar a deposição de sedimentos e a conectividade hidrológica, alterando o equilíbrio dos processos geomorfológicos e ecológicos na região.

A figura 7 apresenta a variação das vazões mínima, média mínima e média anual na Estação 49370000 do Rio São Francisco, situada no município de Pão de Açúcar, durante o

período de 1927 a 2023. Este gráfico destaca a evolução das vazões mínimas, particularmente antes e depois da construção da barragem de Xingó.

Figura 7: Gráfico Vazão Mínima, Média Mínima e Média anual na Estação 49370000 Município Pão de Açúcar do Rio São Francisco para o período de 1927 a 2023



Fonte: ANA, 2023. Produção própria dos autores.

Ao longo das décadas anteriores à construção da barragem, observa-se uma significativa variabilidade nas vazões mínimas, com valores oscilando consideravelmente. Durante esse período, as vazões mínimas chegaram a atingir picos superiores a $300 \text{ m}^3/\text{s}$, enquanto a média mínima das vazões situava-se em torno de $200 \text{ m}^3/\text{s}$. A média anual das vazões, por sua vez, se mantinha ligeiramente acima de $200 \text{ m}^3/\text{s}$.

Entretanto, a partir do final da década de 1980, que marca o início da construção da barragem de Xingó, nota-se uma tendência de redução nas vazões mínimas. Após a construção da barragem, há uma clara diminuição na variabilidade das vazões mínimas, com uma queda acentuada observada nas últimas duas décadas, onde os valores mínimos registrados estão significativamente abaixo dos $200 \text{ m}^3/\text{s}$, alcançando até valores próximos de $50 \text{ m}^3/\text{s}$.

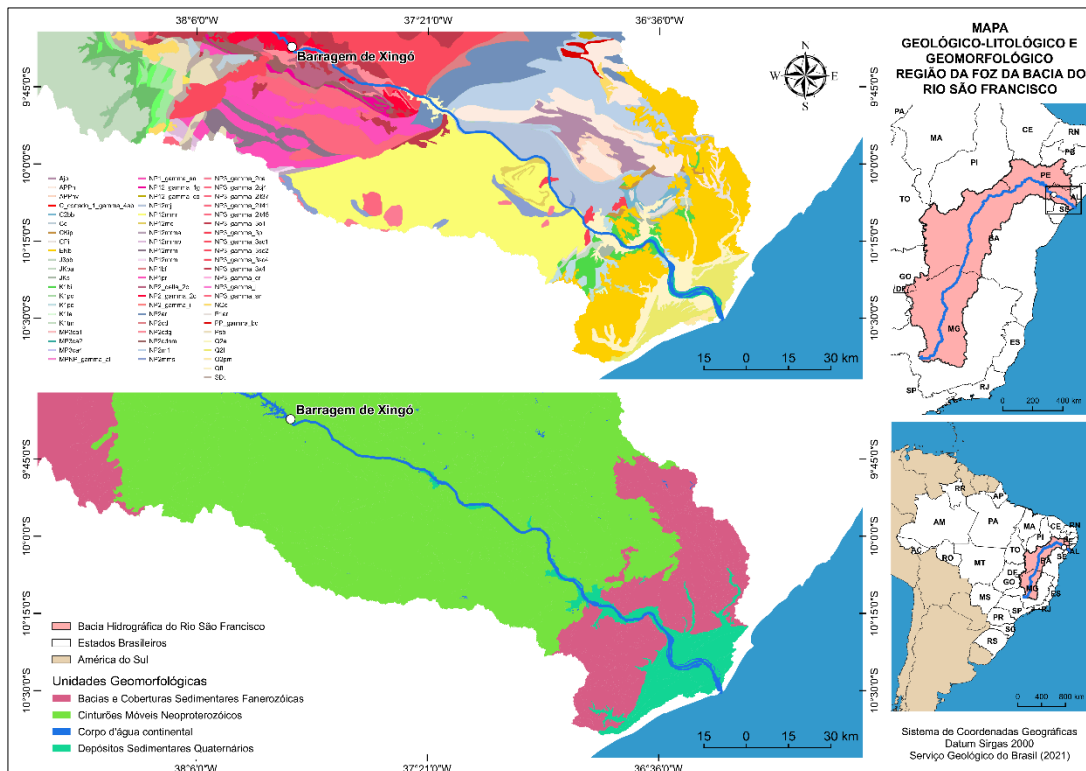
Essa tendência de queda nas vazões mínimas sugere que a operação da barragem tem exercido um impacto considerável na regulação do fluxo de água, resultando em vazões mínimas mais controladas, mas potencialmente prejudiciais ao ecossistema a jusante.

Além disso, essa redução das vazões mínimas pode agravar problemas de assoreamento, salinização e diminuição da capacidade de diluição de poluentes, tornando a gestão dos recursos hídricos ainda mais desafiadora em períodos de seca prolongada. Esses resultados reforçam a necessidade de um gerenciamento cuidadoso das operações da barragem para mitigar os impactos ambientais a jusante.

A Usina Hidrelétrica de Xingó desempenha um papel crucial na regulação do fluxo de água e na geração de energia para a região. Contudo, sua construção trouxe diversos impactos socioambientais, alterando significativamente a dinâmica do ecossistema local, com modificações nos ciclos de cheia e vazante do rio. Na foz do rio São Francisco, essas mudanças afetam processos como o transporte de sedimentos e a morfodinâmica costeira, contribuindo para fenômenos como erosão e assoreamento.

Os mapas geológico-litológico e geomorfológico da região da foz do rio São Francisco evidenciam a complexidade dos processos naturais que influenciam a dinâmica sedimentar. A geologia da área é composta predominantemente por depósitos sedimentares quaternários, cintururas móveis neoproterozoicas e coberturas sedimentares fanerozoicas, como apresentado no mapa geológico da figura 8. Essas formações determinam a vulnerabilidade da região a processos erosivos, especialmente em áreas de depósitos quaternários, mais suscetíveis à mobilização pela ação hídrica.

Figura 8: Mapa Geológico-Litológico e Geomorfológico Bacia Hidrográfica do São Francisco



Fonte: IBGE, 2022. Produzido pelos autores.

Do ponto de vista geomorfológico, conforme ilustrado no mapa geomorfológico da figura 8, a região é caracterizada pela presença de corpos d'água continentais, bacias sedimentares e áreas costeiras marcadas por interações entre o fluxo fluvial e as dinâmicas marinhas. Essas

características geomorfológicas podem amplificar a erosão costeira e o assoreamento na foz, especialmente devido à redução do aporte de sedimentos provocada pelas barragens a montante. A retenção de sedimentos pela barragem de Xingó limita a reposição de material transportado até a foz, reduzindo a estabilidade geomorfológica da área e intensificando a ação do mar sobre os depósitos costeiros.

Conforme demonstrado pelas imagens comparativas da foz do Rio São Francisco entre 2000 e 2023 na figura 9, observa-se que os processos de erosão costeira são acentuados por fatores como a elevação do nível do mar, tempestades e a interferência antropogênica, como as barragens. Assim, as características geológicas e geomorfológicas locais, aliadas às alterações nos ciclos sedimentares, desempenham um papel determinante na vulnerabilidade da região aos impactos ambientais observados.

Figura 9: Impacto das Barragens na Foz do Rio São Francisco entre 2000 e 2023.



Fonte: Google Earth, Landsat.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise das vazões máximas e mínimas na Estação 49370000 do Rio São Francisco ao longo do período de 1927 a 2023 evidencia o impacto significativo da construção da barragem de Xingó na hidrodinâmica do rio. A Usina Hidrelétrica de Xingó desempenha um papel crucial na regulação do fluxo de água e na geração de energia para a região. No entanto, a barragem trouxe diversos impactos socioambientais, que incluem a alteração substancial no regime de fluxo do rio e a modificação dos ciclos de cheia e vazante. As tendências de redução nas vazões, levantam preocupações sobre os efeitos a longo prazo e pode levar ao agravamento de problemas como a salinização, erosão e assoreamento na região costeira.

Os resultados destacam a importância do monitoramento contínuo dos impactos hidrológicos das barragens e a necessidade de uma gestão adaptativa dos recursos hídricos para mitigar efeitos adversos, apoiando a adaptação das comunidades locais e a conservação dos ecossistemas fluviais na foz do rio São Francisco.

REFERÊNCIAS

- AB'SABER, A. N. Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003.
- BERTRAND, G. Paysage et Géographie Physique Globale. Paris: Gauthier-Villars, 1968.
- BRIERLEY, G. J.; FRYIRS, K. A. Geomorphology and River Management: Applications of the River Styles Framework. Oxford: Blackwell Publishing, 2005.
- CALLISTO, M. Ecologia de Rios. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2003.
- CAVALCANTI, L. A. Paisagens Brasileiras: Teoria e Prática na Análise Geográfica. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2002.
- CHRISTOFOLETTI, A. Geomorfologia: Teorias e Modelos. São Paulo: Editora Edgar Blücher, 1999.
- CORRÊA, R. L. Geografia: Teoria e Método. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999.
- GONÇALVES, A. B. Hidrologia Avançada Experimental: Modelagem Matemática Aplicada ao Estudo de Vazões. São Paulo: Editora Acadêmica, 2020.
- LEXARTZA-ARTZA, I.; WAINWRIGHT, J. Hydrological Connectivity: Linking Concepts with Practical Implications. *Catena*, v. 79, n. 2, p. 119-127, 2009.
- ROSSETTI, D. F. Sedimentação e Evolução de Paisagens Fluviais na Amazônia. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 2008.
- SANTOS, M. A Natureza do Espaço: Técnica e Tempo, Razão e Emoção. São Paulo: Hucitec, 1996.
- SILVA, R. T. Paisagem, Memória e Transformação: Perspectivas Geográficas Contemporâneas. São Paulo: Annablume, 2010.
- STRAHLER, A. N. Quantitative Geomorphology of Drainage Basins and Channel Networks. New York: American Geophysical Union, 1957.
- TRICART, J.; KILIAN, G. Ecodinâmica. Rio de Janeiro: IBGE, 1977.