

VARIABILIDADE CLIMÁTICA E RESPOSTA DA VEGETAÇÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO (2000-2024) UTILIZANDO SENSORIAMENTO REMOTO

Climate Variability and Vegetation Response in the São Francisco River Basin (2000–2024) using Remote Sensing

Mariana Santos Freitas

Doutoranda em Geografia Física, Universidade de São Paulo

Orcid: <https://orcid.org/0009-0006-9748-2510>

freitasms@usp.br

Gabriel Pereira

Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de São João del-Rei

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-2093-9942>

pereira@ufsj.edu.br

Contribuição ao VI Simpósio Interdisciplinar de Pós-Graduação e Pesquisa (VI SINPE)

RESUMO

A Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (BHSF) é um sistema socioecológico de vital importância para o Brasil, enfrentando crescentes pressões da variabilidade climática. Este estudo analisou as tendências de precipitação, temperatura da superfície e vigor da vegetação (NDVI) na BHSF durante o período de 2000 a 2024. A metodologia empregou a plataforma Google Earth Engine para processar dados de satélite dos produtos CHIRPS (precipitação) e MODIS (temperatura e NDVI), aplicando filtros de qualidade (QA) para garantir a acurácia dos dados. A análise da série temporal e a geração de gráficos foram realizadas em ambiente Python com as bibliotecas Pandas e Matplotlib. Os resultados indicam uma acentuada variabilidade interanual na precipitação, com a ocorrência de secas severas (ex: 2012-2017) e um mínimo histórico em 2023 (629.1 mm). Observou-se uma clara tendência de aquecimento, com os cinco anos mais quentes da série concentrados na última década. O NDVI demonstrou forte correlação com a precipitação, com o menor índice de vigor vegetativo (0.490) registrado em 2017, no auge da seca. Conclui-se que a bacia está sob estresse climático intensificado, reforçando a necessidade de estratégias de gestão e adaptação baseadas em monitoramento contínuo.

Palavras-chave: Séries Temporais, Estresse Hídrico, Semiárido Brasileiro, MODIS.

ABSTRACT

The São Francisco River Basin (SFRB) is a socio-ecological system of vital importance to Brazil, facing increasing pressure from climate variability. This study analyzed the trends in precipitation, land surface temperature, and vegetation vigor (NDVI) in the SFRB from 2000 to 2024. The methodology involved using the Google Earth Engine platform to process satellite data from CHIRPS (precipitation) and MODIS (temperature and NDVI) products, applying Quality Assurance (QA) filters to ensure data accuracy. Time-series analysis and graph generation were performed in a Python environment using the Pandas and Matplotlib libraries. The results indicate a marked inter-annual variability in precipitation, with the occurrence of severe droughts (e.g., 2012-2017) and a historical

minimum in 2023 (629.1 mm). A clear warming trend was observed, with the five warmest years of the series concentrated in the last decade. The NDVI showed a strong correlation with precipitation, with the lowest vegetation vigor index (0.490) recorded in 2017, at the peak of the drought. It is concluded that the basin is under intensified climate stress, reinforcing the need for management and adaptation strategies based on continuous monitoring.

Keywords: Time Series, Water Stress, Brazilian Semiarid, MODIS.

1. INTRODUÇÃO

A Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (BHSF) representa um dos mais importantes sistemas socioecológicos do Brasil. Com uma área de drenagem que cobre aproximadamente 8% do território nacional, a bacia é um pilar para o desenvolvimento regional, sendo responsável por cerca de 70% da oferta de água da Região Nordeste e por uma parcela significativa da geração de energia hidrelétrica do país (ANA, 2018). Além de seu papel econômico na agricultura irrigada, com destaque para os polos de fruticultura de exportação no Vale do São Francisco, e no abastecimento de grandes centros urbanos, a bacia possui um profundo valor social e cultural, sendo o berço de diversas comunidades tradicionais, como os povos ribeirinhos e indígenas, cuja subsistência está intrinsecamente ligada à saúde do rio (CODEVASP, 2021).

Contudo, este sistema vital opera sob uma dupla pressão histórica e contemporânea. Por um lado, décadas de intervenções humanas, como a construção de grandes barramentos e a conversão de vegetação nativa para a agropecuária, alteraram profundamente o regime hidrológico e sedimentar do rio. Por outro, a bacia enfrenta os desafios impostos pela variabilidade e pelas mudanças climáticas. Grande parte de sua extensão está inserida no semiárido brasileiro, uma região naturalmente suscetível a longos períodos de estiagem. Estudos recentes indicam uma intensificação de eventos climáticos extremos, com secas mais frequentes e severas, que ameaçam a sustentabilidade dos recursos hídricos (Marengo *et al.*, 2017). O Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC) alerta que o aumento da temperatura e a alteração nos padrões de chuva podem exacerbar os processos de desertificação na região, um fenômeno definido pela degradação da terra em áreas áridas e semiáridas, resultando na perda de produtividade biológica e econômica (PBMC, 2014; Sales, 2002).

Neste contexto complexo, o monitoramento contínuo e em larga escala torna-se uma ferramenta indispensável para o diagnóstico e a gestão. O sensoriamento remoto oferece uma abordagem sinótica e de alta frequência temporal, essencial para capturar a dinâmica de sistemas ambientais extensos e complexos como a BHSF (Jensen, 2009). A capacidade de gerar séries temporais de dados consistentes sobre vastas áreas permite a identificação de tendências, anomalias e a avaliação do impacto de eventos climáticos de forma que seria inviável por meio de monitoramento exclusivamente em campo. Plataformas de geoprocessamento em nuvem, como o Google Earth

Engine (GEE), revolucionaram essa capacidade, democratizando o acesso a um massivo arquivo de dados de satélite e ao poder computacional necessário para analisá-los (Gorelick *et al.*, 2017).

Produtos de satélite como os do sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) e o CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data) são amplamente validados e utilizados para monitorar variáveis-chave do sistema climático e da resposta dos ecossistemas. A temperatura da superfície (LST), o índice de vegetação (NDVI) e a precipitação são indicadores fundamentais para avaliar as condições de seca e estresse ambiental (Wan, 2014; Huete *et al.*, 2002; Funk *et al.*, 2015).

Este estudo tem como objetivo analisar a variabilidade climatológica e a resposta da vegetação na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (BHSF) no período de 2000 a 2024. Para tanto, utilizam-se dados de sensoriamento remoto processados na plataforma Google Earth Engine (GEE), com o intuito de quantificar as tendências interanuais de precipitação, temperatura da superfície terrestre e NDVI. Especificamente, busca-se: (i) caracterizar a variabilidade das variáveis climáticas ao longo da série histórica; (ii) identificar padrões, anomalias e tendências significativas nos dados; e (iii) avaliar os impactos dessas dinâmicas sobre o vigor vegetativo da bacia. Almeja-se, assim, fornecer um diagnóstico atualizado do estado de estresse climático da BHSF, contribuindo para embasar discussões sobre gestão ambiental e estratégias de adaptação às mudanças climáticas. Parte-se da hipótese de que a bacia apresenta um padrão de aquecimento contínuo e aumento da irregularidade pluviométrica, refletido na redução do vigor da vegetação, sobretudo em períodos de seca prolongada.

2. METODOLOGIA

A metodologia foi estruturada em duas etapas principais: (1) processamento de dados de satélite em nuvem para extração da série temporal e (2) análise local e visualização dos dados para interpretação dos resultados.

O acesso e processamento dos dados foi realizado na plataforma Google Earth Engine (GEE). O limite vetorial da BHSF, obtido junto à Agência Nacional de Águas (ANA), foi usado para delimitar a área de estudo. Para cada ano do período de 2000 a 2024, foram calculadas as médias espaciais das seguintes variáveis:

- Precipitação: Utilizou-se o produto CHIRPS Daily v2.0, com resolução espacial de ~5 km, para calcular o total de precipitação acumulada para cada ano.
- Temperatura da Superfície (LST): Empregou-se o produto MODIS MOD11A2 v6.1 (resolução de 1 km) para obter a média anual da temperatura diurna em Graus Celsius (°C).
- Índice de Vegetação (NDVI): O produto MODIS MOD13A1 v6.1 (resolução de 500 metros) foi utilizado para calcular a média anual do NDVI, um indicador do vigor da vegetação.

Para garantir a acurácia dos dados, foram aplicados filtros de qualidade (QA) para os produtos MODIS. Para a temperatura, utilizou-se a banda QC_Day para selecionar apenas pixels de alta qualidade. Para o NDVI, a banda SummaryQA foi usada para filtrar medições confiáveis, removendo dados potencialmente contaminados por nuvens ou aerossóis. Ao final, os dados médios anuais para toda a bacia foram exportados como um arquivo no formato .csv.

A análise da série temporal e a geração dos gráficos foram conduzidas localmente no ambiente PyCharm, utilizando a linguagem Python. A biblioteca Pandas foi empregada para carregar, manipular e realizar análises estatísticas descritivas no arquivo .csv. As bibliotecas Matplotlib e Seaborn foram utilizadas para a criação dos gráficos de série temporal, sendo um gráfico de barras para a precipitação e gráficos de linha para a temperatura e o NDVI, permitindo uma visualização clara das tendências e anomalias anuais.

Adicionalmente, ressalta-se que os dados empregados neste estudo apresentam ampla confiabilidade, uma vez que os produtos MODIS e CHIRPS são validados e reconhecidos internacionalmente por sua acurácia em análises ambientais e climáticas. Diversos estudos destacam a consistência desses conjuntos de dados para investigações de larga escala, mesmo em contextos onde não há disponibilidade de séries temporais locais para validação *in situ*, o que reforça sua adequação e robustez na avaliação da variabilidade climática e da resposta da vegetação (Funk *et al.*, 2015; Justice *et al.*, 1998; Didan, 2015).

A área de estudo corresponde à bacia hidrográfica do rio São Francisco, uma das mais importantes do território brasileiro, abrangendo aproximadamente 639.219 km² e se estendendo pelos estados de Minas Gerais, Bahia, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Goiás e Distrito Federal. O rio São Francisco possui cerca de 2.830 km de extensão, com nascentes situadas na Serra da Canastra (MG) e foz no Oceano Atlântico, entre os estados de Alagoas e Sergipe. A bacia apresenta grande diversidade ambiental, englobando domínios de Cerrado, Caatinga e Mata Atlântica, além de diferentes formas de uso e ocupação do solo. Essa heterogeneidade a torna uma região estratégica para análises de variabilidade climática e resposta da vegetação, sobretudo pela forte dependência socioeconômica de suas populações em relação aos recursos hídricos. A localização da bacia hidrográfica está apresentada na Figura 1.

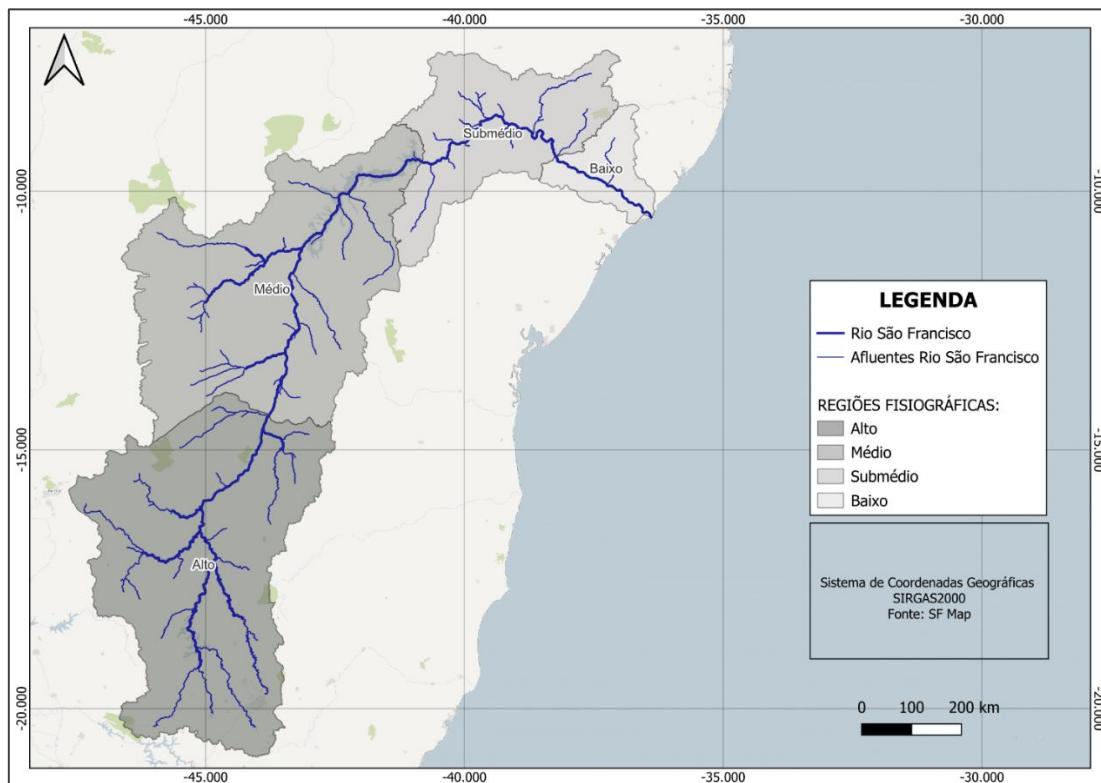


Figura 1 - Localização da bacia hidrográfica do rio São Francisco.

Fonte: Elaboração própria (2025)

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise da série temporal de 25 anos (2000-2024) para a Bacia do Rio São Francisco (BHSF) revela um sistema ambiental sob notável estresse, cuja dinâmica é caracterizada por uma forte variabilidade hidrológica e uma clara tendência de aquecimento, com impactos sinérgicos que se refletem diretamente na saúde da vegetação. A Tabela 1, apresentada a seguir, detalha os dados anuais que fundamentam esta análise.

Tabela 1: Série temporal completa das variáveis.

Ano	Precipitação Anual (mm)	Temperatura Média (°C)	NDVI Médio
2000	1024.75	31.89	0.530
2001	739.90	32.55	0.528
2002	874.88	32.32	0.530
2003	753.43	32.41	0.522
2004	1105.01	31.18	0.552
2005	1059.32	31.14	0.557
2006	969.30	30.76	0.574
2007	752.18	32.27	0.519
2008	1019.99	31.83	0.533
2009	1065.14	30.71	0.584
2010	879.38	31.39	0.559

2011	993.26	30.85	0.562
2012	667.40	32.99	0.496
2013	959.99	32.84	0.510
2014	726.45	32.30	0.517
2015	714.22	33.56	0.505
2016	844.59	33.57	0.506
2017	707.34	33.40	0.490
2018	904.02	32.19	0.529
2019	764.18	33.60	0.526
2020	1061.63	31.15	0.583
2021	932.94	31.95	0.543
2022	952.99	30.34	0.559
2023	629.08	33.15	0.546
2024	998.94	29.80	0.573

Fonte: Elaboração própria (2025), com base em dados CHIRPS Daily v2.0 e MODIS v6.1 (MOD11A2 e MOD13A1) processados no Google Earth Engine.

A dinâmica da precipitação na bacia é marcada por uma intensa irregularidade. A média de 895.5 mm anuais mascara uma oscilação de extremos que é visualmente representada na Figura 2. Mais do que a variação de um ano para o outro, a análise da série temporal revela a ocorrência de eventos de seca plurianuais, com destaque para o período entre 2012 e 2017. Este intervalo não foi apenas uma sequência de anos secos, mas um evento climático persistente que levou o sistema hídrico da bacia a um estado crítico, corroborando os estudos de Marengo *et al.* (2017) sobre a "Seca do Século". As implicações de tais eventos transcendem o balanço hídrico, afetando diretamente a capacidade de armazenamento dos reservatórios, como Sobradinho, e aumentando os conflitos pelo uso da água.

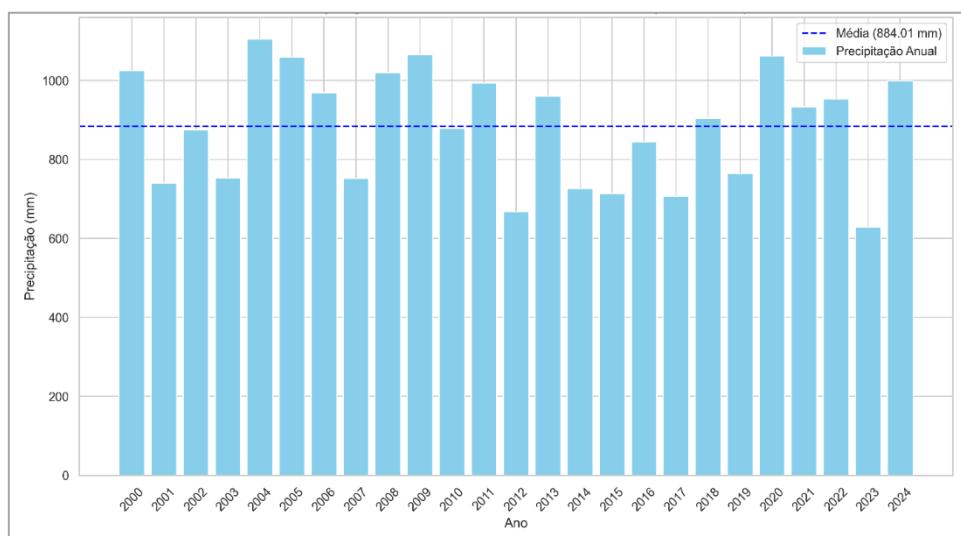


Figura 2 - Gráfico da Precipitação Anual na Bacia do São Francisco (2000-2024).

Fonte: Elaboração própria (2025), com base em dados CHIRPS Daily v2.0 e MODIS v6.1 (MOD11A2 e MOD13A1) processados no Google Earth Engine.

Paralelamente à irregularidade das chuvas, os dados de temperatura da superfície terrestre (LST), detalhados na Figura 3, apontam para uma inequívoca tendência de aquecimento. Embora a média do período seja de 31.84 °C, os cinco anos mais quentes de toda a série de 25 anos ocorreram na última década, uma forte evidência de que a BHSF está passando por um processo de aquecimento regional acelerado. Este aquecimento atua como um potente catalisador da aridez, exacerbando os impactos da escassez de chuvas ao aumentar a evapotranspiração e intensificar o estresse hídrico sobre os ecossistemas.

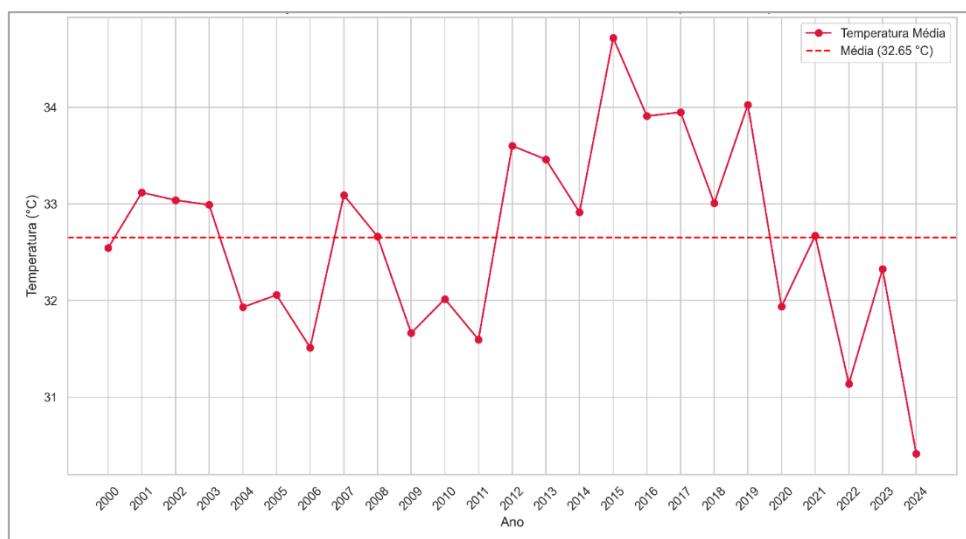


Figura 3 - Gráfico da Temperatura Média Anual na Bacia do São Francisco (2000-2024).

Fonte: Elaboração própria (2025), com base em dados CHIRPS Daily v2.0 e MODIS v6.1 (MOD11A2 e MOD13A1) processados no Google Earth Engine.

A resposta da vegetação, quantificada pelo NDVI e ilustrada na Figura 4, funciona como um bioindicador que integra os efeitos combinados da precipitação e da temperatura. A forte correlação positiva entre o NDVI e a precipitação anual é evidente, demonstrando a dependência direta do ecossistema, em grande parte formado pelo bioma Caatinga, ao pulso hídrico. O ponto mais baixo do NDVI em toda a série foi registrado em 2017 (0.490), no auge da seca plurianual, representando não apenas "menos verde", mas uma perda significativa de biomassa com implicações para a biodiversidade e para a economia local. Esta degradação da cobertura vegetal aumenta a exposição do solo, tornando-o mais vulnerável à erosão e contribuindo para o assoreamento dos rios, um problema crônico na BHSF. A queda de mais de 11% no NDVI médio entre um ano úmido como 2009 (0.584) e um ano crítico como 2017 (0.490) quantifica a magnitude do impacto ecológico e evidencia a vulnerabilidade da bacia aos processos de desertificação descritos por Sales (2002).

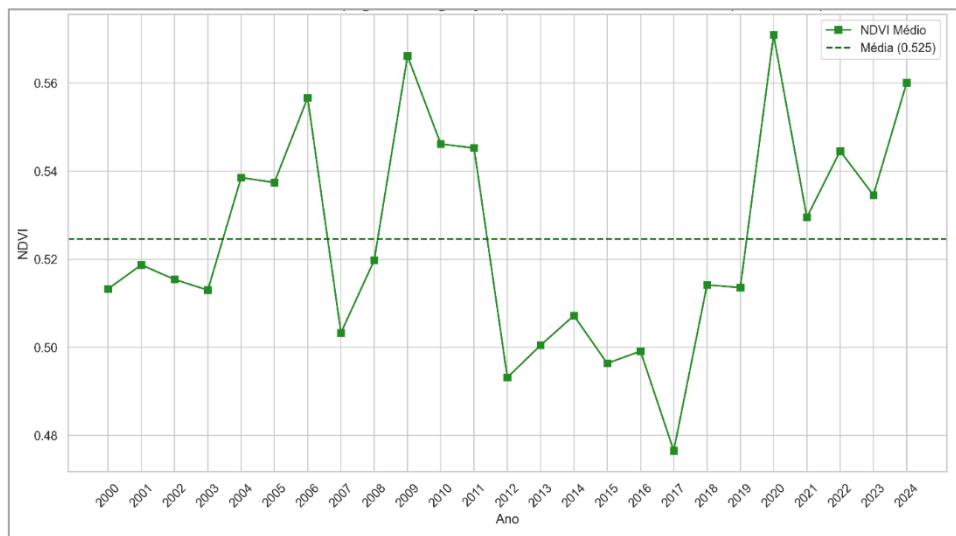


Figura 4 - Gráfico do NDVI Médio Anual (Vigor da Vegetação) na Bacia do São Francisco (2000-2024).

Fonte: Elaboração própria (2025), com base em dados CHIRPS Daily v2.0 e MODIS v6.1 (MOD11A2 e MOD13A1) processados no Google Earth Engine.

Em suma, os resultados demonstram um sistema sob pressão crescente, onde a irregularidade das chuvas é potencializada por um aquecimento contínuo, levando o ecossistema a estados críticos de estresse com maior frequência. Este diagnóstico, baseado em uma metodologia robusta e dados validados, reforça a urgência de estratégias de gestão adaptativa para garantir a sustentabilidade futura da Bacia do Rio São Francisco, pois permitem não apenas compreender a dinâmica da variabilidade climática e da resposta da vegetação na bacia hidrográfica do rio São Francisco, mas também fornecem subsídios relevantes para a formulação de políticas públicas voltadas à gestão ambiental e à conservação dos recursos naturais. A identificação de padrões de variação no NDVI e sua relação com a precipitação e a temperatura podem contribuir para estratégias de adaptação às mudanças climáticas, auxiliando na definição de áreas prioritárias para conservação, recuperação de vegetação nativa e planejamento do uso do solo. Ademais, tais informações apresentam implicações diretas para as populações locais mais vulneráveis, que dependem intensamente da disponibilidade hídrica e dos serviços ecossistêmicos da bacia, reforçando a importância de integrar o conhecimento científico à tomada de decisão e à construção de políticas socioambientais sustentáveis.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo se propôs a realizar um diagnóstico da dinâmica climática e da resposta da vegetação na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, utilizando uma série temporal de 25 anos de dados de sensoriamento remoto. A metodologia, que integrou o processamento em nuvem no Google Earth Engine com a análise de dados em Python, provou-se uma abordagem robusta, transparente e replicável para o monitoramento de um sistema ambiental tão vasto e complexo.

As conclusões desta análise são inequívocas e apontam para um cenário de crescente estresse climático na bacia. Primeiramente, confirmou-se a alta variabilidade da precipitação como uma característica intrínseca, porém com a ocorrência de eventos de seca plurianuais, como o de 2012-2017, que representam uma ameaça severa à segurança hídrica da região. Em segundo lugar, foi identificada uma clara tendência de aquecimento, com a concentração dos anos mais quentes na última década, o que agrava as condições de aridez ao intensificar a evapotranspiração. Por fim, demonstrou-se que a vegetação da bacia, um bioindicador da saúde do ecossistema, responde de forma direta e sensível a essa sinergia de impactos, apresentando perdas significativas de vigor durante os períodos de estresse hídrico e térmico.

Diante do exposto, este trabalho reforça a urgência de fortalecer as políticas públicas de gestão de recursos hídricos, conservação de ecossistemas e adaptação às mudanças climáticas. O monitoramento contínuo, como o realizado aqui, é fundamental para fornecer os subsídios técnicos necessários à tomada de decisão, visando garantir a resiliência e a sustentabilidade de uma das bacias hidrográficas mais estratégicas para o desenvolvimento social e econômico do Brasil. Ademais, como perspectivas para pesquisas futuras, destaca-se a importância de incorporar modelagens preditivas que permitam avaliar cenários de projeção climática, realizar análises específicas em sub-bacias críticas e integrar variáveis socioeconômicas que aprofundem a compreensão dos impactos sobre comunidades locais. Tais avanços podem ampliar o potencial de aplicação prática dos resultados, fortalecendo ações de planejamento territorial, mitigação de riscos e adaptação às mudanças ambientais em curso.

REFERÊNCIAS

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco 2017-2025 (PSF 2017-2025): Resumo Executivo.** 2018. Disponível em: <https://www.cbhsaofrancisco.org.br/plano-de-recursos-hidricos>. Acesso em: 17 jun. 2025.

CODEVASF - COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO DOS VALES DO SÃO FRANCISCO E DO PARNAÍBA. **O Rio São Francisco e a Atuação da CODEVASF.** 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/codevasf/pt-br/assuntos/o-rio-sao-francisco-e-a-atuacao-da-codevasf>. Acesso em: 17 jun. 2025.

DIDAN, K. MOD13Q1 MODIS. **Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V006.** NASA EOSDIS Land Processes DAAC, 2015.

FUNK, C.; PETERSON, P.; LANDSFELD, M.; PEDREROS, D.; VERDIN, J.; SHUKLA, S.; HUSAK, G.; ROWLAND, J.; HARRISON, L.; HOELL, A.; MICHAELSEN, J. The climate hazards

infrared precipitation with station data (CHIRPS): a new environmental record for monitoring extremes. **Scientific Data**, v. 2, n. 150066, p. 1-10, 2015.

GORELICK, N.; HANCHER, M.; DIXON, M.; ILYUSHCHENKO, S.; THAU, D.; MOORE, R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote Sensing of Environment**, v. 202, p. 18-27, 2017.

HUETE, A.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E. P.; GAO, X.; FERREIRA, L. G. Overview of the radiometric and biophysical validation of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1-2, p. 195-213, 2002.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres**. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 587p.

JUSTICE, C. O.; VERMOTE, E.; TOWNSHEND, J. R. G.; DEFRIES, R.; ROY, D. P.; HALL, D. K. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 4, p. 1228-1249, 1998.

MARENGO, J. A.; JONES, R.; ALVES, L. M.; VALVERDE, M. C. Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. **International Journal of Climatology**, v. 31, n. 13, p. 1864-1875, 2011.

MARENGO, J. A.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M. Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 129, n. 3-4, p. 1189-1200, 2017.

PBMC - PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (PBMC). **Base Científica das Mudanças Climáticas**. Contribuição do Grupo de Trabalho 1 para o Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Rio de Janeiro: COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

SALES, M. C. L. O processo de desertificação no nordeste do Brasil: contextos e perspectivas. **Finisterra**, v. 37, n. 73, p. 51-68, 2002.

WAN, Z. New refinements and validation of the collection-6 MODIS land-surface temperature/emissivity product. **Remote Sensing of Environment**, v. 140, p. 36-45, 2014.