UMA DÉCADA DE TRANSFORMAÇÕES HIDROAMBIENTAIS NA BACIA DO RIO PIAUÍ: UMA ABORDAGEM MULTIVARIADA

José Carlos Freitas de Sá Filho [1]; Monique Lima de Melo Lisboa [2]; Maria Gabriely de Oliveira Rocha de Souza [3]; Clicio Souza Santos [4]; José Jairo Florentino Cordeiro júnior [5] & Adnívia Santos Costa Monteiro [6]

RESUMO – As transformações na paisagem alteram diretamente a dinâmica dos corpos hídricos superficiais. Este trabalho integrou geotecnologias, indicadores limnológicos e estatística multivariada para identificar os principais vetores de degradação hidroambiental na Bacia do Rio Piauí (SE) entre 2013 e 2023. Utilizou-se dados da Coleção 10.1 do MapBiomas no QGIS e dados secundários de 20 pontos do sistema SERhidro Monitora (SEMAC), processados em ambiente R através de Análise de Componentes Principais (PCA). Os resultados indicaram a conversão de vegetação nativa em pastagens e mosaicos agrícolas, com expansão urbana no baixo curso. A PCA apontou distanciamento estatístico entre zonas preservadas (maior IQA) e áreas impactadas por elevados índices de estado trófico (IET), sugerindo redução na resiliência ambiental da bacia. Conclui-se que a pressão antrópica contínua atua como o principal fator de deterioração hídrica regional, fornecendo subsídios para estratégias de conservação e segurança hídrica.

ABSTRACT – Landscape transformations directly alter the dynamics of surface water bodies. This study integrated geotechnologies, limnological indicators, and multivariate statistics to identify the main drivers of hydroenvironmental degradation in the Piauí River Basin (SE, Brazil) between 2013 and 2023. Data from MapBiomas Collection 10.1 were used in QGIS, along with secondary data from 20 sampling stations of the SERhidro Monitora system (SEMAC), processed in R environment through Principal Component Analysis (PCA). The results indicated the conversion of native vegetation into pastures and agricultural mosaics, alongside urban expansion near the lower course. The PCA pointed out the statistical distance between preserved zones (higher WQI) and areas impacted by high trophic state indices (TSI), suggesting a reduction in the basin's environmental resilience. In conclusion, continuous anthropic pressure acts as the primary factor for regional water deterioration, providing support for conservation and water security strategies.

Palavras-Chave – Análise de Componentes Principais; Dinâmica da paisagem; MapBiomas.

[1]) Universidade Federal de Sergipe, Av. Marcelo Deda Chagas, Rosa Elze, São Cristóvão - SE, 79 998101170, carlos.freitassafilho@gmail.com
[2]) Universidade Federal de Sergipe, Av. Marcelo Deda Chagas, Rosa Elze, São Cristóvão - SE, 79 988177772, moniquelima1@hotmail.com
[3]) Universidade Federal de Sergipe, Av. Marcelo Deda Chagas, Rosa Elze, São Cristóvão - SE, 79 988516675, mariagabrielyors@gmail.com
[4]) Universidade Federal de Sergipe, Av. Marcelo Deda Chagas, Rosa Elze, São Cristóvão - SE, 79 998456778, clicio.agronomo@gmail.com
[5]) Universidade Federal de Sergipe, Av. Marcelo Deda Chagas, Rosa Elze, São Cristóvão - SE, 79 998958780, jairofcordeiro@academico.ufs.br
[6]) Universidade Federal de Sergipe, Av. Marcelo Deda Chagas, Rosa Elze, São Cristóvão - SE, 79 999654866, Adniviacosta@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

A gestão integrada de bacias hidrográficas representa um dos maiores desafios contemporâneos para a sustentabilidade, especialmente em regiões tropicais sob intensa pressão de transição econômica. As bacias não funcionam apenas como unidades de drenagem, mas como complexos sistemas abertos onde as mudanças no uso e ocupação do solo afetam diretamente o regime hidrológico e, sobretudo, a qualidade dos recursos hídricos superficiais. No contexto de Sergipe, a Bacia Hidrográfica do Rio Piauí destaca-se como um território estratégico devido ao seu papel socioeconômico vital, abrigando centros urbanos e zonas de intensa atividade agropecuária. No entanto, a supressão da vegetação nativa para a introdução de pastagens e a expansão urbana alteram a dinâmica hídrica, intensificando processos de escoamento superficial e o aporte difuso de poluentes nos rios, conforme apontado por Santos *et al*. (2021).

Para compreender a magnitude desses impactos, faz-se necessário o uso integrado de geoprocessamento e sensoriamento remoto, ferramentas que permitem quantificar e espacializar a dinâmica da paisagem ao longo do tempo. Os mapeamentos da Coleção 10.1 do Projeto MapBiomas consolidaram-se como referência para esse tipo de análise, fornecendo dados históricos de consistência temática, seguindo a abordagem de Souza Jr. *et al*. (2020). Contudo, a análise espacial torna-se limitada se não estiver integrada ao monitoramento limnológico de campo. Índices como o de Qualidade da Água (IQA) e o de Estado Trófico (IET) funcionam como indicadores do ecossistema, revelando os reflexos diretos do uso do solo sobre a integridade ambiental da bacia, de acordo com Bello *et al*. (2021).

Diante do exposto, objetivou-se analisar as transformações hidroambientais na Bacia Hidrográfica do Rio Piauí (SE), no período de 2013 a 2023, integrando geotecnologias, indicadores limnológicos e estatística multivariada para identificar os principais vetores de degradação ambiental na bacia.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Caracterização da Área de Estudo

O estudo foi desenvolvido na Bacia Hidrográfica do Rio Piauí, região centro-sul de Sergipe. A área apresenta transição climática entre o tropical úmido litorâneo e o semiárido interiorano, influenciando o regime hídrico local. Dados limnológicos secundários de 20 pontos de amostragem

(Tabela 1), cobrindo o período de 2013 a 2023, foram obtidos junto ao observatório SERHIDRO, mantido pela Secretaria de Estado do Meio Ambiente, Sustentabilidade e Ações Climáticas de Sergipe (SEMAC, 2026).

Tabela 1 - Caracterização e localização geográfica dos pontos de monitoramento na Bacia do Rio Piauí, Sergipe.

Ponto	Município	Latitude	Longitude	Ponto	Município	Latitude	Longitude
P01	Estância	-11,2634	-37,4428	P11	Pedrinhas	-11,2163	-37,6411
P02	Boquim	-11,1014	-37,5878	P12	Arauá	-11,2695	-37,5975
P03	Arauá	-11,2585	-37,5570	P13	Estância	-11,2296	-37,3996
P04	Indiaroba	-11,4738	-37,4913	P14	Salgado	-11,0028	-37,4998
P05	Estância	-11,2067	-37,3396	P15	Salgado	-11,0587	-37,4952
P06	Santa Luzia	-11,3450	-37,5532	P16	Estância	-11,1391	-37,3940
P07	Santa Luzia	-11,3563	-37,4730	P17	Estância	-11,1732	-37,4312
P08	Umbaúba	-11,4015	-37,6217	P18	Lagarto	-10,9466	-37,7319
P09	Santa Luzia	-11,3581	-37,4751	P19	Lagarto	-10,9895	-37,7441
P10	Santa Luzia	-11,3462	-37,4506	P20	Itaporanga	-11,0645	-37,3810

Fonte: Adaptado de SERHIDRO/SEMAC (2026).

2.2. Processamento Espacial e Balanço de Uso do Solo

Mapeamentos anuais de uso e ocupação do solo (2013 e 2023) foram obtidos da Coleção 10.1 do projeto MapBiomas (2026). No software QGIS (versão 4.0.0), os dados raster foram recortados pelo limite da bacia, reprojetados para o sistema UTM (Zona 24 Sul, Datum SIRGAS 2000) e convertidos em matrizes para a tabulação das áreas em hectares (ha). O balanço líquido de transição da paisagem foi calculado pela diferença real de área entre os anos extremos da série histórica.

2.3. Modelagem Estatística e Integração Multivariada (PCA)

A manipulação de dados, as análises de regressão e a construção de gráficos foram executadas em ambiente R (pacotes dplyr e ggplot2). Para avaliar a associação e o comportamento conjunto entre a dinâmica espacial e os indicadores ambientais, aplicou-se a Análise de Componentes Principais (PCA), adotando os critérios de modelagem, extração de fatores e interpretação de matrizes recomendados por Hair *et al*. (2009), com o auxílio dos pacotes FactoMineR e factoextra. A matriz integrada considerou as estações de amostragem como objetos e, como variáveis, as classes de uso do solo e os indicadores limnológicos (IQA e IET). Adicionalmente, o modelo de linguagem Gemini (Google) foi utilizado na etapa de tratamento de dados e análise estatística para auxílio no desenvolvimento de scripts em linguagem R e na padronização estética de gráficos dentro do ambiente RStudio.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Análise Espaço-Temporal da Dinâmica de Uso e Cobertura do Solo

A análise multitemporal da cobertura do solo na Bacia do Rio Piauí revelou uma intensa reconfiguração estrutural em sua paisagem ao longo da década monitorada. Conforme apresentado na Figura 1, o mapeamento comparativo entre os anos de 2013 e 2023 expõe a contínua expansão das atividades humanas na região, caracterizada pelo avanço das fronteiras agropastoris sobre os remanescentes de vegetação nativa do estado de Sergipe.

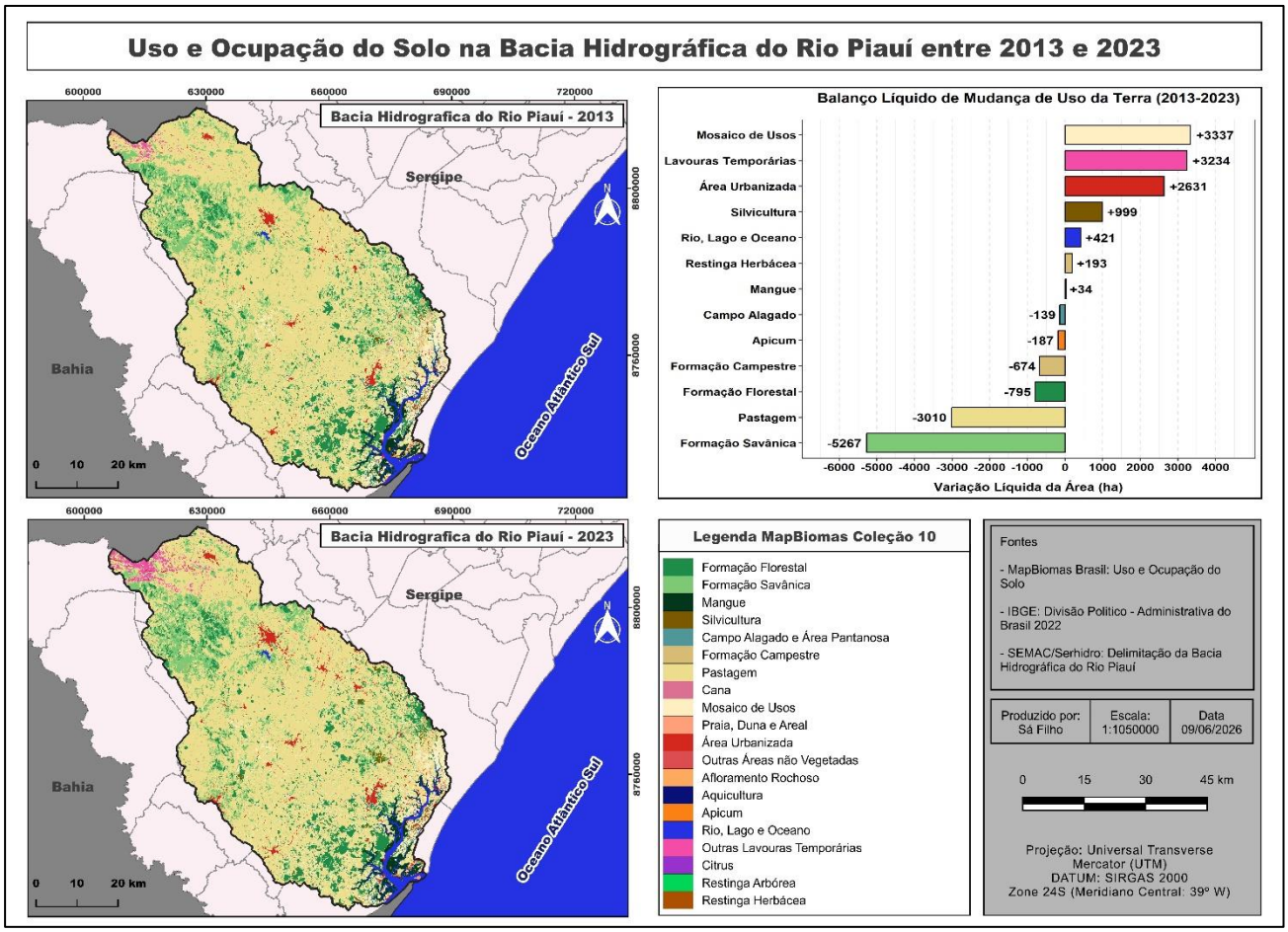


Figura 1 - Mapeamento espacial comparativo de uso e cobertura do solo (2013 e 2023) e balanço de transição líquida na Bacia do Rio Piauí, Sergipe.

O balanço líquido de transição (ganhos e perdas), integrado à Figura 1, quantifica essa dinâmica de substituição: as classes de Pastagem e Mosaico de Usos consolidaram-se como as matrizes dominantes da paisagem. Essa expansão ocorreu primordialmente através da supressão direta e da fragmentação das classes de Formação Florestal e Savânica.

Do ponto de vista hidrográfico e ecológico, essa transição de florestas e savanas para pastagens abertas altera de forma significativa o balanço hidrológico local. A substituição de coberturas vegetais densas e profundas por ecossistemas simplificados de pastagens reduz a interceptação foliar da chuva, acelera a velocidade do escoamento superficial e diminui as taxas de infiltração de água no solo. Esse processo desprotege a camada superficial do solo, intensificando a erosão laminar e o carreamento de sedimentos e compostos químicos em direção à calha dos corpos hídricos.

Para compreender a velocidade e a tendência histórica dessas transformações ano a ano, os dados foram modelados por análises de regressão (Figura 2), revelando que os processos de conversão de solo na Bacia do Rio Piauí seguem padrões matemáticos bem definidos.

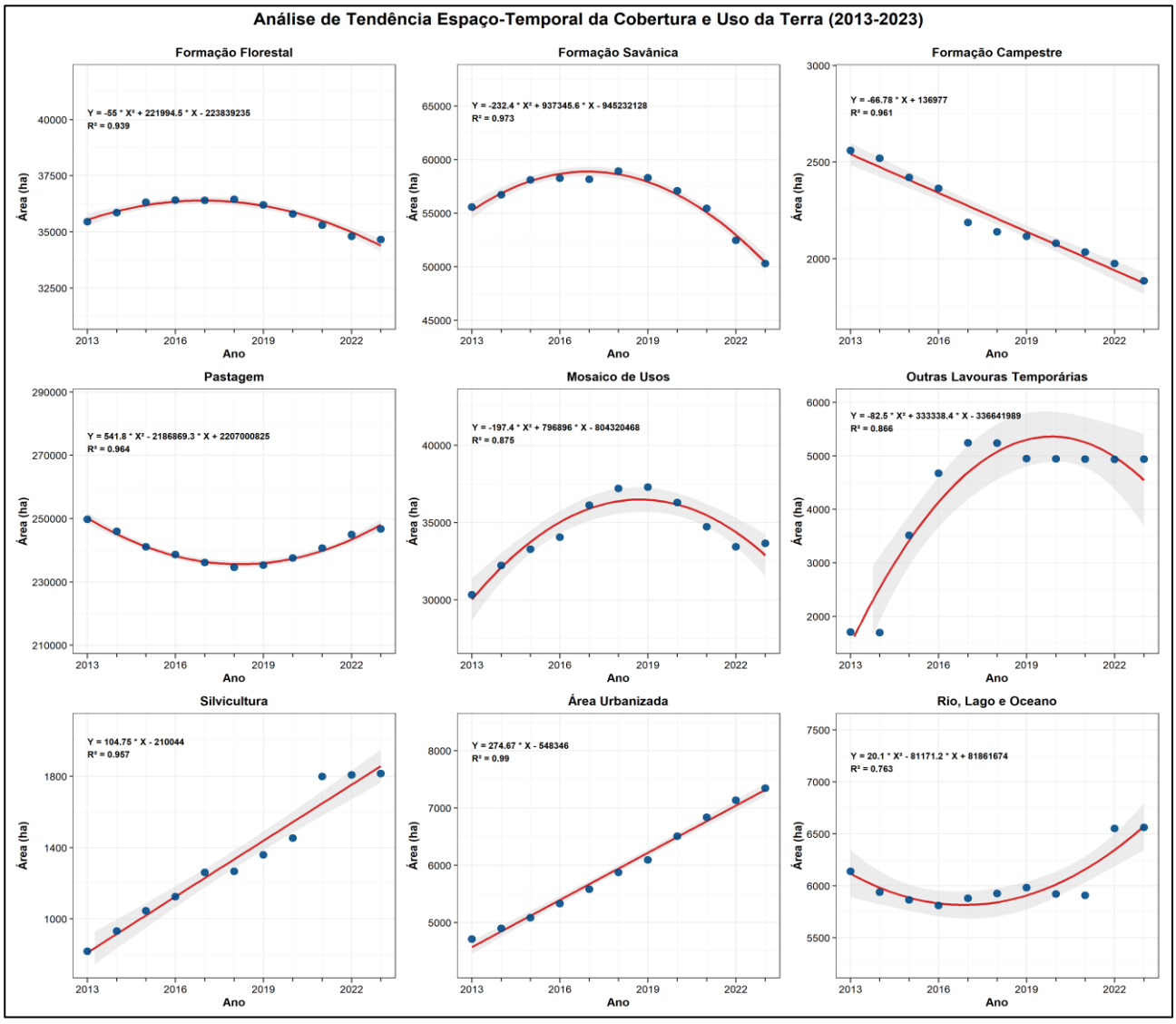


Figura 2 – Tendências históricas lineares e polinomiais (2013–2023) das classes de uso e cobertura do solo na Bacia do Rio Piauí, Sergipe.

A Área Urbanizada (R^2 = 0,99) e a Silvicultura (R^2 = 0,96) exibiram tendências lineares crescentes estritas, expandindo a taxas constantes de 274,67 ha/ano e 104,75 ha/ano, respectivamente, consolidando-se como vetores estruturais de pressão antrópica contínua. Em sentido oposto, a Formação Campestre apresentou decréscimo linear severo (R^2 = 0,96), com perda sistemática de 66,78 ha/ano, evidenciando a supressão silenciosa das coberturas herbáceas nativas. Por outro lado, os ajustes polinomiais de segundo grau (modelos quadráticos) revelaram dinâmicas complexas de inversão de tendência na bacia, caracterizadas por uma marcante sincronia em torno do biênio 2018–2019. A Pastagem (R^2 = 0,96) descreveu uma curva em formato de "U" (concavidade voltada para cima), atingindo o seu ponto mínimo de retração em 2018. Exatamente neste mesmo ano, a Formação Florestal (Mata Atlântica; R^2 = 0,94) e o Mosaico de Usos (R^2 = 0,88) alcançaram seus pontos máximos de expansão (concavidades voltadas para baixo). Esse comportamento síncrono expõe um fenômeno de substituição da matriz do solo: até 2018, o recuo das pastagens permitiu processos temporários de pousio e regeneração florestal secundária. Contudo, a partir de 2018, a retomada da expansão da atividade pecuária inverteu essa dinâmica, cobrando o seu preço ambiental através do declínio imediato das áreas florestais e da simplificação da cobertura do solo. Comportamento semelhante de exaustão ambiental foi validado para a Formação Savânica (Caatinga/Tabuleiros Costeiros; R^2 = 0,97), cuja parábola com concavidade para baixo registrou seu ponto máximo de conservação em 2017, iniciando uma vertiginosa trajetória de queda nos anos subsequentes, culminando nos menores patamares da série histórica em 2023. Já as Outras Lavouras Temporárias (R^2 = 0,87) expandiram-se intensamente até atingir o pico em 2020, impulsionadas pela conjuntura de mercado no início da pandemia, antes de entrarem em fase de estabilização. Por fim, a classe Rio, Lago e Oceano (R^2 = 0,76) descreveu a resposta hidrológica da bacia ao clima, registrando seu ponto crítico de mínimo em 2019, reflexo do déficit hídrico acumulado do ciclo de secas severas da década, seguido por uma vigorosa recuperação volumétrica associada ao retorno de anos hidrológicos mais chuvosos pós-2020.

3.2. Integração Multivariada e Impactos na Qualidade da Água

A Análise de Componentes Principais (PCA) integrou as matrizes de uso do solo às variáveis limnológicas da bacia, retendo 90,6% da variância total acumulada nas duas primeiras dimensões (Dim1: 68,7%; Dim2: 21,9%). O *biplot* revelou forte polarização e gradientes ambientais definidos pelas cargas das variáveis nos eixos (Figura 3). No quadrante superior esquerdo, observa-se o agrupamento de vetores de classes naturais: Formação Florestal, Formação Savânica, Mangue, Campo Alagado e Mosaico de Usos. Registra-se uma forte relação inversa (ângulo de ~180°) entre o

vetor de Formação Florestal e o Índice de Estado Trófico (IET), indicando correlação negativa estrita entre a cobertura arbórea e os processos de eutrofização. De forma análoga, a Formação Savânica contrapõe-se às classes de restinga (arbórea e herbácea), o Mangue opõe-se a Rios, Lagos e Oceanos, e o Campo Alagado demonstra comportamento inverso ao vetor de Pastagem.

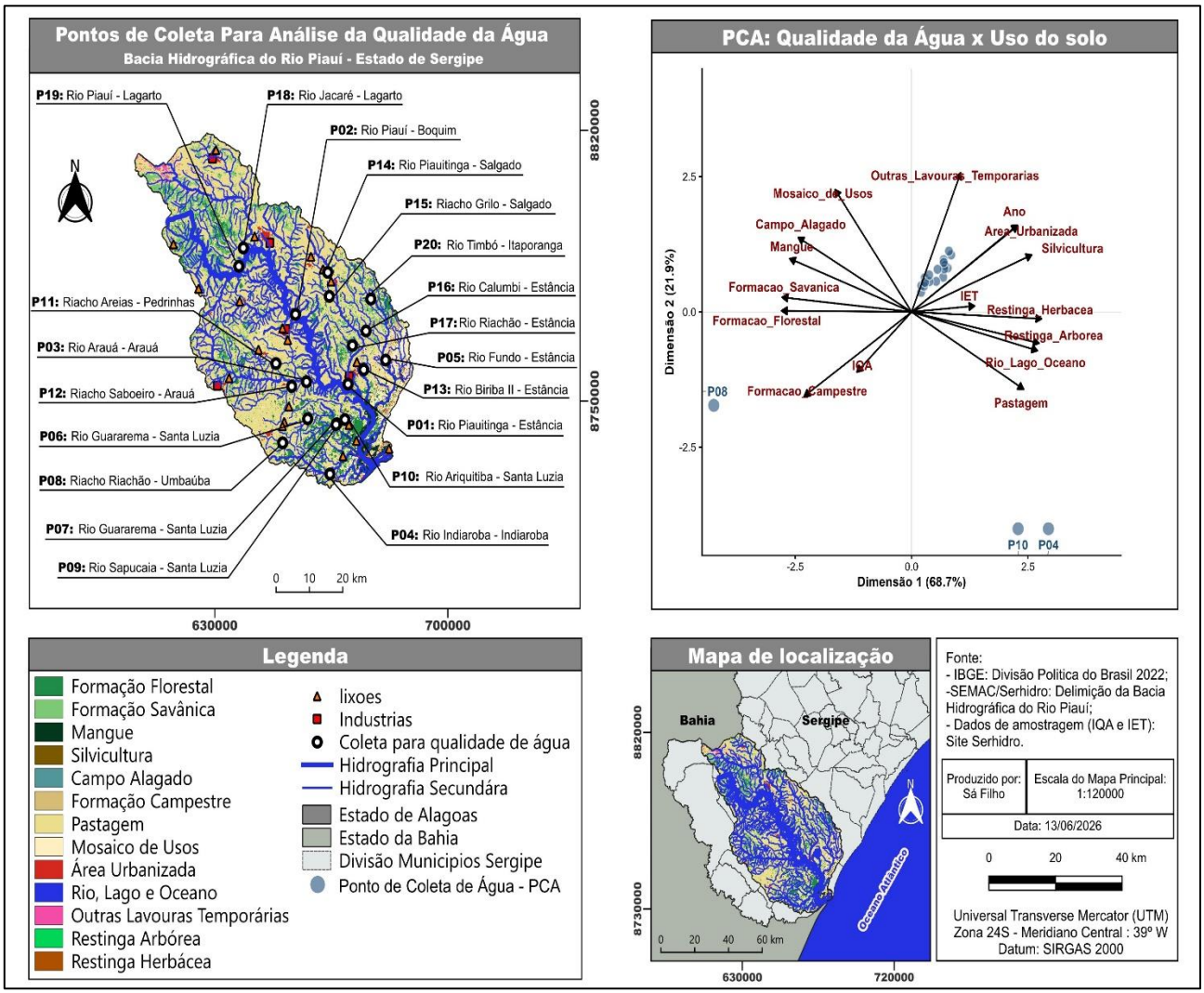


Figura 3 - Localização das estações de monitoramento hídrico do observatório SERHIDRO/SEMAC e *biplot* da Análise de Componentes Principais (PCA) integrada na Bacia do Rio Piauí, Sergipe.

O Índice de Qualidade da Água (IQA) projeta-se no quadrante inferior esquerdo, associado linearmente à Formação Campestre. O ponto P08 (Umbaúba) destaca-se como um extremo estatístico isolado nesta direção, apresentando os indicadores físico-químicos mais favoráveis da série.

As pressões antrópicas concentram-se nos quadrantes orientais. No quadrante superior direito, o vetor do IET exibe forte correlação positiva com as variáveis Silvicultura, Áreas Urbanizadas,

Outras Lavouras Temporárias e com o vetor temporal Ano, evidenciando o incremento histórico da degradação hídrica associado à expansão urbana e agrícola. A maior parte das estações de monitoramento (nuvem de pontos azuis) agrupa-se de forma homogênea no centro do *biplot*, porém com inflexão a este quadrante.

Por fim, no quadrante inferior direito, os vetores de Pastagem, Restinga Herbácea, Restinga Arbórea e Rios, Lagos e Oceanos estendem-se à periferia do eixo, setor onde os pontos P04 (Indiaroba) e P10 (Santa Luzia do Itanhy) distanciam-se estatisticamente das demais estações, refletindo assinaturas limnológicas críticas específicas das zonas de transição estuarina e de forte conversão por pecuária.

4. CONCLUSÃO

Os resultados apontam a redução da resiliência ambiental da Bacia do Rio Piauí, impulsionada pelos impactos cumulativos das atividades agropastoris.

O distanciamento estatístico entre as estações evidencia que a integridade hídrica depende da conservação dos redutos de cabeceira e de ações mitigadoras no baixo curso e estuário.

Por fim, recomenda-se que estudos futuros utilizem zonas de amortecimento (buffers) no entorno dos pontos de amostragem, detalhando a influência do uso do solo em microescala sobre a qualidade da água.

5. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), através do Convênio CAPES/UNESP Nº. 951420/2023. Agradeço ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua, pelo apoio técnico-científico aportado até o momento.

6. REFERÊNCIAS

BELLO, I. P., DE SOUZA, G. R., MENEZES, J. P. C., DE OLIVEIRA, M. F., OLIVEIRA, L. F. C. D. (2021). "*Qualidade De Água E De Estado Trófico Do Ribeirão Vermelho Em Lavras, MG*". Sustentare. https://doi.org/10.5892/st.v5i1.6359

HAIR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. (2009). "*Análise Multivariada de Dados*". Bookman Editora, Porto Alegre – RS, 6 ed., 686 p.

MAPBIOMAS. (2026). "*Plataforma SEEG e MapBiomas: Estatísticas de Uso e Ocupação do Solo – Coleção 10.1 para a Bacia do Rio Piauí*". Disponível em: https://plataforma.mapbiomas.org/. Acesso em: 01 jun. 2026.

SANTOS, A. G. B. D., BEZERRA, A. C., NASCIMENTO, A. H. C. D., DE SOUZA, L. B. S., DA SILVA, J. L. B., & DE ALBUQUERQUE MOURA, G. B. (2021). "*Caracterização Morfométrica e Uso e Ocupação do Solo em Bacia Hidrográfica do Semiárido Pernambucano*". Revista Brasileira de Geografia Física 14, pp. 1036. https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.2.p1036-1043

SEMAC. (2026). "*SERhidro Monitora – Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos de Sergipe*". Secretaria de Estado do Meio Ambiente, Sustentabilidade e Ações Climáticas de Sergipe. Disponível em: <https://serhidro.semac.se.gov.br/apps/d7cbb09dd4924146ad92d9a3c4d52406/explore>. Acesso em: 05 jun. 2026.

SOUZA JR., C. M.; SHIMBO, J. Z.; ROSA, M. R.; PARENTE, L. L.; ALENCAR, A. A.; RUDORFF, B. F. T.; HASENACK, H.; MATSUMOTO, M.; FERREIRA, L. G.; SOUZA-FILHO, P. W. M. (2020). "*Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine*". Remote Sensing 12(17), p. 2735.