



Avaliação dos impactos da carcinicultura no acúmulo de nitrogênio e fósforo em sedimentos na bacia do rio São Francisco, Brasil

Assessment of the impacts of shrimp farming on nitrogen and phosphorus accumulation in sediments in the São Francisco River basin, Brazil

L. S. Xavier^{1,2,3}; C. S. M. Santos^{2,4}; J. A. N. de Melo^{2,5}; S. V. G. Santos^{1,2};
J. M. da Silva^{2,3}; L. S. Costa^{2,3}; M. V. T. Gomes^{3,6}; C. A. B. Garcia^{2,3,5,7};
M. A. S. Cruz^{3,8}; P. A. Coelho Filho⁹; V. E. Schneider^{3,10,11};
S. S. L da Costa^{1,2,3,7*}

¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Ambientais, Universidade Federal de Sergipe, 49107-230, São Cristóvão-SE, Brasil

²Núcleo Regional de Competência em Petróleo, Gás e Biocombustíveis de Sergipe, Laboratório de Tecnologia e Monitoramento Ambiental, Universidade Federal de Sergipe, 49107-230, São Cristóvão-SE, Brasil

³Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Sergipe, 49107-230, São Cristóvão-SE, Brasil

⁴Departamento de Geologia, Universidade Federal de Sergipe, 49107-230, São Cristóvão-SE, Brasil

⁵Departamento de Química, Universidade Federal de Sergipe, 49107-230, São Cristóvão-SE, Brasil

⁶Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba, 5^a Superintendência Regional de Penedo, 57200-000, Penedo-AL, Brasil

⁷Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos em Rede Nacional - ProfÁgua, Universidade Federal de Sergipe, 49107-230, São Cristóvão-SE, Brasil

⁸Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, EMBRAPA Tabuleiros Costeiros, 49025-040, Aracaju-SE, Brasil

⁹Departamento de Engenharia de Pesca, Universidade Federal de Alagoas, 57200-000, Penedo-AL, Brasil

¹⁰Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Sergipe, 49107-230, São Cristóvão-SE, Brasil

¹¹Instituto de Pesquisa sobre Desastres, Universidade Federal de Sergipe, 49107-230, São Cristóvão-SE, Brasil

*silvanio@academico.ufs.br

(Recebido em 31 de julho de 2025; aceito em 24 de setembro de 2025)

A intensificação das atividades antrópicas tem contribuído significativamente para o desequilíbrio dos ecossistemas aquáticos, principalmente pelo aporte de macronutrientes cujo excesso pode desencadear processos de eutrofização, comprometendo a qualidade da água e afetando a biodiversidade. Nesse contexto o presente estudo buscou avaliar as contribuições da atividade de carcinicultura sobre a região do Baixo São Francisco, através da concentração de nitrogênio total Kjeldahl (NTK), fósforo (P) e matéria orgânica (MO) em sedimentos provenientes de viveiros de camarão e do canal principal do rio São Francisco, foram analisadas comparando as concentrações desses parâmetros e suas correlações. Os resultados revelaram teores significativamente mais elevados de NTK, P e MO nos sedimentos dos viveiros, refletindo o acúmulo de resíduos orgânicos decorrentes da alimentação e excreção dos organismos cultivados. A análise estatística mostrou correlações positivas entre os nutrientes, com destaque para a forte associação entre P e MO ($r = 0,97$), sugerindo que a decomposição da MO pode intensificar a liberação de P para a coluna d'água. A análise multivariada (ACP e ACH) evidenciou a clara distinção entre os ambientes de carcinicultura e fluviais, com agrupamentos específicos baseados na composição dos sedimentos. Esses achados indicam que a carcinicultura contribui para o enriquecimento dos sedimentos, podendo intensificar processos de eutrofização e comprometer o equilíbrio ecossistêmico a longo prazo. O estudo reforça a importância da adoção de práticas de manejo mais sustentáveis e de políticas públicas voltadas ao monitoramento e controle da poluição difusa, em consonância com os ODS 6 e 14 da ONU.

Palavras-chave: manejo sustentável, nutrientes, impacto ambiental.

The intensification of anthropogenic activities has significantly contributed to the imbalance of aquatic ecosystems, primarily due to the input of macronutrients whose excess can trigger eutrophication processes, compromising water quality and affecting biodiversity. In this context, the present study aimed to evaluate the contributions of shrimp farming activities in the Lower São Francisco region by analyzing the concentrations of total Kjeldahl nitrogen (TKN), phosphorus (P), and organic matter (OM) in sediments

collected from shrimp ponds and the main channel of the São Francisco River. The concentrations of these parameters were compared, and their correlations were assessed. The results revealed significantly higher levels of TKN, P, and OM in the pond sediments, reflecting the accumulation of organic residues from feed and excreta of the cultivated organisms. Statistical analysis showed positive correlations among the nutrients, with a particularly strong association between P and OM ($r = 0.97$), suggesting that OM decomposition may enhance the release of P into the water column. Multivariate analyses (PCA and HCA) highlighted a clear distinction between aquaculture and riverine environments, with specific clusters based on sediment composition. These findings indicate that shrimp farming contributes to sediment enrichment, potentially intensifying eutrophication processes and jeopardizing long-term ecosystem balance. The study underscores the importance of adopting more sustainable management practices and implementing public policies aimed at monitoring and controlling non-point source pollution, in alignment with the United Nations' Sustainable Development Goals (SDGs) 6 and 14.

Keywords: sustainable management, nutrients, environmental impact.

1. INTRODUÇÃO

A intensificação das atividades antrópicas, como agricultura, pecuária e aquicultura, tem contribuído significativamente para a degradação da qualidade da água em ecossistemas aquáticos em escala global [1-3]. Dentre os principais fatores associados a esse processo, destaca-se o aporte excessivo de nutrientes inorgânicos, especialmente nitrogênio (N) e fósforo (P), elementos essenciais para a produtividade primária dos ambientes aquáticos [4]. A disponibilidade desses nutrientes é influenciada por variáveis como o tipo de cobertura vegetal, características geológicas e pedológicas, uso e ocupação do solo, escoamento superficial e declividade da bacia hidrográfica.

O enriquecimento nutricional dos ecossistemas aquáticos por N e P pode desencadear processos de eutrofização, que podem comprometer a qualidade da água e afetar a biodiversidade aquática [5, 6]. A eutrofização é, atualmente, reconhecida como um dos principais desafios ambientais enfrentados em escala mundial [1], tendo sido reportada em diferentes contextos geográficos, como em bacias hidrográficas no Norte da China [3], em rios localizados na África ocidental [1] e em microbacias na região sul do Brasil [2].

No Brasil, o rio São Francisco representa uma das mais extensas e importantes bacias hidrográficas, desempenhando um papel fundamental no abastecimento hídrico, na navegação, na geração de energia e na subsistência de comunidades ribeirinhas [7, 8]. A região do Baixo São Francisco, em particular, destaca-se por sua rica biodiversidade e por sua relevância socioeconômica, com destaque para o abastecimento humano, a agricultura irrigada, a pesca artesanal e a aquicultura [9]. Dentre as atividades desenvolvidas na região, a carcinicultura é caracterizada pela geração de resíduos ricos em nutrientes, em especial nitrogênio e fósforo [10].

O uso frequente de fertilizantes inorgânicos nos viveiros contribui para a alteração da composição química dos sedimentos, uma vez que, nutrientes adicionados não são absorvidos pelos organismos aquáticos, tendem a se acumular no leito dos viveiros [11]. Embora a importância dos nutrientes para a produtividade dos ecossistemas aquáticos seja amplamente reconhecida [12], ainda são escassas as investigações acerca dos potenciais impactos do nitrogênio e fósforo em sedimentos de viveiros de aquicultura e ambientes fluviais, sobretudo no contexto da bacia do Baixo São Francisco.

Diante desse cenário, a análise das concentrações de nitrogênio, fósforo e matéria orgânica em sedimentos provenientes de ambientes de carcinicultura e de trechos do rio representa uma abordagem relevante para avaliar os impactos ambientais associados às atividades produtivas. Esses parâmetros apresentam forte interdependência, já que os nutrientes tendem a se associar à matéria orgânica nos sedimentos.

Neste estudo, buscou-se investigar as concentrações de nitrogênio total Kjeldahl (NTK) e fósforo (P), correlacionando-as com os teores de matéria orgânica (MO) em dois tipos de ambientes: viveiros de carcinicultura e pontos no canal principal do rio São Francisco. A hipótese central é que os viveiros apresentem acúmulo expressivo de nutrientes nos sedimentos, com possíveis implicações ecológicas. Especificamente, os objetivos são: (i) comparar os teores de NTK e P entre ambientes fluviais e de aquicultura; (ii) avaliar as correlações entre nutrientes e

matéria orgânica; e (iii) discutir os impactos ecológicos desses resultados e suas implicações para o manejo sustentável dos recursos hídricos.

Este trabalho contribui para o avanço do conhecimento ao propor uma abordagem comparativa e integrada voltada à região do Baixo São Francisco, considerada estratégica devido à sua biodiversidade e intensa atividade agroindustrial. Os resultados obtidos fornecem subsídios relevantes para a formulação de estratégias de manejo sustentável e mitigação dos impactos decorrentes da carcinicultura sobre os ecossistemas aquáticos.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Local de amostragem e coleta e tratamento das amostras

A bacia hidrográfica do rio São Francisco possui uma extensão aproximada de 630.000 km², dividida em quatro regiões fisiográficas: alta, média, submédia e baixa. A foz do rio localiza-se entre os estados de Sergipe e Alagoas, na região Nordeste do Brasil. Na porção do Baixo São Francisco, observa-se um uso múltiplo dos recursos hídricos, incluindo o abastecimento doméstico, a geração de energia elétrica, a aquicultura e a pesca artesanal, atividades que desempenham papel fundamental na economia regional e na subsistência das populações ribeirinhas [13, 14].

As coletas de sedimentos foram realizadas em 2019, abrangendo seis pontos distintos. Três amostras foram obtidas em viveiros de carcinicultura, identificados como BS, IS e PS, e outras três no canal principal do rio, denominadas BR, IR e PR. Os pontos de amostragem estão localizados nos municípios de Brejo Grande (SE), Propriá (SE) e Igreja Nova (AL), conforme ilustrado na Figura 1.

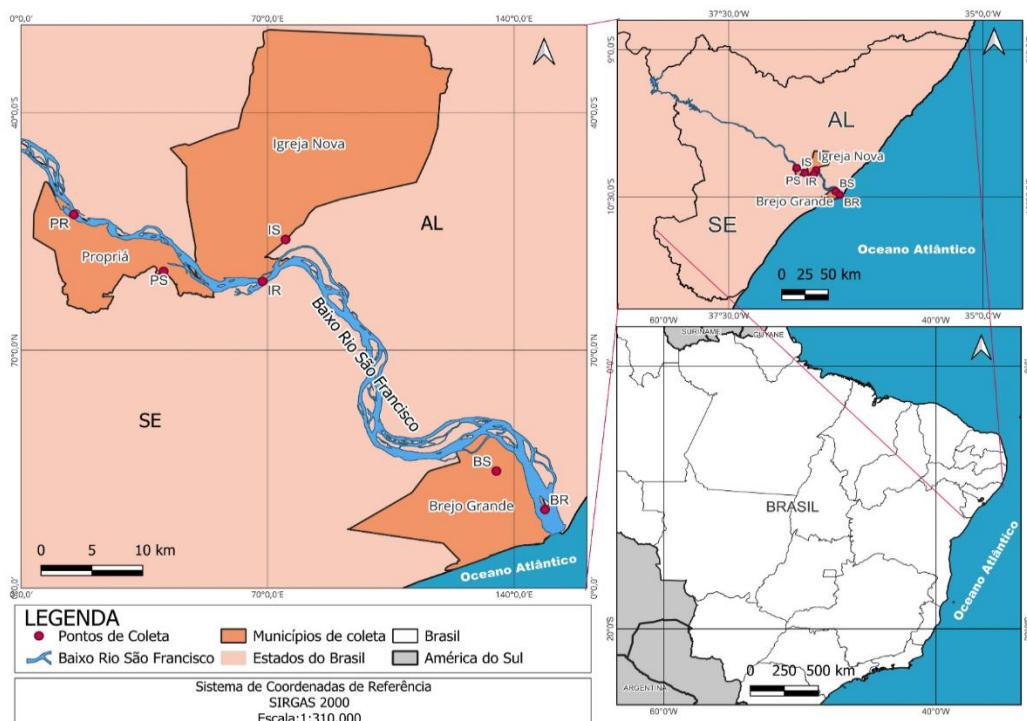


Figura 1: Mapa de localização geográfica dos pontos de coleta dos sedimentos na região do Baixo São Francisco, Brasil.

As amostras de sedimentos superficiais foram coletadas com o uso de draga Van Veen, acondicionadas em sacos plásticos e mantidas congeladas até o processamento laboratorial. Posteriormente, os sedimentos foram secos em estufa a 60 °C por um período de 48 horas [15],

desagregados manualmente com auxílio de almofariz e pistilo, e armazenados em embalagens plásticas do tipo “zip” para posterior análise.

2.2 Determinação de Nitrogênio Total Kjeldahl e Fósforo

A quantidade total de nitrogênio foi determinada utilizando o método de digestão Kjeldahl, seguindo a metodologia descrita por Macêdo (2005) [16] e pela ABNT (2015) [17]. Para isso, cerca de 0,5 g de sedimento seco foram colocados em tubos de ensaio resistentes ao calor. Adicionaram-se 1 g de mistura catalisadora que continha sulfato de potássio (K_2SO_4) e sulfato de cobre ($CuSO_4$), além de 1 mL de peróxido de hidrogênio a 30% (H_2O_2) e 3 mL de ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4 , p.a.).

Os tubos foram colocados no digestor, começando o aquecimento a 150 °C por uma hora. Depois, a temperatura foi aumentada em etapas de 50 °C a cada 30 minutos até atingir 350 °C, mantendo-se nesse nível até que formasse um líquido viscoso de cor verde. Após esfriar até a temperatura ambiente, o conteúdo foi transferido com cuidado para balões de 50 mL, usando funil e bastão de vidro, e o volume foi completado com água deionizada. Uma porção de 10 mL foi reservada para análise do fósforo total. O restante foi devolvido ao tubo e submetido à etapa de destilação no destilador Kjeldahl. Foram adicionados 10 mL de solução de hidróxido de sódio a 40% usando funil de adição, para alcalinizar a amostra. Em seguida, iniciou-se o aquecimento com vapor, já estável em ebulição, e coletou-se o destilado.

A etapa final consistiu na titulação do destilado com solução padrão de ácido clorídrico (HCl) 0,1 mol L⁻¹, utilizando indicador adequado, até o ponto de viragem.

O teor de nitrogênio total (NTK) foi calculado pela seguinte equação:

$$NTK = \frac{(Va - Vb) \times F \times [HCl] \times Eq - g_N \times 1000}{P_1} \quad (1)$$

Onde: NTK – teor de nitrogênio total (mg Kg⁻¹); Va – volume de HCl gasto na titulação da amostra, em mL; Vb – volume de HCl gasto na titulação do branco (mL); F – fator de correção para o HCl 0,1 mol L⁻¹; P1 – massa da amostra (g); Eq-g_N - número de equivalente – grama de nitrogênio.

Para a determinação do fósforo total, utilizou-se uma alíquota de 10 mL da amostra previamente reservada. A essa alíquota foram adicionados 10 mL de solução de molibdato de amônio ($(NH_4)_6Mo_7O_{24}$) e 0,3 g de ácido ascórbico ($C_6H_8O_6$). A mistura foi agitada por 2 minutos e deixada em repouso por 1 hora para o desenvolvimento da coloração característica. A leitura foi realizada por espectrofotometria na região do UV-vis, com comprimento de onda de 880 nm [18].

2.3 Determinação do teor de Matéria Orgânica

A determinação do teor de matéria orgânica (MO) foi realizada por meio da perda por ignição (*Loss on Ignition* – LOI). Para isso, aproximadamente 1,0 g de sedimento seco foi pesada em cadinhos previamente tarados, os quais foram submetidos à calcinação em forno mufla a 550 °C por 3 horas [19, 20]. Registraram-se os pesos iniciais dos cadinhos vazios e das amostras antes da calcinação.

Após o período de incineração, os cadinhos foram transferidos para um dessecador até o resfriamento à temperatura ambiente e, em seguida, novamente pesados para obtenção da massa final do sedimento calcinado. A diferença de massa foi utilizada para o cálculo do teor de matéria orgânica, conforme expressa a Equação 2:

$$MO(\%) = \left[\frac{(P - (T - C))}{P} \right] \times 100 \quad (2)$$

Onde: P - peso da amostra de sedimento; T - peso do cadinho + sedimento após a calcinação; C - peso do cadinho.

2.4 Análise de dados

As análises das amostras de sedimentos foram feitas em triplicata, para garantir a confiabilidade e a reprodutibilidade dos resultados. Os dados foram analisados quanto a média mais ou menos o desvio padrão [21]. As análises estatísticas e multivariadas foram realizadas com o *software Statistica* para Windows, versão 7 (StatSoft Inc., Tulsa, EUA), sendo estas, a Análise de Componentes Principais (PCA), a Análise de Agrupamento Hierárquico (HCA), diagrama de dispersão e a correlação de Pearson. Os coeficientes de correlação de Pearson foram utilizados para analisar a relação entre os parâmetros e destes com os lugares onde os sedimentos foram coletados. As diferenças foram consideradas significativas quando o valor de p foi menor que 0,05 [22].

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Concentração de NTK, P e MO nos sedimentos fluviais e de carcinicultura

Os resultados evidenciam diferenças significativas nas concentrações de NTK entre os sedimentos provenientes dos ambientes fluviais e daqueles localizados em viveiros de carcinicultura, conforme apresentado na Tabela 1. Nos pontos amostrados ao longo do canal principal do rio São Francisco, os teores de NTK variaram de 367,55 mg kg⁻¹ no ponto BR a 490,75 mg kg⁻¹ no ponto PR. Em contraste, os sedimentos oriundos dos viveiros apresentaram valores substancialmente maiores, sendo 626,27 mg kg⁻¹ no ponto BS, 706,35 mg kg⁻¹ no ponto IS — o maior valor registrado — e 587,25 mg kg⁻¹ no ponto PS.

As concentrações de fósforo (P) também demonstraram variações expressivas entre os dois tipos de ambientes, conforme indicado na Tabela 1. Nos sedimentos do rio, os valores foram relativamente baixos: BR registrou 14,72 mg L⁻¹, enquanto IR e PR apresentaram 3,16 mg L⁻¹ e 3,88 mg L⁻¹, respectivamente. Já nos sedimentos dos viveiros, os teores foram consideravelmente mais elevados, com BS apresentando 27,77 mg L⁻¹, IS com 22,21 mg L⁻¹ e PS com 24,17 mg L⁻¹. Esses achados corroboram os resultados de Tian et al. (2019) [23], que apontam que ambientes aquáticos, especialmente sistemas de carcinicultura, tendem a acumular maiores concentrações de N e P nos sedimentos, em razão do uso contínuo de rações enriquecidas com nutrientes que nem sempre são totalmente assimilados pelos organismos cultivados, além do acúmulo de resíduos orgânicos e excretas [11].

Tabela 1: Médias das concentrações de NTK, P e MO nos sedimentos fluviais (BR, IR, PR) e nos sedimentos da carcinicultura (BS, IS, PS) da região do baixo São Francisco, nordeste do Brasil.

Pontos	NTK (mg Kg ⁻¹)	P (mg L ⁻¹)	MO (%)
BR	367,55 ± 8,71	14,72 ± 0,34	7,40 ± 1,31
IR	478,43 ± 8,21	3,16 ± 0,17	0,76 ± 0,22
PR	490,75 ± 7,21	3,88 ± 0,39	0,17 ± 0,01
BS	626,27 ± 8,71	27,77 ± 2,20	10,31 ± 0,54
IS	706,35 ± 17,42	22,21 ± 3,76	9,54 ± 0,07
PS	587,25 ± 4,36	24,17 ± 1,54	10,21 ± 0,50

Em relação aos teores de MO, também foram observadas diferenças marcantes entre os pontos amostrados. Nos ambientes fluviais, o ponto BR apresentou o maior valor (7,40%), enquanto IR e PR apresentaram valores significativamente menores, de 0,76% e 0,17%, respectivamente. Segundo Pérez et al. (2020) [24], essa variação pode estar associada à granulometria dos sedimentos, uma vez que frações mais finas favorecem o acúmulo de matéria orgânica. Por sua vez, os sedimentos dos viveiros de carcinicultura apresentaram teores elevados e relativamente homogêneos, com 10,31% em BS, 9,54% em IS e 10,21% em PS. Esses valores refletem o acúmulo de resíduos orgânicos característicos desses sistemas, oriundos de restos de ração não

consumida e excreções dos camarões cultivados [25], o que geralmente não ocorre nos ambientes fluviais, a menos que estejam sujeitos à influência direta de descargas orgânicas.

Ao comparar as concentrações de MO nos sedimentos provenientes de ambientes de carcinicultura e de áreas fluviais, observa-se que os viveiros apresentam teores substancialmente mais elevados. A decomposição da matéria orgânica nesses ambientes influencia diretamente a liberação de nutrientes como nitrogênio e fósforo. No ponto fluvial BR, por exemplo, o elevado teor de matéria orgânica (7,40%) sugere uma considerável entrada de material orgânico natural, cuja degradação contribui para a liberação gradual desses nutrientes ao longo do tempo [26].

Estudo realizado por Steeby et al. (2004) [27], em sedimentos de fazendas comerciais de cultivo de bagres no noroeste do Mississippi (EUA), registrou concentrações de carbono orgânico variando entre 0,76% e 2,89%, sem evidência de tendência de acúmulo ao longo do tempo. Os autores atribuíram essa estabilidade à rápida mineralização da matéria orgânica, composta principalmente por resíduos alimentares e biomassa fitoplânctônica morta, intensificada pelas elevadas temperaturas da estação de crescimento. Em estudo realizado por Xavier et al. (2025) [28] em viveiros de camarão da região do baixo São Francisco, Brasil, os autores observaram variação de MO de 7,89 a 30,54% e de 5,45 a 36,76% e associaram aos insumos não decompostos nos viveiros, além de ração e excreta dos animais que se acumulam no fundo os tanques.

Nos viveiros de camarão analisados (BS, IS e PS), os teores de matéria orgânica variaram entre 9% e 10%, valores mais elevados que os observados nos ambientes fluviais. Esses níveis refletem a deposição contínua de resíduos oriundos da alimentação e excretas dos organismos cultivados, resultando em processos acelerados de decomposição e, consequentemente, em maior disponibilidade de nutrientes nos sedimentos [23, 25].

De acordo com Liu e Myat (2021) [29], um dos principais desafios da carcinicultura está relacionado ao uso intensivo de insumos ricos em nutrientes, os quais, além de favorecerem o crescimento do zooplâncton — alimento natural dos camarões — também promovem o acúmulo de nitrogênio e fósforo nos sedimentos. Esse padrão foi observado nos pontos BS, IS e PS, cujos valores foram superiores aos registrados nos sedimentos do rio. O acúmulo excessivo desses elementos pode desencadear impactos ecológicos relevantes, como a eutrofização e a redução da biodiversidade, uma vez que a degradação da matéria orgânica demanda elevados níveis de oxigênio dissolvido [5].

Nesse contexto, destaca-se a importância da implementação de estratégias de manejo sustentável na carcinicultura. O aporte excessivo de nutrientes pode favorecer a proliferação de algas, a formação de zonas hipóxicas e o desequilíbrio ecológico, privilegiando espécies mais tolerantes a estresse ambiental [30]. Medidas como a otimização da alimentação e o controle da carga orgânica contribuem para o equilíbrio entre produção e degradação da matéria orgânica, reduzindo o acúmulo de nutrientes nos compartimentos aquáticos. Além de mitigar os impactos ambientais, essas práticas sustentáveis também oferecem benefícios econômicos, ao promover maior eficiência produtiva e conservação dos recursos naturais [29, 31].

3.2 Análise Multivariada

A Análise de Componentes Principais (Figura 2) indica que os dois primeiros componentes explicam 99,49 % (Componente 1: 81,56%; Componente 2: 17,92%) da variância total do conjunto de dados analisados, respectivamente. Percebe-se que os pontos de sedimento de carcinicultura (BS, IS, PS) se destacam dos fluviais (BR, IR, PR), agrupando-se de acordo com suas maiores concentrações dos nutrientes analisados.

A Análise de Agrupamento Hierárquico (HCA), representada pelo dendrograma da Figura 3, revela a formação de dois grupos distintos ao se aplicar um critério de similaridade de 70%. O primeiro grupo é composto pelas amostras de sedimentos oriundas dos viveiros de carcinicultura (BS, PS e IS), enquanto segundo, agrupa os sedimentos coletados no Rio (PR, BR e IR). Essa estrutura evidencia padrões consistentes de similaridade entre os pontos de coleta, baseados nas concentrações de nitrogênio total Kjeldahl, fósforo e matéria orgânica. A diferenciação entre os grupos identificados pela HCA reforça a PCA (Figura 2), que mostra uma clara separação entre os ambientes aquáticos e fluviais ao longo dos eixos principais de variância.

Como observado na Tabela 1, os sedimentos dos viveiros de carcinicultura apresentaram concentrações mais elevadas de nitrogênio, fósforo e matéria orgânica em comparação aos sedimentos dos ambientes naturais. Esses resultados refletem a influência da atividade aquícola sobre a qualidade ambiental, apontando para o acúmulo progressivo desses elementos nos compartimentos sedimentares ao longo do tempo [32]. Tal acúmulo pode representar um risco ambiental significativo, sobretudo em regiões ecologicamente sensíveis como o Baixo São Francisco, com potencial para provocar alterações nos processos biogeoquímicos locais e comprometer a sustentabilidade dos ecossistemas associados.

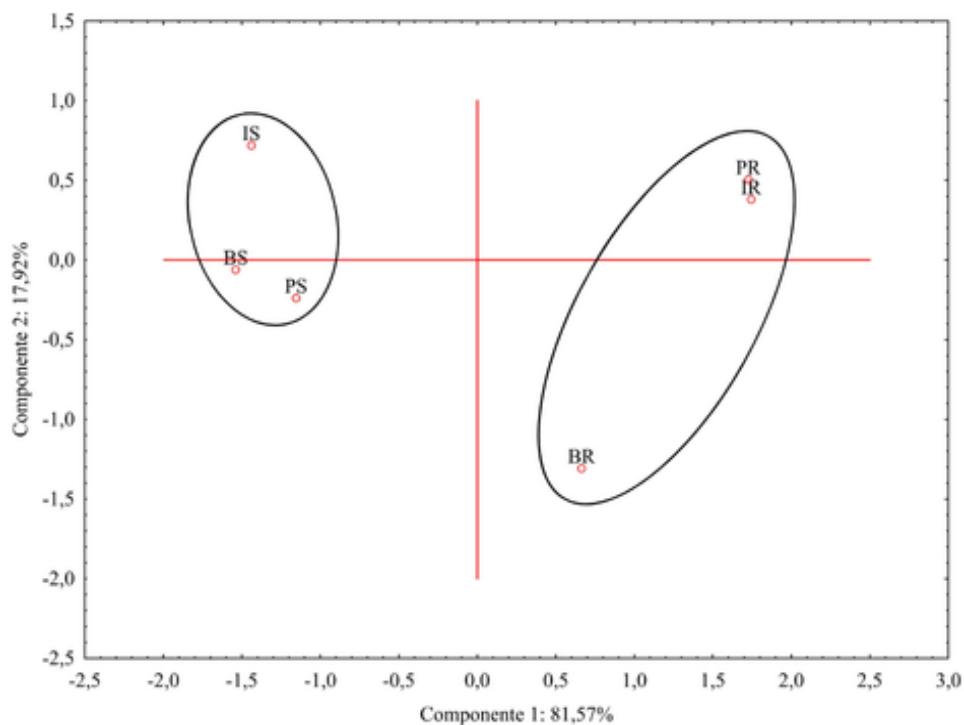


Figura 2: Distribuição dos pontos amostrados com base na análise de componentes principais para os pontos de coleta de sedimentos fluviais e de carcinicultura na região do baixo São Francisco, nordeste Brasil.

A Análise Hierárquica de Agrupamentos destaca essa diferença, conforme apresentado no dendrograma da Figura 3, agrupando os sedimentos com base nas semelhanças nas quantidades de nitrogênio, fósforo e matéria orgânica. Os sedimentos dos viveiros ficam no mesmo grupo, enquanto os sedimentos dos rios se dividem em dois grupos, o que mostra que os dois ambientes têm características diferentes em relação à qualidade dos sedimentos.

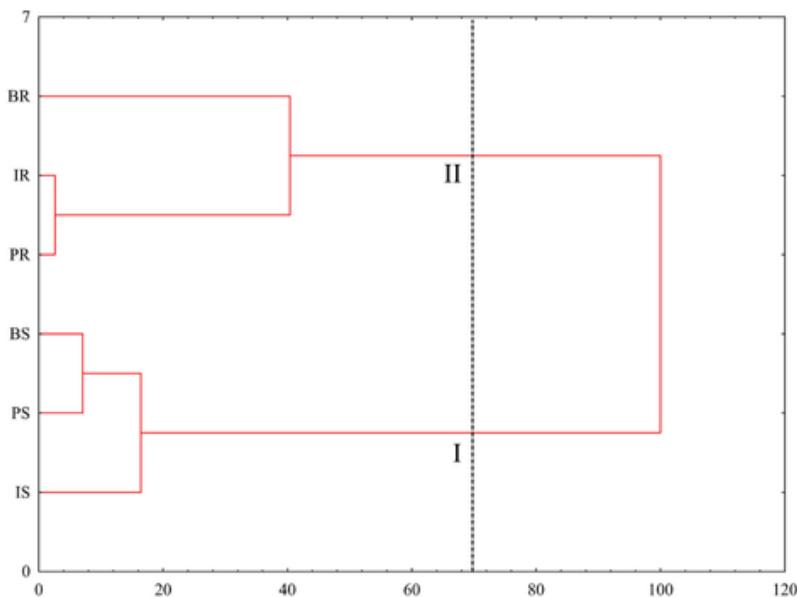


Figura 3: Agrupamento dos pontos amostrados com base na similaridade composicional dos sedimentos usando distância euclidiana com método de ligação de Ward para os seis pontos de coleta de sedimentos fluviais e da carcinicultura na região do baixo São Francisco, nordeste Brasil.

A análise de correlação de Pearson entre os parâmetros avaliados (Tabela 2) evidencia uma associação positiva entre nitrogênio e fósforo, com coeficiente de correlação de 0,63, indicando que esses elementos tendem a se acumular de forma conjunta nos sedimentos. A matéria orgânica apresentou correlação positiva moderada com o nitrogênio ($r = 0,53$) e forte com o fósforo ($r = 0,97$), sugerindo uma relação mais estreita entre fósforo e matéria orgânica. Essa associação pode influenciar na mobilização e liberação do fósforo para a coluna d'água, especialmente sob condições ambientais específicas, como variações no pH, na temperatura, nos níveis de oxigênio dissolvido ou em decorrência da atividade microbiana.

Tabela 2: Matriz de correlação entre os parâmetros analisados (*N*, *P*, *MO*) nos sedimentos fluviais e nos sedimentos da carcinicultura da região do baixo São Francisco, nordeste do Brasil.

	N	P	MO
N	1,00		
P	0,63	1,00	
MO	0,53	0,97	1,00

Os elevados teores de nutrientes e matéria orgânica registrados nos sedimentos dos viveiros de camarão, em especial nos pontos BS e IS, indicam que tais ambientes estão suscetíveis a processos de eutrofização ao longo do tempo. A correlação positiva entre nitrogênio e fósforo ($r = 0,63$), bem como entre fósforo e matéria orgânica ($r = 0,97$), sugere que a mineralização da matéria orgânica facilita o aumento das frações fosfatadas. Esse mecanismo pode ser potencializado durante o período chuvoso, quando o incremento na vazão promove a remobilização dos nutrientes retidos nos sedimentos, comprometendo a qualidade da água e estimulando florescimentos algais em áreas interconectadas [15].

Os diagramas de dispersão com linhas de regressão apresentados na Figura 4 reforçam essas associações, já que exibem coeficientes de determinação consistentes com os coeficientes de correlação da Tabela 2, dentro de um intervalo de confiança de 95%. Esses gráficos evidenciam distintos padrões de interação entre NTK, P e MO, oferecendo subsídios para a interpretação dos processos ecológicos e das pressões antrópicas que atuam sobre os ecossistemas aquáticos do Baixo São Francisco.

A Figura 4a evidencia uma correlação positiva entre as concentrações de nitrogênio (N) e fósforo (P) nos sedimentos analisados, com coeficiente de correlação de $r = 0,63$. Esse valor indica que, à medida que os níveis de fósforo aumentam, os de nitrogênio também tendem a se elevar. Tal relação pode ser atribuída à origem comum desses nutrientes, proveniente do aporte de resíduos da carcinicultura e do uso de fertilizantes [29], além de estar relacionada a processos biogeoquímicos acoplados, como a mineralização da matéria orgânica. Esses achados sustentam a hipótese de que as atividades antrópicas exercem papel central no enriquecimento simultâneo de N e P nos sedimentos da região do Baixo São Francisco [33].

Na Figura 4b, observa-se uma correlação positiva moderada entre nitrogênio e matéria orgânica ($r = 0,53$), indicando que, embora exista associação entre esses parâmetros, essa relação é menos expressiva do que a observada entre N e P. Já a Figura 4-c apresenta uma correlação fortemente positiva entre fósforo e matéria orgânica ($r = 0,97$), sugerindo que sedimentos com maior teor de matéria orgânica tendem a apresentar maiores concentrações de fósforo. Esse comportamento pode ser explicado tanto pela capacidade de retenção do fósforo pela matéria orgânica quanto pela entrada conjunta desses elementos, oriundos de resíduos orgânicos derivados da atividade de cultivo de camarões [34].

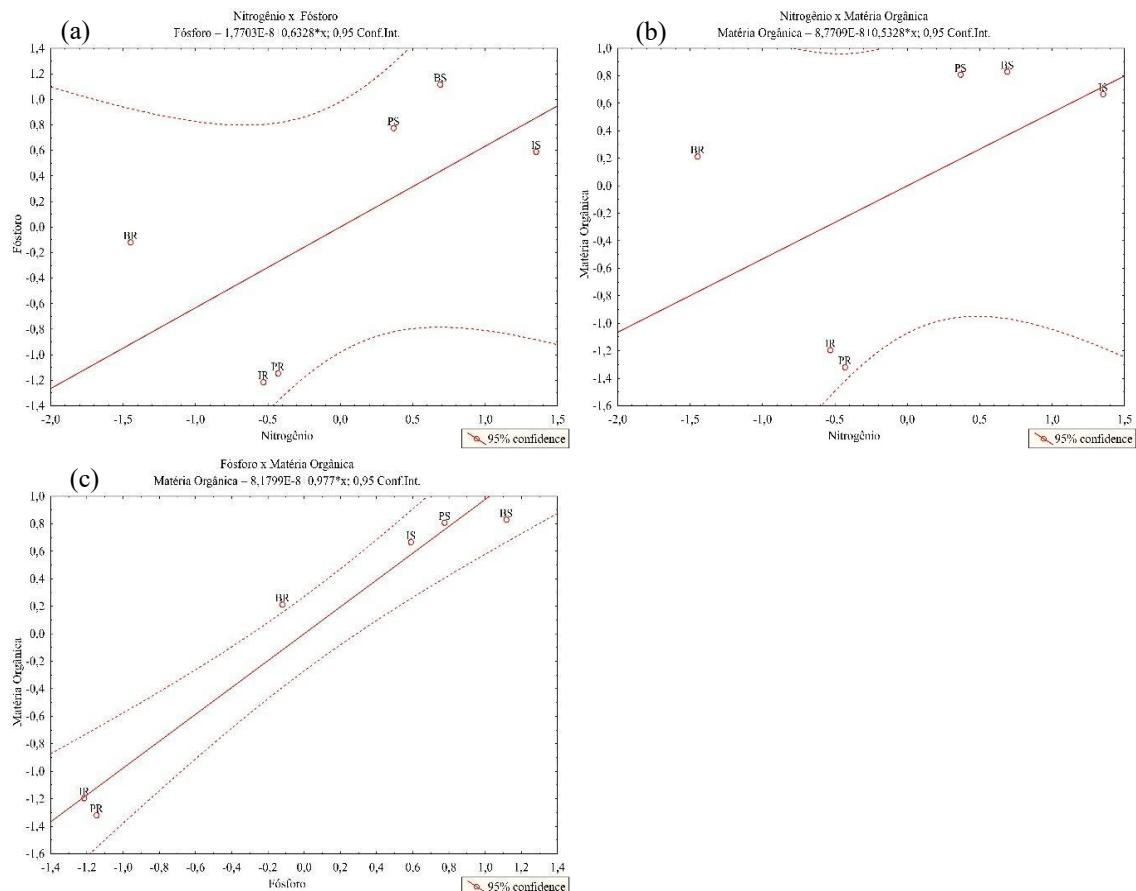


Figura 4: Diagramas de dispersão para (a) N:P, (b) N:MO, (c) MO:P para sedimentos superficiais coletados no curso central do rio e sob influência da atividade de carcinicultura na área do Baixo São Francisco. As linhas sólidas representam as linhas de regressão, as linhas tracejadas definem o limite de confiança de 95%.

As diferenças nas concentrações de N e P entre os ambientes de carcinicultura e os sedimentos do rio podem ser atribuídas a variáveis ambientais como pH, temperatura e disponibilidade de oxigênio dissolvido, que regulam a mobilização e liberação de nutrientes nos compartimentos aquáticos [35]. A correlação expressiva entre fósforo e matéria orgânica nos viveiros evidencia que, sob condições de baixa oxigenação, o fósforo retido nos sedimentos pode ser remobilizado

para a coluna d'água, intensificando os processos de eutrofização [35, 36]. Nesse contexto, destaca-se a importância de estudos experimentais que simulem diferentes condições ambientais, considerando as variações sazonais e os efeitos das mudanças climáticas, com o objetivo de prever e mitigar os impactos sobre os ecossistemas aquáticos da região.

Esses resultados ressaltam a urgência da adoção de práticas de manejo mais eficientes, capazes de reduzir a carga de nutrientes lançada no ambiente e de manter o equilíbrio ecológico nos sistemas de produção aquícola. Ao mesmo tempo, evidenciam a necessidade de políticas públicas que incentivem a sustentabilidade na carcinicultura, promovendo ações integradas de monitoramento, regulação ambiental e educação para o uso responsável dos recursos hídricos.

Um dos principais desafios enfrentados pela carcinicultura é conciliar a intensificação da produção com a conservação ambiental, por meio da adoção de práticas que minimizem a liberação de resíduos ricos em nutrientes e promovam maior eficiência econômica [29]. Essa articulação entre manejo e governança é essencial para que a atividade avance em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente aqueles voltados à proteção da água e da vida aquática. Os achados do presente estudo dialogam diretamente com os ODS propostos pela Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas, especialmente os ODS 6 (água potável e saneamento) e ODS 14 (vida na água) [37].

As concentrações elevadas de nitrogênio e fósforo detectadas nos sedimentos dos viveiros de camarão reforçam a necessidade da implementação de estratégias eficazes para o controle da poluição difusa e do enriquecimento excessivo de nutrientes nos ambientes aquáticos. A aplicação de boas práticas de manejo aquícola, como o uso racional de fertilizantes e a otimização da alimentação, contribui diretamente para o alcance da meta 6.3, que busca reduzir substancialmente a poluição hídrica e o despejo de substâncias perigosas nos corpos d'água. Simultaneamente, essas ações também atendem à meta 14.1, voltada à prevenção e à redução da poluição marinha, inclusive da eutrofização, promovendo a proteção e a recuperação dos ecossistemas costeiros e estuarinos ameaçados pela degradação ambiental.

4. CONCLUSÃO

Os resultados desse estudo mostram que há grandes diferenças na qualidade dos sedimentos entre os rios e os viveiros de cultivo de camarão na região do Baixo São Francisco. Nos viveiros, os sedimentos têm níveis mais altos de nutrientes, porque há excesso de matéria orgânica oriunda de restos alimentares, bem como de excrementos dos camarões. Altos níveis de nutrientes promovem o aumento da concentração de compostos nitrogenados e fósforo, e criam condições que favorecem a eutrofização, visto que se trata de macronutrientes essenciais às estruturas celulares. A eutrofização por sua vez afeta o equilíbrio dos ecossistemas aquáticos alterando parâmetros de qualidade e impactando diretamente na biodiversidade, podendo levar a anoxia do ambiente aquático e por consequência a perda de organismos e em casos mais graves a morte do próprio ecossistema. Neste sentido reforça-se a necessidade de manejo e controle de lançamentos de cargas orgânicas indiferentemente da origem destas.

A relação forte entre fósforo e matéria orgânica mostra que a decomposição dessa matéria libera mais nutrientes nos sedimentos dos viveiros. Esse processo se intensifica quando há menos oxigênio no ambiente. Já nos sedimentos dos rios, os níveis desses nutrientes são mais baixos, o que demonstra que a forma como se cultiva o camarão afeta diretamente os sedimentos. Porém deve se levar em consideração que ambientes lóticos são favorecidos pelo movimento das águas que favorecem a oxidação de compostos químicos o que não ocorrem em sistemas lênticos que é o caso dos criatórios de camarões. Os resultados obtidos mostram a importância de usar práticas de manejo mais eficientes, como regular melhor o fornecimento de ração e usar tecnologias de biofiltração, para reduzir a acumulação de nutrientes. Além disso, os dados deste estudo podem subsidiar o desenvolvimento de políticas públicas que protejam os ecossistemas aquáticos e promovam um cultivo mais sustentável de camarão na região do Baixo São Francisco.

5. AGRADECIMENTOS

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), e ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). Estendo meus agradecimentos ao Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (CBHSF). Reconheço, ainda, a colaboração do Centro de Referência em Aquicultura e Recursos Pesqueiros de Itiúba (5^a SR/CODEVASF). Por fim, agradeço à Fundação de Apoio à Pesquisa e à Inovação Tecnológica do Estado de Sergipe (FAPITEC/SE).

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Soro MP, N'goran KM, Ouattara AA, Yao KM, Kouassi NLB, Diaco T. Nitrogen and phosphorus spatio-temporal distribution and fluxes intensifying eutrophication in three tropical rivers of Côte d'Ivoire (West Africa). *Mar Pollut Bull.* 2022 Jan;186(114391):1-20. doi: 10.1016/j.marpolbul.2022.114391
2. Konzen IS, Gamboa A, Gaida W, da Rosa GM, Flach KA, Bones UA, et al. Impact of anthropogenic activities and land use on water quality: an analysis in microbasins in Rio Grande do Sul, Brazil. *Hygeia.* 2024 Mar;20(e2070):1-17. doi: 10.14393/Hygeia2071633
3. Ji L, Li Y, Zhang G, Bi Y. Anthropogenic disturbances have contributed to degradation of river water quality in arid areas. *Water* 2021 Nov;13(22):1-17. doi: 10.3390/w13223305
4. Lønborg C, Müller M, Butler ECV, et al. Nutrient cycling in tropical and temperate coastal waters: is latitude making a difference?. *Estuar Coast Shelf Sci.* 2021 Jan;262(107571):1-17. doi: 10.1016/j.ecss.2021.107571
5. Siriwardana H, Samarasekara RSM, Anthony D, Vithanage M. Measurements and analysis of nitrogen and phosphorus in oceans: Practice, frontiers, and insights. *Heliyon.* 2024 Jan;10(e28182):1-17. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e28182
6. Akinnawo SO. Eutrophication: causes, consequences, physical, chemical and biological techniques for mitigation strategies. *Environ Chall.* 2023 Jan;12(100733):1-18. doi: 10.1016/j.envc.2023.100733
7. Andrade C, de Souza I, da Silva L. The future sustainability of the São Francisco River Basin in Brazil: A case study. *Sustainab* 2024 Jun;16(13):1-26. doi: 10.3390/su16135521
8. Lima CES, Silva MXM, Rocha SMG, Silveira CS. Anthropic changes in land use and land cover and their impacts on the hydrological variables of the São Francisco River Basin, Brazil. *Sustainability.* 2022 Jan;14(19):1-30. doi: 10.3390/su141912176
9. Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba (CODEVASF). Resumo executivo do relatório final: Mapeamento temático de uso da terra no Baixo São Francisco. Brasília (DF): CODEVASF; 2002. Disponível em: <https://cdn.agenciapeixevivo.org.br/media/2019/06/Mapeamento-Tem%C3%A1tico-de-Uso-da-Terra-no-Baixo-SF.pdf>
10. Franco I, Araujo ARR, Franke CR. Aspectos socioambientais da aquicultura na região do Baixo São Francisco, Sergipe, Brasil. *Rev Meio Amb Sustent.* 2018 Jan-Jun;14 (7):6-25.
11. Iber BT, Kasan NA. Recent advances in shrimp aquaculture wastewater management. *Heliyon.* 2021 Jan;7(11):1-9. doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e08283
12. Lu J, Newham M, Chuang A, Burton J, Garzon-Garcia A, Burford MA. Factors driving impacts of different nitrogen sources on freshwater and marine green algae. *Mar Pollut Bull.* 2024 Jan;208(116991):1-10. doi: 10.1016/j.marpolbul.2024.116991
13. Soares EC, Silva JV, Navas R. O Baixo São Francisco [recurso eletrônico]: Características ambientais e sociais. 1. ed. Maceió (AL): EDUFAL; 2020.
14. Xavier LS, Pires RAS, Gomes MVT, Passos EA, Silva JM, Silva IS, et al. Evaluation of metals in surface sediments from shrimp farming areas in the estuarine region of the Baixo São Francisco, in Northeastern Brazil. *Reg Stud Mar Sci.* 2025 Jan;81(103930):1-9. doi: 10.1016/j.rsma.2024.103930
15. Ünlü S, Topçuoğlu S, Alpar B, Kirbaşoğlu Ç, Yilmaz YZ. Heavy metal pollution in surface sediment and mussel samples in the Gulf of Gemlik. *Environ Monit Assess.* 2008 Jan;144:169-78. doi: 10.1007/s10661-007-9986-6
16. Macêdo JAB. Métodos laboratoriais de análises físico-químicas e microbiológicas. 3. ed. Belo Horizonte (MG): Jorge Macêdo; 2005.
17. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). ABNT NBR 13347: Determinação de nitrogênio total – método kjedahl (NTK). Rio de Janeiro (RJ): ABNT; 2015.

18. American Public Health Association (APHA). Method 4500-P: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 18. ed. Washington (US): APHA; 1992. Disponível em: <https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/002/apha.method.4500-p.1992.pdf>.
19. Miyazawa M, Pavan MA, de Oliveira EL, Ionashiro M, Silva AK. Gravimetric determination of soil organic matter. *Braz Arch Biol Technol.* 2000 Jan;43(5):475-78. doi: 10.1590/S1516-89132000000500005
20. Carmo DL, Silva CA. Quantification methods of carbon and organic matter in organic residues. *Rev Bras Ciênc Solo.* 2012 Aug;36(4):1211-20. doi: 10.1590/S0100-06832012000400015
21. Tang M, Deng Q, Li X, Cao X, Zhang Z, Zhou Y, et al. The effect of natural materials used as sediment remediation on phosphorus and nitrogen control in a mesocosm. *Environ Sci Eur.* 2020 Jan;32(90):1-14. doi: 10.1186/s12302-020-00366-x
22. Akoglu H. User's guide to correlation coefficients. *Turk J Emerg Med.* 2018 Aug;18(3):91-3. doi: 10.1016/j.tjem.2018.08.001
23. Tian Y, Chen G, Lu H, Zhu H, Ye Y. Effects of shrimp pond effluents on stocks of organic carbon, nitrogen and phosphorus in soils of Kandelia obovata forests along Jiulong River Estuary. *Mar Pollut Bull.* 2019 Jan;149(110657):1-8. doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.110657
24. Pérez A, Machado W, Gutiérrez D, Saldarriaga MS, Sanders CJ. Shrimp farming influence on carbon and nutrient accumulation within Peruvian mangroves sediments. *Estuar Coast and Shelf Scie.* 2020 Sept;243(106879):1-10. doi: 10.1016/j.ecss.2020.106879
25. Souza RAL, Takata R, Souza ASL, Silva Junior ML, Silva FNL. Caracterização de sedimentos em viveiros de piscicultura na Amazônia Oriental, Brasil. *Res Society and Deval.* 2021 Jan;10(1):1-10. doi: 10.33448/rsd-v10i1.11815
26. Ferreira V, Elosegi A, Tiegs SD, Von Schiller D, Young R. Organic matter decomposition and ecosystem metabolism as tools to assess the functional integrity of streams and rivers – A systematic review. *Water.* 2020 Jan;12(12):1-40. doi: 10.3390/w12123523
27. Steeby JA, Hargreaves JA, Tucker CS, Kingsbury S. Accumulation, organic carbon and dry matter concentration of sediment in commercial channel catfish ponds. *Aquacult Eng.* 2004 May;30(3-4):115-26. doi: 10.1016/j.aquaeng.2003.10.00
28. Xavier LS, da Silva JM, de Jesus, AS, Pereira JB, de Jesus AS, et al. Contamination status and evaluation of metal pollution indexes in sediments from shrimp farming in the Lower São Francisco River region, Northeast Brazil. *J Soils Sediments.* 2025 Jul;1:1-19. doi: 10.1007/s11368-025-04090-y
29. Liu J, Myat T. Contaminants and heavy metals along the mangrove area of dongzhai harbor, china: distribution and assessment. *SN Appl Sci.* 2021 Sep;3:1-12. doi: 10.1007/s42452-021-04802-2
30. Anandhu A, Book R, Ozbay G. A novel framework to represent hypoxia in coastal systems. *Land.* 2025 May;14(6):1-31. doi: 10.3390/land14061169
31. Tahim EF, Damaceno MN, Araujo IF. Trajetória tecnológica e sustentabilidade ambiental na cadeia de produção da carcinicultura no Brasil. *RESR.* 2019 Jan-Mar;57(1):93-108. doi: 10.1590/1234-56781806-94790570106
32. Figueiredo MCB, Araujo LFP, Gomes RB, Rosa MF, Paulino WD, Morais LFS. Impactos ambientais do lançamento de efluentes da carcinicultura em águas interiores. *Eng Sanit Ambient.* 2005 Abr-Jun;10(2):167-74. doi: 10.1590/S1413-41522005000200011
33. Devlin M, Brodie J. Nutrients and eutrophication. In: Reichelt-Brushett A, editor. *Marine pollution – monitoring, management and mitigation*. Cham : Springer Textbooks in Earth Sciences, Geography and Environment; 2023. p. 75-100. doi: 10.1007/978-3-031-10127-4_4
34. Fink JR, Inda AV, Tiecher T, Barrón V. Iron oxides and organic matter on soil phosphorus availability. *Cienc Agrotec.* 2016 Jan;40(4):369-79. doi: 10.1590/1413-70542016404023016
35. Kor K, Ershadifar H, Ghazilou A, Koochaknejad E. Seasonal variations, potential bioavailability, and ecological risk of phosphorus species in the coastal sediments of the Makran. *Mar Pollut Bull.* 2021 Jan;173(113125):1-10. doi: 10.1016/j.marpolbul.2021.113125
36. Silva RAS, Oliveira GAA, Silva JM, Silva IS, Garcia CAB, Gomes MVT, et al. Evaluation of shrimp farming impacts on the water quality of the Lower São Francisco Watershed Region, Brazil. *Reg Stud Mar Sci.* 2025 Jan;81(103933):1-10. doi: 10.1016/j.rsma.2024.103933
37. Nações Unidas Brasil (ONU Brasil). Os objetivos de desenvolvimento sustentável no Brasil. [Internet]; 2025 [citado em 25 jul 2025]. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>.