



Indicadores PEIRS de sustentabilidade para a carcinicultura em águas interiores no semiárido brasileiro

PEIRS Indicators of Sustainability for Inland Shrimp Farming in the Brazilian Semi-Arid Region

1. Jaisse Marianne de Oliveira Pereira  <https://orcid.org/0009-0002-5869-5565>
1. Universidade Federal Rural do Semi-Árido  Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil
2. Grazielle Ferreira de Oliveira  <https://orcid.org/0009-0002-2687-2504>
2. Universidade Federal Rural do Semi-Árido  Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil
3. Roberta Crhistiane Maltas da Silva  <https://orcid.org/0009-0004-2981-163X>
3. Universidade Federal Rural do Semi-Árido  Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil
4. Jônната Fernandes de Oliveira  <https://orcid.org/0000-0001-7325-435X>
4. Universidade Federal Rural do Semi-Árido  Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil
5. Joel Medeiros Bezerra  <https://orcid.org/0000-0002-8150-4125>
5. Universidade Federal Rural do Semi-Árido  Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil
6. Rogério Taygra Vasconcelos Fernandes  <https://orcid.org/0000-0002-2901-3986>
6. Universidade Federal Rural do Semi-Árido  Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil

Autor de correspondência: marianne.p.liberian@gmail.com

RESUMO

A carcinicultura em águas interiores do semiárido potiguar tem se expandido de forma crescente, impulsionada pelo potencial econômico da atividade, mas acompanhada de desafios ambientais relacionados ao uso intensivo de água e à geração de efluentes. Este estudo qualitativo, de caráter descritivo e exploratório, aplicou o modelo PEIRS, composto pelas dimensões Pressão, Estado, Impacto, Resposta e Sustentabilidade, com o objetivo de identificar e analisar 15 indicadores socioambientais aplicáveis à aquicultura continental no Rio Grande do Norte. Os resultados evidenciaram que os indicadores de pressão e impacto, especialmente o consumo de água, o volume de efluentes e as alterações na fertilidade do solo, representam riscos significativos em um território marcado por escassez hídrica e elevada sensibilidade ecológica. Em contrapartida, estratégias como o reúso hídrico por bioflocos, a impermeabilização de viveiros, as certificações ambientais e o uso de fitorremediação demonstraram potencial para mitigar os efeitos adversos da atividade. A capacitação técnica dos trabalhadores também se mostrou fundamental para o fortalecimento da governança local e para a adoção de práticas produtivas mais eficientes. Conclui-se que o modelo PEIRS constitui uma ferramenta estratégica e replicável para sistematizar a sustentabilidade da carcinicultura e apoiar políticas públicas adaptadas às condições do semiárido brasileiro.

Palavras-chave: Governança hídrica; Monitoramento ambiental; Indicadores socioambientais.

ABSTRACT

Inland shrimp farming in the semi-arid region of Rio Grande do Norte has expanded steadily, driven by the economic potential of the activity but accompanied by environmental challenges related to intensive water use and effluent generation. This qualitative, descriptive, and exploratory study applied the PEIRS model, composed of the Pressure, State, Impact, Response, and Sustainability dimensions, to identify and analyze 15 socio-environmental indicators relevant to continental aquaculture in northeastern Brazil. The results showed that the pressure and impact indicators, especially water consumption, effluent volume, and changes in soil fertility, represent significant risks in a territory marked by water scarcity and high ecological sensitivity. Conversely, strategies such as water reuse through biofloc systems, pond impermeabilization, environmental certifications, and the use of phytoremediation demonstrated potential to mitigate adverse environmental effects. Technical training of workers also proved essential to strengthen local governance and promote more efficient and sustainable production practices. The study concludes that the PEIRS model is a strategic and replicable tool for systematizing sustainability in shrimp farming and supporting public policies adapted to the specific conditions of the Brazilian semi-arid region.

Keywords: Water governance; Environmental monitoring; Socio-environmental indicators.

Introdução

A carcinicultura no semiárido potiguar tem avançado sobre áreas interioranas, impulsionada pela disponibilidade de águas subterrâneas de baixa salinidade captadas por poços rasos e pela utilização de águas estuarinas nas zonas de transição entre rios e mar. Essa expansão territorial resulta da adaptabilidade da atividade às condições edafoclimáticas da região e da busca por alternativas econômicas em cenários marcados pela escassez hídrica (Silva; Camargo, 2022). Segundo o IBGE (2023), a produção de camarão no estado do Rio Grande do Norte ultrapassou 24,7 mil toneladas em 2022, com destaque para o município de Pendências, principal polo produtor. A intensificação produtiva eleva a pressão sobre os recursos hídricos subterrâneos, ainda pouco regulados no setor aquícola, e demanda mecanismos de avaliação capazes de considerar, de forma integrada, seus efeitos ambientais e sociais.

No campo normativo, a Resolução nº 312/2002 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) define critérios para o licenciamento ambiental de empreendimentos de carcinicultura em zonas costeiras. A norma proíbe instalações em áreas de manguezal e determina que empreendimento com área superior a 50 hectares ou situados em zonas ambientalmente frágeis apresentem estudos de impacto

ambiental (Brasil, 2002). Também exige outorga de uso da água e a destinação de área para Reserva Legal, conforme estabelecido pela Lei 12.651/2011 (Novo Código Florestal), alinhada aos princípios da precaução e da prevenção. Paralelamente, políticas públicas estaduais têm incentivado a interiorização da carcinicultura como estratégia de desenvolvimento regional.

Em parceria com o Sebrae/RN, o Governo do Estado identificou municípios como Apodi e Jucurutu como áreas favoráveis ao desenvolvimento da atividade, considerando atributos do solo, disponibilidade hídrica e condições climáticas (Rio Grande do Norte, 2024). Entretanto, a distância entre os instrumentos normativos e sua aplicação cotidiana evidencia fragilidades institucionais nos processos de fiscalização e monitoramento, especialmente em municípios com estrutura administrativa limitada.

Embora gere emprego e renda, a atividade tem sido associada a impactos sobre ecossistemas e comunidades locais. Figueirêdo et al. (2006) relatam ocupação de Áreas de Preservação Permanente, salinização de solos e degradação da qualidade da água destinada ao consumo humano, decorrentes do uso intensivo de insumos químicos, do descarte inadequado de efluentes e da ocupação de áreas ambientalmente vulneráveis. Vicente et al. (2016) apontam riscos à saúde de trabalhadores expostos a produtos químicos e fertilizantes, muitas vezes sem equipamentos de proteção individual, além da perda de autonomia de comunidades tradicionais deslocadas e da redução na segurança alimentar. Os estudos convergem ao indicar a urgência de modelos produtivos que articulem viabilidade econômica com proteção ambiental e social, apoiados por regulação efetiva e tecnologias adequadas.

Nesse contexto, torna-se necessário adotar modelos de gestão que favoreçam a exploração racional dos recursos naturais e permitam compatibilizar a atividade produtiva com o desenvolvimento sustentável, mediante processos sistemáticos de avaliação. Os indicadores de sustentabilidade surgem como ferramentas essenciais para acompanhar os efeitos das atividades humanas sobre o ambiente e orientar decisões públicas. Van Bellen (2005) destaca que tais indicadores permitem organizar dados heterogêneos em dimensões inter-relacionadas de natureza ambiental, social e econômica, facilitando o diagnóstico de situações complexas.

A metodologia PEIRS (Pressão, Estado, Impacto, Resposta e Sustentabilidade) se insere nessa abordagem e deriva do modelo *PRESSURE–STATE–RESPONSE* (PSR), proposto pela Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE, 1993). Originalmente aplicado a avaliações nacionais de desempenho ambiental, o modelo foi ampliado pela incorporação das dimensões de Impacto e Sustentabilidade, o que aumenta sua capacidade analítica em atividades produtivas sujeitas a pressões socioambientais, como a carcinicultura. Em estudo semelhante, Kimpara, Zadjband e Valenti (2012) aplicaram indicadores derivados da abordagem PSR para avaliar a sustentabilidade da aquicultura brasileira, demonstrando sua pertinência em contextos de elevada pressão ambiental. Essa abordagem é particularmente relevante em regiões com restrições hídricas e baixa institucionalidade, como o semiárido potiguar.

A expansão da carcinicultura em ambientes de baixa salinidade ocorre majoritariamente sobre águas interiores, onde a captação de recursos hídricos subterrâneos apresenta riscos cumulativos ainda pouco compreendidos. Em áreas como o Alto Oeste Potiguar, onde a disponibilidade hídrica é limitada e a água subterrânea constitui a principal fonte de abastecimento humano e agrícola, a intensificação da captação para fins produtivos ameaça os processos de recarga dos aquíferos e acirra disputas entre diferentes usos da água. Farias (2016), ao analisar o município de Apodi (RN), identificou que a exploração contínua desses mananciais reduz a disponibilidade hídrica para usos essenciais, ampliando conflitos locais e comprometendo a resiliência socioambiental de comunidades rurais.

Além das disputas pelo acesso à água, os impactos sobre a qualidade dos recursos subterrâneos também são relevantes. Silva e Pierri (2022) apontam que o uso recorrente de fertilizantes e o descarte inadequado de efluentes favorecem a contaminação dos lençóis freáticos. A infiltração de compostos como nitrogênio e fósforo compromete o uso doméstico da água e reduz a resiliência dos sistemas hidrogeológicos, entendidos como estruturas físicas e funcionais responsáveis pelo armazenamento e fluxo das águas subterrâneas. A ausência de monitoramento ambiental contínuo e a limitada capacidade técnica dos órgãos fiscalizadores agravam esse cenário e dificultam o controle dos impactos ao longo do tempo.

Considerando esse panorama, o presente estudo teve como objetivo elencar os principais indicadores socioambientais associados ao setor de carcinicultura em águas continentais na região semiárida do estado do Rio Grande do Norte.

Metodologia

O Alto Oeste Potiguar desempenha papel relevante na economia do Rio Grande do Norte e está inserido no contexto climático do semiárido. A região enfrenta limitações históricas relacionadas à disponibilidade hídrica, que constitui seu principal desafio, embora apresente potencial expressivo de desenvolvimento socioeconômico em atividades como a agricultura irrigada e a carcinicultura. A modificação da paisagem e a exposição dos solos configuram aspectos geomorfológicos que favorecem processos erosivos, intensificados por ações antrópicas que contribuem para o déficit de recarga dos aquíferos, o assoreamento de cursos d'água e o aumento do escoamento superficial.

De acordo com Tôrres (2022), as águas subterrâneas provenientes dos aquíferos Aluvionar e Açu constituem a principal fonte hídrica para o abastecimento humano no município de Apodi. O aquífero Jandaíra, por sua vez, apresenta elevado potencial hídrico associado à fruticultura irrigada. As atividades econômicas desenvolvidas na região podem gerar desequilíbrios no ambiente, especialmente diante do risco de contaminação dos aquíferos, que interfere na qualidade da água e nos usos predominantes. Nesse cenário, as intervenções humanas tendem a exercer maior influência que os processos naturais, tornando a gestão hídrica ainda mais crítica.

O estudo é de natureza qualitativa, descritiva e exploratória, com foco no semiárido potiguar, área onde a carcinicultura tem se expandido para além das zonas costeiras, alterando padrões de uso e ocupação da terra e da água. O levantamento de informações foi realizado entre outubro de 2023 e março de 2024 e incluiu revisão bibliográfica e documental em plataformas como SciELO e Google Scholar, além de repositórios institucionais da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) e da Universidade Federal do Ceará (UFC). Complementarmente, foram consultados

documentos técnicos e bases estatísticas produzidos por órgãos que desenvolvem estudos relacionados ao meio ambiente e aos recursos hídricos.

Os critérios de seleção privilegiaram artigos científicos com contribuições relevantes para a discussão de indicadores aplicados à avaliação sistemática da carcinicultura e de seus impactos socioambientais. As buscas empregaram palavras-chave como “indicadores de sustentabilidade na economia semiárida”, “o semiárido e a carcinicultura”, “a interiorização da carcinicultura”, “impactos da carcinicultura na biodiversidade” e “a carcinicultura na bacia do rio Apodi-Mossoró”.

A pesquisa foi estruturada com base no modelo analítico PEIRS, composto pelas dimensões Pressão, Estado, Impacto, Resposta e Sustentabilidade. Esse modelo permite identificar vetores de pressão sobre os recursos naturais, caracterizar o estado dos elementos afetados, mensurar efeitos ambientais e sociais e avaliar a capacidade de resposta institucional. Sua aplicação à carcinicultura em águas interiores do semiárido oferece uma organização sistemática de indicadores capazes de representar a complexidade das interações entre a produção aquícola, os recursos hídricos e a sustentabilidade ecológica e social.

A seleção e a estruturação dos indicadores seguiram quatro critérios metodológicos principais: relevância temática, viabilidade de mensuração, aplicabilidade regional e distribuição equilibrada entre as dimensões do modelo PEIRS (Tabela 1). Esses critérios orientaram a adaptação dos indicadores às especificidades ambientais, hidrológicas e socioeconômicas da região semiárida.

Tabela 1 – Critérios para seleção e adaptação dos indicadores PEIRS para carcinicultura em águas continentais.

Critério	Descrição
Relevância temática	Conexão direta com impactos recorrentes da carcinicultura em águas interiores.
Viabilidade de mensuração	Existência de dados secundários ou possibilidade de estimativas confiáveis e interpretáveis.
Aplicabilidade regional	Adequação ao contexto ambiental, hídrico e socioeconômico do semiárido potiguar.
Distribuição equilibrada	Alocação proporcional dos indicadores nas dimensões do modelo PEIRS, evitando redundâncias conceituais.

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Com base nesses critérios, foram selecionados 15 indicadores distribuídos proporcionalmente entre as cinco categorias do modelo PEIRS, de modo a representar de forma abrangente e não redundante cada dimensão analisada. A definição desse conjunto considerou sua capacidade de sintetizar aspectos essenciais da atividade aquícola e dialogar com referenciais consolidados na literatura, em consonância com as sistematizações propostas por Kimpara, Zadjband e Valenti (2012). A organização desses indicadores e suas respectivas fontes encontra-se apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – Indicadores por dimensão do modelo PEIRS e respectivos autores de referência.

Dimensão	Indicador	Fonte de Referência
Pressão	Consumo de água (m ³ /kg)	Lima; Rivera; Focken (2012)
	Introdução de espécies exóticas (%)	Gesteira; Paiva (2003)
	Uso de insumos químicos (g/kg)	Lima; Rivera; Focken (2012)
Impacto	Área ocupada pelos viveiros (km ²)	Sá et al. (2013)
	Volume de efluentes gerados (m ³ /ano)	Ribeiro et al. (2016)
	Fertilidade do solo (salinidade, pH)	Ribeiro et al. (2016)
Estado	Índice de Qualidade da Água (IQA)	Sá et al. (2013)
	Disponibilidade hídrica (m ³)	Lima; Rivera; Focken (2012)
	Mortandade de espécies nativas (%)	Gesteira; Paiva (2003)
Resposta	Volume de efluente tratado (m ³ /ano)	Ribeiro et al. (2016)
	Viveiros impermeabilizados	Widiyanti (2021)
	Certificações ambientais obtidas	Bush et al. (2013)
Sustentabilidade	Capacitação em manejo sustentável	Valenti et al. (2018)
	Reuso de água por bioflocos (m ³)	Ruiz-Martinez et al. (2012)
	Fitorremediação (área em m ²)	Chiaiese et al. (2011); Richards; Mullins (2013)

Fonte: Elaborado pelos autores com base na literatura científica (2025).

Resultados e discussão

Os indicadores selecionados para a composição do modelo PEIRS foram construídos a partir de dados extraídos de documentos técnicos, bases estatísticas e estudos científicos voltados à carcinicultura em ambientes de baixa salinidade. A literatura consultada permitiu identificar tendências, lacunas e impactos recorrentes da atividade, consolidando uma matriz analítica coerente com o contexto hidroambiental do semiárido.

Farias (2016) contribuiu de forma decisiva para os indicadores associados à dimensão Pressão, sobretudo aqueles relacionados ao consumo de água, ao risco de salinização dos solos e à qualidade dos corpos hídricos. Seu estudo, realizado no município de Apodi, demonstrou que a exploração contínua de aquíferos em regiões semiáridas provoca redução na disponibilidade hídrica e intensifica conflitos entre usos domésticos, agrícolas e aquícolas. A partir dessa base, o consumo de água e a dependência de insumos químicos foram considerados variáveis centrais para representar a pressão exercida pelo setor.

Os trabalhos de Figueirêdo et al. (2005) e Figueirêdo et al. (2006) forneceram subsídios específicos para a dimensão Impacto, ao documentarem alterações na fertilidade do solo, degradação da qualidade da água e aumento da carga orgânica lançada em ambientes receptores. Em ambos os estudos, os autores evidenciaram que efluentes oriundos da carcinicultura, quando não tratados adequadamente, desencadeiam processos de eutrofização, redução de oxigênio dissolvido e salinização do solo circundante. Esses elementos justificaram a inclusão dos indicadores de volume de efluentes gerados e da análise físico-química dos solos.

A dimensão Estado também se apoia em evidências empíricas robustas. Ribeiro et al. (2016) demonstraram que os ciclos produtivos da carcinicultura alteram a composição química dos sedimentos e afetam comunidades macrobênticas, reforçando a importância de acompanhar a disponibilidade hídrica e a qualidade da água por meio de ferramentas como o Índice de Qualidade da Água. Esses dados expressam a condição ambiental dos sistemas e o grau de alteração provocado pela atividade.

Rocha (2011) ofereceu suporte teórico-social para os indicadores relacionados à introdução de espécies exóticas e à mortalidade de espécies nativas. Sua análise sobre a carcinicultura brasileira mostra que escapes acidentais de espécies cultivadas repercutem diretamente na ecologia de ecossistemas adjacentes, afetando cadeias alimentares e estruturas produtivas locais. Essa perspectiva socioeconômica complementa as dimensões ambientais ao evidenciar que desequilíbrios ecológicos resultam em perdas culturais, econômicas e sociais para comunidades tradicionais.

A dimensão Resposta foi estruturada a partir de evidências da literatura nacional e internacional. Widiyanti (2021) apresenta revisão abrangente das práticas de intensificação sustentáveis, destacando o papel da impermeabilização de viveiros na prevenção de infiltrações e na redução do risco de contaminação de aquíferos. Ribeiro et al. (2016) reforçam a importância do tratamento de efluentes na mitigação dos impactos sobre sedimentos e comunidades aquáticas. Bush et al. (2013) discutem a relevância das certificações ambientais como instrumentos de governança e incentivo à adoção de boas práticas na aquicultura. Dessa forma, a dimensão Resposta integra indicadores que expressam tanto ações estruturais quanto instrumentos institucionais.

A dimensão Sustentabilidade foi fundamentada em abordagens que envolvem tecnologias limpas e inovações no manejo. Valenti et al. (2018) destacam o papel da capacitação técnica em manejo sustentável como componente essencial para melhorar a eficiência produtiva e reduzir externalidades negativas. Ruiz-Martinez et al. (2012) demonstram a viabilidade do reaproveitamento de água através de cultivo de microalgas alimentado por efluentes tratados. Chiaiese et al. (2011) e Richards e Mullins (2013) apresentam uso da fitorremediação como estratégia eficaz para remoção de nutrientes, metais e compostos orgânicos em ambientes aquáticos. Essas contribuições justificam a presença de indicadores voltados ao reuso de água e à adoção de técnicas de fitorremediação.

A utilização de modelos baseados em indicadores, como o PEIRS, requer atenção às suas limitações metodológicas. Van Bellen (2005) discute que sistemas de indicadores dependem da disponibilidade de dados confiáveis e podem simplificar fenômenos complexos se utilizados de forma descontextualizada. Por essa razão, os indicadores aqui propostos foram selecionados a partir de critérios de relevância temática, aplicabilidade regional e capacidade de mensuração, garantindo aderência ao contexto hidroambiental do semiárido e evitando redundâncias conceituais.

Nesse sentido, a Tabela 3 organiza os 15 indicadores selecionados segundo sua dimensão analítica e função, proporcionando uma visão integrada das pressões, estados, impactos, respostas e condições de sustentabilidade associadas à carcinicultura em águas interiores do semiárido brasileiro. Essa estruturação permite compreender a

atividade em sua complexidade socioambiental e oferece um instrumento metodológico aplicável tanto ao Rio Grande do Norte quanto a outras regiões do semiárido nacional.

Tabela 3 - Indicadores da metodologia PEIRS aplicados a carcinicultura de águas continentais no semiárido.

Dimensão	Indicador	Função
Pressão	Consumo de água (m ³ /kg)	Quantificar o volume de água utilizado por quilo de camarão produzido (pegada hídrica azul) (ISO 14046).
	Introdução de espécies exóticas (%)	Estimar a ocorrência de espécies exóticas e seus impactos sobre o ecossistema local.
	Uso de insumos químicos (g/kg)	Avaliar o volume de insumos aplicados nos viveiros por unidade de produção.
Impacto	Área ocupada pelos viveiros (km ²)	Determinar o uso territorial e sua pressão sobre os ecossistemas.
	Volume de efluentes gerados (m ³ /ano)	Calcular a carga orgânica despejada pelos viveiros, considerando a capacidade de assimilação dos corpos hídricos receptores.
	Fertilidade do solo (salinidade/pH)	Monitorar alterações nas propriedades físico-químicas do solo.
Estado	Índice de Qualidade da Água (IQA)	Avaliar a adequação das águas à produção aquícola e sua qualidade ambiental.
	Disponibilidade hídrica (m ³)	Verificar a capacidade dos sistemas hídricos em sustentar a atividade mediante balanço hídrico.
	Mortandade de espécies nativas (%)	Relacionar eventos de mortalidade a alterações ambientais induzidas pela atividade.
Resposta	Volume de efluente tratado (m ³ /ano)	Quantificar o volume de efluentes submetidos a processos de tratamento.
	Viveiros impermeabilizados	Identificar práticas estruturais que evitam infiltrações e contaminação do solo.
	Certificações ambientais obtidas	Indicar o grau de conformidade ambiental dos empreendimentos.
Sustentabilidade	Capacitação em manejo sustentável	Avaliar o nível de qualificação técnica da mão de obra e a difusão de boas práticas.
	Reuso de água por bioflocos (m ³)	Medir a eficiência no reaproveitamento hídrico com uso de tecnologia sustentável.
	Fitorremediação (área em m ²)	Verificar a adoção de técnicas naturais para o tratamento de efluentes.

Fonte: Elaborado pelos autores com base na literatura científica (2025).

O uso dos indicadores selecionados permite construir diagnósticos consistentes sobre a carcinicultura em ambientes de baixa salinidade, contribuindo para a previsão de impactos socioambientais e para o monitoramento contínuo das transformações decorrentes da expansão produtiva. Esse conjunto de indicadores também possibilita identificar alterações na estrutura ambiental e orientar intervenções de gestão compatíveis com as condições específicas do semiárido.

O consumo de água constitui um dos principais indicadores da dimensão Pressão, especialmente em regiões com disponibilidade hídrica limitada. Farias (2016) demonstrou que a carcinicultura instalada em ambientes de baixa salinidade no semiárido cearense apresenta elevada demanda hídrica por unidade de produção, o que exerce forte pressão sobre comunidades rurais que dependem simultaneamente da água para abastecimento humano, agricultura e atividades econômicas diversas. Esses resultados reforçam a necessidade de acompanhar o volume de água empregado por quilo de camarão produzido, parâmetro também reconhecido pela ABCCAM (2023), que estima consumo médio de 30.000 m³ por hectare a cada ciclo produtivo. Esses dados destacam a importância de avaliar a eficiência hídrica da atividade e sua compatibilidade com a resiliência dos sistemas hidrogeológicos do semiárido.

A introdução de espécies exóticas, como *Litopenaeus vannamei*, também representa pressão relevante sobre ecossistemas fragilizados. Rocha (2011) aponta que escapes acidentais geram competição com espécies nativas, alterações na cadeia trófica e redução da biodiversidade, acarretando impactos ecológicos e econômicos sobre comunidades pesqueiras artesanais. A literatura evidencia que mudanças na composição ictiofaunística afetam o equilíbrio das redes alimentares e podem comprometer a sustentabilidade dos ecossistemas estuarinos e continentais.

Outro indicador de Pressão refere-se ao uso intensivo de insumos químicos, cuja aplicação pode contribuir para desequilíbrios ambientais, como a contaminação do solo e da água. Figueirêdo et al. (2005) observaram que fertilizantes, ração não consumida e resíduos químicos acumulam-se nos sedimentos e podem ser transportados para cursos d'água, elevando os riscos de eutrofização e alteração da biota local.

Na dimensão Impacto, o volume de efluentes gerados e as mudanças na fertilidade do solo revelam a magnitude das transformações ambientais provocadas pela atividade. Figueirêdo et al. (2005) identificaram que efluentes da carcinicultura apresentam elevada concentração de matéria orgânica, nitrogênio e fósforo, favorecendo a proliferação de algas e a redução de oxigênio dissolvido nos corpos receptores. Esses processos aceleram a eutrofização e comprometem a qualidade ambiental. Figueirêdo et al. (2006) constataram que a infiltração de efluentes influencia

a salinização e acidificação dos solos adjacentes, reduzindo sua aptidão agrícola e comprometendo usos futuros dessas áreas. Ribeiro et al. (2016) complementam esse panorama ao demonstrar mudanças significativas na composição da fauna bentônica e na química dos sedimentos em viveiros de produção, o que evidencia a persistência dos impactos mesmo após ciclos produtivos sucessivos.

Os indicadores da dimensão Estado fornecem um retrato mais imediato da condição ambiental das áreas afetadas. O Índice de Qualidade da Água (IQA), amplamente utilizado desde sua adoção inicial pela CETESB a partir da matriz da *National Sanitation Foundation*, integra parâmetros físicos, químicos e biológicos, como oxigênio dissolvido, turbidez, pH, DBO, nitrogênio, fósforo e coliformes, e constitui ferramenta robusta para avaliar a adequação das águas ao suporte da biota aquática e às atividades aquícolas. A disponibilidade hídrica, por sua vez, precisa ser analisada à luz da vulnerabilidade das regiões semiáridas. Tucci (2008) evidencia que sistemas hídricos afetados pela urbanização desordenada e pela competição entre usos sofrem com declínio da disponibilidade e com alterações no ciclo hidrológico, o que reforça a necessidade de balancear a atividade aquícola com a capacidade de suporte da bacia hidrográfica.

A taxa de mortandade de espécies nativas representa outro indicador essencial para monitorar o estado dos ecossistemas. Tundisi e Tundisi (2008) demonstram que variações abruptas na qualidade da água provocam perdas na diversidade biológica e reduzem a estabilidade ecológica. A articulação entre disponibilidade hídrica e eventos de mortandade, associada aos processos descritos por Rocha (2011), evidencia que a atividade pode ultrapassar a capacidade de resiliência dos sistemas naturais quando não há mecanismos adequados de prevenção e controle.

Os indicadores de Resposta refletem a capacidade institucional e técnica dos empreendimentos em mitigar seus impactos. O volume de efluentes tratados é fundamental para reduzir a carga orgânica lançada no ambiente. Widiyanti (2021) apresenta evidências de que práticas de intensificação sustentável, como a impermeabilização dos viveiros, reduzem significativamente o risco de infiltração de compostos químicos e de contaminação dos solos. Bush et al. (2013) apontam que

certificações ambientais, como ASC e BAP, promovem o cumprimento de padrões verificáveis e incentivam a adoção de melhores práticas produtivas, contribuindo para transparência e rastreabilidade. Esses elementos são coerentes com os critérios metodológicos propostos por Kimpara, Zadjband e Valenti (2012), que destacam as certificações como instrumentos de governança e de valorização social da atividade.

A dimensão Sustentabilidade integra práticas e tecnologias que favorecem a redução de impactos e a melhoria das condições de produção. A formação técnica dos trabalhadores, conforme sugerido por Valenti et al. (2018), é componente central para assegurar o manejo sustentável e o fortalecimento da governança local. Brito e Silva (2022) demonstraram que macrófitas como *Eichhornia crassipes* podem contribuir para melhorar parâmetros como oxigênio dissolvido e pH em lagoas de estabilização no semiárido, ainda que nem todos os indicadores apresentem mudanças significativas. Lopes (2022) reforça o potencial dessa técnica ao mostrar reduções expressivas de fósforo total e nitrogênio amoniacal em sistemas de fitorremediação. Chiaiese et al. (2011) identificaram elevada eficiência no uso de microalgas e plantas na remoção de compostos fenólicos de efluentes, enquanto Richards e Mullins (2013) destacam a capacidade de microalgas em remover metais pesados e simultaneamente gerar biomassa com valor econômico. Esses achados sustentam a inclusão de indicadores voltados ao reuso da água, ao emprego de bioflocos e à adoção de técnicas de fitorremediação.

De forma integrada, os indicadores construídos a partir de referências como Farias (2016), Ribeiro et al. (2016), Kimpara, Zadjband e Valenti (2012) e Valenti et al. (2018) articulam dimensões ambientais, sociais e econômicas em um sistema coerente e replicável. O modelo PEIRS demonstra, assim, capacidade de estruturar diagnósticos robustos, orientar estratégias de mitigação e apoiar a gestão sustentável da carcinicultura em regiões semiáridas. Ao articular monitoramento contínuo, análise de impactos e respostas institucionais, o estudo oferece uma contribuição metodológica aplicável ao Rio Grande do Norte e a outros territórios que enfrentam desafios semelhantes no que se refere ao uso da água, à pressão ambiental e à governança da atividade aquícola.

Considerações Finais

A aplicação do modelo PEIRS demonstrou elevada capacidade para organizar e interpretar, de maneira integrada, os processos socioambientais associados à carcinicultura em águas interiores do semiárido. A estruturação dos indicadores nas dimensões de Pressão, Estado, Impacto, Resposta e Sustentabilidade permitiu capturar a complexidade das interações entre o sistema produtivo, a disponibilidade hídrica, a dinâmica ecológica e as condições socioeconômicas regionais. Essa abordagem evidencia o potencial do modelo para orientar tanto a formulação de políticas públicas quanto o aprimoramento das práticas de gestão ambiental em territórios marcados por forte vulnerabilidade climática.

A análise dos indicadores mostrou que os maiores desafios se concentram nas dimensões de Pressão e Impacto. O consumo de água, o volume de efluentes e as mudanças na fertilidade do solo revelam que a carcinicultura exerce pressões significativas sobre ecossistemas já frágeis, especialmente em regiões onde a escassez hídrica constitui uma condição estrutural. Esses elementos reforçam a necessidade de integrar a atividade aquícola a instrumentos de planejamento territorial que considerem a capacidade de suporte dos corpos hídricos e dos solos.

Por outro lado, os indicadores de Resposta e Sustentabilidade destacaram caminhos viáveis para a mitigação dos impactos identificados. A adoção de tecnologias como bioflocos, impermeabilização de viveiros e práticas de fitorremediação, aliada ao fortalecimento de certificações ambientais e à capacitação técnica da mão de obra local, demonstra que há alternativas concretas para promover maior eficiência produtiva e reduzir a pressão sobre os recursos naturais. Tais estratégias alinham-se à tendência internacional de consolidar sistemas aquícolas mais transparentes, rastreáveis e ambientalmente responsáveis.

A análise conduzida também revelou a importância da governança local como elemento estruturante para a sustentabilidade da atividade. O engajamento comunitário, a articulação entre instituições de pesquisa, órgãos ambientais e produtores, e a implementação de mecanismos de monitoramento contínuo podem

ampliar o alcance e a eficácia de práticas sustentáveis. Em regiões semiáridas, onde as dinâmicas ambientais e socioeconômicas são historicamente mais sensíveis, esses elementos tornam-se ainda mais determinantes.

Entre as limitações do estudo, destaca-se a utilização exclusiva de dados secundários, o que restringe a possibilidade de validação empírica direta dos indicadores. Recomenda-se que pesquisas futuras incorporem séries temporais de monitoramento em campo, análises sazonais da qualidade da água e do solo, e metodologias participativas que incluam a percepção de comunidades locais e trabalhadores da cadeia produtiva. Tais aprofundamentos podem fortalecer a robustez do modelo e contribuir para sua aplicação em escala ampliada em outras regiões do semiárido nordestino.

Em síntese, os resultados obtidos mostram que o modelo PEIRS constitui uma ferramenta metodológica consistente e replicável para avaliar a carcinicultura de águas interiores em contextos semiáridos. Sua aplicação permite integrar múltiplas dimensões ambientais e sociais, orientar práticas de mitigação e apoiar processos decisórios voltados à construção de uma aquicultura mais resiliente, eficiente e alinhada aos princípios da sustentabilidade regional.

Referências

ABCCAM. Associação Brasileira de Criadores de Camarão. **Informações técnicas da carcinicultura**. 2023. Disponível em: <https://abccam.com.br>. Acesso em: 10 maio 2025.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 312, de 10 de outubro de 2002**. Dispõe sobre critérios e procedimentos para o uso de sedimentos em áreas estuarinas e marinhas. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/licenciamento/documentos/2002_Res_CONAMA_312.pdf. Acesso em: 18 dez. 2024.

BRITO, Luanny Dantas de; SILVA, Maria Cristina Crispim Basílio da. Potencial de uso de macrófitas aquáticas como ferramenta de fitorremediação na lagoa facultativa da Estação de Tratamento de Esgoto de Mamanguape-PB. **Gaia Scientia**, [S.L.], v. 16, n. 4, p. 94-118, 29 dez. 2022. Universidade Federal da Paraíba. <http://dx.doi.org/10.22478/ufpb.1981-1268.2022v16n4.44954>.

BUSH, S. R.; BELTON, B.; HALL, D.; VANDERGEEST, P.; MURRAY, F. J.; PONTE, S.; OOSTERVEER, P.; ISLAM, M. S.; MOL, A. P. J.; HATANAKA, M. Certify Sustainable Aquaculture? **Science**, [S.L.], v. 341, n. 6150, p. 1067-1068, 6 set. 2013. American Association for the Advancement of Science (AAAS).
<http://dx.doi.org/10.1126/science.1237314>.

CHIAIESE, Pasquale; PALOMBA, Francesca; TATINO, Filippo; LANZILLO, Carmine; PINTO, Gabriele; POLLIO, Antonino; FILIPPONE, Edgardo. Engineered tobacco and microalgae secreting the fungal laccase POXA1b reduce phenol content in olive oil mill wastewater. **Enzyme And Microbial Technology**, [S.L.], v. 49, n. 6-7, p. 540-546, dez. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enzmictec.2011.06.002>.

FARIAS, Gustavo Oliveira. **Impactos ambientais da carcinicultura em ambientes de baixa salinidade no semiárido brasileiro**. 2016. 88 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Pesca) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/32463/1/2016_tcc_gofarias.pdf. Acesso em: 17 jun. 2024.

FIGUEIRÊDO, Maria Cléa Brito de; ARAÏJO, Lúcia de Fátima Pereira; ROSA, Morsyleide de Freitas; MORAIS, Lúcia de Fátima Sabóia de; PAULINO, Walt Disney; GOMES, Raimundo Bemvindo. Impactos ambientais da carcinicultura de águas interiores. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [S.L.], v. 11, n. 3, p. 231-240, set. 2006. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522006000300006>.

FIGUEIRÊDO, Maria Cléa Brito de; ARAÏJO, Lúcia de Fátima Pereira; GOMES, Raimundo Bemvindo; ROSA, Morsyleide de Freitas; PAULINO, Walt Disney; MORAIS, Lúcia de Fátima Sabóia de. Impactos ambientais do lançamento de efluentes da carcinicultura em águas interiores. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [S.L.], v. 10, n. 2, p. 167-174, jun. 2005. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522005000200011>.

GESTEIRA, Tereza Cristina Vasconcelos; PAIVA, Melquíades Pinto. Impactos ambientais dos cultivos de camarões marinhos no nordeste do Brasil. **Arquivos de Ciências do Mar**, [S.L.], v. 36, n. 1-2, p. 23-28, 10 mar. 2017. Universidade Federal do Ceará (UFC). <http://dx.doi.org/10.32360/acmar.v36i1-2.6487>.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção agropecuária: Carcinicultura no Rio Grande do Norte**. 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/camarao/rn>. Acesso em: 18 dez. 2024.

KIMPARA, Janaina Mitsue; ZADJBAND, Ariel David; VALENTI, Wagner Cotroni. **Métodos para Medir a Sustentabilidade na Aquicultura**. Embrapa Meio-Norte, 2012. 72 p. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/115655/1/Doc218.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2025.

LIMA, Juliana Schober Gonçalves; RIVERA, Elmer Ccopa; FOCKEN, Ulfert. Emergy evaluation of organic and conventional marine shrimp farms in Guaraíra Lagoon, Brazil. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 35, p. 194-202, nov. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.05.009>.

LOPES, Dilliani Naiane Mascena. **Fitorremediação de efluentes urbano e piscícola utilizando a microalga *Chlorella vulgaris* e adição de sua biomassa seca na dieta do camarão marinho *Litopenaeus vannamei***. 2022. 58 f. Tese (Doutorado em Biotecnologia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/65854>. Acesso em: 15 mai. 2025.

OCDE - Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico. **Core Set of Indicators for Environmental Performance Reviews**. Paris: OECD Publications, 1993. 35 p.

RIBEIRO, Luisa F.; EÇA, Gilmara F.; BARROS, Francisco; HATJE, Vanessa. Impacts of shrimp farming cultivation cycles on macrobenthic assemblages and chemistry of sediments. **Environmental Pollution**, [S.L.], v. 211, p. 307-315, abr. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2015.12.031>.

RICHARDS, R.G.; MULLINS, B. J. Using microalgae for combined lipid production and heavy metal removal from leachate. **Ecological Modelling**, [S.L.], v. 249, p. 59-67, jan. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.07.004>.

RIO GRANDE DO NORTE. **Governo do RN avança no processo de interiorização da carcinicultura no estado**. 2024. Disponível em: <https://www.rn.gov.br/materia/governo-do-rn-avanca-no-processo-de-interiorizacao-da-carcinicultura-no-estado/>. Acesso em: 18 dez. 2024.

ROCHA, Itamar de Paiva. Carcinicultura Brasileira: Processos Tecnológicos, Impactos Socioeconômicos, Sustentabilidade Ambiental, Entraves e Oportunidades. **Revista ABCCAM**, 2011. Disponível em: <https://abccam.com.br/wp-content/uploads/2011/03/carcinicultura%20brasileira%20-%20revista%20abcc%20-%20janeiro%202011.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2025.

RUIZ-MARTINEZ, A.; GARCIA, N. Martin; ROMERO, I.; SECO, A.; FERRER, J.. Microalgae cultivation in wastewater: nutrient removal from anaerobic membrane bioreactor effluent. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 126, p. 247-253, dez. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2012.09.022>.

SILVA, Gustavo Henrique Gonzaga da; CAMARGO, Antonio Fernando Monteiro (orgs.). **A bacia do Rio Apodi-Mossoró: aspectos ambientais, sociais e econômicos de uma bacia hidrográfica no semiárido do Rio Grande do Norte**. Mossoró: EDUFERSA, 2022. 410 p.

Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/server/api/core/bitstreams/5a26639a-189d-4fa9-b42c-766fc900fbdd/content>. Acesso em: 15 dez. 2024.

SÁ, Tadeu Dote; SOUSA, Rommel Rocha de; ROCHA, Ítalo Régis Castelo Branco; LIMA, Gutemberg Costa de; COSTA, Francisco Hiran Farias. Brackish Shrimp Farming in Northeastern Brazil: the environmental and socio-economic impacts and sustainability. **Natural Resources**, [S.L.], v. 04, n. 08, p. 538-550, 2013. Scientific Research Publishing, Inc. <http://dx.doi.org/10.4236/nr.2013.48065>.

SILVA, Hugo Juliano Hermogenes da; PIERRI, Naína. A retomada da carcinicultura no Brasil (2012–2020): flexibilização das normativas e impactos socioambientais. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, [S.L.], v. 60, p. 182-205, 2022. DOI: <https://doi.org/10.5380/dma.v60i0.80348>

TUCCI, Carlos E. M. Águas urbanas. **Estudos Avançados**, [S.L.], v. 22, n. 63, p. 97-112, 2008. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-40142008000200007>.

TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. **Limnologia**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

VALENTI, Wagner C.; KIMPARA, Janaina M.; PRETO, Bruno de L.; MORAES-VALENTI, Patricia. Indicators of sustainability to assess aquaculture systems. *Ecological Indicators*, [S.L.], v. 88, p. 402-413, maio 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.12.068>.

VAN BELLEN, Hans Michael. **Indicadores de sustentabilidade**: uma análise comparativa. Rio de Janeiro: Editora FGV, 2005. 256 p.

VICENTE, Danillo Nascimento; MELLO, Fabiola de Azevedo; SILVA, Renata Calciolari Rossi e. Carcinicultura brasileira: impactos e ações mitigadoras. **Colloquium Agrariae**, [S.L.], v. 12, n. 2, p. 58-61, 20 dez. 2016. Associacao Prudentina de Educacao e Cultura (APEC). <http://dx.doi.org/10.5747/ca.2016.v12.n2.a141>.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, 2007.

WIDIYANTI, Prihanik Marlina. Environmental impacts of shrimp farming and benefit of pond intensification for sustainable aquaculture: A review. **Proceeding International Conference on Science and Engineering**, [S. l.], v. 4, p. 282–295, 2021. Disponível em: <http://sunankalijaga.org/prosiding/index.php/icse/article/view/672>. Acesso em: 16 mai. 2025.

Recebido: 11/07/2025 Publicado: 16/12/2025

Editor Geral: Dr. Eliseu Pereira de Brito