

**GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO
SECRETARIA DE AGRICULTURA E ABASTECIMENTO
AGÊNCIA PAULISTA DE TECNOLOGIA DOS AGRONEGÓCIOS
INSTITUTO DE PESCA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AQUICULTURA E PESCA**

**ANÁLISE COMPARATIVA DA SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL DO CULTIVO
DE MACROALGAS, OSTRAS E PEIXES DE BAIXO NÍVEL TRÓFICO NATIVOS DA
AMÉRICA DO SUL**

Suellen Araújo Alves

Orientador: Prof. Dr. Wagner Cotroni Valenti

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Aquicultura e Pesca do Instituto de Pesca - APTA - SAA, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Aquicultura e Pesca.

São Paulo

Agosto - 2023

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO
SECRETARIA DE AGRICULTURA E ABASTECIMENTO
AGÊNCIA PAULISTA DE TECNOLOGIA DOS AGRONEGÓCIOS
INSTITUTO DE PESCA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AQUICULTURA E PESCA

**ANÁLISE COMPARATIVA DA SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL DO CULTIVO
DE MACROALGAS, OSTRAS E PEIXES DE BAIXO NÍVEL TRÓFICO NATIVOS DA
AMÉRICA DO SUL**

Suellen Araújo Alves

Orientador: Prof. Dr. Wagner Cotroni Valenti

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Aquicultura e Pesca do Instituto de Pesca - APTA - SAA, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Aquicultura e Pesca.

São Paulo

Agosto - 2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Elaborada pelo Programa de Pós-graduação em Aquicultura e Pesca. Instituto de Pesca, São Paulo

A477a Alves, Suellen Araújo
Análise comparativa da sustentabilidade ambiental do cultivo de macroalgas, ostras e peixes de baixo nível trófico nativos da América do Sul /Suellen Araújo Alves – São Paulo, 2023
vii, 63f. ; fig 8. ; tab. 2.

Dissertação (mestrado) apresentada ao Programa de Pós-graduação em Aquicultura e Pesca do Instituto de Pesca – APTA - Secretaria de Agricultura e Abastecimento.
Orientador: Wagner Cotroni Valenti

1. indicadores de sustentabilidade. 2. macroalgas. 3. ostra. 4. peixe. 5. benchmark
I. Valenti, Wagner Cotroni II. Título.

CDD 579

Permitida a cópia parcial, desde que citada a fonte – O autor

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

**ANÁLISE COMPARATIVA DA SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL DO
CULTIVO DE MACROALGAS, OSTRAS E PEIXES DE BAIXO NÍVEL
TRÓFICO NATIVOS DA AMÉRICA DO SUL**

**AUTOR(A): SUELLEN ARAÚJO ALVES
ORIENTADOR(A): Wagner Cotroni Valenti**

Aprovado(a) como parte das exigências para obtenção do título de MESTRE EM
AQUICULTURA E PESCA, Área de Concentração em Aquicultura, pela Comissão
Examinadora:



Prof(a). Dr(a) Wagner Cotroni Valenti



Prof(a). Dr(a) Aline Marcari Marques



gov.br
BRUNO DE LIMA PRETO
CPF: 030.900.110-00
Visto com validade digital

Prof(a). Dr(a) Bruno de Lima Preto

Data da Realização: 03 de agosto de 2023, às 00:00



AGRADECIMENTOS

Foi um longo caminho percorrido para chegar até a conclusão deste trabalho. Não posso deixar de agradecer a Deus, pelo dom da vida, e por me manter forte todos os dias.

A minha família. Sem eles eu definitivamente não seria nada. Eles que estão do outro lado do continente, mas com alma e coração juntinhos e vibrando sempre por minhas vitórias.

A minha esposa. Por estar comigo em todos os momentos. Por me acompanhar, me apoiar e me incentivar todos os dias.

Aos meus amigos. Estar com vocês e poder sentir esse apoio, faz com que tudo seja mais leve.

Ao meu orientador, prof. Dr. Wagner Valenti. Aprendi e aprendo muito com o senhor todos os dias. Foi um enorme prazer tê-lo como meu orientador. Minha eterna gratidão ao professor por permanecer, insistir e acreditar em mim. Me orientar não só neste trabalho, mas também em meu crescimento profissional.

A todos os colegas do Laboratório de Carcinicultura da Unesp – Jaboticabal em que pude trabalhar. Vocês contribuíram para grande parte do meu conhecimento.

Ao Instituto de Pesca de São Paulo. Por me dar a oportunidade de participar desse programa de pós-graduação e fazer parte dessa história.

A minha banca examinadora: Prof. Dra. Fabiana Garcia, Dra. Aline Marques, Prof. Dr. Bruno Preto e Dra. Michelle Roberta. Obrigada por todas sugestões, ideias, dicas e colaborações com o meu trabalho. Obrigada por aceitarem o meu convite e fazerem parte disso.

Gratidão a todos que sempre estiveram comigo. Viva a ciência!!!

Sumário

RESUMO	8
ABSTRACT	9
INTRODUÇÃO GERAL.....	10
OBJETIVO GERAL	15
REFERÊNCIAS DA INTRODUÇÃO GERAL	16
ARTIGO PARA PUBLICAÇÃO	19
1. INTRODUÇÃO.....	23
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	25
2.1 Sistemas de aquicultura estudados.....	25
2.1.1. Sistema de produção de macroalgas vermelhas (<i>Hypnea pseudomusciformes</i>) em região tropical.....	26
2.1.2. Sistema de cultivo de ostra nativa (<i>Crassostrea gasar</i>) em região tropical ..	26
2.1.3. Sistema de cultivo de ostra-do-mangue (<i>Crassostrea gasar</i>) em região subtropical	26
2.1.4. Sistema de produção de tambatinga (<i>Colossoma macropomum x Piaractus brachypomus</i>) em região tropical.....	27
2.1.5. Sistema de monocultivo de tambaqui (<i>Colossoma macropomum</i>) em região subtropical	28
2.1.6. Sistema de cultivo de tambaqui (<i>Colossoma macropomum</i>) integrado com camarão-da-amazônia (<i>Macrobrachium amazonicum</i>) em IMTA-Hapa em região subtropical.	29
2.1.7. Sistema de cultivo de tambaqui (<i>Colossoma macropomum</i>) integrado ao camarão-da-amazônia (<i>Macrobrachium amazonicum</i>) em IMTA-livre em região subtropical	30
2.2 Indicadores	30
2.3 Análise dos dados	34
3. RESULTADOS.....	35

3.1	Uso dos recursos naturais.....	36
3.2	Uso dos materiais	38
3.3	Eficiência no uso dos recursos.....	39
3.4	Poluentes liberados no meio ambiente	41
3.5	Poluentes acumulados nas unidades de produção	43
3.6	Risco do cultivo para conservação e biodiversidade	44
3.7	Sustentabilidade dos sistemas analisados	45
4.	DISCUSSÃO	47
	REFERÊNCIAS	56

Análise comparativa da sustentabilidade ambiental do cultivo de macroalgas, ostras e peixes de baixo nível trófico nativos da América do Sul

RESUMO

Uma crise na disponibilidade de alimentos pode ocorrer até o ano de 2050 devido ao aumento da população. Desta forma, o aumento na produção de alimentos se torna inevitável. Uma solução para a crise alimentar é a produção de organismos aquáticos por meio da aquicultura. Neste trabalho, foram analisados, de forma comparativa, indicadores de sustentabilidade ambiental calculados anteriormente para sistemas de produção de organismos produtores (macroalgas), filtradores (ostras) e fagótrofos de alimento alóctone (peixes de baixo nível trófico). Foram compilados dados secundários de 19 indicadores de sustentabilidade ambiental de sete cultivos aquícolas. Cinco são monocultivos: Macroalga, Ostra em Ambiente Tropical (Ostra tropical), Ostra em Ambiente Subtropical (Ostra subtropical), Tambatinga e Tambaqui. Dois são sistemas integrados: Tambaqui em *hapa* dentro de viveiros de camarão (Tambaqui IMTA-Hapa) e Tambaqui e camarão ambos livres em viveiros (Tambaqui IMTA-Livre). Foi aplicada a ferramenta *benchmark*, estabelecendo-se valores de referência, para a comparação dos indicadores entre os sistemas de cultivo. Os sistemas de cultivo de algas e ostras foram ambientalmente mais sustentáveis que os sistemas de cultivo de peixes. Entre estes, os sistemas integrados não foram claramente mais sustentáveis que os monocultivos conforme esperado. Entretanto, para a definição de sustentabilidade de um sistema, torna-se necessário incluir os indicadores das dimensões social e econômica.

Palavras-chave: indicadores de sustentabilidade, alga, ostra, peixe, *benchmark*.

Comparative analysis of the environmental sustainability of macroalgae, oysters and low-trophic-level fish natives in South America

ABSTRACT

A crisis in food availability may occur by the year 2050 due to population increase. In this way, the increase in food production becomes inevitable. One solution to the food crisis is the production of aquatic organisms through aquaculture. In this work, were analyzed, in a comparative way, environmental sustainability indicators previously calculated for production systems of producing organisms (macroalgae), filter feeders (oysters) and allochthonous food phagotrophs (low trophic level fish). Secondary data were compiled for 19 environmental sustainability indicators for seven aquaculture crops. Five are monocultures: Macroalgae, Oyster in a Tropical Environment (Tropical Oyster), Oyster in a Subtropical Environment (Subtropical Oyster), Tambatinga and Tambaqui. Two are integrated systems: Tambaqui in hapa inside prawn ponds (Tambaqui IMTA-Hapa) and Tambaqui and prawn both free in ponds (Tambaqui IMTA-Free). The benchmark tool was applied, establishing reference values for the comparison of indicators between cropping systems. Algae and oyster farming systems were more environmentally sustainable than fish farming systems. Among these, the integrated systems were not clearly more sustainable than the monocultures as expected. However, in order to define the sustainability of a system, it is necessary to include indicators of the social and economic dimensions.

Keywords: sustainability indicators, macroalgae, oyster, fish, *benchmark*.

INTRODUÇÃO GERAL

Aquicultura é definida como atividade de produção de organismos aquáticos, tais como peixes, crustáceos, moluscos, algas e plantas aquáticas, que apresentam um manejo voltado para a produção e um proprietário, que pode até ser o Estado (FAO, 1988). Esta é uma das atividades de produção de alimentos que mais cresce no mundo (figura 1) e possui grande capacidade em garantir a segurança alimentar da população humana prevista pela ONU até 2050. Portanto, o interesse no consumo de organismos aquáticos tem crescido e vai crescer ainda mais de acordo com a FAO (2022). Além da aquicultura ser uma cadeia produtora de alimentos que contribui para o fornecimento de proteínas para a população, esse alimento também oferece uma diversidade de ácidos graxos essenciais, tais como o ômega-3 (FAO, 2022). A aquicultura é uma atividade de produção de alimento mais recente no mercado quando comparado a bovinos, suínos e aves. Isso faz com que o crescimento da atividade aquícola seja mais constante quando comparado as outras atividades existentes previamente. Com o aumento da população mundial, a aquicultura pode ser uma grande aliada na produção de proteína, principalmente de forma sustentável. Vale ressaltar que políticas distribuição de alimento aliada a produções seriam eficazes para uma melhor distribuição de proteína de qualidade para a população.

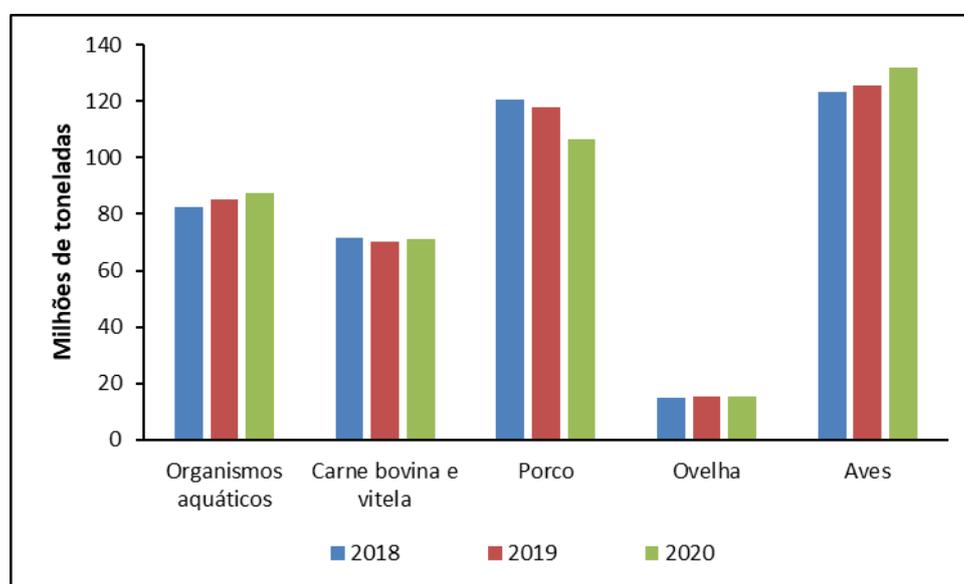


Fig. 1. Produção aquícola mundial em milhões de toneladas excluindo as algas, de acordo com a FAO (2022). E produção de carne bovina, porco, ovelha e aves a nível mundial M. Shahbandeh (2023).

O aumento da atividade aquícola pode gerar impactos ambientais e sociais positivos e negativos, fazendo com que a pauta de sistemas de cultivos sustentáveis seja cada vez mais

importante. Atualmente, é amplamente aceita a ideia de que o crescimento dessa atividade deve ser feito de forma sustentável. Levando em conta o tripé da sustentabilidade, o sistema de cultivo deve ser economicamente viável, socialmente justo e ambientalmente correto (Boyd et al., 2020). Considerando a dimensão ambiental, faz-se necessário a utilização de sistemas de cultivo que tratem os efluentes, aproveite os espaços da coluna d'água, criem um ambiente mais próximo ao meio natural para o animal, e que considere o bem-estar animal. Os principais sistemas de cultivo utilizados na aquicultura são: monocultivo e policultivo em viveiros escavados, tanque rede, aquaponia, bioflocos, *longlines*, travesseiros, mesas fixas, RAS entre outros (Funge-Smith et al., 2001). Quando se utilizam espécies com características tróficas complementares podemos ter cultivo multitrófico integrado - IMTA (Thomas et al., 2021). De acordo com a intensidade da produção, os sistemas podem ser extensivos, semi-intensivos, intensivos e super intensivos. A sustentabilidade depende do sistema de cultivo realizado e certamente alguns ajustes podem torná-lo mais ou menos sustentável.

Os principais grupos de espécies produzidos no mundo são os peixes de água doce, as macroalgas marinhas, os moluscos filtradores e os crustáceos (FAO, 2022). Esses grupos apresentam características próprias e seu principal diferencial é a forma como obtêm alimento e o nível trófico. As algas são extrativistas e produtores primários, ocupando o primeiro nível trófico das cadeias de pastejo. Os moluscos filtradores também são extrativistas isto é, retiram material particulado da água vivo (fitoplâncton) ou morto (partículas de matéria orgânica); portanto ocupam o segundo nível trófico das cadeias de detritos e de pastejo. Os peixes e crustáceos em condições de cultivo podem retirar alimento do fitoplâncton, macrófitas aquáticas, zooplâncton ou bentos. Portanto, podem ocupar o segundo ou terceiro nível trófico. Em grande parte dos cultivos atuais, os peixes e camarões são arraçoados com dietas comerciais ou práticas que funcionam como uma entrada de detritos (Valenti et al., 2010). Nesse caso, podem ser classificados como pertencentes ao segundo nível trófico de cadeias alimentares de detritos. Em níveis de intensificação mais baixos, os peixes e camarões também se alimentam das comunidades bióticas presentes no espaço de cultivo e portanto participam também das cadeias alimentares de pastejo. Nesse caso, podem ocupar o segundo, terceiro ou quarto níveis tróficos. Os diferentes grupos tróficos de espécies devem apresentar características internas semelhantes e dissemelhantes com outros grupos. Desse modo, um estudo comparativo da sustentabilidade realizado para o cultivo de grupos de organismos de baixo nível trófico pode ser interessante. Mas, até o presente, isso não foi realizado.

A aquicultura brasileira produz cerca de 60 espécies de organismos aquáticos usados na alimentação humana (Valenti et al., 2021). Todos os grupos e sistemas de cultivo citados no parágrafo acima são encontrados no Brasil. O IBGE divulgou a lista da produção brasileira em 2021 por grupo de espécies (figura 2). A maior produção é de tilápia (principalmente *Oreochromis niloticus*), seguida pelo tambaqui (*Colossoma macropomun*) (94.593 t/ano) e pelo camarão-branco-do-pacífico (*Litopenaeus vanammei*) (78.637 t/ano). Em quarto lugar ficaram os híbridos do tambaqui formados principalmente pela tambatinga e o tambacu (43.149 t/ano). Os moluscos filtradores, tais como as ostras, vieiras e mexilhões ficaram em 8º lugar (10.908 t/ano). O IBGE não traz dados sobre o cultivo de macroalgas no Brasil, mas a FAO estimou que em 2016 a produção brasileira de macroalgas chegou a 30 toneladas (FAO, 2019).

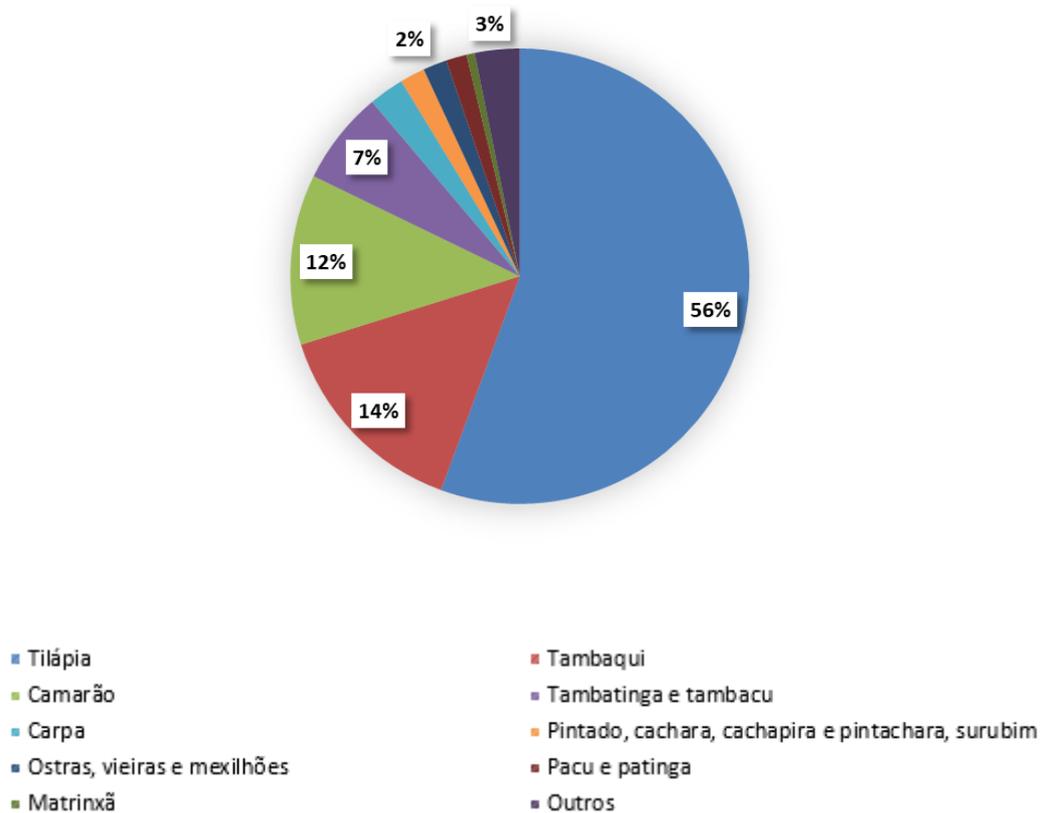


Fig. 2. Grupos de espécies mais produzidas na aquicultura brasileira em 2021 de acordo com estatísticas do IBGE (IBGE, 2022).

Para o estudo da sustentabilidade ambiental nos diferentes grupos tróficos foram escolhidos sistemas de produção de macroalgas, ostras nativas, tambatinga e tambaqui. Este último foi

estudado em monocultivo e em sistema integrado com o camarão-da-amazônia. Uma breve descrição das espécies estudadas é dada abaixo.

As algas hypneas, *Hypnea pseudomusciformes*, são macroalgas vermelhas epifíticas, definidas por um talo ereto com consistência cartilaginosa e presença de ganchos que servem para aderência em outras algas (Yokoya et al., 2020). Podem formar tufo de até 16 cm de altura e apresentam coloração avermelhada, acastanhada ou esverdeada quando viva e toleram temperaturas entre 18° a 30 °C (Kimpapa et al., 2021). As mudas são obtidas pelo corte na parte apical das macroalgas do meio ambiente ou de um sistema de cultivo (Kimpapa et al., 2021). Essas macroalgas passam a vida aderidas a substratos, sendo localizadas em climas tropicais e subtropical, em região entre marés, desde o Maranhão (Nordeste) até Santa Catarina (Sul) (Kimpapa et al., 2021). Com uma taxa de crescimento de 6% ao dia em um cultivo de 45 dias, em uma salinidade ideal a 35, a *Hypnea pseudomusciformes* possui baixa quantidade de gordura (1,3%) em sua biomassa, alto teor de proteína (18%), sendo considerada muito nutritiva para alimentação humana (Kimpapa et al., 2021).

A ostra-do-mangue, *Crassostrea gasar*, é uma espécie de ostra nativa, distribuída ao longo do litoral brasileiro em manguezais, estuários e costões rochosos. Alimenta-se pela filtragem de fitoplâncton, micro-organismos e detritos flutuantes na coluna d'água e uma altura comercial de 8 cm (Sebrae, 2015). Esse animal possui uma larga faixa de tolerância a salinidade, tendo o melhor desenvolvimento entre 4 e 40 (Horodesky et al., 2019). Sua produção ocorre em quase toda a costa brasileira (Valenti et al., 2021).

O tambaqui *Colossoma macropomum* é um peixe nativo da bacia Amazônica, podendo se alimentar de frutos e sementes devido seu hábito alimentar onívoro (Dairiki; Silva, 2011). Esse animal possui índices zootécnicos muito interessantes para a produção, como rusticidade, fácil aceitação de dieta comercial, boa aceitação ao sistema de produção, entre outros (Garcez et al., 2021). Na natureza habita águas mais escuras, com temperaturas entre 25° e 34°C, tolerando ampla variação de pH, esse animal é capaz de resistir até 1 mg/L de oxigênio dissolvido na água (Dairiki; Silva, 2011). A reprodução desse animal em ambiente natural acontece por meio da liberação dos gametas na água (Dalmass et al., 2016) após migração reprodutiva, mas em cativeiro, essa reprodução tem que ser induzida. O tambatinga é um peixe híbrido obtido do cruzamento do ovócito de uma fêmea de tambaqui (*Colossoma macropomum*) e o sêmen de um macho de pirapitinga (*Piaractus brachypomum*) (Costa et al., 2022). Segundo Alves et al. (2014),

a diferença desse animal é que ele cresce mais que o tambaqui e o tambacu, consegue fazer mais ciclos de produção ao decorrer do ano e também consegue tem uma maior eficiência na filtragem de plâncton.

O camarão de água doce *Macrobrachium amazonicum* pode ser localizado facilmente em regiões tropicais e subtropicais da América do Sul, sendo em lagos, rios, reservatórios e áreas inundadas (Maciel; Valenti, 2009). São animais que preferem locais com sedimento em abundância, já que são onívoros (Maciel; Valenti, 2009) e se alimentam de detritos no fundo. Preferem, ambientes com salinidade entre 0 e 5 e temperaturas entre 26 e 28°C. (Silva, 2002). Essa espécie pode pesar até 30g e seu comprimento variar entre 17 e 150 mm dependendo do local no qual está inserido (Silva et al., 2007). Possuem o corpo dividido em cefalotórax e abdome. A reprodução depende de fatores como temperatura e pluviosidade (Maciel; Valenti, 2009). No presente estudo a sustentabilidade do cultivo de *M. amazonicum* não foi analisada, mas apenas sua participação como espécie secundária no cultivo integrado com o tambaqui.

Os cultivos das espécies selecionadas representam sistemas de produção de organismos produtores representados pelas macroalgas, filtradores representados pelas ostras e fagótrofos representados por peixes de baixo nível trófico. Desse modo, temos representados cultivos de organismos do primeiro, segundo e terceiro nível trófico.

OBJETIVO GERAL

O objetivo do trabalho foi analisar de modo comparativo os valores de indicadores de sustentabilidade ambiental de sete sistemas diferentes de aquicultura, baseado em espécies de diferentes níveis tróficos, utilizando a ferramenta *benchmark*. Será também avaliada a utilidade do uso dessa ferramenta na comparação da sustentabilidade entre sistemas.

REFERÊNCIAS DA INTRODUÇÃO GERAL

BOYD, C. E.; D'ABRAMO, L. R.; GLENCROSS, B. D.; HUYBEN, D. C.; JUAREZ, L. M.; LOCKWOOD, G. S.; MCNEVIN, A. A.; TACON, A. G. J.; TELETCHEA, F.; TOMASSO JR, J. R.; TUCKER, C. S.; VALENTI, W. C. Achieving sustainable aquaculture: Historical and current perspectives and future needs and challenges. **Journal of the World Aquaculture Society**, v. 51, n. 3, p. 578-633, 2020.

COSTA, V. F.; SANTOS, J. S. C.; LIRA, T. A.; PACHECO, V. Viabilidade Econômica do Cultivo de Peixe Tambatinga em Tanques Escavados/Economic Feasibility of Growing Tambatinga Fish in Excavated Tanks. **Revista FSA** (Centro Universitário Santo Agostinho), V. 19, N. 10, P. 110-131, 2022.

DAIRIKI J. L.; SILVA, T. B. A. Revisão de Literatura: Exigências Nutricionais do Tambaqui – Compilação de Trabalhos, Formulação de Ração Adequada e Desafios Futuros. **EMBRAPA Amazônia Ocidental**. Manaus, P. 44. 2011.

DALMASS, F. H.; CARRARI, I. F.; CESLA, I. De S.; NOVAKI, M. Guia De Indução Hormonal De Peixes Reofílicos. **Instituto GIA**. Curitiba, P. 24. 2016. Disponível Em: <https://gia.org.br/portal/wpcontent/uploads/2013/12/Reproducao.Pdf>. Acesso Em: 13 jul. 2023.

FAO. Rural Aquaculture: Overview and Framework for Country Reviews. Food and Agriculture Organization of The United Nation. 1988.

FAO. The State of World Fisheries and Aquaculture 2019. Towards Blue Transformation. Rome, 2019.

FAO. The State of World Fisheries and Aquaculture 2022. Towards Blue Transformation. Rome, 2022.

FUNGE-SMITH, S.; PHILLIPS, M. J.; 2001. Aquaculture Systems and Species, Pp. 129-135. In: Subasinghe, R.P., Bueno, P., Phillips, M.J., Hough, C., Mcgladdery S.E., Arthur, J.R. (Eds.). Aquaculture in the Third Millenium. Technical Proceedings of the Conference on Aquaculture in The Third Millenium, Bangkok, Thailand, 20-25 February 2000. (Available At: <http://www.fao.org/DOCREP/003/AB412E/Ab412e09.htm>).

HORODESKY, A.; CASTILHO-WESTPHAL, G. G.; COZER, N.; ROSSI, V. G.; OSTRENSKY, A. Effects of Salinity on the Survival and Histology of Oysters *Crassostrea gasar* (Adanson, 1757). **Bioscience Journal**, Uberlândia, N.35, P.586-597, 2019

IBGE. Pesquisa da Pecuária Municipal (PPM). Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/ppm/quadros/brasil/2021>>. Acesso em: 13 jul. 2023.

KIMPARA J. M.; PEREIRA S. A.; VALENTI W. C. Produção e Beneficiamento da Macroalga Marinha *Hypnea*. **ABC Da Agricultura Familiar**, EMBRAPA – Brasília, P. 58. 2021.

MACIEL, C. R.; VALENTI, W. C. Biology, Fisheries, and Aquaculture of the Amazon River Prawn *Macrobrachium Amazonicum*: A Review. **Nauplius**, V. 17, N. 2, P. 61-79, 2009.

SEBRAE. Ostreicultura – Manual de Boas Práticas: Qualidade e Segurança para Bons Negócios. Brasília, P. 54. 2015. Disponível Em <<https://www.sebrae.com.br/sebrae/portal%20sebrae/ufs/rn/anexos/aquicultura%20-%20ostreicultura%20-%20manual%20de%20boas%20pr%C3%A1ticas%20-%20qualidade%20e%20seguran%C3%A7a%20para%20bons%20neg%C3%B3cios.pdf>>. Acesso em: 13 jul. 2023.

SILVA, M. C. N.; FRÉDOU, F. L.; ROSA FILHO, J. S. Estudo do crescimento do camarão *Macrobrachium Amazonicum* (Heller, 1862) da Ilha De Combú, Belém, Estado do Pará. **Amazônia, Ciência & Desenvolvimento**, V. 2, N. 4, P. 85-104, 2007.

SILVA, K. C. A. Aspectos Bioecológicos do camarão Cascudo, *Macrobrachium Amazonicum* Heller, 1862 (Crustacea, Decapoda, Palaemonidae). **Dissertação (Mestrado)**, MPEG/EMBRAPA/UFPA, Belém. 2002.

SHAHBANDEH, M. Production of meat worldwide from 2016 to 2023, by type. Statista, 2023. Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/237632/production-of-meat-worldwidesince1990/#:~:text=As%20of%20March%202023%2C%20Hormel,of%20chicken%2C%20beef%20and%20pork.>>>. Acesso em: 10 agosto de 2023.

SUPLICY, F.M. (Org.) Manual do Cultivo de Ostras. **EPAGRI**. Florianópolis, P. 256. 2022.

THOMAS, M.; PASQUET, A.; AUBIN, J.; NAHON, S.; LECOCQ, T. When more is more: Taking advantage of species diversity to move towards sustainable aquaculture. **Biol. Rev.** 2021, 96, 767-784.

VALENTI, W. C.; FRANCESCHINI-VICENTINI, I. B.; PEZZATO, L. E. 2003 The Potential for *Macrobrachium Amazonicum* culture. In: World Aquaculture 2003 Salvador, Brazil, "Realizing the Potential: Responsible Aquaculture for a Secure Future". Salvador, Anais...P. 804

VALENTI, W. C.; NEW, M. B.; SALIN, K. R.; YE, J. 2010. Grow-Out Systems: Monoculture In: NEW, M. B.; VALENTI, W. C.; TIDWELL, J. H.; D'ABRAMO, L. R.; KUTTY, M. N. (Ed.) **Freshwater Prawns: Biology and Farming**. Oxford, Wiley-Blackwell. P. 154-179.

VALENTI, W. C.; BARROS, H. P.; MORAES-VALENTI, P.; BUENO, G. W.; CAVALLI, R. O. Aquaculture in Brazil: Past, Present and Future. **Aquaculture Reports**. 2021, 19, 100611.

ARTIGO PARA PUBLICAÇÃO

**Análise comparativa da sustentabilidade ambiental do cultivo de macroalgas,
ostras e peixes de baixo nível trófico nativos da América do Sul**

Artigo redigido nas normas do periódico científico

Aquaculture Reports

QUALIS A2

**Análise comparativa da sustentabilidade ambiental do cultivo de macroalgas,
ostras e peixes de baixo nível trófico nativos da América do Sul**

ALVES, S. A.¹; VALENTI, W. C.^{1,2}

(¹) Instituto de Pesca de São Paulo. São Paulo/SP, Brasil

(²) UNESP, Centro de Aquicultura. Jaboticabal/SP, Brasil

Correspondência do autor: Suellen Araújo Alves (suellenaraujoalves@hotmail.com)

Instituto de Pesca de São Paulo

Av. Conselheiro Rodrigues Alves, 1252

Vila Mariana, São Paulo 04014-900, Brasil

Telefone: (+55) 11-94147-8525

Orcid:

Suellen Araújo Alves (0000-0001-9500-2233), Wagner Cotroni Valenti (0000-0002-8526-1052)
suellenaraujoalves@hotmail.com, w.valenti@unesp.br

Declaração

Conflito de interesses

Os autores declaram que eles não têm interesses conflitantes.

Disponibilidade de dados e materiais

Os dados que suportam esse estudo estão disponíveis com o autor correspondente mediante solicitação.

Disponibilidade de código

Não aplicável.

Análise comparativa da sustentabilidade ambiental do cultivo de macroalgas, ostras e peixes de baixo nível trófico nativos da América do Sul

Resumo

Uma crise na disponibilidade de alimentos pode ocorrer até o ano de 2050 devido ao aumento da população. Desta forma, o aumento na produção de alimentos se torna inevitável. Uma solução para a crise alimentar é a produção de organismos aquáticos por meio da aquicultura. Neste trabalho, foram analisados, de forma comparativa, indicadores de sustentabilidade ambiental calculados anteriormente para sistemas de produção de organismos produtores (macroalgas), filtradores (ostras) e fagótrofos de alimento alóctone (peixes de baixo nível trófico). Foram compilados dados secundários de 19 indicadores de sustentabilidade ambiental de sete cultivos aquícolas. Cinco são monocultivos: Macroalga, Ostra em Ambiente Tropical (Ostra tropical), Ostra em Ambiente Subtropical (Ostra subtropical), Tambatinga e Tambaqui. Dois são sistemas integrados: Tambaqui em *hapa* dentro de viveiros de camarão (Tambaqui IMTA-Hapa) e Tambaqui e camarão ambos livres em viveiros (Tambaqui IMTA-Livre). Foi aplicada a ferramenta *benchmark*, estabelecendo-se valores de referência, para a comparação dos indicadores entre os sistemas de cultivo. Os sistemas de cultivo de algas e ostras foram ambientalmente mais sustentáveis que os sistemas de cultivo de peixes. Entre estes, os sistemas integrados não foram claramente mais sustentáveis que os monocultivos conforme esperado. Entretanto, para a definição de sustentabilidade de um sistema, torna-se necessário incluir os indicadores das dimensões social e econômica.

Palavras-chave: indicadores de sustentabilidade, macroalga, ostra, peixe, *benchmark*.

Comparative analysis of the environmental sustainability of macroalgae, oysters and low trophic level fish natives in South America

Abstract

A crisis in food availability may occur by the year 2050 due to population increase. In this way, the increase in food production becomes inevitable. One solution to the food crisis is the production of aquatic organisms through aquaculture. In this work, were analyzed, in a comparative way, environmental sustainability indicators previously calculated for production systems of producing organisms (macroalgae), filter feeders (oysters) and allochthonous food phagotrophs (low trophic level fish). Secondary data were compiled for 19 environmental sustainability indicators for seven aquaculture crops. Five are monocultures: Macroalgae, Oyster in a Tropical Environment (Tropical Oyster), Oyster in a Subtropical Environment (Subtropical Oyster), Tambatinga and Tambaqui. Two are integrated systems: Tambaqui in hapa inside prawn ponds (Tambaqui IMTA-Hapa) and Tambaqui and prawn both free in ponds (Tambaqui IMTA-Free). The benchmark tool was applied, establishing reference values for the comparison of indicators between cropping systems. Algae and oyster farming systems were more environmentally sustainable than fish farming systems. Among these, the integrated systems were not clearly more sustainable than the monocultures as expected. However, in order to define the sustainability of a system, it is necessary to include indicators of the social and economic dimensions.

Keywords: sustainability indicators, macroalgae, oyster, fish, *benchmark*.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com a ONU (2019), existem previsões de que podemos chegar em até 10 bilhões de pessoas em 2050. Isso faz com que aconteça muitos problemas, em níveis globais, e a insegurança alimentar é um deles. Existirá uma maior necessidade na produção de alimentos, principalmente ricos em proteínas. Mas, para satisfazer todos os quase 10 bilhões de pessoas, a produção de animais terrestres por bovinocultura, suinocultura e avicultura convencionais precisaria do equivalente à área da América do Sul para suprir essa nova necessidade de produção de alimento (Boyd et al., 2020). A aquicultura, pode auxiliar a suprir esse possível déficit de proteínas. Sendo assim, a produção de alimento pela prática da aquicultura torna-se interessante em nível mundial.

A aquicultura é uma das atividades de produção que se manteve em ascensão nos últimos anos, mesmo com a pandemia da COVID-19 (FAO, 2022). De acordo com a FAO (2022), a produção aquícola chegou a 87,5 milhões de toneladas em 2020. Com essa alta taxa de produção, é essencial a utilização de métodos e sistemas de produção efetivos, para prevenir efeitos negativos ao produtor, meio ambiente ou para a sociedade (Saad et al., 2018). Com o crescimento da aquicultura, a quantidade de hormônios e antibióticos, e a disseminação de espécies exóticas, tem crescido nos sistemas aquícolas, podendo gerar impactos ambientais severos ao meio ambiente (Turcios; Papenbrock, 2014). Um exemplo disso são as emissões de gases do efeito estufa nas produções aquícolas, que podem auxiliar a intensificar o aquecimento global (Chen et al., 2023).

Sendo assim, sistemas que gerem menos impactos ambientais negativos e mais sustentáveis são necessários. Além disso, a criação de métricas para medir e auxiliar produtores atingirem a sustentabilidade são necessárias (Chen et al., 2023). Com isso, Valenti et al. (2018) desenvolveram indicadores de sustentabilidade para a aquicultura. Estes visam analisar a sustentabilidade ambiental, social e econômica em diferentes sistemas de cultivo, escalas de produção, regiões e setores. Foram desenvolvidos 22 indicadores ambientais, 20 sociais e 14 econômicos. O uso desses indicadores permite identificar níveis de sustentabilidade de diversas características dos sistemas (Valenti et al., 2018).

Estudos determinando os indicadores de sustentabilidade ambiental foram realizados em vários sistemas aquícolas no Brasil. No entanto, falta uma definição do que é recomendável ou possível de ser atingido em cada sistema de modo a evoluir em direção de atingir maior

sustentabilidade. Para isso, estudos comparativos são essenciais. A ferramenta *benchmark* pode ajudar na comparação desses resultados entre os cultivos. *Benchmark* é um termo em inglês cuja tradução seria “*ponto de referência*”. Muito utilizada em empresas para comparar performances e referências no mercado usando dados e métricas. O *benchmark* é um método de comparação de níveis de desempenho para determinar a diferença entre a própria organização e os melhores executores, focando em adquirir conhecimento. Contribui para adaptar ou implementar as práticas mais apropriadas (Stapenhurst, 2009). Mas essa ferramenta também é utilizada na aquicultura. Engle et al. (2022) utilizaram o *benchmark* para encontrar maneiras de melhorar a eficiência da fazenda. Behrens et al. (2019) aplicaram o *agro-benchmark* para estabelecer comparações entre as fazendas de trutas para implementar e testar uma ração inovadora. A FAO (2022) produziu um relatório técnico aplicando o *benchmark* para examinar padrões de diversificação de espécies produzidos na aquicultura em 200 países. Clemente et al., (2022) conduziram um estudo de conversão de energia através da força das ondas em um sistema aquícola offshore. O que segundo o autor, criou-se dados para a realização de um *benchmark* para aumentar o conhecimento da possibilidade da coexistência de uma geração de energia e um sistema aquícola. Øvrebø et al., (2022) aplicaram a ferramenta *benchmark* para comparar o cultivo de seis grupos de salmões em sistemas e estações do ano diferentes. Apenas Fialho et al. (2021) aplicou a técnica do *benchmark* em estudos de sustentabilidade.

Alguns sistemas aquícolas são considerados mais sustentáveis, tais como os sistemas de cultivos de algas, de moluscos e os sistemas de aquicultura integrada (IMTA). Nos IMTA espécies de diferentes níveis tróficos são produzidas simultaneamente no mesmo cultivo, a fim de que uma possa se beneficiar da outra e gerar um maior aproveitamento de resíduos, evidenciando um equilíbrio no sistema (Boyd et al., 2020). Segundo a FAO (2006), os principais cultivos aquícolas serão e permanecerão sendo os de baixo nível trófico (algas, moluscos e peixes herbívoros-onívoros de água doce) porque são mais eficientes no uso da energia. Silva et al. (2019) destaca que a produção de organismos aquáticos, como por exemplo os moluscos, que são espécies de baixo nível trófico, ocupam o segundo lugar de organismos mais comercializados no mundo. Ao contrário do que acontece em sistemas de cultivo de peixes carnívoros, as espécies de baixo nível trófico podem ser cultivadas em sistemas simples (Neori, 2007). As espécies aquáticas de baixo nível trófico cultivadas são as macro e microalgas, os organismos filtradores, tais como os moluscos bivalves e peixes filtradores, detritívoros,

bentófagos e planctívoros (Valenti; Ballester, 2023). Embora o cultivo de espécies de baixo nível trófico seja muitas vezes referido como mais sustentável, suas características tem sido pouco estudadas sob a perspectiva da sustentabilidade. Portanto, é necessário medir e avaliar a sustentabilidade de cada sistema. Uma comparação entre os sistemas de produção de espécies de baixo nível trófico permite identificar como eles se comportam com relação à sustentabilidade. Possibilita determinar as semelhanças e diferenças entre eles, quais são as características mais sustentáveis e menos sustentáveis de cada um, descrever seu funcionamento e propor mudanças para aumentar a sustentabilidade.

Para um melhor entendimento e enriquecimento de informações quanto ao aspecto de sustentabilidade de espécies de baixo nível trófico, neste trabalho foram analisados os indicadores de sustentabilidade ambientais dos sistemas de cultivo de macroalgas, ostras e peixes herbívoros/planctófagos. As macroalgas são produtores e, portanto, pertencem ao primeiro nível trófico; as ostras são organismos extrativos, que filtram plâncton e partículas orgânicas em suspensão na água, podendo ser incluídas no segundo nível trófico e os peixes usados são o tambaqui e um híbrido que se alimentam principalmente de zooplâncton e material vegetal alóctone, como frutos, ocupando, portanto, o segundo ou terceiro nível trófico. Para avaliar a diferença entre os cultivos dos organismos de diferentes níveis tróficos, foi realizado uma comparação usando a ferramenta *benchmark*, sendo possível identificar quais sistemas são mais ou menos sustentáveis de acordo com cada indicador analisado. Além disso, tornou-se possível apontar os problemas e possíveis impactos ambientais gerados na produção aquícola e propor algumas soluções para uma melhor sustentabilidade da produção.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Sistemas de aquicultura estudados

Foram estudados sete sistemas de aquicultura localizados no Brasil, em região temperada e subtropical, envolvendo o cultivo de macroalgas, ostras e peixes planctófagos/herbívoros conforme descrito a seguir. Os dados são secundários e foram obtidos de estudos prévios que calcularam os indicadores de sustentabilidade ambiental definidos em Valenti et al. (2018).

2.1.1. Sistema de produção de macroalgas vermelhas (*Hypnea pseudomusciformes*) em região tropical

Os dados foram obtidos em Pereira et al. (2021) e Pereira et al. (2020). A macroalga *Hypnea pseudomusciformes* foi cultivada no Estado do Ceará, município de Flexeira, em uma associação de produtores. O cultivo foi realizado em 30 m de *longlines*, com três substratos para cada metro, mantidos a uma profundidade de 6 m e salinidade do mar entre 35-36. Em cada substrato, foram fixadas duas mudas de aproximadamente 25 g cada uma. Para o cálculo dos indicadores, considerou-se uma fazenda com área de 7,5 ha em mar. Além dessa área, o sistema produtivo conta com uma área terrestre de 53 m² para processamento, secagem e armazenamento. O ciclo de produção foi de julho a setembro de 2017, durando 45 dias. As macroalgas possuíram no fim do ciclo um peso de 319 g. A produtividade foi de 0,1 kg/m⁻¹ de algas secas. As macroalgas são comercializadas inteiras e secas com cerca de 15% de umidade.

2.1.2. Sistema de cultivo de ostra nativa (*Crassostrea gasar*) em região tropical

Os dados foram obtidos em Sampaio et al. (2023). O cultivo de ostra-do-mangue, *Crassostrea gasar* foi realizado em 15 fazendas localizadas na costa nordeste do Pará, em uma região tropical. Ocupa uma área de mar de 9 000 m², embora a área produtiva seja de 3600 m². O sistema utilizado por todas as fazendas consiste em mesas fixas ou flutuantes que abrigam os travesseiros de ostras. Os sistemas de mesas flutuantes são utilizados em regiões de manguezal e com grandes variações de maré. São feitos com tubos de PVC e telas plásticas que sustentam as ostras. Cada mesa serve de apoio para 12 travesseiros de tela com 160 sementes dentro. Os produtores não utilizam barco e as sementes são obtidas na natureza. A mão de obra usada é familiar. Apenas uma fazenda está localizada em área com maior coluna de água. Sendo assim, nesse sistema foi utilizado o sistema de *longline* flutuante, com lanternas fixadas. Esse produtor usa barco a remo. Nenhum insumo é aplicado na água ou nas ostras. Esse sistema não possui aeradores. Cada ciclo de cultivo dura 6 meses com sobrevivência ao redor de 80%. Os dados usados aqui foram obtidos nos cultivos de 2017. As ostras são comercializadas inteiras com a concha com peso médio de 85 g.

2.1.3. Sistema de cultivo de ostra-do-mangue (*Crassostrea gasar*) em região subtropical

Os dados foram obtidos em Miraldo (2015). A ostra-do-mangue *Crassostrea gasar* foi cultivada em uma comunidade quilombola do Mandira, localizada em Cananéia, litoral de São Paulo

(25°S, 48°O) com clima predominante subtropical. A produção conta com três cultivos de ostras em conjunto de tabuleiros com 10 m² cada. Estes são feitos em madeira e tela, fixos no fundo por estacas de madeira. Permanecem submersos, mas podem ficar emersos nas marés baixas. O conjunto 1 e 2 possuem 10 tabuleiros cada, totalizando uma área de 200 m². E o conjunto 3 dispõe de quatro tabuleiros, totalizando uma área de 40 m². Nos conjuntos 1 e 2, foram estocadas 32.083 ostras em cada. No conjunto 3, a densidade de estocagem foi de 12.834 ostras. Com o somatório de 77.000 ostras nos cultivos a um peso médio de 13,8 g. As ostras são coletadas na natureza com um tamanho mínimo de 50 mm. Nenhum insumo é aplicado na água ou nas ostras. Esse sistema não possui aeradores. O ciclo de cultivo foi de 1 ano, de novembro/2013 a novembro/2014. O tamanho de venda das ostras é acima de 80 mm. São realizadas 10,5 despesas anuais. Após as despesas, o peso médio para cada conjunto de tabuleiros foi de 61,6 g, 61,0 g e 54,0 g. A composição média das ostras foi de 2,2% de carne, 20,4% de água e 77,4% de concha. O cultivo de ostras possui uma taxa de sobrevivência de 90%. As ostras são comercializadas inteiras com a concha.

2.1.4. Sistema de produção de tambatinga (*Colossoma macropomum* x *Piaractus brachypomus*) em região tropical

Os dados foram obtidos em Gilson (2019). A tambatinga (*Colossoma macropomum* x *Piaractus brachypomus*) foi cultivada nos estados do Maranhão e Piauí, no nordeste do Brasil. Esse sistema conta com 3 fazendas de cultivo de engorda em região tropical. As fazendas tem 2,8; 4,8 e 5,2 ha de espelho d'água. Os sistemas são semi-intensivos de tambatinga em viveiros que utilizam dieta comercial para alimentação.

A fazenda de 2,8 ha possui 12 viveiros de 0,2 ha em média. A densidade de estocagem estabelecida foi de 0,9 alevinos/m². Os animais foram alimentados 3 vezes ao dia. A dieta contou com 28,3% de proteína bruta. Aeradores foram utilizados sendo 2,9 aeradores/ha, totalizando 8 aeradores. Essa fazenda conta com uma canalização central, ou seja, possui escoamento para o abastecimento de água e liberação de efluentes de forma independente. A média das variações dos parâmetros da água monitorados de manhã e à tarde respectivamente foram: condutividade 0,41 e 0,41 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$; oxigênio dissolvido 3,7 e 4,6 mg/L; pH 7,8 e 8,1; temperatura 29,2 e 28,9 °C.

A fazenda de 4,8 possui em média viveiros de 0,3 ha. Os animais foram estocados a 0,8 alevinos/m². A taxa de arraçoamento foi de 3 vezes ao dia. A dieta comercial utilizada possuía 32,4% de proteína bruta. Aeradores não foram utilizados nesse sistema de cultivo. Essa fazenda não possui canalização central.

A fazenda de 5,2 ha possui viveiros de 0,4 ha em média. Foram estocados 0,5 alevinos/m². Os animais foram arraçoados 3,5 vezes ao dia. A dieta ofertada aos peixes possuía 32,4% de proteína bruta. Esse sistema não utilizou aeradores. Essa fazenda possui canalização central, tendo a entrada e saída de água do sistema de forma independente.

O ciclo do cultivo de todas as fazendas foi de 7 meses. Obteve-se 5 meses de estação seca com precipitação anual de 1400 mm no Piauí e 1900 mm nas fazendas do Maranhão. O abastecimento de água nos viveiros das fazendas foi através da chuva e bombeamento da água do rio. A água apenas foi utilizada para repor o que foi perdido por evaporação. Totalizando uma quantidade em média de 1.200 L/água por kg de peixe produzido. Em contrapartida, 50% dessa água é reutilizada. Os viveiros são limpos a cada 3 anos. O efluente do sistema de produção é utilizado para irrigação de um cultivo de melancias. Os peixes são comercializados inteiros.

2.1.5. Sistema de monocultivo de tambaqui (*Colossoma macropomum*) em região subtropical

Os dados foram obtidos em Dantas (2017). O monocultivo de tambaqui *Colossoma macropomum*, ocorreu no setor de carcinicultura da Universidade Estadual Paulista de Jaboticabal, São Paulo, Brasil (21°15'22''S e 48°18'48''O). Foram usados três viveiros de fundo natural com aproximadamente 0,015 ha e 1 m de profundidade. O clima de região subtropical. A água de abastecimento do sistema foi proveniente de duas represas com uma água hipertrófica, sendo a mesma utilizada apenas para reposição das perdas por infiltração e evaporação. Todos os viveiros receberam um aerador para auxiliar na manutenção dos níveis de oxigênio dissolvido da produção, que somente era ligado em caso de emergência. A densidade de estocagem utilizada foi de 3 peixes/m². Os tambaquis foram estocados com 1,8 g nos viveiros. Biometrias foram realizadas mensalmente para determinar a taxa de arraçoamento. Os animais receberam dietas comerciais para animais onívoros. A taxa de alimentação foi de 6% para os peixes até 100 g, recebendo uma ração de 45% de proteína. Para

os tambaquis acima de 100 g a alimentação foi de 3% da biomassa, com uma dieta de 32% de proteína. A alimentação foi ofertada duas vezes ao dia (07:00 e 16:00). As variações dos parâmetros da água obtidos de manhã e a tarde respectivamente foram: condutividade 135,4 e 144,4 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$; oxigênio dissolvido 4,66 e 11,06 mg/L; pH 7,97 e 9,67; temperatura 27,7 e 30,5 °C. O que representa condições adequadas para o desenvolvimento das espécies. Os tambaquis terminam o cultivo como alevinos e podem ser comercializados para outros produtores darem continuidade na fase de crescimento final ou para hidrelétricas realizarem programas de repovoamento.

2.1.6. Sistema de cultivo de tambaqui (*Colossoma macropomum*) integrado com camarão-da-amazônia (*Macrobrachium amazonicum*) em IMTA-Hapa em região subtropical.

Para este sistema, os dados foram obtidos em Dantas (2017). O cultivo foi realizado, no setor de carnicultura da Universidade Estadual Paulista de Jaboticabal, São Paulo, Brasil (21°15'22''S e 48°18'48''O). Os viveiros usados, bem como as características da região estudada foram descritos no item 2.1.5. Cada viveiro recebeu um *hapa* confeccionado com rede plástica de malha de 8 mm com área de superfície de 4 m², submerso a 0,75 m de profundidade, totalizando um volume de 3 m³. Para o estabelecimento dos *hapas* nos viveiros, foram utilizadas duas estacas de metal, uma em cada lado dos viveiros. Trinta camarões/m² estocados livres nos viveiros e 40 peixes/m³ foram estocados em cada *hapa*. Os camarões foram estocados com 0,038 g, antes dos peixes. Os tambaquis foram estocados uma semana depois dentro dos *hapas* com 1,8g. Biometrias foram realizadas mensalmente para determinar a taxa de arraçoamento. Apenas os tambaquis receberam dieta comercial. Os camarões se alimentaram da biota natural dos viveiros, fezes do tambaqui e restos de alimentos. Os tambaquis receberam dietas comerciais para animais onívoros. A taxa de alimentação foi de 6% para ao animal com até 100g, recebendo uma ração de 45% de proteína. Já a taxa de alimentação para os tambaquis acima de 100g foi de 3%, recebendo até o fim do cultivo uma dieta de 32% de proteína. A alimentação foi ofertada duas vezes ao dia (07:00 e 16:00). As variações dos parâmetros da água obtidos de manhã e à tarde respectivamente foram: condutividade 128,8 e 141,4 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$; oxigênio dissolvido 5,28 e 10,80 mg/L; pH 8,21 e 9,56; temperatura 27,5 e 30,2 °C, o que representa condições adequadas para o desenvolvimento das espécies. Os peixes terminam o cultivo como alevinos e podem ser comercializados para outros produtores darem continuidade na fase de crescimento final ou para hidrelétricas

realizarem programas de repovoamento. Os camarões poderão ir para o mercado de iscas vivas ou de consumo humano.

2.1.7. Sistema de cultivo de tambaqui (*Colossoma macropomum*) integrado ao camarão-da-amazônia (*Macrobrachium amazonicum*) em IMTA-livre em região subtropical

Os dados foram obtidos em Dantas (2017). O cultivo foi realizado no setor de carcinicultura da Universidade Estadual Paulista de Jaboticabal, São Paulo, Brasil (21°15'22''S e 48°18'48''O), em uma região de clima subtropical. Os viveiros usados, bem como as características da região estudada foram descritos no item 2.1.6. Os viveiros foram estocados em densidade de 30 camarões/m² e 3 peixes/m² livres nos viveiros. Os camarões foram estocados uma semana antes dos tambaquis nos viveiros, com 0,038 g, a fim de que reconheçam o ambiente e não sejam confundidos pelos peixes como comida. Os tambaquis foram estocados com 1,8g. Biometrias foram realizadas mensalmente para determinar a taxa de alimentação dos peixes. Apenas os tambaquis receberam dieta comercial. Os camarões se alimentaram da biota natural dos viveiros, excretas do tambaqui e restos de alimentos. Os peixes receberam dietas comerciais para animais onívoros. A taxa de alimentação foi de 6% para os animais com até 100 g, recebendo uma ração de 45% de proteína. Já a taxa de alimentação para os tambaquis acima de 100g foi de 3%, recebendo até o fim do cultivo uma dieta de 32% de proteína. A alimentação foi ofertada duas vezes ao dia (07:00 e 16:00). As variações dos parâmetros da água obtidos de manhã e à tarde respectivamente foram: condutividade 131,3 e 147,3 µS/cm²; oxigênio dissolvido 4,85 e 12,31 mg/L; pH 8,19 e 9,72; temperatura 27,7 e 30,6 °C. O que representa condições adequadas para o desenvolvimento das espécies. Os peixes terminam o cultivo como alevinos e podem ser comercializados para outros produtores darem continuidade na fase de crescimento final ou para hidrelétricas realizarem programas de repovoamento. Os camarões poderão ir para o mercado de iscas vivas ou de consumo humano.

2.2 Indicadores

Para avaliar a sustentabilidade ambiental, foram usados indicadores que medem o uso dos recursos naturais, como energia, nitrogênio e fósforo; a eficiência no uso de recursos; a liberação de poluentes para o meio ambiente; fixação de carbono provenientes dos gases do

efeito estufa e os riscos contra a biodiversidade local. Foram utilizados os seguintes indicadores, definidos por Valenti et al. (2018):

Do 1 ao 6 medem o uso dos recursos naturais.

1. Uso do espaço (E): esse indicador mede a área utilizada (ha, m²) por unidade de produção (kg/ t, unidade).

$$E = \text{área utilizada/produção}$$

2. Uso da água (A): esse indicador mede o volume de água utilizado por unidade de produção. Nesse trabalho foi utilizado m³/t. Apenas a água consumida deve ser considerada. A água que retorna ao ambiente em condições similares a que foi captada não é considerada consumida. Mas, se retornar poluída deve ser considerada consumida.

$$A = \text{volume consumido/produção}$$

3. Uso da energia (E): esse indicador mede o total de energia aplicada no sistema em várias formas, como: alimento, fertilizante, eletricidade, combustíveis fósseis, e outros, por unidade de produção. Nesse trabalho foi utilizado MJ/t.

$$E = \text{energia aplicada/produção}$$

4. Proporção de energia renovável (PER): mede a quantidade relativa de energia renovável aplicada no sistema. Nesse trabalho foi avaliado em %. Fontes de energia renovável inclui alimento, fertilizante orgânico, etanol, biodiesel e outras energias obtidas de organismos vivos e solar (fotovoltaica), vento, maré e energia geotérmica. Hidrelétrica não é considerada renovável porque a água dos reservatórios tem um limite de vida útil.

$$PER = \text{quantidade de energia renovável/quantidade total de energia aplicada}$$

Indicadores 5 e 6 medem o uso dos materiais. Nesse trabalho foi utilizado kg/t. Eles são medidos com base na massa de um determinado material utilizado no cultivo para cada unidade de produção. Nitrogênio e fósforo foram usados como materiais chave.

5. Uso do nitrogênio (N):

$N = \text{massa do nitrogênio aplicada/produção}$

6. Uso do fósforo (F):

$F = \text{massa do fósforo aplicada/produção}$

Indicadores 7 a 10 medem a eficiência no uso dos recursos. Nesse trabalho foi avaliado em %. Eles mostram se os recursos estão sendo ou não incorporados na produção.

7. Eficiência no uso da energia (EE):

$EE = \text{energia recuperada na produção/energia aplicada}$

8. Eficiência no uso do nitrogênio (EN):

$EN = \text{massa de nitrogênio recuperada na produção/ massa de nitrogênio aplicada}$

9. Eficiência no uso do fósforo (EF):

$EF = \text{massa de fósforo recuperada na produção/massa de fósforo aplicada}$

10. Produção realmente utilizada (PU): esse indicador mostra a proporção do resíduo não utilizado na biomassa das espécies cultivadas. Exemplos de resíduos são tripas e cabeças de peixe, carapaças e cabeças de camarões, conchas de moluscos e outros.

$PU = \text{massa de porções não utilizadas de organismos cultivados/massa total produzida}$

Indicadores 11 a 14 medem os poluentes liberados no meio ambiente e refletem impactos ambientais negativos na aquicultura. Nesse trabalho foi utilizado kg/t. Eles medem o potencial de poluição.

11. Potencial de eutrofização (PE_N e PE_F):

$PE_N = \text{carga (massa) de nitrogênio liberado nos efluentes/massa ou unidade de produção}$

$PE_F = \text{carga (massa) de fósforo liberado nos efluentes/massa ou unidade de produção}$

12. Potencial de poluição orgânica (PPO):

PPO = carga (massa) de matéria orgânica liberada nos efluentes/massa ou unidade de produção

13. Potencial de siltação (PS):

PS = carga (massa) de todos sólidos suspensos liberados nos efluentes/massa ou unidade de produção

14. Potencial de aquecimento global (PAG):

PAG = carga de gases do efeito estufa liberados na atmosfera/ massa ou unidade de produção

Gases de efeito estufa = massa de CO₂ + CH₄ N₂O, medidos em CO₂ equivalentes.

Indicadores 15 a 17 medem os poluentes acumulados nos tanques ou em fundo de um corpo d'água em sistemas de águas abertas, como tanques rede, *longlines*, bandejas e outros. Nesse trabalho foi utilizado kg/t.

15. Acúmulo de fósforo (AF):

AF = carga (massa) de fósforo acumulado no sedimento/massa ou unidade de organismo produzido

16. Acúmulo de matéria orgânica (AMO):

AMO = carga (massa) de matéria orgânica acumulado no sedimento/massa ou unidade de organismo produzido

17. Acúmulo de material particulado (AMP):

AMP = carga (massa) de material particulado acumulado no sedimento/massa ou unidade de organismo produzido

O indicador 18 mede o risco do cultivo para conservação da genética e biodiversidade.

18. Risco de espécies produzidas (REP):

REP = {1,2,3,4,5,6 ou 8}

no qual:

1 = população local cultivada em sistema aberto ou fechado;

2 = espécies que ocorrem naturalmente na mesma bacia em que a são cultivadas, em sistema fechado;

3 = espécies que ocorrem naturalmente na mesma bacia em que a são cultivadas, em sistema aberto;

4 = espécies alóctones, espécies nativas com variabilidade genética reduzidas, ou híbrido (nativo ou espécie alóctone) cultivada em sistema fechado;

5 = espécies alóctones, espécies nativas com variabilidade genética reduzida, ou híbrido (nativo ou espécie alóctone) cultivada em sistema aberto;

6 = variedade transgênica de qualquer espécie produzida em um sistema fechado;

8 = variedade transgênica de qualquer espécie produzida em um sistema aberto.

2.3 Análise dos dados

Após a compilação dos dados, utilizou-se a ferramenta *benchmark* para a standardização e comparação dos indicadores entre os sistemas. Considerado um método para a medir a performance (Stapenhurst, 2009), neste caso, a ferramenta foi utilizada para a comparação dos dados dos indicadores de sustentabilidade ambiental entre os sete cultivos. Sendo assim, tornou-se possível avaliar quais características de cada sistema foram mais ou menos sustentáveis de acordo com os valores de referência estabelecidos pela técnica do *benchmark*. Tendo os sistemas com valores standardizados positivos são mais sustentáveis em relação àqueles com valores negativos. Por essa técnica, os indicadores são transformados segundo uma padronização que permite uma melhor comparação.

Neste trabalho, quando o valor assumido por um indicador é diretamente proporcional à sustentabilidade, o valor padronizado foi obtido pela equação abaixo:

$$BM = \frac{i-\bar{x}}{\bar{x}} \quad \text{Equação 1}$$

Quando o valor assumido por um indicador é inversamente proporcional à sustentabilidade, o valor padronizado foi obtido pela equação abaixo:

$$BM = \frac{\bar{x}-i}{\bar{x}} \quad \text{Equação 2}$$

Em que:

BM = valor padronizado;

i = valor do indicador de sustentabilidade ambiental;

\bar{x} = média dos valores dos sete cultivos obtidos para o indicador em questão.

3. RESULTADOS

Os valores de todos os indicadores compilados dos estudos citados no método são apresentados na tabela 1.

Tabela 1. Dados dos indicadores de sustentabilidade ambiental. Referem-se ao uso dos recursos, uso dos materiais, eficiência dos recursos, liberação de poluentes, acúmulo de matérias e risco de espécies cultivadas nos sistemas aquícolas analisados. Dados de Macroalga obtidos de Pereira et al. (2020 e 2021); dados de Ostra tropical obtidos de Sampaio et al. (2023); dados de Ostra subtropical obtidos de Miraldo (2015); dados de Tambatinga obtidos de Gilson (2019) e dados de Tambaqui monocultivo, Tambaqui IMTA-Livre e Tambaqui IMTA-Hapa foram obtidos de Dantas (2017).

Indicadores de Sustentabilidade Ambiental	Unidade	Macroalga	Ostra (tropical)	Ostra (subtropical)	Tambatinga	Tambaqui monocultivo	Tambaqui IMTA-hapa	Tambaqui IMTA-livre
Uso do espaço	ha/t	1,25	2,34	0,03	0,10	0,20	0,90	0,30
Uso da água	m ³ /t	0,00	0,00	0,00	2425,00	18464,00	77576,00	15353,00
Uso da energia	MJ/t	2,61	0,02	5641,00	25800,00	107125,30	344509,90	116554,10
Proporção de energia renovável	%	100,00	100,00	13,10	96,90	89,64	96,73	90,44
Uso do nitrogênio	kg/t	2,86	3,10	1,09	72,00	59,20	40,30	49,70
Uso do fósforo	kg/t	0,13	0,60	0,19	24,00	12,90	8,60	10,80
Eficiência no uso da energia	%	383,00	109,00	31,10	87,00	22,20	4,80	17,90
Eficiência no uso do nitrogênio	%	894,00	2820,00	722,00	129,00	45,50	73,70	51,70
Eficiência no uso do fósforo	%	1860,00	2353,70	637,00	88,00	17,70	33,40	23,00
Produção realmente utilizada	%	100,00	22,60	22,60	44,60	51,00	51,00	51,00
Potencial de eutrofização de nitrogênio	kg/t	1,01	-0,09	0,02	2,30	13,80	44,60	21,60
Potencial de eutrofização de fósforo	kg/t	-	-	0,001	0,08	0,90	3,80	1,30
Potencial de poluição orgânica	kg/t	-5,20	-	0,33	4,00	42,90	130,80	57,70
Potencial de siltação	kg/t	8,37	-	3310,00	40,00	86,00	662,20	771,40
Potencial de aquecimento global	kg/t	-851,63	-	-2630,00	-458,60	-301,10	2334,20	-253,80
Acúmulo de fósforo	kg/t	6,17	-	0,033	13,00	1,40	2,40	1,60
Acúmulo de matéria orgânica	kg/t	0,69	-	1160,00	1016,00	193,90	860,10	220,30
Acúmulo de material particulado	kg/t	3189,00	-	3310,00	17,00	-	-	-
Risco de espécies produzidas	-	1	1	1	5	6	6	6

3.1 Uso dos recursos naturais

Os cultivos de Ostra subtropical, Tambatinga, Tambaqui monocultivo e Tambaqui IMTA-Hapa estão acima de 0 quanto ao **Uso do espaço** (Figura 1A). Para o indicador de **Uso do espaço** (Figura 1A) o sistema mais sustentável foi o de Ostra subtropical (0,96). Já o sistema que utiliza mais espaço, sendo considerado como menos sustentável quanto ao indicador **Uso**

do espaço (Figura 1A) é Ostra tropical (-2,20). No indicador de **Uso da água** (Figura 1B), os sistemas mais sustentáveis quanto a esse indicador são: Macroalga (1,00), Ostra tropical (1,00) e Ostra subtropical (1,00). Por outro lado, o sistema que consome mais água e considerado menos sustentável é o Tambaqui IMTA-Hapa (-3,78). Quanto ao indicador **Uso da energia** (Figura 1C), os sistemas mais sustentáveis são Macroalga (1,00) e Ostra tropical (1,00). Já o sistema considerado menos sustentável é o Tambaqui IMTA-Hapa (-3,02). Quanto ao indicador de **Proporção de energia renovável** (Figura 1D), os sistemas de Macroalga (0,20) e Ostra tropical (0,20) foram os mais sustentáveis ambientalmente ao comparar com os outros sistemas analisados. Enquanto isso, o sistema de Ostra subtropical (-0,84) foi o menos sustentável ambientalmente.

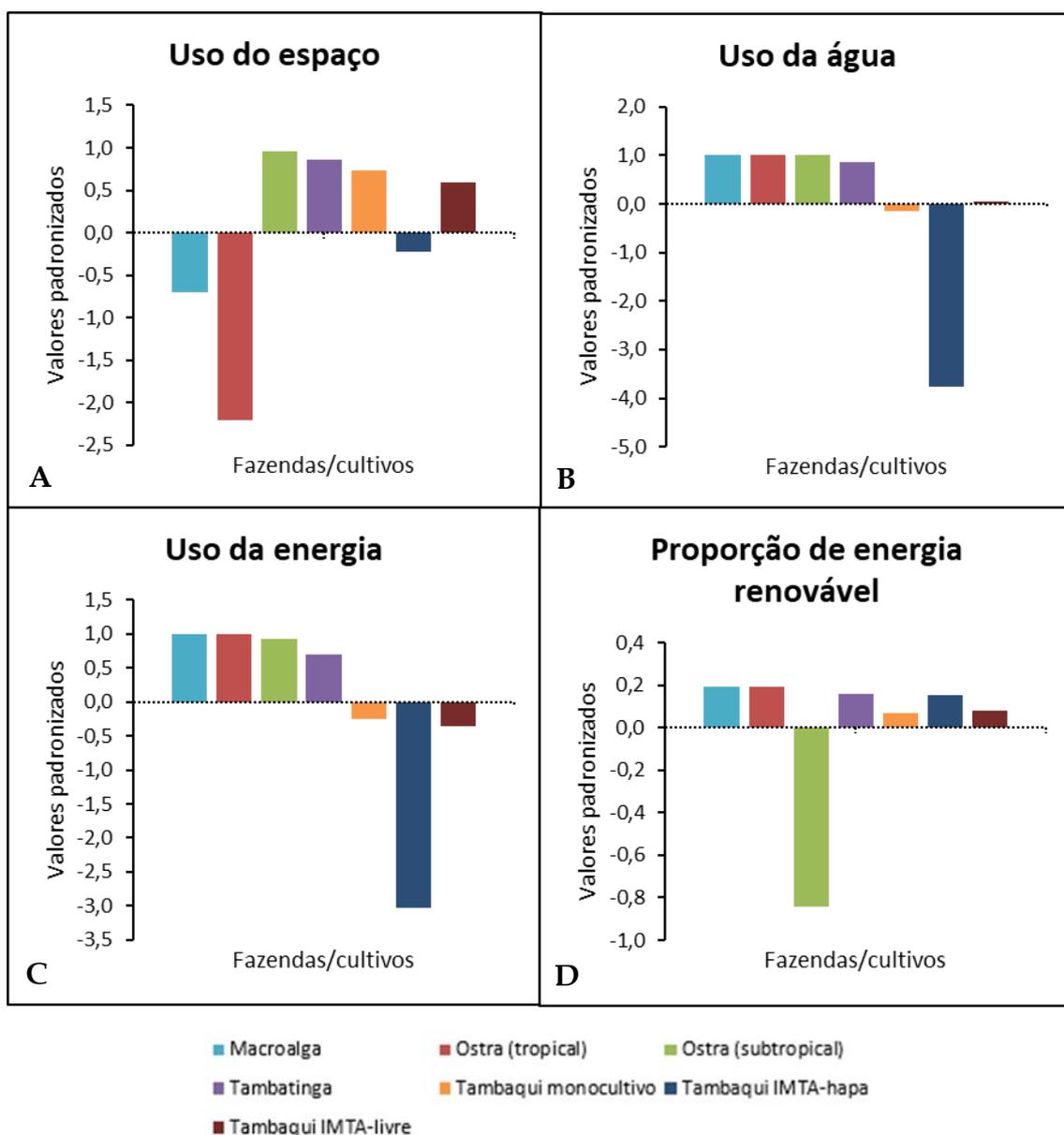


Figura 1. Valores padronizados baseados nos indicadores de sustentabilidade ambiental de **Uso do espaço** (A), **Uso da água** (B), **Uso da energia** (C) e **Proporção de energia renovável** (D) dos sistemas de Macroalga, Ostra tropical, Ostra subtropical, Tambatinga, Tabaqui monocultivo, Tabaqui IMTA-Hapa e Tabaqui IMTA-Livre.

3.2 Uso dos materiais

Na figura 2, estão evidenciados os dados estandarizados dos sistemas analisados. Quanto ao indicador de **Uso do nitrogênio** (Figura 2A) o sistema mais sustentável ambientalmente quando comparado com os outros sistemas analisados foi de Ostra subtropical (0,97). Mas os valores foram bem próximos dos sistemas de Macroalgas (0,91) e Ostra tropical (0,91). O

sistema de Tambatinga (-1,21) foi o menos sustentável ambientalmente. Enquanto isso, o indicador de **Uso do fósforo** (Figura 2B) também mostra o sistema de Macroalga (0,98) e Ostra subtropical (0,98) como os mais sustentáveis e Tambatinga (-1,94) o menos sustentável ambientalmente quando comparado com os outros sistemas analisados.

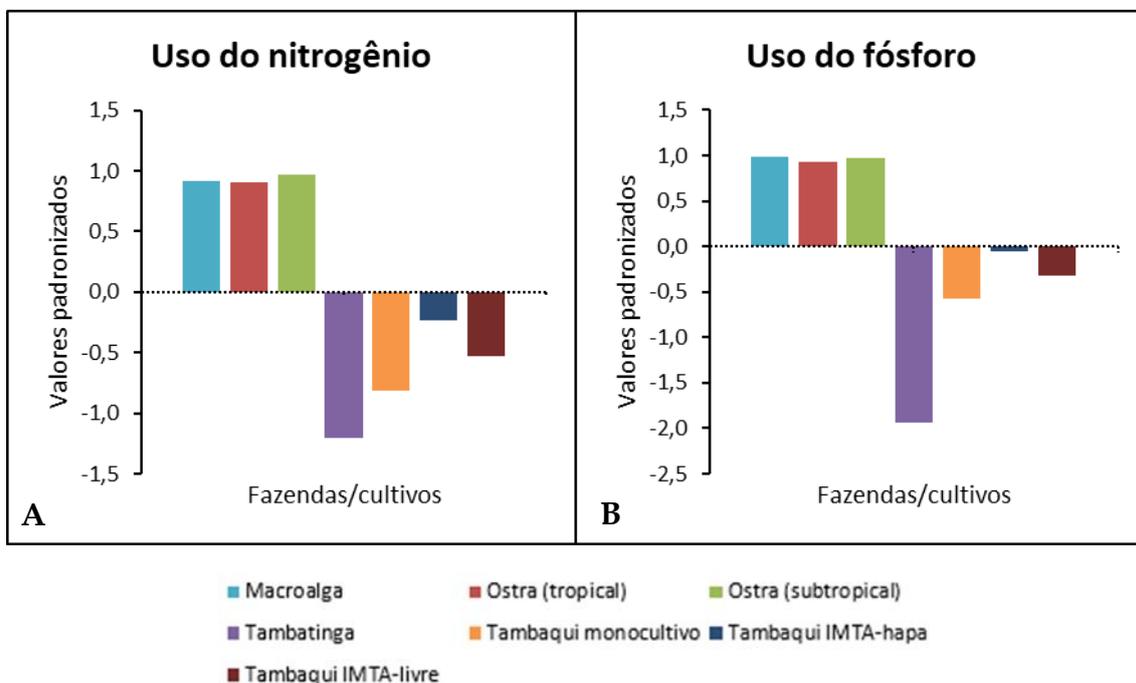


Figura 2. Valores do *benchmark* padronizados a partir dos indicadores de sustentabilidade ambiental quanto ao **Uso do nitrogênio** (A) e **Uso do fósforo** (B), dos sistemas de Macroalga, Ostra tropical, Ostra subtropical, Tambatinga, Tambaqui monocultivo, Tambaqui IMTA-Hapa e Tambaqui IMTA-Livre.

3.3 Eficiência no uso dos recursos

O indicador de **Eficiência no uso da energia** (Figura 3A) mostra que o sistema que mais incorporou energia na produção foi o de Macroalga (3,09), sendo o mais sustentável. Em contrapartida, o Tambaqui IMTA-Hapa (-0,95) foi o sistema menos sustentável ambientalmente em relação aos analisados. No indicador de **Eficiência no uso do nitrogênio** (Figura 3B) o sistema Ostra tropical (3,17) foi capaz de incorporar mais nitrogênio a produção, sendo considerado o mais sustentável. Entretanto, Tambaqui monocultivo (-0,93) foi o sistema menos sustentável ambientalmente quando comparado com os outros sistemas analisados. A **Eficiência no uso do fósforo** (Figura 3C) mostrou que o sistema que mais incorporou fósforo a sua produção e foi considerado mais sustentável foi o de Ostra tropical (2,29). Por outro lado, os sistemas menos sustentáveis ambientalmente ao compará-los com os analisados foi o

Tambaqui monocultivo (-0,97) e Tambaqui IMTA-Livre (-0,97). No indicador de **Produção realmente utilizada** (Figura 3D), o sistema que obteve um melhor aproveitamento de seu organismo quando comparado com sua produção total foi o de Macroalga (1,04), sendo considerado o mais sustentável. No entanto, os sistemas de Ostra tropical (-0,54) e Ostra subtropical (-0,54) foram considerados menos sustentáveis ambientalmente quando comparado com os sistemas analisados.

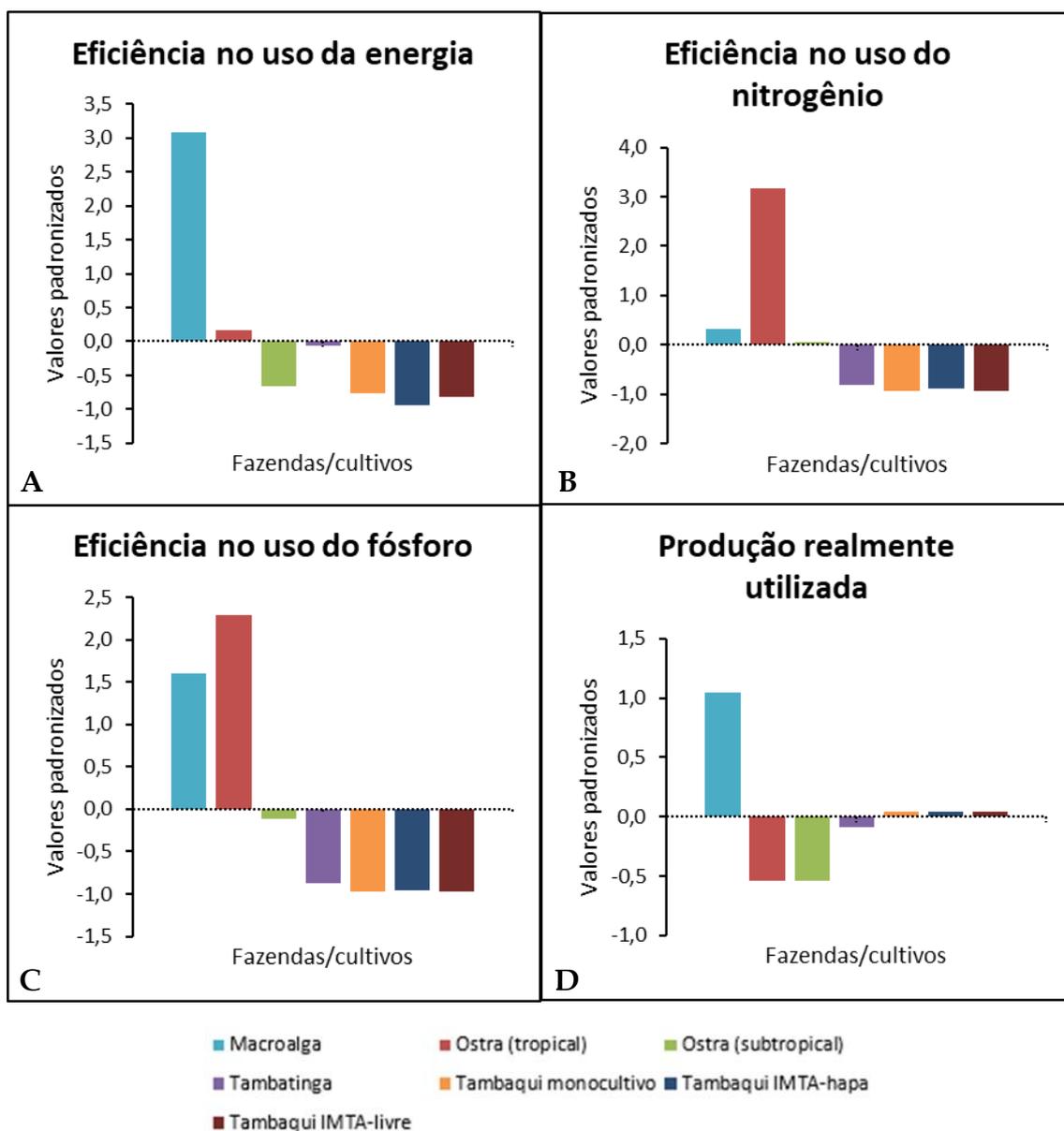


Figura 3. Valores padronizados baseados nos indicadores de sustentabilidade ambiental de **Eficiência no uso da energia** (A), **Eficiência no uso do nitrogênio** (B), **Eficiência no uso do fósforo** (C) e **Produção realmente utilizada** (D) dos sistemas de Macroalga, Ostra tropical, Ostra subtropical, Tambatinga, Tambaqui monocultivo, Tambaqui IMTA-Hapa e Tambaqui IMTA-Livre.

3.4 Poluentes liberados no meio ambiente

O indicador de **Potencial de eutrofização de nitrogênio** (Figura 4A) indica que o sistema Ostra tropical (1,00) mostra uma menor quantidade de nitrogênio liberado pelo efluente em relação aos outros sistemas analisados, sendo considerado o mais sustentável. Contudo, o Tambaqui IMTA-Hapa (-2,75) é evidenciado como menos sustentável ambientalmente de acordo com os sistemas analisados. Quanto ao **Potencial de eutrofização de fósforo** (Figura 4B) o sistema de Ostra subtropical (0,99) lançou menos fósforo no efluente em relação aos outros sistemas analisados, sendo considerado o mais sustentável. Todavia, o sistema de Tambaqui IMTA-Hapa (-2,12) se mostrou no *benchmark* o sistema menos sustentável ambientalmente quando comparado com os outros sistemas analisados. O **Potencial de poluição orgânica** (Figura 4C) exibe o sistema de Macroalga (1,13) como o que menos lança matéria orgânica no efluente, visto que foi o sistema mais sustentável. De outro modo, o sistema de Tambaqui IMTA-Hapa (-2,40) foi o sistema menos sustentável ambientalmente ao analisar os sistemas estudados. O indicador de **Potencial de siltação** (Figura 4D) mostra o sistema de Macroalga (0,99) como o que menos liberou sólidos suspensos no efluente tido como o mais sustentável dentre os sistemas analisados. No entanto, o sistema de Ostra subtropical (-3,07) foi o menos sustentável ambientalmente ao compará-lo com os sistemas analisados. Por fim, o indicador de **Potencial de aquecimento global** (Figura 4E) mostra os sistemas de produção que emitem gases responsáveis pelo efeito estufa. Na figura 4 (E), pode-se observar que o sistema mais sustentável ambientalmente em relação aos outros indicadores foi o de Ostra subtropical (6,30). O sistema de Tambaqui IMTA-Hapa (-7,48) é evidenciado como o menos sustentável ambientalmente em relação aos sistemas analisados.

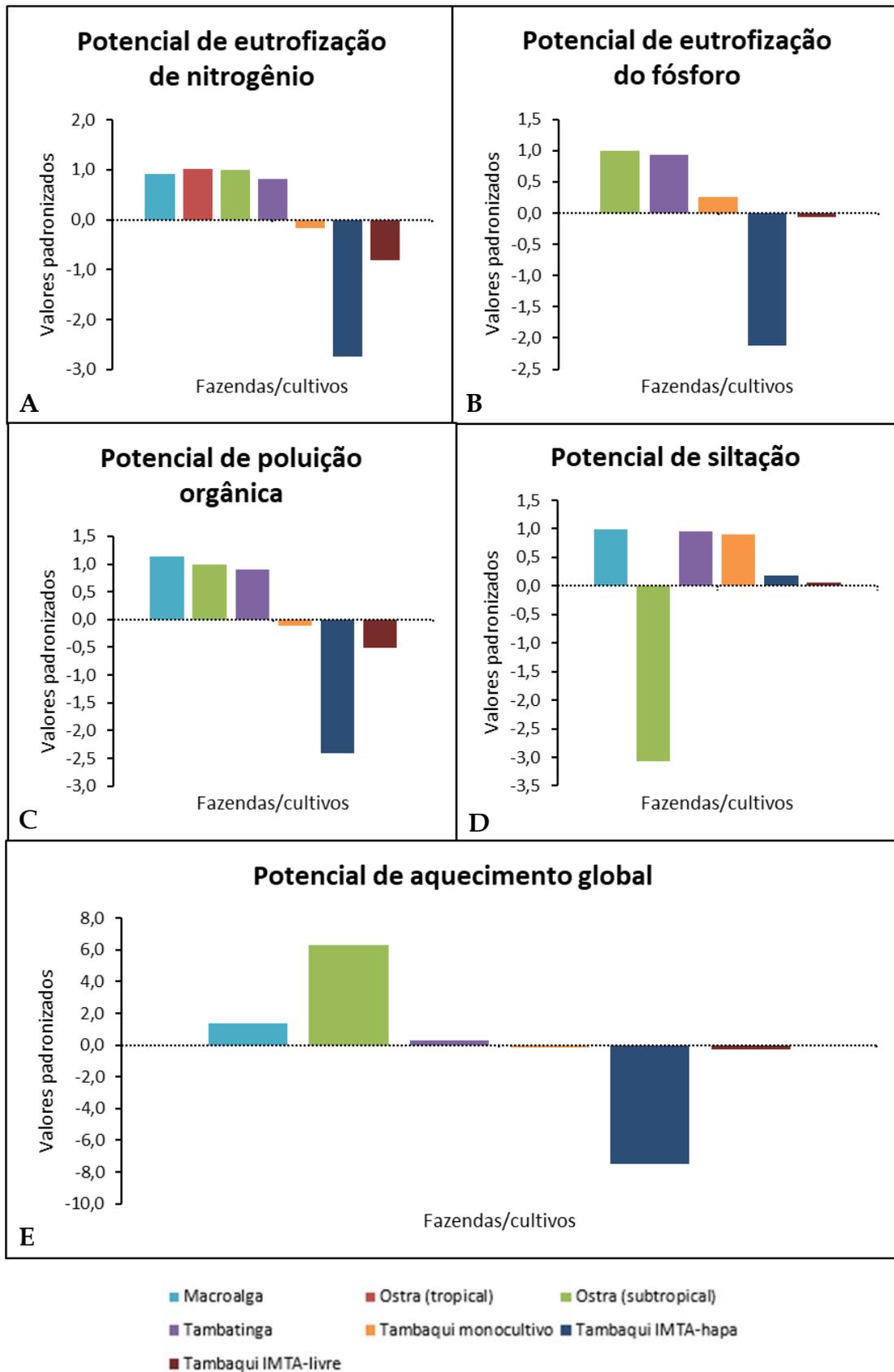


Figura 4. Os dados exibidos na figura 4 estão com valores padronizados baseados nos indicadores de sustentabilidade ambiental de **Potencial de eutrofização de nitrogênio (A)**, **Potencial de eutrofização**

de fósforo (B), **Potencial de poluição orgânica** (C), **Potencial de siltação** (D) e **Potencial de aquecimento global** (E) dos sistemas de Macroalga, Ostra tropical, Ostra subtropical, Tambatinga, Tambaqui monocultivo, Tambaqui IMTA-Hapa e Tambaqui IMTA-Livre.

3.5 Poluentes acumulados nas unidades de produção

No indicador de **Acúmulo de fósforo** (figura 5A) o sistema que menos acumula fósforo na produção e conseqüentemente o mais sustentável ambientalmente foi o de Ostra subtropical (0,99). Contudo, o sistema de produção que mais acumulou e por isso foi o menos sustentável ambientalmente foi o sistema de Tambatinga (-2,17). Quanto ao **Acúmulo de matéria orgânica** (Figura 5B) o sistema que menos acumulou matéria orgânica no sistema produtivo e foi evidenciado como o mais sustentável ambientalmente quando comparado com os outros sistemas analisados foi o Macroalga (1,00). Por outro lado, o sistema menos sustentável quanto ao **Acúmulo de matéria orgânica** (Figura 5B) foi o Ostra subtropical (-1,02). No indicador de **Acúmulo de material particulado** (Figura 5C) o sistema mais sustentável ambientalmente foi o de Tambatinga (0,99). Enquanto isso o sistema menos sustentável quando comparado com os outros sistemas analisados e que acumulou uma maior quantidade de material particulado nas unidades de produção foi o de Ostra subtropical (-0,52).

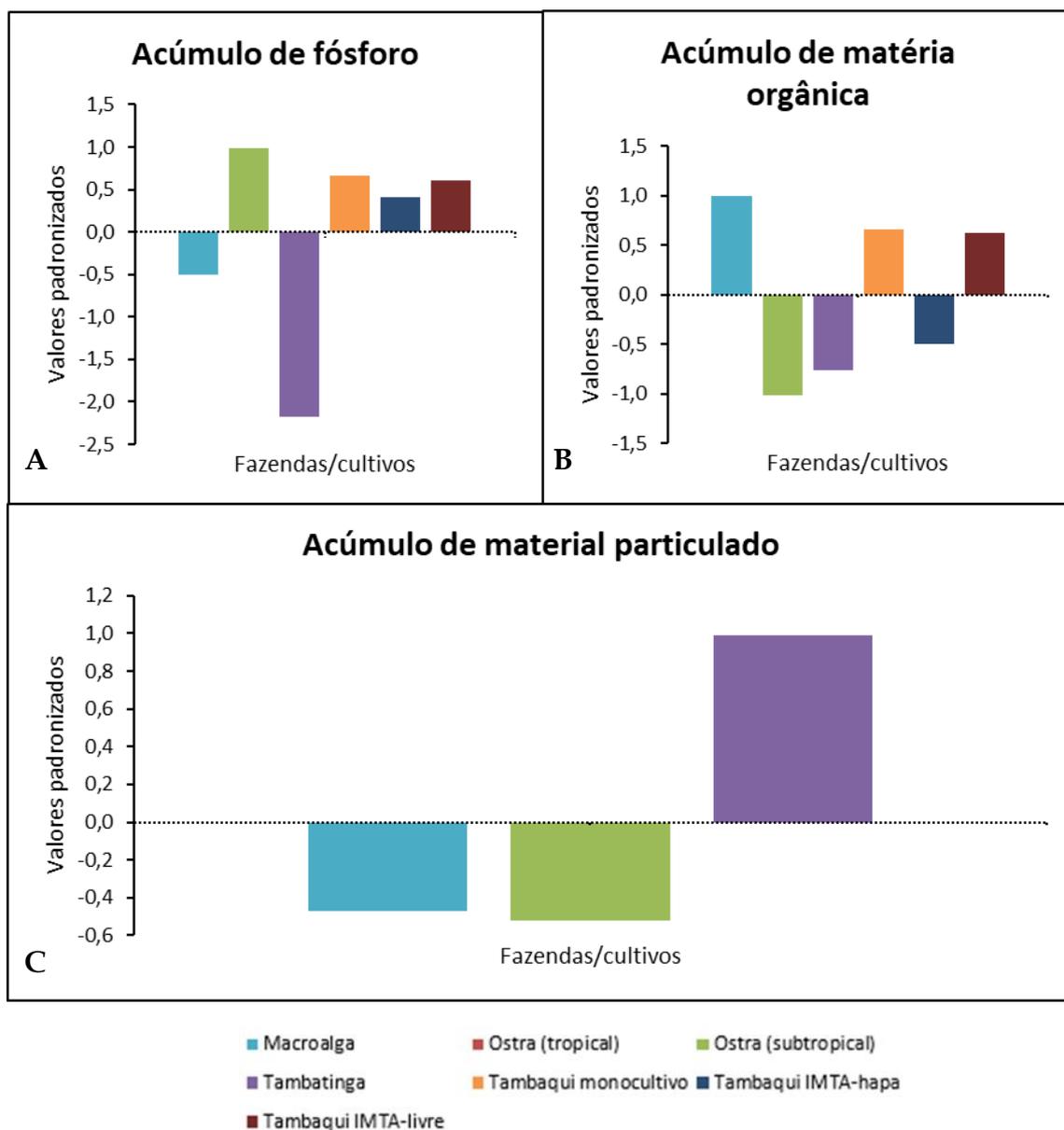


Figura 5. Valores padronizados baseados nos indicadores de sustentabilidade ambiental de **Acúmulo de fósforo (A)**, **Acúmulo de matéria orgânica (B)** e **Acúmulo de material particulado (C)** dos sistemas de Macroalga, Ostra tropical, Ostra subtropical, Tambatinga, Tabaqui monocultivo, Tabaqui IMTA-Hapa e Tabaqui IMTA-Livre.

3.6 Risco do cultivo para conservação e biodiversidade

Verifica-se que os sistemas de Macroalga (0,73), Ostra tropical (0,73) e Ostra subtropical (0,73) foram os sistemas mais sustentáveis ambientalmente em relação ao indicador de **Risco de espécies produzidas** (Figura 6). Enquanto isso os sistemas de Tabaqui monocultivo (-0,61), Tabaqui IMTA-Hapa (-0,61) e Tabaqui IMATA-Livre (-0,61) apresentaram uma menor

sustentabilidade ambiental quanto ao **Risco de espécies produzidas**, sendo os sistemas que oferecem um maior risco à biodiversidade em relação os sistemas de cultivo analisados.

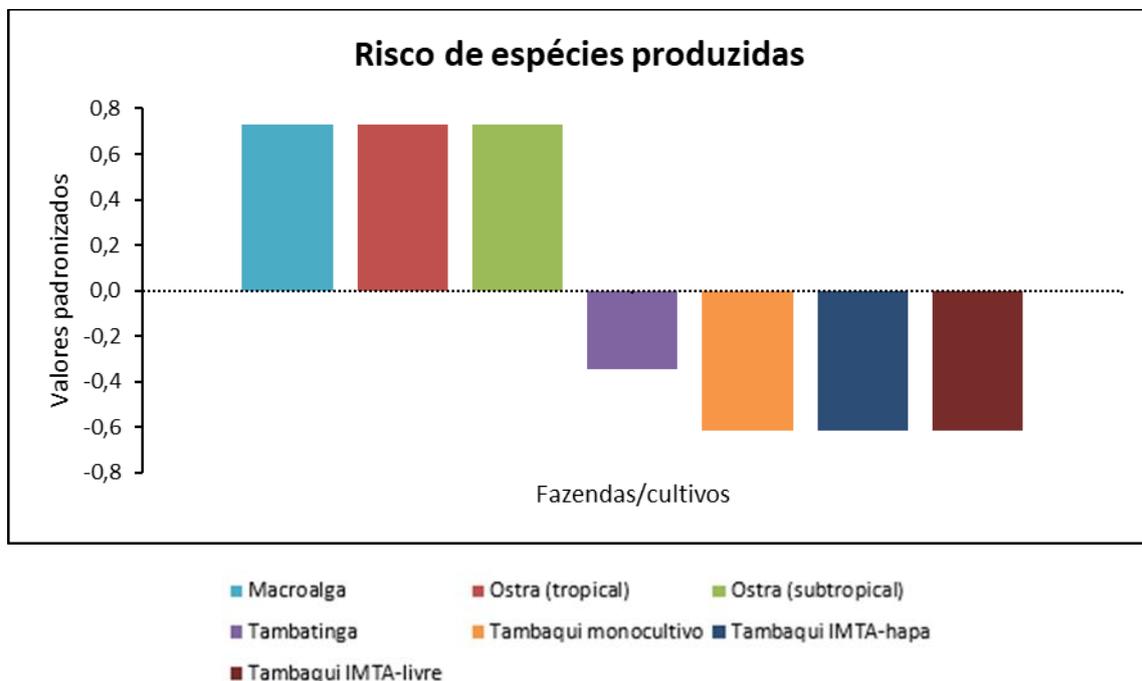


Figura 6. Valores padronizados baseados nos indicadores de sustentabilidade ambiental no **Risco de espécies produzidas** dos sistemas de Macroalga, Ostra tropical, Ostra subtropical, Tambatinga, Tabaqui monocultivo, Tabaqui IMTA-Hapa e Tabaqui IMTA-Livre.

3.7 Sustentabilidade dos sistemas analisados

A tabela 2 mostra a comparação entre os cultivos que foram mais e menos sustentáveis ambientalmente de acordo com cada indicador analisado. Nota-se que os sistemas que mais se repetem quanto aos mais sustentáveis ambientalmente são: Macroalga (10), Ostra tropical (7), Ostra subtropical (7) e Tambatinga (1). Já os sistemas que mais se repetem quanto aos menos sustentáveis são: Tabaqui IMTA-Hapa (8), Ostra subtropical (5), Tambatinga (3), Tabaqui monocultivo (3), Tabaqui IMTA-Livre (2), Ostra tropical (2).

Tabela 2. A tabela 2 evidencia os sistemas de Macroalga, Ostra tropical, Ostra subtropical, Tambatinga, Tambaqui monocultivo, Tambaqui IMTA-Hapa e Tambaqui IMTA-Livre que foram mais e menos sustentáveis no âmbito ambiental de acordo com os indicadores de sustentabilidade ambiental descrito por Valenti et al. (2018).

Indicadores de sustentabilidade ambiental	Sistemas analisados	
	Mais sustentável	Menos sustentável
Uso do espaço	Ostra subtropical	Ostra tropical
Uso da água	Macroalga, Ostra tropical, Ostra subtropical	Tambaqui IMTA-Hapa
Uso da energia	Macroalga, Ostra tropical	Tambaqui IMTA-Hapa
Proporção de energia renovável	Macroalga, Ostra tropical	Ostra subtropical
Uso do nitrogênio	Ostra subtropical	Tambatinga
Uso do fósforo	Macroalga, Ostra subtropical	Tambatinga
Eficiência no uso da energia	Macroalga	Tambaqui IMTA-Hapa
Eficiência no uso do nitrogênio	Ostra tropical	Tambaqui monocultivo
Eficiência no uso do fósforo	Ostra tropical	Tambaqui IMTA-Livre, Tambaqui monocultivo
Produção realmente utilizada	Macroalga	Ostra tropical, Ostra subtropical
Potencial de eutrofização de nitrogênio	Ostra tropical	Tambaqui IMTA-Hapa
Potencial de eutrofização de fósforo	Ostra subtropical	Tambaqui IMTA-Hapa
Potencial de poluição orgânica	Macroalga	Tambaqui IMTA-Hapa
Potencial de siltação	Macroalga	Ostra subtropical
Potencial de aquecimento global	Ostra subtropical	Tambaqui IMTA-Hapa
Acúmulo de fósforo	Ostra subtropical	Tambatinga
Acúmulo de matéria orgânica	Macroalga	Ostra subtropical
Acúmulo de material particulado	Tambatinga	Ostra subtropical
Risco de espécies produzidas	Macroalga, Ostra tropical, Ostra subtropical	Tambaqui monocultivo, Tambaqui IMTA-Hapa, Tambaqui IMTA-Livre

4. DISCUSSÃO

O indicador de **Uso do espaço** mede a quantidade de superfície que o sistema ocupa para cada tonelada de pescado produzido (Valenti et al., 2018). Neste caso, quanto menos espaço é utilizado para produzir a mesma quantidade de pescado, mais sustentável será o sistema. O resultado do indicador **Uso do espaço** é influenciado de acordo com fatores, como o sistema a ser escolhido, espécie, área, entre outros. Para Dantas et al. (2020) o sistema de IMTA pode ser uma das maneiras para a utilização de menos espaço na produção e obtenção de um maior rendimento de biomassa. Visto que existe uma espécie principal a ser cultivada e as demais são secundárias.

Partindo do pressuposto que o **Uso do espaço** pode ser indiretamente proporcional à densidade de estocagem dos sistemas a partir do momento que o sistema é intensificado com a produção de mais de uma espécie diferente pode gerar boas consequências para a produção. Isso faz com que se utilize menos espaço para produzir uma maior quantidade de pescado. O sistema de Ostras subtropical obteve uma densidade de estocagem de 321 ostras/m² e foi o sistema considerado como mais sustentável ao analisar esse indicador quando comparado com os outros sistemas. Maccacchero et al. (2007) evidenciaram que a densidade de estocagem das ostras nativas *Crassostrea sp* influencia diretamente na taxa de crescimento e sobrevivência do animal. As ostras obtiveram melhor crescimento e taxa de sobrevivência no tratamento com a maior densidade de estocagem, alcançando o comprimento de 60 mm após um cultivo de 5 meses (Maccacchero et al., 2007). Contudo, Pedrazzani et al. (2022) destacam que altas densidades de estocagem no cultivo de carpa capim (*Ctenopharyngodon idella*) faz com que aumente o nível de stress do animal, atrapalhando o desenvolvimento e tornando-o propenso a doenças. Uma maior eficácia quanto ao **Uso do espaço** ao comparar os sistemas de Ostra subtropical e Ostra tropical pode estar ligada a diferentes práticas de manejo entre esses sistemas. Tal como a localização dos tabuleiros, manejo diário, tipo de sistema e densidade de estocagem. Logo, deve-se atentar a esses parâmetros a fim de que aumente a sustentabilidade no cultivo de Ostra tropical.

O indicador **Uso da água** mede o volume de água utilizado para cada tonelada de animal produzido. Para medir esse indicador é considerado apenas a água consumida pelo sistema, ou seja, se a água retornar para o meio ambiente poluída é considerada consumida (Valenti et

al., 2018). Diante disso, quanto menos água for consumida para produzir a mesma quantidade de pescado mais sustentável será o sistema de produção. A água é um fator limitante para a aquicultura. Além de ser um recurso finito, pode gerar impactos ao ambiente dependendo do modo como é manejada no sistema. Os cultivos de Macroalga, Ostra tropical e Ostra subtropical foram considerados os mais sustentáveis quanto o indicador de **Uso de água**. Sistemas de produção em águas abertas, como o cultivo de macroalgas e ostras são inseridos ao meio ambiente natural, sendo obrigados a conviver com as espécies já existentes e variações naturais do meio. Pereira et al. (2021), mostraram que as macroalgas não alteram a qualidade da água em sua produção. Sendo também o sistema de Macroalgas o mais sustentável ambientalmente quando ao indicador de **Poluição orgânica**. Deve-se ao fato de que as macroalgas por serem plantas aquáticas fossintéticas (Kimpara et al., 2021) e as ostras animais filtradores fazem um melhor aproveitamento dos nutrientes disponibilizados na água para sua alimentação. Isso também pode ser visto quanto ao indicador de **Potencial de eutrofização do nitrogênio** e **Potencial de eutrofização do fósforo** em que os sistemas mais sustentáveis foram o de cultivos de ostras, sendo o de Ostra tropical e Ostra subtropical, respectivamente. As ostras além de não liberarem nitrogênio na água através do efluente podem ser utilizadas como biorremediação, ou seja, tornam-se aliadas na retirada de compostos nitrogenados em área de estuário, como ocorreu em Long Island (Bricker et al., 2018). Estimou-se que 1,31-2,68% de toda carga de nutrientes que chega no estuário em Long Island, pode ser retirada através de um sistema de produção de ostras modelado por Bricker et al. (2018). Esse valor é considerado alto, fazendo com que gere serviços ecossistêmicos com sua produção e podendo obter retorno financeiro, tendo em vista a externalidade positiva gerada pelo cultivo (Bricker et al., 2018). Portanto, a ostreicultura é um ótimo aliado para o meio ambiente, já que é possível retornar à água do mesmo jeito que a foi capta, ou seja, sem ser consumida e ainda assim auxiliar em tratamento de efluente.

Por outro lado, o sistema de Tambaqui IMTA-Hapa é um sistema de produção em viveiro considerado como menos sustentável ambientalmente quanto aos indicadores de **Uso da água**, **Potencial de eutrofização de nitrogênio**, **Potencial de eutrofização de fósforo** e **Potencial de poluição orgânica**. Esse cultivo necessita de abastecimento de água para manutenção da taxa de evaporação diária que acontece no sistema e também para cobrir a taxa de infiltração. Crepaldi et al. (2006) alertam que deve haver uma escolha acertada quanto a localização de viveiros de aquicultura, já que o clima e as características do solo afetam diretamente na

quantidade de água a ser utilizada em viveiros. O sistema de Tambaqui IMTA-Hapa, possui uma alta carga de nutrientes no sistema proveniente da água hipertrófica de abastecimento e o do uso de dieta comercial no cultivo (Dantas, 2017). Por mais que seja um sistema integrado, o sistema Tambaqui IMTA-Hapa liberou nutrientes e sólidos totais suspensos no efluente (Dantas, 2017) em uma quantidade maior quando comparado com os sistemas analisados. Essa água do efluente do sistema carregada de nutrientes e matéria orgânica ao ser lançada no meio ambiente por ocasião da despesca possui um grande potencial para eutrofização e poluição do meio. Boyd et al. (2007) enfatiza que muitos resíduos produzidos nos sistemas aquícolas que não são capazes de serem tratados em suas próprias fazendas acabam resultando em um descarte no meio ambiente nos efluentes. Kurniawan et al. (2021) destaca que de acordo com seu levantamento, uma estimativa média de água residual gerada pela produção de cultivos extensivos e intensivos em viveiros e sistemas de *raceways* gira em torno de 20,15 m³ /kg/ano. Segundo David et al. (2017b) a maior quantidade de fósforo introduzida no sistema é através da dieta e a utilização de um sistema com mais animais que ocupam diferentes níveis da coluna d'água faz com que aconteça um melhor aproveitamento do fósforo no sistema. Por mais que o Tambaqui IMTA-Hapa seja um cultivo de mais de uma espécie, esse sistema confinou o peixe em *hapa*, ocasionando uma maior concentração de nutrientes e matéria orgânica (Dantas, 2017). Sendo assim, não foi tão eficiente quanto um sistema IMTA convencional, tornando-se difícil o acesso da espécie secundária as fezes e restos de alimentos. Boyd et al. (2007) infere que geralmente em cultivos semi-intensivos e intensivos de produção a água liberada através do efluente possui uma carga de nutrientes maior do que a água de abastecimento. David et al. (2017b) reitera que pelo menos de 7-10% de fósforo dos sistemas de cultivo são liberados nos efluentes, gerando uma água com alta carga de nutrientes levando a um possível impacto ambiental. Torna-se imprescindível o tratamento da água do efluente de sistemas de produção antes de devolvê-la ao meio ambiente. Devolvendo uma água igual ou de melhor qualidade ao que foi captada para o cultivo, além de não eutrofizar ou poluir o meio, faz com que o sistema alcance uma melhor sustentabilidade ambiental.

O indicador de **Uso da energia** mede a quantidade de energia aplicada no sistema para cada kg de pescado produzido. A energia entra no sistema como alimento, fertilizante, eletricidade, combustível fóssil, entre outras (Valenti et al., 2018). Por outro lado, o indicador **Eficiência no uso da energia** avalia o quanto dessa energia foi de fato incorporada na produção (Valenti et al., 2018). Os sistemas que foram mais sustentáveis quanto ao **Uso da energia** também foram

quanto a **Eficiência no uso da energia** e **Proporção de energia renovável**. Os sistemas Macroalga e Ostra tropical foram os mais sustentáveis quando comparados com os sistemas analisados. Por serem fotossintetizantes e animais filtradores (Lima et al., 2022) respectivamente, não necessitam da adição de dietas comerciais ou fertilizantes. Originando melhores resultados quanto a sustentabilidade ambiental quando comparado sistemas de produções em viveiro. As macroalgas são um exemplo de **Eficiência no uso da energia**, visto que possuem a capacidade de incorporar a energia aplicada em sua produção. Por outro lado, o sistema de Tambaqui IMTA-Hapa foi o menos sustentável ambientalmente quanto aos indicadores de **Uso da energia** e **Eficiência no uso da energia**. O sistema Tambaqui IMTA-Hapa é um sistema que recebeu bastante energia do arraçamento, fertilizantes e energia elétrica (Dantas, 2017). O sistema não foi capaz de incorporar essa energia na produção tanto quanto os sistemas mais sustentáveis como Macroalgas e Ostra tropical. No entanto, o sistema menos sustentável quanto a **Proporção de energia renovável** foi Ostra subtropical. Esse sistema usou combustíveis fósseis durante a produção de ostras como o combustível do barco (Miraldo, 2015). Esse tipo de combustível contribui para um alto impacto ambiental quando comparado com produções de energia limpa (Bujas et al., 2022). Por não ser uma fonte de energia renovável e ainda emitir gases causadores do efeito estufa para a atmosfera, foi o fator chave para o baixo valor de **Proporção de energia renovável**. De modo contrário, a produção de Macroalgas não utilizou combustíveis fósseis, fertilizantes químicos, ração e pesticidas (Pereira et al., 2021); portanto apresentou 100% de **Proporção de energia renovável**, sendo o mais sustentável em relação a esse indicador.

Os indicadores de **Uso do nitrogênio** e **Uso do fósforo** medem a quantidade de nitrogênio e fósforo, respectivamente, inseridos no sistema (Valenti et al., 2018). Enquanto isso, a **Eficiência no uso do nitrogênio** e a **Eficiência no uso do fósforo** medem o quanto desses nutrientes o sistema foi capaz de incorporar na produção (Valenti et al., 2018). O **Acúmulo de fósforo** mede quanto desse elemento foi acumulado nos sedimentos ou em corpos d'água por tonelada de organismo produzido (Valenti et al., 2018). O sistema mais sustentável quanto ao **Uso do nitrogênio** e **Acúmulo de fósforo** foi o de Ostra subtropical, enquanto que para o **Uso do fósforo** foram os sistemas de Macroalga e Ostra subtropical. E Ostra tropical foi o mais sustentável quanto a **Eficiência no uso do nitrogênio** e **Eficiência no uso do fósforo**. O nitrogênio (N) e fósforo (P) são elementos essenciais para a vida, por fazer parte da biomassa dos organismos. Além de serem essenciais para o crescimento de ossos e escamas dos peixes,

são importantes para a produção primária e essenciais para toda a vida natante (Luo, 2022; Yogeve et al., 2020). Boyd et al. (2017) destaca que por fazerem parte da biomassa animal, o nitrogênio e o fósforo, são componentes críticos na dieta. As macroalgas e as ostras não necessitam de adição de dieta comercial em seu cultivo. Por isso, seus cultivos são mais sustentáveis quanto a esses indicadores.

O sistema Tambatinga mostrou-se menos sustentável quanto aos indicadores de **Uso do nitrogênio**, **Uso do fósforo** e **Acúmulo do fósforo**. Enquanto Tambaqui IMTA-Livre e Tambaqui monocultivo foram os menos sustentáveis quanto a **Eficiência no uso do fósforo**. E o sistema de Tambaqui monocultivo o menos sustentável ambientalmente quanto a **Eficiência no uso do nitrogênio**. Todos esses sistemas tem em comum a inserção de dieta comercial para a alimentação dos animais. Geralmente, a água de abastecimento dos viveiros pode ser rica em nutrientes, tornando-se uma fonte importante de entrada de N e P no sistema (David et al., 2017a). Esse foi o caso dos cultivos de tambaqui em monocultivo e em cultivo integrado. Ebeling et al. (2006) relata que um sistema de produção de camarão marinho com troca zero, ao utilizar uma dieta de 35% de proteína, pode gerar por volta de 50,4 g de amônia-nitrogênio. A dieta ofertada em todo o cultivo faz com que aumente ainda mais o acúmulo de fósforo no fundo dos viveiros, devido a resto de alimento não consumido, fezes e fertilização excessiva (De Souza et al., 2021) De acordo com David et al. (2017b) o principal compartimento onde ocorre o acúmulo de fósforo em produções aquícolas é no sedimento. Portanto, uma possível diminuição no uso desses materiais ou um cultivo com mais de uma espécie detritívora ou iliófaga pode auxiliar a diminuir o impacto gerado através dos altos níveis de nitrogênio e fósforo no sistema. Flickinger et al. (2020) sugerem que a utilização de animais com diferentes nichos tróficos em um mesmo sistema e que ocupam um espaço diferente na coluna d'água no viveiro pode ser benéfico para o meio fazendo com que diminua o acúmulo de nutrientes no fundo dos cultivos, já que uma segunda espécie cultivada pode ingerir a matéria orgânica particulada e obter um melhor aproveitamento desses nutrientes.

A quantidade de aproveitamento da biomassa produzida em relação aos resíduos gerados pela produção dos organismos aquáticos é medida pelo indicador de **Produção realmente utilizada**. O sistema mais sustentável quanto a esse indicador foi o de Macroalgas, enquanto que os sistemas menos sustentáveis foram os da Ostra tropical e Ostra subtropical. Os peixes são capazes de gerar resíduos de várias formas. Fraga-Corral et al. (2022) mencionam que apenas 45% da biomassa de peixes produzida é aproveitada para a alimentação e 55% é

considerada resíduo como cabeça, víscera, pele, entre outros. No entanto, com os crustáceos os resíduos representam cerca de 60% do animal (carapaça e cefalotórax), restando apenas 40% para o consumo da biomassa (Fraga-Corral et al., 2022). Em contrapartida as macroalgas possuem 100% do aproveitamento de sua biomassa quando destinadas ao consumo humano (Pereira et al., 2021).

Silva et al. (2019) destacam que um dos impactos ambientais gerados pela ostreicultura é a quantidade de conchas que são descartadas. Deve-se atentar ao fato de que grande parte do corpo desse animal é constituído de concha e se tornará resíduo proveniente da produção quando não aproveitado. Zhan et al. (2022) descrevem que por volta de 70% da biomassa produzida por crustáceos e moluscos, o que seriam milhões de conchas e exoesqueletos diariamente, acabam virando resíduo da produção. Se esses resíduos forem descartados no ambiente afetarão os ecossistemas (Zhan et al., 2022). Para diminuir esses impactos e aumentar o aproveitamento dessas conchas, Zhan et al. (2022) destacam que a utilização desses resíduos para a criação de subprodutos seria uma forma viável para solucionar esse impacto gerado pela produção.

O indicador de **Potencial de siltação** mede a quantidade de sólidos suspensos lançados no efluente, enquanto o **Acúmulo de matéria orgânica** mede a quantidade de matéria orgânica acumulado no sedimento dos sistemas de produção (Valenti et al., 2018). Os dois indicadores mostraram uma maior sustentabilidade no cultivo de Macroalgas. Ainda assim, Pereira et al. (2021) recomendam realizar um rodízio nos locais de instalação dos *longlines* para que se obtenha um menor acúmulo de materiais orgânicos e inorgânicos no leito do mar logo abaixo dos cultivos.

O indicador de **Acúmulo de material particulado** mede a quantidade de material particulado acumulado no fundo dos sistemas (Valenti et al., 2018). Esse indicador, mostrou maior sustentabilidade no sistema de Tambatinga, enquanto que o sistema menos sustentável conforme os indicadores de **Potencial de siltação**, **Acúmulo de matéria orgânica** e **Acúmulo de material particulado** é o de Ostra subtropical. Normalmente, os sólidos suspensos se acumulam no fundo dos viveiros (BOYD et al., 2007), mas em alguns sistemas como no caso das ostras que são produzidas em sistemas em águas abertas, os sedimentos são lançados no próprio ambiente. Portanto, o **Potencial de siltação** é igual ao **Acúmulo de material particulado** no sistema de Ostra subtropical.

As partículas menores presentes nos sistemas são as mais difíceis de serem tratadas, já que essas partículas podem ser facilmente dispersadas na água. Mesmo que as ostras sejam animais de baixo nível trófico, elas podem gerar impacto ambiental negativo por conta de sua biologia. As ostras são ótimas aliadas em tratamento de efluentes por seu hábito filtrador, mas também ao fazê-lo pode gerar uma grande quantidade de sólidos suspensos, já que ao filtrar partículas de tamanho irregulares envolvem-nas com uma camada proteica e as devolvem ao ambiente como pseudofeces, gerando-a, acúmulo de matéria particulada abaixo dos cultivos (Sewald, et al., 2012). Deve-se levar em conta a ação das correntes como um fator determinante para dispersar esse material (Sewald, et al., 2012). Cruz et al. (2015) avaliaram em seu trabalho uma área sem produção de ostras e outra com o cultivo de ostras. Os autores identificaram que a área com o cultivo de ostras tinha maior quantidade de depósitos no fundo, afetando as características do sedimento do local, aumentando a quantidade de matéria orgânica com as pseudofeces o que conseqüentemente aumenta o material particulado (Cruz et al., 2015). A estrutura e localização escolhida para o cultivo são fundamentais para mitigar esse efeito. Fierro-Sañudo et al. (2020) destacam em seu trabalho a utilização de matéria orgânica e água residual de sistemas aquícolas continentais na agricultura sendo fonte de crescimento para plantas. Dessa forma, é possível aumentar a sustentabilidade do sistema e ainda gerar uma produção secundária. Além do mais, o uso de sistemas integrados faz com que aconteça um melhor aproveitamento de nutrientes e até redução de resíduos sólidos que acabam acumulando nos sedimentos (Granada et al., 2016).

Para medir a quantidade de gases responsáveis pelo efeito estufa, Valenti et al. (2018) criaram o indicador de **Potencial de Aquecimento Global**. O sistema mais sustentável foi o de Ostra subtropical e o menos sustentável o de Tambaqui IMTA-Hapa. **Potencial de Aquecimento Global** está diretamente ligado a emissão de gases do efeito estufa (CO_2 , CH_4 e N_2O). De acordo com Mosier (1998) o maior contribuinte para o aquecimento global é o CO_2 (60%), seguido de CH_4 (25%) e N_2O (5%). Portanto, a emissão desses gases pode levar a grandes conseqüências para todos. O sistema Tambaqui IMTA-Hapa foi o único sistema analisado que emitiu mais gases do efeito estufa do que absorveu. Kosten et al. (2020) ressaltam que em sistemas de produção em viveiros existem maiores taxas de metano quando comparado a outros sistemas de cultivos. Isso ocorre porque em viveiros de produção o gás metano é proveniente do acúmulo de matéria orgânica, excretas dos animais, restos de alimentos,

entrada de água rica em nutrientes e produção primária no sedimento de fundo em condições anaeróbicas (Kosten et al., 2020).

Sistemas aquícolas podem emitir esses gases, sendo então necessário começar a analisá-los e quantificá-los (Yang et al., 2015). Ao mesmo tempo, as atividades aquícolas sofrem com as mudanças climáticas, tendo em vista que essa atividade depende de uma consistência do meio ambiente. Organismos de diferentes níveis tróficos no sistema faz com que o ambiente seja melhor aproveitado, já que espécies de diferentes níveis tróficos ocupam diferentes espaços na coluna d'água e se alimentam de fontes diferentes. Flickinger et al. (2020) relatam que em sistemas multitróficos integrados podem ocorrer serviços ecossistêmicos, tal como o sequestro de gases do efeito estufa como o CO₂ e CH₄. No entanto, essa hipótese não foi corroborada no presente trabalho porque o sistema Tambaqui IMTA-Hapa mostrou emissão de gases do efeito estufa e mesmo o sistema Tambaqui IMTA-Livre não apresentou maior absorção do que os sistemas de monocultivo. Portanto, o delineamento dos sistemas IMTA exercem um papel crucial na sua eficiência.

MacLeod et al. (2020) calcularam a quantidade de emissão de gases do efeito estufa na aquicultura a nível global em 2017, sendo de 193.319 milhões de toneladas de CO₂ emitidas no leste asiático, tendo um total de emissão mundial de 245.357 milhões de toneladas de CO₂. Os autores reiteram que a aquicultura é uma atividade que menos emite gases do efeito estufa quando comparado com produções terrestres, como bovinocultura, avicultura, suinocultura. Essa atividade pode ganhar mais visibilidade a nível mundial, tendo em vista a necessidade de produção de proteína e redução das emissões dos gases do efeito estufa (Macleod et al., 2020). Para Alonso et al. (2021) uma possível solução para a emissão de CO₂ é o cultivo de ostras, já que essas são capazes de sequestrar carbono do meio.

Com a necessidade de mensurar os riscos a conservação e biodiversidade do meio, Valenti et al. (2018) criaram o indicador de **Risco de espécies produzidas**. Os sistemas mais sustentáveis quanto a esse indicador foram o de Macroalgas, Ostra tropical e Ostra subtropical. Enquanto os menos sustentáveis foram o de Tambaqui monocultivo, Tambaqui IMTA-Hapa e Tambaqui IMTA-Livre. O que difere esses dois grupos de mais ou menos sustentável basicamente é a espécie a ser produzida, sendo ela nativa, exótica, autóctone ou alóctone da bacia onde o sistema está inserido. O sistema Tambatinga é realizado com um peixe híbrido tambatinga, o que oferece risco a biodiversidade se acontecer escapes. Pode ocorrer um retrocruzamento com

indivíduos puros na natureza com introgressão de genes de outra espécie na população natural. Quando a espécie é exótica não há riscos de introgressão gênica, mas ocorrerá a competição com as espécies nativas. Produtores devem se atentar a pequenos cuidados a produzir uma espécie exótica e/ou híbrida. Pelo menos proteger o seu cultivo com malhas para evitar o escape dos indivíduos e evitando que esses destruam a biodiversidade local e gerem um impacto ambiental.

Em contrapartida, a partir do momento que se produz animais nativos da bacia hidrográfica em que o sistema está inserido não oferece nenhum risco à biodiversidade local e a genética. Pereira et al. (2021) destacam que no cultivo de Macroalgas analisado, não existe risco a biodiversidade, porque a espécie cultivada é nativa da mesma região do cultivo. Para Flickinger et al. (2020), o uso de espécies nativas, faz com que aumente a sustentabilidade nos sistemas de produções aquícolas já que o risco de escape de espécie exótica para os corpos hídricos não existe.

A comparação entre sistemas de produção é complexa devido às grandes variações entre eles. As grandes diferenças biológicas entre as espécies cultivadas exigem o uso de sistemas muito diferentes. Além disso, há vários níveis de intensificação, arraçamento e métodos para manter a qualidade da água. Os indicadores de sustentabilidade conseguem medir pontos comuns em todos eles que são importantes para a análise da sustentabilidade. Para compará-los de forma integrada surge a dificuldade relacionada com o uso de variáveis de diversas naturezas. Portanto, é necessária uma técnica de padronização e integração. De um modo geral, a análise de *benchmark* atendeu a essa necessidade. Ela foi efetiva para mostrar de modo mais fácil e padronizado o ranqueamento dos sistemas de produção de acordo com cada indicador. A magnitude das diferenças de um indicador nos vários sistemas fica de certo modo mascarada com a padronização quando há uma grande assimetria na distribuição dos valores numéricos assumidos por um indicador. Modificações nas fórmulas de padronização devem ser estudadas, tais como a aplicação de transformações por meio de logaritmos ou raiz quadrada para facilitar a visualização das diferenças.

REFERÊNCIAS

AL-HAFEDH, Y.S., ALAM, A., BELTAGI, M.S. Food Production and Water Conservation in a Recirculating Aquaponic System in Saudi Arabia at Different Ratios of Fish Feed to Plants. **Journal of the World Aquaculture Society**, 39: 510-520. 2008.

ALONSO, A. A.; ÁLVAREZ-SALGADO, X. A.; ANTELO, L. T. Assessing the impact of bivalve aquaculture on the carbon circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 279, p. 123873, 2021.

ÁLVAREZ-SALGADO, X. A.; FERNÁNDEZ-REIRIZ, M. J.; FUENTES-SANTOS, I.; ANTELO, L. T.; ALONSO, A. A.; LABARTA, U. CO₂ budget of cultured mussels' metabolism in the highly productive Northwest Iberian upwelling system. **Science of the Total Environment**, v. 849, p. 157867, 2022.

ALVES, A. L.; VARELA, E. S.; MORO, G. V.; KIRSCHNIK, L. N. G. Riscos Genéticos da Produção de Híbridos de Peixes Nativos. **Embrapa Pesca e Aquicultura**, 2014. 60 p.: il. color. Documentos/Embrapa Pesca e Aquicultura, ISSN, p. 2318-1400.

BARBOSA, R. G. **Influência de sistemas de cultivo sobre parâmetros de qualidade do tambaqui (*Colossoma Macropomum*)**. Dissertação (Mestre em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal do Tocantis. Palmas, p.73. 2020.

BARRONCAS, M. F.; PEREIRA-FILHO M.; GOMES, L. C.; ROUBACH, R.; ONO, E. A. Efeitos da troca de água sobre os índices zootécnicos e qualidade dos efluentes na criação intensiva do tambaqui (*Colossoma macropomum*) em viveiros escavados. **Revista Brasileira de Engenharia de Pesca**, v. 8, n. 1, p. 49-71, 2015.

BEHRENS, G. M.; LASNER, T.; BRINKER, A; SCHUMANN, M. Viability of cork-enriched feed in trout farming: An agri benchmark fish study on innovative aquaculture techniques. **Thünen Working Paper**, 2019.

BOYD, C. E.; TUCKER, C.; MCNEVIN, A.; BOSTICK, K.; CLAY, J. Indicators of resource use efficiency and environmental performance in fish and crustacean aquaculture. **Reviews in Fisheries science**, v. 15, n. 4, p. 327-360, 2007.

BOYD, C. E.; WOOD, C. W.; CHANEY, P. L.; QUEIROZ, J. F. Role of aquaculture pond sediments in sequestration of annual global carbon emissions. **Environmental pollution**, v. 158, n. 8, p. 2537-2540, 2010.

BOYD, C. E.; D'ABRAMO, L. R.; GLENCROSS, B. D.; HUYBEN, D. C.; JUAREZ, L. M.; LOCKWOOD, G. S.; MCNEVIN, A. A.; TACON, A. G. J.; TELETCHEA, F.; TOMASSO JR, J. R.; TUCKER, C. S.; VALENTI, W. C. Achieving sustainable aquaculture: Historical and current perspectives and future needs and challenges. **Journal of the World Aquaculture Society**, v. 51, n. 3, p. 578-633, 2020.

BRICKER, S. B.; FERREIRA, J. G.; ZHU, C.; ROSE, J. M.; GALIMANY, E.; WIKFORS, G.; SAUREL, C.; MILLER, R. L.; WANDS, J.; TROWBRIDGE, P.; GRIZZLE, R.; WELLMAN, K.; RHEAULT, R.; STEINBERG, J.; JACOB, A.; DAVENPORT, E. D.; AYVAZIAN, S.; CHINTALA, M.; TEDESCO, M. A. Role of shellfish aquaculture in the reduction of eutrophication in an urban estuary. **Environmental science & technology**, v. 52, n. 1, p. 173-183, 2018.

BUJAS, T.; KORICAN, M.; VUKIĆ, M.; SOLDI, V.; VLADIMIR, N.; FAN, A. Review of Energy Consumption by the Fish Farming and Processing Industry in Croatia and the Potential for Zero-Emissions Aquaculture. **Energies**, v. 15, n. 21, p. 8197, 2022.

CAI, J. N.; YAN, X.; LEUNG, P. S. Benchmarking species diversification in global aquaculture. **FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 605**. Rome, FAO. 2022. <https://doi.org/10.4060/cb8335en>.

CHEN, G.; BAI, J.; BI, C.; WANG, Y.; CUI, B. Global greenhouse gas emissions from aquaculture: a bibliometric analysis. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 348, p. 108405, 2023.

CRUZ, M. C. S.; COSTA, S. F. F.; FERREIRA, R. C.; NASCIMENTO, R. L.; PINTO, T. K. O. Avaliação do impacto de um cultivo de ostras sobre o ambiente bentônico. **Boletim do Instituto de Pesca**, v. 41, n. 2, p. 207-218, 2015.

CREPALDI, D. V.; TEIXEIRA, E. A.; FARIA, P. M. C.; RIBEIRO, L. P.; MELO, D. C.; CARVALHO, D.; SOUSA, A. B.; SATURNINO, H. M. Sistemas de produção na piscicultura. **Revista Brasileira de Reprodução Animal**, v.30, n.3/4, p.86-99, 2006.

DANTAS, D. P. **Viabilidade técnica, econômica e sustentabilidade da produção de camarão-da-amazônia e tambaqui em monocultivo e em sistema multitrófico-multiespacial**. Tese (Doutorado em Biologia Aquática) – Universidade Estadual Paulista, Centro de Aquicultura. São Paulo, p. 145. 2017.

DANTAS, D. P.; FLICKINGER, D. L.; COSTA, G. A.; BATLOUNI, S. R.; MORAES-VALENTI, P.; VALENTI, W. C. Technical feasibility of integrating Amazon river prawn culture during the first phase of tambaqui grow-out in stagnant ponds, using nutrient-rich water. **Aquaculture**, v. 516, p. 734611, 2020.

DAVID, F. S.; PROENÇA, D. C.; VALENTI, W. C. Nitrogen budget in integrated aquaculture systems with Nile tilapia and Amazon River prawn. **Aquaculture International**, v. 25, n. 5, p. 1733-1746, 2017a.

DAVID, F. S.; PROENÇA, D. C.; VALENTI, W. C. Phosphorus budget in integrated multitrophic aquaculture systems with Nile Tilapia, *Oreochromis niloticus*, and Amazon River prawn, *Macrobrachium amazonicum*. **Journal of the World Aquaculture Society**, v. 48, n. 3, p. 402-414, 2017b.

DE SOUZA, R. A. L.; TAKATA, R.; DE SOUZA, A. S. L.; JUNIOR, M. L. S.; DA SILVA, F. N. L. Caracterização de sedimentos em viveiros de piscicultura na Amazônia Oriental, Brasil. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 1, p. e41710111815-e41710111815, 2021.

EBELING, J. M.; TIMMONS, M. B.; BISOGNI, J. J. Engineering analysis of the stoichiometry of photoautotrophic, autotrophic, and heterotrophic removal of ammonia–nitrogen in aquaculture systems. **Aquaculture**, v. 257, n. 1-4, p. 346-358, 2006.

ENGLE, C. R.; SENTEN J. V.; SCHWARZ, M. H.; BRAYDEN, C.; BELLE S. Developing production and financial benchmarks for marine aquaculture from farm data. **Aquaculture Economics & Management**, p. 1-30, 2022.

FAO. 2022. The State of World Fisheries and Aquaculture 2022. Towards Blue Transformation. *Rome, FAO*.

FAO. 2006. State of world aquaculture 2006. FAO Fisheries Technical Paper No. 500, FAO, Rome, Italy.

FIALHO, N. S.; VALENTI, W. C.; DAVID, F. S.; GODOY, E. M.; PROENÇA, D. C.; ROUBACH, R.; BUENO, G. W. Environmental sustainability of Nile tilapia net-cage culture in a neotropical region. **Ecological Indicators**, v. 129, p. 108008, 2021.

FIERRO-SAÑUDO, J. F.; RODRÍGUEZ-MONTES DE OCA, G. A.; PÁEZ-OSUNA, F. Co-culture of shrimp with commercially important plants: a review. **Reviews in Aquaculture**, v. 12, n. 4, p. 2411-2428, 2020.

FLICKINGER, D. L.; COSTA, G. A.; DANTAS, D. P.; PROENÇA, D. C.; DAVID, F. S.; DURBOROW, R. M.; MORAES-VALENTI, P.; VALENTI, W. C.; et al. The budget of carbon in the farming of the Amazon river prawn and tambaqui fish in earthen pond monoculture and integrated multitrophic systems. **Aquaculture Reports**, v. 17, p. 100340, 2020.

FRAGA-CORRAL, M.; RONZA, P.; GARCIA-OLIVEIRA, P.; PEREIRA, A. G.; LOSADA, A. P. PRIETO, M. A.; QUIROGA, M. I.; SIMAL-GANDARA, L. Aquaculture as a circular bio-economy model with Galicia as a study case: How to transform waste into revalorized by-products. **Trends in Food Science & Technology**, v. 119, p. 23-35, 2022.

GILSON, F. **Efeito do tamanho das fazendas de tambatinga (*Colossoma macropomum x Piractus brachipomum*) na liberação de resíduos, desempenho econômico, desenvolvimento social e sustentabilidade do sistema de produção**. Tese (Doutorado em Aquicultura) – Universidade Estadual Paulista, Centro de Aquicultura. São Paulo, p. 137. 2019.

GRANADA, L.; SOUSA, N.; LOPES, S.; LEMOS, M. F. L. Is integrated multitrophic aquaculture the solution to the sectors' major challenges? – a review. **Reviews in Aquaculture**, v. 8, n. 3, p. 283-300, 2016.

JANSEN, H. M.; BURG, S. V. D.; BOLMAN, B.; JAK, R. G.; KAMERMANS, P.; MARNIX, P.; STUIVER, M. The feasibility of offshore aquaculture and its potential for multi-use in the North Sea. **Aquaculture international**, v. 24, p. 735-756, 2016.

KIMPARA J. M.; PEREIRA S. A.; VALENTI W. C. Produção e beneficiamento da macroalga marinha *Hypnea*. ABC da agricultura familiar, EMBRAPA – Brasília, p. 58. 2021.

KOSTEN, S.; ALMEIDA, R. M.; BARBOOSA, I.; MENDONÇA, R.; MUZITANO, I. S.; OLIVEIRA-JUNIOR, E. S.; VROOM, R. J. E.; WANG, H. J.; BARROS, N. Better assessments of

greenhouse gas emissions from global fish ponds needed to adequately evaluate aquaculture footprint. **Science of the Total Environment**, v. 748, p. 141247, 2020.

KURNIAWAN, S. B.; AHMAD, A.; RAHIM, N. F. M.; SAID, N. S. M.; ALNAWAJHA, M. M.; IMRON, M. F.; ABDULLAH, S. R. S.; OTHMAN, A. R.; ISMAIL, N. "I.; HASAN, H. A. Aquaculture in Malaysia: Water-related environmental challenges and opportunities for cleaner production. **Environmental Technology & Innovation**, v. 24, p. 101913, 2021.

LEGARDA, E. C.; POLI, M. A.; MARTINS, M. A.; PEREIRA, S. A.; MARTINS, M. L.; MACHADO, C.; LORENZO, M. A.; VIEIRA, F. N. Integrated recirculating aquaculture system for mullet and shrimp using biofloc technology. **Aquaculture**, v. 512, p. 734308, 2019.

LIMA, L. B.; OLIVEIRA, F. J. M.; GIACOMINI, H. C.; LIMA-JUNIOR, D. P. Expansion of aquaculture parks and the increasing risk of non-native species invasions in Brazil. **Reviews in Aquaculture**, v. 10, n. 1, p. 111-122, 2018.

LOTHMANN, R.; SEWILAM, H. Potential of innovative marine aquaculture techniques to close nutrient cycles. **Reviews in Aquaculture**, 2022.

LUO, G. Review of waste phosphorus from aquaculture: Source, removal and recovery. **Reviews in Aquaculture**, 2022.

MACCACCHERO, G. B.; FERREIRA, J. F.; GUZENSKI, J. Influence of stocking density and culture management on growth and mortality of the mangrove native oyster *Crassostrea sp.* in southern Brazil. **Biotemas**, v. 20, n. 3, p. 47-53, 2007

MACEDO, C. F.; SIPAÚBA-TAVARES, L. H. Eutrofização e qualidade da água na piscicultura: consequências e recomendações. **Boletim do instituto de Pesca**, v. 36, n. 2, p. 149-163, 2010.

MACLEOD, M. J.; HASAN, M. R.; ROBB, D. H. F.; RARSHID, M. M. U. Quantifying greenhouse gas emissions from global aquaculture. **Scientific reports**, v. 10, n. 1, p. 11679, 2020.

MIRALDO, M. C. **Análise da sustentabilidade ambiental de um cultivo de ostras em estuário tropical**. Tese (Mestrado em Aquicultura) – Universidade Estadual Paulista, Centro de Aquicultura. São Paulo, p. 40. 2015.

MOSIER, A. R. Soil processes and global change. **Biology and fertility of soils**, v. 27, p. 221-229, 1998.

NEORI, Amir. Essential role of seaweed cultivation in integrated multi-trophic aquaculture farms for global expansion of mariculture: an analysis. **Journal of Applied Phycology**, v. 20, p. 567-570, 2008.

ONU BR. Organização das Nações Unidas no Brasil. **População mundial deve atingir 9,6 bilhões em 2050, diz novo relatório da ONU**. Brasil, 17 jun. 2019. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/83427-populacao-mundial-deve-chegar-97-bilhoes-de-pessoas-em-2050-diz-relatorio-da-onu>>. Acesso em: 28 jan. 2023.

PEREIRA, S. A.; KIMPARA, J. M.; VALENTI, W. C. Sustainability of the seaweed *Hypnea pseudomusciformis* farming in the tropical Southwestern Atlantic. **Ecological Indicators**. v. 121, p.107101, 2021.

PEDRAZZANI, A. S.; TAVARES, C. P. S.; QUINTILIANO, M.; COZER, N.; OSTRENSKY, A. New indices for the diagnosis of fish welfare and their application to the grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) reared in earthen ponds. **Aquaculture Research**, v. 53, n. 17, p. 5825-5845, 2022.

RYAN, K. A.; PALACIOS, L. C.; ENCINA, F.; GRAEBER, D.; OSORIO, S.; STUBBINS, A.; WOELFL, S.; NIMPTSCH, J. Assessing inputs of aquaculture-derived nutrients to streams using dissolved organic matter fluorescence. **Science of The Total Environment**, v. 807, p. 150785, 2022.

SAAD, S.; BASHAR, R.; YEASMIN, F.; KHAN, N. A. Understanding the Relationship between Aquaculture and Poverty: The Case of Gurudaspur, Natore. **Am. J. Environ. Sci.** <https://doi.org/10.3844/ajessp>, 2018.

SAMPAIO, D. S.; FONSECA, T.; VALENTI, W.S. 2023. Sustainability assessment of native oyster culture in Amazonia (*in preparison*).

SEWALD, A. M.; RAUL, M.; RUDORFF, N. M.; BONETTI, C.; MADUREIRA, L. A. D. S. Caracterização Química do Extrato Orgânico de Sedimentos em Áreas de Cultivo de Ostras e Mexilhões na Baía Sul de Florianópolis, SC. **Revista Virtual de Química**, v. 4, n. 4, p. 413-433, 2012.

SILVA, T. H.; MESQUITA-GUIMARÃES, J.; HENRIQUES, B.; SILVA, F. S.; FREDEL, M. C. The potential use of oyster shell waste in new value-added by-product. **Resources**, v. 8, n. 1, p. 13, 2019.

STAPENHURST T. The benchmarking book: a how-to-guide to best practice for managers and practitioners. Oxford: Elsevier; 2009.

TURCIOS, A. E.; PAPENBROCK, J. Sustainable treatment of aquaculture effluents – what can we learn from the past for the future? **Sustainability**, v. 6, n. 2, p. 836-856, 2014.

VALENTI, W.C.; BALLESTER, E. L. 2023. Special Issue "Integrated Aquaculture and Monoculture of Low-Trophic Species". Disponível em: <https://www.mdpi.com/journal/fishes/special_issues/500Z3E5HT4>. Acesso em: 28 de maio de 2023.

VALENTI, W. C.; KIMPARA, J. M.; PRETO, B. D. L.; MORAES-VALENTI, P. Indicators of sustainability to assess aquaculture systems. **Ecological indicators**, v. 88, p. 402-413, 2018.

YANG, P.; HE, Q.; HUANG, J.; TONG, C. Fluxes of greenhouse gases at two different aquaculture ponds in the coastal zone of southeastern China. **Atmospheric Environment**, v. 115, p. 269-277, 2015.

YANG, Y. F.; FENG, C. P.; INAMORI, Y.; MAEKAWA, T. Analysis of energy conversion characteristics in liquefaction of algae. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 43, n. 1, p. 21-33, 2004.

YOGEV, U.; SOWERS, K. R.; MOZES, N.; GROSS, A. Nitrogen and carbon balance in a novel near-zero water exchange saline recirculating aquaculture system. **Aquaculture**, v. 467, p. 118-126, 2017.

YOGEV, U.; VOGLER, M.; NIR, O.; LONDONG, J.; GROSS, A. Phosphorous recovery from a novel recirculating aquaculture system followed by its sustainable reuse as a fertilizer. **Science of The Total Environment**, v. 722, p. 137949, 2020.

ZHAN, J.; LU, J.; WANG, D. Review of shell waste reutilization to promote sustainable shellfish aquaculture. **Reviews in Aquaculture**, v. 14, n. 1, p. 477-488, 2022.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise de *benchmark* realizada com sete sistemas de aquicultura indicou que os cultivos de Macroalga, Ostra tropical e Ostra subtropical são ambientalmente mais sustentáveis do que os cultivos de peixes de baixo nível trófico. Esses cultivos envolvem organismos extrativistas de recursos naturais que não dependem do fornecimento de dieta alóctone ao cultivo e são realizados no mar. Os sistemas integrados de cultivo de peixes de baixo nível trófico não mostraram sustentabilidade ambiental claramente superior aos monocultivos como seria esperado. Certamente, o delineamento dos cultivos e as espécies utilizadas exercem um papel preponderante na sustentabilidade dos sistemas.

O uso da ferramenta *benchmark* mostrou-se interessante para realizar análises comparativas de sustentabilidade em diferentes sistemas de produção. Ela permite uma rápida visualização do ranqueamento dos cultivos de acordo com cada indicador. A comparação da magnitude das diferenças fica um pouco mascarada com os valores padronizados. Mudanças nas fórmulas de cálculo podem ser introduzidas para melhorar a visualização da magnitude das diferenças.