

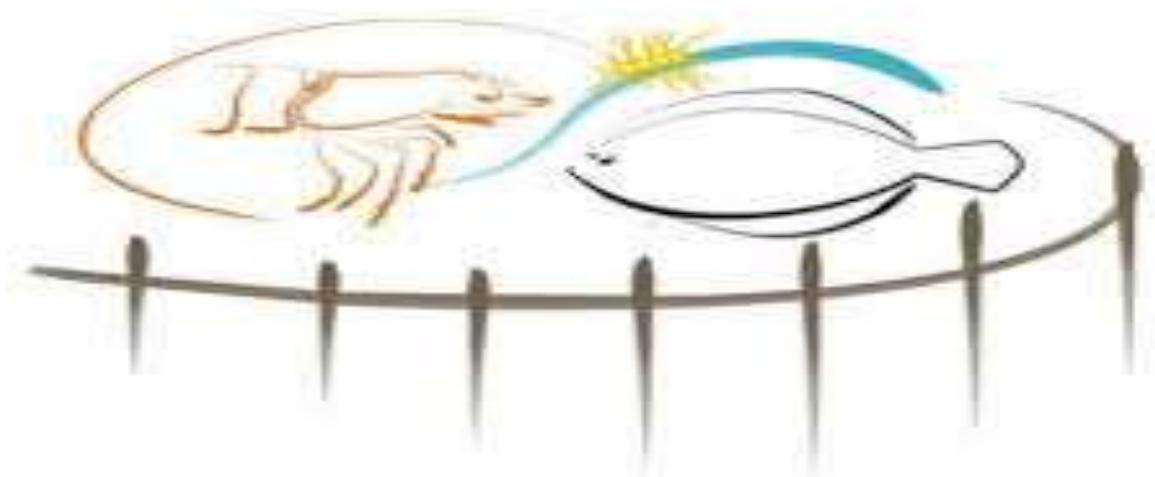


UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
INSTITUTO DE OCEANOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AQUICULTURA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Avaliação de um sistema de recirculação de água (RAS) salina formado por
leito vegetado com o aspargo marinho *Salicornia neei* Lag.**

Yasmin dos Santos Chaves



Orientador: Prof. Dr. César Serra Bonifácio Costa

Co-orientador: Prof. Dr. Geraldo Kipper Fóes

Rio Grande – RS – Brasil

Julho 2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
INSTITUTO DE OCEANOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AQUICULTURA

Avaliação de um sistema de recirculação de água (RAS) salina formado por leito vegetado com o aspargo marinho *Salicornia neei* Lag.

Yasmin dos Santos Chaves

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Aquicultura no Programa de Pós-graduação em Aquicultura da Universidade Federal do Rio Grande-FURG.

Orientador: Dr. César Serra Bonifácio Costa

Co-orientador: Dr. Geraldo Kipper Foés

Rio Grande – RS – Brasil

Julho 2019

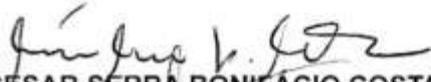
Ata de aprovação



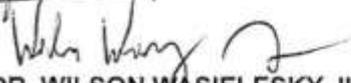
ATA 12/2019

DE DEFESA DA 186ª DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM AQUICULTURA

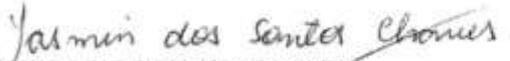
No dia trinta e um de julho de dois mil e dezenove, às nove horas, no Auditório da Estação Marinha de Aquicultura da FURG, reuniu-se a Banca Examinadora de Dissertação de Mestrado em Aquicultura, da **YASMIN DOS SANTOS CHAVES**, orientada pelo Prof. Dr. Cesar Serra Bonifácio Costa, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. Cesar Serra Bonifácio Costa (orientador – IO/FURG), Prof. Dr. Geraldo Kipper Fôes (IO/FURG), Prof. Dr. Wilson Wasielesky Junior (IO/FURG) e o Prof. Dr. Carlos Augusto Prata Gaona (UNESP). Título da dissertação: "**Avaliação de sistema de recirculação de água (RAS) salina formado por leito vegetado com o aspargo marinho Salicornia neei Lag**". Dando início à defesa, o Coordenador Adjunto do PPGAq Prof. Dr. Geraldo Kipper Fôes, passou a presidência da sessão ao Prof. Dr. Cesar Serra Bonifácio Costa, que na qualidade de orientador, passou a palavra para a candidata apresentar a Dissertação. Após ampla discussão entre os membros da Banca e a candidata, a Banca se reuniu sob a presidência do Coordenador em Exercício. Durante esse encontro ficou estabelecido que as sugestões dos membros da Banca Examinadora devem ser incorporadas na versão final da dissertação, ficando a cargo do Orientador o cumprimento desta decisão. A candidata a **YASMIN DOS SANTOS CHAVES** foi considerada **APROVADA**, devendo a versão definitiva da Dissertação ser entregue a Secretaria do PPGAq, no prazo estabelecido nas Normas Complementares do Programa. Nada mais havendo a tratar, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, será assinada pela Banca Examinadora, pela candidata e pelo Coordenador Adjunto do PPGAq.


 PROF. DR. CESAR SERRA BONIFÁCIO COSTA (ORIENTADOR – IO/FURG)


 PROF. DR. GERALDO KIPPER FÔES (IO/FURG)


 PROF. DR. WILSON WASIELESKY JUNIOR (IO/FURG)


 PROF. DR. CARLOS AUGUSTO PRATA GAONA (UNESP)


 YASMIN DOS SANTOS CHAVES


 PROF. DR. GERALDO KIPPER FÔES (Coordenador Adjunto do PPGAq)

Ficha catalográfica

C512a Chaves, Yasmin dos Santos.

Avaliação de um sistema de recirculação de água (RAS) salina formado por leito vegetado com o aspargo marinho *Salicornia neei* Lag / Yasmin dos Santos Chaves. – 2019.
59 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Aquicultura, Rio Grande/RS, 2019.

Orientador: Dr. César Serra Bonifácio Costa.

Coorientador: Dr. Geraldo Kipper Foés.

1. Sistemas BFT 2. Compostos Nitrogenados 3. Fosfato
4. Leitões Vegetados 5. Halófitas 6. *Salicornia neei* I. Costa, César Serra Bonifácio II. Foés, Geraldo Kipper III. Título.

CDU 639.3:639.64

Catálogo na Fonte: Bibliotecário José Paulo dos Santos CRB 10/2344

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABELAS	vii
AGRADECIMENTOS.....	viii
RESUMO.....	9
ABSTRACT	11
1. INTRODUÇÃO	13
1.1. Sistema de cultivo BFT.....	14
1.2 Cultivo aquapônico de plantas halófitas.....	15
2. OBJETIVO GERAL	17
2.1 Objetivos específicos	17
3. MATERIAL E MÉTODOS	17
3.1 Local de estudo	17
3.2 Produção de mudas de <i>S. neei</i>	17
3.3 RAS aquapônico e as águas dos cultivos BFT do camarão-branco-do-Pacífico.....	18
3.4 Avaliação das condições físico-químicas e da eficiência de remoção dos nutrientes do RAS Aquapônico	23
3.4.1. Avaliação da passagem da água pelos leitos vegetados.....	23
3.4.2. Avaliação da recirculação prolongada de água nos leitos vegetados.....	24
3.5 Desenvolvimento da <i>S. neei</i> nos leitos vegetados.....	24
3.6 Análises dos dados.....	25
4. RESULTADOS	26
4.1 . Avaliação das condições físico-químicas do RAS Aquapônico.....	26
4.2.Avaliação da eficiência de remoção dos nutrientes do RAS Aquapônico.....	32
4.3. Desenvolvimento da <i>Salicornia neei</i> nos leitos vegetados.....	37
5. DISCUSSÃO.....	42
5.1. Avaliação das condições físico-químicas do RAS Aquapônico.....	42
5.2. Avaliação da eficiência de remoção dos nutrientes do RAS Aquapônico.....	44
5.3. Desenvolvimento da <i>Salicornia neei</i> nos leitos vegetados.....	48
6. CONCLUSÕES.....	50
7. Referências Bibliográficas.....	51

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fotografias dos sistemas aquapônicos de recirculação de água avaliados. (A) Sistema de Recirculação (RAS) aquapônico composto por três leitos vegetados com a halófito nativa *Salicornia neei*. (B) Sistema de clarificação e escoamento superficial dos leitos vegetados. (C) Tanque coletor na saída dos leitos vegetados.....20

Figura 2: Diagrama do Sistema de Recirculação (RAS) aquapônico.....21

Figura 3. Eficiência de remoção de sólidos suspensos totais (SST) das águas vindas dos raceways pelo clarificador utilizado no RAS aquapônico. A eficiência de clarificação aumentou logaritmicamente em relação ao aumento do SST (n= 10).....27

Figura 4: (A) Valores de sólidos suspensos totais (SST) na água de entrada (bolas preenchidas) e médias (\pm intervalo de confiança de 95%) de SST da água de saída (bolas vazadas) dos leitos vegetados do RAS aquapônico. Em cada dia, o valor da água de entrada fora do intervalo de confiança da média dos valores de saída dos leitos indica diferenças significativamente. (B) Reduções médias do SST após passagem nos leitos vegetados.....29

Figura 5: Médias (\pm erros padrão) do teor de umidade e da condutividade elétrica dos solos dos leitos vegetados ao longo do período de avaliação do RAS aquapônico.....30

Figura 6: (A) Médias diárias de temperaturas máximas, médias e mínimas, (B) radiação solar e valores de precipitação diárias ao longo do período de avaliação do RAS aquapônico.....31

Figura 7: Valores das concentrações de (A) nitrato e (B) nitrito na água de entrada e médias (\pm intervalo de confiança de 95%) da água de saída dos leitos vegetados ao longo do período de avaliação do RAS aquapônico. Em cada dia, o valor da água de entrada fora do intervalo de

confiança da média dos valores de saída dos leitos indica diferença significativa.....34

Figura 8: Valores das concentrações de (A) nitrogênio amoniacal total (NAT) e (B) fosfato na água de entrada e médias (\pm intervalo de confiança de 95%) da água de saída dos leitos vegetados ao longo do período de avaliação do RAS aquapônico. Em cada dia, o valor da água de entrada fora do intervalo de confiança da média dos valores de saída dos leitos indica diferença significativa.....35

Figura 9: Biomassas médias fresca (\pm erro padrões) de caules de *Salicornia neei* nos leitos vegetados após 3 meses do plantio (abril de 2019), 4 meses do plantio (maio de 2019) e rebrotes após 30 dias de poda realizada em abril de 2019.....38

Figura 10: Médias (\pm erro padrão) das alturas dos caules (A), comprimento de ramificações maiores do que 10 cm (B) e número de ramificações dos caules das plantas de *Salicornia neei* cultivadas em RAS aquapônico em Rio Grande (RS) por 3 meses de crescimento e após 30 dias de uma poda. L = leito; Q = quadrado de parcela amostral; TC = tamanho comercial de caules e ramos em Israel.....40

Figura 11: Número médio (\pm erro padrão) de caules, ramificações maiores do que 10 cm e total de ramificações de plantas de *Salicornia neei* cultivados por 3 meses (abril de 2019) e rebrotadas após 30 dias de uma poda em RAS aquapônico em Rio Grande, RS.....41

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1:** Médias (erro padrão) dos tempos de residência, de parâmetros da água salina e do sedimento dos três leitos vegetados com *Salicornia neei* durante o período de avaliação do RAS aquapônico. Fatores que mostram diferenças significativa ($P < 0,05$) são destacados em negrito. Letras minúsculas diferentes mesma linha indicam médias significativamente diferentes conforme o teste de Tukey ($p < 0,05$). SST = sólidos suspensos totais; DIF SST = diferença no teor de SST entre a entrada e saída da água.....28
- Tabela 2:** Médias (\pm erro padrão) das concentrações (mg L^{-1}) de nutrientes da água de saída dos leitos vegetados ao longo do período de avaliação do RAS aquapônico. Resultados das ANOVAs bifatoriais entre datas de amostragem e leitos vegetados são apresentados.....33
- Tabela 3:** Médias (\pm erro padrão) das concentrações (mg L^{-1}) da água de entrada ($n=30$) e de saída ($n=90$) dos leitos vegetados ao longo do período de avaliação do RAS aquapônico. Resultados das ANOVAs bifatoriais entre datas de amostragem e leitos vegetados são apresentados.....33
- Tabela 4:** Valores médios das concentrações dos nutrientes (nitrato, nitrito, fosfato e nitrogênio amoniacal - NAT), condutividade elétrica (CE) e pH nos lisímetros instalados na camada de brita dos RAS aquapônicos. Dif = diferença entre entrada e média de saída; Dif % = diferença percentual.....36
- Tabela 5:** Médias (\pm erro padrão) das biomassas fresca, seca (ambas em g m^{-2}) e da suculência dos caules da *Salicornia neei* cultivados por 3 meses (abril de 2019), 4 meses (maio de 2019) e de rebrotes após 30 dias da poda em RAS aquapônico em Rio Grande, RS.....39

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Dr. César Costa pela confiança e todos os ensinamentos compartilhados.

A minha família, em especial minha mãe Suzana, pela educação, amor e incentivo.

Ao meu co-orientador Dr. Geraldo Fóes pela amizade, ajuda e apoio constantes.

Aos membros da banca examinadora Dr. Carlos Gaona e Dr. Wilson Wasielesky por aceitarem o contive e pelas valiosas contribuições ao trabalho.

Ao Dr. Luís André Sampaio, pela primeira oportunidade de estágio que tive na vida acadêmica e a todas as amizades e conhecimento adquirido no período no Laboratório de Piscicultura Marinha e Estuarina.

A colega Kennia do Laboratório de Biotecnologia de Halófitas (BTH), por tornar o trabalho laboratorial mais engraçado e divertido, e aos estagiários Andrews e Talisson do ECOVECO pela ajuda na construção dos leitos e cuidados com as plantas na estufa.

Ao Projeto Camarão pela colaboração e utilização a água de recirculação para a realização deste trabalho.

A todas amizades que fiz na EMA e aos colegas que me ajudaram na construção dos leitos.

Ao Sandro pelo auxílio nas análises químicas.

Aos terceirizados, sempre dispostos a ajudar sem hesitar no trabalho pesado.

A todos os professores que tive em minha vida, principalmente para aqueles que exercem a profissão com entusiasmo e tornaram as disciplinas agradáveis e interessantes.

A Capes pela concessão da bolsa.

A todos aqueles que germinam atitudes em favor do meio ambiente.

RESUMO

Os sistemas de cultivo aquícolas estão cada vez mais intensivos, com maiores estocagens de animais e alimentos ofertados, resultando em elevadas concentrações de compostos nitrogenados e fosfatados, material em suspensão e dissolvido na água de cultivo. Dentre as tecnologias aplicadas na intensificação da produção de camarões marinhos no Brasil e resto do mundo, destaca-se a tecnologia de bioflocos (“BFT”, sigla em inglês de “Biofloc Technology”). Uma forma de reduzir o excesso de nutrientes vem sendo a integração de sistema de recirculação de água (“RAS”) com plantas aquáticas, de forma a absorver os nutrientes e gerar biomassa vegetal com alto valor econômico (i.e., RAS aquapônicos). O objetivo do presente trabalho foi a avaliação de um sistema de recirculação de água salina de um cultivo BFT do camarão marinho *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931), composto por leitos vegetados com a halófito nativa da costa brasileira *Salicornia neei*. O sistema aquapônico avaliado foi constituído por um clarificador, um reservatório de água clarificada e três canteiros em sistema de leito vegetado (cada um com 10 m²) com *S. neei* (densidade de plantio de 9 plantas m⁻²) e um tanque coletor. Após o estabelecimento das plantas de *S. neei*, em abril de 2019, as águas de um cultivo BFT do *L. vannamei* (estocagem de 168-421 camarões m⁻²) foram recirculadas através dos leitos vegetados ao longo de 45 dias. Foram avaliadas durante passagens diárias de água pelo sistema, os teores de sólido em suspensão, nitrogenados e fosfato nas águas de entrada e de saída dos leitos, além de outros parâmetros físico-químicos água, solo e do ar. O desenvolvimento e produtividade da *S. neei* nos canteiros foram avaliados por coletas periódicas da biomassa dos caules, e medições das alturas e ramificações, em duas parcelas de 0,5 X 0,5 m em cada leito. O clarificador por sedimentação utilizado mostrou ser incapaz de reter teores de sólidos suspensos totais (SST) menores do que 250 mg L⁻¹ e apresentou uma eficiência máxima de 50%. As concentrações médias na água de entrada dos leitos de SST, nitrato, nitrito, NAT (nitrogênio amoniacal total) e fosfato foram de, respectivamente: 250,77; 39,1; 0,37; 0,07; e 1,53 mg L⁻¹. Após a passagem pelos leitos vegetados as reduções médias dos teores de SST, nitrato, nitrito, NAT e fosfato foram de, respectivamente: 15,2; 15,4; 33,2; 30,4; e 74,0%. Reduções globais significativas foram observadas apenas para nitrito e fosfato. Durante avaliação da recirculação prolongada (13 dias), dentro desse período, os teores de nitrato na água caíram continuamente, chegando ao limite de detecção, enquanto o nitrito passou a ser absorvido eficientemente e o NAT

incorporado a água quando esta passava pelos leitos. Condições anaeróbicas dos reservatórios e aeróbica no substrato do leito, criaram o padrão observado. Apesar da condição fortemente nitrificante no RAS aquapônico nas últimas semanas de avaliação, não ocorreu incorporação significativa de nitrato na água saindo dos leitos vegetados. Este resultado foi possível devido ao crescimento exuberante das plantas de *S. neei*, onde acumulou uma biomassa média de 3722 g m⁻² de matéria fresca (372,2 g m⁻² de massa seca) após 4 meses de crescimento nos leitos vegetados. A biomassa média de rebrote após 30 dias da poda foi de 1193,2 g m⁻² massa fresca (117,3 g m⁻² de massa seca) e as plantas de *S. neei* produziram cerca de 500 caules com tamanho comercial (10 cm) em cada metro quadrado. A alta produtividade e forma de crescimento de *S. neei* nos leitos vegetados apontam para um ótimo potencial comercial desta forma de produção aquapônica do aspargo marinho.

Palavras-chave: sistemas BFT, compostos nitrogenados, fosfato, leitos vegetados, halófitas, *Salicornia neei*.

ABSTRACT

Aquaculture farming systems are increasingly intensive, with higher stocks of animals and foods offered, resulting in high concentrations of nitrogen compounds and phosphate, suspended and dissolved matter in the water. Among the technologies applied in the intensive marine shrimp production in Brazil and in the rest of the world, Biofloc Technology ("BFT") stands out. Intensive farming can be integrated to water recirculation systems (RAS) with aquatic plants in order to reduce high nutrient loads and generate plant biomass with high economic value (i.e., aquaponic RAS). The objective of the present research was the evaluation a saline water recirculation system for cultivation of the marine shrimp *Litopenaeus vannamei* in BFT system, composed by vegetated beds with the Brazilian coastal halophyte *Salicornia neei*. The evaluated aquaponic system was composed by a clarifier (settling tank), a clarified water reservoir and three vegetated beds (each with 10 m²) with *S. neei* (planting density of 9 plants m⁻²), and a water collection tank. At April 2019, after the establishment of *S. neei*, waters from a *L. vannamei* BFT system (storage of 168-421 shrimp m⁻²) were recirculated through the vegetated beds over 45 days. The values of water total suspended solids (TSS), nitrogen compounds and phosphate in the water entering and exiting the beds were evaluated during daily water passages by the aquaponic RAS, as well as other physical-chemical parameters of water, soil and air were monitored. The development and productivity of *S. neei* in the beds were evaluated by periodic harvests of shoot biomass and measurements of shoot heights and branching inside two 0.5 x 0.5 m plots in each bed. The settling tank used was unable to retain TSS contents smaller than 250 mg L⁻¹ and it showed a maximum retention efficiency of 50%. The average concentrations in the inflow water of TSS, nitrate, nitrite, total ammonia nitrogen (TAN) and phosphate were 250.77, 39.1, 0.37, 0.07, 1.53 mg L⁻¹, respectively. After the water passage through the vegetated beds, the average reductions of concentrations of TSS, nitrate, nitrite, TAN and phosphate were 15.2, 15.4, 33.2, 30.4 74.0%, respectively. Significant reductions of global averages were observed only for nitrite and phosphate. During the study, a prolonged recirculation experiment of 13 days was performed, when nitrate contents in the water fell continuously, reaching detection limit values, while the nitrite was efficiently absorbed and the TAN incorporated into the water as it passed through the vegetated beds. This pattern was created by the anaerobic and denitrifying conditions in the water reservoirs and aerobic conditions in the vegetated bed substrate. Despite the overall

strongly nitrifying condition in the aquaponic RAS in the last weeks of evaluation, no significant nitrate incorporation occurred in the water leaving the vegetated beds. This result was possible due to the exuberant growth of *S. neei* plants and the incorporation of nitrogen in the form of nitrate inside their biomass. *Salicornia neei* accumulated an average biomass of 3722 g fresh matter m⁻² (372.2 g dry mass m⁻²) after 4 months of growth in the vegetated beds. The average biomass of resprouting, 30 days after pruning, was 1193.2 g fresh mass m⁻² (117.3 g dry mass m⁻²) and *S. neei* plants produced about 500 commercial-sized shoots (>10 cm long) in each square meter of the beds. The high productivity and growth pattern of *S. neei* in the vegetated beds point to a great commercial potential of this form of aquaponic production of this sea asparagus.

Keywords: Aquapony, RAS, BFT system, nitrogen compounds, phosphate, vegetated bed, halphyte, *Salicornia neei*.

1. Introdução

A aquicultura marinha vem se desenvolvendo muito rapidamente nos últimos anos, em resposta à crescente demanda mundial por alimentos e bioprodutos com propriedades nutritivas e farmacêuticas. No Brasil, aproximadamente 70 mil toneladas de camarões marinhos foram produzidas pela aquicultura em 2015 (IBGE 2015), com mais de 90% da produção nacional concentrada na região nordeste (ABCC/MPA 2013), onde tem sido uma importante fonte de renda para as comunidades rurais da região e dos micro e pequenos produtores (Marques et al. 2016). Atualmente quase toda a produção nacional é representada pelo camarão-branco-do-Pacífico *Litopenaeus vannamei* (Boone 1931) (FAO 2016).

Os sistemas de cultivo são cada vez mais intensivos, com maiores estocagens de animais e suplementação alimentar, resultando em elevadas concentrações de compostos nitrogenados e fosfatados, matéria orgânica em suspensão e dissolvida na água de cultivo, devido principalmente da degradação da ração e da excreção dos organismos cultivados, além de microorganismos na água do cultivo (Wasielesky et al. 2006, Gaona et al. 2011, Krummenauer et al. 2012, Froés et al. 2012).

Plantas vasculares aquáticas podem ser integradas ao cultivo intensivo de camarão, como parte de sistemas de recirculação de água RAS (abreviatura inglesa de “Recirculating Aquaculture Systems”), objetivando a remoção de compostos inorgânicos dissolvidos (Henry-Silva & Camargo 2008, Quintã et al. 2015, Pinheiro et al. 2017, Schardong et al. 2018) e a produção hidropônica de biomassa vegetal com interesse econômico (Hundley & Navarro 2013).

O uso de efluentes e águas de recirculação para produção hidropônica é denominado de aquaponia, que é uma opção econômica para o tratamento de descargas de aquicultura, aliviando a poluição e aumentando a eficiência do uso da água, reduzindo assim o impacto ambiental (Timmons & Ebeling 2010). A integração da aquaponia na aquicultura marinha intensiva depende da identificação de plantas vasculares capazes de crescerem em águas salinas (halófitas). O cultivo de halófitas tem sido combinado com o cultivo de camarões e peixes marinhos para redução de contaminantes descartados no meio ambiente (Costa 2006, Porto et al. 2006, Shpigel et al. 2013, Costa & Herrera 2016a, 2016b, Pinheiro et al. 2017).

1.1. Sistema de cultivo BFT

Dentre as tecnologias aplicadas na intensificação da produção de camarões marinhos no Brasil e resto do mundo, destaca-se a tecnologia de bioflocos (BFT, sigla em inglês de “Biofloc Technology”). Sistema BFT baseia-se na formação de agregados microbianos, que alimentam os animais cultivados e absorvem compostos amoniacais da água, têm sido amplamente utilizados na produção de *L. vannamei* a elevadas densidades de estocagem com mínima ou zero taxa de renovação de água (Hargreaves 2013). Este sistema de cultivo reduz consideravelmente o uso de área e de recursos hídricos em comparação com sistemas tradicionais semi-intensivos (Samocha et al. 2010, 2012).

A utilização de tecnologias como o BFT vem se tornando imprescindível para o estabelecimento de cultivos de camarões marinhos em áreas continentais (Araneda et al. 2008). O alto custo de obtenção de água salgada e a dificuldade de descartar efluentes salgados fazem com que os cultivos continentais sejam realizados em sistema fechado, como o sistema BFT. Estudos que busquem reduzir a salinidade, diminuir a quantidade de água, utilizar sais de baixo custo e reutilizar a água são necessários para tornar esse tipo de cultivo sustentável do ponto de vista econômico e ambiental (Araneda et al. 2008).

O cultivo com BFT inicia pela colonização de bactérias heterotróficas a partir da manipulação da relação carbono:nitrogênio (C:N) da água do cultivo, através da adição de carbono orgânico (frequentemente melaço) baseada na concentração dos nitrogenados presentes no cultivo (Avnimelech 2012, Hargreaves 2013). A manipulação da relação C:N favorece a conversão do nitrogênio amoniacal em biomassa microbiana, mantendo a qualidade de água e, conseqüentemente, reduzindo a necessidade de renovações e aumentando a biossegurança (Mcintosh 2000, Ebeling et al. 2006). Outra vantagem comumente atribuída ao uso do sistema BFT é que os agregados microbianos (bioflocos) podem ser utilizados como fonte complementar de proteína (Burford et al. 2004, Xu et al. 2012). Sistemas superintensivos de cultivos de camarão em sistema BFT e mínima troca de água são realizados com estocagens de 100-500 camarões m^{-2} e geram até 50 MT (toneladas métricas) de camarão ha^{-1} (Taw 2010).

No sistema BFT o crescimento microbiano é tão vigoroso que pode ocorrer acúmulo de sólidos em suspensão na água, ao ponto de obstruir as branquias dos camarões e competir pelo oxigênio na água, conseqüentemente prejudicando o crescimento do camarão (Hargreaves 2013, Schweitzer et al. 2013, Gaona et al. 2016). Devido a necessidade de aeração vigorosa da água para compensar a respiração microbiana, uma característica do sistema BFT é a tendência

de predominar o processo de nitrificação e o acúmulo de nitrato, em relação à desnitrificação e/ou volatilização que poderiam levar a formação de compostos mais tóxicos como a amônia e o nitrito (Avnimelech 2012, Hargreaves 2013).

O fósforo também tende a acumular nos sistemas BFT intensivos, principalmente na forma de fosfatos, devido às grandes suplementações de ração ofertada para os organismos cultivados e excreção dos mesmos. Apesar do fosfato não ser relacionado à intoxicação de organismos na aquacultura, o aumento da concentração deste elemento e a diminuição da razão N:P de compostos dissolvidos na água podem propiciar florações de microalgas tóxicas, particularmente cianobactérias, com consideravelmente redução na produção de camarão (Alonso-Rodriguez & Paez-Osuna 2003, Yusoff et al. 2010). Conseqüentemente, e o acúmulo excessivo de sólidos, nitrato e fosfato na água de cultivo são aspectos inerentes do sistema BFT. O controle do excesso de sólidos em suspensão pode ser feita por meio do uso de decantadores (clarificadores) (Gaona et al. 2016), entretanto a remoção do nitrato e fosfato dissolvidos na água continua ser um gargalo destes sistemas, que deve ser tratado com alternativas tecnológicas e inovações.

1.2. Cultivo aquapônico de plantas halófitas

O cultivo aquapônico de halófitas pode ser realizado em tanques sem substrato (balsas flutuantes) ou em sistemas onde as raízes são fixadas em um substrato. No sistema de cultivo de camada filtrante (“nutrient film technique”, NFT) as plantas crescem em uma camada rasa de água em fluxo contínuo (dentro de canais, leitos ou de tubos), sendo a água enriquecida em nutrientes coletada em um reservatório e recirculada pelo sistema (Hundley & Navarro 2013). Variantes do NFT são denominadas banhados artificiais (“constructed wetlands”) ou sistema de leito cultivado (“cultivated bed”), onde ocorre o preenchimento dos canais com substrato poroso, como seixos ou brita, as raízes das plantas ficam submersas e o efluente ou água para recirculação pode fluir em uma fina lâmina recobrimdo a superfície ou em subsuperfície (Webb et al. 2012, Espinosa-Moya et al. 2014, Schardong et al. 2018). Nos leitos cultivados o fluxo contínuo visa evitar a estagnação do oxigênio e o acúmulo de compostos tóxicos reduzidos (ex. sulfetos) resultantes de microorganismos anaeróbicos (Buhmann & Papenbrocka 2013, Buhmann et al. 2015). Em todos RAS aquapônicos, o biofilme microbiano sobre raízes, paredes dos recipientes e substratos exercem papel determinante na eficiência de filtragem/transformação das formas químicas dos nutrientes. RAS com halófitas podem remover entre 23-82% de compostos nitrogenados inorgânicos e 20-89% de fosfato (Costa

2011, Sousa et al. 2011, Webb et al. 2012, Pinheiro et al. 2017, Schardong et al. 2018) de efluentes salinos da aquicultura.

O Brasil possui uma rica flora de plantas halófitas, que dominam diferentes habitats da costa e planos salinos em áreas continentais, e constitui um imenso potencial biotecnológico a disposição da agricultura de regiões com solos salinos ou para o uso sustentável de águas salinas (Costa & Herrera 2016a, 2016b). Entre as halófitas nativas mais promissoras de serem usadas no controle de macronutrientes em efluentes e águas de recirculação de sistemas de cultivos salinos podemos destacar o aspargo marinho *Salicornia neei* Lag. [sinonímia de *Sarcocornia ambigua* (Michx.) M.A.Alonso & M.B.Crespo; *Salicornia gaudichaudiana* Moq.](Costa et al. 2019). Diferentes espécies de aspargo marinho têm ganhado espaço no tratamento de efluente da aquicultura marinha por serem tolerantes a altas salinidades, além de apresentarem boa absorção de nutrientes e produtividade de biomassa com interesse econômico (Glenn et al. 2013, Ventura & Sagi 2013, Buhmann et al. 2015).

A *S. neei* é uma planta herbácea perene de ampla distribuição na costa brasileira, habitando a zona entremarés de marismas e manguezais (Medina et al. 2008, Costa & Herrera 2016a), apresenta morfologia simplificada, caracterizada por folhas fusionadas, que se apresentam como caules clorofilados cilíndricos, suculentos e segmentados.

Os caules dessa espécie apresentam alta qualidade nutricional, com altos teores de minerais, tais como K, Mg, Ca, Fe, Mn e Zn (Bertin et al. 2014, 2016, Riquelme et al. 2017, Doncato & Costa 2018), são ricos em ácido palmítico e ácidos graxos poli-insaturados (ω -6 e ω -9; Bertin et al. 2014, Costa et al. 2014a), além de compostos fenólicos com propriedades antioxidantes e antiinflamatórias (Bertin et al. 2014, Timm et al. 2015, Pinheiro et al. 2017; Riquelme et al., 2017). Consequentemente, o aspargo marinho *S. neei* pode ser utilizada na alimentação humana (Costa 2006, Dias 2015, Timm et al. 2015, Bertin et al. 2016, Riquelme et al. 2017) e animal, em geral (Bertin et al. 2014, Costa et al. 2014a). As sementes possuem cerca 13% de óleo destacando-se o ácido linoleico- ω 6 (42,9%) e o ácido palmítico (20,4%), e a massa seca de caules reprodutivos (que contém sementes, mas representam uma biomassa vegetal muito maior) até 5,2% de lipídeos, sendo ambos produtos recomendados para o consumo animal ou produção de biodiesel (D'Oca et al. 2012, Costa et al. 2014a). Cultivos de *S. neei* vem em diferentes zonas climáticas têm atingindo produções médias de matéria fresca de caules por safra de 8,2 a 59,5 t ha⁻¹ (Costa & Herrera 2016b, Pinheiro et al. 2017). Esta espécie já foi cultivada com águas/efluentes salinos em solos arenosos (Doncato & Costa,

2018) e argilosos (Costa & Herrera 2016b, Riquelme et al. 2017), bem como em sistemas aquapônicos em bancada NFT (Oliveira 2017) e balsas flutuantes (Pinheiro et al. 2017). Recentemente, Schardong et al. (2018) avaliaram o efeito da passagem em um leito vegetado misto, com *S. neei*, *Batis maritima* e *Sporobolus virginicus*, na qualidade da água de recirculação de um cultivo de camarão marinho (água clara). Neste trabalho cultivamos *S. neei* em um leito vegetado com água de recirculação de um cultivo BFT de camarão marinho, para avaliação de seu crescimento e da capacidade de depuração da água salgada.

2. Objetivo Geral

Avaliação de um sistema de recirculação aquapônico de água salina composto por um leito vegetado com a halófita nativa da costa brasileira *Salicornia neei*.

2.1. Objetivos Específicos

(1) Avaliar a eficiência de remoção de compostos nitrogenados (nitrogênio amoniacal, nitrito e nitrato) e de fosfato da água salina de um cultivo intensivo BFT do camarão branco do Pacífico por um leito vegetado com *Salicornia neei*.

(2) Avaliar o desenvolvimento e a produtividade de biomassa vegetal de *S. neei* produzida em leito vegetado irrigado com água salina de um cultivo intensivo BFT do camarão branco do Pacífico.

3. Material e Métodos

3.1. Local de Estudo

Um sistema aquapônico desacoplado composto leitos vegetados com *S. neei* integrado a um sistema de cultivo BFT intensivo do camarão-branco-do-Pacífico *L. vannamei* foi estabelecido no município de Rio Grande (RS), na Estação Marinha de Aquacultura Prof. Marcos Alberto Marchiori (EMA) da Universidade Federal do Rio Grande - FURG, localizada na praia do Cassino (32° 19' S, 52° 15' W)(Figura 1A; Figura 2).

3.2. Produção de mudas de *S. neei*

As mudas de *S. neei* da linhagem BTH2 desenvolvida pelo Laboratório de Biotecnologia de Halófitas (Instituto de Oceanografia, FURG; Doncato & Costa 2018, Souza et al. 2018) foram obtidas de sementes, conforme protocolo de germinação e crescimento de

plântulas proposto por Freitas & Costa (2014) e Costa & Bonilla (2016b). As plântulas foram transferidas para tubetes de 55 cm³ com areia e mantidas por 45 dias em bandejas com solução nutritiva Hoagland (10%), dentro de uma estufa não aclimatizada, antes de transferidas para o leito vegetado previamente instalado.

3.3. RAS aquapônico e as águas dos cultivos BFT do camarão branco do Pacífico.

Salicornia neei foi plantada nos leitos vegetados em janeiro de 2019 e possibilitando o seu estabelecimento com irrigação periódica com água salina de um viveiro de cultivo em sistema BFT do camarão branco do Pacífico *Litopenaeus vannamei* até o mês de abril de 2019. Após o estabelecimento, águas de dois tanques raceways de cultivo BFT da mesma espécie de camarão foram empregadas para irrigação por 30 dias dos leitos vegetados e a avaliação do efeito do RAS aquapônico na qualidade da água recirculada. A seguir caracterizamos o RAS aquapônico contruído e os cultivos de camarão de onde foi obtida água para avaliação deste sistema.

Os sólidos em suspensão na água do sistema BFT foram inicialmente removidos pela passagem em um clarificador (decantador; Gaona et al. 2011, 2016) cilíndrico de 1000 L, com uma coluna central de sedimentação de 15 cm de diâmetro e 97 cm de altura (Figura 1B). A circulação de água entre os raceways e o clarificador foi realizada por uma bomba com vazão de 7,5 L min⁻¹. A remoção dos sólidos visou prevenir o excesso de matéria orgânica particulada no leito vegetado, sendo o lodo acumulado no clarificador descartado em uma saída na parte inferior do clarificador.

A água clarificada saía por um ladrão na parte superior do clarificador e, por gravidade, era transferida para um reservatório de 3000 L conectado por tubos de PVC e mangueiras de irrigação de polietileno aos leitos vegetados, onde foram plantadas *S. neei* (Figura 2). Cada leito vegetado foi instalado em uma estrutura de madeira, tipo caixa, com 1,0m de largura, 10m de comprimento (10 m²) e 0,60 m de altura, cuja parte interna foi revestida com mantas de polietileno. As mantas preveniram a percolação da água de recirculação para o sedimento adjacente e freático. Foram estabelecidos três leitos vegetados com circulação independente permitindo replicação da avaliação da qualidade da água recirculada (Figura 1A - L1, L2, L3). A água recirculada constituiu a principal fonte de água e nutrientes suplementados ao cultivo de *S. neei*.

Cada leito vegetado tinha uma declividade de $0,1 \text{ cm m}^{-1}$, sendo formado por uma camada de 0,30 m de areia fina sobre uma camada de 0,20 m de brita (diâmetro de 4 a 9 cm), que foram separadas por uma manta comercial de geotêxtil com uma abertura de filtração de 150 μm , fabricada com fibras de poliéster (PET)(Figura 2). A manta de geotêxtil permitiu a percolação da água que ingressava no leito vegetado para a camada de brita (fluxo vertical), mas impedindo a passagem da areia. As plantas de *S. neei* foram estabelecidas na camada superficial de areia em uma densidade de 9 plantas m^{-2} . A água recirculada foi depositada no leito vegetado em sua extremidade superior, onde por ação da gravidade descende por um fluxo vertical até a zona radicular na areia e depois até a brita (Figura 1B). Parte do volume de água colocado escoava pela superfície, ocorrendo o desaparecimento de empoçamentos superficiais cerca de 30 minutos após o término da drenagem diária. Este procedimento preveniu a instalação de organismos vetores de doenças (mosquitos, moluscos). Após percorrer o leito vegetado a água era recolhida, na extremidade oposta à que entrou, por um tubo de PVC de 40 mm na parte inferior da brita e por gravidade retornava a um tanque coletor (Figura 1C). O tanque coletor possuía uma conexão de PVC, com registros e mangueiras de polietileno de 1 polegada, que permitia o recalque da água através de uma bomba da água de 0,5 CV para o clarificador. Medições periódicas da vazão dos leitos (entrada no tanque coletor) foram realizadas durante a avaliação, registrando-se uma carga hidráulica média de $4,9 \text{ L min}^{-1}$ (variando de 4,5 a $5,3 \text{ L min}^{-1}$ entre os leitos). O tempo de residência média foi cerca de 16 minutos, mas variou significativamente ($p < 0,001$) entre leitos (Tabela 1) de 11,2 a 20,8 minutos. A retenção hidráulica dos leitos foi estimada pelo tempo de escoamento após interrupção da entrada de água, considerando a carga hidráulica, sendo de 161 L, 148 L e 157 L, respectivamente, para os leitos L1, L2 e L3 (média = $155,4 \pm 2,8 \text{ L}$).

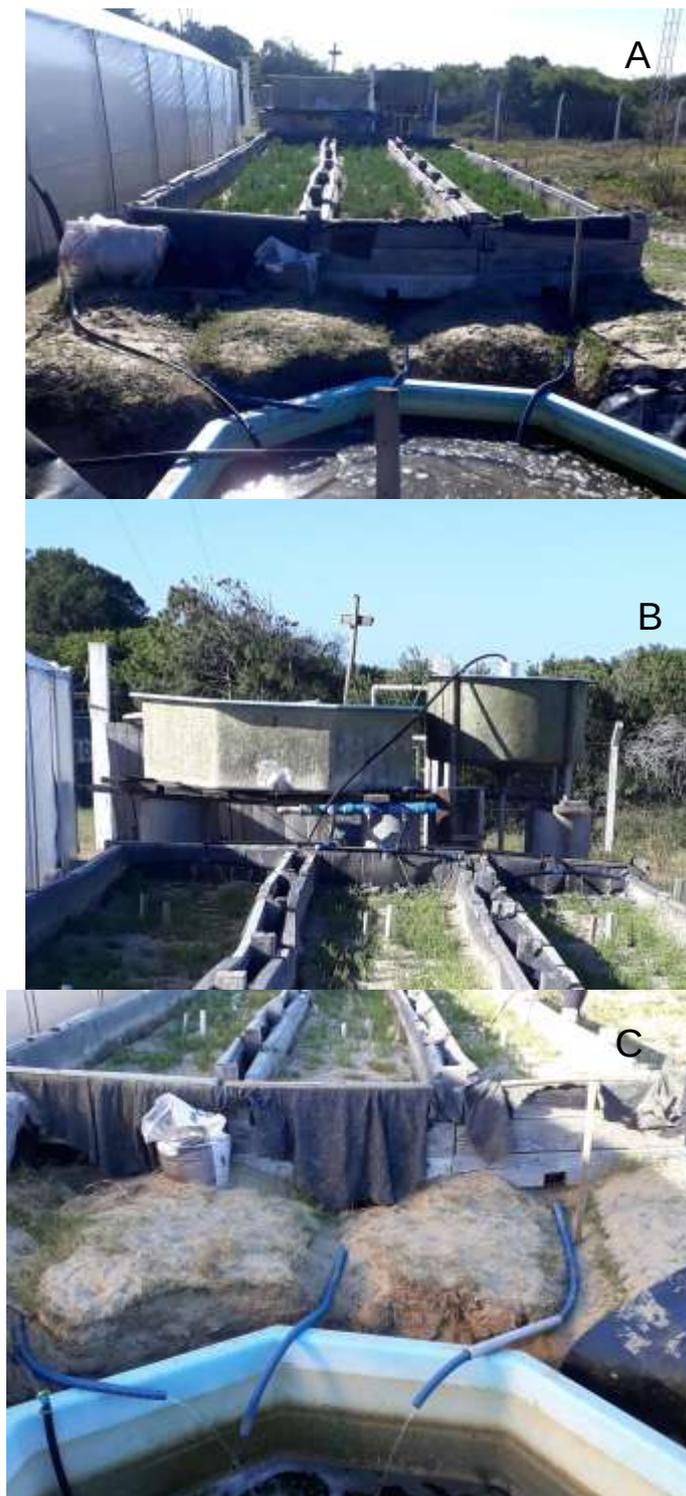


Figura 1- (A) Sistema de Recirculação (RAS) aquapônico composto por três leitos vegetados com a halófito nativa *Salicornia neei*. (B) Sistema de clarificação e escoamento superficial dos leitos vegetados. (C) Tanque coletor na saída dos leitos vegetados.

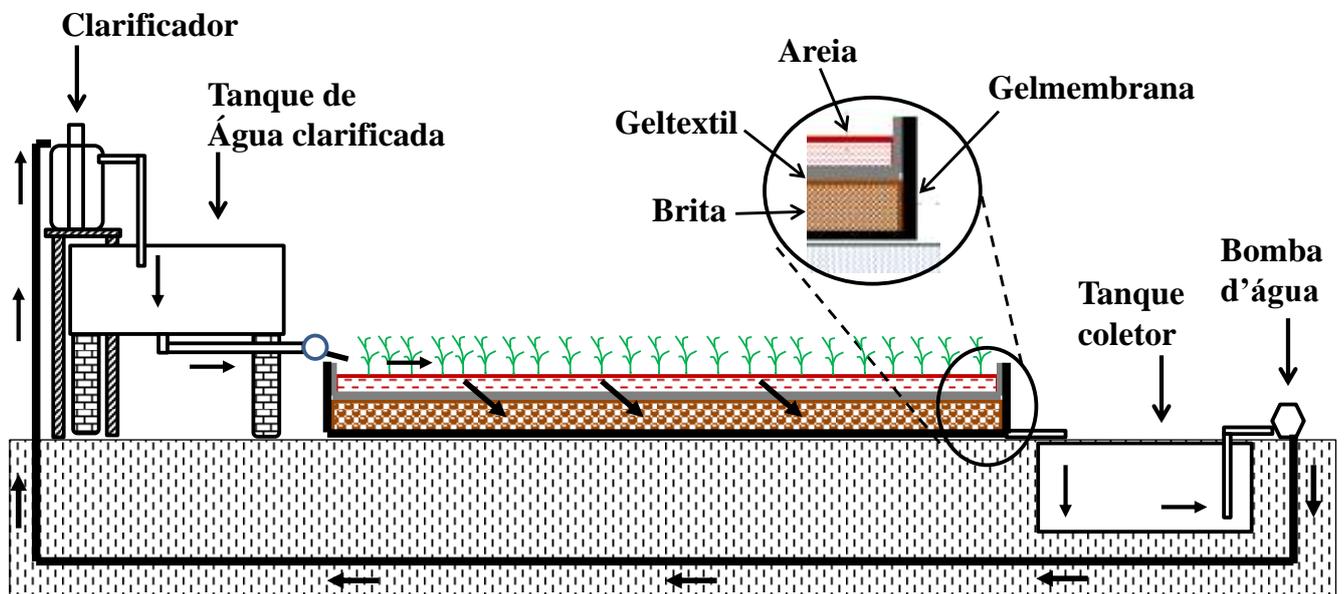


Figura 2- Esquema do Sistema de Recirculação (RAS) aquapônico.

Quanto às fontes de água utilizadas no estudo no período de estabelecimento da *S. neei* nos leitos vegetados, entre janeiro e abril de 2019, as plantas foram irrigadas a cada dois dias com água de um viveiro de cultivo em sistema BFT do *L. vannamei*, com a densidade de 60 camarões m⁻². Durante a rega, cada leito recebeu um volume de 20 L de água salina. Durante o cultivo, a água do viveiro de camarão foi monitorada pela equipe responsável pelo cultivo, onde utilizou-se os equipamentos multiparâmetro HANNA HI 98194 (oxigênio dissolvido e salinidade), pHmetro de bancada Mettler Toledo® para quantificação dos parâmetros *in situ*, assim como foram coletadas amostras de água em recipientes estéreis, as quais foram filtradas e quantificadas para posterior análise. As concentrações de nitrogênio amoniacal total (NAT), o nitrito (N-NO₂) e fosfato (P-PO₄) seguindo a metodologia descrita em Baumengarten (2010) e nitrato (N-NO₃) segundo metodologia descrita em Garcia et al (2014).

No período de avaliação do RAS aquapônico foi utilizada água do cultivo BFT do *L. vannamei*, desenvolvido em dois raceways de 237 m², onde o suprimento de ar e circulação da água foram feitos através de sistemas de injetores (“nozzles”) de ar com uma densidade de estocagem, respectivamente, de 168 e 421 camarões m⁻². Ambos os cultivos tiveram fertilização inicial com melão utilizando uma relação C:N de 15:1, sendo que foram utilizadas águas do raceway 1 entre 08/04 e 10/04/2019, e após a despesca deste água do raceway 2 entre 11/04 e 21/05/2019. Os parâmetros químicos da água dos raceways foram monitorados através da mesma metodologia empregada para o viveiro.

3.4. Avaliação das condições físico-químicas e da eficiência de remoção dos nutrientes do RAS Aquapônico

3.4.1. Avaliação da passagem da água pelos leitos vegetados

A avaliação do RAS aquapônico iniciou um mês e meio após início do cultivo em sistema BFT do *L. vannamei* no raceway 1. Em 30 dias do outono foram avaliados os parâmetros físico-químicos, os nitrogenados e o fósforo nas águas de entrada e de saída nos leitos vegetados com *S. neei*, assim como o crescimento e produtividade da *S. neei* entre os meses de abril e maio de 2019, no RAS aquapônico estabelecido em Rio Grande (RS). Em cada dia de amostragem foram coletadas amostras de água do reservatório de água clarificada e das saídas dos leitos vegetados. Em estudo preliminar nas primeiras duas semanas após o plantio de *S. neei*, foi quantificado o tempo de retenção hidráulica de cada leito, sendo estabelecido o intervalo de coleta da água de 40 minutos após o início da passagem da água pelos leitos. Este tempo era equivalente ao dobro do tempo de retenção hidráulica do leito com o fluxo mais lento (Tabela 1). Valores de condutividade e pH foram estimados nas águas através de eletrodos, condutivímetro portátil (HI 9835 – Hanna®) e pHmetro de bancada Mettler Toledo® respectivamente. As amostras de água coletadas foram filtradas (45 µm) e congeladas para posterior análise das concentrações de nitrogênio amoniacal total (NAT) utilizando o método de Koroleff (1972), bem como o nitrito, e o fósforo pelo método adaptado por Aminot & Chaussepied (1983), descritos em Baumgarten et al. (2010). O nitrato foi quantificado através do método descrito por Garcia et al. (2014), utilizando um espectrofotômetro (modelo Biospectro SP-22) na faixa de luz visível. Alíquotas das amostras de água foram filtradas com filtros Whatman GF/C pré-pesados e o teor de sólidos suspensos total (SST) foi estimado por gravimetria, após secagem em estufa a 60 °C por 48 horas. As taxas de remoção de nutrientes e SST foram estimadas pela diferença percentual entre as concentrações de entrada e de saída dos leitos vegetados (Espinosa-Moya et al. 2014).

Adicionalmente, durante todo o período de avaliação do RAS aquapônicos foram coletadas amostras de areia superficial na profundidade de 0-5 cm de profundidade em dois pontos aleatórios de cada leito vegetado. Esta coleta foi efetuada sempre antes da passagem diária da água. A umidade de cada amostra foi estimada por gravimetria. A condutividade elétrica da areia foi estimada através da medida no extrato aquoso feito por 10 g de solo em 30 ml de água destilada e expressa após cálculo, considerando a diluição (Glenn et al. 1997). Duas amostras da camada superficial da areia (0-10 cm) foram coletadas em cada leito

vegetado no início e no final do período de avaliação, secas em estufa a 60 °C por 48 horas e depois calcinadas a 550 °C por 6 horas, para quantificação do teor de matéria orgânica no solo. Periodicamente, foram coletadas amostras de água do fundo da camada de brita (sifonamento dos lisímetros instalados; tubos de PVC com 4 cm de diâmetro) para análise de pH, SST e nutrientes. Dados meteorológicos diários foram obtidos da estação automática do INMET no campus da FURG.

3.4.2. Avaliação da recirculação prolongada de água nos leitos vegetados

Dentro do período de avaliação do efeito da passagem da água pelos leitos nos teores de SST e dos nutrientes, foi realizado um teste de avaliação da recirculação prolongada de água nos leitos vegetados, entre os dias do ano 112 e 124 (22 de abril a 04 de maio de 2019). Durante esse período, um volume de 1500 L de água captada no raceway 2 foi recirculado durante 13 dias entre a caixa de água clarificada e o tanque de saída, passando pelos leitos vegetados. A cada ciclo diário, este processo de passagem durava cerca de uma hora e quarenta minutos e após a água permanecia nos reservatórios de saída e do clarificador até o próximo ciclo de bombeamento e avaliação de passagem. Durante a avaliação da recirculação, continuou sendo adotado o mesmo procedimento de amostragem das águas de entrada e saída utilizado na avaliação do efeito da passagem da água pelos leitos.

3.5. Desenvolvimento da *S. neei* nos leitos vegetados.

Foram estabelecidas em cada leito vegetado, duas parcelas aleatórias de 0,25 m² (0,5 X 0,5 m) para quantificação detalhada do desenvolvimento das plantas de *S. neei*. No início do período de avaliação dos leitos vegetados (abril de 2019), todas as plantas nas parcelas foram cortadas a 5 cm do solo, sendo os caules remanescentes deixados enraizados na areia para rebrote. As plantas coletadas tiveram medidas a altura do seu caule principal (maior comprimento vertical), o número de ramificações primárias dos caules e o comprimento de todas ramificações maiores do que 10 cm (valor adotado como tamanho comercial mínimo de ramos e caules de *Salicornia*, para venda em Israel; Ventura et al. 2011), além das biomassas aéreas fresca e seca (estufa 60 °C por 48 horas) estimadas através de pesagem uma balança de precisão ($\pm 0,01$ g). Um mês após o corte, todos os caules rebrotados foram novamente cortados 5 cm do solo para estimativa da taxa de crescimento (comprimentos de caules e ramificações), bem como da taxa de produção de biomassa aérea (fresca e seca). Adicionalmente, no mesmo dia da coleta dos rebrotos, uma parcela de 0,25 m² foi posicionada

ao lado de cada parcela de rebrote (“parcela pareada”) e todas as plantas no seu interior foram cortadas a 5 cm do solo, visando avaliar o desenvolvimento/produção de biomassa das plantas sem corte.

3.6. Análises dos dados

Foram realizadas Análises de Variância (ANOVA) bifatoriais para comparação das variáveis (tempo de residência, SST, condutividade elétrica e pH da água, umidade e condutividade elétrica do solo, NAT, nitrito, nitrato e fosfato da água) entre datas de amostragem e leitões vegetados. Em cada dia de coleta, as diferenças estatísticas entre as águas de entrada e de saída, quanto aos teores de SST e nutrientes, foram avaliadas a partir da verificação se os valores individuais da água de entrada se posicionavam dentro ou fora do intervalo de confiança de 95% das médias da água de saída dos leitões (Zar 2010). Os teores de SST, nitrogenados e fosfato da água clarificada na entrada dos leitões e da água de saída dos mesmos foram comparados através de ANOVAs unifatoriais. Para todas as ANOVAs que apresentaram fatores significativos foram realizados teste a posteriori de Tukey ao nível de significância de 5%. Antes das análises os dados acima descritos foram testados quanto a homocedasticidade e normalidade. A homogeneidade das variâncias foi feito com Cochran C, Hartley, Barlett. Algumas variáveis analisadas não apresentaram normalidade e/ou homocedasticidade sendo necessária sua transformação matemática. Os teores na água de nitrito e fosfato foram transformados por $\text{Log}_{10}(100x)$, e valores de NAT foram transformados $\text{Log}_{10}(100x+1)$.

O desenvolvimento e produção de biomassa das plantas de *S. neei* foram comparados entre os leitões vegetados através de ANOVAs unifatoriais, seguidas do teste a posteriori de Tukey ao nível de significância de 5%.

4. Resultados

4.1. Avaliação das condições físico-químicas do RAS Aquapônico

A partir do monitoramento da água do viveiro, utilizada para irrigação das plantas de *S. neei* durante o período de estabelecimento, foram observados os seguintes valores médios (\pm erro padrão; $n= 108$): salinidade da água= $9,6 \pm 0,01$ g NaCl L⁻¹ (≈ 14 dS m⁻¹); pH= $8,45 \pm 0,01$; oxigênio dissolvido= $5,17 \pm 0,02$ mg L⁻¹; nitrogênio amoniacal= $0,20 \pm 0,02$ mg L⁻¹; nitrito= $0,16 \pm 0,02$; nitrato= $1,39 \pm 0,24$ mg L⁻¹ ($n= 6$); e fosfato= $0,09 \pm 0,06$ mg L⁻¹ ($n= 5$).

Durante a avaliação dos leitos vegetados as águas captadas dos raceways apresentaram os seguintes valores médios. Raceway 1: nitrato= $48,03 \pm 10,33$ mg L⁻¹; nitrito = $0,24 \pm 0,06$; NAT = $0,05 \pm 0,02$ mg L⁻¹; e fosfato= $1,58 \pm 0,27$ mg L⁻¹. Raceway 2: salinidade da água= 34 g NaCl L⁻¹ (≈ 50 dS m⁻¹); pH= $7,8$; oxigênio dissolvido= $5,8$ mg L⁻¹; nitrato= 40 mg L⁻¹; NAT= $0,07$ mg L⁻¹; e fosfato= $1,53$ mg L⁻¹.

Durante o período de avaliação do RAS aquapônico a água do cultivo de camarão captada dos raceways apresentou uma grande variação do total de sólidos em suspensão (SST; 226 a 809 mg L⁻¹), devido tanto a etapa de desenvolvimento do cultivo, como também o acúmulo do material particulado junto ao tubo de captação de água (Figura 3). A eficiência de remoção do SST pelo clarificador variou em função dos teores de particulados das águas vindas dos raceways, caracterizando uma incapacidade do clarificador de reter teores menores do que 250 mg L⁻¹ e uma máxima eficiência de cerca de 50%.

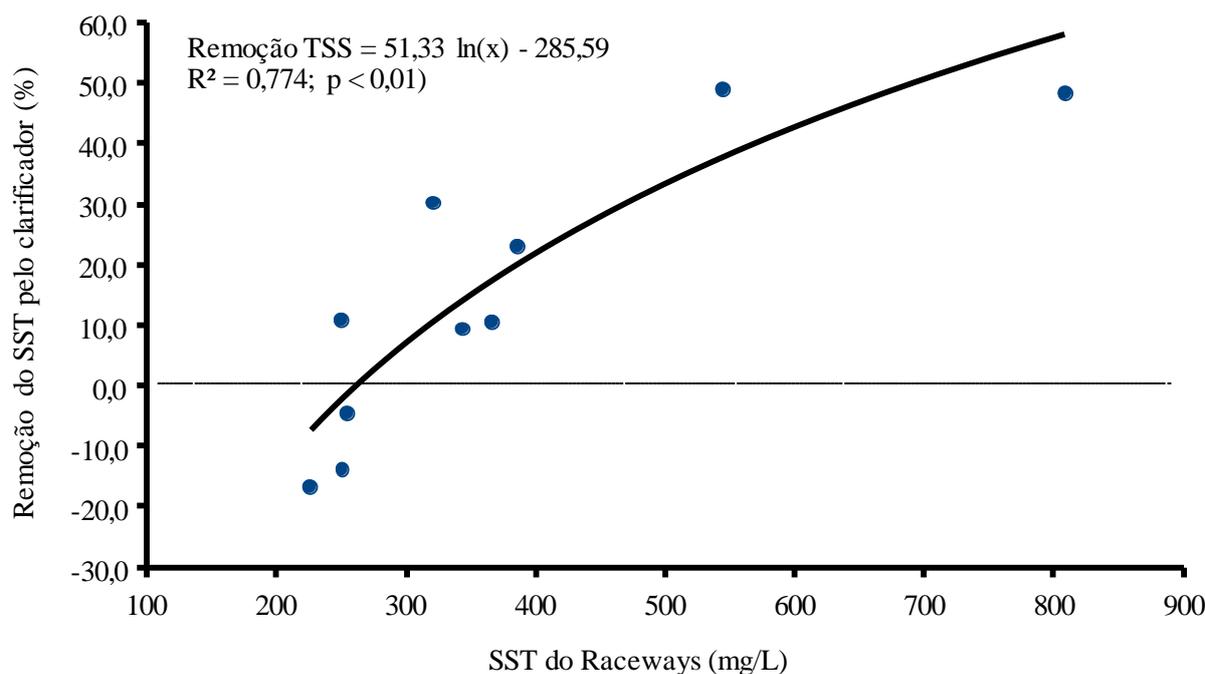


Figura 3. Eficiência de remoção de sólidos suspensos totais (SST) das águas vindas dos raceways pelo clarificador utilizado no RAS aquapônico.

O teor médio de SST da água clarificada que ingressou nos leitos vegetados foi de $250,77 \pm 10,69 \text{ mg L}^{-1}$ ($n= 26$). Após a passagem pelos leitos, o valor médio global de SST foi de $207,68 \pm 4,09 \text{ mg/L}$ ($n= 78$), conseqüentemente uma redução média de 15,2%. Tanto as médias de SST, como de redução percentual global do SST não foram diferentes entre os leitos vegetados, no entanto variaram significativamente ($p < 0,001$) ao longo do tempo de avaliação (Tabela 1; Figura 4). A comparação dos valores de SST de entrada com os intervalos de confiança das médias diárias de SST na saída dos leitos, permitiu detectar períodos de retenção significativa dos particulados nos leitos, destacadamente entre os dias 107-113, 120, 126-130 e 136-138. Em todos estes períodos teores de SST maiores do que 250 mg L^{-1} ingressaram nos leitos vegetados (Figura 4). Durante o período de avaliação da recirculação prolongada ocorreu uma redução gradual do SST, com um pequeno aumento no final da avaliação devido ao arrasto de lodo que não foi retido no clarificador.

Os valores médios globais de condutividade elétrica da água de entrada ($36,35 \pm 7,37 \text{ dS m}^{-1}$) e da saída dos leitos ($34,45 \pm 9,61 \text{ dS m}^{-1}$) não tiveram diferença significativa ($F=1,12$; $p= 0,3300$). A condutividade elétrica da água de saída dos leitos variou significativamente ($p <$

0,005) ao longo do tempo (Tabela 1), sendo observado um período de altas condutividades ($58,9$ a $65,2$ dS m^{-1}) entre os dias 103 e 115 do ano (23 a 25/04/2019).

O pH médio da água de entrada ($8,00 \pm 0,58$) no período de avaliação foi significativamente ($F=1,66$; $p<0,05$) reduzido após a passagem pelos leitos ($7,75 \pm 0,30$). O pH variou ao longo do tempo (Tabela 1), com pH mais alcalinos observados mais frequentemente da metade até o final do período de avaliação do RAS aquapônico. A média da umidade dos solos ficou em torno de 16%, não ocorrendo diferença significativa entre os leitos (Tabela 1; Figura 5). No entanto, ocorreu diferença na umidade do solo ao longo do tempo ($p<0,001$), onde os valores flutuando entre 11,0% e 18,2%. As médias globais de condutividade elétrica do solo foram menores do que da água de entrada, não ocorrendo diferenças entre leitos (Tabela 1; Figura 5), e os valores médios diários flutuaram ao longo do tempo entre 3,78 e 16,56 dS m^{-1} . Reduções da condutividade elétrica do solo foram observadas após maiores volumes de chuvas nos dias 116, 133 e 141.

Amostras de solo coletadas nos leitos vegetados no início do período de avaliação apresentaram um teor médio de matéria orgânica de $0,40 \pm 0,05\%$, enquanto que 45 dias depois ao final da avaliação, este teor dobrou, variando de $0,53 \pm 0,02\%$ a $0,68 \pm 0,07\%$ entre os leitos vegetados.

Tabela 1. Médias (erro padrão) dos tempos de residência, de parâmetros da água salina e do sedimento dos três leitos vegetados com *Salicornia neei* durante o período de avaliação do RAS aquapônico. Fatores que mostram diferenças significativa ($p < 0,05$) são destacados em negrito. Letras minúsculas diferentes na mesma linha indicam médias significativamente diferentes conforme o teste de Tukey ($p < 0,05$). SST = sólidos suspensos totais; DIF SST = diferença no teor de SST entre a entrada e saída da água.

Variáveis	n	Leito			Data		Leito		Data X Leito	
		L1	L2	L3	F	p	F	p	F	P
Tempo de Residência (minutos)	26	20,77a	15,92ab	11,19c	2,50	0,0030	108,68	0,0000	-	-
		(0,60)	(0,63)	(0,44)						
Água										
SST (mg/L)	26	209,12	211,81	202,12	10,51	0,0000	1,97	0,1508	-	-
		(7,69)	(6,70)	(7,43)						
DIF SST (%) *	26	-14,84	-13,11	-17,66	11,63	0,0000	2,13	0,1291	-	-
		3,26	3,45	2,88						
Condutividade elétrica	30	34,20	33,97	35,19	24,78	0,0000	1,18	0,3134	-	-
		1,78	1,82	1,71						
pH	17	7,82	7,73	7,70	9,74	0,0000	0,66	0,5227	-	-
		0,08	0,06	0,07						
Solo										
Umidade do solo (%)	58	15,97	16,07	16,35	5,89	0,0000	0,79	0,4562	0,91	0,6496
		0,31	0,31	0,26						
Condutividade solo **	58	10,24	10,84	10,56	10,73	0,0000	1,27	0,2865	2,33	0,0002
		0,54	0,59	0,45						

** raiz quadrada (x)

* raiz quadrada (x+100)

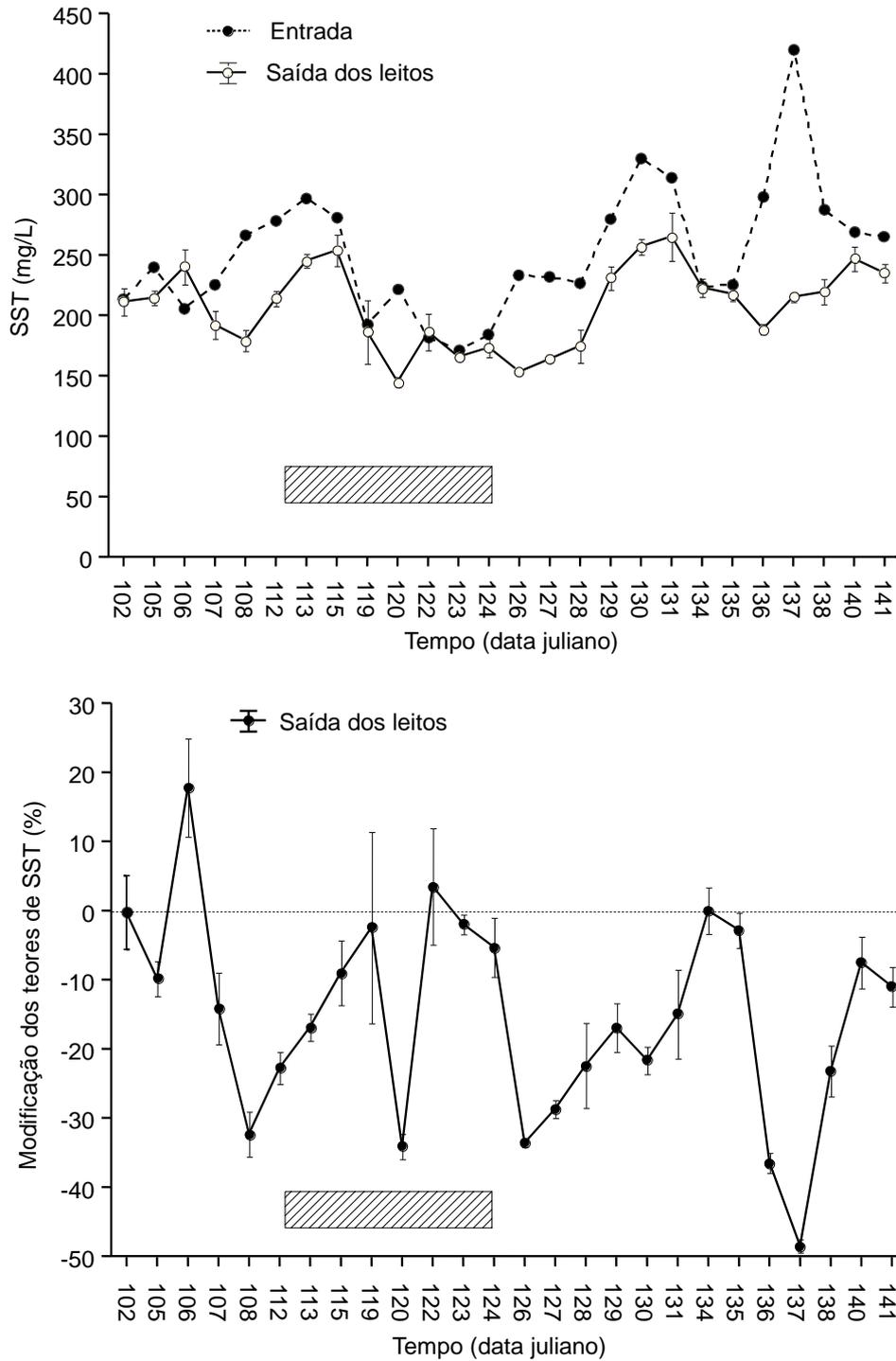


Figura 4. (A) Valores de sólidos suspensos totais (SST) na água de entrada e médias (\pm intervalo de confiança de 95%) de SST da água de saída dos leitos vegetados do RAS aquapônico. Em cada dia, o valor da água de entrada fora do intervalo de confiança da média dos valores de saída dos leitos indica diferenças significativamente. (B) Reduções médias do SST após passagem nos leitos vegetados. O retângulo listrado indica o período da avaliação da recirculação prolongada.

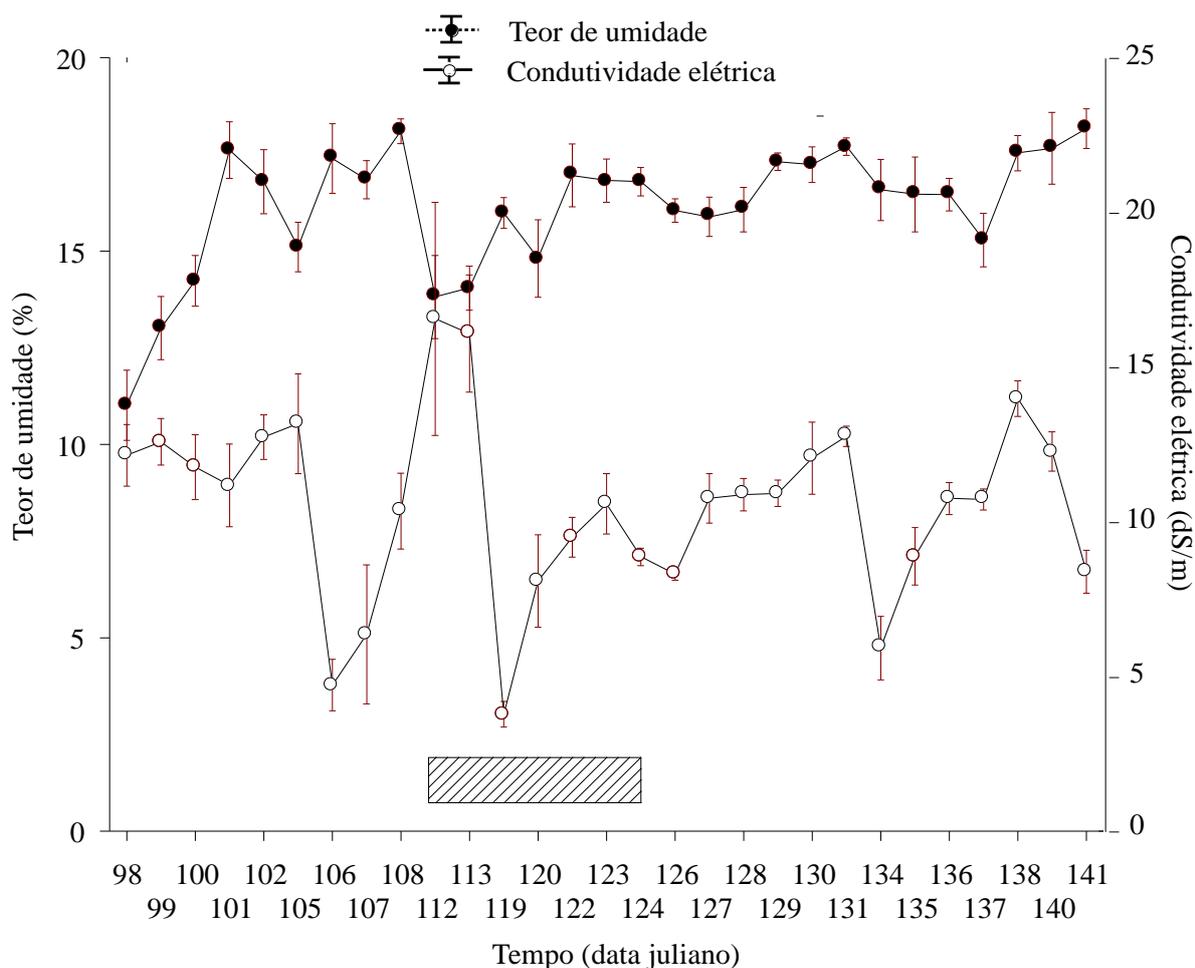


Figura 5. Médias (\pm erros padrão) do teor de umidade e da condutividade elétrica dos solos dos leitos vegetados ao longo do período de avaliação do RAS aquapônico. O retângulo listrado indica o período de avaliação da recirculação prolongada.

No período de aclimação (dia 21 a 97 do ano; 21/01 a 07/04/2019), as plantas de *Salicornia neei* nos leitos vegetados (RAS aquapônico) ficaram expostas a uma temperatura média do ar de $23,4 \pm 2,9$ °C e uma radiação solar diária média de $18,6 \pm 6,0$ MJ m⁻² dia⁻¹, ocorrendo poucas chuvas nesse período (acumulado de 79 mm)(Figura 6). No período avaliação do RAS (dia 98 a 141 do ano; 08/04 a 21/05/2019) a temperatura média do ar foi de $18,7 \pm 2,6$ °C e a radiação média de $10,2 \pm 4,0$ MJ m⁻² dia⁻¹. A precipitação acumulada no período de avaliação do RAS aquapônico foi de 102 mm (Figura 6). Especificamente, durante o período de recirculação prolongada de água no RAS aquapônico ocorreram três dias com chuvas irregulares, que totalizaram um acumulado de 33 mm.

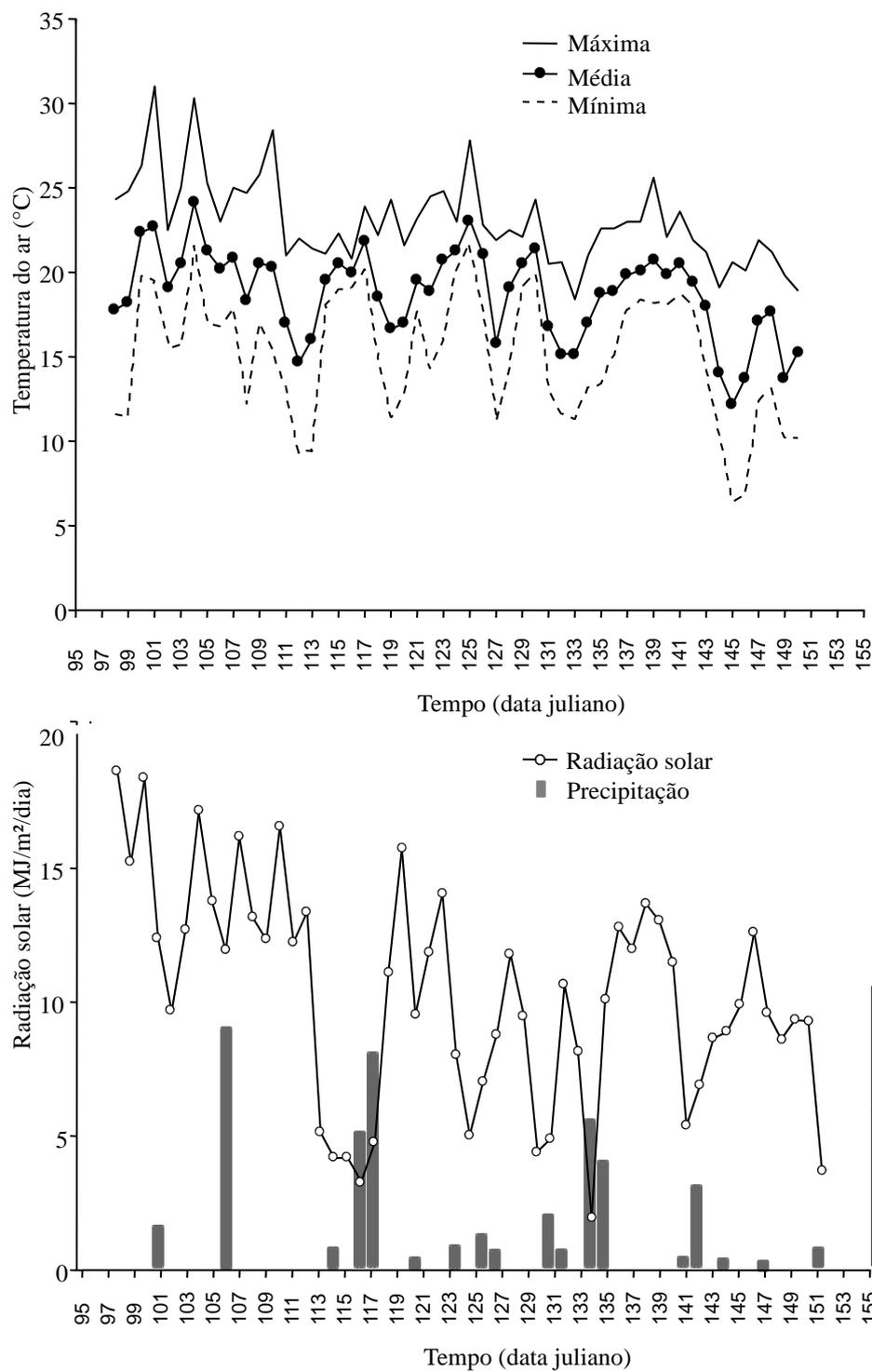


Figura 6. (A) Médias diárias de temperaturas máximas, médias e mínimas, (B) radiação solar e valores de precipitação diárias ao longo do período de avaliação do RAS aquapônico.

4.2. Avaliação da eficiência de remoção dos nutrientes do RAS Aquapônico

As concentrações de todos os nutrientes na água de entrada e nas águas de saída dos leitos vegetados variaram ao longo do tempo (Tabela 2). O nitrato sofreu uma redução marcante em sua concentração durante o período de recirculação prolongada da água dentro do RAS entre os dias 112 e 124, até valores abaixo do limite de detecção (Figura 7A). Após este evento os teores aumentaram novamente, com a captação e ingresso no RAS de uma “nova água” do raceway. Apesar de ter ocorrido uma redução média global de 15% no teor do nitrato após a passagem pelos leitos vegetados (Tabela 3), não foi detectada uma diferença estatística entre as médias globais das águas de entrada e de saída.

O leito 2 mostrou uma menor média global de concentração ($0,21 \text{ mg L}^{-1}$) de nitrito na água de saída do que o leito 3 ($0,29 \text{ mg L}^{-1}$), e o leito 1 apresentou valor intermediário (Tabela 2). As concentrações de nitrito, reduziram significativamente ($p < 0,05$) após a passagem nos leitos (Tabela 3), sendo que a comparação dos valores da água de entrada com os intervalos de confiança das médias diárias na saída dos leitos mostrou que estas reduções ocorreram marcadamente após o dia 113, durante o período de recirculação prolongada e estendendo-se até o final do período de avaliação do RAS (Figura 7B). O NAT, como o nitrato, não apresentou redução significativa da sua média global após passagem pelos leitos (Tabela 2) e nem diferenças entre os leitos (Tabela 3). Entretanto, entre os dias 115 e 123 (avaliação da recirculação prolongada) os valores médios da água de saída progressivamente aumentaram e foram significativamente maiores do que os valores da água de entrada após cada passagem pelos leitos (Figura 8A). Após o dia 130, os teores de NAT na água de saída passaram a ser significativamente menores do que da água de entrada (Figura 8A).

Os teores de fosfato nas águas de entrada e de saída mostraram flutuações até o dia 124 e após esta data mostraram uma tendência de crescimento até o final do período de avaliação (Figura 8B). Entre as flutuações, períodos de reduções contínuas das concentrações ocorreram entre os dias 99 e 107, bem como dias 122 a 124 (no final da avaliação de recirculação prolongada). As concentrações de fosfato na água de saída dos leitos 1 e 2 mostraram valores médios globais ($0,44\text{-}0,49 \text{ mg L}^{-1}$) significativamente maiores do que o do leito 3 ($0,28 \text{ mg L}^{-1}$) (Tabela 2). A concentração média global das águas de saída ($0,40 \text{ mg L}^{-1}$) foi cerca de 74% menor ($p < 0,001$) do que da água de entrada ($1,53 \text{ mg L}^{-1}$) (Tabela 2), sendo que a remoção de fosfato ocorreu ao longo de todo período de avaliação (Figura 8B).

Tabela 2. Médias (\pm erro padrão) das concentrações (mg L^{-1}) de nutrientes da água de saída dos leitos vegetados ao longo do período de avaliação do RAS aquapônico. Resultados das ANOVAs bifatoriais entre datas de amostragem e leitos vegetados são apresentados.

Variáveis	n	Leito			Data		Leito	
		L1	L2	L3	F	P	F	P
Nitrato	30	35,25 (4,01)	31,03 (3,22)	32,96 (3,89)	13,06	< 0,0001	1,61	0,2085
Nitrito \$	30	0,25 ^{ab} (0,03)	0,21 ^a (0,04)	0,29 ^b (0,05)	18,28	< 0,0001	4,11	0,0214
NAT	30	0,06 (0,01)	0,04 (0,01)	0,05 (0,01)	3,55	< 0,0001	2,82	0,0681
Fosfato \$	30	0,49 ^b (0,06)	0,44 ^b (0,07)	0,28 ^a (0,04)	13,88	< 0,0001	15,57	< 0,0001

\$ log(100x)

Tabela 3. Médias (\pm erro padrão) das concentrações (mg L^{-1}) da água de entrada (n=30) e de saída (n=90) dos leitos vegetados ao longo do período de avaliação do RAS aquapônico. Resultados das ANOVAs bifatoriais entre datas de amostragem e leitos vegetados são apresentados.

Variáveis	Água		Remoção		
	Entrada	Saída &	F	p	Dif E-S (%)
Nitrato	39,13 (4,05)	33,08 (2,13)	1,92	0,1688	-15,46
Nitrito \$	0,37 (0,03)	0,25 (0,02)	9,58	0,0025	-33,21
NAT	0,07 (0,01)	0,05 (0,00)	3,05	0,0833	-30,44
Fosfato \$	1,53 (0,25)	0,40 (0,03)	37,41	< 0,0001	-73,85

& n = 90; amostras agrupadas dos três leitos.

\$ log(100x)

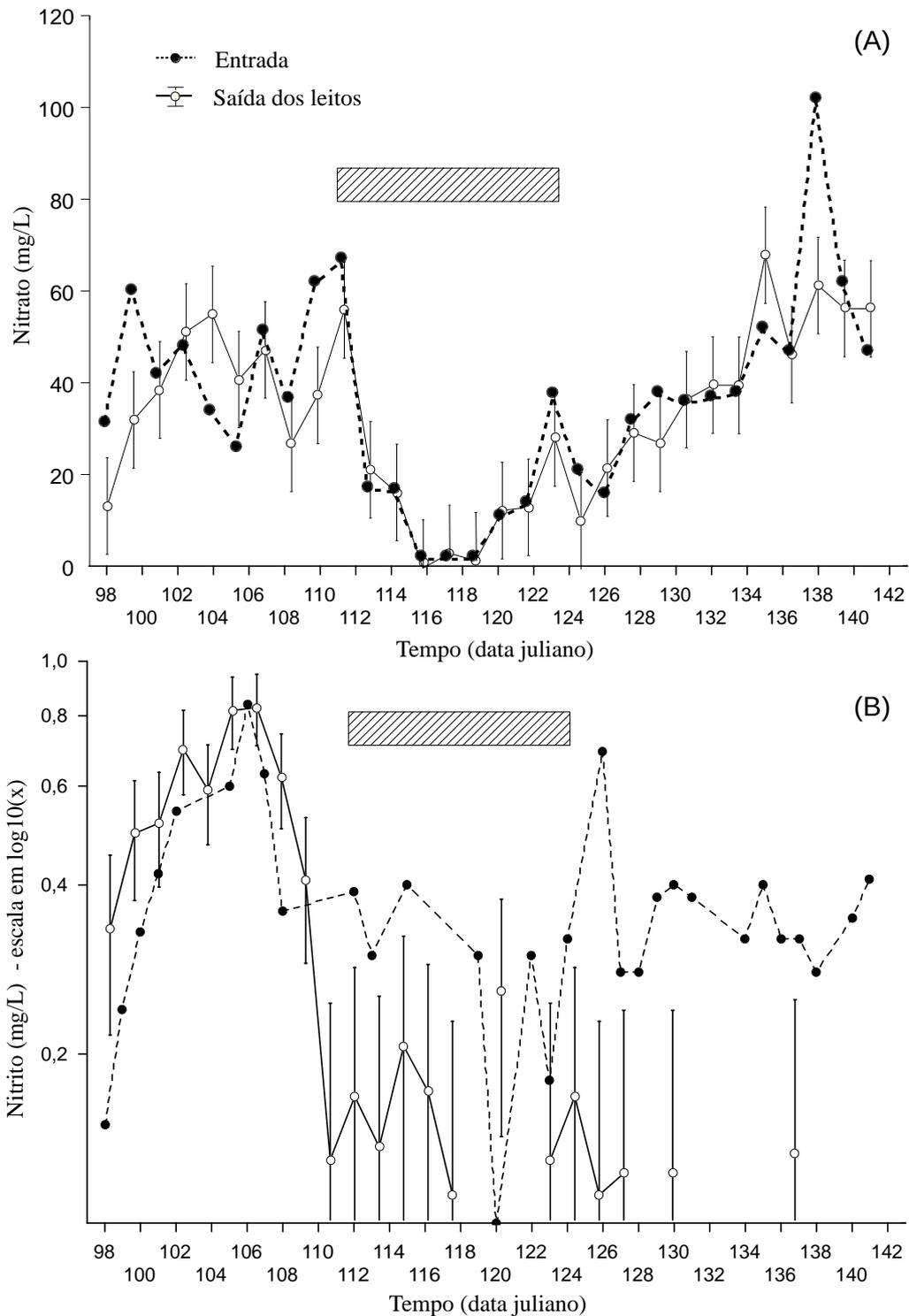


Figura 7. Valores das concentrações de (A) nitrato e (B) nitrito na água de entrada e médias (\pm intervalo de confiança de 95%) da água de saída dos leitos vegetados ao longo do período de avaliação do RAS aquapônico. Em cada dia, o valor da água de entrada fora do intervalo de confiança da média dos valores de saída dos leitos indica diferença significativa. O retângulo listrado indica o período de avaliação da recirculação prolongada.

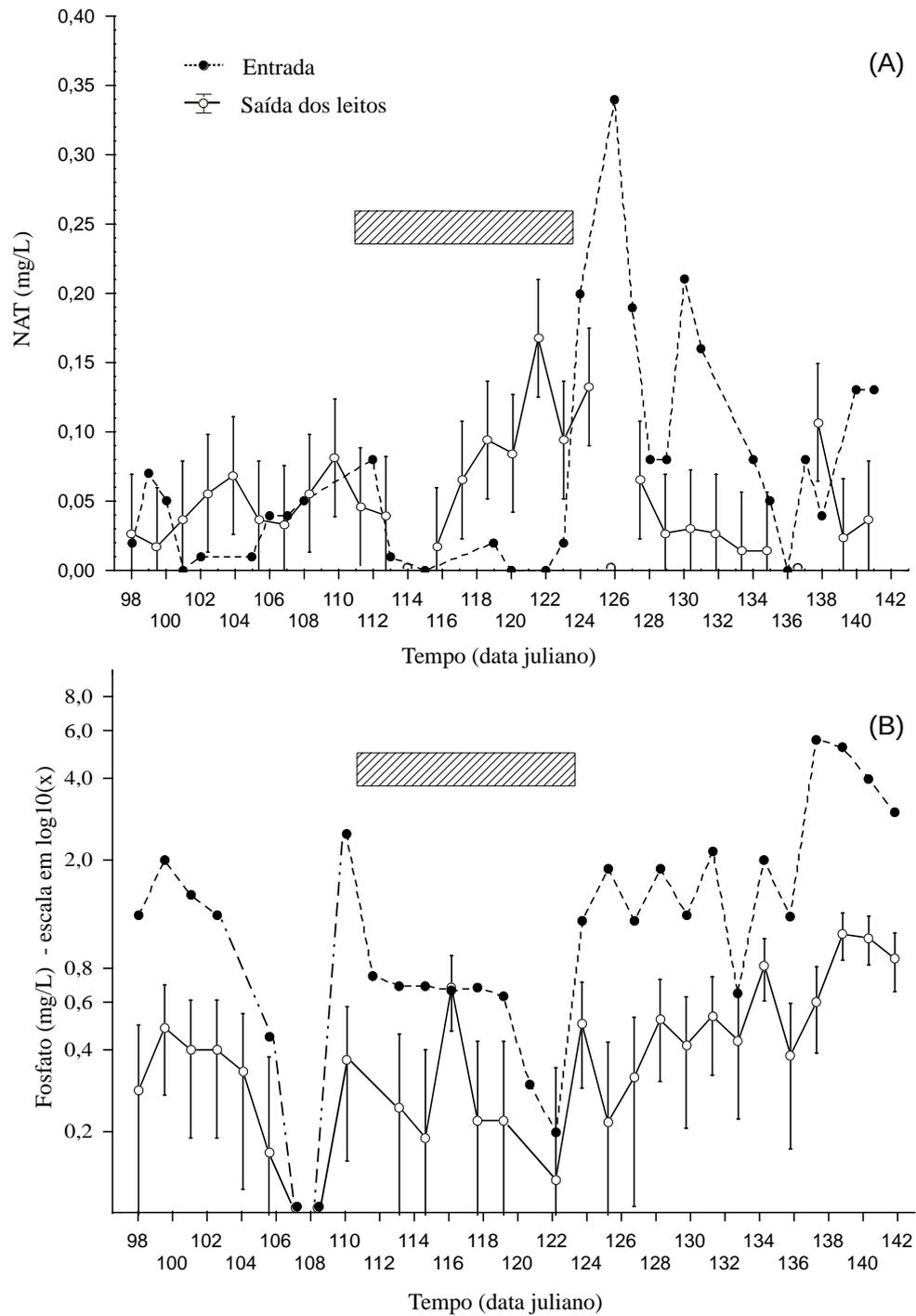


Figura 8. Valores das concentrações de (A) nitrogênio amoniacal total (NAT) e (B) fósforo na água de entrada e médias (\pm intervalo de confiança de 95%) da água de saída dos leitos vegetados ao longo do período de avaliação do RAS aquapônico. Em cada dia, o valor da água de entrada fora do intervalo de confiança da média dos valores de saída dos leitos indica diferença significativa. O retângulo listrado indica o período de avaliação da recirculação prolongada.

As concentrações dos nutrientes nos lisímetros instalados para a verificação da água que ficava retida na brita, após percolação pela areia, estão descritas na Tabela 4. Os valores na água retida na brita foram marcadamente diferentes da água da entrada. No dia em que foi feita a análise o sistema estava aparentemente convertendo NAT em nitrito e nitrito em nitrato. De forma semelhante ao que foi observado nas águas saindo dos leitos, a água na camada de brita mostrou uma marcada redução do fosfato, condutividade elétrica semelhante a água de entrada e uma leve acidificação.

Tabela 4. Valores médios das concentrações dos nutrientes (nitrato, nitrito, fosfato e nitrogênio amoniacal - NAT), condutividade elétrica (CE) e pH nos lisímetros instalados na camada de brita dos RAS aquapônicos. Dif = diferença entre entrada e média de saída; Dif % = diferença percentual. O leito 3 não continha água retida nas britas no dia de amostragem, não sendo incluído nessa avaliação.

Variáveis	Água entrada	Brita		Média	Dif	Dif %
		leito 1	leito 2			
Nitrato (mg L^{-1})	49,50	79,90	79,90	79,90	30,40	61,41
Nitrito (mg L^{-1})	0,41	0,20	0,20	0,20	-0,21	-51,22
NAT (mg L^{-1})	0,13	0,10	0,04	0,07	-0,06	-46,15
Fosfato (mg L^{-1})	3,00	0,70	1,70	1,20	-1,80	-60,00
CE (dS m^{-1})	38,50	37,20	37,10	37,15	-1,35	-3,51
pH	8,53	7,90	7,85	7,87	-0,66	-7,68

4.3. Desenvolvimento da *Salicornia neei* nos leitos vegetados.

As biomassas médias fresca e seca de caules de *S. neei* nos leitos vegetados após 3 meses do plantio (abril de 2019) foram de, respectivamente, $715,8 \pm 212,9 \text{ g m}^{-2}$ e $73,1 \pm 20,4 \text{ g m}^{-2}$. As plantas continuaram a crescer marcadamente no período de outono, alcançando aos 4 meses de cultivo (maio de 2019) médias de 3722 g m^{-2} para biomassa fresca e $372,2 \text{ g m}^{-2}$ para biomassa seca, ou seja um crescimento de 400% em um período de 30 dias (Figura 9). Plantas com 3 meses submetidas a poda foram capazes de rebrotarem vigorosamente, produzindo uma biomassa média de caules fresca de $1193,2 \text{ g m}^{-2}$ e seca de $117,3 \text{ g m}^{-2}$ após 30 dias. Este crescimento médio do rebrote representou cerca de 40% da produtividade alcançada pelas plantas que não sofreram poda.

Nas duas datas de avaliação das biomassas frescas e secas de caules e do rebrote não foram detectadas diferenças significativas entre os leitos vegetados (Tabela 5). A suculência média dos caules (percentual de água) permaneceu entorno de 90%, sendo observada uma suculência um pouco menor no leito 2 (89%) em abril de 2019.

Caules com 3 meses apresentavam alturas e várias ramificações com comprimentos das maiores do que 10 cm (Figuras 10 A-B), tamanho comercial adotado para venda em países europeus e asia (Ventura et al. 2011). Em média 184 caules e 27 ramos possuíam mais do que 10 cm em cada metro quadrado dos leitos vegetados aos 3 meses de crescimento, e após 30 dias da poda, 507 ramos possuíam mais do que 10 cm em cada metro quadrado (Figura 11). A densidade média de ramos por caule, tanto das plantas com 3 meses como seus rebrotes após 30 dias foram muito semelhantes entre quadrados dos três leitos vegetados, ficando entre 12 e 22 ramos por caule (Figura 10C). Nos quadrados de rebrotes a densidade média de ramos alcançou $7547 \text{ ramos m}^{-2}$ (Figura 11).

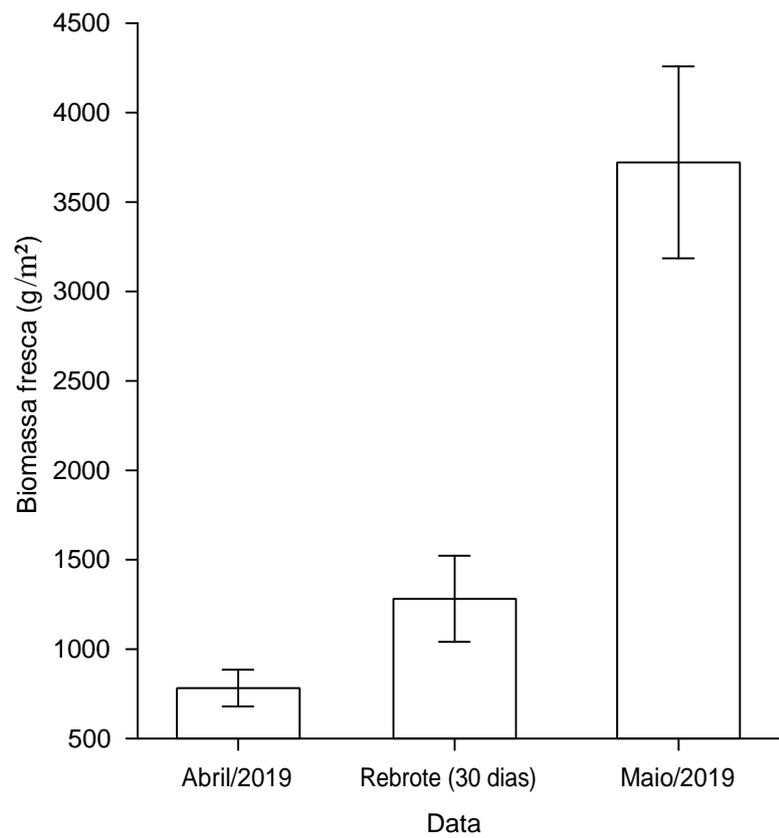


Figura 9. Biomassas médias fresca (\pm erro padrões) de caules de *Salicornia neei* nos leitos vegetados após 3 meses do plantio (abril de 2019), 4 meses do plantio (maio de 2019) e rebrotes após 30 dias de poda realizada em abril de 2019.

Tabela 5. Médias (\pm erro padrão) das biomassas fresca, seca (ambas em g m^{-2}) e da suculência dos caules da *Salicornia neei* cultivados por 3 meses (abril de 2019), 4 meses (maio de 2019) e de rebrotes após 30 dias da poda em RAS aquapônico em Rio Grande, RS.

Abril/2019	L1	L2	L3	F	p
Biomassa fresca	1027,6 (127,1)	633,4 (146,1)	687,2 (309,1)	2,1	0,2735
Biomassa seca	101,9 (10,0)	69,2 (17,1)	66,2 (27,8)	2,0	0,2782
Suculência (%)	90,1 (0,3)	89,1 (0,2)	90,3 (0,3)	12,0	0,0371
Rebrote (30 dias)					
Biomassa fresca	1816,3 (769,5)	1161,5 (83,0)	866,9 (440,0)	1,8	0,3082
Biomassa seca	172,4 (76,4)	119,3 (5,7)	83,3 (41,1)	1,6	0,3377
Suculência (%)	90,6 (0,2)	89,7 (0,2)	90,4 (0,2)	9,0	0,0544
Maio/2019	L1	L2	L3	F	p
Biomassa fresca	4279,4 (1582,4)	2319,5 (374,0)	4567,0 (7,3)	3,4	0,1696
Biomassa seca	414,6 (161,8)	231,2 (42,1)	444,6 (9,9)	2,9	0,2021
Suculência (%)	90,4 (0,2)	90,1 (0,2)	90,3 (0,2)	1,0	0,4667

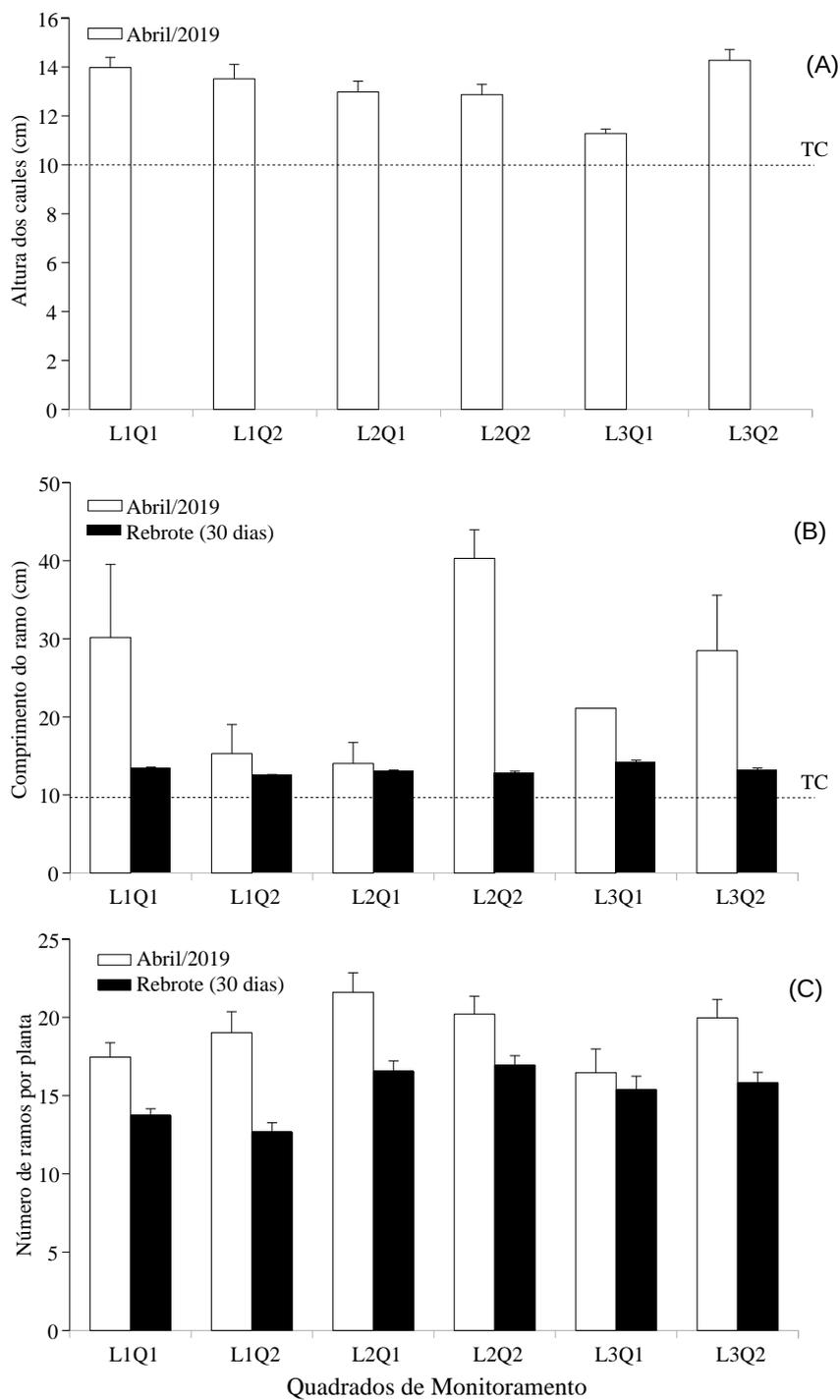


Figura 10. Médias (\pm erro padrão) das alturas dos caules (A), comprimento de ramificações maiores do que 10 cm (B) e número de ramificações dos caules das plantas de *Salicornia neei* cultivadas em RAS aquapônico em Rio Grande (RS) por 3 meses de crescimento e após 30 dias de uma poda. L = leito; Q = quadrado de parcela amostral; TC = tamanho comercial de caules e ramos em Israel.

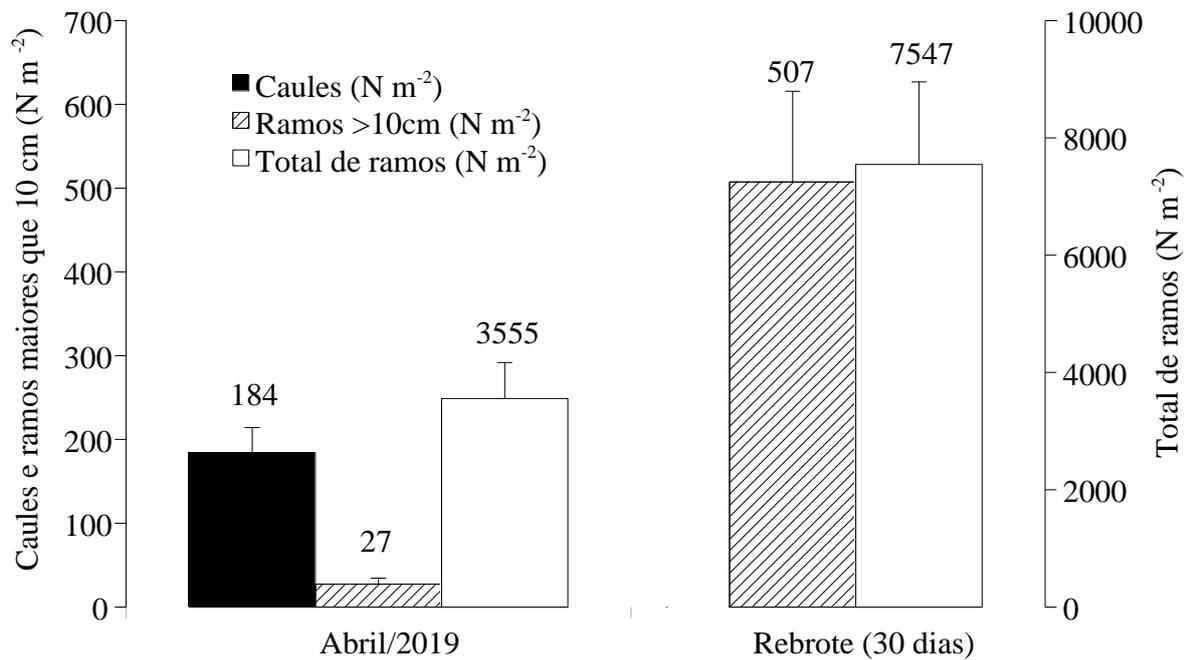


Figura 11. Número médio (\pm erro padrão) de caules, ramificações maiores do que 10 cm e total de ramificações de plantas de *Salicornia neei* cultivados por 3 meses (abril de 2019) e rebrotadas após 30 dias de uma poda em RAS aquapônico em Rio Grande, RS.

5. Discussão

5.1. Avaliação das condições físico-químicas do RAS Aquapônico

Um dos aspectos mais importante para integração de RAS aquapônicos com sistemas de cultivo BFT é a clarificação da água antes do ingresso no leito vegetado. O alto teor de partículas suspensas compostas particularmente por flocos microbianos é a principal característica dos cultivos BFT (Samocha et al. 2010). No entanto o material particulado pode gerar grandes demandas biológicas e químicas de oxigênio (Ray et al. 2010, Gaona et al. 2016), levando a redução do potencial de oxiredução do meio, acidificação e afetando a disponibilidade dos nutrientes para plantas (Shpigel et al. 2013), além de poderem comatar as raízes em meio hidropônico, dificultando a absorção de nutrientes e até levando ao apodrecimento das raízes (Henry-Silva & Camargo 2008).

As águas captadas para a avaliação dos leitos vegetados com *S. neei* apresentaram uma grande variação nos teores de SST, mas os valores deste parâmetro permaneceram dentro dos citados para outros cultivos de camarão marinho com o sistema BFT, onde é recomendada a manutenção de teores de sólidos totais em suspensão na faixa de 200–600 mg L⁻¹ (Gaona et al. 2016, Samocha et al. 2010, Schweitzer et al. 2013). No presente estudo, a eficiência máxima do clarificador utilizado para a remoção de sólidos foi de 50%, com um fluxo de 7,5 L min⁻¹. A comparação dos valores de clarificação de nosso sistema, onde importa a retenção instantânea do biofoco que não deveria passar para o compartimento de cultivo das plantas, com valores publicados de sistemas BFT é difícil. Nesses sistemas de cultivo de camarão, normalmente os valores médios de SST são calculados (e apresentados) ao longo de períodos de semanas ou meses de recirculação das mesma das água (com periódica reposição de perdas por evaporação), sendo o efeito no SST de tratamentos como diferentes técnicas de clarificação e/ou manejos de viveiros comparadas (Ray et al. 2010, Gaona et al. 2011, 2016, Pinheiro et al. 2017). Nosso percentual, por exemplo, é semelhante aos 45 a 56% de redução do SST observado por Ray et al. (2010) em clarificadores por sedimentação de 589 L com uma vazão de 6 L min⁻¹, que receberam águas de sistemas BFT salino de camarão marinho com teores médios de SST de 745 a 820 mg L⁻¹. Entretanto, estes autores expressam valores médios de SST mantidos ao longo das semanas de cultivo, quando a água recirculou centenas de vezes pelo clarificador, diferente do nosso sistema onde o tempo máximo de retenção chegou a 40 minutos. Por exemplo, Gaona et al. (2011), utilizando clarificadores por sedimentação de 1000

L e vazão de 75 L min^{-1} , obteve uma redução média de 24,5% do SST ao longo de 4 meses de cultivo BFT do *L. vannamei*, onde o teor de águas não clarificadas permaneceram entorno de 650 mg L^{-1} . Em ambos trabalhos nenhum comentário é feito em relação a eficiência dos clarificadores frente a menores teores de SST. Nossos resultados mostram, no entanto, que clarificadores por sedimentação podem ser ineficientes na remoção de sólidos em baixas concentrações (nosso caso teores menores que 250 mg L^{-1}). Em nossa avaliação da recirculação prolongada (13 dias), os teores de SST inicialmente caíram na água de entrada e recirculada nos leitos, mas ressuspensões e reintroduções de sólidos dos reservatórios ocorreram quando teores recirculando de SST eram próximos a 200 mg L^{-1} . Este resultado mostra que sistemas tradicionais de clarificadores por sedimentação não são compatíveis com RAS aquapônicos trabalhando com sistemas BFT, uma vez que não conseguem reduzir a níveis mínimos os sólidos que podem entrar em contato com as plantas.

Recebendo águas com sólidos em suspensão, a longo do tempo leitos vegetados irão reter valores significativos de sólidos e matéria orgânica. A avaliação dos sedimentos dos leitos vegetados com *S. neei* mostrou que o baixo teor de matéria orgânica na camada de areia (cerca de 0,5%) de enraizamento das plantas dobrou após 45 dias de irrigação. Este aumento progressivo dos sólidos/matéria orgânica certamente poderá alterar as condições físico-químicas dos leitos vegetados e comprometer o crescimento das plantas e alterar a qualidade da água recirculada. Abou-Elela & Hellal (2012) mostraram que um leito vegetado com plantas herbáceas para o tratamento de efluentes mistos da cidade do Cairo, Egito, apresentou um eficiência de retenção do SST de 92%, sendo o teor médio da água de entrada de apenas $8,5 \text{ mg L}^{-1}$. Este sistema com cerca de 460 m^2 e um tempo de residência de uma semana, mostrou mineralizar material orgânico em períodos secos, com menor fluxo de água, e reter durante períodos de saturação do solo (devido a menor mineralização). O resultado acima mostra que leitos vegetados são eficientes na recirculação de águas com baixos teores de sólidos (uma centena de vezes menores do que dos sistemas BFT). Novas alternativas de clarificação da água deverão ser buscadas para a manutenção continuada do RAS aquapônico e compatibilização do funcionamento desses com o manejo do sistema BFT.

O pH teve uma pequena redução (mas significativa) após a passagem da água pelos RAS aquapônicos, o que pode ter acontecido devido ao contato com ácidos húmicos acumulados no solo, bem como a decomposição aeróbica de microalgas/material orgânico particulado vindos com a água do raceway liberando gás carbônico, que dissociado na água

intersticial forma carbonatos e bicarbonatos, liberando prótons H^+ para água e baixando o pH (Gaona et al. 2011). Entretanto, os valores de pH do presente estudo permaneceram na faixa de melhor desenvolvimento do *L. vannamei* que é entre 7,0 e 9,0. (Van Wyk & Scarpa 1999). Shi et al. (2011), em um experimento com leito vegetado em Xangai na China, verificaram a diminuição do pH após passagem de água de recirculação em solo cultivado com halófitas (*Phragmites australis*, *Spartina alterniflora* e *Scirpus mariqueter*), sendo os valores médios nos pontos de entrada e saída, respectivamente, 8,2 e 7,9. Buhmann & Papenbrock (2013) argumentaram que valores de pH em solo e água de recirculação também podem reduzir pela predominância do processo de nitrificação (oxidação de amônia para nitrato).

5.2. Avaliação da eficiência de remoção dos nutrientes do RAS aquapônico

As concentrações de nitrato, nitrito e NAT das águas do cultivo BFT de camarão marinho utilizadas na avaliação do RAS aquapônico permaneceram dentro dos valores observados para este tipo de cultivo e dentro dos limites adequados para *L. vannamei*. O teor médio de nitrato na água foi de $39,1 \text{ mg L}^{-1}$ (máximo de $104,7 \text{ mg L}^{-1}$), é semelhante aos $31,6 \text{ mg L}^{-1}$ citado por Rocha et al. (2012) para água contendo bioflocos provenientes da criação de camarões *L. vannamei*, e também um valor bem abaixo dos 177 mg L^{-1} , que segundo Furtado et al. (2015) é o nível a partir do qual podem ser observados efeitos crônicos tóxicos em juvenis de *L. vannamei*. A média de nitrito na água de entrada foi de $0,37 \text{ mg L}^{-1}$. Krummenauer et al. (2012) analisando reutilização da água do cultivo do camarão *L. vannamei* em sistema BFT, registrou concentrações de nitrito inferiores a 10 mg L^{-1} . Porém Pinheiro et al. (2017) encontrou um teor médio de $0,40 \text{ mg L}^{-1}$ de nitrito em cultivo de camarão *L. vannamei* em sistemas de bioflocos. O teor médio do NAT na água de entrada foi de $0,07$ (máximo de $0,84 \text{ mg L}^{-1}$), valor bem inferior ao nível de segurança do NAT para juvenis de *L. vannamei* em salinidade 25 que é de $3,55 \text{ mg L}^{-1}$ (Lin & Chen, 2001). A predominância do nitrato entre os nitrogenados é característica do sistema BFT, e resultado da facilitação do crescimento de bactérias nitrificantes na água de recirculação e forte aeração, bactérias estas que oxidam amônia em nitrito (oxidantes de amônia) e nitrito em nitrato (oxidantes de nitrito)(Samocho et al. 2010, Krummenauer et al. 2012, Silva et al. 2013). Nos sistemas de cultivos de camarões, o fósforo provém geralmente dos resíduos de ração, da excreção dos organismos cultivados e da adição de melação (no sistema BFT), permanecendo nas formas tanto dissolvidas como particuladas. Krummenauer et al. (2012) e Silva et al. (2013) descrevem

o acúmulo de fosfato dissolvido ao longo de cultivos BFT de camarão e valores médios finais de, respectivamente, 1,07 e 1,38 mg L⁻¹, concentrações semelhantes ao valor médio da água de entrada da avaliação do RAS aquapônico (1,53 mg L⁻¹). Como ocorreu com os teores de material particulado, a variação temporal dos valores dos nitrogenados e do fosfato foi em parte determinada pela qualidade da água captada no raceway, além de ressuspensão de material nos tanques e clarificador do RAS aquapônico.

A passagem da água clarificada pelos leitos vegetados com *S. neei* resultou em reduções nas concentrações médias globais de todos nutrientes (nitrito e fosfato, significativamente). No entanto, marcadas flutuações entre os dias de coletas nos teores dos nutrientes apontam para um papel dominante da comunidade microbiana, bem como que as magnitudes dos processos observados foram influenciadas pelo tempo de residência dessa passagem. De forma geral, a eficiência em reduzir a carga de nutrientes de leitos vegetados está diretamente ligada a tempo de residência (“retenção hidráulica”) e inversamente a carga hidráulica (i.e., quantidade de água aportada por metro quadrado) e a concentração de nutrientes (Buhmann & Papenbrock 2013, Shi et al. 2011). Este efeito do tempo de residência fica nítido quando observado o comportamento dos nutrientes durante o período de recirculação prolongada.

Durante os primeiros dez dias do período de avaliação, os teores de nitrato e NAT da água de entrada flutuaram e a passagem pelos leitos em alguns dias levou a reduções desses elementos e em outros o nitrato foi incorporado. Nesse mesmo período, os teores de nitrito nas águas de entrada e saída subiram gradualmente até 0,6-0,8 mg L⁻¹, possivelmente devido ao estímulo a bactérias oxidantes da amônia. Pinheiro et al. (2017) observou em cultivo de camarão *L. vannamei* de sistema BFT integrado a bancadas NFT com *S. neei*, um acúmulo semelhante de nitrito na água e um valor médio nesse nutriente (0,6 mg L⁻¹) maior do que na água de um cultivo controle sem plantas (0,40 mg L⁻¹). Estes autores interpretaram este resultado como produto da remoção do SST, tanto pelo seu sistema de clarificação como pelas raízes das plantas, além da condição oxidante do sistema aquapônico. A incorporação nitrato na água de passagem pelo leito vegetado nos primeiros dias da avaliação suporta esta hipótese da condição oxidante próxima das raízes.

Após estes dias iniciais, durante a avaliação da recirculação prolongada os teores de nitrato na água caíram continuamente por 13 dias, chegando ao limite de detecção, enquanto o nitrito passou a ser absorvido eficientemente e o NAT incorporado a água quando esta passava

pelos leitos. Estes resultados sugerem que processos diferentes estavam predominando nos diferentes compartimentos do RAS aquapônico. Enquanto ao longo da maior parte do dia, nos reservatórios onde a água era armazenada (tanque de saída e clarificador) predominava um forte processo de denitrificação, no substrato do leito vegetado possivelmente a mineralização da matéria orgânica liberava NAT (“amonificação”; Buhmann & Papenbrock 2013), que era facilmente solubilizado na água de passagem. Logo, condições anaeróbica dos reservatórios e aeróbica no substrato do leito, criaram o padrão observado. Esta interpretação pode ser sustentada por Hargreaves (2013), que sugere como alternativa para reduzir a concentração de nitrato em cultivos com sistema BFT, a construção de “unidades de denitrificação”. Segundos estes autores, estas unidades deveriam ser construídas em tanques laterais aos viveiros/raceways, onde a água poderia ser acumulada e mantida parada por 1 a 2 dias, quando o depósito de orgânicos e as condições anóxicas junto ao fundo favoreceriam a denitrificação. Nessas condições o nitrato é utilizado como oxidante da matéria orgânica por bactérias anaeróbicas. Logo, nosso tanque de saída e clarificador possivelmente atuaram como “unidades de denitrificação”. Adicionalmente, reduções de nitrato com água recirculada por tempo prolongado também foram apontadas para outros sistemas hidropônicos/aquapônicos. Henry-Siva & Camargo (2006), trabalhando com o sistema DWS com a macrófita *Eichornia crassipes* no tempo de residência de 33 horas que conseguiu remover 53% do nitrato da água do cultivo de tilápia. Oliveira (2017) utilizando dois diferentes sistemas de cultivo hidropônico (NFT “nutrient film technique e DWS “deep water systems”) com a *S. neei*, chegou a alcançar uma remoção de 67,4% do nitrato após uma retenção por 72 horas da água de um cultivo de piscicultura intensiva. Shpigel et al. (2013) avaliando o desempenho de leitos vegetados de *Salicornia persica* como biofiltro da maricultura, encontrou uma remoção de nitrogênio total dissolvido (nitrato+nitrato) de 77-79%, para leitos com superfícies de 24,3 m² e um tempo de retenção hidráulica de um dia e meio.

Após o período de recirculação prolongada, com a troca da água pela captação mais frequente no raceway, os níveis de nitrato subiram gradualmente até o final do período de avaliação. Este aumento refletiu o comportamento do nitrato no raceway e mostrou a incapacidade dos leitos vegetados em reduzir este composto, quando um tempo curto de manutenção da água nos reservatórios do RAS aquapônico foi adotado. Buhmann & Papenbrock (2013) discutiram como leitos vegetados com diferentes formas circulação de água (i.e., superficial, sub-superficial, horizontal e vertical) possuem diferentes eficiências

para remoção de nitrogenados. No caso do nosso tipo de leito vegetado, com fluxo predominantemente subsuperficial e vertical (entre camada de areia para de brita), estes autores afirmam que a alta oxidação promove altas taxas de conversão da amônia para o nitrato mas uma remoção muito lenta do nitrato, devido a inibição da desnitrificação. Além do fluxo de irrigação intermitente dos leitos, o processo de nitrificação é provavelmente estimulado pelas raízes ricas em aerênquima da *S. neei*, que favorece a existência de zonas microaeróbicas, propícias a sobrevivência de bactérias nitrificantes, como as dos gêneros *Nitrosomonas* e *Nitrobacter*, que têm pH ótimo para crescimento no intervalo entre 7,0 e 8,0 (Hundley & Navarro 2013); valores semelhantes aos observados no período de avaliação. As reduções significativas dos teores de NAT e nitrito após a passagem pelos leitos durante as últimas semanas do período de avaliação, suportam a hipótese do forte processo de nitrificação sustentado nos leitos vegetados. Shi et al. (2011) apontam reduções de NAT na ordem de 30% em leito vegetado com fluxo vertical. Webb et al. (2012) descrevem magnitudes maiores de redução do NAT (91-100%) em sistema de leito vegetado com fluxo vertical cultivado com *Salicornia europaea*.

Dos compostos nitrogenados, apenas os teores de nitrito mostraram diferenças significativas entre os leitos vegetados. O leito 2 mostrou uma menor média global ($0,21 \text{ mg L}^{-1}$) e conseqüentemente uma maior remoção de nitrito do que os demais leitos vegetados. Este leito apresentou valores intermediários de fluxo de vazão (retenção hidráulica), pH, condutividade elétrica (da água e do solo) e de umidade do solo. Nenhum destes fatores parece explicar a maior eficiência para o nitrito. A única variável monitorada que apresentou valor médio no leito 2 maior que nos demais (mas não estatisticamente significativa) foi o teor de SST. É possível que, devido a sua posição mais central no RAS e entrada linearmente posicionada em relação a tubulação da água de entrada de água clarificada, biofoco/lodo não retido no clarificador tenha tido uma maior concentração neste leito. Um maior teor de particulados orgânicos neste leito pode ter favorecido a condições de desnitrificação.

O fosfato foi o nutriente que teve a maior taxa de remoção (74%) pelos leitos vegetados, e este processo se manteve ao longo de todo período de avaliação. Em apenas um período (entre os dias 106 e 108), quando ocorreu uma precipitação de 22 mm de chuvas, o teor de fosfato tanto na água de entrada como na água de saída dos leitos esteve abaixo do limite de detecção, o que poderia ser explicado pela diluição desse composto. Buhmann & Papenbrock (2013) apontaram que a alta taxa de remoção de fosfato em leitos vegetados bem

drenados pode ser explicada pela imobilização do fosfato com algumas substâncias inorgânicas (como hidróxidos e óxidos de ferro e manganês) ou orgânicas. Shpigel et al. (2013) encontraram uma maior taxa de remoção do fosfato da água de efluente da maricultura por leitos vegetados com *S. persica* com fluxo subsuperficial (99%) do que em leito com fluxo superficial (solo saturado; 83%). Webb et al. (2012) encontrou remoções de 90% do fosfato de efluentes da maricultura em leito vegetado com *S. europaea*. Mitsch (1995) avaliando leitos vegetados construídos para tratar a água turva no rio Des Plaines, no nordeste de Illinois, EUA, mostrou diminuições do fosfato dissolvido de 53 a 92 %, independente do volume de água de passagem. Todos estes resultados apontam para alta eficiência na remoção de fosfato por sistemas aquapônicos com substrato para o enraizamento das plantas. Na ausência do substrato fortes processos de regeneração do fósforo orgânico para fosfato, por ação microbiana, tendem a ocorrer em tanques de sedimentação estáticos não vegetados (Copertino et al. 2009) ou com raízes de halófitas (Oliveira 2017) durante tratamento de efluente de carcinicultura marinha intensiva.

5.3. Desenvolvimento da *Salicornia neei* nos leitos vegetados.

As condições da radiação, temperatura e precipitação durante os períodos de aclimatação das plantas de *S. neei* e de avaliação do RAS aquapônico foram semelhantes aos de cultivos anteriores realizados no verão-outono gaúcho (Doncato & Costa 2018, Souza et al. 2018), e favoráveis ao pleno desenvolvimento desta espécie. No Brasil, *S. neei* vem sendo cultivada experimentalmente sob irrigação salina em diferentes zonas climáticas e tipos de solos, e a maioria dos cultivos foi realizada com condutividades elétricas do solo entre 4,5 a 22,0 dS m⁻¹ (Costa & Herrera 2016a, Doncato & Costa 2018, Alves et al. 2019, Schardong et al. 2018). A condutividade média do solo durante o presente estudo (10,5 dS m⁻¹) manteve-se mais próxima do ótimo de salinização para o crescimento da *S. neei*, que segundo o bioensaio de Souza et al. (2018) é 5 g NaCl L⁻¹ (\approx 7,5 dS m⁻¹). A média da umidade dos solos nos três leitos vegetados manteve-se em torno de 16%, valor muito próximo dos 10-12 % caracterizados com determinantes das mais altas produtividades de *S. neei* em cultivo no semiárido nordestino, irrigado com água de poço salino (Costa et al. 2014b).

A biomassa média de rebrote após 30 dias da poda foi de 1193,2 g m⁻² massa fresca (117,3 g m⁻² de massa seca). Ventura et al. (2011) avaliaram o efeito da frequência de podas nas produtividades de espécies de *Salicornia* anuais e perenes (*Sarcocornia fruticosa*) de

Israel, irrigadas com água salina enriquecidas com nutrientes. Neste estudo, para podas efetuadas a cada 4 semanas, a espécie anual apresentou maior produtividade média de rebrote (2600 g m^{-2}) do que a perene (1000 g m^{-2}). Logo, a produção de biomassa de rebrote de *S. neei* (que é uma espécie perene) foi maior da quantificada para *Salicornia* perene de Israel. Os valores citados acima são, entretanto, muito menores do que os obtidos de rebrotos de 3 semanas (21 dias) para *Salicornia europaea* (espécie anual) cultivada em leito vegetado irrigado com efluente da piscicultura marinha no País de Gales, que variou durante o verão entre 2000 e 4000 g m^{-2} de massa fresca (Webb et al. 2012).

O valor de biomassa média de 3722 g m^{-2} de matéria fresca ($372,2 \text{ g m}^{-2}$ de massa seca) acumulada após 4 meses de crescimento da *S. neei* nos leitos vegetados está entre os maiores já quantificados para esta espécie, que segundo Costa & Herrera (2016) variaram entre 820 e 5950 g m^{-2} ($8,2$ a $59,5 \text{ t ha}^{-1}$), para tempos de cultivo de $3,5$ a $7,5$ meses. Considerando o cultivo hidropônico de *S. neei*, Pinheiro et al. (2017) encontrou uma produção de total de $8,2 \text{ kg m}^{-2}$ de bancadas NFT (“Nutrien film technique”) com água de cultivo de camarão em sistema BFT durante 73 dias de experimento. Um valor de produção bem menor de 1100 g m^{-2} foi obtido para a mesma espécie por Oliveira (2017), após 88 dias de cultivo em bandejas flutuantes dentro de sistemas DWS (“deep water systems”).

Apesar da condição fortemente nitrificante no RAS aquapônico nas últimas semanas de avaliação, não ocorreu incorporação significativa de nitrato na água saindo dos leitos vegetados. Este resultado foi possível devido ao crescimento exuberante das plantas de *S. neei* e incorporação do nitrato na forma de nitrogênio em sua biomassa. Quintã et al. (2015) mostraram em um bioensaio que *Salicornia europaea* apresenta um maior crescimento tendo como fonte de nitrogênio o nitrato, do que quando suprida com NAT. Esta maior afinidade por nitrato possivelmente também ocorre em *S. neei*, e segundo Doncato & Costa (2018), o teor médio de nitrogênio em caules de *S. neei* da linhagem BTH2 cultivada, em canteiro aberto sob irrigação de água salina da carcinicultura, é de $13,9 \text{ g Kg}^{-1}$ de massa seca. Considerando este teor de nitrogênio nos caules e a biomassa de rebrote da *S. neei* nos leitos vegetados, cerca de 1630 mg N m^{-2} foram fixados em caules dessa planta a cada 30 dias. Esta estimativa mostra que boa parte do nitrato produzido pela intensa nitrificação nos leitos vegetados deve estar sendo absorvido pelo crescimento da *S. neei*, não sendo repassado para a água de passagem no leito.

Quanto ao caule principal e ramificações de *S. neei*, estas são característica de interesse agrônômico, uma vez que esta espécie é comercializada como “aspargo marinho” tanto “in natura” como de forma industrializada (e.g. como pickles). O tamanho comercial adotado para caules e ramos em Israel é de 10 cm, e as plantas de *S. neei* cultivadas nos leitos vegetados foram capazes de produzir, 30 dias após poda, cerca de 500 caules com este tamanho comercial em cada metro. Além da alta produtividade de caules, as plantas cultivadas nos leitos vegetados apresentaram uma alta suculência (90% do peso fresco era composto por água), característica de grande atratividade para a culinária gourmet (Ventura & Sagi 2013). Este valor de suculência é maior do que os descritos em cultivos anteriores de *S. neei* com água da carcinocultura por Doncato & Costa (2018) de 85,8% e por Souza et al. (2018) de 84%, como também de plantas de populações selvagens de *S. neei* (88,2-88,6% segundo Bertin et al. 2014; e 84.5% segundo Medina et al. 2008). A alta produtividade e forma de crescimento de *S. neei* nos leitos vegetados apontam para um ótimo potencial comercial desta forma de produção aquapônica do aspargo marinho.

6. Conclusões

O sistema de clarificação através de sedimentação, tradicionalmente utilizado nos cultivos BFT, e utilizado no presente estudo, não foi eficiente para as necessidades de qualidade de água da aquaponia em leito vegetado (teores de SST não reduziram mais do que 200 mg L⁻¹), portanto, novos métodos de clarificação devem ser estudados.

Em relação aos nitrogenados, no sistema RAS aquapônico os processos de incorporação e remoção de nitrato ocorreram em diferentes compartimentos, tendo como resultado global uma inabilidade do sistema testado de remover o nitrato da água, quando a água passa periodicamente pelo sistema ou uma troca muito frequente da água recirculada foi aplicada. A remoção do nitrato originado no BFT pode ser alcançada a partir de recirculação da água no RAS Aquapônico por um tempo mais prolongado (como por em sistema de bateladas), onde a maior parte da eliminação ocorreu aparentemente em reservatórios com água parada e com o predomínio do processo de desnitrificação.

Como em outros estudos com leitos vegetados, o RAS aquapônico se mostrou muito eficiente para remoção do fosfato dissolvido na água, através de processos que ocorreram no

solo, independentemente do manejo de fluxo contínuo ou recirculação prolongada da água no sistema.

Sobre o crescimento da *S. neei* nos leitos vegetados, as condições físico-químicas e concentrações de nutrientes da água de irrigação foram favoráveis ao crescimento da planta, que atingiu alta biomassa, foi capaz de crescer vigorosamente após poda e produzir um grande número de caules e ramos (cerca de $500 \text{ m}^{-2} \text{ 30 dias}^{-1}$), com tamanhos propício a comercialização.

7. Referências

- ABOU-ELELA, SI, & HELLAL, MS. 2012. Municipal wastewater treatment using vertical flow constructed wetlands planted with *Canna*, *Phragmites* and *Cyprus*. *Ecological Engineering* 47: 209-213.
- ALONSO-RODRIGUEZ, R, & PAEZ-OSUNA, F. 2003. Nutrients, phytoplankton and harmful algal blooms in shrimp ponds: a review with special reference to the situation in the Gulf of California. *Aquaculture* 219: 317–336.
- ALVES, PR, DE LUCENA, EMP, BONILLA, OH, & COSTA, CSB. 2019. Fenologia da *Salicornia neei* Lag. cultivada no semiárido cearense. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 12(02): 489-504.
- ARANEDA, M, PEREZ, E, P, & GASCA-LEYVA, E. (2008). White shrimp *Penaeus vannamei* culture in freshwater at three densities: Condition state based on length and weight. *Aquaculture*, 283 (1-4): 13–18.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CRIADORES DE CAMARÃO/ MINISTÉRIO DA PESCA E AQUICULTURA. 2013. Levantamento da Infraestrutura Produtiva e dos aspectos tecnológicos, economicos, sociais e ambientais da carcinicultura marinha no Brasil em 2011. 2013. Associação Brasileira de criadores de Camarão/ Ministério da Pesca e Aquicultura, 82p.
- AVNIMELECH, Y. 2012 *Biofloc Technology - A Practical Guide Book*, 2nd Ed. The World Aquaculture Society, Baton Rouge, Louisiana, EUA : 272.
- BAUMGARTEN, MGZ, WALLNER-KERSANACH M & NIENCHESKI, LFH. 2010. *Manual de análises em oceanografia química*. Rio Grande, Brasil, Ed. da Universidade Federal do Rio Grande, 2 a edição: 172.
- BERTIN, RL, GONZAGA, LV, BORGES, GSC, AZEVEDO, MS, MALTEZ, HF, HELLER, M, MICKE GA, TAVARES, LBB, FETT, R. 2014. Nutrient composition and, identification/quantification of major phenolic compounds in *Sarcocornia ambigua* (Amaranthaceae) using HPLC–ESI-MS/MS. *Food Research. International*, 55: 404-411.
- BERTIN, RL, MALTEZ, HF, GOIS, JS, BORGES, DLG, BORGES, GSC, GONZAGA, LV, FETT, R. 2016. Mineral composition and bioaccessibility in *Sarcocornia ambigua* using ICP-MS, *Journal of Food Composition and Analysis*, 47: 45-51.

- BUHMANN, AK & PAPENBROCKA, J. 2013. Biofiltering of aquaculture effluents by halophytic plants: Basic principles, current uses and future perspectives. *Environmental and Experimental Botany*, 92: 122-133.
- BUHMANN, AK, WALLERB, U, WECKERC, B, PAPENBROCKA, J. 2015. Optimization of culturing conditions and selection of species for the use of halophytes as biofilter for nutrient-rich saline water. *Agricultural Water Management*, 149: 102–114.
- BURFORD, MA, THOMPSON, PJ, BAUMAN, RH and PEARSON, DC. 2004. The contribution of flocculated material to shrimp *Litopenaeus vannamei* nutrition in a high-intensive zero-exchange system. *Aquaculture* 232:525-537.
- COPERTINO, MS, TORMENA, T & SEELIGER, U. 2009. Biofiltering efficiency, uptake and assimilation rates of *Ulvaclathrata* (Roth) J. Agardh (Chlorophyceae) cultivated in shrimp aquaculture wastewater. *Journal of Applied Phycology*, 21: 31-45.
- COSTA, CSB. 2006. A salicornia: uma planta que pode ser utilizada no cultivo integrado com o camarão. *Panorama da Aquicultura*, 98:28-33.
- COSTA, CSB. 2011. Restoration of coastal salt marshes in Brazil using native salt marsh plants. In: GREIPSSON, S. (ed.). *Restoration Ecology*. Jones & Bartlett Learning, Sudbury. 333-338.
- COSTA, CSB, VICENTI, JRM, MORÓN-VILLARREYES, J, CALDAS, S, CARDOSO, LV, FREITAS, RF, D'OCA, MGM. 2014a. Extraction and characterization of lipids from *Sarcocornia ambigua* meal: a halophyte biomass produced with shrimp farm effluent irrigation. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 86(2): 935-943.
- COSTA, CSB, BONILLA, OH, OLIVEIRA, RD, ALVES, PR, LOPES, EF, & LUCAS, DS. 2014b. Influence of different saline irrigation regimes on soil electrical conductivity and crop yield of *Sarcocornia ambigua* in the semi-arid region of NE Brazil. In: *Annals of the II INOVAGRI International Meeting*. Fortaleza, p.3234-3243.
- COSTA, CSB, HERRERA, OB. 2016a. Halophytic life in Brazilian salt flats: biodiversity, uses and threats. In: Khan MA, Boër B, Azturk M, Clüsener-Godt M, Gul B and Breckle S-W (Eds.), *Sabkha ecosystems volume V: the Americas*. Berlin:Springer, p. 11-27.
- COSTA, CSB, HERRERA, OB. 2016b. Halófitas brasileiras: Formas de cultivo e usos. In: Gheyi, HR, Dias, NS, Lacerda, CF, Gomes Filho, E. (Eds.), *Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados*. Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Salinidade-INCTSal/CNPq, Fortaleza, 2ª. Ed.: 243-258.

- COSTA, CSB, KADEREIT, G, FREITAS, GPM. 2019. Molecular markers indicate the phylogenetic identity of southern Brazilian sea asparagus: first record of *Salicornia neei* Lag. in Brazil. *Rodriguésia*, Rio de Janeiro, 70: e03122017. 2019, 10p.
- DIAS, G. 2015. Sal verde e mais saudável. *Agropecuária Catarinense*, 28: 29-31.
- D'OCA, MGM, MORON-VILLARREYES, JA, LEMÕES, JS, COSTA, CSB. 2012. Fatty acids composition in seeds of the South American glasswort *Sarcocornia ambigua*. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 84: 865-870.
- DONCATO, KB, COSTA, CSB. 2018. Growth and mineral composition of two lineages of the sea asparagus *Sarcocornia ambigua* irrigated with shrimp farm saline effluent. *Experimental Agriculture*, 54(3): 399–416.
- DONCATO, KB, COSTA, CSB. 2018. Nutritional potential of a novel sea asparagus, *Salicornia neei* Lag., for human and animal diets. *Biotemas*, 31 (4): 57-63.
- EBELING JM, TIMMONS, MB, BISOGNI, JJ. 2006. Engineering analysis of the stoichiometry of photoautotrophic, autotrophic, and heterotrophic control of ammonia-nitrogen in aquaculture in aquaculture production systems. *Aquaculture* 257: 346-358.
- ESPINOSA-MOYA, EA, ANGEL-SAHAGÚN, CA, MENDOZA-CARILLO, JM, ALBERTOS-ALPUCHE, PJ, ÁLVAREZ-GONZALEZ, CA, MARTINEZ-YAÑEZ, R. 2014. Herbaceous plants as part of biological filter for aquaponics system. *Aquaculture Research*, 47(6): 1716-1726.
- FAO. 2016. Food and agriculture organization of the United Nations. The State of World Fisheries and Aquaculture 2016. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 200p.
- FREITAS, RF, COSTA, CSB. 2014. Germination responses to salt stress of two intertidal populations of the perennial glasswort *Sarcocornia ambigua*. *Aquatic Botany*, 117: 12-17.
- FRÓES, C, FÓES, G, KRUMMENAUER, D, BALLESTER, E, POERSCH, LH, & WASIELESKY JR., W. 2012. Fertilização orgânica com carbono no cultivo intensivo em viveiros com sistema de bioflocos do camarão branco *Litopenaeus vannamei*. *Atlântica*, 34(1): 31-39.
- FURTADO, PS, CAMPOS, BR, SERRA, FP, KLOSTERHOFF, M. ROMANO, LA, WASIELESKY JR, W. 2015. Effects of nitrate toxicity in the Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, reared with biofloc technology (BFT). *Aquacult Int* 23:315–327.

- GAONA, CAP, POERSCH, LH, KRUMMENAUER, D, FOES, GK, & WASIELESKY JR., W. 2011. The effect of solids removal on water quality, growth and survival of *Litopenaeus vannamei* in a Biofloc Technology Culture System. *International Journal of Recirculating Aquaculture*, 12: 54-73.
- GAONA, CAP, SERRA, FDP, FURTADO, PS, POERSCH, LH, & WASIELESKY JR, W. 2016. Biofloc management with different flow rates for solids removal in the *Litopenaeus vannamei* BFT culture system. *Aquaculture International*, 24(5): 1263-1275.
- GARCIA-ROBLEDO, E, CORZO, A, PAPASPYROU, S. 2014. A fast and direct spectrophotometric method for the sequential determination of nitrate and nitrite at low concentrations in small volumes. *Marine Chemistry* 162: 30-36.
- GLENN, EP, MIYAMOTO, S, MOORE, D, BROWN, JJ, THOMPSON, TL, BROWN, P. 1997. Water requirements for cultivating *Salicornia bigelovii* Torr. with seawater on sand in a coastal desert environment. *Journal of Arid Environments*, 36: 711-730.
- GLENN, EP, ANDAYA, T, CHATURVEDI, R, MARTINEZ-GARCIA, R, PEARLSTEINA, S, SOLI, D, NELSON, SG, FELGER, RS. 2013. Three halophytes for saline-water agriculture: an oilseed, a forage and a grain crop. *Environmental and Experimental Botany*, 92: 110-121.
- HARGREAVES, JA, 2013. Biofloc Production Systems for Aquaculture. Southern Regional Aquaculture Center. Publication No. 4503.
- HENRY-SILVA, GG & CAMARGO, AFM. 2006. Efficiency of aquatic macrophytes to treat *Nile tilapia* pond effluents. *Scientia Agricola*. 63: 433-438.
- HENRY-SILVA, GG, AFM CAMARGO. 2008. Tratamento de efluentes de carcinicultura por macrófitas aquáticas flutuantes. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 37(2): 181-188.
- HUNDLEY, GC, NAVARRO, RD. 2013. Aquaponia: a integração entre piscicultura e hidroponia. *Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável (RBAS)*, 3(2): 52-61.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2015.
- KRUMMENAUER, D, SEIFERT Jr, CA, POERSCH, LH, FÓES, GK, LARA, GR, & WASIELESKY Jr, W. 2012. Cultivo de camarões marinhos em sistema de bioflocos: análise da reutilização da água. *Atlântica*, 34(2): 103-111.
- LIN, YC, CHEN, JC. 2001. Acute toxicity of ammonia on *Litopenaeus vannamei* Boone juveniles at different salinity levels. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 259: 109-119.

- MARQUES, AR, NETO, JSF, FERREIRA, F. 2016. Hierarchical clustering and partitioning to characterize shrimp grow-out farms in northeast Brazil. *Aquaculture*, 463: 106–112.
- MCINTOSH, MC, NEVIN, AA. 2004. Ionic Supplementation of Pond Waters for Inland Culture of Marine Shrimp. *Journal of the World Aquaculture Society*, 35(4): 460–467.
- MEDINA, E, FRANCISCO, AM, WINGFIELD, R, CASAÑAS, OL. 2008. Halofitismo em plantas de la costa caribe de Venezuela: halófitas y halotolerantes. *Acta Bot. Venez.*, 31:49-80.
- MITSCH, WJ, CRONK, JK, WU, X, NAIRN, RW. 1995. Phosphorus retention in constructed freshwater riparian marshes. *Ecological Applications*, 5(3): 830-845.
- OLIVEIRA, GS. 2017. Avaliação de dois sistemas aquapônicos com a halófito *Sarcocornia ambigua* (Michx.) Alonso & Crespo para recirculação de água da piscicultura marinha intensiva. Dissertação de mestrado. Programa de Pos-graduação em Aquicultura, FURG. Rio Grande-RS, 59p.
- PINHEIRO, I, ARANTES, R, do ESPÍRITO SANTO, CM, do NASCIMENTO VIEIRA, F, LAPA, KR, GONZAGA, LV, FETT, R, BARCELOS-OLIVEIRA, JR, SEIFFERT, WQ. 2017. Production of the halophyte *Sarcocornia ambigua* and Pacific white shrimp in an aquaponic system with biofloc technology. *Ecological Engineering*, 100: 261-267.
- PORTO, ER, AMORIM, MCC, DUTRA, MT, PAULINO, RV, BRIO, LTL, MATOS, ANB. 2006. Rendimento da *Atriplex nummularia* irrigada com efluentes da criação de tilápia em rejeito da dessalinização de água. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 10(1) 97–103.
- QUINTÃ, R, SANTOS, R, THOMAS, DN, & VAY, LL. 2015. Growth and nitrogen uptake by *Salicornia europaea* and *Aster tripolium* in nutrient conditions typical of aquaculture wastewater. *Chemosphere*, 120: 414-421.
- RAY, AJ, LEWIS, BL, CL BROWDY & LEFFLER, JW. 2010. Suspended solids removal to improve shrimp (*Litopenaeus vannamei*) production and an evaluation of a plant-based feed in minialexchange, superintensive culture systems. *Aquaculture*, 299: 89–98.
- RIQUELME, J, OLAETA, JA, GÁLVEZ, L, UNDURRAGA, P, FUENTEALBA, C, OSSES,A, ORELLANA, J, GALLARDO, J, PEDRESCHI, R. 2017. Nutritional and functional characterization of wild and cultivated *Sarcocornia neei* grown in Chile. *Cien. Inv. Agr.* 43(2):283-293.

- ROCHA, AF, ABREU, PC, WASIELESKY JR, W, TESSER, MB. 2012 Avaliação formação de bioflocos na criação de juvenis de tainha *Mugil Cf. Hospes* sem renovação de água. *Atlântica*, 34: 63-74.
- SAMOCHA, TM, WILKENFELD, JS, MORRIS TC. 2010. Intensive raceways without water exchange analyzed for White shrimp culture. *Global Aquaculture Advocate*. 13:22–24p.
- SAMOCHA, TM, SCHVEITZER, R, KRUMMENAUER, D, MORRIS, TC. 2012. Recent Advances in Super-Intensive, Zero-Exchange Shrimp Raceway Systems. *Global Aquac Adv*, 15(6): 70-71.
- SCHARDONG, RMF, BONILLA, OH, SANTANELLA, ST. 2018. Cultivo de *Batis maritima*, *Sarcocornia ambigua* e *Sporobolus virginicus* com água residuária do cultivo de *Litopenaeus vannamei*. *Biotemas*, 31 (2): 19-32.
- SCHVEITZER, R, ARANTES, R, BALOI, MF, COSTODIO PFS, ARANA, LV, SEIFFERT, WQ, & ADRETTA, ER. 2013. Use of artificial substrates in the culture of *Litopenaeus vannamei* (Biofloc System) at different stocking densities: Effects on microbial activity, water quality and production rates. *Aquacultural Engineering*, 54: 93-103.
- SHI, Y, G ZHANG, J LIU, Y ZHU & J XU. 2011. Performance of a constructed wetland In treating brackish wastewater from commercial recirculating and super-intensive shrimp growout systems. *Bioresource Technology*, 102: 9416–9424.
- SHPIGEL, M, BEN-EZRA, D, SHAULI, L, SAGI, M, VENTURA, Y, SAMOCHA, T & LEE, JJ. 2013. Constructed wetland with *Salicornia* as a biofilter for mariculture effluents. *Aquaculture*, 412: 52-63.
- SOUSA, WTZ, PANITZ, CMN, THOMAZ, SM. 2011. Performance of pilot-scale vertical flow constructed wetlands with and without the emergent macrophyte *Spartina alterniflora* treating mariculture effluent. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 54(2): 405-413.
- SOUZA, MM, DA SILVA, B, COSTA, CSB, FURLONG, EB. 2018. Free phenolic compounds extraction from Brazilian halophytes, soybean and rice bran by ultrasound-assisted and orbital shaker methods. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 90(4): 3363-3372.
- TAW, N. Biofloc technology expanding at white shrimp farms biofloc systems deliver high productivity with sustainability. 2010. *Global Aquaculture Advocate*, 2: 20-22.
- TIMM, TG, SILVA Jr, AA, BERTIN, RL, TAVARES, LBB. 2015. Processamento de conservas de *Sarcocornia perennis*. *Agropecuária Catarinense*, 28: 97-102.

- TIMMONS, MB, EBELING, JM. 2010 Recirculating aquaculture. NRAC Publication Cayuga Aqua Ventures, Ithaca, NY, 3: 975p.
- VAN WYK, SCARPA, J. 1999. Water quality and management. In Van Wyk, p., Davis-Hodgkins, M, Laramore, R, Main, KL, Mountain, J, and Scarpa, j. (Eds.). Farming marine shrimp in recirculating freshwater systems. Tallahassee: Florida Department of Agriculture and Consumer Services. 128-138p.
- VENTURA, Y, WUDDINEH, WA, MYRZABAYEVA, M, ALIKULOV, Z, KHOZINGOLDBERG, I, SHPIGEL, M, SAMOCHA, TM, SAGI, M. 2011. Effect of seawater concentration on the productivity and nutritional value of annual *Salicornia* and perennial *Sarcocornia* halophytes as leafy vegetable crops. *Scientia Horticulturae*, 128: 189-196.
- VENTURA, Y, SAGI, M. 2013. Halophyte crop cultivation: The case for *Salicornia* and *Sarcocornia*. *Environmental and Experimental Botany*, 92: 144-153.
- WASIELESKY, W, ATWOOD, H, STOKES, A, BROWDY, CL. 2006. Effect of natural production in a zero exchange suspended microbial flocs based super-intensive culture system for white shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Aquaculture* 258: 396–403.
- WEBB, JM, QUINTÃ, R, PAPADIMITRIOU, S, NORMAN, AL, RIGBY, BM, THOMAS, DN, LE VAY, CL. 2012. Halophyte filter beds for treatment of saline wastewater from aquaculture. *Water Research* 46: 5102-5114.
- XU WJ, PAN, LQ. 2012. Effects of bioflocs on growth performance, digestive enzyme activity and body composition of juvenile *Litopenaeus vannamei* in zero-water exchange tanks manipulating C/N ratio in feed. *Aquaculture* 356–357: 147–152.
- YUSOFF, FM, MATIAS-PERALTA, H, & SHARIFF, M. 2010. Phytoplankton population patterns in marine shrimp culture ponds with different sources of water supply. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 13(4): 458–464.
- ZAR, JH. 2010. Biostatistical analysis. New York, Prentice-Hall. 944 p.