

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOTECNOLOGIA E
BIOCIÊNCIAS**

Ana Gabriela Itokazu Canzian da Silva

**Implantação e avaliação de um *Algal Turf Scrubber* para remoção de
nutrientes**

**FLORIANÓPOLIS
2018**

ANA GABRIELA ITOKAZU CANZIAN DA SILVA

Implantação e avaliação de um *Algal Turf Scrubber* para remoção
de nutrientes

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa
de Pós-Graduação em Biotecnologia e Biociências
da Universidade Federal de Santa Catarina
para obtenção do grau de Mestre em Biotecnolo-
gia e Biociências

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Rubi Rörig

Florianópolis, Junho de 2018

Ana Gabriela Itokazu Canzian da Silva
Implantação e avaliação de um *Algal Turf Scrubber* para remoção de nutrientes/
Ana Gabriela Itokazu Canzian da Silva. – Brasil, 2018-
110 p. : il. (algumas color.) ;

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Rubi Rörig

Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina
Centro de Ciências Biológicas
Departamento de Botânica , 2018.

1. Palavra-chave1. 2. Palavra-chave2. 2. Palavra-chave3. I. Orientador. II. Universidade Federal de Santa Catarina. III. Programa de Pós Graduação em Biotecnologia e Biociências. IV. Título

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

ANA GABRIELA ITOKAZU CANZIAN DA SILVA

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Biotecnologia e Biociências, sendo aprovada em sua forma final pela banca examinadora:

Orientador(a): Prof. Dr. Leonardo R. Rörig
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Rodrigo Mohedano
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. José Bonomi Barufi
Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 05 de Junho de 2018

*Dedico este trabalho e todo o resto aos meninos, Marcelo & Felipe.
À borda do universo, e tudo que pode ter pra dentro disso.*

Agradecimentos

Ao meu companheiro, Rafael Bidese Puhl, que além de não poucos anos de convívio, me deu duas coisicas lindas pra chamar de filhos, e um lar. Por ser a quem recorro quando bate o desespero, por estar junto também quando o que tem é alegria.

Aos meus pais, Maria Cristina Itokazu e Nelson Canzian da Silva, por me ensinarem bem mais do que a cartilha manda, sempre. Pelas longas conversas e pelas curtas também, pela ajuda com os meninos, e com a vida.

Ao ídolo e orientador, Leonardo Rubi Rörig, por tanto tempo de paciência, convivência, e ensinamentos que vou levar pra vida toda. Foram muitos anos de trabalho juntos, na bancada, no campo, fazendo as burocracias da UFSC, e em bares, também. Te considero como segundo pai, de verdade. Obrigada, por isso e por tudo.

Aos amigos e companheiros de biotec, Mariana Londero Becker, Gabriel Matos, Cândice Maria Boff e Thaís Alberti, pelos almoços, comidinhas nos seminários, venenos derramados, e pelas risadas de doer as bochechas.

Ao eterno quarteto, Laura Freitas, Gustavo Flores e Tábata Burkhardt, que sempre fizeram parte da minha vida acadêmica, e mesmo que mais distantes, não me deixam na mão nunca. Aos irrelevantes, sempre tão relevantes. À música, brasileira e estrangeira, pop e obscura.

Aos colegas de lab Danielly Oliveira, Kely Salvi, Ariane Paulutti, Luana de Azevedo Aimi, Giulia Burle, Tanise Klein Ramos, Rafaela Gordo Corrêa, Graziela Persich, Melissa dos Santos, Eduardo Bastos e todos os que participaram do lab durante o processo. Pelas ajudas diárias, pelas conversas, pelas saídas de campo, pelos experimentos na Barra, e pelo café compartilhado. Aos muitos colegas de outros labs, que eventualmente trocaram idéias e ajudaram com trabalhos braçais.

Aos amigos Rafaela e Vincent Samagaia, Rebeca Andrade, João Vitor Heberle, Laura Freitas, José Roberto Guaritá, Matheus J. Werner, Dylan Pazello, Johannes Frey, Francisco Gomes, Gustavo Flores, e Mariana Londero Becker, por fazerem minha vida mais amena e tornarem a fazedoura desse trabalho mais divertida, assim como ocuparem a minha mente com outras coisas mais soltas que um trabalho acadêmico. Agradeço também por eventualmente discutirem sobre sequestro de nutrientes, biorremediação, e crescimento de algas, além de particularidades das mudanças dos parâmetros físico-químicos da lagoa da Barra. Sei que não é fácil aguentar os cientistas ávidos com as suas pesquisas, até mesmo quando você mesmo é um cientista... Obrigada por engradecerem a alma e acalmarem o coração, e por serem parte do meu caos.

Aos professores David Blersch, Paulo Antunes Horta, Marcelo Maraschin, José Bonomi, Eduardo Lobo Alcayaga, Edmundo Grisard, Roberto Derner, Rodrigo Mohedano, Admir Giachini, Vinícius Cerqueira. Pela ajuda, apoio, e conversas, as oficiais e as de corredor também. Pelas conquistas, e pelas esperanças. Aos técnicos Rafael Lopes, J. C. Simonassi e Caio Magnotti,

pelo trabalho braçal, pela supervisão, e por serem, muitas vezes, meus olhos e ouvidos.

À banca, particularmente, ainda que todos foram inclusos por outros tantos motivos, mas que também corajosamente aceitaram presenciar e avaliar este trabalho. Pelos pitacos e sugestões, pela paciência, e pelo apoio. Ao Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia e Biociências da UFSC, por me formar e me permitir crescer e avançar naquilo que me move profissionalmente.

Aos laboratórios LAFIC, LCA, LAPMAR, LMM, NEMAR, pela estrutura, apoios moral e técnico, e por manter a parceria.

À empresa iGui[®], que nos auxiliou na manufatura das rampas. Às agências de fomento CAPES e CNPq, pelo apoio financeiro nessa crise que tivemos que viver. E novamente, mas agora em outro âmbito, ao Leonardo, meu pai Nelson, e ao Rafael, que complementaram o que faltou com o próprio, para que eu pudesse realizar este trabalho.

"O preço de qualquer coisa é a quantidade de vida que você troca por ela."

- Henry David Thoreau

"I'm not the greatest; but gimme space kid, I'm set to make it."

- Rebel Kleff

"Enquanto você dorme, o tempo anda. Enquanto você anda, o tempo corre. Enquanto você corre, o tempo voa. A gente voa alto, e o tempo não volta."

- Don L

Resumo

A qualidade e a disponibilidade de água vêm diminuindo drasticamente em todo o globo, comprometendo a viabilidade de ecossistemas inteiros, além da saúde e qualidade de vida de populações humanas. O crescimento urbano rápido e desordenado intensifica a necessidade de intervenções pré e pós-contaminação, ou seja, melhorias no tratamento de esgoto e atitudes de remediação. Estudos com foco em biorremediação despontam em busca de alternativas para recuperação de ambientes atingidos e contaminados e neste contexto, os sistemas *Algae Turf Scrubber* (ATS) são utilizados com sucesso em ambientes diversos. Estudados para depuração de aquários, foram testados para remoção de nutrientes em efluentes pesados, como os da suinocultura e pecuária. Com o objetivo de implementar e avaliar um sistema de tratamento baseado na técnica ATS para remoção de nutrientes, construímos um sistema composto por duas rampas, adjacente a uma lagoa salobra de decantação de efluentes de maricultura, próxima à Lagoa da Conceição em Florianópolis. O sistema conta com dois regimes hidráulicos intercambiáveis. O regime de crescimento é denominado "aberto": a água da lagoa apenas circula pelo sistema. O regime de teste, "fechado", funciona com dois reservatórios de 100 litros cada, as rampas são utilizadas separadamente e a água circula apenas dentro do sistema construído. Foram testadas duas topografias de substrato de crescimento diferentes (rede de nylon e rede de polietileno com revestimento em policloreto de vinila expandido), e os parâmetros avaliados incluíram pH, temperatura, salinidade, turbidez, luminosidade, condutividade, oxigênio dissolvido, clorofila e ficocianina *in vivo*, além da análise da composição específica da biomassa, e do conteúdo de nitrogênio e fósforo. Os testes foram realizados com a água da própria lagoa, e os valores de remoção atingiram 17,81%, 32,35%, e 88,31% para N-NH₄, N-NO₂ and P-PO₄, respectivamente. O sistema poderá continuar em uso para pesquisa e remediação após a finalização deste trabalho.

Palavras-chave: Algal, Scrubber, sucessão, nutrientes, remoção, nitrogênio, fósforo.

Abstract

Water quality and availability are declining worldwide, compromising ecosystem viability, alongside with human population health and quality of living. The fast and disrupt urban growth intensifies the intervention need, before and after contamination, as in, wastewater treatment and remediation. *Algal Turf Scrubber* (ATS) rise as an alternative for contaminated aquatic areas restoration and for wastewater treatment as well. Created and studied for aquarium depuration, they were tested for nutrient removal in manure and suine effluents. Therefore, an ATS-based system for nutrient removal were built, with two 4 meter-long ramps connected with a brackish water decantation pond, near Conceição Lagoon, in Florianópolis. The system is interchangeable, with an "open" regime, when the water from the decantation pond is pumped to the system, and once passes through, it falls back to the pond; and "closed", when the ramps are used separately, with one 100 L reservatory each. The open regime were used to mature the system, and the closed one, for the nutrient removal experiments. Two different substrates were tested, and the descriptive parameters included pH, temperature, salinity, turbidity, irradiance, condutivity, dissolved oxygen, *in vivo* chlorophyll and phicocyanin, plus nutrients in the water and dry biomass. Tests were run with water from the decantation pond, and the removal rates reached 17,81%, 32,35%, and 88,31% for N-NH₄, N-NO₂ and P-PO₄, respectively. This ATS-based system will be used for further investigations, complementing the research done at this institution.

Keywords: Algal, Scrubber, succession, nutrient, removal, nitrogen, phosphorous.

Lista de ilustrações

Figura 1	– Processo inicial de formação de um biofilme, onde (a) esquemático de uma diatomácea assentando na superfície e em seguida, interagindo com esta, (b) representação da produção do rastro, e (c) esquemático do processo como um todo. Imagens modificadas de Lebret, Thabard e Hellio 2009, Ozkan e Berberoglu 2013, Wetherbee <i>et al.</i> 1998.	27
Figura 2	– Localização da área utilizada, onde (a) Ilha de Florianópolis, (b) Estação de Maricultura Professor Elpídio Beltrame, da UFSC, e (c) local de construção das rampas e da lagoa salobra de decantação utilizada na realização dos experimentos (setas). (Earth 2018).	31
Figura 3	– Fluxograma esquemático do procedimento de análise das massas úmida (WW) e seca(DW) para cada substrato (Nylon, PVC e Bucha).	33
Figura 4	– Projeto conceitual dos <i>Algal Traps</i> idealizados e construídos para o experimento de assentamento algal. (a) vista superior e (b) vista lateral. Imagem da autora.	34
Figura 5	– <i>Algal Traps</i> montados com diferentes malhas para teste de colonização de substratos: <i>Luffa cylindrica</i> , malha de nylon, e malha de nylon com PVC expandido, respectivamente da esquerda para a direita. Foto da autora.	35
Figura 6	– <i>Algal Traps</i> montados e instalados na lagoa da Estação de Maricultura Professor Elpídio Beltrame, na Barra da Lagoa - UFSC.	35
Figura 7	– Vistas frontal (a), superior (b), posterior (c) e lateral (d) do projeto conceitual 3D das rampas do <i>Algal Turf Scrubber</i> . Imagens da autora.	38
Figura 8	– <i>Croqui</i> do projeto das rampas do Sistema do tipo <i>Algal Turf Scrubber</i> . Imagem da autora.	39
Figura 9	– Fotos do processo e itens construídos para o ATS. Em (a), manufatura e posicionamento dos cavaletes para apoio das rampas de fibra de vidro, e em (b) a casa da bomba. Fotos da autora.	39
Figura 10	– <i>Algal Turf Scrubber</i> construído e funcionando baseado no Regime Aberto de circulação de água. Em (a), vista frontal do sistema e em (b), vista lateral. Fotos da autora.	40
Figura 11	– Ponteira para captação de água construída e utilizada para o ATS em Regime Aberto de circulação de água. Em (a) ponteira montada sem filtro e em (b), ponteira desmontada, mostrando a segunda passagem de água. Fotos da autora.	41
Figura 12	– <i>Algal Turf Scrubber</i> construído e funcionando baseado no Regime Fechado de circulação de água. Fotos de Eduardo Bastos.	41

Figura 13 – Microfotografias de luz da superfície das malhas de PVC (a), Bucha (b), e Nylon (c), utilizadas no experimento de colonização de substratos com os <i>Algal Traps</i> . Fotos da autora. Barra = 1 mm.	44
Figura 14 – Microfotografias Eletrônicas de Varredura da superfície das malhas de PVC (a) e (b), Bucha (c) e (d), e NYL (e) e (f), utilizadas no experimento de colonização de substratos com os <i>Algal Traps</i> . Fotos da autora, realizadas no LCME-UFSC.	45
Figura 15 – Variáveis descritivas da água da lagoa durante o experimento de colonização de substratos com os <i>Algal Traps</i> . Em (a), Salinidade e Temperatura (°C), em (b) Clorofila e Ficocianina <i>in vivo</i> e Clorofila extraída ($\mu\text{g/mL}$), em (c) pH e Turbidez (RFU), e em (d) Oxigênio Dissolvido (mg/L) e Saturação de Oxigênio Dissolvido (%).	47
Figura 16 – Nutrientes da água da lagoa ao longo do experimento de colonização de substratos nos <i>Algal Traps</i>	47
Figura 17 – Representação dos morfotipos definidos e contados durante processamento das amostras de sucessão do experimento de colonização de substratos com os <i>Algal Traps</i>	49
Figura 18 – Distribuição e abundância relativa de 8 morfotipos em determinados tempos sucessionais de três malhas durante o experimento de colonização de substratos com os <i>Algal Traps</i> . Malha de PVC em (a), Bucha em (b), e Nylon em (c). Experimento de 696 horas, ocorrido entre os dias 22 de Março e 20 de Abril de 2017.	50
Figura 19 – Volume Precipitado Sedimentado (SPV) e Volume Total Sedimentado (TSV) das malhas de PVC (a), Bucha (b), e Nylon (c) utilizadas no experimento de colonização de substratos com os <i>Algal Traps</i> . Experimento de 696 horas, ocorrido entre os dias 22 de Março e 20 de Abril de 2018.	51
Figura 20 – Biomassa seca em cada malha testada nos <i>Algal Traps</i> durante o experimento de colonização de substratos. Experimento de 696 horas, ocorrido entre os dias 22 de Março e 20 de Abril de 2018.	51
Figura 21 – Representação da Análise de Componentes Principais para os morfotipos e amostras de cada malha no experimento de assentamento algal com os <i>Algal Traps</i>	52
Figura 22 – Etapas da maturação do ATS, onde (a) malha crua, (b) assentamento de diatomáceas, (c) biofilme de diatomáceas, (d) biofilme de diatomáceas de cadeia, (e) diatomáceas de cadeia e filamentosas, (f) filamentosas, (g) filamentosas e foliáceas, e (h) foliáceas e filamentosas de maior relação superfície/volume. Fotos da autora.	54

Figura 23 – Fotos detalhadas das etapas da maturação descritas na Figura 22, onde (a) microscopia da comunidade na Figura 22c, (b) filamentos macroscópicos e microscopia das cadeias de diatomáceas na Figura 22d, (c) microscopia da comunidade na Figura 22f, e (d) microscopia de uma etapa avançada. Fotos da autora.	55
Figura 24 – Biomassa seca (DW) e Biomassa úmida (WW) em cada malha nos três experimentos de remoção de nutrientes no ATS.	56
Figura 25 – Nutrientes da água circulante nas rampas no primeiro experimento de remoção de nutrientes do <i>Algal Turf Scrubber</i> nas duas rampas em Regime Fechado (de 18 a 21 de Julho de 2017). (a), (c), e (e) representam as medidas da rampa com a malha de Nylon, e (b), (d), e (f) representam as variáveis da rampa com a malha de PVC.	58
Figura 26 – Variáveis descritivas da água circulante nas rampas no primeiro experimento de remoção de nutrientes do <i>Algal Turf Scrubber</i> nas duas rampas em Regime Fechado (de 18 a 21 de Julho de 2017). (a), (c), (e) e (g) representam as variáveis da rampa com a malha de Nylon, e (b), (d), (f) e (h) representam as variáveis da rampa com a malha de PVC.	59
Figura 27 – Nutrientes da água circulante nas rampas no segundo experimento de remoção de nutrientes do <i>Algal Turf Scrubber</i> nas duas rampas em Regime Fechado (de 08 a 11 de Agosto de 2017). (a), (c), e (e) representam as medidas da rampa com a malha de Nylon, e (b), (d), e (f) representam as variáveis da rampa com a malha de PVC.	60
Figura 28 – Variáveis descritivas da água circulante nas rampas no segundo experimento de remoção de nutrientes do <i>Algal Turf Scrubber</i> nas duas rampas em Regime Fechado (de 08 a 11 de Agosto de 2017). (a), (c), (e) e (g) representam as variáveis da rampa com a malha de Nylon, e (b), (d), (f) e (h) representam as variáveis da rampa com a malha de PVC.	61
Figura 29 – Nutrientes da água circulante nas rampas no terceiro experimento de remoção de nutrientes do <i>Algal Turf Scrubber</i> nas duas rampas em Regime Fechado (de 30 a 31 de Outubro de 2017). (a), (c), e (e) representam as medidas da rampa com a malha de Nylon, e (b), (d), e (f) representam as medidas da rampa com a malha de PVC.	62
Figura 30 – Variáveis descritivas da água circulante nas rampas no terceiro experimento de remoção de nutrientes do <i>Algal Turf Scrubber</i> nas duas rampas em Regime Fechado (de 30 a 31 de Outubro de 2017). (a), (c), (e) e (g) representam as variáveis da rampa com a malha de Nylon, e (b), (d), (f) e (h) representam as variáveis da rampa com a malha de PVC.	63

Figura 31 – Grupos de morfotipos definidos e relacionados à sucessão ao longo do presente trabalho. (a) diatomáceas penadas soitárias, (b) esféricas, microalgas verdes ou cianobactérias, (c) diatomáceas coloniais, (d) coloniais, microalgas verdes ou cianobactérias, (e) dinoflagelados e (f) filamentosas. Imagens da autora. 69

Figura 32 – Modelo teórico de fatores seletivos importantes que determinam a composição da comunidade algal de um ATS. As letras representam espécies ou morfotipos diferentes. Modificado de Kangas *et al.* 2017. 71

Lista de tabelas

Tabela 1	– Pontos amostrais e amostragens realizadas ao longo do experimento de assentamento algal nos <i>Algal Traps</i> , onde cada coleta realizada é representada por um quadrado preenchido.	36
Tabela 2	– Tempo de maturação, duração e vazões de cada experimento realizado no ATS.	42
Tabela 3	– Valores de massa úmida, massa seca e umidade, por centímetro quadrado de cada malha, tratados com água do mar ou água destilada.	43
Tabela 4	– Composição relativa do fitoplâncton nas amostras de rede (qualitativas) coletadas na lagoa ao longo do período do experimento de colonização de substratos com os <i>Algal Traps</i> . Experimento de 696 horas, ocorrido entre os dias 22 de Março e 20 de Abril de 2017. (-): ausente, (*): raro, (**): frequente, (***): abundante, (****): muito abundante	48
Tabela 5	– Dados comparativos de irradiância entre os três experimentos realizados no ATS, apresentados na forma de energia total recebida pelas rampas em Mega Joules (MJ) e indicação do máximo valor de irradiância registrado em micromol de fótons por metro quadrado por segundo ($\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)	57
Tabela 6	– Composição relativa das amostras dos experimentos de remoção de nutrientes, para cada malha testada. As amostras inicial e final foram idênticas, por isso não estão explícitas. (-): ausente, (*): raro, (**): frequente, (***): abundante, (****): muito abundante	57
Tabela 7	– Taxas ótimas de remoção e respectivo tempo acumulado (horas), por nutriente analisado em cada malha, nos três experimentos no ATS.	72
Tabela 8	– Valores de remoção normalizados por litro, por área e por energia, para cada nutriente analisado em cada malha, nos três experimentos no ATS.	73
Tabela 9	– Dados brutos das variáveis descritivas referentes ao experimento de colonização de substratos com os <i>Algal Traps</i>	88
Tabela 10	– Dados brutos dos nutrientes da água da lagoa durante o experimento de colonização de substratos com os <i>Algal Traps</i>	89
Tabela 11	– Lista dos códigos utilizados no procedimento de contagem e identificação de morfotipos do experimento de assentamento algal nos <i>Algal Traps</i>	90
Tabela 12	– Contagem de morfotipos com 25 categorias diferentes do <i>Algal Trap</i> com malha de PVC, onde nano $\leq 20\mu\text{ m}$; micro $\leq 200\mu\text{ m}$ e $\geq 20\mu\text{ m}$; macro $\geq 200\mu\text{ m}$	95
Tabela 13	– Contagem de morfotipos com 25 categorias diferentes do <i>Algal Trap</i> com malha de <i>Luffa cylindrica</i> (bucha), onde nano $\leq 20\mu\text{ m}$; micro $\leq 200\mu\text{ m}$ e $\geq 20\mu\text{ m}$; macro $\geq 200\mu\text{ m}$	96

Tabela 14 – Contagem de morfotipos com 25 categorias diferentes do <i>Algal Trap</i> com malha de Nylon, onde nano $\leq 20\mu$ m; micro $\leq 200\mu$ m e $\geq 20\mu$ m; macro $\geq 200\mu$ m.	97
Tabela 15 – Contagem de morfotipos com 8 categorias diferentes do <i>Algal Trap</i> com malha de PVC.	98
Tabela 16 – Contagem de morfotipos com 8 categorias diferentes do <i>Algal Trap</i> com malha de <i>Luffa cylindrica</i> (bucha).	99
Tabela 17 – Contagem de morfotipos com 8 categorias diferentes do <i>Algal Trap</i> com malha de Nylon.	100
Tabela 18 – Dados brutos das variáveis descritivas da rampa com malha de Nylon do primeiro experimento (exp1) de remoção de nutriente no <i>Algal Turf Scrubber</i> . 102	
Tabela 19 – Dados brutos das variáveis descritivas da rampa com malha de PVC do primeiro experimento (exp1) de remoção de nutriente no <i>Algal Turf Scrubber</i> . 103	
Tabela 20 – Dados brutos das variáveis descritivas da rampa com malha de Nylon do segundo experimento (exp2) de remoção de nutriente no <i>Algal Turf Scrubber</i> . 104	
Tabela 21 – Dados brutos das variáveis descritivas da rampa com malha de PVC do segundo experimento (exp2) de remoção de nutriente no <i>Algal Turf Scrubber</i> . 104	
Tabela 22 – Dados brutos das variáveis descritivas da rampa com malha de Nylon do terceiro experimento (exp3) de remoção de nutriente no <i>Algal Turf Scrubber</i> . 105	
Tabela 23 – Dados brutos das variáveis descritivas da rampa com malha de PVC do terceiro experimento (exp3) de remoção de nutriente no <i>Algal Turf Scrubber</i> . 105	
Tabela 24 – Dados brutos dos nutrientes durante o primeiro experimento do ATS (exp1). 106	
Tabela 25 – Dados brutos dos nutrientes durante o segundo experimento do ATS (exp2). 106	
Tabela 26 – Dados brutos dos nutrientes durante o terceiro experimento do ATS (exp3). . 107	
Tabela 27 – Tabela descritiva dos materiais utilizados na construção e operação do <i>Algal Turf Scrubber</i> , de acordo com o Regime de Operação.	110

Sumário

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	Eutrofização	24
1.2	Sistemas do tipo <i>Algal Turf Scrubbers</i>	25
1.3	Abordagens	27
2	OBJETIVOS	29
2.1	Objetivo Geral	29
2.2	Objetivos Específicos	29
3	METODOLOGIA	31
3.1	Localização	31
3.2	Caracterização dos substratos	32
3.2.1	Massa seca	32
3.2.2	Microscopia	33
3.3	<i>Algal Traps</i>: Projeto e construção	34
3.3.1	Projeto e construção dos aparatos	34
3.4	<i>Algal Traps</i>: Experimento de colonização de substratos	35
3.5	<i>Algal Turf Scrubber</i>: Projeto e construção	38
3.5.1	Construção do sistema	38
3.5.2	Regimes de Operação	39
3.6	<i>Algal Turf Scrubber</i>: Experimentos de remoção de nutrientes	41
4	RESULTADOS	43
4.1	Substratos	43
4.2	<i>Algal Traps</i>	46
4.3	<i>Algal Turf Scrubber</i>	53
4.3.1	Maturação das rampas	53
4.3.2	Experimentos de remoção de nutrientes	56
5	DISCUSSÃO	65
5.1	Substratos	65
5.2	<i>Algal Traps</i>	66
5.3	<i>Algal Turf Scrubber</i>	69
5.3.1	Maturação	69
5.3.2	Remoção de nutrientes	71
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	75

6.1	Conclusões	75
6.2	Trabalhos futuros	75
	REFERÊNCIAS	77
	APÊNDICES	85
	APÊNDICE A – DADOS BRUTOS DO EXPERIMENTO DE COLO- NIZAÇÃO DE SUBSTRATOS	87
	APÊNDICE B – DADOS BRUTOS DOS TRÊS EXPERIMENTOS DE REMOÇÃO DE NUTRIENTES NO <i>ALGAL TURF</i> <i>SCRUBBER</i>	101
	APÊNDICE C – TABELAS COMPLEMENTARES <i>ALGAL TURF SCRUB- BER</i>	109

1 Introdução

A disponibilidade e qualidade da água, postas em risco pelo aumento da poluição, pela industrialização e pelo desenvolvimento econômico desenfreado, tornaram-se uma grande preocupação da sociedade atual. Apesar de a gestão sustentável de recursos hídricos ser projetada amplamente em meios sociais, políticos e científicos, este valioso bem enfrenta ameaças sérias, quantitativa e qualitativamente (Abdel-Raouf, Al-Homaidan e Ibraheem 2012). No tratamento de esgoto doméstico, as tentativas de dar sustentabilidade ao processo normalmente terminam como fertilizante na agricultura. A proposta é de fato interessante, mas uma vez que foi indicada, estabeleceu-se e praticamente anulou a demanda de novos fins para este tipo de processo. Este tipo de restrição demonstra que pesquisas na área de biotecnologia ambiental, apesar de muitas, ainda não atingiram um desenvolvimento holístico (Grommen e Verstraete 2002).

A necessidade de solução para problemas ambientais como esse, bem como a de construção de uma sociedade em harmonia com o meio ambiente é evidente, e alternativas como a biorremediação, que já é bem conhecido pela academia, são cada vez mais estudadas. Trabalhos propõem tratamento de esgoto e biorremediação utilizando bactérias, fungos, ou consórcios microbianos (Wu *et al.* 2017, Harms, Schlosser e Wick 2011, Brune e Bayer 2012, Zhuang *et al.* 2007). Ao passo que muitos organismos podem ser utilizados em tratamento de águas e biorremediação, as algas são organismos potenciais para tratamento de águas (resíduo, esgoto e ambientes contaminados) devido à características da sua própria biologia: alta relação superfície/volume (para microalgas, principalmente), capacidade de detoxificação e encapsulamento, metabolismo e crescimento acelerados, e duplicação rápida (Hammed *et al.* 2016, Hoffmann 1998). Enquanto as características do metabolismo e crescimento, bem como as da duplicação levam a um processo mais acelerado de remediação (Rawat, Kumar e Bux 2011, Elser e Urabe 1999, Gupta, Pandey e Pawar 2016), a capacidade de retenção ou detoxificação de substâncias nocivas marcam o potencial biotecnológico desses organismos em processos de tratamento de águas contaminadas com metais pesados ou micropoluentes, por exemplo (Zeraatkar *et al.* 2016, Kanwar, Mishra e Mukherjee 2017).

A Engenharia Ecológica, uma das frentes que englobam pesquisas em biorremediação, cresce a cada dia. Esta linha de pesquisa e de técnicas que contribuem para a melhora ambiental, e para a convivência em harmonia da população com a natureza, tem um grande apelo do público (Mitsch 1998). Esclarecida como disciplina pela primeira vez na década de 60 por Odum 1962 e Odum *et al.* 1963, com grandes avanços desde 1989 (Mitsch 1998), a engenharia ecológica cresceu com trabalhos que utilizam mesocosmos e *wetlands* construídos para a melhora ambiental (Craggs *et al.* 1996) (Tanner 1996) (Hillman e Culley 1978), bem como na implantação de estruturas com seres vivos incorporados à edifícios e parques para a inclusão da natureza no cotidiano das pessoas (Todd e Todd 1994). O campo da engenharia ecológica para

tratamento de águas residuais se consolidou e foi conceitualizado de forma mais concreta, além de uniformizado em princípios por trabalhos como os de (Todd e Josephson 1996), ainda que trabalhos mais recentes e mais abrangentes, como os de Bergen, Bolton e Fridley 2001, Odum e Odum 2003, e Todd, Brown e Wells 2003, continuem trazendo modificações e novas propostas de padronização.

Dentro da idéia de design de sistemas vivos para remediação e tratamento de águas residuais, o uso de sistemas de engenharia para o cultivo de algas bênticas e biofilmes com alta produtividade na remoção de poluentes vêm sendo produzidos com sucesso (Travieso, Benitez e Dupeiron 1992, Christenson e Sims 2012, Adey e Hackney 1989, Adey, Kangas e Mulbry 2011, Blersch, Kangas e Mulbry 2013). Os sistemas do tipo foram avaliados como uma tecnologia potencialmente rentável para remoção de nutrientes de efluentes municipais (Craggs *et al.* 1996) e de águas costeiras (Adey, Kangas e Mulbry 2011) (Mulbry, Kangas e Kondrad 2010).

Assim, o uso da Engenharia Ecológica em consórcios de microrganismos, como proposto em *Algal Turf Scrubber* (ATS), é muito acessível à biorremediação, pois explora a diversidade e complementariedade da fisiologia da microbiota (Subashchandrabose *et al.* 2011). Além de ser uma opção ecológica para remoção de nutrientes na recuperação de áreas degradadas, este tipo de sistema pode ser usado concomitantemente para a produção de biomassa para produção de fertilizantes ou para extração de co-produtos, como óleos e nutracêuticos, o que torna a combinação destas duas abordagens potencialmente rentável (Pizarro *et al.* 2006).

1.1 Eutrofização

Os nutrientes exercem papéis centrais no crescimento e desenvolvimento, e isso é reconhecido cientificamente desde a "Lei do Mínimo de Liebig" (Liebig 1855), em que o crescimento de uma planta é limitado pelo nutriente presente no ambiente na menor quantidade relativa às demandas da planta. Dentre os muitos nutrientes necessários e preferíveis para o crescimento dos seres vivos, alguns se mantêm como os principais, como o nitrogênio e o fósforo (Felisberto e Murakami 2013). Nutrientes podem ser utilizados, inclusive, como fator para caracterização de ambientes: oligotrófico, mesotrófico, eutrófico, e hipertrófico, sendo ambientes que recebem cargas de nutrientes baixa, média, alta, e extremamente alta, respectivamente (Smith, Tilman e Nekola 1999).

A palavra eutrofia foi utilizada pela primeira vez em 1928 em Thienemann 1928, publicação alemã sem tradução conhecida, relacionando outros fatores físi-químicos da água com nutrientes e oxigênio. Enquanto eutrofia pode ser entendido simplesmente pelo estado de boa nutrição de algo ou alguém, a eutrofização é entendida como o processo em que um ambiente aquático é enriquecido por nutrientes dissolvidos, o que estimula o crescimento de seres fotossintetizantes, usualmente resultando na depleção de oxigênio dissolvido (Eutrophication

2016). Assim, sabemos que os nutrientes são necessários, e que todos organismos vivos precisam deles. Mas em quantidades muito exacerbadas, são um problema, pois passam a ser tóxicos ou geram desenvolvimento excessivo de espécies oportunistas. Exemplos disso são blooms algais, que impedem a distribuição de luz e trocas gasosas, e cada vez mais ganham proporções massivas no contexto global (Li *et al.* 2014, Glibert *et al.* 2018, Wells e Karlson 2018).

A remoção de nutrientes de águas residuais pode ser realizada com tratamentos físicos e químicos. Sistemas de tratamento de água para abastecimento utilizam largamente remoções deste tipo, mas apesar da reprodutibilidade e facilidade de gerenciamento, existem desvantagens no uso deste tipo de tratamento, quais sejam: necessitam de insumos químicos (floculantes, quelantes), geram lodo poluente, e custo. Além disso, a maior parte destes processos deve ser implementada em ambientes controlados, limitando a possibilidade de uso em ecossistemas, em processos de remediação. Assim, entre os métodos considerados para a redução da eutrofização, englobando a ideia da Engenharia Ecológica, é o cultivo controlado de organismos. Este método pode ser feito com o tratamento prévio das águas (Kesaano e Sims 2014, Hoh, Watson e Kan 2016), ou inserindo mecanismos e sistemas, como por exemplo *wetlands* flutuantes (Pavlineri, Skoulikidis e Tsihrintzis 2017) ou sistemas com biofilmes (Singh, Paul e Jain 2006), e vem ganhando espaço pela sua simplicidade e baixo custo (Gao, Endo e Agatsuma 2018).

1.2 Sistemas do tipo *Algal Turf Scrubbers*

A proposta do *Algae Turf Scrubber* (ATS) foi desenvolvida na década de 1980 por Walter Adey, a quem pertence a patente norte-americana do produto (Adey 1982). No documento, é descrito como um equipamento para produção de biomassa de algas com uso como purificador de dióxido de carbono, poluentes e nutrientes. O ATS atualmente pode ser descrito como um sistema de tratamento de água para retirada de nutrientes inorgânicos e produção de biomassa de algas utilizando a engenharia ecológica (Adey, Luckett e Jensen 1993, Adey, Kangas e Mulbry 2011, Mulbry, Kangas e Kondrad 2010). Aplicado inicialmente para gerenciar nutrientes, oxigênio, e sistemas de carbonato em modelos de micro e mesocosmos de ecossistemas aquáticos (Adey e Loveland 2011), o ATS foi utilizado na década de 90 como uma unidade terciária de águas residuais em Patterson, Califórnia (Craggs *et al.* 1996, Craggs 2001), mostrando seu potencial.

Os elementos essenciais de um sistema ATS são 1) uma tela para o crescimento algal; 2) movimento da água; e 3) luz (Adey e Loveland 2011). Algumas destas exigências são comuns às de sistemas de tratamento que utilizam algas, maximizando a produção autotrófica (Goldman 1979), e cumprindo requisitos básicos de cultivo massivo de algas (Huntley, Nonomura e Noue 1989, Richmond 1992, cap 8). A remoção de nutrientes acontece através da absorção biológica e contenção destes nutrientes pelo crescimento da biomassa (Ray, Terlizzi e Kangas 2015). Como a biomassa algal cresce muito rapidamente por conta da disponibilidade de nutrientes,

a retirada numa frequência adequada se torna fator essencial no controle de operação de um ATS, bem como em qualquer sistema que utilize algas para tratamento de esgoto (Hoffmann 1998). Esta biomassa pode ainda, ser aproveitada em outros processos, como o uso como fertilizantes (Mulbry, Kondrad e Pizarro 2006).

Muitos trabalhos focados em tratamento de dejetos e efluentes da agropecuária foram realizados com sucesso (Mulbry *et al.* 2005, Mulbry e Wilkie 2001, Kebede-Westhead, Pizarro e Mulbry 2006), e o escalonamento de sistema do tipo ATS foram feitos na Chesapeake Bay (MD, USA) (Mulbry, Kangas e Kondrad 2010), e em escala comercial pela Hydromentia® (Adey *et al.* 2013). Isto demonstra a viabilidade e versatilidade do ATS para tratamento de águas e remediação de sistemas, seja para grandes volumes, ou para pequenos corpos d'água.

A literatura para colonização de substratos pelo perifíton e por diatomáceas é extensa, porém limitada a certas condições. Enquanto a maior parte dos estudos sobre colonização por diatomáceas e sua relação com fatores ambientais é largamente estudada (Berthon, Bouchez e Rimet 2011), estes se restringem principalmente a riachos, onde a água é corrente, e doce. E mesmo nessas condições, não existe concordância factual com a relação da composição de algas e fatores como nutrientes, por exemplo (Gottschalk e Kahlert 2012, Viktoria *et al.*), o que demonstra a complexidade do processo e também a dificuldade da comunidade acadêmica em normatizar este tipo de estudo.

Algumas tentativas de modelagem do processo de adesão e colonização por algas e bactérias foram realizadas (Ozkan e Berberoglu 2013, Ozkan e Berberoglu 2013), mas o processo é dependente de fatores muito complexos, desde as espécies envolvidas, até mudanças dinâmicas da composição química do meio, como demonstrado em outros trabalhos com comunidades diferentes (Arampatzi, Giannoglou e Diza 2011, Berner, Heimann e Sheehan 2015, Monroe 2007, Mieszkina, Callow e Callow 2013, Choudhary *et al.* 2017, Muffler *et al.* 2014), e não poderá ser explicada na sua totalidade com apenas um estudo.

Mas aos poucos, a comunidade científica adiciona informações sobre o tema. Trabalhos vêm incrementando o conhecimento sobre topografias (Blerch *et al.* 2017, Blerch, Kangas e Mulbry 2013, Huang *et al.* 2018), e a dinâmica química entre bactérias, algas e substratos ganharam interesse (Ozkan e Berberoglu 2013, Flemming e Wingender 2010, Arampatzi, Giannoglou e Diza 2011), mas ainda não vislumbramos a relação entre as algas do ambiente *versus* as algas que crescem nos substratos, e quais e porquê são fundadoras de todo o processo de sucessão sobre o substrato, dando origem à comunidade de *turf*, por exemplo.

A formação de um biofilme de microalgas se baseia no contato das microalgas à uma superfície, independentemente de se já colonizada por outros organismos (Berner, Heimann e Sheehan 2015, Pippo *et al.* 2009). Para diatomáceas, a adesão inicial é descrita como um processo quimiotático, onde a interação inicial da superfície com a célula pode ser um fator determinante para a formação posterior do biofilme (Figura 1a) (Wetherbee *et al.* 1998, Leuret, Thabard e Hellio 2009). Após este primeiro contato, os rastros deixados pelas microalgas (Figura

1b) e outros polissacarídeos excretados por bactérias formam uma matriz amorfa, que dá suporte a outras espécies e captura matéria orgânica e outros compostos da coluna d'água (Figura 1c) (Lebret, Thabard e Hellio 2009).

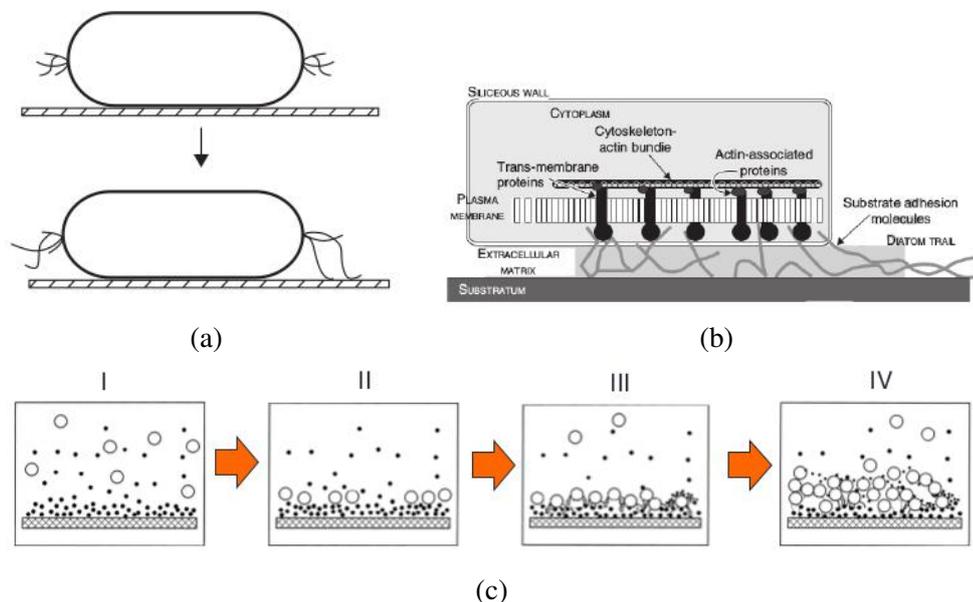


Figura 1 – Processo inicial de formação de um biofilme, onde (a) esquemático de uma diatômica assentando na superfície e em seguida, interagindo com esta, (b) representação da produção do rastro, e (c) esquemático do processo como um todo. Imagens modificadas de Lebret, Thabard e Hellio 2009, Ozkan e Berberoglu 2013, Wetherbee *et al.* 1998.

1.3 Abordagens

Para o desenvolvimento deste trabalho, nos dedicamos à duas abordagens, já que mesmo com toda a informação que existe na literatura sobre sistemas do tipo ATS, ou sistemas que utilizam substratos para o crescimento de macro e microalgas, ainda sobram lacunas sobre a dinâmica de assentamento de algas, sua relação com as topografias de substratos, e sobre se um clima tropical influencia a velocidade desse assentamento. No contexto da dissertação é importante esclarecer o momento em que essa etapa do trabalho se encaixa.

Como poderá ser visto nas próximas seções, o protótipo do sistema do tipo ATS tem alguns gargalos, e devido a outras dificuldades burocráticas e técnicas, demandou muito tempo para ser construído. Concomitantemente à construção do ATS, idealizamos e realizamos mais uma etapa do trabalho, com estruturas que escolhemos denominar de *Algal Traps*. O principal objetivo destes aparatos foi tentar entender, de forma exploratória, a dinâmica da comunidade planctônica da lagoa estudada, a relação desta comunidade com as espécies que cresceriam nos diferentes substratos, e como o assentamento se dá em cada substrato, sobre a velocidade e tipos de algas que habitam. Além de explorar este tipo de questionamento, esta etapa permitiu

uma familiarização no estudo da comunidade de algas do local. Com este conjunto de dados, buscou-se também, remontar a idéia do uso de classificação em morfotipos, utilizados por Kruk *et al.* 2010, Kruk e Segura 2012.

A segunda abordagem utilizada neste trabalho foi a construção e operação de um sistema do tipo ATS, a fim de testar sistemas deste tipo para um ambiente tropical, em uma lagoa salobra. O sistema foi projetado, construído e testado neste trabalho, gerando um protótipo que será utilizado também em pesquisas posteriores. O projeto foi baseado em trabalhos anteriores sobre sistemas do tipo ATS (Mulbry, Kangas e Kondrad 2010, Adey *et al.* 2013, D’Aiuto *et al.* 2015, Kangas e Mulbry 2014, Kangas *et al.* 2017, Pizarro, Kebede-Westhead e Mulbry 2002, Valeta e Verdegem 2015, Ray, Terlizzi e Kangas 2015), e adequado à disponibilidade de materiais do mercado local.

2 Objetivos

2.1 Objetivo Geral

Construir e avaliar a operação de um *Algal Turf Scrubber* em escala piloto com a finalidade de remoção de nutrientes de uma lagoa salobra de decantação de efluentes de maricultura.

2.2 Objetivos Específicos

Considerando o desenvolvimento do trabalho e o objetivo geral apresentado, destacam-se os seguintes objetivos específicos.

- Verificar a velocidade e caracterizar o assentamento de algas em diferentes topografias de substratos, analisando a sucessão através de morfotipos algais nos diferentes substratos testados.
- Implantar um protótipo funcional para remoção biológica de nutrientes baseado em sistemas do tipo *Algal Turf Scrubber* (ATS).
- Avaliar a eficiência do sistema para a remoção de nutrientes de uma lagoa salobra.

3 Metodologia

3.1 Localização

O trabalho foi desenvolvido dentro de uma propriedade da Universidade Federal de Santa Catarina, a Estação de Maricultura Professor Elpídio Bletrame, localizada no bairro Barra da Lagoa, em Florianópolis-SC (Figura 2b). O espaço é compartilhado pelos laboratórios de Peixes Marinhos (LAPMAR), de Moluscos Marinhos (LMM), de Camarões Marinhos (LCM), de Cultivo de Algas (LCA), de Oceanografia Costeira (LOC), de Peixes Ornamentais Marinhos (LAPOM), e a Seção de Macroalgas. Alguns deste laboratórios possuem plantas externas para seus experimentos, e por isso esta área da UFSC conta com grandes seções de área livre entre os prédios.



Figura 2 – Localização da área utilizada, onde (a) Ilha de Florianópolis, (b) Estação de Maricultura Professor Elpídio Beltrame, da UFSC, e (c) local de construção das rampas e da lagoa salobra de decantação utilizada na realização dos experimentos (setas). (Earth 2018).

A lagoa salobra de decantação dos efluentes dos laboratórios de maricultura (Figura 2c), que compartilha as flutuações da Lagoa da Conceição, é obviamente influenciada pelas trocas de águas dos tanques dos laboratórios adjacentes, tem uma área de aproximadamente 2.500 m^2 e um volume total aproximado de 2.000 m^3 (Earth 2018). Após aproximações e reuniões com professores dos laboratórios, contamos com a ajuda do grupo do LAPMAR para utilizarmos uma área de grama próxima à lagoa salobra. Além da área, acertamos o compartilhamento de fornecimento de energia, e utilização de algumas estruturas físicas do laboratório (principalmente

para suporte logístico, além de uma torneira de água doce e local para armazenamento de material).

Como a área que nos foi concedida ficava afastada dos outros prédios, foi feita uma ligação à central de energia do prédio mais próximo (m1/LAPMAR). Os cabos de energia foram enterrados e foi criada uma estação com duas tomadas e um disjuntor independente, facilitando a utilização das bombas e outros equipamentos.

3.2 Caracterização dos substratos

Os substratos utilizados neste trabalho foram três:

- **NYL:** rede de fios de nylon, de forma quadriculada, com abertura de até 2 mm, em média 1 mm, adquirida em estabelecimentos agropecuários, como "rede de mosquiteiro".
- **PVC:** policloreto de vinila expandido sobre malha trançada quadriculada de nylon, com aberturas de até 3 mm, em média 2 mm, e espessura média de 1,4 mm, adquirido em lojas de tecido, como tapetes antiderrapantes.
- **BUC:** Frutos secos de *Luffa cylindrica*, da variedade "bucha de metro", não tratados, abertos e costurados em forma de malha, de forma que a superfície externa dos frutos fosse a superfície superior.

Todos os três substratos foram avaliados e comparados nas análises de colonização algal com os *Algal Traps*, enquanto apenas os substratos NYL e PVC foram avaliados durante os testes de remoção de nutrientes no *Algal Turf Scrubber*. Os experimentos estão descritos nos itens 3.3 e 3.5.

3.2.1 Massa seca

As malhas escolhidas são muito diferentes, tanto por área quanto por superfície, e assim todos os substratos foram pesados sistematicamente para massa úmida (WW) e massa seca (DW). Este procedimento foi realizado para conhecer a massa intrínseca de cada substrato, por área. Cada malha foi amostrada em quadrados de 1, 2, 3, 4, 5 e 6 cm de lado com tréplicas, e colocadas em dois "tratamentos": 1) banho de água destilada e 2) banho de água do mar salinidade 30. As tréplicas das amostras foram mantidas nos banhos por 24h e pesadas úmidas, retirando o excesso de água com toques leves de papel absorvente, ou "*gently blotting*" como descrito em (Ross *et al.* 2017). As amostras da água salgada foram lavadas 3 vezes com solução de Formiato de Amônia (NH_4HCO_2) a 0,5 M para que o sal superficial fosse retirado. As amostras foram, então, secas em estufa a 60°C até um peso constante, e pesadas novamente (Figura3).

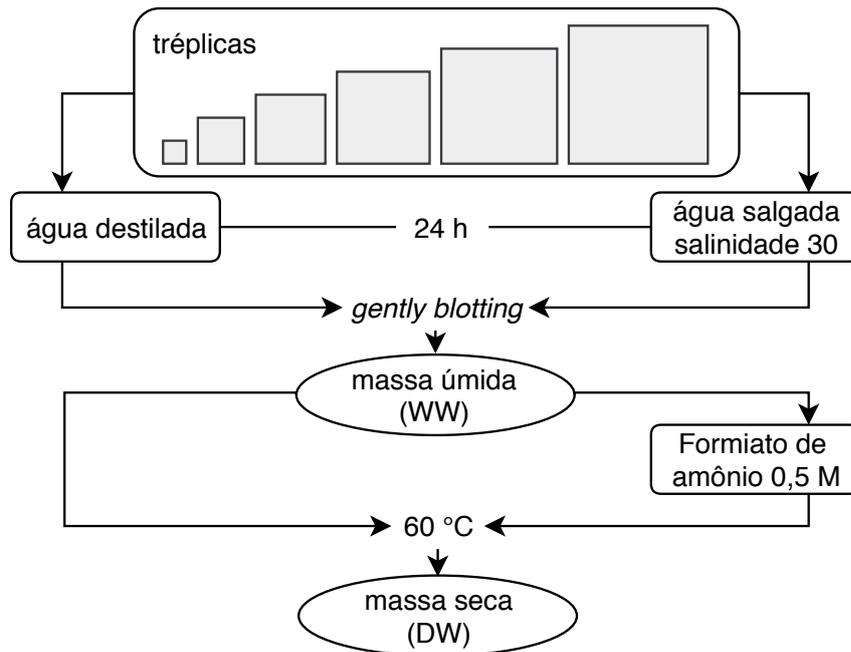


Figura 3 – Fluxograma esquemático do procedimento de análise das massas úmida (WW) e seca (DW) para cada substrato (Nylon, PVC e Bucha).

A partir dos dados obtidos para as massas seca e úmida de cada quadrado, foram calculados a média e os desvios (DP) das trélicas. Uma vez verificados os baixos valores de DP, os valores foram normalizados por área, para cada malha. A partir dos valores médios de WW e DW, foram calculados os valores de retenção de umidade, descritos em porcentagem de massa úmida (%).

3.2.2 Microscopia

A partir da idéia de que as malhas com maior superfície teriam melhor adesão e um desenvolvimento diferenciado da comunidade, avaliamos as malhas microscopicamente. Os substratos foram analisados secos, sob lupa (Olympus BX41) e microscopia de luz (Olympus BX43), íntegras e também em corte.

Além das análises de microscopia de luz, realizamos também análises em Microscopia Eletrônica de Varredura, para que entendêssemos melhor a construção espacial de cada substrato. Para esta avaliação, foram recortadas amostras quadradas dos substratos, cada uma com cerca de 0,5 cm de lado. As amostras foram secas em estufa a 60°C até peso constante e coladas em *stubs* com fita de carbono. As amostras foram mantidas em dessecador até a cobertura em ouro para análise em MEV no Laboratório Central de Microscopia Eletrônica (LCME - UFSC). A análise foi realizada com o apoio do corpo técnico do LCME, onde buscamos imagens representativas da amostra como um todo, bem como das áreas de corte, para assim demonstrar as características internas de cada material.

3.3 *Algal Traps*: Projeto e construção

3.3.1 Projeto e construção dos aparatos

O projeto do aparato que denominamos como "*Algal Trap*" está representado na Figura 4, e os substratos, descritos no item anterior foram utilizados em forma de malha, e podem vistos montados nos aparatos na Figura 5.

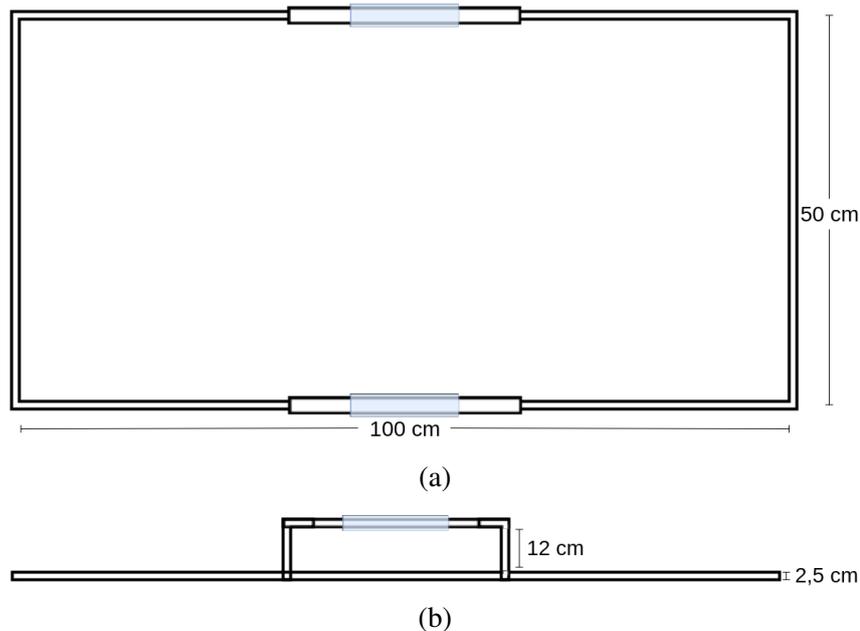


Figura 4 – Projeto conceitual dos *Algal Traps* idealizados e construídos para o experimento de assentamento algal. (a) vista superior e (b) vista lateral. Imagem da autora.

As margens dos *Algal Traps*, onde foram fixadas as malhas de substratos, foram fabricadas utilizando canos de pvc de 25 mm e conexões de canos disponíveis no mercado regular. Os retângulos principais de 0,5 m² foram furados para que os aparatos afundassem, e as alças, com bóias (em azul, na Figura 4), foram mantidas íntegras, favorecendo a flutuação. Pela estrutura, os *Algal Traps* mantinham a malha de substrato a 10 cm da superfície da água, sempre submersas, mas suscetíveis a movimentos dos ventos e expostas à luz do sol (Figura 6).



Figura 5 – *Algal Traps* montados com diferentes malhas para teste de colonização de substratos: *Luffa cylindrica*, malha de nylon, e malha de nylon com PVC expandido, respectivamente da esquerda para a direita. Foto da autora.



Figura 6 – *Algal Traps* montados e instalados na lagoa da Estação de Maricultura Professor Elpídio Beltrame, na Barra da Lagoa - UFSC.

3.4 *Algal Traps*: Experimento de colonização de substratos

O experimento de colonização de substratos foi realizado entre os dias 22 de Março e 20 de Abril de 2018, totalizando 696 horas. Os *Algal Traps* foram montados e colocados no lago e para evitar que estes flutuassem para longe demais da borda do lago, foram presos à cordas e

estas, à poitas. As poitas foram colocadas a cerca de 2 metros da borda do lago, com cordas de cerca de 3 metros de comprimento, e dentro dessa limitação, os aparatos ficaram à deriva.

Durante as amostragens, foram coletados parâmetros descritivos da água da lagoa, incluindo nutrientes e amostras qualitativas de rede do fitoplâncton, além das amostragens para as análises de composição da comunidade nas malhas e de peso seco. Todas as coletas foram feitas de acordo com a tabela 1, sempre no período da manhã, antes das 11 h.

Tabela 1 – Pontos amostrais e amostragens realizadas ao longo do experimento de assentamento algal nos *Algal Traps*, onde cada coleta realizada é representada por um quadrado preenchido.

Pontos amostrais	Variáveis descritivas	Nutrientes	Comunidade malha	Comunidade fitoplanctônica
0 h	■	■		
24 h	■		■	
48 h	■	■	■	■
72 h			■	
96 h			■	
120 h	■	■	■	■
168 h	■	■	■	
216 h	■	■	■	
264 h		■	■	
312 h	■		■	■
384 h	■			
480 h	■	■	■	■
528 h	■	■		
552 h			■	■
648 h	■			
696 h	■	■	■	■

Análises da água da lagoa

A cada coleta de água da lagoa, foram analisadas as variáveis descritivas: salinidade (refratômetro RSM Digilab), oxigênio dissolvido e saturação de oxigênio dissolvido (oxímetro MO-900 Instrutherm), pH (pHmetro de bancada Thermo Scientific Orion Star A211), turbidez (turbidímetro Plus II AlfaKit), condutividade (condutivímetro Nova Instruments NI CVP), temperatura (oxímetro MO-900 Instrutherm), clorofila a e ficocianina *in vivo* (fluorímetro de mão Hand Turner).

Amostras integrais da água foram coletadas e filtradas em filtro de fibra de vidro de 1.6 μ m, armazenadas em frascos estéreis e mantidas congeladas entre -4°C e -16°C. As análises de nutrientes foram conduzidas nos laboratórios do Núcleo de Estudos do Mar (NEMAR - UFSC), seguindo metodologia de (Grashoff, Kremling e Ehrhardt 1999). Os nutrientes analisados foram: ortofosfatos ($P - PO_4$), nitrito ($N - NO_2$) e nitrogênio amoniacal ($N - NH_4$). Os filtros foram congelados e armazenados entre -4°C e -16°C para posterior análise de clorofila extraída em

Acetona 90% e leitura em espectrômetro de bancada Trilogy Turner com o módulo Blue para clorofila.

Para as amostras qualitativas, foi utilizada rede de fitoplâncton com malha 20 μm . A cada coleta, a rede foi jogada da borda da lagoa, puxada, e retirada da água vagarosamente, para que o sedimento não fosse revolvido. A rede foi passada até concentração da amostra, e esta, colocada em frasco limpo e fixada com formol concentração final 0,4%. A amostra foi analisada para distribuição relativa, e quando necessário, literatura específica foi utilizada.

Coleta e processamento das amostras da malha

A cada coleta, foram amostrados 3 quadrados em cada *Algal Trap*, com 3 cm de lado. Cada quadrado foi dividido ao meio, gerando duas amostras de 3 x 1,5 cm. Uma das amostras foi encaminhada ao processamento para análise da comunidade, e a segunda amostra, ao processamento para análise da massa seca.

Análise da comunidade

O processamento para análise da comunidade consistiu em colocar as amostras em frascos limpos e estéreis com 15 mL de água do mar salinidade 30, e fixá-las com formol concentração final 0,4%. As amostras foram colocadas para sedimentação por 48 h, em ambiente protegido da luz e com temperatura controlada. O volume do material sedimentado foi calculado (volume precipitado sedimentado, SPV), representando o volume de algas depositadas na malha, mas não fixadas. Em seguida, as malhas foram raspadas com o auxílio de espátula, pinça e a água da própria amostra. Os 15 mL de amostra foram então, colocados para sedimentar por 48 h novamente, e o volume do material sedimentado foi calculado novamente (volume total sedimentado, TSV), representando o volume total de algas na malha, independente se apenas aderida ou de fato fixadas.

As amostras foram então analisadas sob microscopia de luz (Olympus BX43), quantitativa de morfotipos. A contagem de morfotipos foi realizada em câmara de *Sedgewick-Rafter* (Le-Gresley e McDermott 2010) com aumento de até 200 vezes, e quando necessária, a identificação de espécies foi feita com o auxílio de literatura específica. Os morfotipos foram definidos ao longo da análise, através de desenhos de morfologias gerais e medidas dos espécimes encontrados. Esta metodologia de definição de morfotipos teve um caráter exploratório e caucional.

Avaliação da massa seca

Todas amostras foram lavadas 3 vezes com solução de Formiato de Amônia (NH_4HCO_2) a 0,5 M para que o sal presente não interferisse na pesagem das amostras. Após o tratamento com Formiato de Amônia, as amostras foram pesadas (WW) e secas em estufa a 60°C até um

peso constante, e pesadas novamente (DW). A porcentagem de umidade foi calculada a partir destes valores, descontado o peso da malha.

3.5 *Algal Turf Scrubber*: Projeto e construção

O projeto conceitual do sistema *Algal Turf Scrubber* está representado na Figura 7.

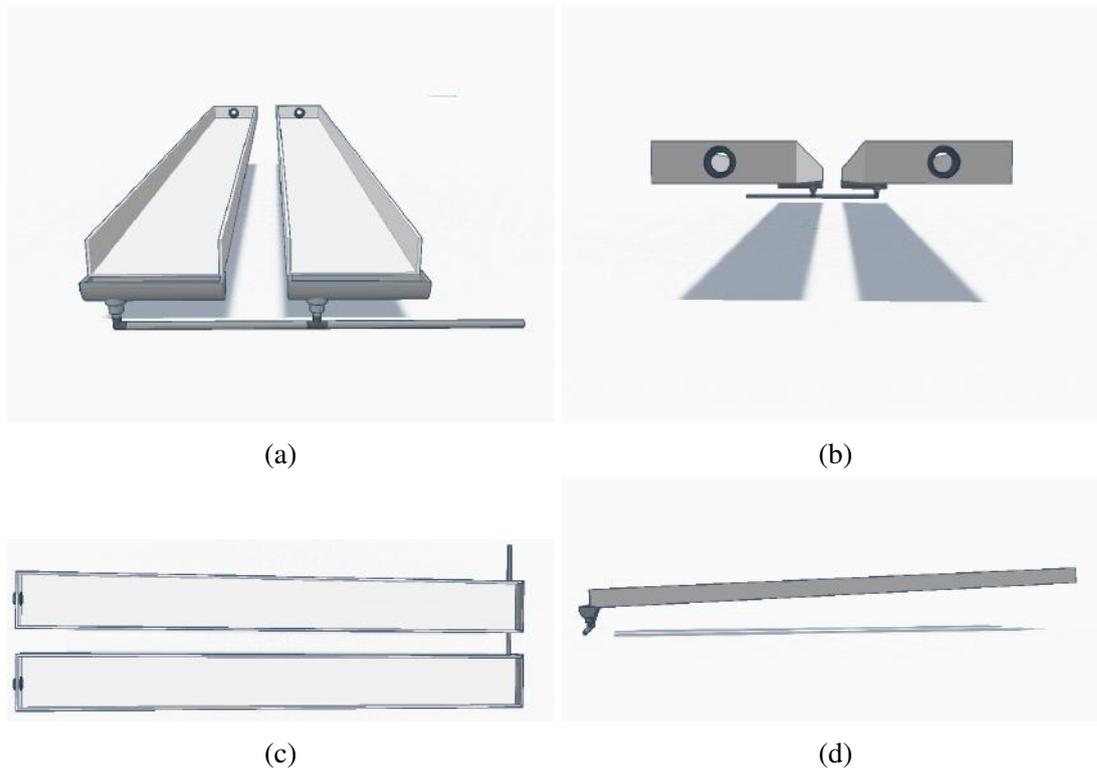


Figura 7 – Vistas frontal (a), superior (b), posterior (c) e lateral (d) do projeto conceitual 3D das rampas do *Algal Turf Scrubber*. Imagens da autora.

3.5.1 Construção do sistema

A rampa foi manufaturada em fibra de vidro pela empresa iGui[®], através do *iGui Ecologia*, um programa da empresa voltado ao apoio à iniciativas de pesquisa e solução ambientais. O *croqui* (Figura 8) do projeto foi enviado para a empresa, junto com dados e medidas, e as duas rampas foram enviadas à UFSC.

Os cavaletes de apoio das rampas foram construídos com caibros de pinus autoclavado, além de ripas de pinus para firmeza da estrutura e apoio da rampa. Os cavaletes foram colocados em buracos no chão, estes preenchidos por brita, para estabilização da base (Figura 9a). No *head end* das rampas foi construída uma estrutura de proteção (casa da bomba) para armazenamento das bombas de circulação de água, contra chuva e curiosos. A casa da bomba (Figura 9b), que tem 1 m de laterais e 1,20 m de altura, foi construída com caibros de pinus autoclavado, com as laterais de haletas de pinus inclinadas, para favorecer a circulação de ar. As telhas de

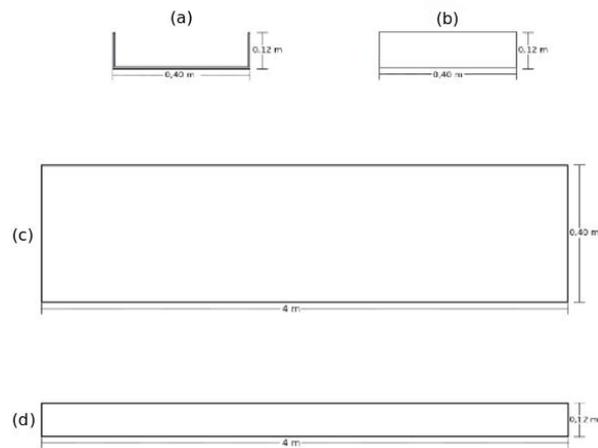


Figura 8 – *Croqui* do projeto das rampas do Sistema do tipo *Algal Turf Scrubber*. Imagem da autora.

fibrocimento foram apoiadas e pregados em vigas de pinus, para reforçar a tensão horizontal e não comprometer a estrutura.



Figura 9 – Fotos do processo e itens construídos para o ATS. Em (a), manufatura e posicionamento dos cavaletes para apoio das rampas de fibra de vidro, e em (b) a casa da bomba. Fotos da autora.

3.5.2 Regimes de Operação

A estrutura do sistema do tipo ATS construído para o presente trabalho foi pensada para contemplar dois regimes de operação, versatilizando o sistema para pesquisas exploratórias, uma vez que o sistema será utilizado em trabalhos futuros. Os conceitos de "aberto" e "fechado" ao longo deste texto não possuem o mesmo significado do que na área de biotecnologia de processos, ou de engenharia civil, onde o regime "fechado" significaria um sistema hermético, sem influências do meio externo. Neste sentido, os termos aqui farão jus ao estado de circulação da água, ou seja, no Regime Aberto a água circulante no sistema é compartilhada com o meio (a lagoa salobra de decantação), e no Regime Fechado, o sistema funciona baseado a um regime de

bateladas, onde inicialmente o sistema é alimentado com uma quantidade conhecida de água, e a circulação se mantém apenas com essa massa de água.

Os materiais utilizados em cada componente, para cada regime do sistema constam na Tabela 27, nos apêndices.

Sistema Aberto

Neste regime de operação (Figura 10), as tubulações de saída do sistema de bombas retifica para apenas uma bomba periférica de 1 hp (ICS-100AB Eletroplás®). A entrada de água da bomba vem de uma ponteira, e a saída superior de água bifurca-se para as duas rampas. O fluxo de água entre as duas rampas foi corrigido através de registros de pressão, para possibilitar o pareamento de fluxo.



Figura 10 – *Algal Turf Scrubber* construído e funcionando baseado no Regime Aberto de circulação de água. Em (a), vista frontal do sistema e em (b), vista lateral. Fotos da autora.

A ponteira utilizada (Figura 11) para a captação da água foi colocada dentro da lagoa de água salobra, a cerca de 6 metros da borda. A ponteira foi construída com tubos de 25 e 100 mm de diâmetro furados (estrutura visível na Figura 11b), de forma a possibilitar a colocação de malhas de nylon como filtros, um mais interno e outro mais externo. Os filtros foram utilizados para aumentar a vida útil da bomba periférica utilizada, que não é recomendada para uso em águas sujas, ou com material em suspensão.

No *tail end* das rampas, a água era coletada com o auxílio de bocais de calhas, e direcionadas para um mesmo cano, que devolvia a água diretamente à lagoa, que podem ser vistos na Figura 10a.

Sistema Fechado

Neste regime de operação (Figura 12), eram utilizadas duas bombas de 1/2 hp, uma para cada rampa. Pode-se dizer, então, que no Regime Fechado de operação, o sistema era



Figura 11 – Ponteira para captação de água construída e utilizada para o ATS em Regime Aberto de circulação de água. Em (a) ponteira montada sem filtro e em (b), ponteira desmontada, mostrando a segunda passagem de água. Fotos da autora.

divido em dois sistemas distintos. Dentre os experimentos realizados no ATS, não houve algum que utilizasse apenas uma rampa, então para fins práticos, a partir daqui sempre que se referir a "Regime Fechado" ou "Sistema Fechado", o trabalho se refere às duas rampas, operando separadamente, ainda que concomitantemente, a menos que seja afirmado outra situação.



Figura 12 – *Algal Turf Scrubber* construído e funcionando baseado no Regime Fechado de circulação de água. Fotos de Eduardo Bastos.

No Regime fechado, a água coletada no *tail end* da rampa era conduzida através de um sifão até uma caixa d'água de 100 litros, e desta, através de um cano instalado próximo ao fundo, a água era recirculada pela rampa através da bomba, instalada no *head end* da rampa.

3.6 *Algal Turf Scrubber: Experimentos de remoção de nutrientes*

Os substratos escolhidos para os experimentos de remoção de nutrientes foram o PVC e o Nylon, testados sempre concomitantemente, a cada experimento, um em cada rampa. Estes experimentos de remoção foram conduzidos após um tempo de maturação do sistema (Regime

Aberto), e as duas rampas foram mantidas sob a mesma vazão durante um mesmo experimento (Regime Fechado), valores de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 – Tempo de maturação, duração e vazões de cada experimento realizado no ATS.

Experimento	Início (data e hora)	Fim (data e hora)	Vazão (L.s ⁻¹)	Vazão (L.min ⁻¹)	Tempo de maturação (dias)
exp1	18-Jul-2017 12:55 h	20-Jul-2017 15:15 h	0,330	19,98	17
exp2	08-Ago-2017 11:15 h	10-Ago-2017 09:30 h	0,389	23,34	14
exp3	30-Out-2017 11:25 h	31-Out-2017 17:40 h	0,243	14,58	19

Análises da água

A amostragem e análise de água para este experimento seguiram a metodologia descrita no item 3.4. Neste experimento, a água analisada foi coletada diretamente da caixa d'água ao fim da rampa, e além de todas as variáveis já detalhadas, foi utilizado um HOBBO *data logger* (Onset Computer Corporation) para série temporal de irradiância. O HOBBO foi colocado no centróide da rampa, dentro da água, e aferia a luminosidade a cada 15 minutos.

Coleta e processamento das amostras da malha

As coletas e processamento das amostras da malha para este experimento seguiram a metodologia descrita no item e subitens de 3.4

4 Resultados

4.1 Substratos

Os dados de massa média por área das malhas estão apresentados na Tabela 3, para ambos tratamentos. As médias e desvio padrão foram calculados considerando os quadrados de todos os tamanhos (1, 2, 3, 4, 5 e 6 cm de lado), visto que as médias e desvios não diferiram entre os diferentes tamanhos de quadrado, quando normalizadas as massas em relação à área. Curiosamente, mesmo com o tratamento com Formiato de amônio, as amostras que permaneceram na água salgada tiveram uma massa seca levemente maior do que aquelas do banho de água destilada. Estes dados foram utilizados como referência para as avaliações de crescimento de biomassa algal nas malhas nos diferentes experimentos com as rampas, e com os *Algal Traps*, foram importantes já que o peso da biomassa é calculado mais precisamente sobre a malha, já que o processo de colheita ainda não foi bem estabelecido, e para evitar diferenças da colheita entre as malhas, a normatização da pesagem foi importante.

As características físicas e estruturais superficiais das malhas podem ser visualizadas nas imagens em microscopia de luz (Figura 13) e de Microscopia Eletrônica de Varredura (Figura 14). Pelas imagens, percebem-se diferenças entre as malhas, onde a malha de PVC mostra rugosidades e bolhas internas, a Bucha mostra estrutura emaranhada em 3 dimensões, com microporosidades relacionadas ao material celulósico, e o Nylon, uma estrutura bidimensional e bem lisa.

Tabela 3 – Valores de massa úmida, massa seca e umidade, por centímetro quadrado de cada malha, tratados com água do mar ou água destilada.

Substrato		WW (g.cm ⁻²)	Desvio Padrão	DW (g.cm ⁻²)	Desvio Padrão	Umidade (g.cm ⁻²)
PVC	água do mar	0,0350	0,0014	0,0200	0,0006	0,0150
	água destilada	0,0354	0,0017	0,0196	0,0003	0,0158
Bucha	água do mar	0,1810	0,0024	0,0830	0,0001	0,0980
	água destilada	0,1754	0,0037	0,0762	0,0013	0,0992
Nylon	água do mar	0,0105	0,0012	0,0080	0,0005	0,0025
	água destilada	0,0097	0,0018	0,0079	0,0005	0,0018

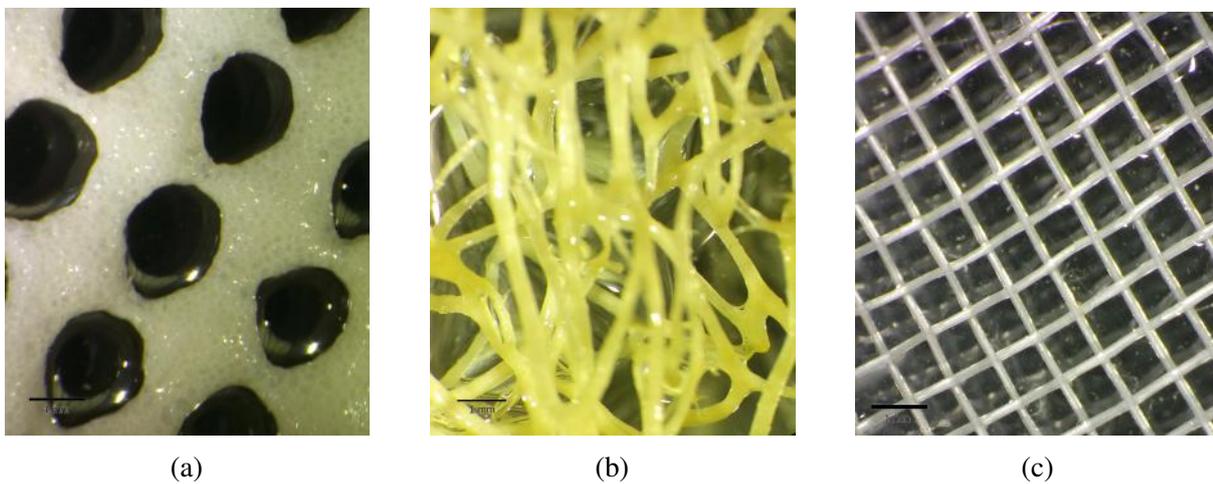


Figura 13 – Microfotografias de luz da superfície das malhas de PVC (a), Bucha (b), e Nylon (c), utilizadas no experimento de colonização de substratos com os *Algal Traps*. Fotos da autora. Barra = 1 mm.

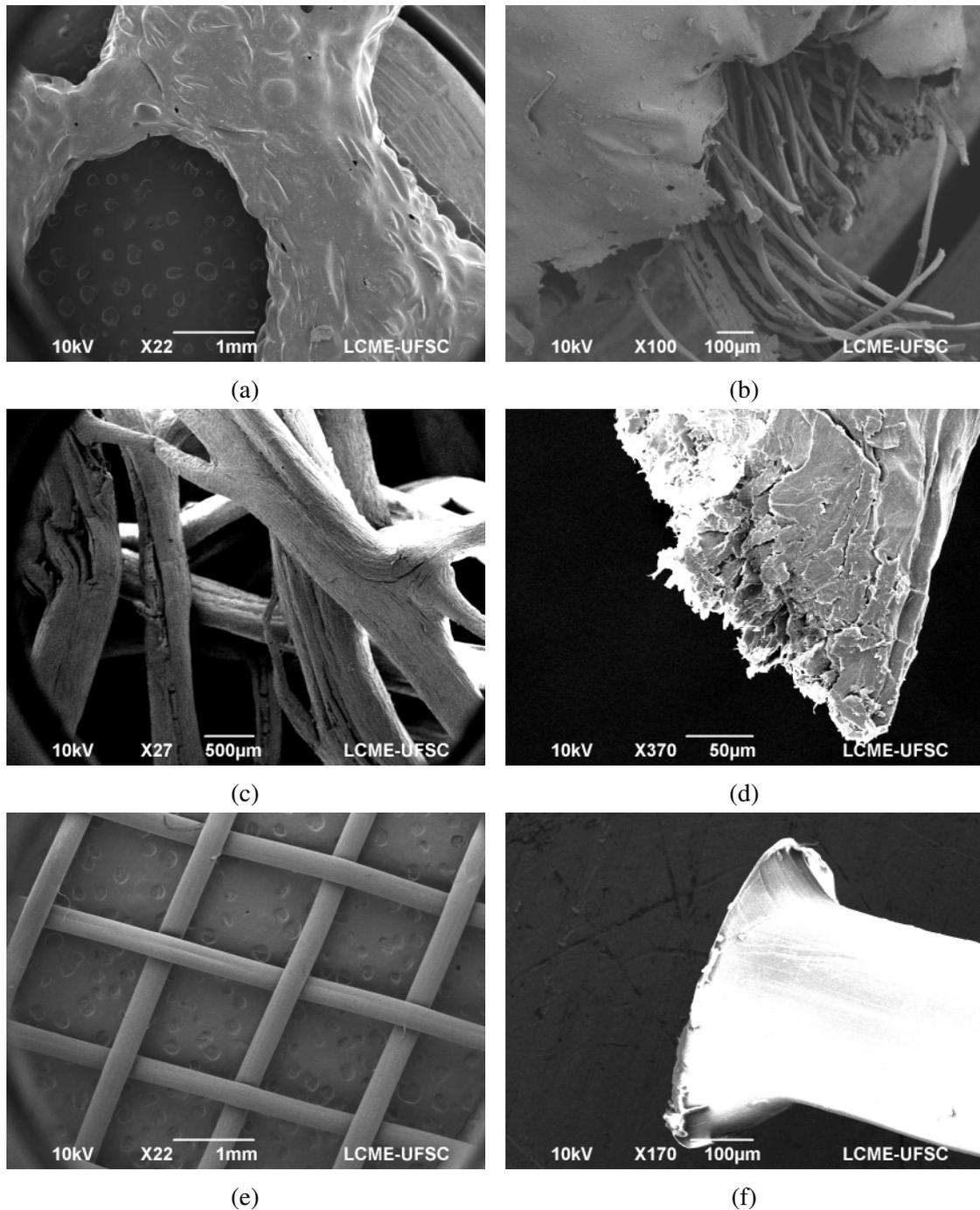


Figura 14 – Microfotografias Eletrônicas de Varredura da superfície das malhas de PVC (a) e (b), Bucha (c) e (d), e NYL (e) e (f), utilizadas no experimento de colonização de substratos com os *Algal Traps*. Fotos da autora, relizadas no LCME-UFSC.

4.2 *Algal Traps*

As variáveis descritivas da água da lagoa coletada ao longo do experimento de colonização de substratos com os *Algal Traps* estão representadas na Figura 15, e os nutrientes, na Figura 16. Percebem-se consideráveis oscilações na salinidade e temperatura (Figura 15a), relacionadas às entradas de água marinha oriunda dos laboratórios, bem como de entradas de água doce eventualmente oriundas de chuvas ou interação com aquíferos sub-superficiais. Essas oscilações são ressaltadas devido ao baixo volume da lagoa. A biomassa algal, representada pelos pigmentos fotossintéticos (Figura 15b), também mostrou oscilações, porém sem padrão claro de relação com temperatura e salinidade. Alguns picos de pigmentos foram diretamente relacionados a picos de salinidade e temperatura, porém outros inversamente. O pH mostrou pouca oscilação, provavelmente relacionada à salinidade relativamente alta, que promove tamponamento (Figura 15c). A turbidez em geral foi baixa, refletindo a baixa turbulência da lagoa e baixa pluviosidade na área no período avaliado (Figura 15c). O pico de turbidez perceptível em 384 horas foi relacionado a um evento de chuva. Já em relação aos dados de oxigênio dissolvido (Figura 15d), merece destaque o pico em 528 horas, relacionado ao crescimento súbito e/ou concentração de fitoplâncton no ponto de coleta, também visível no pico de clorofila-a extraída (Figura 15b), representados por dinoflagelados e diatomáceas, como pode ser observado pela Tabela 4.

Essa mesma tabela mostra que diferentes táxons algais se revezaram ao longo do tempo experimental no plâncton da lagoa, apesar de a análise ter sido parcial e relativa. Os nutrientes, por outro lado, não mostraram oscilações equivalentes às demais variáveis, sugerindo ausência de causa e efeito entre estes e a biomassa e composição algal (Figura 16). Chama a atenção, no entanto, o aumento de ortofosfato ao final do período experimental, coincidindo com incremento de clorofila-a extraída e oxigênio dissolvido. O objetivo do monitoramento dessas variáveis físico-químicas e biológicas na água da lagoa foi apenas obter informações colaterais ao longo do experimento de colonização de substratos para compreender possíveis relações entre os resultados, porém não foram observadas em análises exploratórias, relações claras entre esses dados e a composição e sucessão de espécies nos *Algal Traps*.

A análise da colonização e sucessão de microalgas nos *Algal Traps* revelou diversos morfotipos pertencentes a dezenas de táxons. Como o objetivo foi tentar compreender se há padrões de colonização relacionados a grupos funcionais e não a espécies, foi realizada uma observação e posterior agrupamento de morfotipos, tentando construir um modelo ilustrativo dos padrões de sucessão entre essas diferentes morfologias. Os morfotipos considerados originalmente nas contagens das amostras de composição dos *Algal Traps* podem ser vistos na Figura 17. Esses morfotipos foram posteriormente agrupados em 8 morfotipos genéricos, a saber: diatomáceas penadas, cianobactérias coloniais, cianobactérias cocóides, microalgas verdes coloniais, microalgas verdes, diatomáceas coloniais, dinoflagelados e filamentosas. A análise da composição dos *Algal Traps* ao longo do tempo foi feita com base nesses agrupamentos e encontra-se representada na Figura 18.

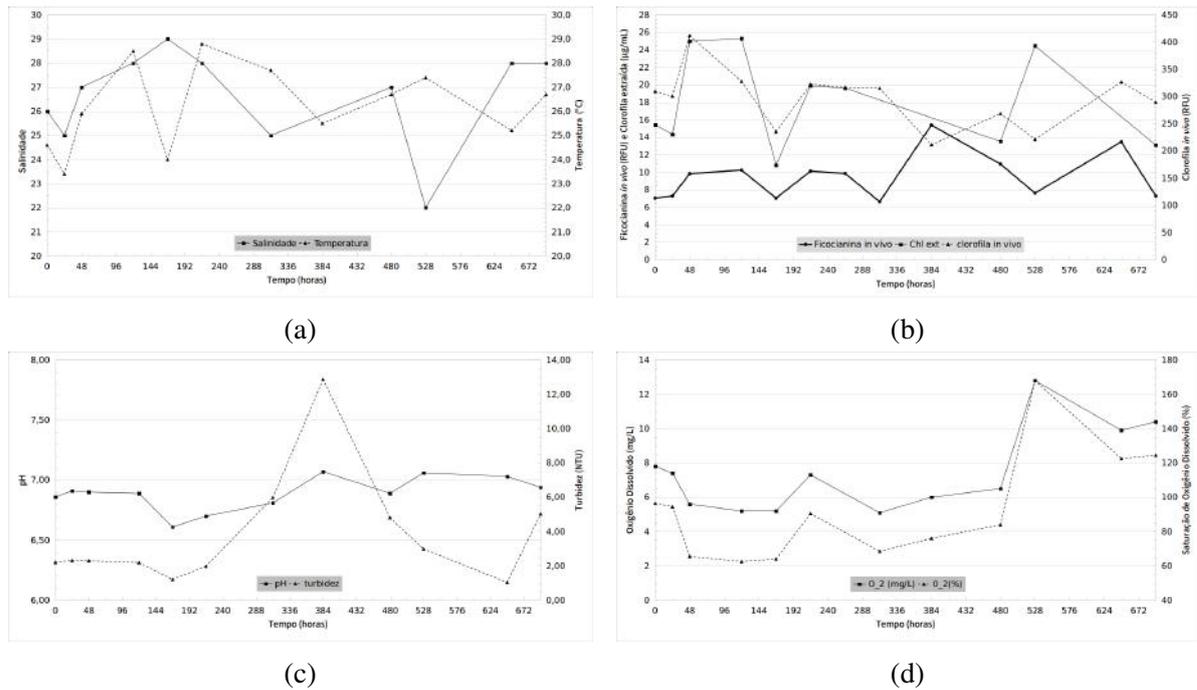


Figura 15 – Variáveis descritivas da água da lagoa durante o experimento de colonização de substratos com os *Algal Traps*. Em (a), Salinidade e Temperatura (°C), em (b) Clorofila e Flocianina *in vivo* e Clorofila extraída ($\mu\text{g/mL}$), em (c) pH e Turbidez (RFU), e em (d) Oxigênio Dissolvido (mg/L) e Saturação de Oxigênio Dissolvido (%).

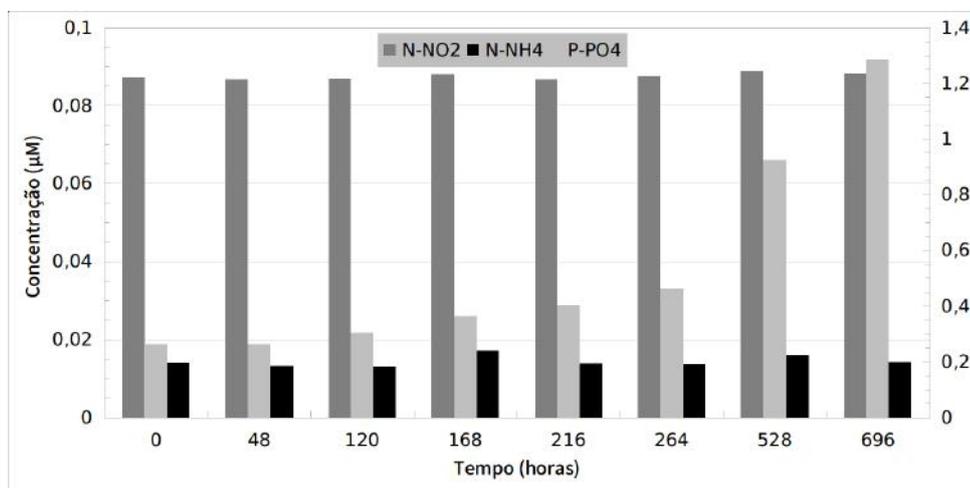


Figura 16 – Nutrientes da água da lagoa ao longo do experimento de colonização de substratos nos *Algal Traps*.

Alguns padrões gerais de sucessão de morfotipos podem ser percebidos de forma similar nos três substratos: o incremento gradual de diatomáceas penadas e a redução progressiva de microalga verdes e, mais sutilmente, de dinoflagelados. No PVC e no Nylon percebeu-se um considerável incremento de diatomáceas filamentosas depois de 264 horas. Os resultados referentes aos valores de Volume Precipitado Sedimentado (VPS) e de Volume Total Sedimentado (VTS) das três malhas utilizadas no experimento de colonização de substratos por microalgas

Tabela 4 – Composição relativa do fitoplâncton nas amostras de rede (qualitativas) coletadas na lagoa ao longo do período do experimento de colonização de substratos com os *Algal Traps*. Experimento de 696 horas, ocorrido entre os dias 22 de Março e 20 de Abril de 2017. (-): ausente, (*): raro, (**): frequente, (***): abundante, (****): muito abundante

Grupo	Táxon/Morfotipo	Abundância Relativa					
		48 h	120 h	312 h	480 h	552 h	696 h
Bacillariophyceae	<i>Amphiprora</i> sp.	*	-	*	*	-	-
	<i>Chaetoceros</i> spp.	*	*	***	*	**	****
	<i>Epithemia</i> sp.	**	**	-	*	*	*
	<i>Haslea</i> sp.	*	-	*	*	*	-
	Penais (nanométricas)	*	**	*	*	*	-
	<i>Pleurosigma</i> sp.	**	**	**	*	*	*
Chlorophyta	<i>Botriococcus</i> sp.	*	*	-	*	*	-
	<i>Rhizoclonium</i> sp.	*	**	*	-	*	*
	<i>Ulva</i> spp.	*	***	**	-	-	-
Cyanobacteria	Chroococcales	**	***	-	**	*	*
	Oscillatoriales	-	****	**	*	-	*
Dinophyceae	<i>Diplopelta</i> sp.	-	*	-	-	-	-
	Gonyaulacales	**	*	-	****	**	*
	<i>Protoperidinium</i> spp.	*	*	-	-	-	-
	<i>Scropsiella</i> sp.	-	*	-	-	-	-
-	Copepoda	*	****	-	*	*	*
-	Nematoda	-	-	-	*	-	-
-	Tintinnida	*	-	-	-	-	-
-	Pelotas fecais	*	**	****	****	*	****

estão representados na Figura 19. Estes dados indicam a quantidade de material microbiano (microalgas, bactérias etc.) aderido ou assentado nos substratos. É possível verificar que houve um maior e mais rápido acúmulo de material no substrato bucha. Os dados de biomassa seca mostram essas diferenças de biomassa entre diferentes substratos de forma mais visível (Figura 20).

A figura 20 mostra a Análise de Componentes Principais (ACP) realizada com os dados de composição de morfotipos ao longo do tempo nos 3 tipos de substratos. O primeiro componente da ACP explicou 84,17% da variância dos dados e o segundo componente explicou 6,82% da variância, totalizando 90,99% nos dois primeiros componentes que estão ilustrados. De maneira geral a ACP representou de forma simplificada o processo de sucessão de morfotipos ao longo do tempo. O primeiro componente está relacionado com o tempo e o segundo foi influenciado pela distribuição diferenciada de dinoflagelados.

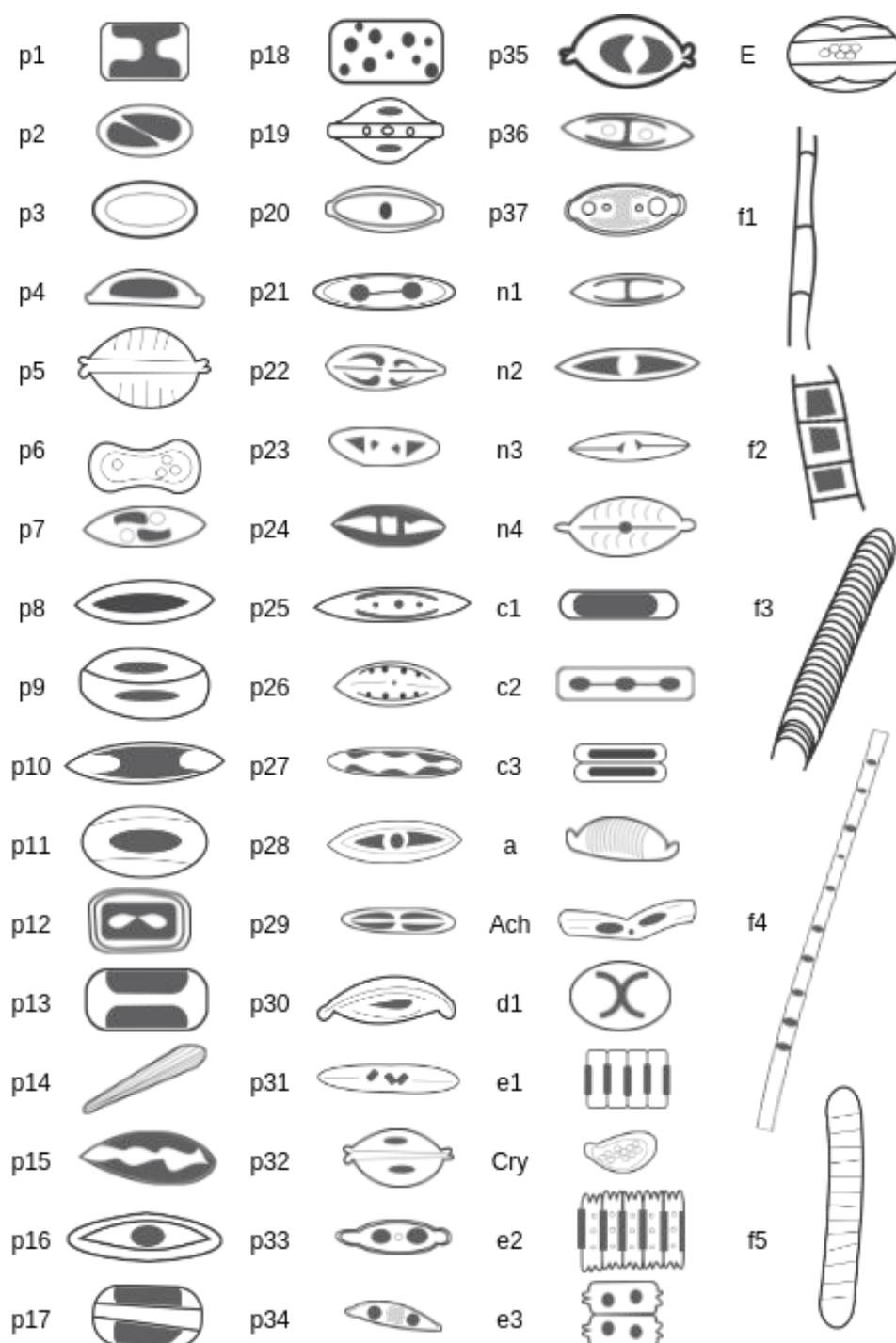
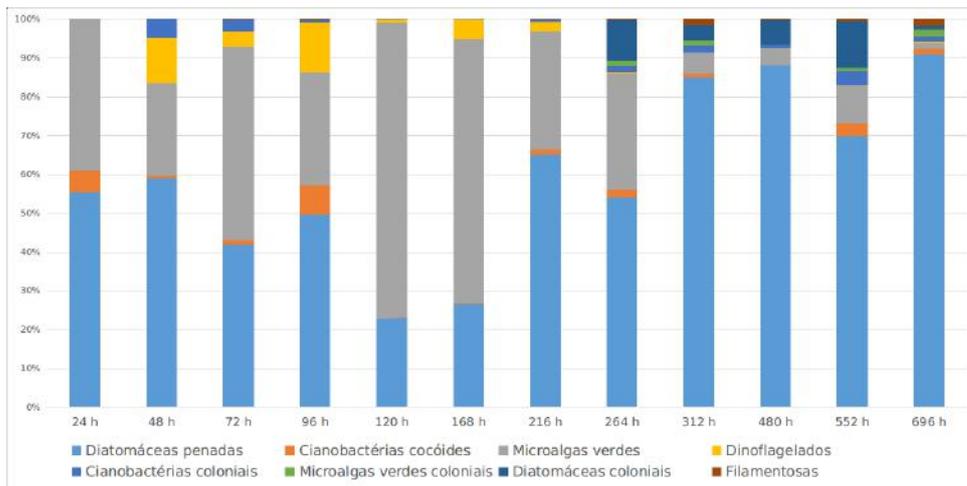
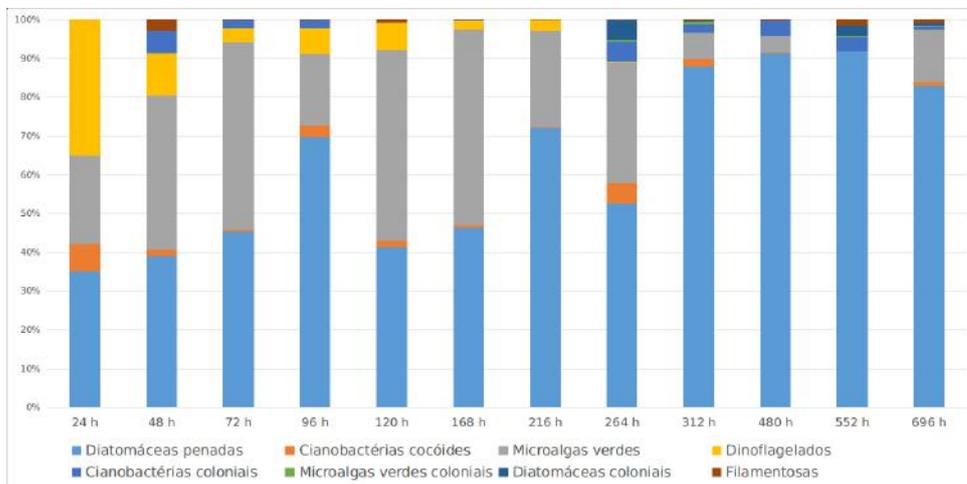


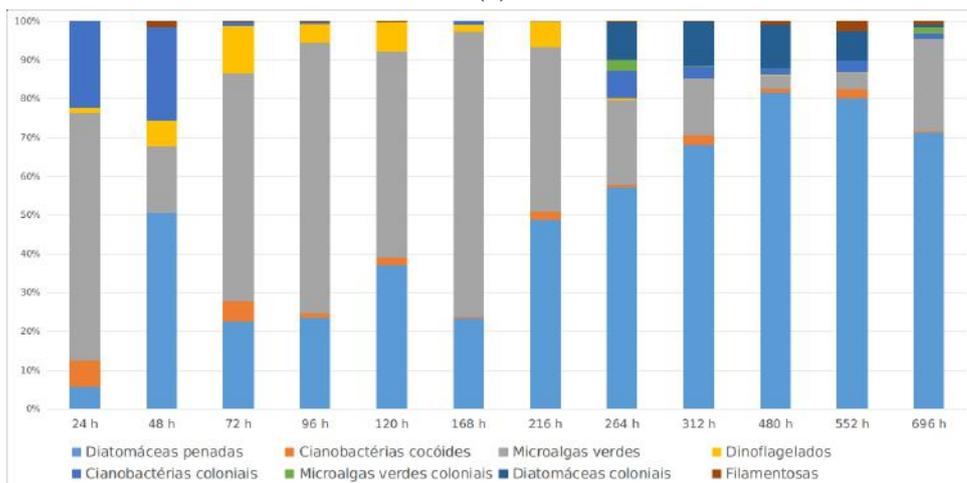
Figura 17 – Representação dos morfotipos definidos e contados durante processamento das amostras de sucessão do experimento de colonização de substratos com os *Algal Traps*.



(a)



(b)



(c)

Figura 18 – Distribuição e abundância relativa de 8 morfotipos em determinados tempos sucessivos de três malhas durante o experimento de colonização de substratos com os *Algal Traps*. Malha de PVC em (a), Bucha em (b), e Nylon em (c). Experimento de 696 horas, ocorrido entre os dias 22 de Março e 20 de Abril de 2017.

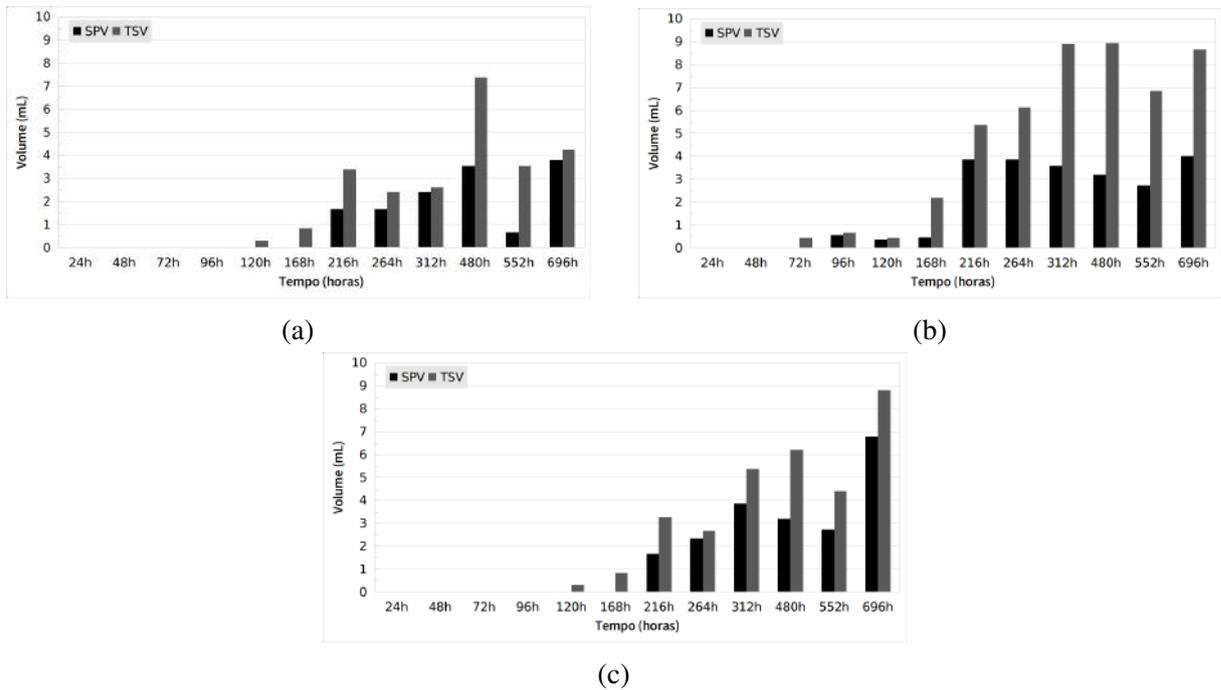


Figura 19 – Volume Precipitado Sedimentado (SPV) e Volume Total Sedimentado (TSV) das malhas de PVC (a), Bucha (b), e Nylon (c) utilizadas no experimento de colonização de substratos com os *Algal Traps*. Experimento de 696 horas, ocorrido entre os dias 22 de Março e 20 de Abril de 2018.

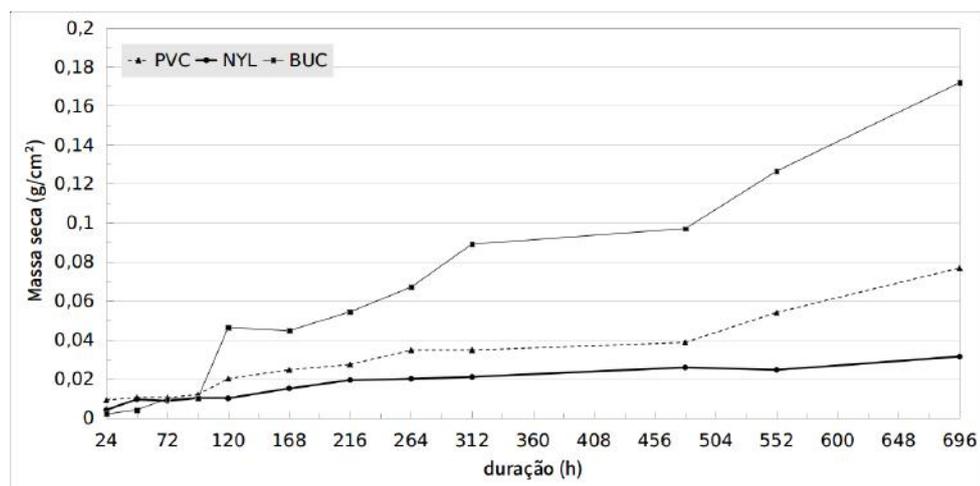


Figura 20 – Biomassa seca em cada malha testada nos *Algal Traps* durante o experimento de colonização de substratos. Experimento de 696 horas, ocorrido entre os dias 22 de Março e 20 de Abril de 2018.

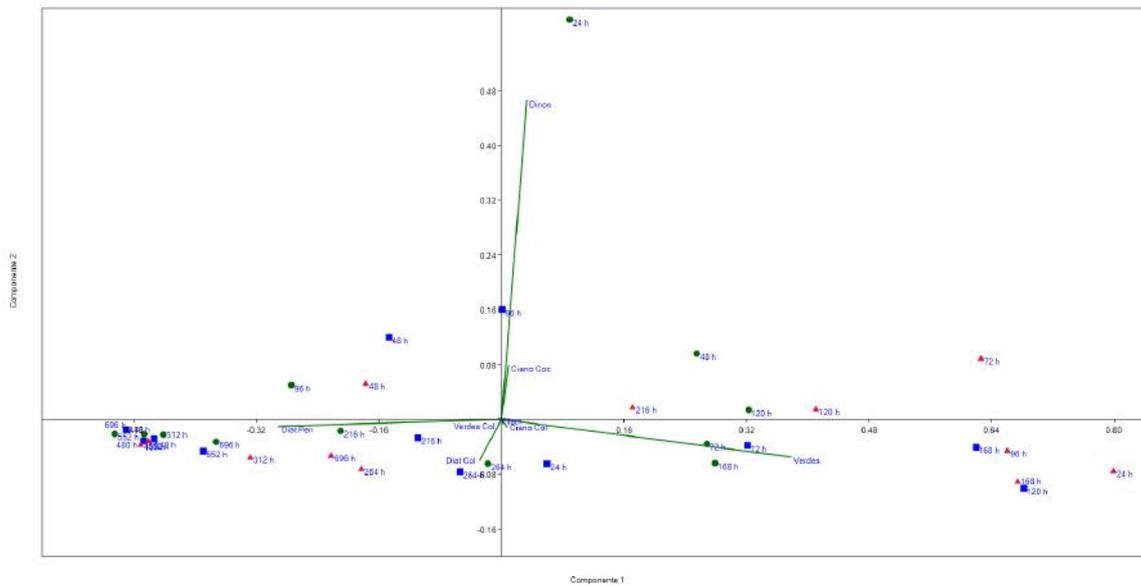


Figura 21 – Representação da Análise de Componentes Principais para os morfotipos e amostras de cada malha no experimento de assentamento algal com os *Algal Traps*.

4.3 Algal Turf Scrubber

4.3.1 Maturação das rampas

As maturações do sistema para os experimentos de remoção de nutrientes a cada experimento de remoção de nutrientes evidenciaram uma sequência de etapas, com durações individuais dependentes de variáveis ambientais, como precipitação, temperatura e luminosidade. Cada etapa é nomeada de acordo com o tipo algal predominante, ou característica geral, e podem ser vistas nas Figuras 22. Inicialmente, apenas algumas horas após o início do fluxo de água sobre as rampas, as mesmas apresentaram coloração marrom indicativa da acumulação de diatomáceas planctônicas. Alguns dias depois as diatomáceas já formavam biofilmes mais espessos, formados não só pelas primeiras diatomáceas planctônicas, mas também por outras, de hábito bêntico, como as penadas unicelulares. O próximo passo foi o crescimento de diatomáceas filamentosas (em cadeia), especialmente do gênero *Melosira*. O passo seguinte mostra o aparecimento de algas verdes filamentosas. Depois, próximo do clímax da sucessão, aparece *Ulva* spp., tanto formas filamentosas (as antigas *Enteromorpha*), sendo que *Ulva* spp. foliosas são as últimas a se desenvolverem, indicando já a necessidade de remoção do excesso de biomassa. Os tempos de maturação de cada experimento constam na Tabela 2.

Apesar de não ter sido realizado um acompanhamento sistemático da maturação das rampas, algumas amostras para microscopia foram coletadas, e podem ser vistas na Figura 23. A Figura 23a mostra a variedade de morfotipos das primeiras colonizadoras, as diatomáceas unicelulares, seguidas das diatomáceas em cadeia, como a *Melosira nummuloides* (Figura 23b). Nesta figura, ainda consegue-se observar como as cadeias podiam ser vistas macroscopicamente, na rampa. Nesta etapa, o sistema era dominado por diatomáceas de cadeia, e foi apelidado de "*Diatom Turf Scrubber*", até que as filamentosas começam a aparecer (Figura 23c), e dominam o sistema. A Figura 23d mostra uma etapa que fica além das etapas de maturação, onde começa a se desenvolver fauna macroscópica e o *turf* começa a morrer e eventualmente, a se desprender do sistema.

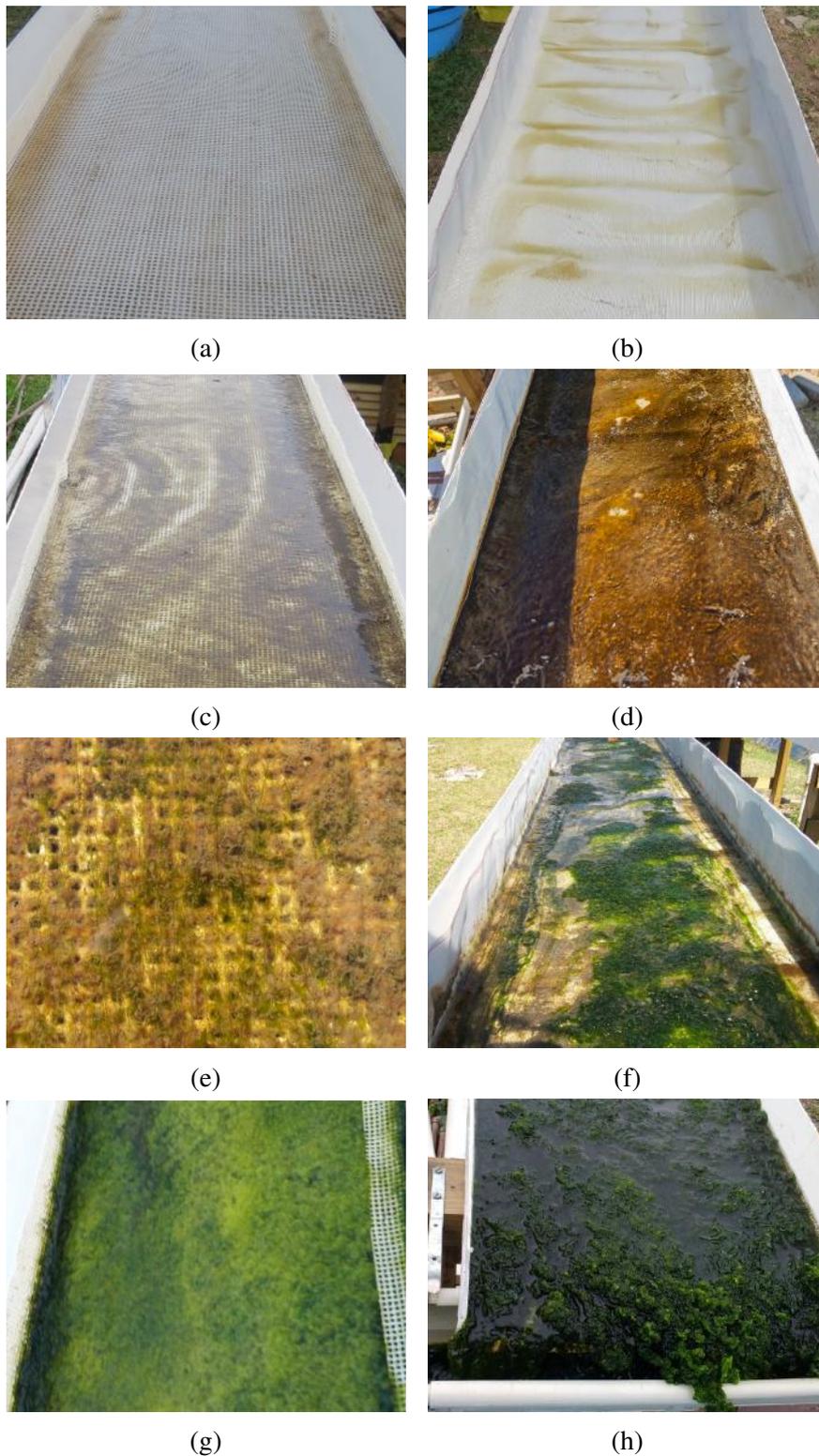


Figura 22 – Etapas da maturação do ATS, onde (a) malha crua, (b) assentamento de diatomáceas, (c) biofilme de diatomáceas, (d) biofilme de diatomáceas de cadeia, (e) diatomáceas de cadeia e filamentosas, (f) filamentosas, (g) filamentosas e foliáceas, e (h) foliáceas e filamentosas de maior relação superfície/volume. Fotos da autora.

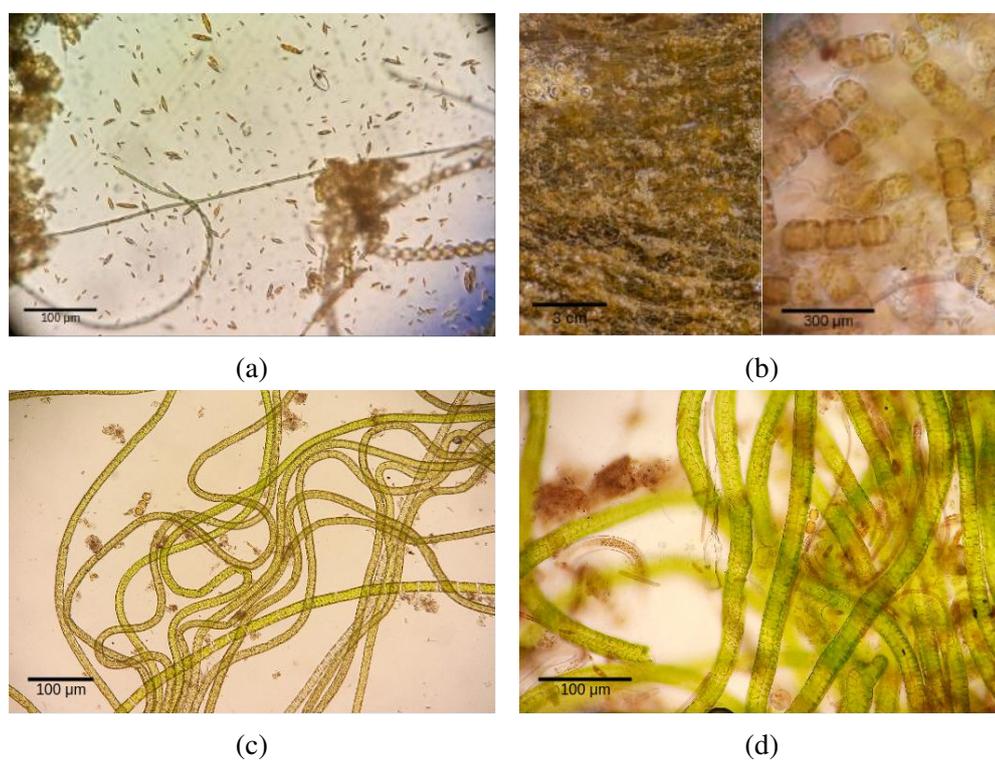


Figura 23 – Fotos detalhadas das etapas da maturação descritas na Figura 22, onde (a) microscopia da comunidade na Figura 22c, (b) filamentos macroscópicos e microscopia das cadeias de diatomáceas na Figura 22d, (c) microscopia da comunidade na Figura 22f, e (d) microscopia de uma etapa avançada. Fotos da autora.

4.3.2 Experimentos de remoção de nutrientes

Os três experimentos de remoção de nutrientes foram conduzidos após a maturação das rampas, sendo que o primeiro experimento começou a ser avaliado com uma biomassa aderida (*turf*) relativamente baixa para ambos substratos. Nos demais experimentos a biomassa inicial foi maior e também mostrou valor de biomassa final bem maior, quando comparado ao primeiro experimento, especialmente no substrato Nylon (Figura 24).

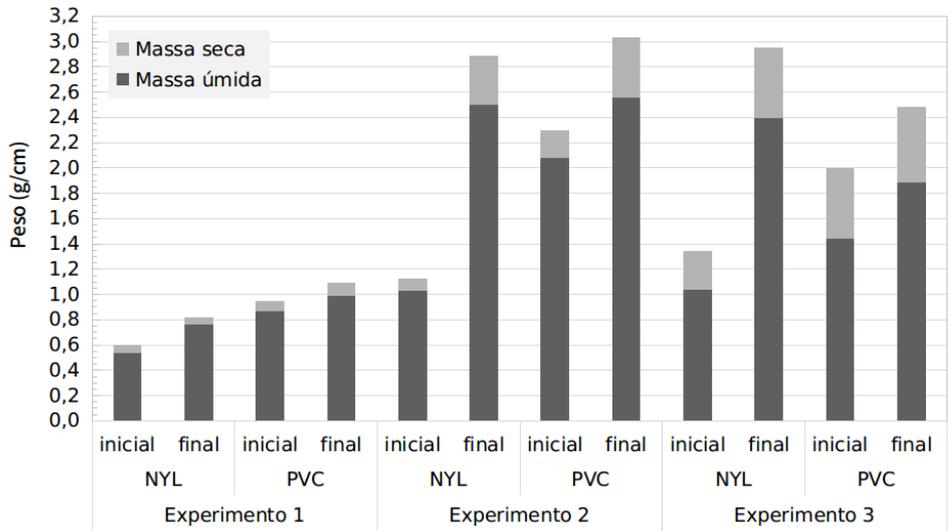


Figura 24 – Biomassa seca (DW) e Biomassa úmida (WW) em cada malha nos três experimentos de remoção de nutrientes no ATS.

A disponibilidade de energia luminosa (irradiância) foi diferente para cada experimento, o que pode ser visto na Tabela 5. A maior quantidade total de energia disponibilizada ao sistema ocorreu no experimento 1, seguido pelos experimentos 3 e 2. Esses dados, normalizados pelo tempo de avaliação da remoção de nutrientes, fornecerá informação sobre a eficiência relativizada com a energia, que é um dado importante para fins de modelagem preditiva.

A composição relativa do *turf* algal nas rampas do ATS nos três experimentos está apresentada na Tabela 6. Percebe-se que no experimento 1 não houve aparecimento de macroalgas verdes (*Ulva* spp., *Rhizochlonium* sp. e *Chaetomorpha* sp.), fato que aconteceu nos outros dois experimentos. Aparentemente, as cianobactérias apresentaram maior afinidade pelo substrato nylon.

As análises de nutrientes e as variáveis descritivas dos experimentos de remoção de nutrientes podem ser encontradas nas Figuras 25 a 30. No experimento 1, onde os turfs não apresentaram macroalgas como *Ulva* spp. e outras, houve comportamento similar entre Nylon e PVC. Houve considerável redução de nutrientes a partir de 20h, especialmente para ortofosfato e nitrito (Figura 25). Para amônio a remoção não foi significativa. Salinidade e condutividade não variaram muito, como era esperado, entre o início e final do experimento. Já a temperatura mostrou aumento progressivo (Figura 26). Os pigmentos, indicativos da presença de fitoplâncton e de microalgas que se destacaram do *turf*, mostrou um pico em torno das 20 horas, momento

Tabela 5 – Dados comparativos de irradiância entre os três experimentos realizados no ATS, apresentados na forma de energia total recebida pelas rampas em Mega Joules (MJ) e indicação do máximo valor de irradiância registrado em micromol de fótons por metro quadrado por segundo ($\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)

Experimento	Início (data e hora)	Fim (data e hora)	Tempo total (h)	Energia total (MJ)	Máximo valor ($\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)
exp1	18-Jul-2017 12:55 h	20-Jul-2017 15:15 h	50,35	51,7	2753 (20-Jul-2017 11:55 h)
exp2	08-Ago-2017 11:15 h	10-Ago-2017 09:30 h	46,55	23,27	4282 (08-Ago-2017 13:05 h)
exp3	30-Out-2017 11:25 h	31-Out-2017 17:40 h	30,15	45,27	2197 (20-Out-2017 09:15 h)

Tabela 6 – Composição relativa das amostras dos experimentos de remoção de nutrientes, para cada malha testada. As amostras inicial e final foram idênticas, por isso não estão explícitas. (-): ausente, (*): raro, (**): frequente, (***): abundante, (****): muito abundante

Grupo	Táxon/Morfotipo	Experimento					
		exp1		exp2		exp3	
		PVC	NYL	PVC	NYL	PVC	NYL
Bacillariophyceae	<i>Melosira nummuloides</i>	**	**	***	**	*	-
	Penales (nanométricas)	***	***	**	*	*	**
Chlorophyta	Esféricas	***	***	-	*	*	**
	Esféricas coloniais	****	****	***	***	*	**
	<i>Rhizoclonium</i> sp.	**	**	**	-	****	****
	<i>Chaetomorpha</i> sp.	*	-	**	***	***	****
	<i>Ulva lynza</i>	-	-	****	**	**	-
	<i>Ulva compressa</i>	-	-	*	**	**	**
	<i>Ulva lactuca</i>	-	-	***	-	-	-
	<i>Ulva flexuosa</i>	-	-	***	*	***	-
Cyanobacteria	Chroococales	**	-	***	-	**	-
	Oscillatoriales	-	*	**	-	-	-

de mais significativa remoção de nutrientes. O pH e a turbidez oscilaram consideravelmente ao longo do tempo experimental, assim como o oxigênio dissolvido (Figura 26).

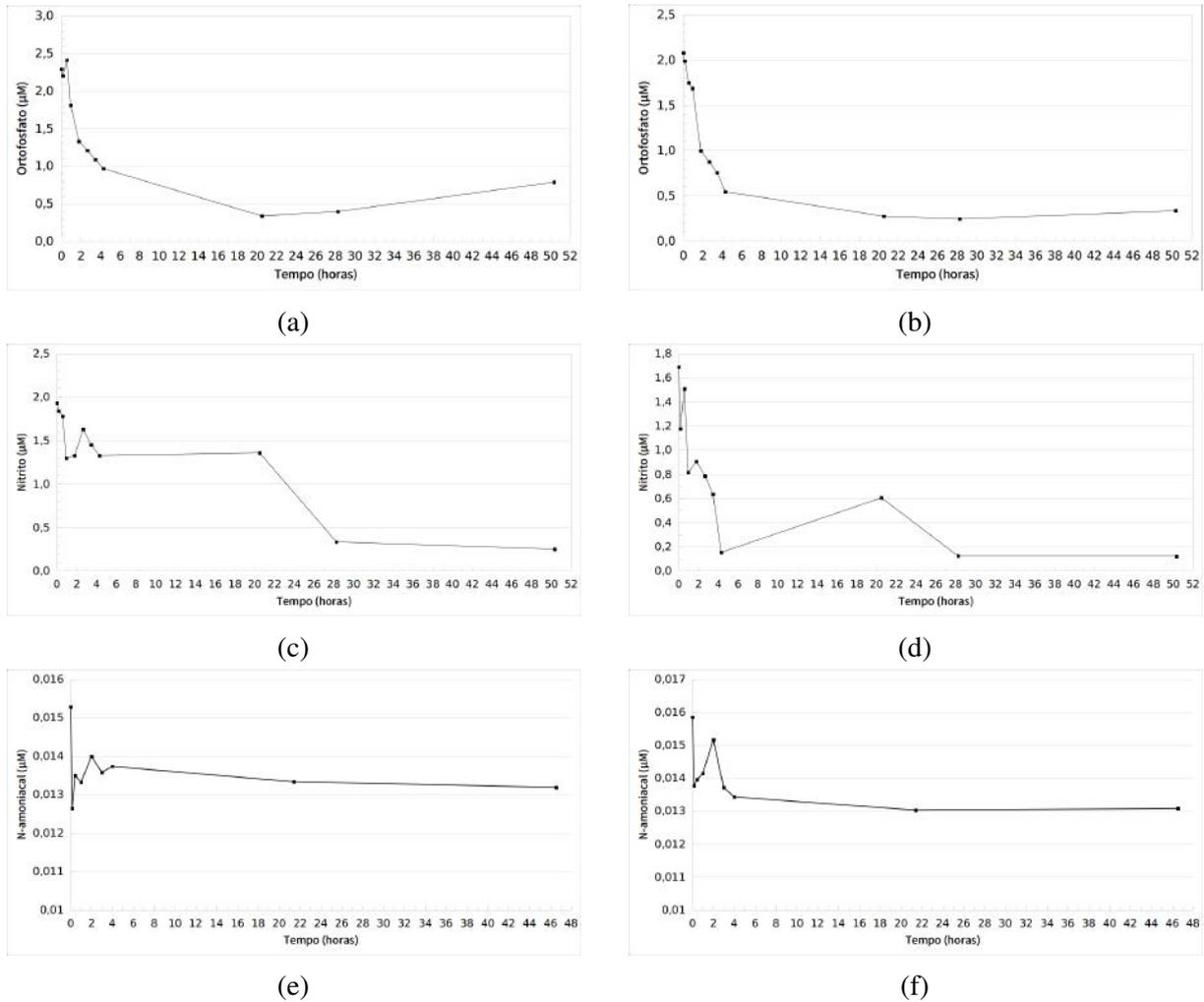


Figura 25 – Nutrientes da água circulante nas rampas no primeiro experimento de remoção de nutrientes do *Algal Turf Scrubber* nas duas rampas em Regime Fechado (de 18 a 21 de Julho de 2017). (a), (c), e (e) representam as medidas da rampa com a malha de Nylon, e (b), (d), e (f) representam as variáveis da rampa com a malha de PVC.

No experimento 2, o padrão de remoção de ortofosfato e nitrito foi similar ao Experimento 1. O amônio mais uma vez mostrou baixa remoção. O comportamento das variáveis físico-químicas e pigmentos foi também similar ao experimento 1, exceto pelo pH, que mostrou maior persistência de valores elevados relacionados provavelmente à fotossíntese mais intensa do turf composto por macroalgas (Figura 28).

No experimento 3 percebeu-se um comportamento um pouco diferente e inesperado, provavelmente relacionado ao excesso de biomassa algal e aparecimento de fauna no *turf*. Não houve considerável redução dos nutrientes nos sistemas (Figura 29). Em relação às variáveis físico-químicas e pigmentos, percebeu-se um comportamento complexo, provavelmente também relacionado ao excesso de biomassa e início de decomposição da mesma nas rampas (Figura 30).

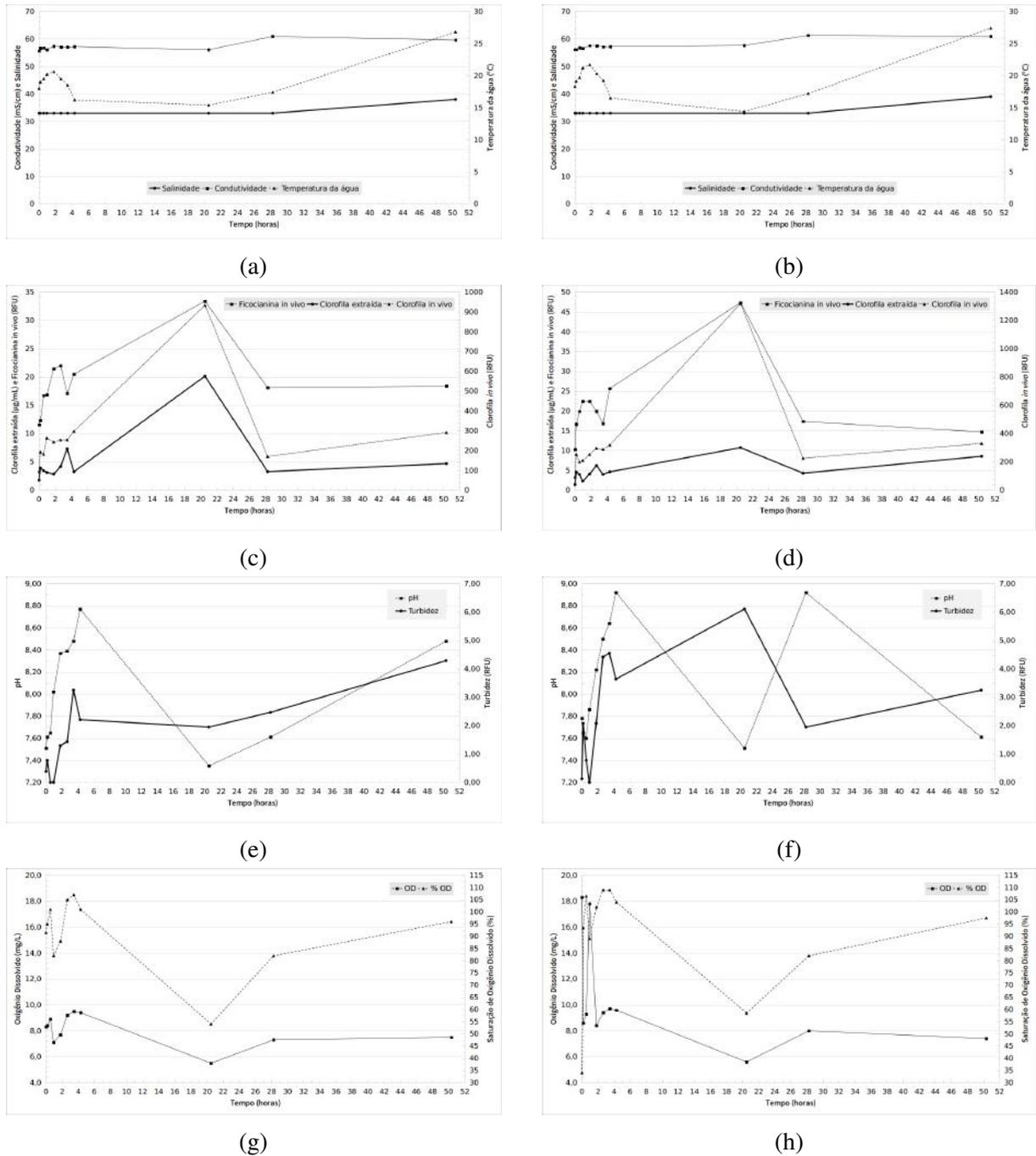


Figura 26 – Variáveis descritivas da água circulante nas rampas no primeiro experimento de remoção de nutrientes do *Algal Turf Scrubber* nas duas rampas em Regime Fechado (de 18 a 21 de Julho de 2017). (a), (c), (e) e (g) representam as variáveis da rampa com a malha de Nylon, e (b), (d), (f) e (h) representam as variáveis da rampa com a malha de PVC.

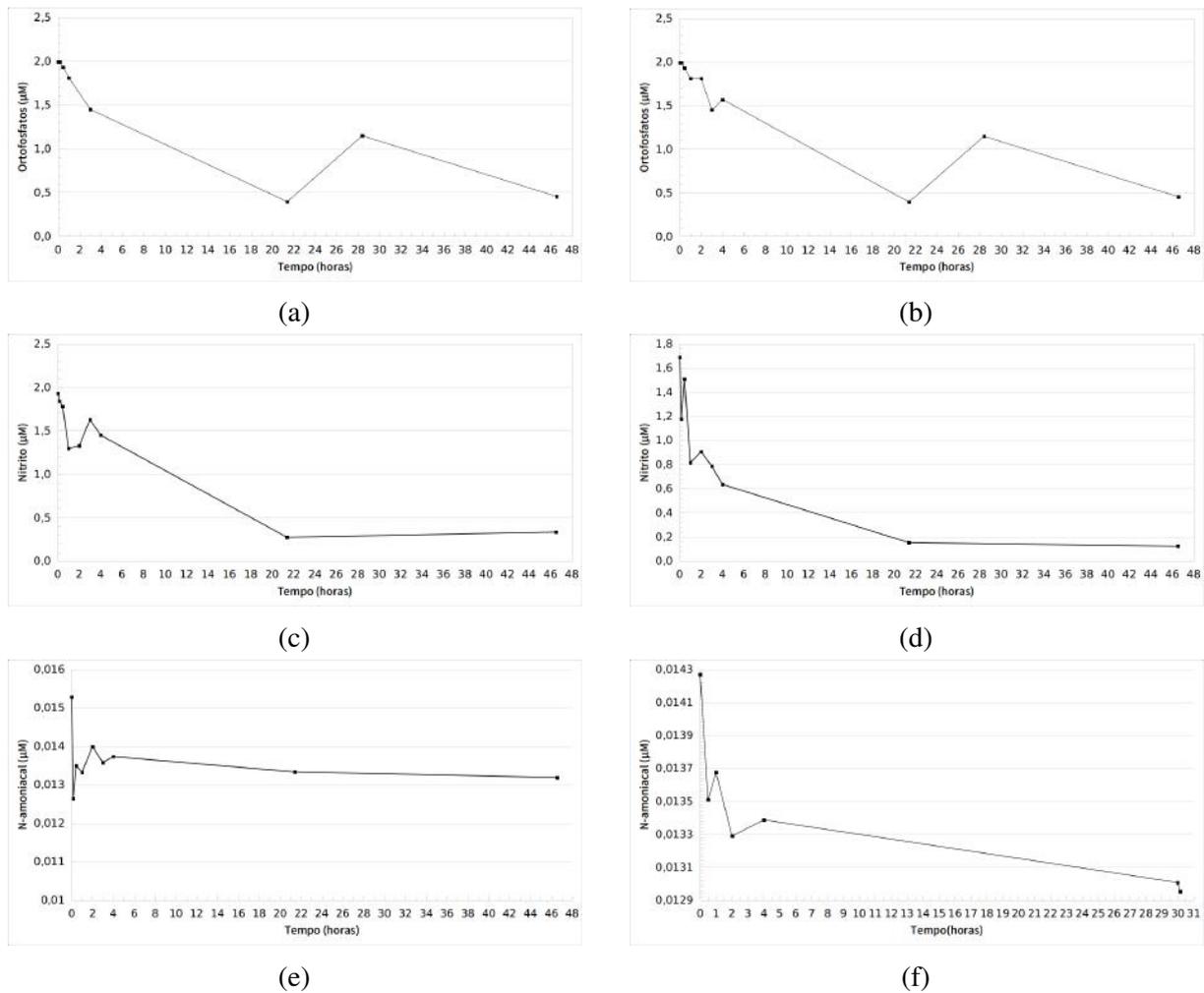


Figura 27 – Nutrientes da água circulante nas rampas no segundo experimento de remoção de nutrientes do *Algal Turf Scrubber* nas duas rampas em Regime Fechado (de 08 a 11 de Agosto de 2017). (a), (c), e (e) representam as medidas da rampa com a malha de Nylon, e (b), (d), e (f) representam as variáveis da rampa com a malha de PVC.

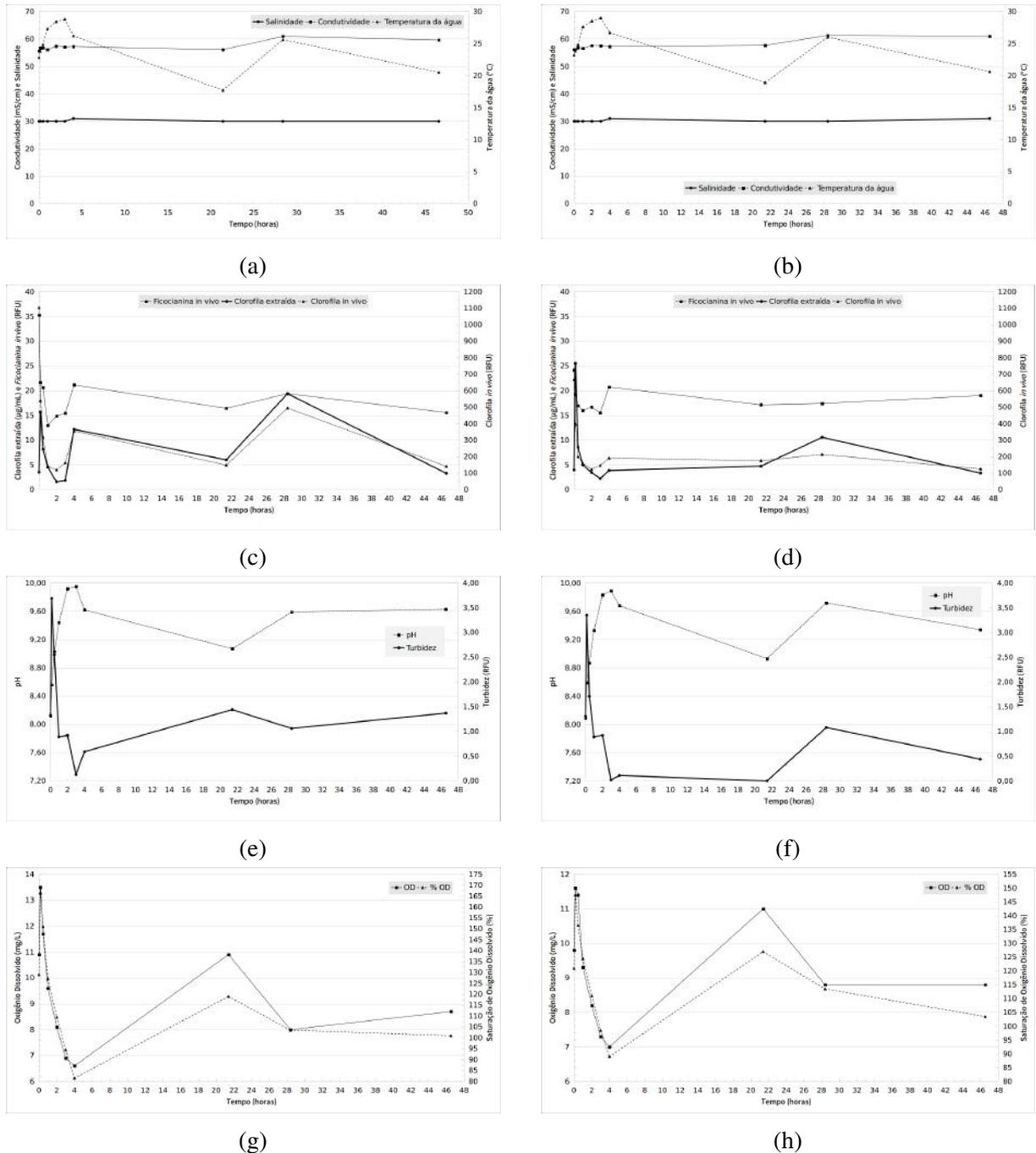


Figura 28 – Variáveis descritivas da água circulante nas rampas no segundo experimento de remoção de nutrientes do *Algal Turf Scrubber* nas duas rampas em Regime Fechado (de 08 a 11 de Agosto de 2017). (a), (c), (e) e (g) representam as variáveis da rampa com a malha de Nylon, e (b), (d), (f) e (h) representam as variáveis da rampa com a malha de PVC.

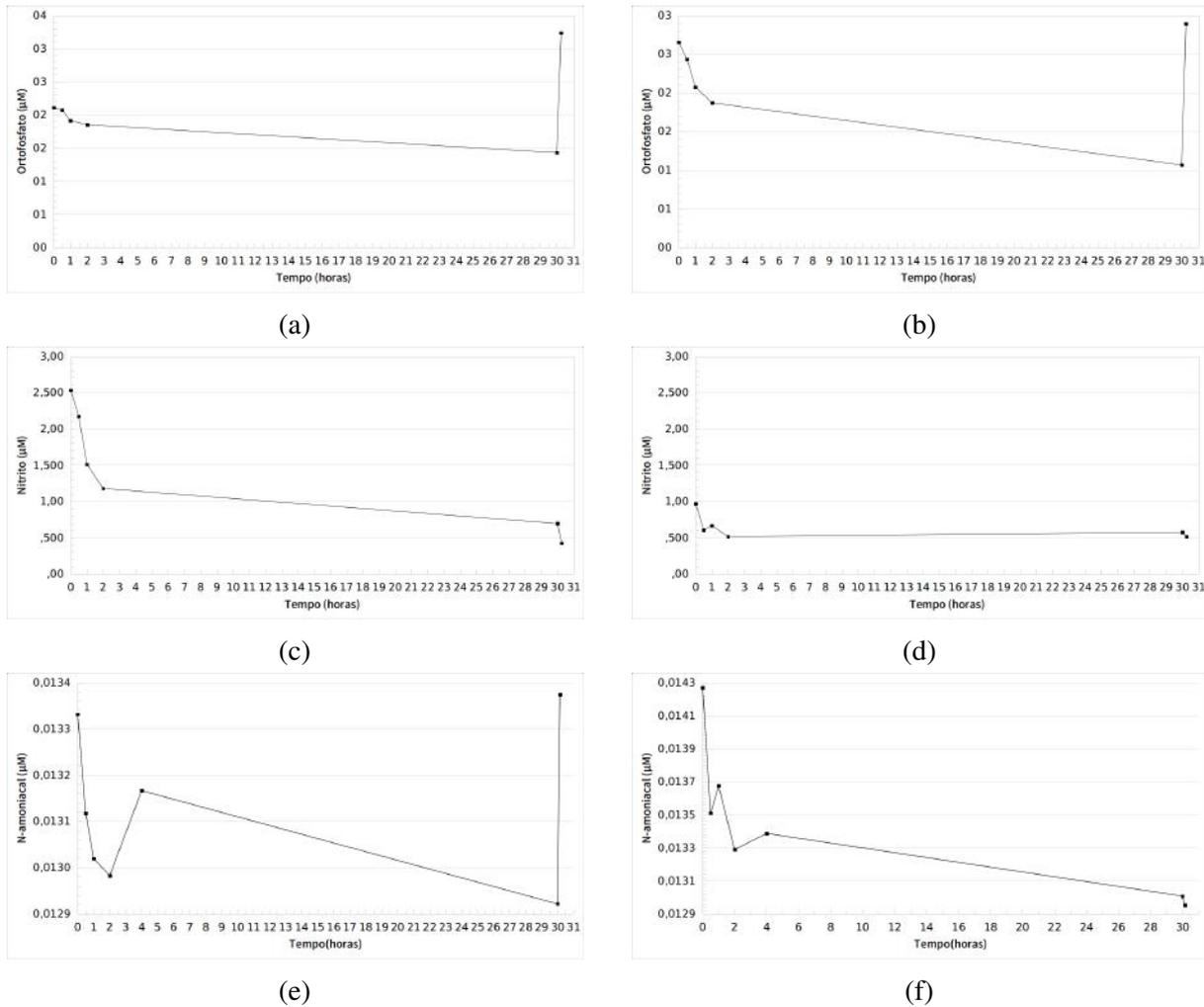


Figura 29 – Nutrientes da água circulante nas rampas no terceiro experimento de remoção de nutrientes do *Algal Turf Scrubber* nas duas rampas em Regime Fechado (de 30 a 31 de Outubro de 2017). (a), (c), e (e) representam as medidas da rampa com a malha de Nylon, e (b), (d), e (f) representam as medidas da rampa com a malha de PVC.

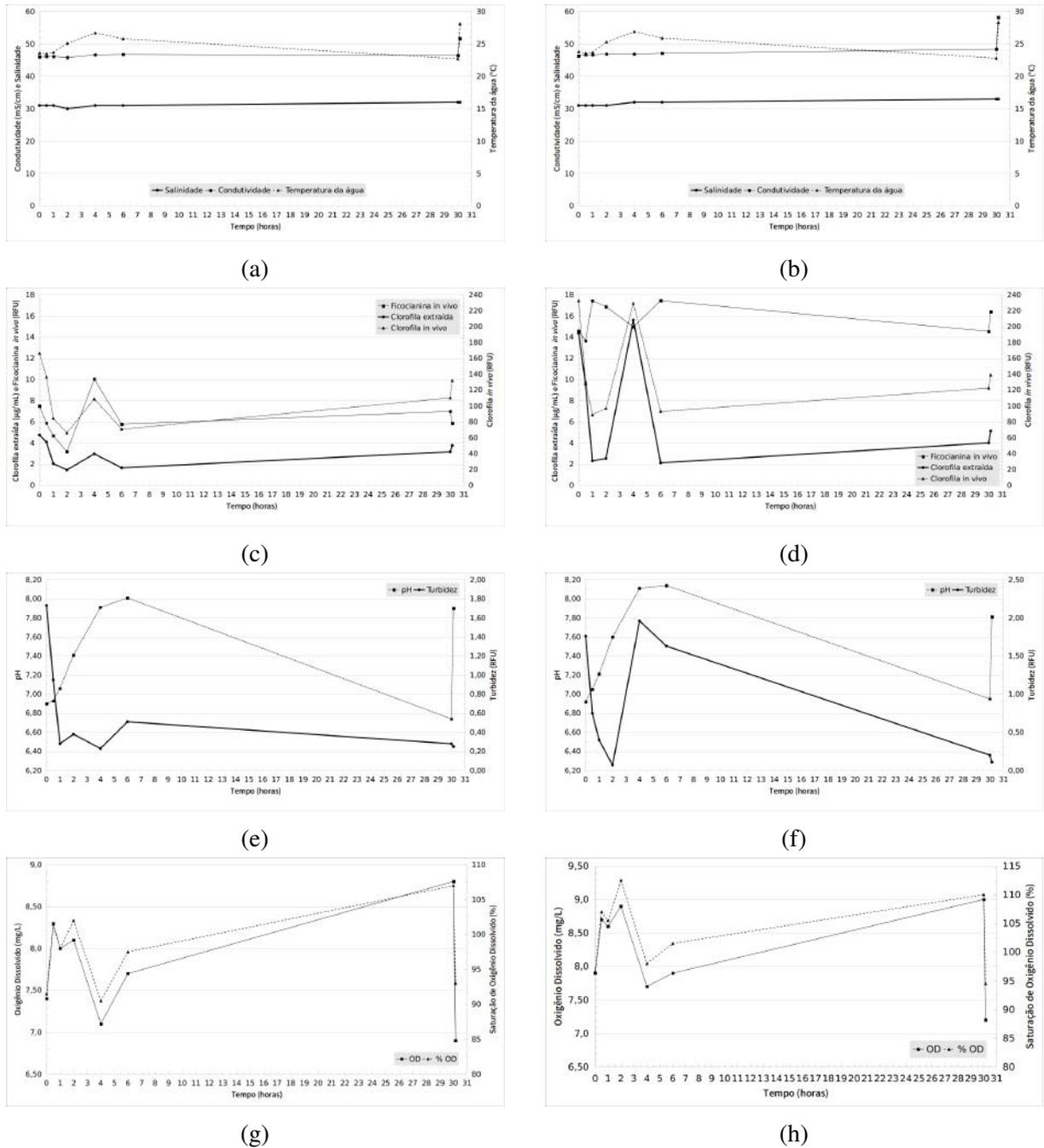


Figura 30 – Variáveis descritivas da água circulante nas rampas no terceiro experimento de remoção de nutrientes do *Algal Turf Scrubber* nas duas rampas em Regime Fechado (de 30 a 31 de Outubro de 2017). (a), (c), (e) e (g) representam as variáveis da rampa com a malha de Nylon, e (b), (d), (f) e (h) representam as variáveis da rampa com a malha de PVC.

5 Discussão

5.1 Substratos

Em uma primeira análise as três malhas mostraram adequação para uso como substrato para colonização de algas. Analisando as microfotografias percebe-se que o Nylon (Figura 13c), é mais bidimensional, liso, além de ser o tipo de malha de escolha da maior parte dos trabalhos com ATS (Adey *et al.* 2013, Mulbry, Kangas e Kondrad 2010, Adey 1982, Adey, Kangas e Mulbry 2011). Esta malha é, visivelmente, a mais lisa e consistente fisicamente das três malhas analisadas (Figura 14e), e não mostra grandes alterações na sua estrutura mesmo nas áreas de corte (Figura 14f). Em contraste, a malha de PVC apresenta uma terceira dimensão significativa, com cerca de 1,5 mm de altura, contra menos de 0,1 mm no Nylon. Isso se deve ao processo de fabricação, que expande o PVC em altas temperaturas, fazendo o material ferver. Ao olho nu esse material expandido parecia poroso – uma característica interessante para o assentamento de microalgas e propágulos de macroalgas. Porém, com a análise de microscopia (Figura 13a), percebeu-se que as supostas bolhas eram internas e não geram maior superfície de contato externo para adesão e colonização de algas. A maior porosidade seria interessante uma vez que, devido à constante colheita, inerente à operação de um ATS, a manutenção de propágulos ou aglomerados celulares algais protegidos nesses poros possibilitaria mais rápida regeneração do dossel algal. Nessas condições, o *turf* cresceria mais rapidamente e o tempo de virtual inatividade na remoção de nutrientes seria minimizado, aumentando a eficiência de remoção do ATS. Porém, como pôde ser verificado nas imagens de MEV (Figura 14a), os poros não são abertos para o exterior da malha, mas sim cobertos por uma camada de PVC, fazendo a superfície praticamente lisa, mesmo que não tanto quanto o nylon.

Como alternativa ao uso de malhas sintéticas na operação de ATS, o terceiro substrato escolhido foi o fruto seco de *Luffa cylindrica* (planta da família Cucurbitaceae conhecida popularmente como "bucha"), buscando uma maior sustentabilidade no processo. Além de potencialmente aumentar a eficiência de biorremediação, já que as fibras de *L. cylindrica* sabidamente tem propriedades adsorptivas de substâncias nocivas (Akhtar, Iqbal e Iqbal 2004, Oboh e Aluyor 2009, Khani e Ahmad 2015, Lindino *et al.* 2014, Laidani, Hanini e Henini 2011), a rede complexa e fractal formada pelas fibras da bucha parece um ambiente bastante favorável para o crescimento e dinamização de uma comunidade microbiana (Figura 13b). Sendo ainda mais tridimensional que a malha de PVC, a intrincada estrutura da bucha tem maior área de superfície (Figura 14c), apresentando ranhuras e aberturas ao longo das fibras, além de poros e múltiplas camadas (Figura 14d). Segundo Demir *et al.* 2008, o arranjo de fibras de *L. cylindrica* pode apresentar até $123 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, o que é consideravelmente maior do que, por exemplo, os $0,0332 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ do Nylon, calculado a partir das dimensões dos fios e valores de massa seca por cm^2

(Tabela 3).

Ainda sobre os dados de massa, verificou-se que a capacidade de retenção de umidade da Bucha foi 6 vezes maior que a do PVC. Este resultado, adicionado aos resultados de biomassa seca nas malhas dos *Algal Traps* (Figura 20), se deve à alta superfície da Bucha, já mencionada, e sua porosidade e rugosidade. A capacidade de retenção de umidade e maior superfície para crescimento de biomassa são características desejáveis para uma malha de ATS. Assim, durante possíveis momentos sem fluxo de água (desligamento programado da bomba periférica, ou queda de energia) a própria malha seria capaz de reter umidade para manter a comunidade viva e funcional por mais tempo do que malhas como o Nylon, que possui capacidade de retenção de umidade 12 vezes menor. Além disso, outros trabalhos (Blersch *et al.* 2017, Kardel *et al.* 2015) demonstram a importância da tridimensionalidade de substratos para maior crescimento de algas.

5.2 *Algal Traps*

O experimento de colonização algal de substratos com uso dos *Algal Traps* teve como objetivo verificar a velocidade e caracterizar o assentamento de algas nas diferentes malhas. Com isso é possível caracterizar a sucessão, a possível afinidade de morfotipos por certo material, além de diferenças no incremento da biomassa.

Os dados de biomassa seca do experimento demonstram uma grande diferença de incremento de biomassa dos diferentes substratos, com a Bucha atingindo valores 210% maiores do que os valores referentes ao PVC, e 560% maiores do que os valores referentes ao Nylon. Pela tendência das linhas, a biomassa seca continuaria a crescer, diferentemente do que propõe Biggs 1996, onde o pico de biomassa seria em torno de 404 horas, mesmo considerando condições de baixa turbulência. Outra característica interessante que difere os substratos é a proporção de assentamento e adesão de algas, que pode ser vista a partir dos dados de SPV e TSV (Figura 19) dos três substratos. O SPV é o biovolume proporcional às algas que estavam apenas assentadas na superfície da amostra, enquanto o TSV representa as assentadas mais as aderidas, uma vez que é resultado da raspagem da malha. A diferença entre TSV e SPV então diz respeito às algas que estariam aderidas ao substrato. Sobre isso, enquanto o Nylon (Figura 19c) mostrou um volume médio de algas assentadas um pouco maior do que os outros substratos, a Bucha (Figura 19b) mostrou valores de volumes relacionados à algas aderidas muito maiores. Curiosamente, a relação volume/massa seca não se define neste experimento, uma vez que os valores de SPV e TSV do PVC (Figura 19a) são menores do que os do Nylon. Isso pode ser devido à densidade dos tipos algais presentes em cada substrato. A partir dos dados de distribuição e abundância relativa de morfotipos algais (Figura 18), a diferença mais significativa em relação aos substratos PVC e Nylon, principalmente nas amostras 480 h e 552 h, foi nas proporções dos morfotipos cianobactérias coloniais e microalgas verdes. Os dados, porém, não permitem uma certeza sobre isso. O volume também pode ser influenciado pela quantidade de matéria orgânica e material

suspensão na amostra, características não avaliadas nem contabilizadas nos dados de distribuição e abundância relativa.

Para a construção dos supracitados gráficos de distribuição e abundância relativa, foram estabelecidos conjuntos de morfotipos mais restritos do que os inicialmente definidos (Figura 17 e lista completa nos Apêndices, vide Tabela 11), devido à semelhança morfológica, proporções de aparecimento nas amostras, e/ou provável influência dos tipos morfológicos no processo de sucessão das malhas, utilizando os próprios dados e as sugestões de, (Kruk *et al.* 2010, Kruk e Segura 2012). Primeiro, foi definida a separação dos grandes grupos morfológicos, e dentro destes, três categorias de tamanho: nanométricas ($\leq 20\mu\text{m}$), micrométricas ($> 20\mu\text{m}$ e $\leq 200\mu\text{m}$), e macrométricas ($> 200\mu\text{m}$). Estes dados podem ser encontrados nos Apêndices, Tabelas 12, 13 e 14). Mesmo reduzindo o número de morfotipos, ainda eram muitos para que se conseguisse realizar uma linha lógica para sua análise, devido à dificuldade de visualização. A partir disso, com cuidadosa análise dos dados de contagem, para que não houvesse sobreposição errônea de morfotipos, estas 25 categorias foram reduzidas a 8 (vide Tabelas 15, 16 e 17), considerando ocorrência e abundância de cada morfotipo nas amostras.

Excetuando-se algumas amostras onde as proporções de microalgas verdes e diatomáceas coloniais são díspares entre si, a proporção de morfotipos não mostrou uma linha de tendência diferente em cada substrato analisado, ao menos não de forma clara. Neste ponto, a análise incorreu em algumas falhas, uma vez que os valores totais de unidades contadas nas últimas três amostragens para cada substrato não diferiram consideravelmente entre si mas em contrapartida, os volumes TSV, principalmente dos substratos Bucha (Figura 19b) e Nylon (Figura 19c) aumentaram significativamente. A Bucha, a partir de 480 h começa a reter muita água e a perder estrutura, e isso pode influenciar nos resultados de TSV, mas no caso do Nylon isso não justificaria. Isso pode ser explicado pela presença de algas filamentosas, subestimadas em termos de biovolume nas contagens devido à não consideração do comprimento dos filamentos. Isso se deveu principalmente pela inadequação da câmara de Sedgewick-Rafter para este tipo de cálculo, quando alguns filamentos extrapolavam as dimensões da área reticulada padronizada para contagem.

A análise de componentes principais das amostras do experimento de colonização e dos morfotipos (Figura 21) evidencia um gradiente temporal no Componente 1, que explica 84,17% da distribuição. Neste eixo, o lado positivo tem representação principalmente das amostras mais iniciais, e o lado negativo, de amostras de tempos mais avançados no experimento. Além disso, os componentes de morfotipo demonstram uma tendência de sucessão de verdes para diatomáceas penadas. A ACP também não evidencia claramente padrões diferenciados de sucessão ou influência nos morfotipos pelo material do substrato, apesar de o Componente 1 demonstrar uma tendência ao aumento da biomassa no lado negativo, com maior presença de pontos de amostras da Bucha, corroborando os dados de DW. Mais sutil do que anterior, o Componente 2 reflete a circunstância e interferência do grupo dinoflagelados. Este grupo, mais

comuns no início até metade do experimento, ainda que pontualmente, domina este componente, que explica apenas 6,82% da distribuição.

Sobre a dinâmica do desenvolvimento do biofilme, Trbojevic *et al.* 2017 é o estudo que talvez se aproxime mais da nossa experiência. Este estudo é baseado em classificações relativamente completas e considerando diversos fatores, ainda se restringem apenas às diatomáceas (Passy 2007, Rimet e Bouchez 2012), e complementa a análise com filamentosas, esféricas e móveis flageladas. Foram testados 4 substratos diferentes, todos sintéticos e relativamente lisos. A classificação utilizada pelos autores sugere camadas verticais no biofilmes, onde tipos menores habitariam a camada inferior e os maiores, o dossel. Temporalmente, o estudo mostrou que os tipos menores diminuem em etapas posteriores significativamente, fato que não foi comprovado nos *Algal Traps*, onde as microalgas verdes e esféricas, onde as móveis se incluem, habitam inicialmente, e ao longo da sucessão, dão espaço para as diatomáceas.

A Tabela 4 contém os dados de composição relativa do fitoplâncton coletado nas amostras de rede (qualitativas) durante o experimento de assentamento algal. Ainda que a composição de algas dos substratos dos *Algal Traps* não tenha sido espécie-específica, pelas características dos morfotipos e pela composição do fitoplâncton da lagoa, percebe-se que os substratos não necessariamente refletem mudanças no plâncton, reforçando a idéia de que a presença do substrato de fato cria um ambiente diferente, principalmente em comunidades mais avançadas, onde os biofilmes criam contínua e progressivamente microambientes diferentes e cada vez mais balizada pelas próprias características físico-químicas. Ainda dentro deste tema, a velocidade de assentamento e fixação das algas identifica dois processos distintos: 1) o assentamento das algas, e 2) a adesão, ou fixação das algas, onde o primeiro processo não determina o segundo, mas este sim depende do anterior. Alguns organismos, como por exemplo, dinoflagelados, apenas habitam o sistema de modo transitório, contribuindo para a sucessão e molde deste, mas de maneira efêmera. Assim, dependendo das condições a cada passo sucessional, certos organismos se estabelecem, e outros apenas passam. Apenas certos tipos de algas visivelmente habitam de forma consistente o sistema, principalmente nas horas mais avançadas, como microalgas verdes e as diatomáceas coloniais, e as filamentosas.

Ao fim desta etapa, considerando diversos trabalhos de classificação (Kruk e Segura 2012, Kruk *et al.* 2010, Passy 2007, Rimet e Bouchez 2012), definiram-se os 6 morfotipos mais relevantes para avaliação da sucessão em sistemas de substratos (Figura 31). Nesta nova classificação, sugerida para sistemas de água salgada, como a lagoa estudada, os diferentes tamanhos de diatomáceas não são relevantes, e os grupos esféricas e coloniais (Figuras 31b e 31d) englobam tanto algas verdes quanto cianobactérias, uma vez que esta diferenciação não se mostrou relevante nas análises quantitativas. Os dinoflagelados (Figura 31e) ganham importância pela sua relação com a comunidade fitoplanctônica, representando mudanças externas à construção da comunidade sucessional do biofilme, ainda que efêmeras. As diatomáceas coloniais e as filamentosas (Figuras 31c e 31f) têm importância uma vez que representam estágios sucessionais

mais avançados, ainda que neste estudo, as filamentosas tenham sido subestimadas quantitativamente. Novos estudos são recomendados, reconsiderando a metodologia de contagem para filamentosas, e sugerindo uma avaliação mais precisa dos volumes (TSV e SPV), considerando matéria orgânica e cinzas.

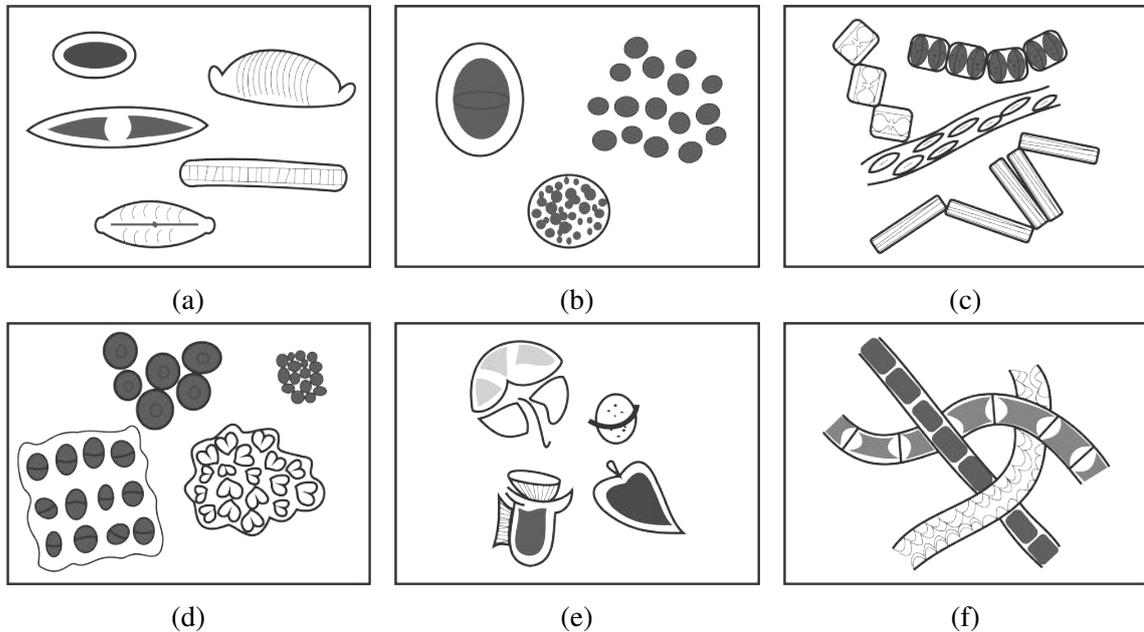


Figura 31 – Grupos de morfotipos definidos e relacionados à sucessão ao longo do presente trabalho. (a) diatomáceas penadas soítárias, (b) esféricas, microalgas verdes ou cianobactérias, (c) diatomáceas coloniais, (d) coloniais, microalgas verdes ou cianobactérias, (e) dinoflagelados e (f) filamentosas. Imagens da autora.

5.3 *Algal Turf Scrubber*

5.3.1 Maturação

Percebeu-se que a sequência de etapas que ocorrem no processo de maturação do ATS independentemente da malha que é instalada: 1 - início, momento em que a malha é colocada, e o sistema começa a circular (Figura 22a), 2 - assentamento inicial e colonização por diatomáceas (Figura 22b), 3 - o biofilme de diatomáceas se estabelece (Figura 22c), 4 - colonização da malha pelas diatomáceas em cadeia (Figura 22d), 5 - comunidade formada por diatomáceas de cadeia e também algas filamentosas (Figura 22e), 6 - sistema dominado pelas filamentosas de alta relação superfície/volume (Figura 22f), 7 - filamentosas dominam e aparecimento de foliáceas (Figura 22g), 8 - foliáceas dominam e filamentosas maiores (Figura 22h), e ainda 9 - caracterizado pelo aparecimento de fauna e início de mortalidade das algas (Figura 23d).

Apesar dos tempos de maturação diferentes (Tabela 2), as maturações de cada experimento ocorreram seguindo estas etapas, similares às dos *Algal Traps*, com variações provavelmente derivadas da diferença de turbulência e corrente da água, que modificam as exigências

ecológicas da comunidade. Por exemplo, nos ATS, ao fim do processo de maturação, as filamentosas dominam em número e em biomassa, seguidas das foliáceas, diferentemente dos *Algal Traps*. Estes dois *bauplan* provavelmente se favorecem devido à turbulência e velocidade da água do ATS, já que são fixas, e grandes. A fixação permite a manutenção da alga em um sistema turbulento, onde a camada limite diminui, e a absorção de nutrientes passa a ocorrer por advecção, processo mais eficiente que a difusão (Borchardt 1996, Dodds 2003).

A etapa 9 (Figura 23d), de início de mortalidade das algas, na realidade de operação em escala de um ATS, não é desejável, já que a partir do momento em que as algas começam a morrer, os nutrientes voltam a ficar disponíveis na coluna d'água, processo contrário ao objetivo principal de um sistema deste tipo. Assim, o ideal seria a colheita da biomassa anteriormente a esta etapa, prevenindo a senescência algal e renovando o sistema, aumentando a eficiência de remoção. O último experimento (exp3) teve um tempo de maturação maior, e apresentou um *turf* demasiadamente denso, que afetou a vazão, já que a água fica retida na rampa em maior quantidade e as algas atenuam a velocidade da água. Este experimento ocorreu na fase de senescência das algas, e os dados de biomassa seca (Figura 24) refletem isso, sendo menores do que os do segundo experimento. O exp2, apesar de o *turf* estar menos denso, apresentou valores de biomassa seca maiores já que no exp3 a morte algal acarretou no destacamento de parte da biomassa (*slough biomass*, impedindo uma avaliação mais precisa da biomassa seca).

Em um estudo recente, um modelo teórico dos fatores seletivos que determinam a composição da comunidade de ATS foi proposto (Kangas *et al.* 2017). Neste modelo, as espécies colonizadoras de ATS vêm de fontes externas e passam por filtros de processo de seleção (Weiher e Keddy 2001, Temperton 2004). Os filtros funcionam como impedimentos, que permitem apenas àquelas espécies que são adaptadas a fatores particulares a colonizar. São três filtros, um de fixação à malha, que permite que as algas filamentosas que conseguem se atracar fisicamente e resistir à velocidade da água do sistema persistam; um filtro hidráulico, que seleciona as espécies que não têm a capacidade de se fixar à malha, mas conseguem persistir na comunidade se não forem levadas pela corrente; e finalmente, o filtro de colheita, que é a interferência humana direta à seleção da comunidade algal, e favorece aquelas espécies com fixação física forte à malha, que após a colheita, conseguem crescer rapidamente assim que o sistema é re-ligado (Figura 32).

Os autores não explicitam a temporalidade dos três processos, mas descrevem as algas unicelulares como dependente das filamentosas, já que estas criam microhabitats com velocidades da água menores. Isso também fica mais claro na figura, que demonstra um processo de facilitação para a fonte de espécies unicelulares para o filtro hidráulico. Além disso, descrevem as filamentosas e que passam o filtro de fixação, como a "história principal", e a comunidade formada pelas algas unicelulares que passam pelo filtro hidráulico, como a "comunidade de fundo". É claro que as filamentosas surgem como personagem principal no processo de remoção de nutrientes, pela seu alto consumo e alta relação superfície/volume (Hoffmann 1998), e também pela sua alta biomassa. Porém, como visto no processo de maturação das rampas (Figuras 22 e

23), as diatomáceas aparecem e se fixam primeiro, formando biofilmes inteiros e consistentes. É provável que, num sistema em operação constante, onde a colonização a partir da malha crua não exista mais, as diatomáceas se tornem uma comunidade de fundo, mas durante a colonização inicial, elas têm grande importância. Além de serem as primeiras colonizadoras, elas podem facilitar o meio para adesão dos propágulos das filamentosas, já que o biofilme consiste em exopolissacarídeos e matéria orgânica, formando um tapete de substrato para estas algas maiores. Adicionado ao processo da figura de Kangas *et al.* 2017, poderia existir uma outra seta pontilhada de facilitação, indicando a preparação e melhora do substrato pelas diatomáceas para a fixação de filamentosas.

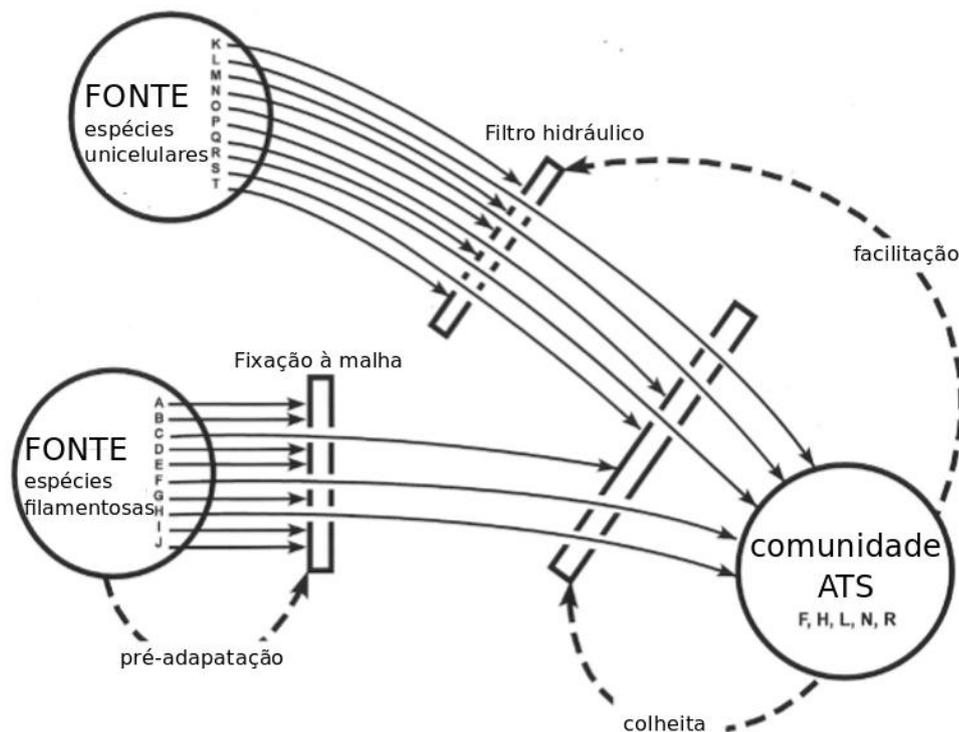


Figura 32 – Modelo teórico de fatores seletivos importantes que determinam a composição da comunidade algal de um ATS. As letras representam espécies ou morfotipos diferentes. Modificado de Kangas *et al.* 2017.

5.3.2 Remoção de nutrientes

Apesar das perspectivas interessantes de uso da Bucha como substrato, verificados nos experimentos de colonização de substratos nos *Algal Traps*, decidiu-se por não utilizá-la em um primeiro momento nas rampas do ATS pelas seguintes razões: (a) a partir de 480 h nos *Algal Traps* a Bucha mostrou desestruturação, com início de decomposição do material fibroso, (b) a possível desestruturação da bucha em menor tempo dificultaria a comparação de eficiência com as outras malhas, que são sintéticas e não decomponíveis, (c) optou-se por inicialmente conhecer o tempo de maturação do ATS nas condições climáticas regionais, e para tanto, seria importante o uso de duas malhas persistentes. A perspectiva era testar também a Bucha no ATS, porém

não houve tempo hábil para conduzir esses experimentos. Porém, estão programados outros experimentos em novos projetos utilizando Bucha, e eventualmente outros substratos orgânicos e naturais.

Com os valores das análises de nutrientes na água, apresentados nas Figuras 25, 27 e 29, foram calculadas as taxas de remoção ótimas para cada nutriente (Tabela 7). De maneira geral, o PVC se destaca pelas taxas de remoção de qualquer um dos três nutrientes, indicando uma superioridade em relação ao Nylon neste parâmetro. Como as taxas ótimas de remoção têm tempos diferentes, e isso dificulta uma comparação entre os experimentos, os valores de remoção foram normalizados. Na Tabela 8 são apresentados os valores das taxas de remoção normalizadas por litro, por área, e por energia. Estes cálculos foram baseados na área do sistema, no volume utilizado, e na quantidade de energia total recebida pelo sistema durante o experimento (vide Tabela 5). Dados reportados para um ATS em pequena escala (Wilkie e Mulbry 2002, Kebede-westhead *et al.* 2003, Kebede-Westhead, Pizarro e Mulbry 2004) chegam a $1,4 \text{ g.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ para Fósforo e a $0,75 \text{ g.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ para Nitrogênio, enquanto que para ATS de maior escala reduzem a $0,7$ e $1,1 \text{ g.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ para Fósforo e Nitrogênio, respectivamente (Adey, Kangas e Mulbry 2011). Os valores reportados são superiores aos dados obtidos neste experimento, e isso pode ser devido à composição diferente dos ATS, ou também ao fato de as águas serem diferentes. Alguns estudos mostram que até certo ponto, quanto maior a concentração de nutrientes, maior é a remoção por algas (Abolhasani *et al.* 2018, Yeoman *et al.* 1988, Posadas *et al.* 2013), e que as vias de remoção de consórcios parecidos metabolicamente são recompensadas diferentemente em água salgada e doce (Sun *et al.* 2017). A água da lagoa sofre variações grandes de salinidade, de 22 a 29 durante o experimento de colonização de substratos (Figura 15a), e atingindo 33 durante os experimentos de remoção. Ainda que durante os experimentos a salinidade não tenha variado, a variação durante a maturação e mesmo numa escala evolutiva, pode influenciar nos tipos metabólicos presentes nas rampas, mudando a cinética da remoção.

Tabela 7 – Taxas ótimas de remoção e respectivo tempo acumulado (horas), por nutriente analisado em cada malha, nos três experimentos no ATS.

Nutriente	exp1		exp2		exp3	
	PVC	NYL	PVC	NYL	PVC	NYL
Ortofosfato ($PO_4 - P$)	88,31%	85,44%	80,21%	74,40%	59,80%	32,35%
	20,5 h	28,25 h	21,4 h	21,4 h	30 h	30 h
Nitrito ($NO_2 - N$)	92,73%	87,04%	92,73%	85,84%	46,77%	83,26%
	50,35 h	28,25 h	21,4 h	46,55 h	30,25 h	2 h
N amoniacal ($N - NH_4$)	17,81%	13,48%	17,81%	13,70%	3,08%	9,22%
	0,95 h	20,5 h	46,55 h	21,4 h	30,15 h	30 h

Não encontramos dados normalizados pela energia recebida pelo sistema para remoção de nutrientes com sistemas do tipo ATS, ainda que diagramas de blocos e esquematização baseada em teorias energéticas tenha sido a base da Engenharia Ecológica e do ATS (Odum e Odum 1976). Mesmo sem base para comparação, este dado é importante, uma vez que para a

Tabela 8 – Valores de remoção normalizados por litro, por área e por energia, para cada nutriente analisado em cada malha, nos três experimentos no ATS.

Nutriente		exp1		exp2		exp3	
		PVC	NYL	PVC	NYL	PVC	NYL
Ortofosfato $PO_4 - P$	remoção média por hora (mg P.L ⁻¹ .h ⁻¹)	9,06	6,17	5,08	7,08	2,16	5,02
	remoção média por área (mg P.m ⁻² .dia ⁻¹)	135,98	92,60	76,15	106,21	32,40	75,29
	remoção média por energia (mg P.L ⁻¹ .watt ⁻¹)	3,59	3,37	4,67	6,51	1,43	3,33
Nitrato $NO_2 - N$	remoção média por hora (mg N.L ⁻¹ .h ⁻¹)	1,53	1,43	3,56	3,3	3,21	0,6
	remoção média por área (mg N.m ⁻² .dia ⁻¹)	23,01	38,30	53,39	22,76	48,07	9,00
	remoção média por energia (mg N.L ⁻¹ .watt ⁻¹)	1,49	1,40	3,27	3,04	2,14	0,40

construção de modelagem e simulações, objetivos almeçados para futuros estudos, este tipo de dado é importante e necessário (Odum e Peterson 1996).

6 Considerações finais

6.1 Conclusões

- A Bucha retém mais umidade que as malhas sintéticas utilizadas.
- A produção de biomassa seca durante o experimento de colonização de substratos foi significativamente maior na Bucha, em relação aos substratos nylon e PVC.
- A velocidade e quantidade de algas durante o assentamento e a adesão na Bucha foram maiores.
- A sucessão da colonização dos diferentes substratos se dá de maneira similar: de diatomáceas penadas a esféricas verdes e cianobactérias.
- Para a colonização de diatomáceas em cadeias, os substratos sintéticos se mostraram mais propícios.
- Variações da comunidade fitoplanctônica não são imperativas à colonização de substratos.
- O processo de maturação do sistema ATS é similar nos diferentes substratos sintéticos.
- O uso de sistemas do tipo ATS para remediação e pesquisa científica é possível em clima tropical, inclusive em sistemas de água salobra.
- O ATS construído é eficiente na remoção de nutrientes como o Fosfato e o Nitrito.
- A remoção de nitrogênio amoniacal no sistema construído é pouco eficiente.
- O ATS dominado por filamentosas se mostrou mais eficiente por unidade de energia, quando comparado ao mesmo sistema dominado por diatomáceas.
- O substrato PVC se mostrou mais eficiente para remoção de nutrientes em relação ao mesmo sistema com malha de Nylon.

6.2 Trabalhos futuros

Além dos objetivos específicos desenvolvidos neste trabalho devido à sua realidade acadêmica, objetivos adjacentes foram conquistados. Um novo sistema foi construído, e com ele, uma nova linha de pesquisa, com potencial para dezenas de estudos subsequentes. Ainda assim, melhorias podem e dever ser feitas para facilitar a operação do sistema, além de aumentar sua vida útil, quais sejam:

- Modificar o sistema de tubulações, facilitando a troca entre os regimes fechado e aberto, trocando parte dos tubos rígidos de PVC para mangueiras.
- Restaurar as estruturas dos cavaletes de suporte da rampa, para aumentar a mobilidade e estabilidade das rampas, considerando em um futuro próximo testes com novas inclinações, e também para aumentar a versatilidade do sistema.
- Re-avaliar a escolha de bombas periféricas, uma vez que percebemos que as atuais não tem vida útil muito longa. Para o regime aberto, uma bomba submersa pode ser mais adequada, e isso leva à necessidade de uma rede para a bomba dentro da lagoa; e também para o regime fechado, uma bomba submersa poderia ser mais adequada, mas de menor calibre do que a anterior.
- Automatização de coleta parâmetros, tanto para o monitoramento do sistema quanto para experimentos.

Novos testes de remoção de nutrientes podem ser feitos, com novas propostas:

- Novos substratos (bucha, outros substratos sintéticos e naturais).
- Testar diferentes intervalos de coleta, implementando testes de nutrientes *in loco* e em tempo real.
- Análise da biomassa, sobre a variação bioquímica, metabolismo, compostos e composição (C, H, N, P, S).
- Análises globais, incluindo metagenômica e metabolômica da comunidade.
- Testes e acompanhamento do tempo de maturação, para estabelecer operação de colheita.

E sobre os experimentos de colonização de substratos, os aparatos se mostraram muito práticos como ferramenta para este tipo de estudo. Novas técnicas e metodologias devem ser implementadas para a coleta das amostras, incluindo re-avaliar a importância e forma de condução das réplicas de composição da comunidade. Estudos como o desenvolvido na etapa dos *Alga Traps* podem ser realizados no sistema ATS.

Referências

- ABDEL-RAOUF, N.; AL-HOMAIDAN, A.; IBRAHEEM, I. Microalgae and wastewater treatment. *Saudi Journal of Biological Sciences*, Elsevier, v. 19, n. 3, p. 257–275, 2012. Citado na página 23.
- ABOLHASANI, M. H.; PIRESTANI, N.; NEHBANDANI, A.; SANATINIA, B. Nutrient removal from municipal wastewater using mixture of two algae, *scenedesmus obliquus* and *chlorella vulgaris*. *Int. J. Aqu. Sci*, v. 9, n. 1, p. 44–50, 2018. Citado na página 72.
- ADEY, W.; HACKNEY, L. The composition and production of tropical marine algal turf in laboratory and field experiments. *The Biology, Ecology and Mariculture of Mithrax spinosissimus Utilizing Cultured Algal Turfs*. Mariculture Institute, Washington, DC, 1989. Citado na página 24.
- ADEY, W.; LUCKETT, C.; JENSEN, K. Phosphorus removal from natural waters using controlled algal production. *Restoration Ecology*, Wiley Online Library, v. 1, n. 1, p. 29–39, 1993. Citado na página 25.
- ADEY, W. H. *Algal Turf Scrubber*. 1982. USP 4333263 AN 194726. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 65.
- ADEY, W. H.; KANGAS, P. C.; MULBRY, W. Algal turf scrubbing: Cleaning surface waters with solar energy while producing a biofuel. *BioScience*, v. 61, n. 6, p. 434–441, 2011. Citado 4 vezes nas páginas 24, 25, 65 e 72.
- ADEY, W. H.; LOVELAND, K. *Dynamic aquaria: building living ecosystems*. [S.l.]: Academic Press, 2011. Citado na página 25.
- ADEY, W. H.; MILLER, J. B.; HAYEK, L.-A. C.; THOMPSON, J. G. Algal turf scrubber (ats) flowways on the great wicomico river, chesapeake bay: Productivity, algal community structure, substrate and chemistry. *Journal Phycology*, v. 49, p. 489–501, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 26, 28 e 65.
- AKHTAR, N.; IQBAL, J.; IQBAL, M. Enhancement of lead (ii) biosorption by microalgal biomass immobilized onto loofa (*luffa cylindrica*) sponge. *Engineering in life sciences*, Wiley Online Library, v. 4, n. 2, p. 171–178, 2004. Citado na página 65.
- ARAMPATZI, S. I.; GIANNOGLOU, G.; DIZA, E. Biofilm formation: A complicated microbiological process. *Aristotle University Medical Journal*, v. 38, n. 2, p. 21–29, 2011. Citado na página 26.
- BERGEN, S. D.; BOLTON, S. M.; FRIDLEY, J. L. Design principles for ecological engineering. *Ecological Engineering*, v. 18, p. 201–210, 2001. Citado na página 24.
- BERNER, F.; HEIMANN, K.; SHEEHAN, M. Microalgal biofilms for biomass production. *Journal of Applied Phycology*, v. 27, p. 1793–1804, 2015. Citado na página 26.
- BERTHON, V.; BOUCHEZ, A.; RIMET, F. Using diatom life-forms and ecological guilds to assess organic pollution and trophic level in rivers: a case study of rivers in south-eastern france. *Hydrobiologia*, Springer, v. 673, n. 1, p. 259–271, 2011. Citado na página 26.

- BIGGS, B. J. Patterns in benthic algae of streams. *Algal ecology: freshwater benthic ecosystems*, Academic Press, p. 31–56, 1996. Citado na página 66.
- BLERSCH, D. M.; KANGAS, P. C.; MULBRY, W. Autonomous benthic algal cultivator under feedback control of ecosystem metabolism. *Environmental Engineering Science*, Mary Ann Liebert, Inc. 140 Huguenot Street, 3rd Floor New Rochelle, NY 10801 USA, v. 30, n. 2, p. 53–60, 2013. Citado na página 24.
- BLERSCH, D. M.; KANGAS, P. C.; MULBRY, W. W. Turbulence and nutrient interactions that control benthic algal production in an engineered cultivation raceway. *Algal Research*, v. 2, p. 107–112, 2013. Citado na página 26.
- BLERSCH, D. M.; KARDEL, K.; CARRANO, A. L.; KAUR, M. Customized 3d-printed surface topography governs species attachment preferences in a fresh water periphyton community. *Algal Research*, v. 21, p. 52–57, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 66.
- BORCHARDT, M. Nutrients. In: STEVENSON, R. J.; BOTHWELL, M. L.; LOWE, R. L.; THORP, J. H. (Ed.). *Algal ecology: Freshwater benthic ecosystem*. 84 Theobladn Road, London WC1X8RR, UK.: Academic Press, 1996. cap. 7, p. 183–227. Citado na página 70.
- BRUNE, K. D.; BAYER, T. Engineering microbial consortia to enhance biomining and bioremediation. *Frontiers in microbiology*, Frontiers, v. 3, p. 203, 2012. Citado na página 23.
- CHOUDHARY, P.; PRAJAPATI, S. K.; KUMAR, P.; MALIK, A.; PANT, K. K. Development and performance evaluation of an algal biofilm reactor for treatment of multiple wastewaters and characterization of biomass for diverse applications. *Bioresource technology*, Elsevier, v. 224, p. 276–284, 2017. Citado na página 26.
- CHRISTENSON, L. B.; SIMS, R. C. Rotating algal biofilm reactor and spool harvester for wastewater treatment with biofuels by-products. *Biotechnology and bioengineering*, v. 109, n. 7, p. 1674–1684, 2012. Citado na página 24.
- CRAGGS, R. J. Wastewater treatment by algal turf scrubbing. *Water Science and Technology*, v. 44, n. 11, p. 427–433, 2001. Citado na página 25.
- CRAGGS, R. J.; ADEY, W. H.; JESSUP, B. K.; OSWALD, W. J. A controlled stream mesocosm for tertiary treatment of sewage. *Ecological Engineering*, Elsevier, v. 6, n. 1, p. 149–169, 1996. Citado na página 24.
- CRAGGS, R. J.; ADEY WALTER, H.; JENSON, K. R.; JOHN, M. S. S.; GREEN, F. B.; OSWALD, W. J. Phosphorus removal from wastewater using an algal turf scrubber. *Water Science and Technology*, v. 33, p. 191–198, 1996. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 25.
- DEMIR, H.; TOP, A.; BALKOSE, D.; ULKU, S. Dye adsorption behavior of luffa cylindrica fibers. *Journal of Hazardous Materials*, Elsevier, v. 153, n. 1, p. 389–394, 2008. Citado na página 65.
- DODDS, W. K. The role of periphyton in phosphorus retention in shallow freshwater aquatic systems. *Journal of Phycology*, Wiley Online Library, v. 39, n. 5, p. 840–849, 2003. Citado na página 70.
- D’AIUTO, P.; PATT, J.; ALBANO, J.; SHATTERS, R.; EVENS, T. Algal turf scrubbers: periphyton production and nutrient recovery on a south florida citrus farm. *Ecological Engineering*, Elsevier, v. 75, p. 404–412, 2015. Citado na página 28.

EARTH, E. tools for G. *KML Shapes - Polygon Area*. 2018. <<http://www.earthpoint.us/Shapes.aspx>>. Accessed February 20, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 31.

ELSER, J. J.; URABE, J. The stoichiometry of consumer-driven nutrient recycling: Theory, observations, and consequences. *Ecology*, Wiley Online Library, v. 80, n. 3, p. 735–751, 1999. Citado na página 23.

EUTROPHICATION. *Merriam-Webster's collegiate dictionary*. New edition. Springfield, MA: Merriam-Webster Incorporated, 2016. Citado na página 24.

FELISBERTO, S.; MURAKAMI, E. Papel do perifíton na ciclagem de nutrientes e na teia trófica. In: . São Carlos, São Paulo, Brazil: RiMa Editora, 2013. cap. 3, p. 23–43. Citado na página 24.

FLEMMING, H.-C.; WINGENDER, J. The biofilm matrix. *Nature Reviews Microbiology*, Nature Publishing Group, v. 8, n. 9, p. 623, 2010. Citado na página 26.

GAO, X.; ENDO, H.; AGATSUMA, Y. Seasonal changes in photosynthesis, growth, nitrogen accumulation, and salinity tolerance of *Chaetomorpha crassa* (Cladophorales, Chlorophyceae). *Journal of Applied Phycology*, Springer, p. 1–8, 2018. Citado na página 25.

GLIBERT, P. M.; HEIL, C. A.; WILKERSON, F. P.; DUGDALE, R. C. Nutrients and harmful algal blooms: Dynamic kinetics and flexible nutrition. *Global Ecology and Oceanography of Harmful Algal Blooms*, Springer, p. 93–112, 2018. Citado na página 25.

GOLDMAN, J. C. Outdoor algal mass cultures—ii. photosynthetic yield limitations. *Water Research*, Elsevier, v. 13, n. 2, p. 119–136, 1979. Citado na página 25.

GOTTSCHALK, S.; KAHLERT, M. Shifts in taxonomical and guild composition of littoral diatom assemblages along environmental gradients. *Hydrobiologia*, Springer, v. 694, n. 1, p. 41–56, 2012. Citado na página 26.

GRASHOFF, K.; KREMLING, K.; EHRHARDT, M. *Methods of Seawater Analysis*. Weinheim; New York; Chichester; Brisbane; Singapore; Toronto: Wiley-VCH, 1999. Citado na página 36.

GROMMEN, R.; VERSTRAETE, W. Environmental biotechnology: the ongoing quest. *Journal of Biotechnology*, Elsevier, v. 98, n. 1, p. 113–123, 2002. Citado na página 23.

GUPTA, S.; PANDEY, R.; PAWAR, S. B. Microalgal bioremediation of food-processing industrial wastewater under mixotrophic conditions: Kinetics and scale-up approach. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, Springer, p. 1–10, 2016. Citado na página 23.

HAMMED, A. M.; PRAJAPATI, S. K.; SIMSEK, S.; SIMSEK, H. Growth regime and environmental remediation of microalgae. *Algae*, The Korean Society of Phycology, v. 31, n. 3, p. 189–204, 2016. Citado na página 23.

HARMS, H.; SCHLOSSER, D.; WICK, L. Y. Untapped potential: exploiting fungi in bioremediation of hazardous chemicals. *Nature Reviews Microbiology*, Nature Publishing Group, v. 9, n. 3, p. 177, 2011. Citado na página 23.

HILLMAN, W. S.; CULLEY, D. D. The uses of duckweed: The rapid growth, nutritional value, and high biomass productivity of these floating plants suggest their use in water treatment, as feed crops, and in energy-efficient farming. *American Scientist*, JSTOR, v. 66, n. 4, p. 442–451, 1978. Citado na página 23.

- HOFFMANN, J. P. Wastewater treatment with suspended and nonsuspended algae - minireview. *Journal of Phycology*, 1998. Citado 3 vezes nas páginas 23, 26 e 70.
- HOH, D.; WATSON, S.; KAN, E. Algal biofilm reactors for integrated wastewater treatment and biofuel production: a review. *Chemical Engineering Journal*, Elsevier, v. 287, p. 466–473, 2016. Citado na página 25.
- HUANG, Y.; ZHENG, Y.; LI, J.; LIAO, Q.; FU, Q.; XIA, A.; FU, J.; SUN, Y. Enhancing microalgae biofilm formation and growth by fabricating microgrooves onto the substrate surface. *Bioresource Technology*, Elsevier, 2018. Citado na página 26.
- HUNTLEY, M. E.; NONOMURA, A. M.; NOUE, J. De la. *Algal culture systems*. [S.l.: s.n.], 1989. 111-130 p. Citado na página 25.
- KANGAS, P.; MULBRY, W. Nutrient removal from agricultural drainage water using algal turf scrubbers and solar power. *Bioresource technology*, Elsevier, v. 152, p. 484–489, 2014. Citado na página 28.
- KANGAS, P.; MULBRY, W.; KLAVON, P.; LAUGHINGHOUSE, H. D.; ADEY, W. High diversity within the periphyton community of an algal turf scrubber on the susquehanna river. *Ecological Engineering*, Elsevier, v. 108, p. 564–572, 2017. Citado 4 vezes nas páginas 18, 28, 70 e 71.
- KANWAR, P.; MISHRA, T.; MUKHERJEE, G. Microbial bioremediation of hazardous heavy metals. In: *Bioremediation and Sustainable Technologies for Cleaner Environment*. [S.l.]: Springer, 2017. p. 281–293. Citado na página 23.
- KARDEL, K.; CARRANO, A. L.; BLERSCH, D. M.; KAUR, M. Preliminary development of 3d-printed custom substrata for benthic algal biofilms. *3D Printing and Additive Manufacturing*, Mary Ann Liebert, Inc. 140 Huguenot Street, 3rd Floor New Rochelle, NY 10801 USA, v. 2, n. 1, p. 12–19, 2015. Citado na página 66.
- KEBEDE-WESTHEAD, E.; PIZARRO, C.; MULBRY, W. Treatment of swine manure effluent using freshwater alga: production, nutrient recovery, and elemental composition of algal biomass at four effluent loading rates. *Journal of Applied Phycology*, v. 18, p. 41–46, 2006. Citado na página 26.
- KEBEDE-WESTHEAD, E.; PIZARRO, C.; MULBRY, W. W. Treatment of dairy manure effluent using freshwater algae: elemental composition of algal biomass at different manure loading rates. *Journal of agricultural and food chemistry*, ACS Publications, v. 52, n. 24, p. 7293–7296, 2004. Citado na página 72.
- KEBEDE-WESTHEAD, E.; PIZARRO, C.; MULBRY, W. W.; WILKIE, A. C. Production and nutrient removal by periphyton grown under different loading rates of anaerobically digested flushed dairy manure 1. *Journal of Phycology*, Wiley Online Library, v. 39, n. 6, p. 1275–1282, 2003. Citado na página 72.
- KESAANO, M.; SIMS, R. C. Algal biofilm based technology for wastewater treatment. *Algal Research*, Elsevier, v. 5, p. 231–240, 2014. Citado na página 25.
- KHANI, Z.; AHMAD, K. Bioaccumulation of heavy metals and metalloids in luffa (*Luffa cylindrica* L.) irrigated with domestic wastewater in jhang, pakistan: a prospect for human nutrition. *Pakistan Journal of Botany*, v. 47, n. 1, p. 217–224, 2015. Citado na página 65.

KRUK, C.; HUSZAR, V. L.; PEETERS, E. T.; BONILLA, S.; COSTA, L.; LURLING, M.; REYNOLDS, C. S.; SCHEFFER, M. A morphological classification capturing functional variation in phytoplankton. *Freshwater Biology*, Wiley Online Library, v. 55, n. 3, p. 614–627, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 28, 67 e 68.

KRUK, C.; SEGURA, A. M. The habitat template of phytoplankton morphology-based functional groups. *Hydrobiologia*, Springer, v. 698, n. 1, p. 191–202, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 28, 67 e 68.

LAIDANI, Y.; HANINI, S.; HENINI, G. Use of fiber luffa cylindrica for waters traitement charged in copper. study of the possibility of its regeneration by desorption chemical. *Energy Procedia*, Elsevier, v. 6, p. 381–388, 2011. Citado na página 65.

LEBRET, K.; THABARD, M.; HELLIO, C. Algae as marine fouling organisms: adhesion damage and prevention. In: *Advances in Marine Antifouling Coatings and Technologies*. 1. ed. Sawston, Cambridge: Woodhead Publishing, 2009. cap. 4, p. 80–112. Citado 3 vezes nas páginas 15, 26 e 27.

LEGRESLEY, M.; MCDERMOTT, G. Counting chamber methods for quantitative phytoplankton analysis—haemocytometer, palmer-maloney cell and sedgewick-rafter cell. *Microscopic and molecular methods for quantitative phytoplankton analysis. UNESCO (IOC Manuals and Guides)*, p. 25–30, 2010. Citado na página 37.

LI, H.-M.; TANG, H.-J.; SHI, X.-Y.; ZHANG, C.-S.; WANG, X.-L. Increased nutrient loads from the changjiang (yangtze) river have led to increased harmful algal blooms. *Harmful Algae*, Elsevier, v. 39, p. 92–101, 2014. Citado na página 25.

LIEBIG, J. F. von. *Principles of agricultural chemistry: With special reference to the late researches made in England*. [S.l.]: Walton & Maberly, 1855. Citado na página 24.

LINDINO, C. A.; MARCINIAK, A. A.; JR, A. C. G.; STREY, L. Adsorption of cadmium in vegetable sponge (luffa cylindrica). *Revista Ambiente & Água*, SciELO Brasil, v. 9, n. 2, p. 212–223, 2014. Citado na página 65.

MIESZKIN, S.; CALLOW, M. E.; CALLOW, J. A. Interactions between microbial biofilms and marine fouling algae: a mini review. *Biofouling*, Taylor & Francis, v. 29, n. 9, p. 1097–1113, 2013. Citado na página 26.

MITSCH, W. Ecological engineering: the 7-year itch. *Ecological Engineering*, v. 10, p. 119–130, 1998. Citado na página 23.

MONROE, D. Looking for chinks in the armor of bacterial biofilms. *PLoS biology*, Public Library of Science, v. 5, n. 11, 2007. Citado na página 26.

MUFFLER, K.; LAKATOS, M.; SCHLEGEL, C.; STRIETH, D.; KUHNE, S.; ULBER, R. Application of biofilm bioreactors in white biotechnology. In: *Productive Biofilms*. [S.l.]: Springer, 2014. p. 123–161. Citado na página 26.

MULBRY, W.; KANGAS, P.; KONDRAD, S. Toward scrubbing the bay: nutrient removal using small algal turf scrubbers on chesapeake bay tributaries. *Ecological Engineering*, v. 36, p. 536–541, 2010. Citado 5 vezes nas páginas 24, 25, 26, 28 e 65.

- MULBRY, W.; KEBEDE-WASTHEAD, E.; PIZARRO, C.; SIKORA, L. Recycling of manure nutrients: use of algal biomass from dairy manure treatment as a slow release fertilizer. *Bioresource Technology*, v. 96, p. 451–458, 2005. Citado na página 26.
- MULBRY, W.; KONDRAD, S.; PIZARRO, C. Biofertilizers from algal treatment of dairy and swine manure effluents: characterization of algal biomass as a slow release fertilizer. *Journal of Vegetable Science*, Taylor & Francis, v. 12, n. 4, p. 107–125, 2006. Citado na página 26.
- MULBRY, W.; WILKIE, A. Growth of benthic freshwater algae on dairy manures. *Journal of Applied Phycology*, v. 13, p. 301–306, 2001. Citado na página 26.
- OBOH, I.; ALUYOR, E. Luffa cylindrica-an emerging cash crop. *African Journal of Agricultural Research*, Academic Journals, v. 4, n. 8, p. 684–688, 2009. Citado na página 65.
- ODUM, H. T. Man in the ecosystem. In: LOCKWOOD CONFERENCE ON THE SUBURBAN FOREST AND ECOLOGY. [S.l.]: Bull. Conn. Agric. Station, 1962. v. 652, p. 57–75. Citado na página 23.
- ODUM, H. T.; ODUM, B. Concepts and methods of ecological engineering. *Ecological Engineering*, v. 20, p. 339–361, 2003. Citado na página 24.
- ODUM, H. T.; ODUM, E. C. *Energy basis for man and nature*. [S.l.]: McGraw-Hill Book Company, New York, 1976. Citado na página 72.
- ODUM, H. T.; PETERSON, N. Simulation and evaluation with energy systems blocks. *Ecological Modelling*, Elsevier, v. 93, n. 1-3, p. 155–173, 1996. Citado na página 73.
- ODUM, H. T.; SILER, W. L.; BEYERS, R. J.; ARMSTRONG, N. *Experiments with engineering of marine ecosystems*. [S.l.]: Institute of Marine Science, 1963. Citado na página 23.
- OZKAN, A.; BERBEROGLU, H. Adhesion of algal cells to surfaces. *Biofouling*, Taylor & Francis, v. 29, n. 4, p. 469–482, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 15, 26 e 27.
- OZKAN, A.; BERBEROGLU, H. Cell to substratum and cell to cell interactions of microalgae. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, Elsevier, v. 112, p. 302–309, 2013. Citado na página 26.
- PASSY, S. I. Diatom ecological guilds display distinct and predictable behavior along nutrient and disturbance gradients in running waters. *Aquatic Botany*, Elsevier, v. 86, n. 2, p. 171–178, 2007. Citado na página 68.
- PAVLINERI, N.; SKOULIKIDIS, N. T.; TSIHRINTZIS, V. A. Constructed floating wetlands: a review of research, design, operation and management aspects, and data meta-analysis. *Chemical Engineering Journal*, Elsevier, v. 308, p. 1120–1132, 2017. Citado na página 25.
- PIPPA, F. D.; BOHN, A.; CONGESTRI, R.; PHILIPPIS, R. D.; ALBERTANO, P. Capsular polysaccharides of cultured phototrophic biofilms. *Biofouling*, Taylor & Francis, v. 25, n. 6, p. 495–504, 2009. Citado na página 26.
- PIZARRO, C.; KEBEDE-WESTHEAD, E.; MULBRY, W. Nitrogen and phosphorous removal rate using small algalturfs grown with dairy manure. *Journal of Applied Phycology*, v. 14, p. 469–473, 2002. Citado na página 28.
- PIZARRO, C.; MULBRY, W.; BLERSCH, D.; KANGAS, P. An economic assessment of algal turf scrubber technology for treatment of dairy manure effluent. *Ecological Engineering*, v. 26, p. 321–327, 2006. Citado na página 24.

POSADAS, E.; GARCIA-ENCINA, P.-A.; SOLTAU, A.; DOMINGUEZ, A.; DIAZ, I.; MUNOZ, R. Carbon and nutrient removal from centrates and domestic wastewater using algal–bacterial biofilm bioreactors. *Bioresource technology*, Elsevier, v. 139, p. 50–58, 2013. Citado na página 72.

RAWAT, I.; KUMAR, R.; BUX, T. Dual role of microalgae: Phycoremediation of domestic wastewater and biomass production for sustainable biofuels production. *Applied Energy*, v. 88, p. 3411–3424, 2011. Citado na página 23.

RAY, N. E.; TERLIZZI, D. E.; KANGAS, P. C. Nitrogen and phosphorus removal by the algal turf scrubber at an oyster aquaculture facility. *Ecological Engineering*, Elsevier, v. 78, p. 27–32, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 28.

RICHMOND, A. Open systems for the mass production of photoautotrophic microalgae outdoors: physiological principles. *Journal of Applied Phycology*, Springer, v. 4, n. 3, p. 281–286, 1992. Citado na página 25.

RIMET, F.; BOUCHEZ, A. Life-forms, cell-sizes and ecological guilds of diatoms in european rivers. *Knowledge and management of Aquatic Ecosystems*, EDP Sciences, n. 406, p. 01–12, 2012. Citado na página 68.

ROSS, M. E.; STANLEY, M. S.; DAY, J. G.; SEMIAO, A. J. A comparison of methods for the non-destructive fresh weight determination of filamentous algae for growth rate analysis and dry weight estimation. *Journal of Applied Phycology*, Springer, p. 1–12, 2017. Citado na página 32.

SINGH, R.; PAUL, D.; JAIN, R. K. Biofilms: implications in bioremediation. *Trends in microbiology*, Elsevier, v. 14, n. 9, p. 389–397, 2006. Citado na página 25.

SMITH, V. H.; TILMAN, G. D.; NEKOLA, J. C. Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. *Environmental pollution*, Elsevier, v. 100, n. 1-3, p. 179–196, 1999. Citado na página 24.

SUBASHCHANDRABOSE, S. R.; RAMAKRISHNAN, B.; MEGHARAJ, M.; VENKATESWARLU, K.; NAIDU, R. Consortia of cyanobacteria/microalgae and bacteria: biotechnological potential. *Biotechnology advances*, Elsevier, v. 29, n. 6, p. 896–907, 2011. Citado na página 24.

SUN, W.; ZHAO, H.; WANG, F.; LIU, Y.; YANG, J.; JI, M. Effect of salinity on nitrogen and phosphorus removal pathways in a hydroponic micro-ecosystem planted with *Lythrum salicaria* L. *Ecological Engineering*, Elsevier, v. 105, p. 205–210, 2017. Citado na página 72.

TANNER, C. C. Plants for constructed wetland treatment systems—a comparison of the growth and nutrient uptake of eight emergent species. *Ecological engineering*, Elsevier, v. 7, n. 1, p. 59–83, 1996. Citado na página 23.

TEMPERTON, V. M. *Assembly rules and restoration ecology: bridging the gap between theory and practice*. [S.l.]: Island Press, 2004. v. 5. Citado na página 70.

THIENEMANN, A. *Der Sauerstoff im eutrophen und obligotrophen See*. Stuttgart, Germany: Schweizerbart Science Publishers, 1928. Citado na página 24.

TODD, J.; BROWN, J. E.; WELLS, E. Ecological design applied. *Ecological Engineering*, v. 20, p. 421–440, 2003. Citado na página 24.

- TODD, J.; JOSEPHSON, B. The design of living technologies for waste treatment. *Ecological Engineering*, v. 6, p. 109–136, 1996. Citado na página 24.
- TODD, N. J.; TODD, J. *From eco-cities to living machines: principles of ecological design*. [S.l.]: North Atlantic Books, 1994. Citado na página 23.
- TRAVIESO, L.; BENITEZ, F.; DUPEIRON, R. Sewage treatment using immobilized microalgae. *Bioresource technology*, Elsevier, v. 40, n. 2, p. 183–187, 1992. Citado na página 24.
- TRBOJEVIC, I.; JOVANOVIC, J.; KOSTIC, D.; POPOVIC, S.; KRIZMANIC, J.; KARADASIC, V.; SIMIC, G. S. Structure and succession of periphyton in an urban reservoir: artificial substrate specificity. *Oceanological and Hydrobiological Studies*, De Gruyter, v. 46, n. 4, p. 379–392, 2017. Citado na página 68.
- VALETA, J.; VERDEGEM, M. Removal of nitrogen by algal turf scrubber technology in recirculating aquaculture system. *Aquaculture Research*, Wiley Online Library, v. 46, n. 4, p. 945–951, 2015. Citado na página 28.
- VIKTORIA, B.; LUKACS, A.; TOROK, P.; KOKAI, Z.; NOVAK, Z.; ENIKHON. Combined eco-morphological functional groups are reliable indicators of colonisation processes of benthic diatom assemblages in a lowland stream. Citado na página 26.
- WEIHER, E.; KEDDY, P. *Ecological assembly rules: perspectives, advances, retreats*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2001. Citado na página 70.
- WELLS, M. L.; KARLSON, B. Harmful algal blooms in a changing ocean. *Global Ecology and Oceanography of Harmful Algal Blooms*, Springer, p. 77–90, 2018. Citado na página 25.
- WETHERBEE, R.; LIND, J. L.; BURKE, J.; QUATRANO, R. S. Minireview—the first kiss: establishment and control of initial adhesion by raphid diatoms. *Journal of Phycology*, Wiley Online Library, v. 34, n. 1, p. 9–15, 1998. Citado 3 vezes nas páginas 15, 26 e 27.
- WILKIE, A. C.; MULBRY, W. W. Recovery of dairy manure nutrients by benthic freshwater algae. *Bioresource technology*, Elsevier, v. 84, n. 1, p. 81–91, 2002. Citado na página 72.
- WU, Y.; HAN, R.; YANG, X.; ZHANG, Y.; ZHANG, R. Long-term performance of an integrated constructed wetland for advanced treatment of mixed wastewater. *Ecological Engineering*, Elsevier, v. 99, p. 91–98, 2017. Citado na página 23.
- YEOMAN, S.; STEPHENSON, T.; LESTER, J.; PERRY, R. The removal of phosphorus during wastewater treatment: a review. *Environmental Pollution*, Elsevier, v. 49, n. 3, p. 183–233, 1988. Citado na página 72.
- ZERAATKAR, A. K.; AHMADZADEH, H.; TALEBI, A. F.; MOHEIMANI, N. R.; MCHENRY, M. P. Potential use of algae for heavy metal bioremediation, a critical review. *Journal of environmental management*, Elsevier, v. 181, p. 817–831, 2016. Citado na página 23.
- ZHUANG, X.; CHEN, J.; SHIM, H.; BAI, Z. New advances in plant growth-promoting rhizobacteria for bioremediation. *Environment international*, Elsevier, v. 33, n. 3, p. 406–413, 2007. Citado na página 23.

Apêndices

APÊNDICE A – Dados brutos do experimento de colonização de substratos

Tabela 9 – Dados brutos das variáveis descritivas referentes ao experimento de colonização de substratos com os *Algal Traps*.

Data	Tempo (horas)	Salinidade	Temperatura (°C)	Oxigênio Dissolvido (mg/L)	Saturação de Oxigênio Dissolvido (%)	pH	Turbidez (NTU)	Clorofila <i>in vivo</i> (RFU)	Ficocianina <i>in vivo</i> (RFU)	Clorofila extraída
22-Mar-17	0	26	24,6	7,8	96,50	6,86	2,21	309,4	7,05	15,43
23-Mar-17	24	25	23,4	7,4	94,50	6,91	2,31	300,7	7,28	14,32
24-Mar-17	48	27	25,9	5,6	65,50	6,90	2,29	411,9	9,84	25,01
27-Mar-17	120	28	28,5	5,2	62,50	6,89	2,19	328,0	10,25	25,3
29-Mar-17	168	29	24,00	5,2	64,00	6,61	1,21	235,2	7,04	10,81
31-Mar-17	216	28	28,8	7,3	90,50	6,7	1,98	322,5	10,13	19,9
2-Apr-17	264	-	-	-	-	-	-	316,80	9,87	19,63
4-Apr-17	312	25	27,7	5,1	68,50	6,81	5,98	315,2	6,62	-
7-Apr-17	384		25,5	6,0	76,00	7,07	12,87	211,2	15,39	-
11-Apr-17	480	27	26,70	6,50	84,00	6,89	4,81	268,80	10,94	13,53
13-Apr-17	528	22	27,40	12,80	168,00	7,06	2,99	221,30	7,61	24,47
18-Apr-17	648	28	25,20	9,90	122,50	7,03	1,04	326,60	13,48	-
20-Apr-17	696	28	26,70	10,40	124,50	6,94	5,03	289,40	7,28	13,1

Tabela 10 – Dados brutos dos nutrientes da água da lago durante o experimento de colonização de substratos com os *Algal Traps*.

Data	Tempo acumulado (horas)	Ortofosfato (μ M)	Nitrito (μ M)	N amoniacal (μ M)
22-Mar-17	0	0,2631	0,0873	0,0140
24-Mar-17	48	0,2631	0,0867	0,0132
27-Mar-17	120	0,3033	0,0868	0,0131
29-Mar-17	168	0,3635	0,0881	0,0171
31-Mar-17	216	0,4036	0,0866	0,0138
2-Apr-17	264	0,4638	0,0877	0,0136
13-Apr-17	528	0,9254	0,0888	0,0159
20-Apr-17	696	1,2866	0,0881	0,0142

Tabela 11 – Lista dos códigos utilizados no procedimento de contagem e identificação de morfotipos do experimento de assentamento algar nos *Algal Traps*.

e(2.5)	p3(15x10)	p10(25x5)	p21(35x7.5)	p36(55x10)	E(60x25)	pl(220x25)	F4(60x5)
e(5)	p3(20x5)	p10(25x10)	p21(35x10)	p37(40x10)	E(60x35)	pl(220x30)	F4(100x5)
e(7.5)	p3(20x10)	p10(30x5)	p21(37.5x5)	p37(45x15)	E(65x30)	pl(225x30)	F4(215x10)
e(10)	p3(25x5)	p10(30x7.5)	p21(40x10)	p37(50x15)	E(65x32.5)	pl(235x30)	F4(235x10)
e(15)	p3(30x10)	p10(30x10)	p21(45x5)	p37(55x15)	E(65x35)	pl(240x30)	F4(300x10)
e(20)	p3(35x10)	p10(35x5)	p21(45x10)	N1(10x5)	E(65x40)	pl(240x35)	F5(140x2.5)
e(25)	p3(40x10)	p10(35x7.5)	p21(45x12.5)	N1(20x5)	E(70x30)	pl(250x20)	F5(210x2.5)
e(30)	p3(65x20)	p10(35x10)	p21(50x5)	N1(20x10)	E(70x35)	pl(250x25)	F5(570x2.5)
e(35)	p4(5x2.5)	p10(40x5)	p21(50x10)	N1(25x5)	E(70x40)	pl(250x30)	F5(620x2.5)
e(40)	p4(10x2.5)	p10(40x7.5)	p21(55x15)	N1(25x10)	E(75x25)	pl(250x40)	F5(650x2.5)
c(5)	p4(10x5)	p10(40x10)	p22(40x15)	N1(27.5x5)	E(75x30)	pl(260x30)	Oscill(100x10)
c(10)	p4(12.5x5)	p10(45x5)	p22(45x10)	N1(30x5)	E(75x35)	pl(260x35)	Oscill(125x10)
c(15)	p4(15x5)	p10(45x10)	p22(50x7.5)	N1(30x7.5)	E(75x40)	pl(275x30)	Oscill(150x10)
c(20)	p4(15x10)	p10(45x15)	p22(50x15)	N1(30x10)	E(80x20)	pl(280x50)	Oscill(300x12.5)
c(25)	p4(20x5)	p10(50x5)	p22(55x20)	N1(35x5)	E(80x30)	pl(310x30)	Oscill(320x10)
c(30)	p4(20x7.5)	p10(50x10)	p22(70x10)	N1(35x7.5)	E(80x35)	Mel(10x10).1/2	Oscill(350x10)
c(35)	p4(20x10)	p11(30x10)	p22(75x7.5)	N1(35x10)	E(80x40)	Mel(10x10).1/4	Oscill(350x12.5)
c(40)	p4(20x15)	p11(30x15)	p22(100x10)	N1(37.5x5)	E(82.5x30)	Mel(10x10).1/8	Oscill(450x12.5)
c(50)	p4(25x5)	p11(30x20)	p22(110x5)	N1(40x5)	E(82.5x42.5)	Mel(10x10).1/37	Oscill(400x12.5)
c(60)	p4(25x10)	p11(35x15)	p22(140x5)	N1(40x7.5)	E(85x40)	Mel(20x17.5).1/16	Oscill(385x25)
c(80)	p4(35x5)	p11(40x10)	p22(150x12.5)	N1(40x10)	E(90x40)	Mel(20x17.5).1/28	Oscill(680x10)
c(150)	p4(30x7.5)	p11(40x15)	p22(165x10)	N1(40x15)	E(95x30)	Mel(25x20).1/6	Oscill(1200x10)

(Tabela 11 continuada da página anterior)

cc(2.5).1/2	p4(30x10)	p11(40x25)	p22(200x10)	N1(45x5)	E(100x40)	Mel(55x50).1/4	GB(30)
cc(5).1/2	p4(30x15)	p11(40x30)	p22(225x7.5)	N1(45x7.5)	E(125x40)	Ach(40x15)	GB(35)
cc(5).1/4	p4(35x7.5)	p12(10x5)	p22(240x5)	N1(45x10)	E(130x35)	Ach(50x5)	GB(40)
cc(5).1/8	p4(40x10)	p12(30x10)	p22(250x5)	N1(45x15)	E(130x40)	Ach(50x20)	GB(50)
cc(5).1/9	p4(45x10)	p12(40x15)	p22(285x7.5)	N1(50x5)	E(140x40)	Ach(50x25)	GB(60)
cc(5).1/10	p4(45x15)	p13(10x5)	p22(340x10)	N1(50x10)	d1(15x10)	Ach(55x10)	GB(65)
cc(5).1/12	p4(50x7.5)	p13(20x10)	p23(40x10)	N1(50x15)	d1(25x15)	Ach(55x17.5)	GB(70)
cc(5).1/13	p4(55x10)	p13(25x10)	p24(20x5)	N1(55x15)	d1(30x15)	Ach(60x10)	GB(80)
cc(5).1/16	p4(55x15)	p13(35x10)	p24(30x10)	N1(55x20)	d1(35x20)	Ach(60x15)	GB(85)
cc(7.5).1/2	p4(65x10)	p13(50x7.5)	p24(35x7.5)	N1(65x10)	d1(40x30)	Ach(80x10)	GB(100)
cc(7.5).1/4	p4(65x17.5)	p14(40x5)	p24(40x10)	N1(80x10)	d1(45x20)	Thal(10x5).1/3	Gb(110)
cc(10).1/2	p4(70x20)	p14(50x7.5)	p24(110x15)	N1(90x10)	d1(65x35)	Thal(10x5).1/4	GB(140)
cc(10).1/4	p4(110x15)	p14(60x5)	p25(35x10)	N1(250x25)	d1(70x40)	Thal(10x5).1/8	GB(150)
cc(10).1/8	p5(10x5)	p14(175x10)	p25(40x10)	N1(265x25)	d1(75x40)	Thal(20x5).1/2	GB(180)
cc(15).1/4	p5(15x5)	p14(180x7.5)	p25(45x10)	N2(10x5)	d1(80x30)	Thal(20x5).1/3	GB(190)
cc(30).1/2	p5(15x10)	p14(295x7.5)	p25(50x15)	N2(20x5)	d1(80x45)	Thal(20x5).1/4	GB(200)
Synecho(10x5)	p5(20x5)	p15(12.5x5)	p26(35x10)	N2(20x7.5)	d1(85x35)	Isth(20x10)	GB(210)
Synecho(10x7.5)	p5(20x10)	p15(15x5)	p26(40x7.5)	N2(25x5)	d1(95x40)	Isth(25x10)	GB(230)
Synecho(15x10)	p5(25x10)	p15(20x5)	p26(45x15)	N2(25x10)	d1(217.5x35)	d(10)	GB(240)
Synecho(20x10)	p5(30x10)	p15(25x10)	p26(50x7.5)	N2(30x5)	Nlo(20x2.5)	d(15)	GB(250)
Synecho(25x25)	p5(30x15)	p15(30x5)	p26(50x10)	N2(30x7.5)	Nlo(30x2.5)	d(20)	GB(280)
Synecho(30x10)	p5(35x15)	p15(30x10)	p26(50x15)	N2(30x10)	Nlo(35x2.5)	d(25)	GB(320)
Synecho(30x25)	p5(40x10)	p15(35x5)	p26(112.5x15)	N2(35x5)	Nlo(40x2.5)	d(27.5)	GB(500)
Synecho(35x20)	p5(40x15)	p15(35x10)	p27(35x7.5)	N2(35x7.5)	Nlo(40x5)	d(30)	c1(10x2.5)

(Tabela 11 continuada da página anterior)

Synecho(40x20)	p6(10x5)	p15(35x15)	p27(35x10)	N2(35x10)	Nlo(45x2.5)	d(40)	c1(10x2.5)
Synecho(40x25)	p6(15x7.5)	p15(40x5)	p27(35x15)	N2(35x15)	Nlo(45x5)	spi(100x5)	c1(10x5)
Synecho(40x35)	p6(20x5)	p15(40x10)	p27(40x7.5)	N2(37.5x10)	Nlo(50x2.5)	spi(115x5)	c1(10x25)
Synecho(45x25)	p6(25x7.5)	p15(65x15)	p27(40x10)	N2(40x5)	Nlo(50x5)	spi(120x5)	c1(12.5x2.5)
Synecho(45x40)	p6(25x15)	p16(15x5)	p27(45x10)	N2(40x7.5)	Nlo(55x5)	spi(145x5)	c1(15x2.5)
Synecho(50x45)	p6(30x10)	p16(25x5)	p27(60x10)	N2(40x10)	Nlo(60x2.5)	Sce(25x15)	c1(15x5)
Synecho(55x45)	p6(30x15)	p16(25x7.5)	p27(50x15)	N2(45x5)	Nlo(60x5)	Gramm(10x5)	c1(15x7.5)
Synecho(60x25)	p6(40x20)	p16(35x5)	p27(55x15)	N2(45x7.5)	Nlo(65x5)	Gramm(15x5)	c1(20x5)
Merismo(5x5).1/4	p6(35x25)	p16(35x12.5)	p28(25x7.5)	N2(45x10)	Nlo(70x2.5)	Gramm(20x5)	c1(20x7.5)
Merismo(5x5).1/8	p7(15x5)	p16(40x10)	p28(30x10)	N2(50x5)	Nlo(70x5)	Gramm(20x10)	c1(25x5)
p1(10x5)	p7(25x5)	p16(125x15)	p28(35x7.5)	N2(50x7.5)	Nlo(75x5)	Proro(20x15)	c1(30x2.5)
p1(15x5)	p7(25x10)	p17(10x5)	p28(35x15)	N2(50x10)	Nlo(80x5)	Proro(25x15)	c1(30x5)
p1(15x7.5)	p7(25x15)	p17(20x5)	p28(40x10)	N2(60x25)	Nlo(80x10)	Proro(30x20)	c1(32.5x5)
p1(15x10)	p7(30x5)	p17(20x10)	p28(40x15)	N2(65x5)	Nlo(85x5)	Proro(30x25)	c1(32.5x10)
p1(20x5)	p7(30x7.5)	p17(25x10)	p28(50x20)	N2(80x5)	Nlo(90x2.5)	Cry(10x5)	c1(35x5)
p1(20x10)	p7(30x10)	p17(25x15)	p29(20x7.5)	N2(160x10)	Nlo(90x5)	Cry(10x7.5)	c1(35x7.5)
p1(20x15)	p7(35x7.5)	p17(30x10)	p29(25x5)	N2(290x10)	Nlo(95x5)	Cry(15x10)	c1(40x2.5)
p1(25x5)	p7(35x10)	p17(30x15)	p29(35x7.5)	N3(20x5)	Nlo(100x2.5)	Cry(15x12.5)	c1(40x5)
p1(25x7.5)	p7(35x15)	p17(30x20)	p29(35x10)	N3(20x10)	Nlo(100x5)	Cry(20x10)	c1(40x7.5)
p1(25x10)	p7(40x5)	p17(35x5)	p29(45x7.5)	N3(25x7.5)	Nlo(100x10)	Cry(20x15)	c1(45x5)
p1(25x15)	p7(40x10)	p17(35x10)	p29(45x10)	N3(30x5)	Nlo(105x5)	Cry(25x12.5)	c1(50x2.5)
p1(30x5)	p7(45x5)	p17(35x20)	p29(50x7.5)	N3(30x7.5)	Nlo(110x2.5)	Cry(25x17.5)	c1(55x7.5)
p1(30x10)	p7(45x15)	p17(40x15)	p30(40x20)	N3(35x20)	Nlo(110x5)	Cry(25x20)	c1(80x5)
p1(30x15)	p7(47.5x10)	p17(40x20)	p30(45x10)	N3(40x5)	Nlo(110x10)	Cry(30x20)	c1(200x5)

(Tabela 11 continuada da página anterior)

p1(30x20)	p7(50x10)	p17(45x20)	p30(50x15)	N3(45x5)	Nlo(115x5)	Cry(40x30)	c1(300x15)
p1(32.5x10)	p7(75x25)	p17(47.5x10)	p30(55x15)	N3(45x7.5)	Nlo(115x7.5)	Phalac(20x15)	c2(15x5)
p1(32.5x15)	p8(5x2.5)	p17(105x15)	p30(70x20)	N3(60x5)	Nlo(115x10)	Phalac(20x10)	c2(20x5)
p1(35x10)	p8(7.5x2.5)	p18(10x5)	p30(70x25)	N4(15x7.5)	Nlo(120x5)	Gsa(30x25)	c2(25x5)
p1(35x15)	p8(10x2.5)	p18(20x10)	p30(80x20)	N4(20x10)	Nlo(120x10)	Gsa(60x45)	c2(30x5)
p1(35x20)	p8(10x5)	p18(20x15)	p31(35x10)	N4(25x7.5)	Nlo(125x2.5)	Gsa(60x55)	c2(35x10)
p1(40x7.5)	p8(12.5x5)	p18(25x5)	p31(40x10)	N4(25x10)	Nlo(125x5)	Gsa(70x50)	c2(40x7.5)
p1(40x15)	p8(15x2.5)	p18(25x10)	p31(40x15)	N4(25x15)	Nlo(125x7.5)	Gsa(70x55)	c2(50x7.5)
p1(40x20)	p8(15x5)	p18(25x15)	p31(45x10)	N4(30x5)	Nlo(125x10)	Gsa(70x60)	c2(50x10)
p1(45x15)	p8(15x7.5)	p18(25x20)	p31(50x10)	N4(35x15)	Nlo(130x5)	e1(15x2.5).1/4	c2(60x15)
p1(45x20)	p8(15x10)	p18(27.5x12.5)	p31(50x15)	N4(40x10)	Nlo(130x10)	e1(15x2.5).1/5	c2(100x7.5)
p1(50x15)	p8(20x5)	p18(30x10)	p32(20x10)	N4(40x15)	Nlo(135x5)	e1(15x5).1/2	x1(10x5)
p1(50x20)	p8(20x7.5)	p18(30x15)	p32(25x10)	N4(65x15)	Nlo(135x7.5)	e1(45x15).1/4	x1(15x10)
p1(65x15)	p8(20x10)	p18(35x15)	p32(30x10)	A(10x5)	Nlo(140x5)	e2(45x15).1/4	x1(20x10)
p1(70x20)	p8(25x5)	p18(40x15)	p32(30x15)	A(10x7.5)	Nlo(145x5)	F1(30x10)	x1(20x15)
p1(80x30)	p8(25x7.5)	p18(40x20)	p32(45x20)	A(15x5)	Nlo(145x10)	F1(40x5)	x1(25x10)
p1(140x30)	p8(25x10)	p18(45x20)	p32(50x20)	A(15x7.5)	Nlo(150x5)	F1(50x5)	x1(25x15)
p2(5x2.5)	p8(30x5)	p18(55x25)	p33(10x5)	A(15x10)	Nlo(150x7.5)	F1(80x5)	x1(30x5)
p2(10x5)	p8(30x7.5)	p18(60x20)	p33(15x5)	A(20x7.5)	Nlo(150x10)	F1(100x5)	x1(30x10)
p2(15x7.5)	p8(30x10)	p18(110x20)	p33(30x10)	A(20x10)	Nlo(155x5)	FI(110x2.5)	x1(30x20)
p2(15x10)	p8(35x5)	p19(20x10)	p33(35x7.5)	A(25x10)	Nlo(155x10)	F1(110x5)	x1(35x7.5)
p2(20x5)	p8(40x5)	p19(30x10)	p33(35x15)	A(27.5x10)	Nlo(160x7.5)	F1(115x5)	x1(35x10)
p2(20x10)	p8(40x10)	p19(35x15)	p33(35x20)	A(30x7.5)	Nlo(170x5)	F1(120x5)	x1(35x15)
p2(25x5)	p8(45x10)	p19(40x10)	p33(40x7.5)	A(30x10)	Nlo(175x5)	F1(120x7.5)	x1(40x10)

(Tabela 11 continuada da página anterior)

p2(25x10)	p8(55x7.5)	p19(55x15)	p33(40x15)	A(35x15)	Nlo(180x5)	F1(140x5)	x1(40x15)
p2(25x15)	p8(60x5)	p20(15x5)	p33(45x7.5)	A(40x10)	Nlo(195x5)	F1(155x5)	x1(40x20)
p2(30x5)	p9(10x5)	p20(20x10)	p33(45x15)	A(40x15)	Nlo(220x5)	F1(180x5)	x1(45x10)
p2(30x7.5)	p9(20x7,5)	p20(25x5)	p33(50x15)	A(50x15)	Rhizos(50x2.5)	F2(20x2.5)	x1(45x15)
p2(30x10)	p9(20x10)	p20(25x10)	p33(55x12.5)	E(20x10)	Rhizos(70x5)	F2(30x10)	x1(45x20)
p2(30x12.5)	p9(20x12.5)	p20(25x15)	p33(55x15)	E(25x10)	pl(110x10)	F2(60x10)	x1(50x10)
p2(30x15)	p9(25x15)	p20(30x10)	p33(85x20)	E(25x12.5)	pl(115x10)	F2(60x15)	x1(50x15)
p2(35x5)	p9(30x15)	p20(30x15)	p34(15x7.5)	E(30x15)	pl(115x15)	F2(80x10)	x1(55x15)
p2(40x10)	p9(30x20)	p20(35x10)	p34(30x7.5)	E(30x20)	pl(100x20)	F2(90x15)	
p2(50x5)	p9(35x15)	p20(40x12.5)	p34(35x7.5)	E(35x15)	pl(135x30)	F2(100x2.5)	
p2(50x7.5)	p9(35x20)	p20(40x15)	p34(40x17.5)	E(35x20)	pl(140x25)	F2(115x5)	
p3(5x2.5)	p9(40x15)	p20(45x15)	p34(45x10)	E(40x15)	pl(150x25)	F2(300x10)	
p3(7.5x2.5)	p9(40x20)	p20(50x20)	p35(15x10)	E(40x20)	pl(185x30)	F3(95x15)	
p3(10x2.5)	p9(40x25)	p21(15x5)	p36(35x5)	E(40x25)	pl(195x30)	F3(100x5)	
p3(10x5)	p9(45x15)	p21(25x5)	p36(35x7.5)	E(45x20)	pl(200x20)	F3(140x10)	
p3(10x7.5)	p10(10x5)	p21(30x5)	p36(35x10)	E(50x25)	pl(200x25)	F3(200x10)	
p3(15x5)	p10(15x5)	p21(25x10)	p36(40x10)	E(55x20)	pl(200x30)	F3(220x5)	
p3(15x7.5)	p10(20x5)	p21(35x5)	p36(50x7.5)	E(55x25)	pl(215x30)	F3(450x10)	

Tabela 12 – Contagem de morfotipos com 25 categorias diferentes do *Algal Trap* com malha de PVC, onde nano $\leq 20\mu$ m; micro $\leq 200\mu$ m e $\geq 20\mu$ m; macro $\geq 200\mu$ m.

		Tempo acumulado (horas)	24 h	48 h	72 h	96 h	120 h	168 h	216 h	264 h	312 h	480 h	552 h	696 h
			Morfortipos											
Diatomáceas penadas	nano	0	87	447	917	2433	9333	152667	29417	121667	268333	7800	150667	
	micro	110	568	3133	13317	9500	32667	173333	29611	194333	388333	30733	358333	
	macro	0	16	7	217	0	67	4000	722	2333	0	0	1667	
Esféricas	Ciano- bactérias	nano	0	0	20	50	67	200	667	1444	3667	0	1600	7000
		micro	11	8	73	2117	33	200	5333	278	0	0	200	333
		macro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Microalgas verdes	nano	77	191	4153	8500	39200	107200	152000	25389	19667	32667	5400	11500
		micro	0	79	120	0	100	267	2667	2167	1000	0	0	1333
		macro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dinoflagelados	nano	0	79	87	2400	433	5133	6667	0	0	0	0	1667	
	micro	0	55	240	1333	0	3000	6000	500	0	0	0	0	
	macro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Coloniais	Ciano- bactérias	nano	0	39	260	0	100	0	1333	0	2333	0	467	2000
		micro	0	0	0	0	0	0	0	778	0	0	0	667
		macro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Microalgas verdes	nano	0	0	0	0	0	0	0	111	667	0	0	7333
		micro	0	0	0	0	0	0	0	1111	4667	0	533	3333
		macro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Diatomáceas	nano	0	0	0	0	0	0	0	556	0	41333	6600	0
		micro	0	0	0	0	0	0	0	9056	15000	6167	0	7000
		macro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	667
Green Blobs	nano	0	16	0	0	0	67	0	0	2000	4333	400	0	
	micro	0	0	0	0	0	0	1333	278	1667	1000	1133	3667	
	macro	0	0	0	167	0	67	0	278	333	0	0	0	
Filamentosas		0	0	20	83	0	0	667	389	5667	3333	267	10000	

Tabela 13 – Contagem de morfotipos com 25 categorias diferentes do *Algal Trap* com malha de *Luffa cylindrica* (bucha), onde nano $\leq 20\mu$ m; micro $\leq 200\mu$ m e $\geq 20\mu$ m; macro $\geq 200\mu$ m.

Tempo acumulado (horas)		24 h	48 h	72 h	96 h	120 h	168 h	216 h	264 h	312 h	480 h	552 h	696 h	
Diatomáceas penadas	nano	9	99	3280	8500	13800	48333	5833	65833	304000	295667	48111	235667	
	micro	396	2290	9793	45783	46067	126500	17792	81333	445000	496667	57778	327778	
	macro	0	99	80	233	200	1500	83	667	3333	2333	1778	1778	
Esféricas	Ciano- bactérias	nano	81	45	0	1017	533	2667	0	13500	17000	2000	0	5889
		micro	0	55	160	1400	1667	500	83	667	0	0	0	0
		macro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Microalgas verdes	nano	263	1962	13873	13900	71133	193333	8208	86167	57333	33667	0	89111
		micro	0	589	173	417	333	0	0	1500	0	2667	0	889
		macro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dinoflagelados	nano	405	323	500	2867	7067	5000	0	333	333	667	0	778	
	micro	0	367	627	2300	3200	2667	917	667	0	0	0	0	
	macro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Coloniais	Ciano- bactérias	nano	0	260	460	1100	0	0	0	667	2667	30000	1333	3556
		micro	0	0	0	0	0	0	0	9000	4000	0	444	2889
		macro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Microalgas verdes	nano	0	0	0	0	0	0	0	667	6000	0	222	667
		micro	0	0	0	0	0	0	0	1167	0	0	222	222
		macro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Diatomáceas	nano	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4667
		micro	0	0	0	0	0	0	0	14333	0	0	2111	0
		macro	0	0	0	0	0	0	0	0	1333	0	1000	0
Green Blobs	nano	0	81	40	233	67	0	0	0	9667	3000	667	0	
	micro	0	0	13	0	0	0	0	3833	3000	1000	1889	833	
	macro	0	35	67	367	67	1333	0	167	0	0	0	222	
Filamentosas		0	180	60	150	1067	333	42	333	3333	2333	1778	5778	

Tabela 14 – Contagem de morfotipos com 25 categorias diferentes do *Algal Trap* com malha de Nylon, onde nano $\leq 20\mu$ m; micro $\leq 200\mu$ m e $\geq 20\mu$ m; macro $\geq 200\mu$ m.

Tempo acumulado (horas)		24 h	48 h	72 h	96 h	120 h	168 h	216 h	264 h	312 h	480 h	552 h	696 h	
Diatomáceas penadas	nano	9	130	727	2100	4317	4933	243667	8583	40667	86333	13222	85889	
	micro	27	916	427	3267	2320	10867	278944	14500	51111	168000	33111	139556	
	macro	0	0	13	17	0	0	7056	333	667	3000	0	2556	
Esféricas	Ciano-bactérias	nano	0	0	73	117	317	67	56	167	3222	2333	889	1111
		micro	43	0	193	150	33	133	14222	56	333	333	444	111
		macro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Microalgas verdes	nano	400	282	3040	15733	9533	49867	267056	7556	19556	10333	1111	75333
		micro	0	69	7	250	17	200	1111	222	222	1000	1444	1000
		macro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dinoflagelados	nano	9	96	307	717	1083	800	111	111	0	333	0	111	
	micro	0	41	327	383	267	333	41722	0	0	0	0	0	
	macro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Coloniais	Ciano-bactérias	nano	141	500	27	50	0	333	0	111	444	0	0	2556
		micro	0	0	0	0	0	333	0	1389	0	0	0	0
		macro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Microalgas verdes	nano	0	0	0	0	0	0	56	556	222	0	0	3000
		micro	0	0	0	0	0	0	111	444	0	0	0	2667
		macro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Diatomáceas	nano	0	0	0	0	0	0	0	2222	13000	13333	0	0
		micro	0	0	0	0	0	0	0	944	2556	22000	3444	1556
		macro	0	0	0	0	0	0	0	333	0	667	1000	0
Green Blobs	nano	0	0	0	0	0	0	0	0	1222	4000	778	889	
	micro	0	0	0	0	0	0	0	833	2444	667	1000	778	
	macro	0	0	20	50	0	0	444	222	0	0	0	0	
Filamentosas		0	31	20	83	67	0	0	111	333	2667	1444	3111	

Tabela 15 – Contagem de morfotipos com 8 categorias diferentes do *Algal Trap* com malha de PVC.

Tempo acumulado (horas)	24 h	48 h	72 h	96 h	120 h	168 h	216 h	264 h	312 h	480 h	552 h	696 h
Diatomáceas penadas	110	671	3587	14450	11933	42067	330000	49944	318333	656667	38533	510667
Cianobactérias cocóides	11	8	93	2167	100	400	6000	1722	3667	0	1800	7333
Microalgas verdes	77	270	4273	8500	39300	107467	154667	27556	20667	32667	5400	9000
Dinoflagelados	0	134	327	3733	433	8133	12667	500	0	0	0	1667
Cianobactérias coloniais	0	55	260	167	100	133	2667	1333	6333	5333	2000	6333
Microalgas verdes coloniais	0	0	0	0	0	0	0	1222	5333	0	533	10667
Diatomáceas coloniais	0	0	0	0	0	0	0	9611	15000	47500	6600	5333
Filamentosas	0	0	20	83	0	0	667	389	5667	3333	267	10000

Tabela 16 – Contagem de morfotipos com 8 categorias diferentes do *Algal Trap* com malha de *Luffa cylindrica* (bucha).

Tempo acumulado (horas)	24 h	48 h	72 h	96 h	120 h	168 h	216 h	264 h	312 h	480 h	552 h	696 h
Diatomáceas penadas	405	2489	13153	54517	60067	176333	23708	147833	752333	794667	107667	565222
Cianobactérias cocóides	81	100	160	2417	2200	3167	83	14167	17000	2000	0	5889
Microalgas verdes	263	2552	14047	14317	71467	193333	8208	87667	57333	36333	0	90000
Dinoflagelados	405	691	1127	5167	10267	7667	917	1000	333	667	0	778
Cianobactérias coloniais	0	377	580	1700	133	1333	0	13667	19333	34000	4111	7222
Microalgas verdes coloniais	0	0	0	0	0	0	0	1833	6000	0	444	889
Diatomáceas coloniais	0	0	0	0	0	0	0	14333	1333	0	3111	4667
Filamentosas	0	180	60	150	1067	333	42	333	3333	2333	1778	5778

Tabela 17 – Contagem de morfotipos com 8 categorias diferentes do *Algal Trap* com malha de Nylon.

Tempo acumulado (horas)	24 h	48 h	72 h	96 h	120 h	168 h	216 h	264 h	312 h	480 h	552 h	696 h
Diatomáceas penadas	35	1046	1167	5383	6637	15800	307444	20556	92444	257333	46333	228000
Cianobactérias cocóides	43	0	267	267	350	200	14278	222	3556	2667	1333	1222
Microalgas verdes	400	351	3047	15983	9550	50067	268167	7889	19778	11333	2556	76333
Dinoflagelados	9	137	633	1100	1350	1133	41833	111	0	333	0	111
Cianobactérias coloniais	141	500	47	100	0	667	444	2556	4111	4667	1778	4222
Microalgas verdes coloniais	0	0	0	0	0	0	167	1000	222	0	0	5667
Diatomáceas coloniais	0	0	0	0	0	0	0	3500	15556	36000	4444	1556
Filamentosas	0	31	20	83	67	0	0	111	333	2667	1444	3111

APÊNDICE B – Dados brutos dos três
experimentos de remoção de nutrientes
no *Algal Turf Scrubber*

Tabela 18 – Dados brutos das variáveis descritivas da rampa com malha de Nylon do primeiro experimento (exp1) de remoção de nutriente no *Algal Turf Scrubber*.

Data	Horário	Tempo acumulado (horas)	Clorofila in vivo (RFU)	Ficocianina in vivo (RFU)	Clorofila extraída (ug/mL)	Oxigênio Dissolvido (mg/L)	Saturação de Oxigênio Dissolvido (%)	pH	Turbidez (RFU)	Salinidade	Condutividade (mS/cm)	Temperatura da água(°C)
18-Jul-2017	12h55	0	93,43	10,29	1,4	18,3	34	7,78	0,13	33	56,15	18,3
18-Jul-2017	13h03	0,15	252	16,63	4,56	8,6	93,5	7,65	2,08	33	56,14	19,1
18-Jul-2017	13h28	0,55	199,4	19,87	3,96	9,3	106,5	7,6	0,78	33	56,74	19,7
18-Jul-2017	13h53	0,95	209,9	22,4	2,29	17,8	89	7,86	0	33	56,56	21,2
18-Jul-2017	14h43	1,8	252,8	22,41	4,05	8,4	102	8,22	2,08	33	57,55	21,7
18-Jul-2017	15h33	2,65	296	19,91	6,2	9,4	109	8,5	4,42	33	57,52	20,3
18-Jul-2017	16h23	3,46	288,4	16,85	3,99	9,7	109	8,64	4,55	33	57,12	19,2
19-Jul-2017	17h13	4,3	318,3	25,64	4,63	9,6	104	8,92	3,64	33	57,24	16,5
19-Jul-2017	9h25	20,5	1319	47,35	10,72	5,6	58,5	7,51	6,11	33	57,63	14,4
19-Jul-2017	17h10	28,25	225,7	17,36	4,29	8	82	8,92	1,95	33	61,3	17,2
21-Jul-2017	15h15	50,35	330,1	14,71	8,55	7,4	97,5	7,61	3,25	39	60,92	27,4

Tabela 19 – Dados brutos das variáveis descritivas da rampa com malha de PVC do primeiro experimento (exp1) de remoção de nutriente no *Algal Turf Scrubber*.

Data	Horário	Tempo acumulado (horas)	Clorofila in vivo (RFU)	Ficocianina in vivo (RFU)	Clorofila extraída (ug/mL)	Oxigênio Dissolvido (mg/L)	Saturação de Oxigênio Dissolvido (%)	pH	Turbidez (RFU)	Salinidade	Condutividade (mS/cm)	Temperatura da água(°C)
18-Jul-2017	12h55	0	95,24	11,54	1,76	8,3	91,5	7,51	0,39	33	55,58	18
18-Jul-2017	13h03	0,15	192,3	12,3	3,92	8,4	95	7,61	0,78	33	56,62	19
18-Jul-2017	13h28	0,55	181,5	16,69	3,44	8,9	101	7,65	0	33	56,69	19,5
18-Jul-2017	13h53	0,95	262,8	16,84	3,13	7,1	82	8,02	0	33	56,08	20,2
18-Jul-2017	14h43	1,8	243	21,45	2,84	7,7	88	8,37	1,3	33	57,38	20,6
18-Jul-2017	15h33	2,65	254	22,01	4,17	9,2	105	8,39	1,43	33	57,03	19,5
18-Jul-2017	16h23	3,46	254,4	17,1	7,3	9,5	107	8,48	3,25	33	57,07	18,5
19-Jul-2017	17h13	4,3	296,8	20,49	3,26	9,4	101	8,77	2,21	33	57,19	16,2
19-Jul-2017	9h25	20,5	933,5	33,39	20,14	5,5	54	7,35	1,95	33	56,06	15,4
19-Jul-2017	17h10	28,25	169,9	18,1	3,28	7,3	82	7,61	2,47	33	60,92	17,4
21-Jul-2017	15h15	50,35	291,2	18,37	4,69	7,5	96	8,48	4,29	38	59,61	26,8

Tabela 20 – Dados brutos das variáveis descritivas da rampa com malha de Nylon do segundo experimento (exp2) de remoção de nutriente no *Algal Turf Scrubber*.

Data	Horário	Tempo acumulado (horas)	Clorofila in vivo (RFU)	Ficocianina in vivo (RFU)	Clorofila extraída (ug/mL)	Oxigênio Dissolvido (mg/L)	Saturação de Oxigênio Dissolvido (%)	pH	Turbidez (RFU)	Salinidade	Condutividade (mS/cm)	Temperatura da água(°degree C)
08-ago-2017	11h15	0	667,7	24,18	3,98	9,8	121	8,09	1,31	30	56,15	23,2
08-ago-2017	11h25	0,15	396,8	19,27	25,52	11,6	147,5	8,59	3,35	30	56,14	23,8
08-ago-2017	11h45	0,45	200,3	16,98	8,56	11,4	136,5	8,87	1,71	30	56,74	24,8
08-ago-2017	12h15	1	159,4	16,02	5,01	9,3	124,5	9,33	0,89	30	56,56	27,6
08-ago-2017	13h15	2	123,2	16,71	3,45	8,2	111	9,83	0,92	30	57,55	28,5
08-ago-2017	14h15	3	147,4	15,55	2,25	7,3	98,5	9,89	0,02	30	57,52	29
08-ago-2017	15h15	4	191,6	20,74	3,87	7	89	9,68	0,11	31	57,24	26,7
09-ago-2017	8h40	21,4	175,1	17,14	4,75	11	127	8,93	0	30	57,63	18,9
09-ago-2017	15h20	28,4	213,4	17,41	10,57	8,8	113,5	9,72	1,08	30	61,3	26

Tabela 21 – Dados brutos das variáveis descritivas da rampa com malha de PVC do segundo experimento (exp2) de remoção de nutriente no *Algal Turf Scrubber*.

Data	Horário	Tempo acumulado (horas)	Clorofila in vivo (RFU)	Ficocianina in vivo (RFU)	Clorofila extraída (ug/mL)	Oxigênio Dissolvido (mg/L)	Saturação de Oxigênio Dissolvido (%)	pH	Turbidez (RFU)	Salinidade	Condutividade (mS/cm)	Temperatura da água(°degree C)
08-ago-2017	11h15	0	1104	35,25	3,53	10,9	129	8,12	1,33	30	55,58	22,8
08-ago-2017	11h25	0,15	538,6	21,63	15,7	13,5	166,5	8,56	3,69	30	56,62	23,8
08-ago-2017	11h45	0,45	318,3	20,63	8,16	11,7	151	9,03	2,55	30	56,69	24,8
08-ago-2017	12h15	1	141	13	4,54	9,6	127	9,44	0,89	30	56,08	27,3
08-ago-2017	13h15	2	120,2	14,88	1,55	8,1	109,5	9,92	0,92	30	57,38	28,4
08-ago-2017	14h15	3	163,5	15,47	1,86	6,9	94,5	9,95	0,13	30	57,03	28,8
08-ago-2017	15h15	4	355,7	21,16	12,19	6,6	81,5	9,62	0,59	31	57,19	26,2
09-ago-2017	8h40	21,4	148,6	16,43	6,01	10,9	119	9,07	1,44	30	56,06	17,7
09-ago-2017	15h20	28,4	494,6	19,39	19,39	8	103,5	9,59	1,06	30	60,92	25,6

Tabela 22 – Dados brutos das variáveis descritivas da rampa com malha de Nylon do terceiro experimento (exp3) de remoção de nutriente no *Algal Turf Scrubber*.

Data	Horário	Tempo acumulado (horas)	Clorofila in vivo (RFU)	Ficocianina in vivo (RFU)	Clorofila extraída (ug/mL)	Oxigênio Dissolvido (mg/L)	Saturação de Oxigênio Dissolvido (%)	pH	Turbidez (RFU)	Salinidade	Condutividade (mS/cm)	Temperatura da água(°C)
30-out-2017	11h25	0	232,6	14,56	14,38	7,9	96,5	6,92	1,76	31	46,3	23,8
30-out-2017	11h55	0,5	130,7	13,65	9,52	8,7	107	7,05	0,75	31	46,63	23,6
30-out-2017	12h25	1	88,7	17,43	2,31	8,6	105,5	7,21	0,4	31	46,6	23,7
30-out-2017	13h25	2	97,03	16,87	2,54	8,9	112,5	7,6	0,07	31	46,86	25,3
30-out-2017	15h25	4	229,3	14,97	15,62	7,7	98	8,11	1,96	32	46,86	26,9
30-out-2017	17h25	6	92,95	17,45	2,12	7,9	101,5	8,14	1,63	32	47,12	25,9
31-out-2017	17h25	30	122,5	14,54	4	9	110	6,95	0,2	33	48,36	22,8
31-out-2017	17h40	30,25	139,1	16,39	5,13	7,2	94,5	7,81	0,11	33	58,21	28,3

Tabela 23 – Dados brutos das variáveis descritivas da rampa com malha de PVC do terceiro experimento (exp3) de remoção de nutriente no *Algal Turf Scrubber*.

Data	Horário	Tempo acumulado (horas)	Clorofila in vivo (RFU)	Ficocianina in vivo (RFU)	Clorofila extraída (ug/mL)	Oxigênio Dissolvido (mg/L)	Saturação de Oxigênio Dissolvido (%)	pH	Turbidez (RFU)	Salinidade	Condutividade (mS/cm)	Temperatura da água(°C)
30-out-2017	11h25	0	166,4	7,496	4,75	7,4	91,5	6,9	1,73	31	46,01	23,6
30-out-2017	11h55	0,5	136,4	5,869	4,09	8,3	101,5	6,93	0,95	31	46,1	23,5
30-out-2017	12h25	1	84,37	4,68	2,05	8	98	7,06	0,28	31	46,11	23,7
30-out-2017	13h25	2	66,08	3,184	1,45	8,1	102	7,41	0,38	30	45,79	25,1
30-out-2017	15h25	4	108,8	10,03	2,97	7,1	90,5	7,91	0,23	31	46,61	26,7
30-out-2017	17h25	6	70,66	5,769	1,65	7,7	97,5	8,01	0,51	31	46,74	25,8
31-out-2017	17h25	30	110,1	6,981	3,17	8,8	107	6,74	0,28	32	46,38	22,7
31-out-2017	17h40	30,25	132	5,849	3,76	6,9	93	7,9	0,25	32	51,68	28,1

Tabela 24 – Dados brutos dos nutrientes durante o primeiro experimento do ATS (exp1).

Data	Horário	Tempo (horas)	Ortofosfato (μ M)		Nitrito (μ M)		N amoniacal (μ M)	
			PVC	NYL	PVC	NYL	PVC	NYL
18-Jul-2017	12h55	0	2,079	2,290	1,688	1,929	0,016	0,015
18-Jul-2017	13h03	0,15	1,989	2,200	1,176	1,838	0,014	0,013
18-Jul-2017	13h28	0,55	1,748	2,410	1,507	1,778	0,014	0,013
18-Jul-2017	13h53	0,95	1,688	1,808	0,815	1,297	0,014	0,013
18-Jul-2017	14h43	1,8	0,996	1,327	0,905	1,327	0,014	0,013
18-Jul-2017	15h33	2,65	0,875	1,206	0,785	1,628	0,015	0,014
18-Jul-2017	16h23	3,46	0,755	1,086	0,634	1,447	0,014	0,014
19-Jul-2017	17h13	4,3	0,544	0,966	0,153	1,327	0,013	0,014
19-Jul-2017	9h25	20,5	0,273	0,333	0,604	1,357	0,013	0,013
19-Jul-2017	17h10	28,25	0,243	0,394	0,123	0,333	0,013	0,013
21-Jul-2017	15h15	50,35	0,333	0,785	0,120	0,250	0,013	0,013

Tabela 25 – Dados brutos dos nutrientes durante o segundo experimento do ATS (exp2).

Data	Horário	Tempo (horas)	Ortofosfato (μ M)		Nitrito (μ M)		N amoniacal (μ M)	
			PVC	NYL	PVC	NYL	PVC	NYL
08-ago-2017	11h15	0	1,989	1,537	1,688	1,929	0,016	0,015
08-ago-2017	11h25	0,15	1,989	1,417	1,176	1,838	0,014	0,013
08-ago-2017	11h45	0,45	1,929	1,297	1,507	1,778	0,014	0,013
08-ago-2017	12h15	1	1,808	1,387	0,815	1,297	0,014	0,013
08-ago-2017	13h15	2	1,447	1,447	0,905	1,327	0,015	0,014
08-ago-2017	14h15	3	0,394	0,394	0,785	1,628	0,014	0,014
09-ago-2017	8h40	21,4	1,146	1,568	0,153	0,273	0,013	0,013
09-ago-2017	15h20	28,4	0,454	0,815	0,123	0,333	0,013	0,013

Tabela 26 – Dados brutos dos nutrientes durante o terceiro experimento do ATS (exp3).

Data	Horário	Tempo (horas)	Ortofosfato (μ M)		Nitrito (μ M)		N amoniacal (μ M)	
			PVC	NYL	PVC	NYL	PVC	NYL
30-out-2017	11h25	0	2,651	2,109	0,966	2,531	0,013	0,014
30-out-2017	11h55	0,5	2,431	2,069	0,604	2,170	0,013	0,014
30-out-2017	12h25	1	2,069	1,909	0,665	1,507	0,013	0,014
30-out-2017	13h25	2	1,869	1,849	0,514	1,176	0,013	0,013
30-out-2017	15h25	4	1,066	1,427	0,574	0,695	0,013	0,013
30-out-2017	17h25	30	2,892	3,233	0,514	0,424	0,013	0,013
31-out-2017	17h25	30,25	0,454	0,815	0,123	0,333	0,013	0,013

APÊNDICE C – Tabelas
complementares *Algal Turf Scrubber*

Tabela 27 – Tabela descritiva dos materiais utilizados na construção e operação do *Algal Turf Scrubber*, de acordo com o Regime de Operação.

Componente do ATS	Materiais utilizados para construção	
	Regime: sistema aberto	Regime: sistema fechado
Rampas	fibra de vidro	
Cavaletes	caibros de pinus autoclavado (7 cm x 11 cm x 1 m) ripas de pinus autoclavado (2 cm x 11 cm x 45 cm)	
Casa da Bomba	caibros de pinus autoclavado (7 cm x 11 cm x 1 m) haletas de pinus autoclavado (1 cm x 3 cm x 1 m)	
Tubulação (ponteira)	canos de PVC água fria \varnothing 32 mm	não se aplica
Ponteira	canos de PVC DN100 canos de PVC água fria \varnothing 32 mm conexões PVC DN100 e \varnothing 32 mm malha de nylon	não se aplica
Tubulação (saída bomba)	canos de PVC água fria \varnothing 32 mm conexões PVC \varnothing 32 mm registro de pressão \varnothing 32 mm	canos de PVC água fria \varnothing 32 mm conexões PVC \varnothing 32 mm
Calha (saída rampa)	bocal para calha 100 mm adaptadores 100 mm - 40 mm	
Tubulação (saída rampa)	canos de PVC DN40 conexões PVC DN40	conexões PVC DN40 sifão de pia DN40
Reservatórios	não se aplica	Caixas d'água 100 litros (fibra de vidro)
Tubulação (retorno)	não se aplica	canos de PVC DN40 adaptaores DN40 - 32 mm