



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS E ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

FABIANE BERNARDI DE SOUZA

**PRODUÇÃO DE BIOMASSA DE ALGAS E MACRÓFITAS EM
LAGOAS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES SANITÁRIOS**

Porto Alegre

Dezembro 2018

FABIANE BERNARDI DE SOUZA

**PRODUÇÃO DE BIOMASSA DE ALGAS E MACRÓFITAS EM LAGOAS DE
TRATAMENTO DE EFLUENTES SANITÁRIOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO
APRESENTADO AO CURSO DE ENGENHARIA
AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO GRANDE DO SUL COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO
DE ENGENHEIRO AMBIENTAL.

Orientador: Luiz Olinto Monteggia

Coorientador: José Carlos Alves Barroso Júnior

Porto Alegre

Dezembro 2018

CIP - Catalogação na Publicação

de Souza, Fabiane Bernardi
Produção de Biomassa de Algas e Macrófitas em
Lagoas de Tratamento de Efluentes Sanitários / Fabiane
Bernardi de Souza. -- 2018.
99 f.
Orientador: Luiz Olinto Monteggia.

Coorientador: José Carlos Alves Barroso Júnior.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto
de Pesquisas Hidráulicas, Curso de Engenharia
Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2018.

1. tratamento de efluente. 2. lagoa de alta taxa.
3. produção de biomassa de algas . 4. produção de
biomassa de macrófitas. 5. aproveitamento da biomassa
de algas e macrófitas. I. Monteggia, Luiz Olinto,
orient. II. Barroso Júnior, José Carlos Alves,
coorient. III. Título.

FABIANE BERNARDI DE SOUZA

PRODUÇÃO DE BIOMASSA DE ALGAS E MACRÓFITAS EM LAGOAS DE
TRATAMENTO DE EFLUENTES SANITÁRIOS

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul defendido e aprovado em **10/dezembro/2018** pela Comissão avaliadora constituída pelos professores:

Banca Examinadora:

.....
Ms. José Carlos Alves Barroso Júnior - Coorientador

.....
Prof.^a Dra. Lúcia Helena Ribeiro Rodrigues - Departamento de Obras Hidráulicas

.....
Prof.^a Dra. Maria Cristina Almeida Silva – Departamento de Engenharia Ambiental

Conceito:.....

Dedico este trabalho a meus pais, Artur e Celina, que sempre me apoiaram e especialmente durante o período do meu Curso de Graduação estiveram ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pela oportunidade de fazer o curso.

Ao futuro doutor José Carlos Alves Barroso Júnior, meu coorientador, por todo o auxílio, tempo, paciência, correções e dedicação que contribuíram grandemente para a realização deste Trabalho de Conclusão de Curso.

Ao meu orientador Luiz Olinto Monteggia, pelo suporte no pouco tempo que lhe coube, pelas suas correções e incentivos.

Ao Fernando Schuck de Oliveira e professor Arno Krenzinger, pelo tempo, conhecimento e ajuda na construção do instrumento utilizado.

Aos meus pais, pelo incentivo e apoio durante a graduação.

Agradeço a todos os professores por me proporcionar o conhecimento não apenas racional, mas a manifestação do caráter e afetividade da educação no processo de formação profissional, por tanto que se dedicaram a mim, não somente por terem me ensinado, mas por terem me feito aprender. A palavra mestre, nunca fará justiça aos professores dedicados aos quais sem nominar terão os meus eternos agradecimentos.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

A persistência é o caminho do êxito.

Charles Chaplin

RESUMO

SOUZA, F. B. de. Produção de biomassa de algas e macrófitas em lagoas de tratamento de efluentes sanitários. 2018. 99 f. Trabalho de Conclusão (Graduação em Engenharia Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

O tratamento de esgotos domésticos no Brasil ainda é muito deficiente, principalmente nos municípios de pequeno porte. Uma alternativa viável de tratamento é a utilização de reator UASB seguida por Lagoas de Alta Taxa (LAT) de algas ou macrófitas. Estas últimas geram biomassa passível de aproveitamento. Entender a dinâmica da biomassa é de fundamental importância para otimizar sua produção. Assim, esse estudo procurou avaliar a influência de parâmetros ambientais na produção de algas e macrófitas em LAT. Para isso, foram levantados dados de produção de biomassa de algas e macrófitas, alcalinidade e temperatura no interior da lagoa de estudos prévios conduzidos pelo grupo de pesquisa Bioenergia e Ambiente, além de informações de radiação solar e temperatura atmosféricas do banco de dados nacional (INMET) e geradas informações de radiação solar no interior da LAT por meio de amostragem com o uso de um equipamento confeccionado com sensor de fotodiodo. Os parâmetros investigados foram a radiação solar, temperatura e dióxido de carbono (este último foi obtido a partir das análises de alcalinidade). Os dados analisados de estudos anteriores e obtidos do INMET abrangeram o período de dezembro de 2014 a fevereiro de 2015 e as amostragens ocorreram no mês de outubro de 2018. As amostragens foram realizadas para compreender a dinâmica da biomassa de algas com o efeito da radiação no interior da lagoa e como elas também influem sobre esta variável, e então aplicar este aos dados de radiação do período de dezembro de 2014 a fevereiro de 2015. Todas as análises foram efetuadas através do software *Excel*. Os resultados mostraram tendência de aumento da biomassa de algas e macrófitas com a elevação dos parâmetros avaliados. Em alguns casos essa correlação apresentou linearidade baixa, pois outros fatores agiam em conjunto no desenvolvimento da biomassa. Em relação as algas, a produção foi maior em relação a temperatura quando os dias eram ensolarados e quanto maior a radiação solar menor era a penetração de luz no interior da lagoa devido ao aumento da concentração de algas. A produtividade de algas no período avaliado foi cerca de 3,75 kg/dia sob as condições de operação da LAT. No que se refere as macrófitas, percebeu-se a necessidade de efetuar o controle de densidade a fim de evitar a sobreposição das mesmas (que pode resultar em condições adversas para o seu crescimento). Os parâmetros temperatura e radiação solar apresentaram uma maior influência sobre a biomassa no período em que não houve o controle

dessa. A produção durante o período sem e com controle de densidade foram de, respectivamente, 2,7 kg/dia e 2,04 kg/dia. A produtividade foi menor no segundo momento, pois no período avaliado a radiação solar e temperatura eram inferiores ao primeiro. A variável mais importante para as algas e macrófitas são, respectivamente, o dióxido de carbono e a temperatura, segundo a Análise dos Componentes Principais (PCA) realizado nos dados de estudo. Segundo as referências pesquisadas, ambas as biomassas apresentaram potencial de aproveitamento para a fabricação de biocombustíveis, alimentação animal e adubo. Neste estudo foi verificado que os critérios avaliados se tratam de possíveis fatores limitantes do sistema e que a produtividade da biomassa de algas é mais elevada que a de macrófitas na profundidade estudada, pois as algas são cultivadas na coluna de água (em relação ao volume, portanto dependem da profundidade) enquanto as macrófitas, na superfície (em relação à área); entretanto, outros fatores devem ser considerados (por exemplo, separação e adensamento) para aproveitamento final da biomassa produzida nas lagoas de tratamento.

Palavras chave: algas, macrófitas, temperatura, radiação solar, dióxido de carbono, produção, lagoa

ABSTRACT

SOUZA, F. B. de. Biomass production of algae and macrophytes in wastewater treatment ponds. 2018. 99 p. Final Paper (Graduation in Environmental Engineering) - Institute for Hydraulic Research. Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

The treatment of domestic wastewater in Brazil is still very poor, especially in small municipalities. A viable treatment alternative is the use of a UASB reactor followed by algal or macrophyte High Rate Ponds (HRP). The latter generate biomass that can be exploited. Understanding the dynamics of biomass is fundamental to optimize its production. Thus, this study sought to evaluate the influence of environmental parameters on algal and macrophyte production in HRP. For this, algae and macrophytes biomass production data, alkalinity and temperature inside the pond were collected from previous studies conducted by the Bioenergy and Environment research group, as well as information on solar radiation and atmospheric temperature from the national databases (INMET) and generate information of solar radiation inside the HRP through sampling using a photodiode sensor equipment. The parameters investigated were solar radiation, temperature and carbon dioxide (the latter was obtained from alkalinity analyzes). Data analyzed from previous studies and obtained from INMET covered the period from December 2014 to February 2015 and the samplings occurred from October 2018. Samplings were realized to understand the dynamics of algal biomass with the effect of radiation within the pond and how they also influence this variable, and then apply it to radiation data from December 2014 to February 2015. All analyzes were performed using *Excel* software. The results showed a tendency to increase algal and macrophyte biomass with the increase of the evaluated parameters. In some cases this correlation was low linearity, because other factors acted together in the development of biomass. In relation to algae, the production was higher in relation to the temperature when the days were sunny and the greater the solar radiation the lesser the light penetration inside the pond due to the increase of the algae concentration. The productivity of algae in the evaluation period was about 3.75 kg/day under the operating conditions of HRP. Regarding macrophytes, it was realized the need to perform density control in order to avoid overlapping (which may result in adverse conditions for their growth). Temperature and solar radiation parameters had a greater influence on biomass in the period when it was not controlled. The production during the period without and with density control were, respectively, 2.7 kg/day and 2.04 kg/day. The productivity was lower in the second moment, because in the evaluated period the solar radiation and temperature were inferior to the first one. The most important variable for algae and macrophytes are, respectively, carbon dioxide and temperature, according to the Principal Component Analysis (PCA) performed in

the study data. According to the researched references, both biomasses presented potential for use in the manufacture of biofuels, animal feed and fertilizer. In this study it was verified that the evaluated parameters are possible limiting factors of the system and the algal biomass productivity is higher than macrophytes in the studied depth, because the algae are cultivated in the water column (in relation to the volume, therefore depend on depth) while macrophytes on the surface (relative to the area). However, other factors must be considered (for example, separation and densification) for the final use of biomass produced in the treatment ponds.

Keywords: algae, macrophytes, temperature, solar radiation, carbon dioxide, production, pond

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representação esquemática do reator UASB	18
Figura 2. (a) Configuração de uma LAT em circuito múltiplo e (b) único	22
Figura 3. <i>Chlorella</i> sp.	25
Figura 4. <i>Euglena</i> sp.	26
Figura 5. Espectro do comprimento de onda da luz solar	31
Figura 6. <i>Lemna minor</i>	35
Figura 7. <i>Spirodela intermedia</i>	36
Figura 8. <i>Spirodela polyrhiza</i>	37
Figura 9. <i>Wolffia columbiana</i>	38
Figura 10. Representação esquemática das fontes de obtenção dos dados	53
Figura 11. Reator UASB	54
Figura 12. LAT's de algas (direita) e macrófitas (esquerda) operadas em paralelo	54
Figura 13. Dimensões das LAT's	55
Figura 14. Pá impulsora de mistura	55
Figura 15. Sensor de radiação solar	56
Figura 16. Vista do piranômetro e valor da constante de conversão	57
Figura 17. Piranômetro (centro) e sensores (borda) sendo calibrados	58
Figura 18. Computador e datalogger utilizados para a medição automática	59
Figura 19. Sensor de fotodiodo.	60
Figura 20. Instrumento confeccionado para medir radiação	61
Figura 21. Relação da temperatura com a produção de biomassa	68
Figura 22. Crescimento de algas para diferentes condições climáticas	69
Figura 23. Diagrama pC vs. pH para o sistema carbonato (T=25°C)	71
Figura 24. Dinâmica da biomassa de algas em relação ao CO ₂	72
Figura 25. Macrófitas espalhadas na LAT de algas quando desligada a mistura	73
Figura 26. Perfil de radiação solar na LAT de algas	74
Figura 27. Dinâmica da biomassa de algas em relação a radiação solar	75
Figura 28. Relação entre biomassa de algas e radiação solar no interior da lagoa	78

Figura 29. Dinâmica da produção de biomassa com a temperatura.....	80
Figura 30. Dinâmica da produção de biomassa com a radiação solar.....	81
Figura 31. Dinâmica da produção de biomassa com a radiação solar discretizado	82
Figura 32. Dinâmica da produção de biomassa com a temperatura.....	84
Figura 33. Dinâmica da produção de biomassa com a radiação solar.....	84
Figura 34. Mapa fatorial das macrófitas.....	86
Figura 35. Mapa fatorial das algas	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores para a produtividade de biomassa de microalgas.....	28
Tabela 2. Produção de biomassa de algas em diferentes locais.....	29
Tabela 3. Valores médios de produção de biomassa em diferentes concentrações de nutrientes	42
Tabela 4. Composição média do biogás.....	46
Tabela 5. Produção de biogás específica e teor de metano dos respectivos grupos de substâncias	47
Tabela 6. Oleaginosas cultivadas no Brasil com potencial para produção de biodiesel	48
Tabela 7. Produtividade média de bioetanol por área para diferentes culturas	49
Tabela 8. Percentual de lipídios em algumas microalgas em relação à massa seca	51
Tabela 9. Comparação de produção de óleo/biodiesel de diversas oleaginosas	51
Tabela 10. Curvas de calibração de cada sensor.	59
Tabela 11. Medidas de radiação solar.....	74
Tabela 12. Concentração de biomassa de algas nos dias de medição de radiação solar.....	77
Tabela 13. Penetração da radiação solar na lagoa segundo a concentração de algas	77
Tabela 14. Desenvolvimento crescente das macrófitas.....	79
Tabela 15. Períodos de decaimento de macrófitas.....	79
Tabela 16. Variação da produção de biomassa em relação à radiação em semanas consecutivas	82
Tabela 17. Produção média da biomassa de algas e macrófitas	85
Tabela 18. Composição macrófitas	88

LISTA DE SIGLAS

LAT: Lagoa de Alta Taxa

UASB: Reator Anaeróbio de Manto de Lodo de Fluxo Ascendente

SNIS: Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento

INMET: Instituto Nacional de Meteorologia

RFA: Radiação Fotossinteticamente Ativa

RSD: Resíduo Sólido Domiciliar Orgânico

DBO: Demanda Bioquímica de Oxigênio

DBO₅: DBO consumida em 5 dias

DQO: Demanda Química de Oxigênio

OD: Oxigênio Dissolvido

COD: Carbono Orgânico Dissolvido

SSV: Sólidos Suspensos Voláteis

MOS: Matéria Orgânica Seca

ST: Sólidos Totais

PT: Fósforo Total

NTK: Nitrogênio Kjeldahl Total

pH: potencial de hidrogênio

N: Nitrogênio

P: Fósforo

C: Carbono orgânico

CO₂: dióxido de carbono

NH₄: nitrogênio amoniacal ionizado

NH₃: nitrogênio amoniacal livre

N₂: gás nitrogênio

CH₄: gás metano

PCA: Análise de Componentes Principais

m: metro

cm: centímetro

mm: milímetro

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	16
2.1. Objetivo Geral	16
2.2. Objetivos Específicos	16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1. Reator UASB.....	17
3.2. Lagoas	18
3.2.1. Lagoas de Estabilização	19
3.2.2. Lagoas de Alta Taxa	21
3.3. Algas	23
3.3.1. Principais espécies	24
3.3.2. Cultivo de algas em lagoas de tratamento.....	27
3.3.3. Parâmetros intervenientes no cultivo de microalgas	30
3.4. Macrófitas	34
3.4.1. Principais espécies	34
3.4.2. Cultivo de macrófitas em lagoas de tratamento.....	39
3.4.3. Parâmetros intervenientes no cultivo de macrófitas	40
3.5. Aproveitamento de Biomassa.....	43
3.5.1. Adubo.....	43
3.5.2. Alimentação.....	44
3.5.3. Biocombustíveis	45
4. MATERIAIS E MÉTODOS	53
4.1. Materiais	53
4.2. Métodos	56
4.2.1. Confecção do instrumento de medição de radiação solar	56
4.2.2. Algas	62
4.2.2.1. Biomassa de algas	62
4.2.2.2. Temperatura.....	62

4.2.2.3.	Dióxido de carbono	63
4.2.2.4	Medição da radiação na lagoa.....	63
4.2.2.5	Radiação solar.....	64
4.2.3	Macrófitas	65
4.2.3.1	Biomassa de macrófitas	66
4.2.3.2	Temperatura e Radiação solar.....	67
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	68
5.2	Desenvolvimento de algas.....	68
5.1.1	Produção de algas em relação à temperatura	68
5.1.2	Produção de algas em relação ao CO ₂	69
5.1.3	Perfil da radiação na lagoa de algas.....	72
5.1.4	Produção de algas em relação à radiação solar	75
5.2	Desenvolvimento das macrófitas	79
5.5.1	Produção de macrófitas em relação à temperatura e radiação solar – 1ª fase	80
5.5.2	Produção de macrófitas em relação à temperatura e radiação solar – 2ª fase	83
5.5.3	Produção de macrófitas em relação ao CO ₂	85
5.6	Comparação produção de biomassa de algas e macrófitas	85
5.7	Análise de componentes principais	86
5.8	Aproveitamento da biomassa.....	87
6	CONCLUSÕES	90
7	RECOMENDAÇÕES.....	92
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93

1. INTRODUÇÃO

O suprimento de água de qualidade e o tratamento e disposição final das águas residuárias possuem elevada importância para o alcance do desenvolvimento sustentável. Uma das principais fontes de poluição que interfere neste desenvolvimento é o despejo de esgotos sanitários nos cursos hídricos.

Atualmente no Brasil o esgotamento sanitário é o serviço de saneamento básico com menos cobertura nos municípios. Do total de 5.570 municípios, em 2016, apenas 2.495 possuíam rede coletora de esgoto, sendo 1.526 com índice superior a 70% de cobertura, enquanto o tratamento era ainda mais raro, realizado em apenas 74,9% do esgoto captado. Portanto 51,9% dos esgotos gerados no Brasil são coletados e 44,9% são tratados. Na região sul, segundo dados do SNIS (2016), apenas 42,5% dos municípios tem atendimento com rede de esgoto e 43,9% realizam o seu tratamento.

O lançamento destes efluentes domésticos diretamente nos corpos hídricos pode causar a eutrofização das águas e como consequência danos ao ambiente. A eutrofização é a fertilização artificial de águas naturais devido ao excesso de nitrogênio e fósforo adicionado que resulta no aumento no crescimento de plantas, como algas e macrófitas. As consequências desse processo é a formação de uma camada que diminui a transparência, impedindo a penetração de luz solar; geração de gases e substâncias tóxicas, podendo causar gosto e odor desagradáveis à água; e consumo de oxigênio dissolvido devido a morte e decomposição da matéria orgânica destas plantas em excesso. Estes fenômenos podem resultar na perda de biodiversidade devido a morte de peixes e outros organismos aquáticos.

A fim de evitar este problema, deve-se buscar alternativas acessíveis e eficientes para tratar os efluentes dos pequenos municípios, pois estes apresentam maiores limitações sob o aspecto técnico e econômico.

O emprego de reatores anaeróbios de alta taxa, especialmente o reator UASB, apresentam vantagens significativas como etapa inicial de tratamento para pequenos e médios municípios (remoção de matéria orgânica), entretanto apresentam eficiência reduzida para remoção de nutrientes (nitrogênio-N e fósforo-P) e organismos patogênicos. Neste caso, a utilização de Lagoas de Alta Taxa (LAT) que aliam o uso de algas e macrófitas (tratamento secundário e terciário) consistem em excelente alternativa de pós-tratamento para proteção dos recursos hídricos.

As LAT's apresentam simplicidade operacional inerente dos sistemas de lagoas de estabilização, entretanto possuem dispositivos de mistura para a movimentação da

massa líquida, proporcionando uma otimização dos parâmetros necessários para o desenvolvimento de algas e macrófitas, as quais, juntamente com as bactérias promovem a remoção da poluição.

No Brasil há condições favoráveis para a instalação deste tipo de tratamento, pois existe disponibilidade de terras com baixo valor por hectare e condições ambientais adequadas. Além disso, a LAT é vantajosa devido a possibilidade de aproveitamento da biomassa de algas e macrófitas produzida para gerar outros produtos (NASCIMENTO, 2001).

A biomassa de microalgas e macrófitas cultivadas nestas lagoas podem servir como fonte para extração de lipídios para a geração de biodiesel, obter o bioetanol por fermentação e gerar biogás a partir da sua digestão, entre outros (CRAGGS et al., 2011). Além das diferentes formas de se obter energia, também pode-se recuperar a massa algal e/ou de macrófitas para gerar fertilizantes/adubos e também podem servir de alimentos para animais, sendo consumidas diretamente ou incorporada nas rações.

Muitos estudos desenvolvidos pela Petrobrás e universidades já abordaram possibilidade de gerar biocombustível a partir de microalgas e macrófitas. Elas apresentam a vantagem de necessitar uma área menor de cultivo se comparada com outras culturas, como milho e cana de açúcar, além de não competirem com o uso do solo para a alimentação humana.

Os lipídios acumulados nas células das algas podem ser empregados para produção de biodiesel, entretanto, a sua produção só é econômica e ambientalmente viável se associada ao tratamento de águas residuárias. Pois os gastos com o cultivo e separação das algas do meio líquido já são subsidiados pelo processo de tratamento, além de não haver custos com a preparação de efluentes sintéticos com as quantidades de nutrientes suficientes para suprir a necessidade da biomassa.

Contudo, existem lacunas de informações a respeito do funcionamento desses sistemas em larga escala (PITTMAN; DEAN; OSUNDEKO, 2011; PARK; CRAGGS; SHILTON, 2011). Ainda segundo esses mesmos pesquisadores, há a necessidade de se entender melhor o que controla a manutenção de espécies dominantes e a interação dos microrganismos nesses ambientes artificiais. Os principais estudos de produção de biomassa a partir de esgotos sanitários devem focar tanto na avaliação da remoção de matéria orgânica, nitrogênio, fósforo e outros poluentes, como também o controle das variáveis que otimizem a produção de biomassa (PITTMAN; DEAN; OSUNDEKO, 2011).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Avaliar a produção de biomassa de algas e macrófitas em lagoas de tratamento de esgotos sanitários e fatores intervenientes no processo.

2.2. Objetivos Específicos

- Verificar o efeito da temperatura no desenvolvimento da biomassa de algas e macrófitas.
- Analisar o crescimento da biomassa em função da radiação solar incidente.
- Investigar métodos para correlacionar a presença de dióxido de carbono na fase aquosa e correlaciona-los com produção de biomassa de algas.
- Avaliar a variação da intensidade da luz solar no interior da LAT e suas influências na dinâmica da biomassa de algas (concentração de algas) e vice-versa.
- Averiguar os fatores limitantes do processo e o parâmetro de maior relevância para o desenvolvimento da biomassa.
- Apresentar a viabilidade do aproveitamento da biomassa de algas e macrófitas retiradas do efluente para a geração de coprodutos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Reator UASB

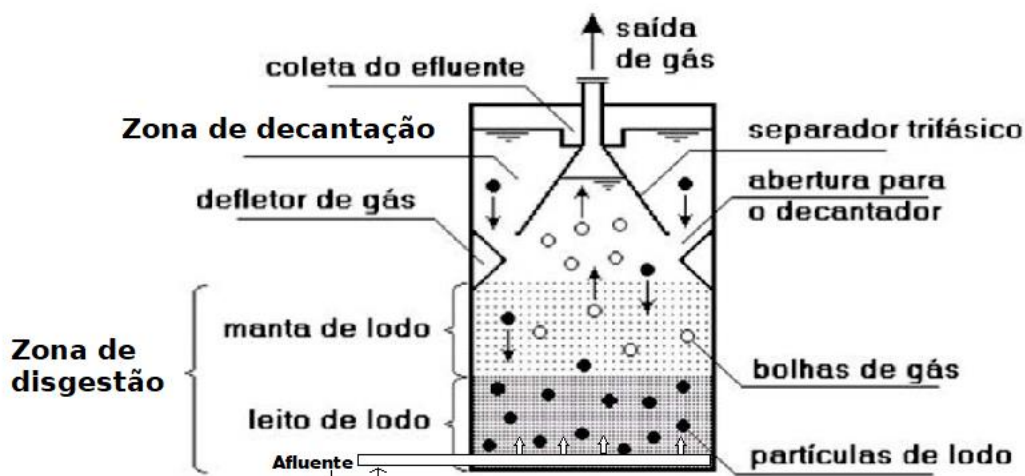
O Reator Anaeróbio de Manto de Lodo de Fluxo Ascendente (do inglês UASB, Upflow Anaerobic Sludge Blanket) é um tratamento biológico que ocorre sem presença de oxigênio para a remoção da matéria orgânica contida nos esgotos sanitários (METCALF & EDDY . INC., 2003). O processo de digestão anaeróbia pode ser subdividido em quatro fases:

- Hidrólise: conversão de polímeros complexos, como proteínas, carboidratos, lipídios, em cadeias orgânicas mais simples (açúcares, aminoácidos, ácidos graxos, álcoois), realizado pela ação de enzimas extracelulares liberadas por bactérias fermentativas.
- Acidogênese: bactérias acidogênicas utilizam os produtos da hidrólise para gerar ácidos graxos voláteis de cadeia curta, tais como acético, butírico, propiônico, valérico e outros; etanol; dióxido de carbono e hidrogênio.
- Acetogênese: os produtos da acidogênese são convertidos, por bactérias acetogênicas, em acetato, dióxido de carbono e hidrogênio.
- Metanogênese: é a etapa que efetivamente remove a matéria orgânica do meio líquido e pode ser efetuada por dois grupos de bactérias: metanogênicas acetotróficas e metanogênicas hidrogenotróficas. As primeiras convertem o acetato em metano e dióxido de carbono e as segundas reduzem o dióxido de carbono a metano utilizando o gás hidrogênio como fonte de energia (METCALF & EDDY . INC., 2003).

O Reator UASB é considerado um sistema anaeróbio de alta taxa, pois pode receber cargas orgânicas elevadas. O esgoto sanitário entra no processo pela parte inferior e se direciona a superfície, realizando um fluxo ascendente. Junto ao fundo do reator forma-se uma camada de lodo bastante concentrada constituída por grânulos de bactérias com boas características de sedimentação e alta atividade metanogênica, chamada leito de lodo. Esta apresenta concentração entre 40 a 100 gramas de sólidos suspensos totais por litro. Acima dela existe uma camada mais diluída denominada manto de lodo, com concentração de 15 a 30 gramas de sólidos suspensos totais por litro. A remoção da matéria orgânica no reator UASB ocorre nas camadas de leito e manto de lodos (zona de digestão), onde é convertida a biogás (CHERNICHARO, 2007).

Na parte superior do reator UASB encontra-se um separador trifásico, responsável por separar sólidos, líquidos e gases. Este possui um plano inclinado que constitui a câmara de decantação. As partículas de lodo que sobem à superfície impulsionadas pelo fluxo do líquido e pelas bolhas de biogás, encontram nesta zona condições de tranquilidade hidráulica o que permite a sua sedimentação e retorno à zona de digestão (base do reator) (METCALF & EDDY . INC., 2003). Além disso, o reator também apresenta defletores de biogás para garantir que todo o biogás seja captado pelo separador trifásico. A Figura 1 apresenta uma representação esquemática de um reator UASB.

Figura 1. Representação esquemática do reator UASB



Fonte: adaptado pelo autor

3.2. Lagoas

Existem diversas configurações de lagoas utilizadas para o tratamento de esgotos sanitários. Lagoas anaeróbias e facultativas são utilizadas para a remoção de matéria orgânica carbonácea, enquanto que as lagoas de maturação têm como objetivo principal reduzir o número de organismos patogênicos. Também existem as lagoas aeradas, as quais usam equipamentos para fornecer oxigênio ao sistema e manter os sólidos em suspensão, e de alta taxa, que utilizam um sistema de mistura dentro da lagoa para controlar o fluxo hidráulico. Nos itens a seguir serão apresentados os tipos de lagoas de tratamento.

3.2.1. Lagoas de Estabilização

As lagoas de estabilização são sistemas de tratamento biológico que utilizam processos naturais para a redução da carga orgânica e patogênicos, constituindo-se na forma mais simples de tratamento de esgotos sanitários (VON SPERLING, 2013). Além da simplicidade, apresentam remoção satisfatória e baixo custo de construção e operação, se adaptando muito bem ao clima do Brasil.

A estabilização da matéria orgânica pode ser realizada pela ação de microrganismos, como bactérias, através de oxidações aeróbias ou anaeróbias. Os sistemas aeróbios utilizam o gás oxigênio como acceptor de elétrons para oxidar a matéria orgânica e os anaeróbios, sulfato ou dióxido de carbono como acceptor de elétrons na ausência de gás oxigênio e nitrato.

As lagoas podem funcionar de forma isolada ou sem série, sendo as associações mais comuns listadas a seguir:

- Lagoa facultativa;
- Lagoa anaeróbia seguida de lagoa facultativa;
- Lagoa anaeróbia seguida de lagoa facultativa e de maturação;
- Lagoa facultativa seguida de lagoa de maturação.

Os principais tipos de lagoas de estabilização empregadas para a depuração de esgotos sanitários são:

Lagoa Anaeróbia: (3,5 a 5 m de profundidade) são as mais profundas, pois devem ser mantidas condições de anaerobiose no interior da lagoa. Para isso há o lançamento de uma grande carga de demanda bioquímica de oxigênio (DBO) por unidade de volume, fazendo com que a taxa de consumo de oxigênio seja várias vezes superior à taxa de produção. No balanço de oxigênio, a produção pela fotossíntese e pela reaeração atmosférica são, neste caso, desprezíveis (VON SPERLING, 2013).

De acordo com Jordão e Pessoa (2011), uma lagoa bem projetada poderá operar livre de maus odores (devido a geração de sulfetos), oferecendo uma redução de DBO na faixa de 50% (para valores de temperatura menores ou igual a 20°C) até 60% (para temperatura maior que 20°C). Como a DBO efluente é elevada há a necessidade de um tratamento posterior, sendo o mais comum a utilização de lagoas facultativas, pois esta associação permite a diminuição da área requerida da última.

A estabilização anaeróbia da matéria orgânica é um processo complexo, onde vários grupos de organismos atuam em uma sequência de reações até chegar aos produtos finais, metano e gás carbônico, conforme descrito no item 3.1.

Segundo Von Sperling (2013), o tempo de detenção hidráulica dos esgotos sanitários em lagoas anaeróbias situa-se entre 3 a 6 dias.

Lagoa Facultativa: (1,5m a 3,0 m de profundidade) ocorrem três zonas, classificadas em função da presença ou ausência de oxigênio, sendo elas: zona anaeróbia, zona aeróbia e zona facultativa.

No fundo da lagoa forma-se a zona anaeróbia através da deposição de sólidos em suspensão que contem matéria orgânica (lodo). O oxigênio é rapidamente consumido e não há reposição suficiente. A matéria orgânica do lodo sofre processo de decomposição por microrganismos anaeróbios, sendo convertidos lentamente em gás metano, gás carbônico e sulfídrico, permanecendo apenas o material inerte ao fundo.

A matéria orgânica dissolvida e em suspensão (coloidal) permanece dispersa na massa líquida. Na parte mais superficial da lagoa há oxigênio dissolvido que é utilizado para oxidação da matéria orgânica, a qual recebe o nome de zona aeróbia. O oxigênio é produzido através de trocas gasosas na superfície e por algas, as quais utilizam o dióxido de carbono (CO_2) para a realização da fotossíntese e geram o gás oxigênio consumido por bactérias.

À medida que se aprofunda na lagoa, a penetração da luz diminui, o que ocasiona a predominância do consumo de oxigênio (respiração) sobre a sua produção (fotossíntese), com eventual ausência de oxigênio dissolvido a partir de uma certa profundidade (VON SPERLING, 2013). A camada intermediária em que as variações das taxas de fotossíntese e respiração resultam em ausência de oxigênio em certos períodos e a presença em outros, recebe o nome de zona facultativa, e é processada por bactérias capazes de utilizar outros aceptores de elétrons (nitratos, sulfetos e gás carbônico) na ausência de oxigênio para estabilizar a matéria orgânica.

O tempo de residência dos esgotos dentro da lagoa, de maneira geral, é superior a 20 dias e o efluente apresenta elevada concentração de sólidos suspensos não sedimentáveis, principalmente devido as algas (VON SPERLING, 2013).

De acordo com Jordão e Pessoa (2011), uma investigação englobando 115 lagoas facultativas na região Sudeste do Brasil, mostrou que elas apresentam uma

eficiência média de 74% de remoção de DBO, enquanto nos sistemas em série (lagoas anaeróbias seguidas de facultativas) este índice chegou a 82%.

Lagoa de Maturação: (0,8 a 1,0 m de profundidade) em geral são empregadas após um sistema de remoção biológica de matéria orgânica. Sua principal finalidade é remover os organismos patogênicos dos esgotos sanitários que não foram totalmente eliminados nos processos anteriores. Entre os organismos a serem removidos, incluem-se bactérias, vírus, cistos de protozoários e ovos de helmintos, sendo estes dois últimos ~~são~~ normalmente eliminados do efluente por sedimentação (VON SPERLING, 2013). É uma alternativa aos métodos tradicionais de desinfecção, como o uso de cloro.

Elas são mais rasas e apresentam uma área superficial maior, pois seu principal objetivo é ampliar as condições desfavoráveis aos microrganismos patogênicos, como radiação solar, pH e elevadas concentrações de oxigênio dissolvido (OD). A radiação solar contém raios ultravioletas que são bactericidas.

De acordo com Jordão e Pessoa (2011), tem-se alcançado até 99,9999% de eficiência em lagoas de maturação em série. O tempo de detenção hidráulica pode variar de 3 a 40 dias, dependendo das dimensões da lagoa e da temperatura.

Os sistemas de lagoas também podem ser utilizados como pós-tratamento de efluentes vindos de outros processos como lodos ativados, filtros biológicos e reator UASB, para oferecer um polimento final, resultando em um efluente de melhor qualidade.

Um outro tipo de lagoa de estabilização é a lagoa com macrófitas, usada para um polimento final, com objetivo de reduzir nutrientes, sólidos em suspensão e a DBO remanescente. Vários experimentos práticos indicam também a redução de metais. Ela requer manutenção intensiva (corte regular das plantas, secagem e destinação final) e cuidados com o sombreamento, pois incentivam a proliferação de moscas e mosquitos (JORDÃO; PESSOA, 2011).

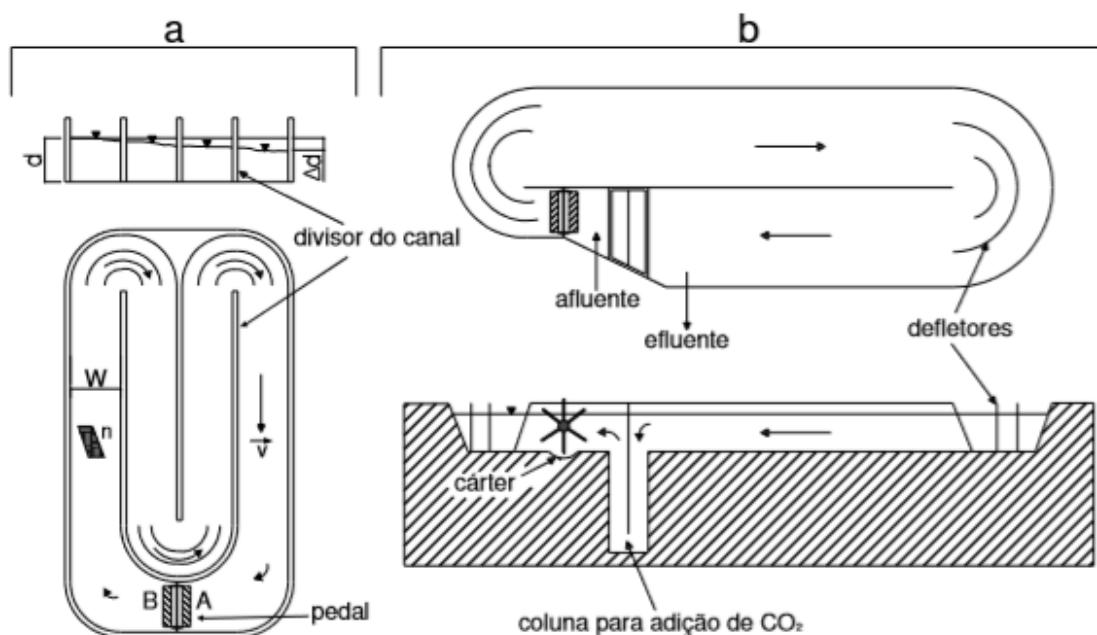
3.2.2. Lagoas de Alta Taxa

As LAT's são uma evolução das lagoas de estabilização. Elas, como as anteriores, são projetadas e construídas para promover o tratamento de esgotos sanitários, via interação entre algas e bactérias. As LAT's possuem, porém, menor

profundidade em relação às lagoas de estabilização convencionais, com valores típicos entre 0,2 a 0,5 metros podendo chegar até 1,0 metro, são construídas em formato de pistas de corridas ovais, contam com dispositivos mecânicos que movimentam lentamente a massa líquida, e são operadas com tempo de detenção hidráulica de 3 a 10 dias (OSWALD, 1998a; PICOT et al., 1991; PARK e GRAGGS, 2010; GRAGG et al., 2012; SANTIAGO, 2013).

A movimentação do líquido tem como finalidade evitar a existência de estratificações térmicas, melhor distribuição dos nutrientes e utilização da luz (evita a formação de uma densa camada de algas próxima a superfície que dificulta a passagem da luz solar), o que contribui para a formação de biomassa, otimizando a produção de oxigênio através da fotossíntese. As velocidades de fluxo na LAT estão compreendidas na faixa de 0,05 a 0,3 m/s (SANTIAGO, 2013). A Figura 2 apresenta uma representação esquemática de uma LAT.

Figura 2. (a) Configuração de uma LAT em circuito múltiplo e (b) único



Fonte: Santiago (2013)

A LAT possibilita uma série de vantagens se comparada ao sistema convencional. Dentre elas pode-se citar a pouca acumulação de lodo no reator, ausência de odor, ausência de mosquitos, nível terciário de tratamento devido à alta produtividade primária, arraste da amônia e coagulação/precipitação do fosfato

(NASCIMENTO, 2001). Isso é possível devido aos altos níveis de pH e OD alcançados no reator durante a fotossíntese, à “juventude” da população de algas e à constante movimentação do líquido. Tais reações são otimizadas nesta modalidade pela reduzida profundidade útil, maximizando a utilização da luz solar pelas algas, e portanto, possibilitando a aplicação de cargas mais altas de DBO e maior assimilação de nutrientes pelas vias metabólicas da biomassa (NASCIMENTO, 2001).

As algas geradas dentro destes sistemas tendem a ser maiores e apresentar colônias, o que torna mais fácil a sedimentação assim que cessada a turbulência.

Assim como nos sistemas convencionais, a matéria orgânica é removida através da oxidação por bactérias heterotróficas, sendo o oxigênio fornecido pela atividade fotossintética de algas. No caso de matéria orgânica particulada, outra via de remoção é a agregação ao floco de alga/bactéria e posterior sedimentação em um decantador (SANTIAGO, 2013). As principais vias de remoção de nutrientes são a assimilação fotossintética, ou seja, incorporada a biomassa algal, e a volatilização do nitrogênio e precipitação do fósforo.

3.3. Algas

Algas são organismos eucariotos (contém membrana nuclear envolvendo várias moléculas de DNA, ao contrário dos procariotos que possuem uma única molécula de DNA e ausência de membrana nuclear), uni ou multicelulares. Há três grandes grupos de algas, em função das suas cores: verdes, marrons e vermelhas. Todas as algas contêm clorofila *a*, que lhes permitem realizar fotossíntese, processo pelo qual carbono inorgânico é sintetizado em carbono orgânico. A clorofila *a* confere as algas a tonalidade verde, embora outros pigmentos possam mascará-lo.

Em tratamento de esgotos sanitários, algas são utilizadas para a produção de oxigênio em lagoas. No tratamento de água, as algas podem resultar na produção de odor e sabor na água tratada como resultados de subprodutos de metabolismo ou células mortas (BENETTI, 2017).

As algas unicelulares também são chamadas de microalgas. Sob esta denominação estão incluídos também organismos de estrutura celular procariótica, com representantes nas Divisões Cyanophyta (cianobactérias) e Prochlorophyta. (DERNER et al., 2006).

Microalgas são microrganismos encontrados em corpos aquáticos em todo o globo terrestre; podem ainda estar presentes em folhas ou caules de vegetais além de poder formar, em simbiose com fungos, os líquens. São os principais integrantes do fitoplâncton, podendo ser encontrados de forma individualizada ou em colônias capazes de alcançar grandes dimensões. Esse grupo de organismos é considerado fundamental para a manutenção da vida na Terra uma vez que participam da produção de maior parte do O₂ da atmosfera (MONÇÃO, 2018), sendo responsáveis por pelo menos 60% da produção primária (SCHMITZ; MAGRO; COLLA, 2012).

Andrade et al. (2008) e Chisti (2007) caracterizam as microalgas como microrganismos fotossintéticos, que combinam água e dióxido de carbono atmosférico com luz solar para produzirem biomassa (polissacarídeos, proteínas, lipídios e hidrocarbonetos), que pode ser utilizada na produção de biocombustíveis, suplementos alimentares, ração animal, químicos, cosméticos, e também podem ser empregados na captura de dióxido de carbono da atmosfera.

3.3.1. Principais espécies

Atualmente, são conhecidas cerca de 40.000 espécies de microalgas, sendo que as principais cultivadas comercialmente são *Dunaliella salina* para a obtenção de caroteno; *Haematococcus pluvialis* para a obtenção de astaxantina e do gênero *Chlorella* e *Anthospira (Spirulina)* para a adição em alimentos naturais, esta última principalmente por apresentar elevadas concentrações de proteína, além de compostos com propriedades de uso farmacêutico, como ácido linoleico e polissacarídeos (BECKER, 2007; ANDRADE, 2014).

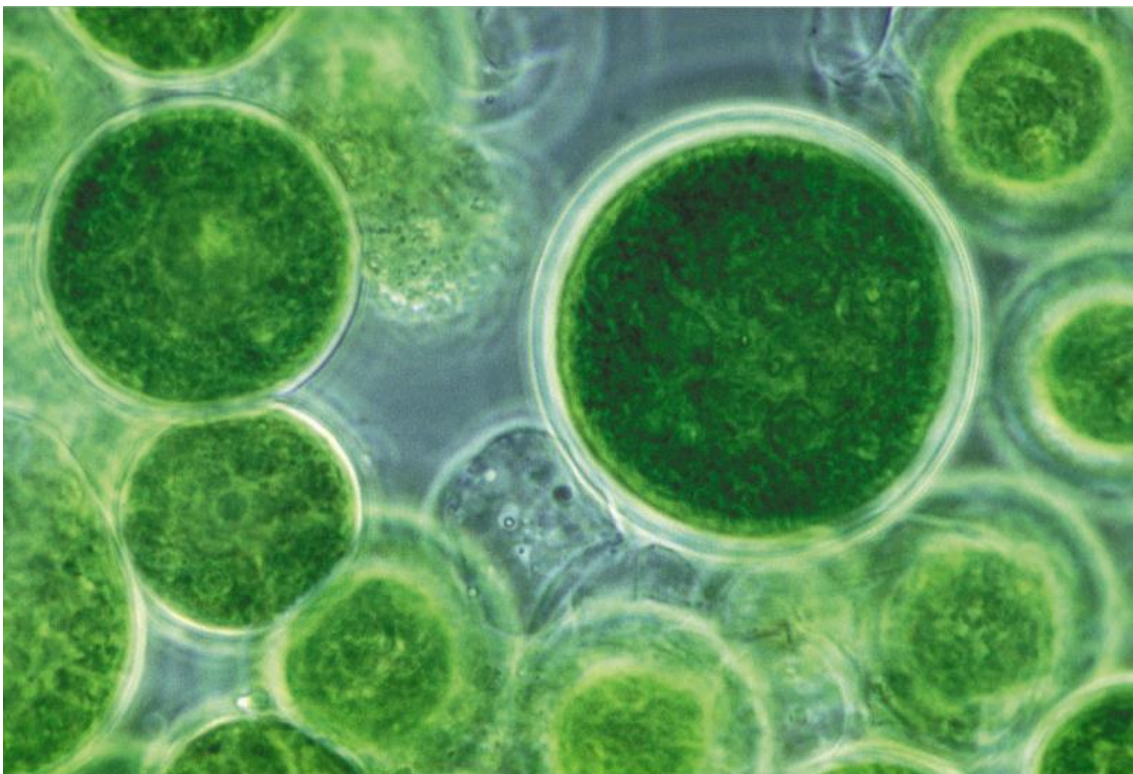
Para o tratamento de águas residuárias as principais espécies são dos gêneros *Chlamydomonas*, *Euglenas* (Figura 4) e *Chlorellas* (Figura 3), pertencente ao grupo das clorofíceas. Os dois primeiros gêneros são normalmente os primeiros a aparecer na lagoa, tendendo a ser dominantes nos períodos frios, e possuindo flagelos, o que lhes confere a capacidade de locomoção (otimizando a posição com relação à incidência da luz e à temperatura) (VON SPERLING, 2013).

As *Chlorellas* são algas unicelulares eucarióticas de água doce com formato esférico e sem flagelo. Apresentam um tamanho em torno de 2 a 10 micrometros de diâmetro. No planeta existem pelo menos dez espécies desse gênero, sendo a mais conhecida a *Chlorella pyrenoidosa* (PASQUALI, 2018).

As espécies de algas *Chlorella* foram amplamente aplicadas no tratamento de efluentes e mostraram capacidade comprovada de remoção de nitrogênio, fósforo e auxílio aos microorganismos para a redução da matéria orgânica (DQO), com diferentes tempos de detenção (variando de 10 a 42 dias), misturando-se com bactérias ou não (BENETTI, 2017).

Segundo Wang et al. (2010), em estudos realizados em quatro tipos de águas residuárias: antes do decantador primário (1), após o decantador primário (2), após do tanque de lodo ativado (3) e água residual gerada na centrífuga de lodo (4), as taxas de remoção de $\text{NH}_4\text{-N}$ pela *Chlorella* sp. foi de 82,4%, 74,7% e 78,3% para as águas residuárias 1, 2 e 4, respectivamente. Para a 3, teve-se 62,5% de remoção de $\text{NO}_3\text{-N}$. Para as águas residuárias 1, 2 e 4, foi retirado 83,2%, 90,6%, e 85,6% de fósforo e 50,9%, 56,5%, e 83,0% de carbono orgânico dissolvido (COD). As taxas de crescimento específico médio no período exponencial foram de 0,412; 0,429; 0,343 e 0,948 dia^{-1} para águas residuais 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

Figura 3. *Chlorella* sp.



Fonte: Pasquali (2017)

As Euglenas são algas unicelulares de corpo alongado. Desenvolvem-se principalmente em águas com elevados teores de matéria orgânica, fósforo e nitrogênio.

Abrangendo cerca de 700 espécies, entre pigmentadas e apigmentadas, a família *Euglenaceae* compreende indivíduos flagelados, de hábito isolado, raramente fixos ou ainda sob a forma de colônias (MENEZES, 1989).

Em estudos realizados por Mahapatra, Chanakya e Ramachandra (2013) foram testadas as capacidades de remoção de nutrientes. As algas cultivadas num curto período de 8 dias resultaram na remoção de 98% de $\text{NH}_4\text{-N}$, 93% de nitrogênio total, 85% de orto-fosfato, 66% de fosfato total e 92% de carbono orgânico total. Os Euglenoides atingiram um teor lipídico máximo de 24,6% (p / p) com uma densidade de biomassa de $1,24 \text{ g L}^{-1}$ (peso seco).

Comparado com outras algas, *Euglena* sp. mostraram taxas de crescimento mais rápidas, com alta densidade de biomassa, em concentrações elevadas de nitrogênio amoniacal ($\text{NH}_4\text{-N}$) e carbono orgânico (C). O crescimento abundante destas espécies foi observado em águas residuais não tratadas com uma taxa média de crescimento específico (μ) de $0,28 \text{ dia}^{-1}$ e produtividades de biomassa de $132 \text{ mg L}^{-1}\text{dia}^{-1}$ (MAHAPATRA; CHANAKYA; RAMACHANDRA, 2013).

Figura 4. *Euglena* sp.



Fonte: Centre (2015)

Em experimentos realizados em LAT's por Barroso (2015), no período de julho a agosto, verificou-se a presença das espécies:

- BACILLARIOFITA: *Gomphonema parvulum*, *Nitzschia palea*
- CLOROFITA: *Chlorella vulgaris*, *Desmodesmus opoliensis*, *Desmodesmus protuberans*, *Oocystis lacustres*, *Scenedesmus acutus*, *Scenedesmus acuminatus*.
- EUGLENOFITA: *Euglena acus*, *Euglena agilis*, *Euglena caudata*, *Euglena ehrenbergi*, *Euglena próxima*, *Euglena oxyuris*, *Lepocinclis caudata*, *Lepocinclis playfairiana*, *Lepocinclis texta*, *Trachelomonas volvocina*, *Phacus* sp., *Phacus curvicauda*.

Em lagoas de cultivo misto, como no caso do estudo acima, existe uma grande variabilidade de espécies de algas que se desenvolvem ao longo do ano. Elas crescem naturalmente, sem que haja um controle para o predomínio de alguma espécie de interesse. Assim, os resultados de produção de biomassa e remoção de nutrientes também apresentam mudanças de acordo com o período analisado.

3.3.2. Cultivo de algas em lagoas de tratamento

O cultivo de algas em sistemas abertos vem sendo utilizado desde a década de 50 (BOROWITZKA, 1999; ACIOLI, 2014). Nos sistemas abertos podem ser utilizadas águas naturais (lagoas, lagos) ou lagos artificiais. Os sistemas mais utilizados incluem grandes lagoas rasas, lagoas circulares e LAT's. A vantagem dos tanques abertos é que eles são mais fáceis de construir e operar (ACIOLI, 2014). Entretanto, a ineficiência na utilização da luz, as perdas por evaporação, a difusão de CO₂ para a atmosfera, a necessidade de grandes áreas de terra e a alta contaminação são os principais fatores que limitam o uso desses sistemas.

As LAT's são os sistemas abertos mais antigos e mais simples para a produção em massa de microalgas. No que diz respeito à produtividade de biomassa, Breenam e Owende (2009) reuniram os trabalhos de vários pesquisadores e forneceram valores para o cultivo em sistemas abertos (Tabela 1). Vale destacar a variabilidade de valores para uma mesma espécie de microalga.

Tabela 1. Valores para a produtividade de biomassa de microalgas

Microalga	Concentração máxima (g L ⁻¹)	Produtividade máxima (g L ⁻¹ dia ⁻¹)	Referência Original
<i>Chlorella</i> sp.	10	-	Setliket (1970)
<i>Chlorella</i> sp.	40	-	Doucha e Lívanský (2006)
<i>Haematococcus pluvialis</i>	0,202	-	Huntley e Redalje (2007)
<i>Spirulina platensis</i>	-	0,18	Richmond et al. (1990)
<i>Spirulina platensis</i>	0,47	0,05	Jiménez et al. (2003)
<i>Spirulina platensis</i>	0,9	0,15	Pushparaj et al. (1997)
<i>Spirulina platensis</i>	1,6	0,32	Pushparaj et al. (1997)

Fonte: Breenam e Owende (2009)

Em estudos desenvolvidos por Park e Craggs (2010), a produção de biomassa em seu sistema de LAT foi de 24 g·m⁻²·d⁻¹. Este valor encontrado está muito próximo dos valores apresentados na Tabela 2, entretanto como é afirmado por eles faz-se necessário um estudo mais aprofundado, ou seja, com atividades mais prolongadas (mais de 1 ano), para confirmar a relação da radiação solar com a produtividade de algas.

Tabela 2. Produção de biomassa de algas em diferentes locais

Tipo de LAT	Local	Espécie	Produtividade por área (g/(m ² ·d))		Área superficial (m ²)	Volume total (m ³)	Referências
			Total	Extraído			
Produção comercial	Hawaii	<i>Tetraselmis suecica</i>	40,0		-	-	Laws et al. (1988)
	Hawaii	<i>Cyclotella cryptlm</i>	29,7		-	-	Laws et al. (1988)
	Hawaii	<i>Plntymonas sp</i>	26,0		48,0	5,8	Sheehan et al. (1998)
	Hawaii	<i>Cyclotella cryptlm</i>	30,0		9,2	1,1	Sheehan et al. (1998)
	Hawaii	<i>Tetraselmis suecica</i>	37,5		9,2	1,1	Sheehan et al. (1998)
	Novo México	<i>Scenedesmus quadrlonuda</i>	14,0		100	22,5	Weissman and Goebel
	Novo México	<i>Gilorelln sp.</i>	21,0		100	22,5	Weissman and Goebel (1988)
	Israel	<i>Anabena slomensis</i>	12,9		2,0	0,3	Richmond et al. (1993)
Tratamento de Efluentes	Califórnia	Cultura mista de algas (ex. <i>Scenedesmus sp.</i> <i>Micractinium sp.</i> <i>Actinastrum sp.</i> <i>Pediastrum sp.</i> <i>Coelostrum sp.</i> <i>Chlorella sp.</i> <i>Ankistrodesmus sp)</i>	18,4		1000	-	Benemann (1986)
	Israel		33,0	14,8	120	-	Shelef (1982)
	Israel		35,0	-	150	-	Shelef (1982)
	Nova Zelândia		25,0	-	32,0	8,0	Park and Craggs (2010)
	Brasil		6,2 - 9,1	5,0 - 7,5	269	80,0	Barroso Júnior(2015)
	Filipinas		15,3	11,9	100	-	Oswald (1987)
	'Escócia		18,0	-	12,0	-	Cromar et al. (1996)
	Espanha		12,7 - 14,8	9,9 - 11,5	1,54	-	Garcia et al. (2006)
	Kuwait		15,0	-	12,0	-	Banat et al. (1990)

Fonte: adaptado de Barroso (2015)

Os nutrientes são removidos do meio através da assimilação da biomassa, principalmente a de algas (sendo também incorporada na produção de novas células de bactérias), porém, também há outros processos de natureza físico-química que

contribuem para o processo de remoção global. O fosfato, por exemplo pode ser precipitado e a amônia volatilizada devido aos altos níveis de pH alcançados durante a fotossíntese (BOGAN et al., 1960; AZOV, SHELEF, 1987; NASCIMENTO, 2001).

A separação desta biomassa geralmente não é praticada em sistemas de LAT, requerendo a utilização de coagulantes e floculantes e estes devido ao custo, limitam a utilização da biomassa, mesmo para a conversão em biocombustíveis (BENEMANN, 2009). Segundo Oran (1989), um grande objetivo que pode ser alcançado numa LAT é a produção e armazenamento de algas. No entanto, tem-se encontrado dificuldades para se remover e armazenar as algas devido ao seu pequeno tamanho (<20 μ m). Se a remoção de algas é eficiente, é possível alcançar baixa concentração de matéria orgânica efluente, da ordem de 25mg/L em termos de DQO, no entanto a remoção de coliformes fecais mostrou-se baixa devido ao curto tempo de detenção hidráulico.

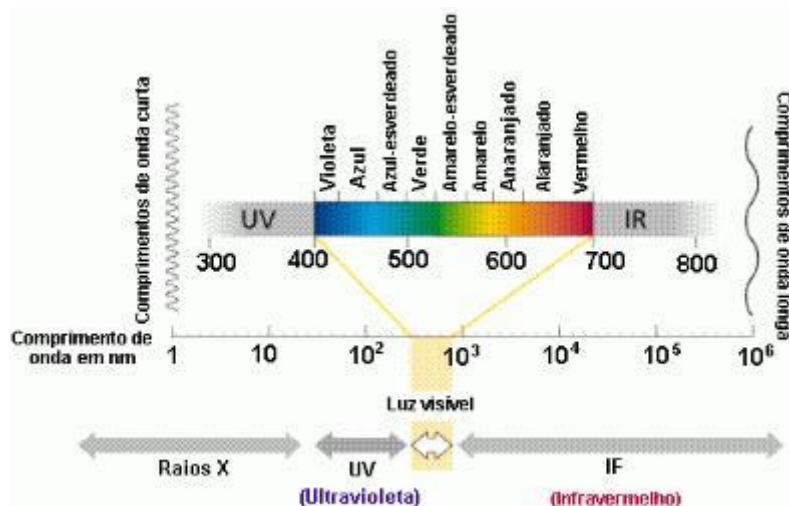
3.3.3. Parâmetros intervenientes no cultivo de microalgas

Para o cultivo de microalgas alguns parâmetros são de fundamental importância, como: radiação solar, temperatura, pH, nutrientes e disponibilidade de CO₂. Além disso, as dimensões do reator, a turbulência, presença de possíveis contaminantes e o equipamento de coleta também influem no desenvolvimento de microalgas.

Radiação solar: a radiação solar é um dos elementos mais importantes para o desenvolvimento de organismos fotossintetizantes, pois ela serve como energia para as atividades metabólicas das microalgas. Esta também influi na variação de temperatura, que afeta diretamente o equilíbrio iônico, pH e solubilidade dos gases, como oxigênio e gás carbônico, essenciais para a dinâmica dentro das lagoas (BOUTERFAS et al., 2002; SANTIAGO, 2013).

Apenas uma fração do espectro solar é utilizado pelas plantas para a realização da fotossíntese, devido a sensibilidade seletiva dos cloroplastos. Esta fração denominada de radiação fotossinteticamente ativa (RFA), é considerada como sendo o fluxo de fótons na faixa de 400 a 700 nm do espectro solar (ASSIS; MENDEZ, 1989). A Figura 5 apresenta as várias regiões de comprimento de onda da luz.

Figura 5. Espectro do comprimento de onda da luz solar



Fonte: Carlos Martinez (2006)

Szeicz (1974) consideram que a radiação solar na faixa espectral de RFA é da ordem de 50% da radiação medida por um radiômetro convencional, embora muitos outros autores tenham reportado razões da ordem de 44% a 69% (ASSIS; MENDEZ, 1989). Em estudo para obter uma relação entre a radiação global (K) e fotossinteticamente ativa desenvolvidos por Assis e Mendez (1989) na cidade de Pelotas resultaram em uma equação linear expressa por: $RFA = 2,23 K$. Verificou-se que a radiação e onda curta na faixa de RFA (400-700 nm) foi cerca de 47% do espectro solar.

Em estudos anteriores encontrou-se uma relação linear entre a produtividade de biomassa algal, em termos de matéria seca, e irradiância solar. Esta relação possui um valor máximo (saturação), acima do qual a intensidade de luz pode prejudicar as algas (fotoinibição) diminuindo a sua produtividade.

A radiação solar varia dentro da lagoa de acordo com a profundidade. Quanto mais fundo menor será a intensidade luminosa. As algas também auxiliam a diminuir esse alcance.

Além disso, no interior da água a luz do sol também é atenuada em função de características físicas e químicas da água como sólidos suspensos e dissolvidos e substâncias húmicas (SANTIAGO, 2013).

O aumento da concentração de algas pode ser um fator limitante, já que altas densidades podem provocar o que se é chamado de efeito de sombreamento, ou seja, quando há grandes concentrações de algas e estas impedem a passagem da radiação solar até as algas que se encontram em maiores profundidades. Segundo Park e Craggs

(2010), uma concentração de 300 g SST de algas / m³ irá absorver quase toda a RFA dentro dos primeiros 15 cm da lagoa, deixando o resto da profundidade da lagoa no escuro (BARROSO, 2015).

Em LAT, que possui menor profundidade e movimentação da massa líquida, a intensidade com que a radiação afeta seu funcionamento é amplificada. Santiago (2013) avaliou o efeito de diferentes níveis de radiação solar no desempenho de LAT's, a qual a produção de sólidos suspensos voláteis (SSV) diminuiu com o aumento do bloqueio da luz solar a partir de uma porcentagem de 65% de sombreamento, para valores menores que este houve um aumento na quantidade de SSV.

Temperatura: o crescimento de microalgas aumenta com a elevação da temperatura até atingir um valor de temperatura ótima. A partir desta temperatura o crescimento pode ser prejudicado.

A temperatura ótima medida sob condições de taxa máxima de crescimento das algas, na presença de nutrientes e condições de luz adequadas, varia de acordo com a espécie de alga, mas geralmente encontra-se entre 28°C e 35°C (SOEDER et al., 1985; BARROSO, 2015).

Segundo Kerby e Stewart (1989) a temperatura ideal para um rápido crescimento, especialmente das espécies de *Chlorella*, deve estar entre 20 e 32°C (ANDRADE, 2014).

Disponibilidade de CO₂: o carbono é um macronutriente responsável por formar a biomassa algal. Geralmente, a fonte de carbono é o CO₂ e a principal rota de fixação do carbono pela microalga é através da fotossíntese (SASI, 2009; ANDRADE, 2014). No entanto, algumas espécies podem combinar os processos de fotossíntese com a assimilação heterotrófica de matéria orgânica.

O CO₂ presente no interior da lagoa pode ser originado por dois processos: a degradação da matéria orgânica por bactérias ou trocas gasosas entre a superfície da lagoa e a atmosfera, sendo o primeiro o maior responsável por fornecer carbono. Entretanto o esgoto sanitário não apresenta carbono suficiente para suprir a demanda das algas. A relação C:N em água residuária é tipicamente 3:1, enquanto a tipicamente encontrada na biomassa algal é 6:1 (PARK e GRAGGS, 2010; SANTIAGO, 2013). Essa relação é ainda mais baixa se considerar que nem toda matéria orgânica resulta em

gás carbônico. Por isso a adição de CO₂, como já demonstrado em alguns estudos, eleva a produção de algas em lagoas.

A adição de CO₂ ajuda ainda a controlar o pH em níveis favoráveis aos processos biológicos das algas.

pH: a faixa de pH ideal para a maioria das espécies de algas é entre 5 e 9. A elevação gradativa do pH no meio de cultura é indicativo do crescimento microalgal. O incremento do pH ocorre devido à atividade biológica das células, o que produz uma redução na quantidade de carbono inorgânico dissolvido através do consumo necessário ao crescimento celular (BERENGUEL et al., 2004; ANDRADE, 2014).

Nutrientes: além do carbono, outros nutrientes são fundamentais para o cultivo de microalgas, sendo os principais o nitrogênio e fósforo. Também são necessários alguns micronutrientes, como cobalto, cobre, manganês, molibdênio e ferro.

A quantidade necessária de cada nutriente varia de acordo com a espécie de alga. Geralmente, o nitrogênio é fornecido na forma de nitratos, amônia, sais de amônia e ureia, sendo o nitrato a substância preferencial para as algas. O fósforo é um elemento limitante para o desenvolvimento de algas, pois o nitrogênio pode ser fixado pelas algas através do gás N₂ presente na atmosfera, já o fósforo necessita estar presente no meio de cultivo. O fósforo encontra-se em esgotos nas formas de ortofosfato, polifosfato e fósforo orgânico (BENETTI, 2017).

Em geral, é comum a adição de excesso de fertilizantes em lagoas para que os nutrientes não sejam fatores limitantes.

Agitação: a agitação é uma variável importante por proporcionar uma exposição mais homogênea à luz, bem como aumentar a disponibilidade de nutrientes, os quais, em agitação constante, não cristalizam (ficam suspensos). Evita também a sedimentação das microalgas, o que acarretaria exposição em excesso das camadas superiores e subexposição das camadas inferiores (ANDRADE, 2014). As velocidades desenvolvidas pelo sistema não ocasionam turbulência capaz de provocar a ressuspensão do lodo.

3.4. Macrófitas

As macrófitas são plantas aquáticas (*macro=grande, fita=planta*). Elas são, em sua grande maioria, vegetais terrestres que ao longo de seu processo evolutivo, se adaptaram ao ambiente aquático, por isso apresentam algumas características de vegetais terrestres e uma grande capacidade de adaptação a diferentes tipos de ambientes (o que torna sua ocorrência muito ampla). Habitam desde brejos até ambientes totalmente submersos (debaixo d'água).

Devido ao fato das macrófitas aquáticas constituírem um grupo muito grande, elas são geralmente classificadas em 5 grupos ecológicos, baseados em seu modo de vida (biótipo) no ambiente aquático (PROBIO, 2018).

- a) Macrófitas aquáticas emersas: enraizadas no sedimento, porém as folhas crescem para fora da água. Ex: Junco, Taboa.
- b) Macrófitas aquáticas com folhas flutuantes: enraizadas no sedimento e com folhas flutuando na superfície da água. Ex: Lírio d'água, Vitória-régia.
- c) Macrófitas aquáticas submersas enraizadas: enraizadas no sedimento, crescendo totalmente debaixo d'água. Ex: Elódea, Cabomba.
- d) Macrófitas aquáticas submersas livres: Permanecem flutuando debaixo d'água. Podem se prender a pecíolos e caules de outras macrófitas. Ex: Utriculária.
- e) Macrófitas aquáticas flutuantes: Flutuam livremente na superfície da água. Ex: Alface d'água, Aguapé, Orelha-de-rato.

O grupo de interesse deste trabalho para o tratamento de efluentes em lagoas é o das macrófitas flutuantes.

3.4.1. Principais espécies

Diversas espécies de macrófitas podem ser utilizadas para o tratamento de efluentes. No Brasil a subfamília mais comum é a *Lemnoideae*.

Os vegetais da subfamília *Lemnoideae* possuem a maior taxa de crescimento entre as plantas vasculares, portanto são capazes de retirar nutrientes da água com grande eficiência (IQBAL, 1999; MOHEDANO, 2004). São consideradas as menores plantas vasculares do mundo e são conhecidas como “lentilhas d'água” ou somente “lemnas”.

A subfamília *Lemnoideae* constitui-se de cinco gêneros: *Lemna*, *Wolffia*, *Landoltia*, *Spirodela* e *Wolffiella*, e cerca de 40 espécies (MOHEDANO, 2010). As espécies de interesse são citadas abaixo.

Lemna minor: elas são pequenas macrófitas que se assemelham as algas (Figura 6) e podem formar uma camada densa que dificulta a proliferação de insetos, como mosquitos, e o despreendimento de odores oriundos do interior das lagoas.

Elas podem ser utilizadas para remover excesso de nutrientes ou metais tóxicos (processo chamado de fitorremediação), pois são eficientes bio-acumuladores. Apresentam um crescimento rápido, tamanho de cerca de 1 a 8 mm de comprimento, são resistentes e facilmente removidas da água. O habitat é lacustre (lagos ou lagoas) e ribeirinho (em rios ou córregos), e são nativas na maior parte da África, Ásia, Europa e América do Norte.

Conforme Greenway e Woolley (2001), a *lemna* contribuiu para a remoção de nitrogênio e fósforo, obtendo valores de remoção de 15 - 80% de N e 24 - 80% de P. No entanto, outros autores conseguiram remoções dentro da faixa de 14,3 - 51,9% nitrogênio total e 10,76 - 34,17% da remoção de fósforo total (WU et al., 2013).

Em estudo realizado por Driever, Van Nes e Roijackers (2005) sob condições de temperatura controlada (23°C) e em meio sem limitação de nutrientes, foi observado que em densidades de 9 g de peso seco de biomassa de *Lemna minor* por metro quadro se obtém a máxima taxa de crescimento relativo, cujo valor é 0,3 dia⁻¹.

Figura 6. *Lemna minor*



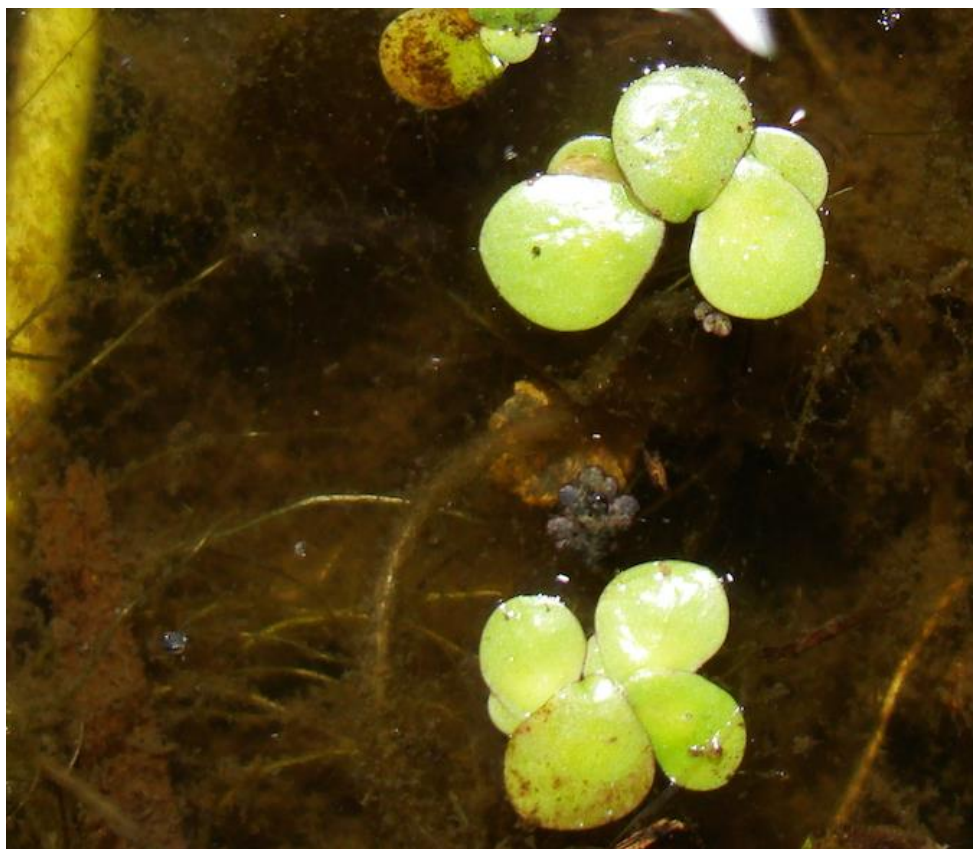
Fonte: Lindsey (2006)

Spirodela intermedia: esta planta aquática pode apresentar folhas de 4-6 mm de comprimento. Sua aparência pode ser vista na Figura 7. Quanto a distribuição geográfica, a espécie é restrita à América do Sul (da Argentina até a Venezuela) e América Central, ocorrendo em ambientes de clima tropical, subtropical e temperado quente (PEREIRA, POTT, TEMPONI, 2016)

Basílico et al. (2016) verificou que a média de biomassa da *Spirodela intermedia* ao final do ensaio foi 2,2 vezes maior do que a biomassa inicial, resultando em uma taxa de crescimento relativo (TCR) de 0,130 g/(g.dia) e uma produtividade de 16,4 t ano de peso seco/ (ha.ano).

Segundo Sutton & Ornes (1975) e Lorenzi (1991), *Lemna* e *Spirodela* são consideradas excelentes filtros biológicos, uma vez que conseguem absorver 97% do ortofosfato de um lago raso em oito semanas, quando colhidas a cada semana (POTT; POTT, 2002).

Figura 7. *Spirodela intermedia*



Fonte: Schneider (2016)

Spirodela polyrhiza: A espécie é difundida em toda a Europa, África, Ásia, Austrália e América do Norte, além de partes da América do Sul. Prefere habitats de águas paradas com verões quentes, ocorrendo em lagos e grandes barragens. Apesar de muito pequena, é a maior entre as “lentilhas d’água”, com 4-10 mm de diâmetro (Figura 8).

Segundo Zhao et al. (2015), a *Spirodela polyrhiza* não pode sobreviver ao frio, desta forma só crescem por cerca de 6 meses ao decorrer do ano. *Spirodela polyrhiza* tem sido cultivada em experiências de fitorremediação e recuperação de nutrientes a partir de efluentes sanitários (XU; SHEN, 2011).

A *Spirodela polyrhiza* pode obter valores de remoção de nitrogênio total (NT) e fósforo total (PT) de até 96% e 89%, respectivamente (MOHEDANO et al., 2012).

Quanto a produtividade de biomassa, Reddy (1985) obteve valor de 11,3 t ano de peso seco/ (ha · ano) ao cultivar a *Spirodela polyrhiza* sob condições de nutrientes não limitantes.

Figura 8. *Spirodela polyrhiza*



Fonte: Hilty (2017)

Wolffia columbiana: é considerada a menor planta com flores do mundo, com menos de 1,5 mm de comprimento (Figura 9). Ela é amplamente distribuída na América do Norte, Central e do Sul.

Valderrama et al. (2002) utilizou um sistema de tratamento composto de *Wolffia* e *Chlorella vulgaris*, sendo que essa cultura reduziu o nitrogênio amoniacal em 71,6% e o fósforo em 28,0%.

A remoção de nutrientes e produção de biomassa de macrófita do gênero *Wolffia* obtida através de experimentos em escala de laboratório com fluxo contínuo alimentado com água residuária apresentou taxas médias de remoção de nitrogênio e fósforo de 0,03 a 0,18 mg N/m².d e 0,023 a 0,079 mg P/m².d, respectivamente. A máxima taxa de produção de folhas vegetativas foi de 86 a 160 g de peso molhado/m².d, dependendo da concentração de nutrientes. A máxima taxa de crescimento específico da *Wolffia* foi 0,35 a 0,38 dia⁻¹ (SODA et al., 2013).

Figura 9. *Wolffia columbiana*



Fonte: Discover Life (2018)

3.4.2. Cultivo de macrófitas em lagoas de tratamento

Macrófitas flutuantes tem demonstrado eficiência no tratamento de efluentes, respondendo de forma mais eficaz na remoção de nutrientes se comparada às enraizadas, pois estas atuam no sedimento ao passo que as flutuantes retiram nutrientes diretamente da coluna d'água (SHIMODA, 1984; MOHEDANO, 2004).

Existem diversos mecanismos através dos quais as lemnas podem purificar um corpo d'água eutrofizado. A redução de nitrogênio ocorre pela absorção direta da planta (até 50%), pela ação de microrganismos fixados nas raízes e pela volatilização da amônia (MOHEDANO, 2004). A principal via de remoção do fósforo é pela incorporação na biomassa vegetal e microbiana, uma vez que os compostos fosfatados formados não são voláteis. Uma parte destes compostos sofre precipitação, dependendo das condições químicas da água, sendo eventualmente necessária a dragagem do solo (MOHEDANO, 2004). A atuação da lemna na diminuição de sólidos em suspensão está relacionada ao bloqueio da luz solar, impedindo a formação de fitoplâncton, que é um dos principais problemas em lagoas, pois este se mantém suspenso indefinidamente.

Segundo Valentim (1999), as vantagens das plantas aquáticas no tratamento de efluentes, em comparação a um filtro convencional (de solo ou de pedras), são a estética e o apelo ecológico; o controle de mau odor, agindo como um biofiltro de odor, possibilitando instalação próxima à comunidade; o tratamento aeróbio e anaeróbio do efluente, retirando sólidos suspensos e microrganismos patogênicos; e o controle de insetos, por ação de plantas superficiais (POTT; POTT, 2002).

Em estudos realizados por Mohedano (2010), utilizando macrófitas lemnáceas da espécie *Landoltia punctata* no tratamento do efluente de suinocultura, após o tratamento em um biodigestor, verificou-se, após um ano de monitoramento, uma produtividade de biomassa de lemnas de 180 g/m².dia de matéria fresca, ou 68 t/ha.ano, com um teor de proteína de 35%. As lagoas de lemnas apresentaram excelentes resultados no polimento do efluente, para os parâmetros avaliados, com as seguintes eficiências de remoção: NTK= 98%, N-NH₃= 99%, PT= 94%, DQO= 96%, DBO₅= 95%, ST = 92%, E. coli = 2 log.

É importante salientar que, para o sucesso do tratamento de efluentes com lemnas é necessário rigoroso manejo e monitoramento, principalmente em relação a remoção de biomassa, pois estas podem envelhecer e ao se decomporem os nutrientes podem voltar para a coluna d'água (JOURNEY; SKILLICORN; SPIRA, 1993). Este

mesmo autor afirma que o manejo de populações de lemnas é simples, podendo ser efetuado manualmente ou com o auxílio de telas.

Talvez a principal vantagem das lagoas de lemnas quando comparadas as lagoas de estabilização de elevada produção algal seja a redução dos sólidos suspensos (MOHEDANO, 2010), devido à ausência da contribuição da biomassa de algas para a elevação desse parâmetro. Porém o maior destaque, quando comparado a outros sistemas de tratamento é a produção de uma biomassa de excelente qualidade nutricional (MOHEDANO, 2004).

3.4.3. Parâmetros intervenientes no cultivo de macrófitas

Para que as lemnas tenham um desenvolvimento ideal é necessário que haja condições ambientais propícias. Temperatura da água, radiação, pH, concentração de nutrientes, correnteza, salinidade, carbono inorgânico, controle do crescimento, presença de toxinas e competição com outras espécies são fatores que dependendo dos seus valores interferem no desenvolvimento da planta. Alguns desses parâmetros serão discutidos individualmente a seguir:

Temperatura: a temperatura influencia a produção de macrófitas por controlar a velocidade de reações químicas destes vegetais (KIRK, 1994; BIUDES; CAMARGO, 2008). De maneira geral, altas temperaturas favorecem a produção por acelerarem as reações químicas metabólicas das macrófitas aquáticas (GENEVIÈVE et al., 1997; BIUDES; CAMARGO, 2008). Contudo, cada espécie apresenta uma faixa de temperatura ótima para o seu crescimento.

Em climas temperados, onde as estações são bem definidas e, portanto, há marcantes variações de temperatura e radiação solar ao longo do ano, a produção de biomassa apresenta oscilações sazonais.

Em estudos realizados em região temperada (Carolina do Norte, EUA), observou-se que a macrófita flutuante *Lemma* sp. foi abundante no verão, quando as temperaturas da água ficaram em torno de 20°C, e desapareceu no inverno, quando as temperaturas da água ficaram entre 3°C e 1°C (BIUDES; CAMARGO, 2008).

Em regiões tropicais, devido às estações serem mais estáveis, espera-se que haja menor variação na produção de biomassa. Entretanto, fatores como variação ao longo do ano de pluviosidade e do nível d'água tem se mostrado importantes como

responsáveis pela oscilação da produtividade de biomassa. Em climas tropicais de ambientes costeiros, que apresentam pequena mudança sazonal, verifica-se que a produção de macrófitas é constante ao longo do ano.

Radiação fotossinteticamente ativa: este fator é essencial à produção de macrófitas aquáticas por controlar a fotossíntese destes vegetais. As taxas fotossintéticas das macrófitas aumentam com o aumento da radiação fotossinteticamente ativa até o nível de saturação, a partir do qual a fotossíntese pode ser inibida (COSBY et al., 1984; BIUDES; CAMARGO, 2008).

A maioria dos estudos sobre o efeito da radiação na produção de macrófitas tem sido realizado em espécies submersas, nas quais a quantidade necessária de radiação varia com a espécie, onde umas necessitam de taxas mais altas e outras estão adaptadas à condições de sombra.

Estudos sobre a influência da radiação sobre macrófitas aquáticas flutuantes são raros. Esta carência de estudo se deve ao fato de que espécies flutuantes não são influenciadas pela transparência da água como as submersas. No entanto, algumas espécies flutuantes e emergentes podem ocorrer em áreas mais ou menos sombreadas por outras espécies de macrófitas ou pela vegetação terrestre (mata ciliar) (LEUNG, 2005; BIUDES; CAMARGO, 2008).

Carbono inorgânico dissolvido: este pode controlar a produtividade de macrófitas aquáticas submersas, pois é essencial a fotossíntese destes vegetais. Entretanto não possui muita relevância entre macrófitas flutuantes, pois estas retiram o CO₂ diretamente da atmosfera.

Velocidade de corrente: a velocidade de corrente é um fator que pode determinar a ocorrência, limitar a produtividade ou favorecer o crescimento de macrófitas. Altas velocidades transportam macrófitas e impedem a formação de bancos (CAMARGO et al., 2003; BIUDES; CAMARGO, 2008).

Velocidade de corrente moderada pode favorecer o crescimento e o aumento da produtividade de macrófitas aquáticas. Este favorecimento ocorre devido a dois motivos: prejuízo ao crescimento de fitoplâncton e do perifiton que favorece o crescimento das macrófitas submersas; maior disponibilidade de nutrientes para as macrófitas flutuantes (CAMARGO et al., 2003; BIUDES; CAMARGO, 2008).

Estudos sobre o efeito da velocidade de corrente sobre a produtividade de macrófitas são escassos no Brasil. Entre os estudos realizados, Silva (2008) avaliou a produção de biomassa da macrófita flutuante *Eichhornia crassipes* em diferentes velocidades de corrente e constatou efeito positivo do aumento da velocidade de corrente sobre a produção de biomassa.

Concentração de nutrientes: o nitrogênio e fósforo são elementos constituintes da biomassa das macrófitas e são essenciais na composição de moléculas que atuam nos processos metabólicos. A disponibilidade destes nutrientes é um dos principais fatores que controlam a ocorrência de produção de biomassa de macrófitas aquáticas.

Diversos estudos têm demonstrado que em ambientes com maiores concentrações de nitrogênio e fósforo apresentam maior frequência de ocorrência e maior produção de macrófitas. Assim, a eutrofização artificial pode provocar aumento na produção de macrófitas flutuantes, emersas e submersas, com intensa proliferação destes vegetais.

Henry-Silva (2001), em estudo realizado em sistemas de tratamento de efluentes de viveiros de tilápia-do-nilo, encontrou uma relação positiva entre produção de biomassa pelas macrófitas flutuantes *E. crassipes* e *P. Stratiotes* e as concentrações de fósforo e nitrogênio da água (Tabela 3).

Tabela 3. Valores médios de produção de biomassa em diferentes concentrações de nutrientes

Espécies	Produção de biomassa (g MS.m ⁻² .dia ⁻¹)	Nutrientes	
		NT (µg.L ⁻¹)	PT (µg.L ⁻¹)
<i>E. crassipes</i>	22,07	350	77
<i>E. crassipes</i>	2,93	190	12
<i>P. Stratiotes</i>	7,10	350	77
<i>P. Stratiotes</i>	1,42	190	12

Fonte: Biude & Camargo (2008)

A alta produção de biomassa de macrófitas flutuantes em águas com elevadas concentrações de nitrogênio e fósforo tem despertado o interesse em utilizá-las em

sistemas de tratamento de efluentes enriquecidos em nutrientes. Nestes sistemas, as macrófitas removem nutrientes da água e os estocam em sua biomassa (TILLEY et al., 2002). Além disto, servem de substrato para microrganismos que mineralizam e removem nutrientes efluentes (BIUDES; CAMARGO, 2008).

Variação do nível de água: diversos estudos têm demonstrado a influência da variação do nível d'água sobre a biomassa, frequência de ocorrência e/ou a produção de macrófitas (PALMAS-SILVA et al., 2000; SANTOS; ESTEVES, 2002; SANTOS; ESTEVES, 2004; PALMAS-SILVA et al., 2005; SANTOS et al., 2006; THOMAZ et al., 2006; BIUDES; CAMARGO, 2008).

Thomaz *et al.* (2006) estudou o efeito da redução do nível d'água nas espécies flutuantes *E. crassipes* e *Salvinia herzogii* e submersas *E. najas* em braços do Reservatório de Itaipu (fronteira Brasil-Paraguai). Os autores observaram que a redução do nível d'água em 5 m não alterou a frequência de ocorrência de *E. crassipes* e *S. herzogii* que permaneceram constantes antes e após o evento. Por outro lado, essa redução diminuiu a frequência de ocorrência de *E. najas* de 38% para 9% um mês após o evento. Assim, espécies flutuantes parecem ser menos influenciadas pela variação do nível d'água que as submersas e até mesmo emersas (BIUDES; CAMARGO, 2008).

3.5. Aproveitamento de Biomassa

A biomassa de microalgas e macrófitas que se desenvolve em lagoas de tratamento de esgotos sanitários deve ser removida periodicamente para evitar a superpopulação e consequente competição por recursos, e assim garante-se a propagação das plantas remanescentes.

Essa biomassa recolhida pode ser utilizada para diversos fins, como adubo orgânico, biocombustíveis, alimentação de peixes e aves (em estado fresco, incorporada a ração ou em forma peletizada), entre outras. Entretanto, não é apropriado a sua utilização para alimentação humana.

3.5.1. Adubo

A qualidade do adubo depende muito da espécie de macrófita e alga utilizada para fabricá-lo. Em geral, para se obter um adubo de boa qualidade, recomenda-se

acrescentar materiais de origem animal, como esterco, pois o resíduo vegetal apresenta maior concentração de carbono, enquanto o animal de nitrogênio.

As macrófitas aquáticas apresentam grande capacidade em estocar nutrientes e estes podem ser devolvidos ao ambiente após sua decomposição. Segundo estudos conduzidos por Antunes e Espíndola (2009) os adubos gerados pelas espécies de macrófitas *Pistia stratiotes*, *Eichhornia crassipes* e *Lemna minor* que são cultivadas em sistemas de tratamento de esgotos do tipo áreas alagadas (*wetlands* construídas) demonstraram ser uma boa alternativa quando misturados com resíduos sólidos domiciliares orgânicos (RSD), as quais a porcentagem de mistura destes resíduos à biomassa de macrófitas foram de 80% e 40% de volume. A utilização de macrófitas de forma isolada não é pertinente, pois o processo é mais lento e não atinge a temperatura considerada ideal, o que ocorre somente após a adição de resíduos sólidos domiciliares. Os RSD devem ser utilizados em quantidades adequadas a fim de evitar um aumento da salinidade e consequente condutividade elétrica, o que torna o adubo tóxico à biota e, portanto, inviável de utilização.

As microalgas também apresentam uma grande capacidade de armazenar nitrogênio e fósforo removidos de esgotos sanitários que podem ser recuperados para a utilização de adubos (BENETTI, 2017). Em sistemas de LAT's as microalgas podem ou não ser removidas do efluente final, sendo este último caso aplicado diretamente sobre o solo para o aproveitamento de nutrientes.

3.5.2. Alimentação

Em ambientes naturais, as lemnáceas constituem um importante recurso alimentar para aves aquáticas, peixes e insetos (POTT, 200). A baixa porcentagem de fibras e o elevado valor nutricional as tornam um alimento de boa qualidade para animais domésticos e possivelmente humanos (IQBAL, 1999), quando estes não são cultivados em esgotos sanitários. Todavia a relação entre proteína e fibras pode variar de acordo com o estado trófico da água onde se desenvolvem, com a frequência de coleta e com a espécie envolvida (JOURNEY et al., 1993). Said et al. (1979) afirmam que o cultivo de lemnas pode produzir dez vezes mais proteína por hectare ano do que a soja, alcançando uma taxa de 59 kg de proteína, de boa qualidade, por dia. Todavia, a quantidade de lipídios contidas nas lemnáceas é extremamente baixa, uma vez que são utilizadas as folhas e não as sementes como no caso da soja. Landesman et al. (2002)

apresentam a constituição da farinha de *Lemna giba*, onde a quantidade de proteína bruta atinge 41,7% e os lipídios não ultrapassam 4,4%. Portanto a alimentação de animais constituída à base de farinha de lemna necessitaria de complementos ricos em gordura (MOHEDANO, 2004).

A aplicação mais comum de microalgas tem sido na aquicultura, para a alimentação direta ou indireta de algumas espécies de peixes, moluscos, crustáceos e de diversos organismos forrageiros de interesse econômico. São empregadas espécies de Bacillariophyceae (*Chaetoceros* spp. Ehrenberg, *Thalassiosira* spp. Cleve, *Phaeodactylum tricornutum* Bohlin e *Skeletonema costatum* Greville), Haptophyceae (*Isochrysis* spp. Parke), Cryptophyceae (*Rhodomonas* spp. Karsten), Chrysophyceae (*Monochrysis* spp. Skuja), Prasinophyceae (*Tetraselmis* spp. Stein), Cyanophyceae (*Arthrospira* spp. e *Spirulina* spp.) e Chlorophyceae (*Chlorella* spp., *Dunaliella* spp. e *Scenedesmus* spp. Bourrely), dentre outras classes e diversas espécies (DERNER et al., 2006).

Segundo Pribadi (2009), microalgas podem produzir cerca de 10% a 40% em peso de hidrocarbonetos e açúcares e de 20% a 40% de proteínas. Além disso, sua taxa de crescimento é 100 vezes mais rápida do que plantas terrestres, com multiplicação ocorrendo em intervalos de tempo de 24 a 48 horas.

3.5.3. Biocombustíveis

Os biocombustíveis são combustíveis formados a partir de biomassa, ou seja, matéria orgânica (vegetal, animal e microrganismos), portanto têm origem de fontes renováveis. As fontes mais conhecidas no mundo são cana-de-açúcar, milho, soja, semente de girassol, madeira e celulose. Os biocombustíveis são biodegradáveis, por isso causam menor impacto ao meio ambiente (PETROBRAS, 2007). Eles podem substituir total ou parcialmente os combustíveis derivados de petróleo em motores a combustão.

Segundo dados fornecidos pela Empresa de Pesquisa Energética o Brasil e os Estados Unidos foram os principais países a produzir e comercializar biocombustíveis, com um percentual de 84% no ano de 2017 (EMPRESA DE PESQUISAS ENERGÉTICAS, 2018).

Alguns estudiosos defendem o uso dos biocombustíveis, apontando algumas vantagens: redução de gases poluentes na atmosfera (dióxido e monóxido de carbono)

de até 48%, não poluem o meio ambiente pelo fato de não serem tóxicos, emitem 47% menos material particulado (que penetra nos pulmões) e também são fontes renováveis de energia ao contrário dos combustíveis fósseis, como o petróleo e o carvão mineral (DUVAL; SANTOS, 2012).

Existe uma grande variedade de biocombustíveis que hoje em dia são usados em larga escala e tem grande potencial de crescimento, tais como os citados a seguir:

Biogás: o biogás é produzido através da decomposição biológica da matéria sob condições de anaerobiose (sem a presença de oxigênio). Ele é composto principalmente por gás metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), podendo também conter certa quantidade de hidrogênio, sulfeto de hidrogênio, amônia e outros gases traço. A sua composição é influenciada principalmente pelos substratos utilizados, pela técnica de fermentação e pelas diferentes tecnologias de construção de usinas. A Tabela 4 mostra a composição média do biogás.

Tabela 4. Composição média do biogás

Componente	Concentração
Metano (CH_4)	50% - 75% em volume
Dióxido de carbono (CO_2)	25% - 45% em volume
Água (H_2O)	2% - 7% em volume (20 - 40°C)
Sulfeto de hidrogênio (H_2S)	20 - 20.000 ppm
Nitrogênio (N_2)	< 2% em volume
Oxigênio (O_2)	< 2% em volume
Hidrogênio (H_2)	< 1% em volume

Fonte: BMELV (2010)

A produtividade (produção de gás em relação ao volume do biodigestor), rendimento (produção de gás em relação à quantidade de substrato introduzido) e taxa de degradação (expressa a eficiência do aproveitamento do substrato) são parâmetros

que descrevem o desempenho de uma usina de biogás. A Tabela 5 apresenta a produção de biogás de acordo com o grupo de substâncias.

Tabela 5. Produção de biogás específica e teor de metano dos respectivos grupos de substâncias

	Produção de biogás (l/kg de MOS)	Teor de metano (CH₄) (% em volume)
Proteína digestível	700	71
Gordura digestível	1.250	68
Carboidrato digestível	790	50

*MOS: matéria orgânica seca

Fonte: adaptado BMELV (2010)

Biodiesel: o biodiesel é um combustível formado a partir de óleos vegetais ou gorduras animais, etanol ou metanol e catalisadores, portanto trata-se de um éster (produto da reação de um ácido, geralmente orgânico, com um álcool), ao contrário do diesel que é uma n-parafina (ou Normal-Parafina, subproduto do petróleo processado nas refinarias) (PETROBRAS, 2007). Ele pode ser utilizado puro ou em mistura de diversas proporções com o diesel mineral.

Devido à grande extensão territorial do Brasil, existe uma grande diversidade de matérias primas para a produção de biodiesel, como a soja, o girassol, a mamona, o milho, o pinhão-manso, o caroço de algodão, a canola, o babaçu, o buriti, o dendê, a macaúba e o amendoim, além das de origem animal como o sebo bovino e as gorduras de frango e de suínos. Óleos de descarte, óleos de vísceras de animais e usados para a fritura de alimentos também são utilizados como matérias-primas alternativas. A Tabela 6 reúne as principais oleaginosas com predisposição para a produção de biodiesel no Brasil.

Em geral, pode-se afirmar que ésteres alquílicos de ácidos graxos podem ser produzidos a partir de qualquer tipo de matéria-prima oleaginosa, mas nem toda matéria-prima pode ser utilizada para a obtenção de um produto que atenda às especificações internacionais do biodiesel (RAMOS et al., 2017).

Tabela 6. Oleaginosas cultivadas no Brasil com potencial para produção de biodiesel

Cultivar	Óleo (%)	Cultivo	Rendimento de óleo (kg/ha)
Palma (fruto)	22	Perene	2000-8000
Pinhão - manso	38	Perene	1200-1500
Babaçu	60	Perene	120
Mamona	39,6-59,8	Anual	470
Amendoim	40-60	Anual	788
Girassol	40-47	Anual	774
Soja	18-21	Anual	560
Colza	34-40	Anual	570
Algodão (caroço)	18-20	Anual	361

Fonte: Ramos et al. (2017)

Bioetanol: o bioetanol é um combustível obtido através da fermentação controlada e da destilação de resíduos vegetais, como o bagaço da cana-de-açúcar, a beterraba, trigo ou o milho.

O bioetanol e o biodiesel são os biocombustíveis líquidos de maior destaque. Mediante rotas biológicas, o bioetanol pode ser produzido com base em qualquer biomassa que contenha quantidades significativas de amido ou açúcares. Hoje em dia, há um leve predomínio da produção com base em materiais amiláceos (53% do total), como milho, trigo e outros cereais e grãos. Para esses casos, a tecnologia de conversão geralmente começa com a separação, a limpeza e a moagem do grão. A moagem pode ser úmida, quando o grão é embebido e fracionado antes da conversão do amido a açúcar (via úmida), ou seca, quando isso é feito durante o processo de conversão (via seca). Em ambos os casos, o amido é tipicamente convertido em açúcares por meio de um processo enzimático a altas temperaturas. Os açúcares liberados são, então, fermentados por leveduras, e o vinho resultante é destilado para a purificação do

bioetanol. Além do bioetanol, esses processos envolvem, geralmente, diversos coprodutos, que variam conforme a biomassa utilizada.

Devido as diferentes rotas de produção de bioetanol e da matéria prima, existem diferentes índices de produtividade por unidade de área cultivada. Os valores aproximados de produtividade são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7. Produtividade média de bioetanol por área para diferentes culturas

Cultura	Produtividade média (litros/ha)
Trigo	1.900
Sorgo sacarino	2.500
Mandioca	3.000
Milho	4.000
Beterraba	6.600
Cana (incluso o etanol obtido do resíduo celulósico)	9.200

Fonte: adaptado Nogueira et al. (2008)

Biohidrogênio: o hidrogênio, que é um carreador energético, é o elemento que tem o mais alto poder calorífico, ou seja, maior energia por unidade de peso em comparação com outros combustíveis, pois é o elemento mais leve existente. Especificamente a quantidade de energia libertada durante a reação do hidrogênio é cerca de 2,5 vezes do poder de combustão de um hidrocarboneto (gasolina, gásóleo, metano, propano) (SANTOS; SANTOS, 2005).

O biohidrogênio é produzido a partir de processos biológicos, a qual alguns organismos produzem o gás hidrogênio (H₂) como resultado de suas atividades metabólicas de fotossíntese ou fermentação. É uma tecnologia de baixo custo quando comparada a outras técnicas e requer menos energia para geração.

Ainda há pouca informação sobre métodos de produção de biohidrogênio, pois os processos para sua obtenção ainda estão em fase experimental nos laboratórios do mundo todo.

Apesar disto, acredita-se que o biohidrogênio proporcionará o barateamento no preço de comercialização de combustível para automóveis, além de ser útil para alguns setores da indústria.

Biocombustível a partir de algas e macrófitas: biocombustíveis, tais como biogás, biodiesel e bioetanol, podem ser gerados através de matéria orgânica oriundas de algas e macrófitas.

Microalgas e outros microrganismos oleíferos também têm sido propostos e amplamente estudados como fonte de lipídeos para a produção de biodiesel. Comparativamente a outras culturas agrícolas, o cultivo de microalgas é bastante promissor porque, além de apresentar maior produtividade em óleo, exige menores extensões de terra para a sua produção. Além disto, as microalgas apresentam um ciclo de vida de poucos dias, permitindo colheitas contínuas e diminuindo a logística de armazenagem, necessária para o caso de culturas anuais, e sua habilidade em consumir CO₂ como insumo para a fotossíntese (crescimento autotrófico) pode contribuir para uma eventual redução do aquecimento global. Por outro lado, as microalgas podem ser cultivadas em sistemas intensivos, empregando esgotos sanitários e rejeitos agroindustriais como fonte de carbono, constituindo-se, portanto, em uma solução tanto energética quanto ambiental (pois trata os efluentes) que não oferece qualquer competição com a produção de alimentos (RAMOS et al., 2017).

Os teores em lipídios e triglicerídios (TG) dependem das condições das culturas, sendo que nos anos de 1940, foram relatados percentuais bastante elevados, de 70 a 85% em lipídios (TEIXEIRA; MORALES, 2007). A Tabela 8 apresenta algumas microalgas promissoras como matéria prima para a produção de biodiesel. A Tabela 9 faz uma comparação da produção de óleo e biodiesel entre várias espécies utilizadas para produção do combustível.

Tabela 8. Percentual de lipídios em algumas microalgas em relação à massa seca

Microalgas	% de Lipídios	Microalgas	% de Lipídios
Scenedesmus obliquus	12-14	Euglena gracilis	14-20
Scenedesmus dimorphus	16-40	Prymnesium parvum	22-38
Chlamydomonas reinhardii	21	Porphyridium cruentum	09-14
Chlorella vulgaris	14-22	Spirulina platensis	04-09
Spirogyra sp.	11-21	Synechoccus sp.	11
Dunaliella tertiolecta	64-71		

Fonte: Teixeira, Morales (2007)

Tabela 9. Comparação de produção de óleo/biodiesel de diversas oleaginosas

Cultura	Quantidade de óleo (% óleo/peso de biomassa)	Produção de óleo (l óleo/ ha ano)	Área (m ² ano/ kg biodiesel)	Produtividade de biodiesel (kg biodiesel/ha.ano)
Milho	44	172	66	152
Soja	18	636	18	562
Canola	41	974	12	862
Girasol	40	1.070	11	946
Mamona	48	1.307	9	1.156
Dendê	36	5.366	2	4.747
Microalgas (Baixo teor)	30	58.700	0,2	51.927
Microalgas (Médio teor)	50	97.800	0,1	86.515
Microalgas (Alto teor)	70	132.900	0,1	121.104

Fonte: adaptado Andrade (2014)

As microalgas também podem ser utilizadas como matéria orgânica para a realização da digestão anaeróbia, a qual gera o biogás; assim como, existem espécies que apresentam elevada concentração de carboidratos que podem ser utilizados para a geração de açúcares e posterior fermentação e destilação, originando o bioetanol. Assim, após a extração de óleo, a biomassa das algas resultante pode ser transformada em etanol, metano, e, além disso, pode ser utilizada para ração animal ou ser usada como adubo orgânico devido a seu alto teor de nitrogênio e fósforo, ou simplesmente utilizada para a cogeração de energia (eletricidade e calor) (GRIS et al., 2010).

O uso de biogás provindo de algas para geração de eletricidade pode produzir cerca de 1 kWh de eletricidade/kg de sólidos voláteis de algas (BENEMANN; OSWALD, 1996). Alguns estudos estimam que algumas espécies de algas (Kelp, Ulva, Cladophora) apresentam um potencial de produção de metano de cerca de 0,31 – 0,38 m³ CH₄/kg SV (AMON et al., 2007). Portanto as algas possuem potencial de metano atrativo, quando comparada a outras culturas. Para que haja maior produção de metano é necessário maximizar a produção de biomassa.

Em experimentos realizados por Pereira, Filho e Melo (2004) com macrófitas das espécies *Eichhornia crassipes*, *Eichhornia azurea*, *Pistia stratiotes* e *Salvinia*, a qual foram trituradas e adicionadas 1355,17 gramas da mistura dentro de um reator de digestão anaeróbia, obteve-se um biogás com cerca de 39,9% a 47,7% de gás metano (CH₄). As macrófitas apresentam baixo teor de lipídios, portanto não apresentam vantagens no seu aproveitamento para a produção de biodiesel.

As lemnas, de acordo com estudos recentes, apresentam-se também como uma alternativa para a geração de bioetanol e biodiesel. Cheng e Stomp (2009) afirmam que, após hidrólise enzimática do amido, a biomassa de *Spirodela polyrrhiza*, cultivada em dejetos suínos, pode produzir cerca de 26% de etanol em relação ao peso seco. Assim, devido a alta produtividade destas plantas, o rendimento para a produção do etanol pode ser 5 vezes superior quando comparado ao do milho, em uma mesma área. Em outro estudo, Muradov et al. (2010) avaliaram os subprodutos da pirólise (a 500°C) da biomassa de *Lemna minor*, encontrando uma produção de “bio-óleos” de 40% em relação a biomassa seca. Pode-se concluir que a alta taxa de crescimento deste grupo vegetal amplifica os aspectos qualitativos de sua biomassa (MOHEDANO, 2010).

Deve-se levar em consideração que esta produção de biomassa é, geralmente, um subproduto de sistemas de tratamento de efluentes e pode, assim, valorizá-lo favorecendo o balanço econômico durante a operação.

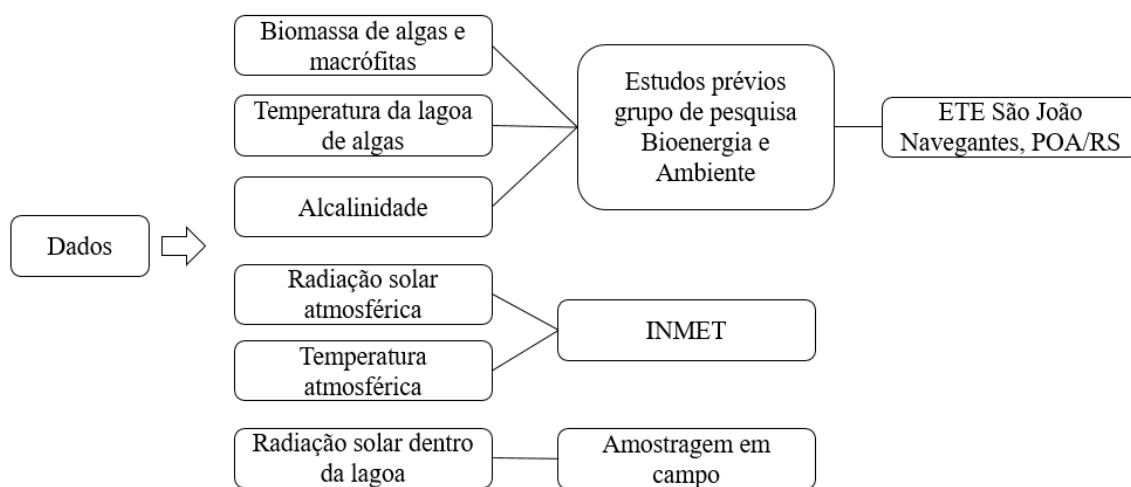
4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Materiais

Os dados de biomassa de algas e macrófitas, temperatura da lagoa de algas e alcalinidade (a qual, este último, foi aplicado para determinar o CO₂ presente no meio líquido) utilizados neste estudo foram obtidos de experimentos prévios conduzidos pelo grupo de pesquisa Bioenergia e Ambiente na planta experimental de tratamento de esgotos sanitários, localizada na Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) São João Navegantes, em Porto Alegre/ RS, nos anos 2014 a 2015.

Os dados de radiação e temperatura atmosféricas foram fornecidos pelo 8º Distrito de Meteorologia – INMET de Porto Alegre, com intervalos de medição horário. A informação da radiação solar no interior da lagoa de algas foi medida através da amostragem com o uso de um equipamento, confeccionado para este estudo, com sensor de fotodiodo. A Figura 10 esquematiza a origem dos dados.

Figura 10. Representação esquemática das fontes de obtenção dos dados



Fonte: própria da autora

A planta experimental da ETE São João Navegantes emprega reator UASB alimentado com esgoto sanitário bruto e o seu efluente é encaminhado a duas LAT's operadas em paralelo. Este reator tem forma em planta circular constituído em fibra de vidro, com 2,42 metros de diâmetro e 4 metros de altura total (Figura 11).

Figura 11. Reator UASB



Fonte: própria da autora

As LAT's (Figura 12) possuem 40 metros de comprimento e 5 metros de largura na seção superior do canal.

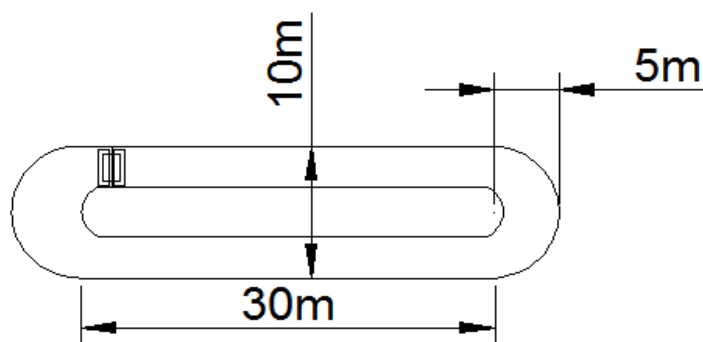
A Figura 13 mostra uma representação esquemática das dimensões das lagoas. As paredes laterais são revestidas em concreto e apresentam inclinação dos taludes de 45°. Possuem 0,75 metros de profundidade e a lâmina d'água é mantida a 30 centímetros, o que corresponde a uma área superficial de 148 m² e volume de 80 m³.

Figura 12. LAT's de algas (direita) e macrófitas (esquerda) operadas em paralelo.



Fonte: própria da autora

Figura 13. Dimensões das LAT's



Fonte: Barroso (2015)

Dispõem de pá impulsora (Figura 14) com o objetivo de promover a mistura do efluente, a qual evita a formação de uma camada densa de algas, favorecendo o processo de fotossíntese, e proporciona um melhor contato entre a biomassa e os nutrientes.

Figura 14. Pá impulsora de mistura



Fonte: própria da autora

Para se descobrir a quantidade de radiação que penetra na lagoa, e, portanto, o que de fato está disponível para as algas, foi necessário desenvolver um instrumento de medição de radiação solar que permite a leitura simultânea da luz na superfície e dentro do efluente (o item 4.1 descreve como foi realizada a confecção do equipamento). Este sensor foi ancorado junto ao fundo da lagoa por meio de uma base de ferro (Figura 15) e posicionado no meio do canal, ao qual o acesso foi possibilitado por uma ponte. As leituras foram realizadas de maneira manual através de dois multímetros.

Figura 15. Sensor de radiação solar



Fonte: própria da autora

Como os dados de radiação solar no interior da lagoa foram medidos em período quente e ao longo do ano ocorre uma grande variedade de espécies de algas, o que implica em níveis diferentes de penetração da radiação solar, optou-se por trabalhar com os dados do período de dezembro de 2014 a fevereiro de 2015, totalizando nove pontos. Além disso, este foi o período em que houve maior consistência dos dados nos diferentes parâmetros avaliados. Entretanto, recomenda-se que seja utilizado um intervalo de tempo maior, como um ano, pois assim é possível o registro mais preciso das variações sazonais e do dinâmica da biomassa.

Os parâmetros para a avaliação da produção de biomassa (temperatura, radiação solar e dióxido de carbono) foram escolhidos devido serem potenciais fatores limites do sistema, uma vez que o esgoto sanitário bruto apresenta nutrientes suficientes para suprir a necessidade das algas e macrófitas.

4.2. Métodos

4.2.1. Confecção do instrumento de medição de radiação solar

O instrumento foi desenvolvido em parceria com o Laboratório de Energia Solar da UFRGS (LABSOL), o qual forneceu os sensores e realizou sua montagem e calibração.

O sensor utilizado no instrumento trata-se de um fotodiodo, o qual possui funcionamento similar a uma célula fotovoltaica. Este sensor gera um sinal em forma de diferença de potencial elétrico, e, portanto, para se ter uma resposta em uma determinada faixa de tensão foi necessário utilizar um resistor associado. A resistência utilizada foi de 30 ohms.

Para que fosse possível a sua utilização debaixo d'água todas as conexões elétricas foram vedadas com cola epóxi, deixando exposto apenas a célula de fotodiodo.

Foram desenvolvidos dois sensores, uma para ficar submerso e outro para medir a radiação na superfície, a fim de se obter medidas simultâneas de leitura de radiação e, portanto, comparar a quantidade de irradiância que penetra na lagoa em relação a disponível. Ambos foram confeccionados da mesma forma.

A calibração dos dois sensores foi efetuada através do auxílio de um piranômetro. O piranômetro é um instrumento específico para medir radiação solar numa superfície plana e expressa o resultado em W/m^2 (watts por metro quadrado). Cada equipamento possui uma constante específica dada em V/Wm^{-2} (volts metro quadrado por watts) para converter o sinal gerado, o qual é expresso em voltagem e convertido em radiação solar (W/m^2). A constante do piranômetro utilizado é de $8,28 \times 10^{-6} V/Wm^{-2}$, conforme observado na Figura 16.

Figura 16. Vista do piranômetro e valor da constante de conversão.



Fonte: própria da autora

A calibração se procedeu durante o primeiro período da tarde, entre 12:00 e 14:00 (onde o sol é mais forte), e em dia ensolarado (Figura 17) na data de 19 de setembro de 2018. O critério para uma correta calibração é a não presença de nuvens.

Os sensores e o piranômetro foram conectados a um datalogger de voltagem, e este junto a um computador, a fim de se obter medições automáticas (Figura 18). Foram realizados registros de dados a cada cinco minutos.

Figura 17. Piranômetro (centro) e sensores (borda) sendo calibrados



Fonte: própria da autora

Figura 18. Computador e datalogger utilizados para a medição automática



Fonte: própria da autora

Os dados gerados foram salvos no formato Excel e em escala de volts. Os dados do piranômetro foram convertidos em radiação através da constante e as voltagens lidas dos sensores foram passadas para milivolts (mV). Assim, as curvas de calibração, cuja entrada é a leitura da tensão dos sensores em milivolts (x) e a saída o valor da radiação (Y) para cada um dos sensores é apresentado na Tabela 10.

Tabela 10. Curvas de calibração de cada sensor.

Sensor	Curva de calibração	Erro (R ²)
Submerso	$Y=20,628x - 687,39$	0,9781
Superfície	$Y=21,697x - 675,88$	0,9231

Fonte: própria da autora

Os sensores foram fixados em uma estrutura construída de tubo de PVC. O sensor a ser submerso foi fixado em uma haste em formato de “L” e o sensor utilizado para medições na superfície, em uma haste em forma de “T”. A Figura 19 mostra o

sensor de fotodiodo utilizado para a medição e a Figura 20 apresenta a configuração final do instrumento de medida.

Figura 19. Sensor de fotodiodo.



Fonte: Própria da autora

Figura 20. Instrumento confeccionado para medir radiação



Fonte: própria da autora

Todas as leituras de voltagem foram realizadas por um multímetro da marca Fertak Tools modelo MAS838L, na escala de milivolts (mV).

4.2.2. Algas

4.2.2.1. Biomassa de algas

Os dados de biomassa de algas foram medidos a partir da análise de Sólidos Suspensos Voláteis (SSV), pois, segundo Pearson; Mara e Bartone (1987), 70% a 90% dos sólidos suspensos totais presentes no efluente de lagoas é devido a células de algas. Ainda, a clorofila-*a* pode corresponder, dependendo das espécies presentes, de 1% a 2% do peso seco das algas planctônicas (APHA, 2003).

O valor adotado foi de 90% de algas do total de SSV, pois realizando uma regra de três com os dados de clorofila-*a* e SSV verificou-se que todos os resultados se encontravam entre a faixa de 1% a 2% de clorofila-*a*, o que indica, portanto, que o efluente apresenta grande presença de algas, por isso a adoção de uma porcentagem elevada.

Os dados foram medidos na unidade de mg/l (miligrama por litro). Para se obter uma produção semanal de algas eles foram multiplicados pela vazão da lagoa (0,98 m³/h) e expressos em kg/semana conforme mostrado na Equação 1. O TDH (tempo de detenção hidráulico) da lagoa era de 3,4 dias.

$$P_i = \frac{SSVi * 0,98 * 24 * 7}{1000} \text{ Equação 1}$$

Onde,

P_i: produção de biomassa de algas (kg/semana)

SSVi: sólidos suspensos voláteis (mg/l)

4.2.2.2. Temperatura

A temperatura da lagoa foi medida três vezes na semana de forma manual através de termômetro apropriado em escala de °C (graus Celsius). A média desses valores foi tomada como o dado de temperatura semanal.

4.2.2.3. Dióxido de carbono

Foram medidas as alcalinidades total e de Ripley do efluente da lagoa. Esses parâmetros medem a presença do sistema carbonato. Para determinar a quantidade de CO_2 disponível para a utilização das algas fez-se a diferença de alcalinidade total e alcalinidade de Ripley de bicarbonatos medidos na LAT de algas. As variáveis foram amostradas nos mesmos dias de coleta de SSV no efluente.

A alcalinidade total é composta por ácidos carbônicos (H_2CO_3), bicarbonatos (HCO_3^-) e carbonatos (CO_3^{2-}). Ao proceder a subtração com a alcalinidade de Ripley sabe-se a concentração das espécies de ácidos carbônicos e carbonatos, a qual para a faixa de pH da lagoa, que varia de 7,1 a 7,9, há maior concentração da primeira espécie (segundo dados do diagrama pC x pH que será apresentado no item resultados).

Como a concentração de H_2CO_3 não varia com o pH em sistemas abertos, pode-se considerar sua concentração proporcional a de CO_2 em solução. Este comportamento será melhor explicado no item 5.1.2.

Este balanço consistiu em uma simplificação, pois parte-se do princípio que a alcalinidade do meio é fornecida principalmente pela presença do sistema carbonato, constituído por carbonatos, bicarbonatos e ácido carbônico. Outros fatores podem vir a interferir, entretanto em sistemas não controlados a modelagem das variáveis necessárias torna-se complexa e inviável devido a não disponibilidade de todos os dados necessários.

4.2.2.4 Medição da radiação na lagoa

A radiação foi medida sob duas condições, com o misturador da LAT de algas desligado, portanto comportando-se como uma lagoa de estabilização, e com o misturador ligado, conforme operação normal.

Os sensores foram mantidos fixos na mesma posição central do canal em todas as coletas de dados. O sensor submerso foi localizado no sentido contra a corrente e foram realizadas medidas em três profundidades diferentes da lagoa: 5 cm, 12 cm e 20 cm em relação a superfície da água. O sensor de superfície foi mantido a uma altura de 1,30 metros da base do canal.

As leituras de radiação foram realizadas a cada 15 minutos de maneira simultânea e manual entre aproximadamente 8:00 da manhã e 16:30 da tarde, pois a partir deste horário os valores lidos encontravam-se próximo do limite de detecção do

aparelho. Foi efetuado um total de três dias de amostragens com a pá impulsora ligada e 1 dia com ela desligada. As medidas foram feitas no mês de outubro de 2018.

Com os valores amostrados montou-se um perfil de penetração de luz solar através de gráficos e realizou-se avaliações de valores de máximos, mínimos e médios.

4.2.2.5 Radiação solar

Foram utilizadas duas abordagens para avaliar a dinâmica da biomassa em relação à radiação solar.

No primeiro, a partir das medidas em campo de radiação solar na superfície e no interior da lagoa fez-se uma proporção entre estes para cada uma das profundidades a fim de determinar a porcentagem de penetração. Depois efetuou-se o valor médio e desvio padrão destes dados.

Os valores de radiação de dezembro de 2014 a fevereiro de 2015 foram fornecidos pelo INMET, sendo calculado o valor médio semanal dos valores de radiação horários. A estas quantidades aplicou-se a porcentagem média de ingresso de luz solar.

Em um segundo momento, para uma melhor avaliação da penetração solar no interior da lagoa e sua influência sobre a produção de biomassa utilizou-se a equação desenvolvida por Park, Craggs e Shilton (2011), a qual correlaciona a produção de biomassa com a radiação solar.

De acordo com os autores a máxima eficiência de conversão fotossintética pelas algas (η_{max}), cujos valores variam de 1,3-2,4% do total de radiação solar, pode ser usada para estimar a produtividade algal (P_{max}) através radiação solar incidente (I_o). Em experimento realizado em escala piloto pelos autores na Nova Zelândia durante o período de verão (dezembro a fevereiro) a produtividade de algas pode ser determinada a partir da faixa de radiação solar conforme a Equação 2.

$$P_{max} = \frac{I_o \cdot \eta_{max}}{E} \times 1000 \quad \text{Equação 2}$$

Onde,

P_{max} : concentração de biomassa ($g/m^2.dia$)

I_o : radiação solar média de dezembro de 2008 a fevereiro de 2009 ($MJ/m^2.dia$)

η_{max} : máxima eficiência de conversão de energia solar fotossintética: 2,4 %

E : valor energético da biomassa de algas como calor (21 kJ/g)

Aplicando esta equação à radiação medida durante os dias de coleta de dados de luz solar no interior da lagoa foi estimada a concentração de algas. Então, correlacionou-se estas com a porcentagem de penetração média encontrada no dia. A medição de radiação solar na lagoa durou cerca de seis horas e trinta minutos. Considerando que o dia possui aproximadamente treze horas de sol e que a aferição ocorreu durante o período de maior intensidade solar, a radiação total do dia foi a soma dos valores medidos mais um quarto desta quantidade, conforme apresentado na Equação 3. Essa proporção foi obtida pela análise dos dados do INMET nos dias de amostragem, a qual a soma da radiação das horas de coleta de dados é cerca de 4 vezes maior que a do resto do dia.

$$R_t = R_{6:30} + \frac{R_{6:30}}{4} \quad \text{Equação 3}$$

A mesma equação de concentração de biomassa também foi utilizada para os dados diárias de radiação registradas no período de dezembro de 2014 a fevereiro de 2015 fornecidos pelo INMET. A partir dos resultados de concentração encontrados, foi aplicada a correlação de penetração solar x concentração, e a intensidade de infiltração foi multiplicada pela radiação solar.

Os dados de biomassa de microalgas foram correlacionados com os parâmetros temperatura, radiação solar e dióxido de carbono e procedeu-se a montagem de gráficos de dispersão através do software *Excel* para melhor visualização da dinâmica. Todas as análises foram realizadas por inspeção visual e montagem de linhas de tendência.

A avaliação do potencial de aproveitamento das microalgas foi efetuada através da revisão de bibliografias sobre o assunto e a análise do parâmetro mais importante para o desenvolvimento da biomassa foi realizada por meio do Método dos Componentes Principais (PCA) através da extensão *Action Stat 3* instalada ao software *Excel*.

4.2.3 Macrófitas

A análise da biomassa de macrófitas foi dividida em duas etapas. Na primeira as lemnas foram introduzidas e deixadas para crescer e na segunda passou-se a efetuar o controle da densidade. A unidade utilizada para a medição da biomassa foi g/m² (grama em peso seco por metro quadrado).

4.2.3.1 Biomassa de macrófitas

A estimativa de biomassa era efetuada primeiramente tomando 3 pontos de amostragem da lagoa e depois passou-se a efetuar 6 pontos. A amostragem foi realizada através do uso de uma rede de área de 0,25 m² e furos suficientemente pequenos capazes de reter a massa de lemnas.

As quantidades amostradas foram pesadas (massa úmida) e uma parcela foi conduzida a estufa a fim de estimar a umidade presente. A porcentagem média de sólidos totais foi de 6,84%. Este último foi aplicado a todos os valores de massa úmida e depois efetuou-se sua divisão pela área da rede para obter massa seca por metro quadrado (g/m² seco). Por último, tomou-se a média dos pontos amostrados como a densidade do dia.

O controle da densidade consistiu em retirar biomassa de lemnas da lagoa a fim manter uma quantidade pré-estabelecida. A densidade foi controlada na faixa de 30 a 60 g/m² seco dentro da lagoa. Este valor foi escolhido baseado em experiências anteriores do grupo de pesquisa, pois esta proporção evita a superposição de macrófitas e consequente perda de contato com os nutrientes ou superfície (que pode provocar a morte das lemnas). Além disso, permite maior espaço para a reprodução das macrófitas e melhor cobertura da superfície por elas.

Para estimar a produção para o primeiro momento fez-se a diferença entre as densidades da amostragem atual com a anterior multiplicada pela área superficial da lagoa (148 m²) e dividiu-se pelo número de dias (resultado da diferença de dias entre uma amostragem e outra) convertendo a unidade de massa em gramas para quilos (1/1.000) conforme mostrado na Equação 4. O resultado encontrado foi a produção diária dada em kg/dia. No segundo momento realizou-se o mesmo procedimento, entretanto a este valor foi somada a quantidade retirada de macrófitas da lagoa do dia.

$$Pi = \frac{(Di - Da) * 148}{n * 1000} \quad \text{Equação 4}$$

Onde,

Pi: produção de biomassa de macrófitas (kg/dia)

Di: densidade atual (g/m² seco)

Da: densidade anterior (g/m² seco)

n: número de dias entre amostragens consecutivas

Pelo fato de não haver dados da quantidade retirada de macrófitas da lagoa durante o período de controle de densidade procedeu-se uma aproximação deste valor por meio de interpolação baseada nos crescimentos verificados na primeira etapa.

4.2.3.2 Temperatura e Radiação solar

Tanto a temperatura quanto radiação atmosférica foram obtidas através da média dos valores horários dos dados fornecidos pelo INMET. Para a temperatura foram utilizados todos os dados e para a radiação excluiu-se os horários em que não há radiação solar. Na primeira e segunda etapas foram realizadas as médias diárias.

No total houve um período de dados para a primeira fase de 2 meses e 1 mês para a segunda.

Os dados de biomassa de macrófitas foram correlacionados com os parâmetros temperatura e radiação solar e procedeu-se a montagem de gráficos de dispersão através do software *Excel* para melhor visualização da dinâmica. Todas as análises foram realizadas por inspeção visual e montagem de linhas de tendência.

A avaliação do potencial de aproveitamento das lemnas foi efetuada através da revisão de bibliografias sobre o assunto e a análise do parâmetro mais importante para o desenvolvimento da biomassa foi realizada por meio do Método dos Componentes Principais (PCA) através da extensão *Action Stat 3* instalada ao software *Excel*.

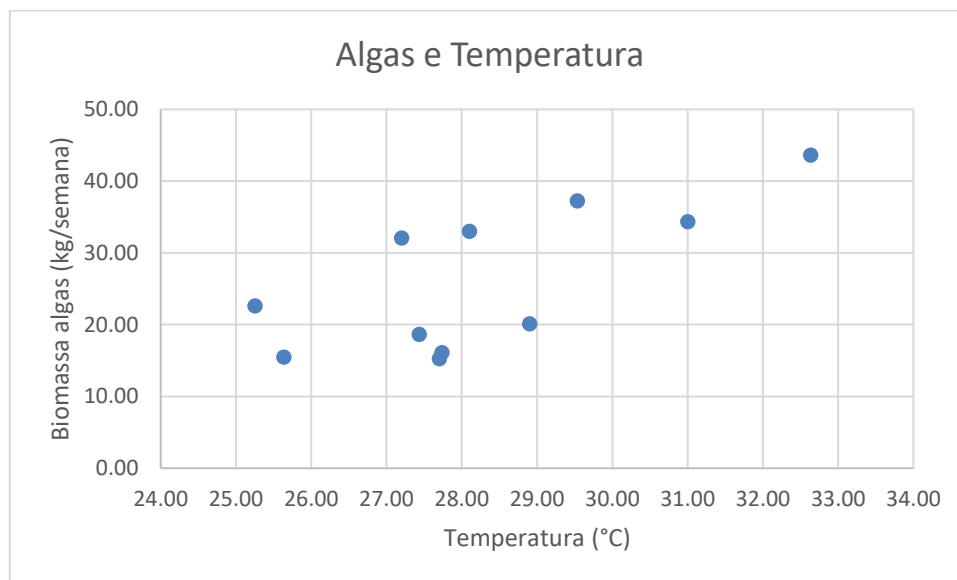
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.2 Desenvolvimento de algas

5.1.1 Produção de algas em relação à temperatura

Correlacionando a temperatura com a produção de biomassa de algas observa-se uma tendência de aumento da produção com a temperatura, conforme Figura 21.

Figura 21. Relação da temperatura com a produção de biomassa



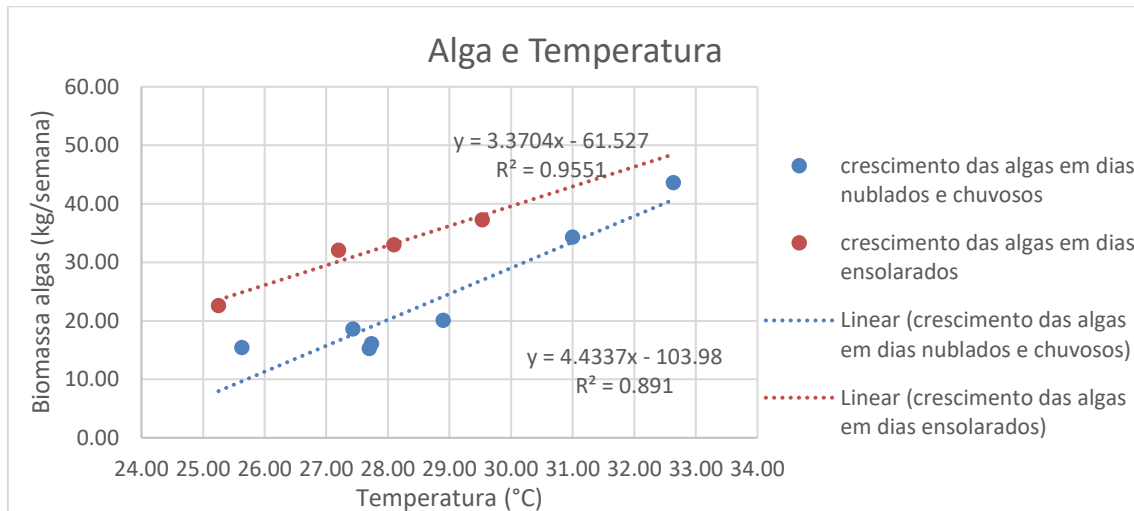
Fonte: própria da autora

Essa tendência é não linear, havendo taxas diferentes de crescimento para uma mesma variação de temperatura, ou seja, há momentos em que para uma mesma faixa de temperatura a produção é maior que em outros. Como o sistema é aberto, diversos outros parâmetros influenciam em conjunto com a temperatura, como a condição climática no local, se estava ensolarado, chuvoso ou nublado.

A Figura 22 apresenta a correlação da temperatura com a biomassa de algas em diferentes condições climáticas. Na série onde os dias são ensolarados, observa-se uma taxa de crescimento maior que a da série com dias mais fechados (nublado e chuvoso na maior parte do tempo). Em dias chuvosos ocorre menor concentração de algas comparada a dias não chuvosos, sendo este comportamento plausível devido a menor radiação solar e contribuição do volume de água pelas chuvas, o que acarreta a diluição da concentração de algas. Considerando a área de captação da lagoa, cujo valor aproximado é de 400 m², e a precipitação média de um dia de chuva em Porto Alegre, cerca de 10 mm (de acordo com a série histórica fornecida pelo 8º Distrito de

Meteorologia), tem-se um volume de 4 m³ penetrando na lagoa, o qual corresponde a cerca de 17% da vazão diária (23,52m³/dia).

Figura 22. Crescimento de algas para diferentes condições climáticas



Fonte: própria da autora

5.1.2 Produção de algas em relação ao CO₂

O crescimento de biomassa nas LAT's é controlado por fatores ambientais, operacionais e biológicos. O esgoto sanitário pode ser utilizado como fonte de água e nutrientes, como mencionado. Dentre os nutrientes, o carbono inorgânico poderá ser o nutriente limitante mais importante (SASI, 2009; ANDRADE, 2014). Ele determina a ocorrência da fotossíntese.

De acordo com a lei de Henry uma certa quantidade de gás pode se dissolver em água, onde a solubilidade de um gás ideal num líquido, a temperatura constante, é proporcional à pressão parcial sobre a solução (Equação 5). A constante de proporcionalidade, ou coeficiente de solubilidade de Henry, é dependente da temperatura e da natureza do solvente e do soluto (PILLA, 2010). A solubilidade do gás diminui com o aumento de temperatura e com a concentração de outras espécies em dissolução. Em geral a concentração de gases no líquido é pequena.

$$CO_2 = kP_{CO_2} \quad \text{Equação 5}$$

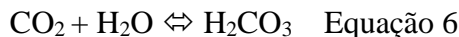
Onde,

CO₂: concentração de equilíbrio do gás (mol/l ou mg/l)

k: constante de Henry (mol/l.atm ou mg/l.atm)

P_{CO_2} : pressão parcial do gás (atm)

O gás dissolvido em água pode reagir com esta, apresentando concentrações de equilíbrio muito maiores que aqueles que não reagem (Equação 6). A presença de ácido carbônico (H_2CO_3) tende a diminuir o pH do meio aquoso. Quando há o consumo de CO_2 o equilíbrio é deslocado, dissociando o ácido carbônico.

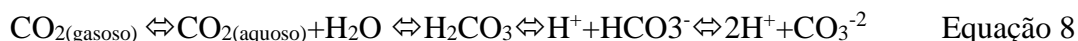


Se a água apresentar carbonatos, como carbonato de cálcio ($CaCO_3$) e carbonato de magnésio ($MgCO_3$), o gás carbônico pode se combinar a esses transformando-os em bicarbonatos (HCO_3^-) (Equação 7), a qual junto com o carbonato conferem alcalinidade ao meio aquoso. Esse processo pode ocorrer em pH de 4,4 até 8,3.



Equação 7

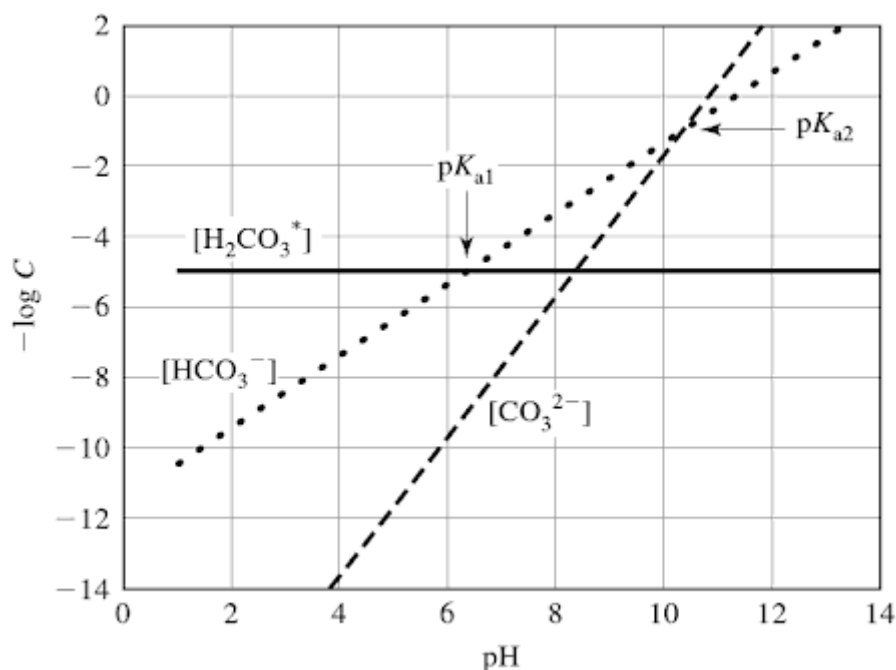
A Equação 8 apresenta de forma mais geral os possíveis comportamentos do CO_2 em solução.



De acordo com o balanço acima, o CO_2 em solução está em equilíbrio com o CO_2 atmosférico. Qualquer mudança dos componentes do sistema para a direita, no sentido do CO_2 aquoso faz com que o CO_2 gasoso seja liberado pela solução, ou se dissolva. Assim, se o sistema for aberto, a concentração de H_2CO_3 não varia com o pH em uma dada temperatura constante, mas a concentração das espécies de carbonato (CT) muda (Figura 23), ao contrário do sistema fechado, onde CT é constante (DAVIS; MASTEN, 2016).

$$CT = [H_2CO_3] + [HCO_3^-] + [CO_3^{-2}]$$

Figura 23. Diagrama pC vs. pH para o sistema carbonato (T=25°C)



Fonte: Davis e Masten, 2016

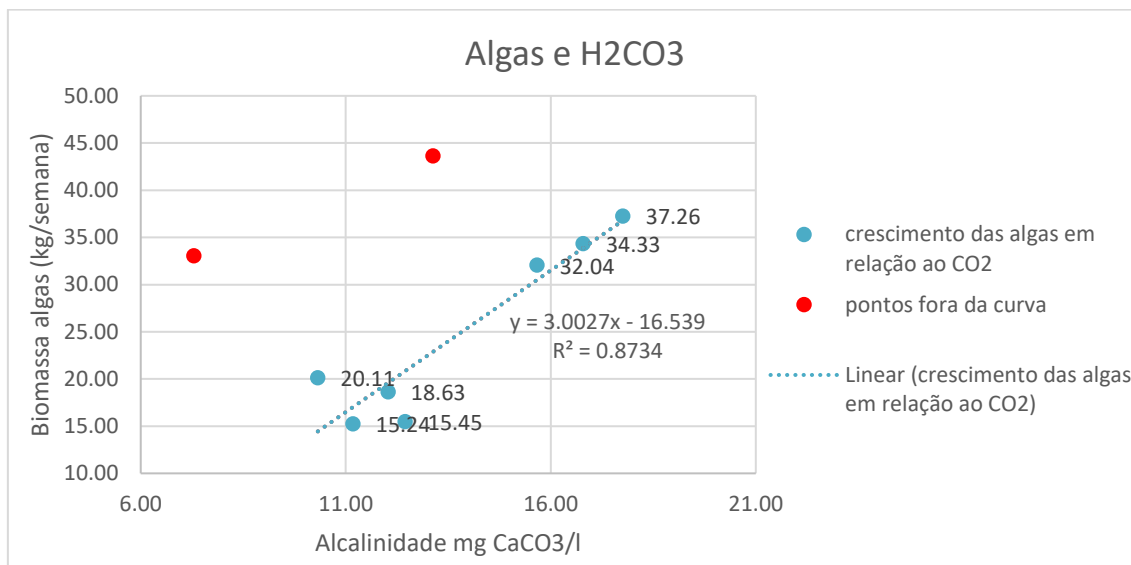
Devido ao comportamento do H_2CO_3 apresentado no diagrama acima, pode-se assumir que a quantidade de ácido carbônico em solução é proporcional à porcentagem de CO_2 dissolvido.

Para determinar a quantidade de H_2CO_3 presente na lagoa utilizou-se medidas de alcalinidade do meio.

A alcalinidade é a capacidade de neutralizar um ácido forte devido à presença de carbonatos e bicarbonatos em solução. A alcalinidade total medida, portanto, representa a quantidade CT. Também foi medida a alcalinidade de Ripley de bicarbonatos.

Ripley et al. (1986) propõem a determinação separada da alcalinidade bicarbonato (alcalinidade parcial - AP) e alcalinidade ácidos graxos voláteis (alcalinidade intermediária - AI).

Procedendo a subtração da alcalinidade total pela de bicarbonato e assumindo que para a faixa de valores de pH medidos nas lagoas, cujos valores variam de 7,1 a 7,9; existe maior concentração de ácido carbônico em comparação ao carbonato, chega-se à uma aproximação da dinâmica da biomassa de algas com a disponibilidade de CO_2 apresentada na Figura 24.

Figura 24. Dinâmica da biomassa de algas em relação ao CO₂

Fonte: própria da autora

A figura acima demonstra uma tendência de crescimento da produção de biomassa com o aumento da disponibilidade de CO₂. Os dados apresentam uma pequena dispersão ocasionada possivelmente pelas variações de temperatura, pois um aumento desta variável diminui a solubilidade do gás. Os pontos em vermelho, fora da curva, possivelmente foram influenciados por outros fatores (nutrientes, radiação solar, tempo de exposição da biomassa à radiação).

5.1.3 Perfil da radiação na lagoa de algas

A curva de calibração do sensor submerso não foi representativa para o sistema, pois os valores lidos no interior da lagoa eram muito menores àqueles utilizados na calibração, ou seja, a faixa de leitura durante o ajuste não abrangeu a faixa de valores lidos em campo. Isso ocorreu devido a calibração do instrumento durante o período de maior intensidade solar, pois a partir das 14:00 houve o surgimento de nuvens, a qual pode ter ocasionado dispersão ou concentração de radiação, portanto os valores são não confiáveis.

Como a curva de calibração do sensor de superfície não apresentou problemas, este foi utilizado como base para determinar a radiação submersa. Para isso, primeiramente realizou-se uma regressão linear entre os valores em milivolts lidos durante a calibração pelo sensor submerso (valores de x) e o de superfície (valores de y). Essa curva de calibração gerada (Equação 9) serve como um fator de correção.

$$y=0,8935x+3,5981 \quad \text{Equação 9}$$

$$R^2=0,9358$$

Esta equação foi aplicada aos valores lidos em campo do sensor submerso, e depois foi feita uma razão entre este valor corrigido e a leitura do sensor de superfície, resultando em uma proporção. Essa proporção foi multiplicada ao valor de radiação (dada em W/m^2) gerado pela curva de calibração do sensor de superfície, encontrando-se, portanto, o valor de radiação submersa.

Durante as amostragens observou-se que a radiação apresenta uma maior oscilação quanto mais próximo à superfície, a qual é influenciada principalmente pelo vento.

A diferença entre as medições realizadas entre a lagoa com o dispositivo de mistura desligado e ligado foi mínima. As possíveis explicações para este efeito são o pequeno intervalo tempo em que a lagoa permaneceu com o misturador mecânico desligada, portanto não permitindo a ocorrência da estratificação e/ou a lagoa possuir dimensões apropriadas que não interferem nos parâmetros mesmo estando desligada. Os valores serão apresentados a seguir.

Durante o período em que o misturador da lagoa permaneceu desligado percebeu-se que as macrófitas, que de alguma forma atingiram a lagoa de algas, tende a se espalhar (Figura 25). Elas, quando em grande quantidade, podem diminuir a penetração da luz solar no meio líquido. Durante a amostragem houve interferência na leitura do sinal devido a passagem das lemnas por cima do sensor.

Figura 25. Macrófitas espalhadas na LAT de algas quando desligada a mistura

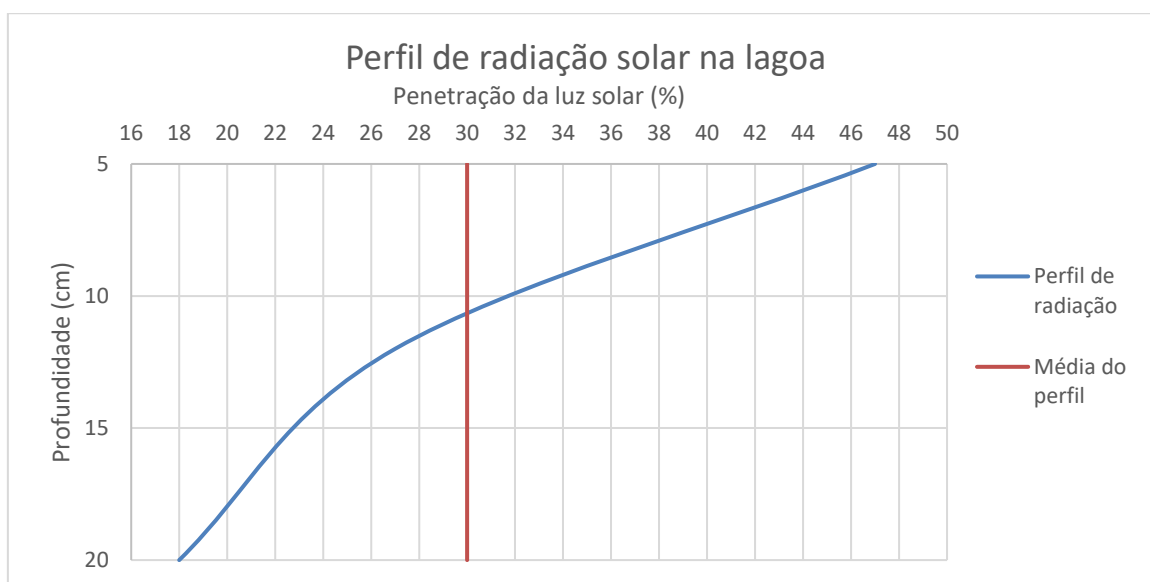


Fonte: própria da autora

Os resultados mostram que a porcentagem de penetração de luz solar nas profundidades 5 cm, 12 cm e 20 cm da superfície com o misturador mecânico da LAT ligada (realizando a mistura da lâmina d'água na lagoa) são, respectivamente, $47\% \pm 3,3$; $27\% \pm 2,7$; $18\% \pm 3,7$ em relação à radiação atmosférica incidente. A Figura 26 apresenta o comportamento médio da radiação solar dentro da lagoa nesta situação. Os valores de radiação solar são apresentados na Tabela 11.

As medidas de infiltração solar durante o período em que o misturador da lagoa permaneceu desligado para as profundidades 5 cm, 12 cm e 20 cm são, respectivamente, $58\% \pm 1,3$; $34\% \pm 0,6$; $24\% \pm 0,6$ em relação à radiação atmosférica incidente, com média de 39%. A penetração solar foi maior durante o período em que o misturador permaneceu desligado, o que pode ter sido ocasionado pela sedimentação das algas.

Figura 26. Perfil de radiação solar na LAT de algas



Fonte: própria da autora

Tabela 11. Medidas de radiação solar.

Radiação (W/m ²)	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
Superfície	737,28	262,63	1426,56	46,63
Submersa (5 cm)	344,24	130,85	620,16	23,14
Submersa (12 cm)	194,17	74,22	376,04	20,92
Submersa (20 cm)	129,57	49,56	226,60	10,54

Fonte: própria da autora

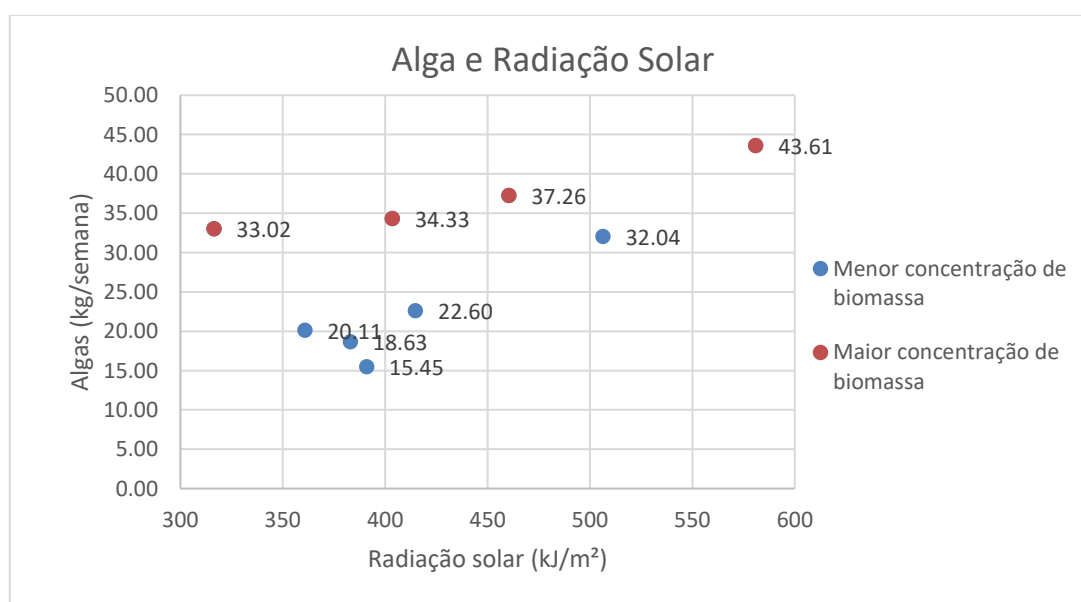
A radiação solar apresentou ampla faixa de valores, variando com o dia e horário amostrado. Apesar disso, a penetração manteve-se aproximadamente constante nos diferentes momentos de amostragem.

A oscilação da penetração solar, de maneira geral, foi mais elevada junto à superfície, entretanto o desvio padrão médio para as medidas tomadas a 20 cm de profundidade mostram o contrário. Esse comportamento ocorreu porque em um dos dias amostrados a lâmina d'água encontrava-se a 40 cm (o nível normal é 30 cm), e esta diferença foi percebida principalmente na medida junto ao fundo, a qual gerou valores diferentes dos observados nos demais dias. A média e o desvio padrão para este dia atípico de amostragem foi de $14\% \pm 0,9$ contra $21\% \pm 1,9$ dos demais.

5.1.4 Produção de algas em relação à radiação solar

A partir das amostragens realizadas no interior da lagoa em três pontos de profundidades (5, 12 e 20 centímetros da superfície) obteve-se um perfil médio de penetração da radiação solar de cerca de 30%. Essa porcentagem foi aplicada aos valores médios da semana de radiação solar superficial medida pelo INMET durante o período de dezembro de 2014 a fevereiro de 2015, resultando na Figura 27. Observa-se que há uma tendência de aumento da produção de biomassa com a elevação da radiação solar.

Figura 27. Dinâmica da biomassa de algas em relação a radiação solar



Fonte: própria da autora

Sabe-se de estudos anteriores que a resposta da produção da biomassa de algas com a radiação é linear (ASSIS; MENDEZ, 1989). Além disso, não somente a radiação influi sobre o desenvolvimento das algas como também as algas interferem na penetração da luz solar.

Os pontos em vermelho, os quais apresentam maiores concentrações de algas e visualmente definem uma outra tendência, possivelmente geram valores de atenuação superiores ao considerado, pois este maior número de biomassa tende a bloquear a passagem da radiação solar, diminuindo a penetração solar ao fundo, gerando um perfil médio de infiltração no interior da lagoa menor. Já para as menores concentrações (pontos em azul) a atenuação é menor que a considerada (30%). Além disso, outros fatores ambientais (como CO₂, temperatura, nutrientes, pH) podem atuar junto com a radiação, contribuindo, em sistemas abertos, para que a resposta da biomassa se apresente com uma correlação linear mais baixa.

Para uma melhor avaliação é necessário amostrar junto com a radiação solar a concentração de sólidos suspensos voláteis (SSV) nas diferentes profundidades.

Uma alternativa para determinar a concentração da biomassa de algas é a utilização da equação de Park, Craggs e Shilton (2011) variando a medida de radiação solar média registrada (I_o). Para o período de dezembro 2014 a fevereiro de 2015 na cidade de Porto Alegre, cujo valor de incidência solar é de aproximadamente 20,76 MJ/m²dia, resultou em uma produtividade algal de aproximadamente 24 g/m²dia. Este valor é próximo a outros resultados encontrados na bibliografia em locais de semelhante radiação solar.

Comparando a produtividade encontrada aplicando a equação de Park, Craggs e Shilton com as quantidades de SSV determinadas em laboratório, cujo valor médio para o período é cerca de 25,3 g/m² dia ± 9,7, verifica-se que os valores são próximos.

A concentração de biomassa de algas pela equação de Park, Craggs e Shilton (2011) para os valores de radiação medidos em campo é apresentada na Tabela 12.

Tabela 12. Concentração de biomassa de algas nos dias de medição de radiação solar

Radiação (MJ/m ² .dia)	Concentração de algas (g/m ² .dia)
19,2	21,9
24,8	28,3
26,8	30,7

Fonte: própria da autora

Correlacionando a concentração da tabela acima com a porcentagem de penetração da radiação solar média obtida em campo, obtém-se a Equação 10.

$$y = -0,5668x + 44,628 \quad \text{Equação 10}$$

Onde,

y: penetração de radiação solar (%)

x: concentração de biomassa (g/m².dia)

Usando a Equação 10 à produção de algas do período de dezembro de 2014 a fevereiro de 2015, resultou nos valores de penetração apresentados na Tabela 13.

Tabela 13. Penetração da radiação solar na lagoa segundo a concentração de algas

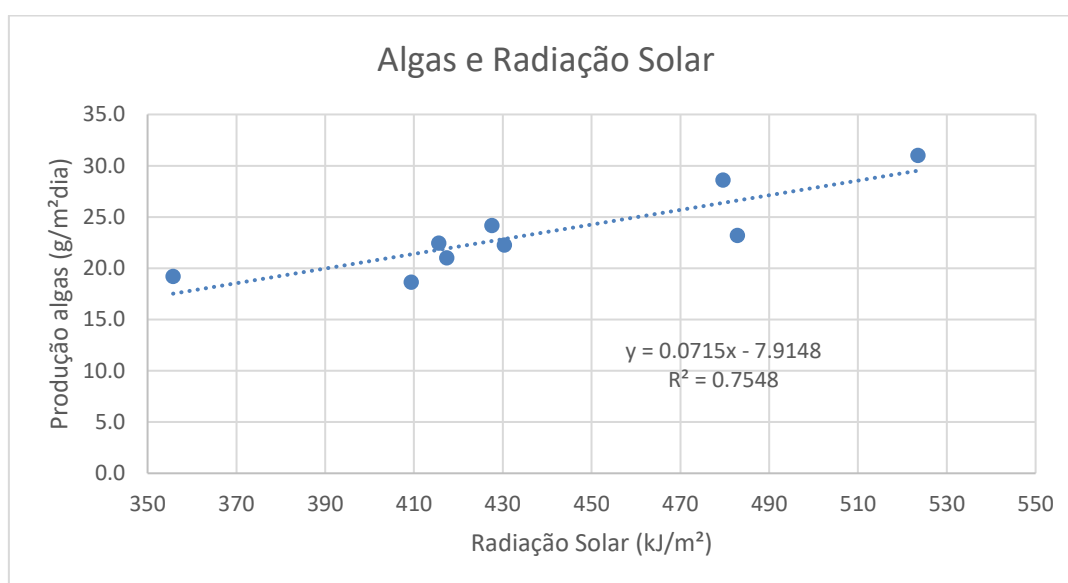
Produção de Algas (g/m ² .dia)	Penetração (%)
23,2	31,5
31,0	27,0
21,0	32,7
22,3	32,0
19,2	33,7
28,6	28,4
24,2	30,9

Produção de Algas (g/m ² dia)	Penetração (%)
22,5	31,9
18,7	34,1

Fonte: própria da autora

A Figura 28 apresenta a relação das algas com a radiação solar utilizando os valores de penetração mostrados na tabela acima.

Figura 28. Relação entre biomassa de algas e radiação solar no interior da lagoa



Fonte: própria da autora

Assim, quanto maior a radiação solar maior a produção de algas e menor é a penetração média da luz solar no interior da lagoa. Uma maior concentração, provocada por uma elevação na radiação, diminui a quantidade de energia que chega ao fundo devido ao bloqueio causado pelas células. A baixa profundidade e o dispositivo de mistura fazem com que a concentração seja constante ao longo do perfil da lagoa. Acredita-se que as algas revezem seu posicionamento entre superfície e fundo, por isso, apesar de uma menor penetração o aumento da radiação é capaz de atingir a maioria ou até a totalidade das algas.

5.2 Desenvolvimento das macrófitas

Após a inoculação das macrófitas na LAT observa-se um crescimento contínuo até uma densidade de aproximadamente 190 g/m² seco (Tabela 14). A partir deste momento a taxa reprodução passa a ser muito lenta e marcada por períodos de mortandade de macrófitas, o que pode ser verificado na Tabela 15, onde há aumento e diminuição da densidade entre semanas consecutivas. Portanto não é recomendado trabalhar com valores de densidades acima do limite apresentado, pois gera sobreposição de lemnas, dificultando o acesso à superfície ou aos nutrientes. A máxima densidade de biomassa atingida foi em torno de 230 g/m² seco.

Tabela 14. Desenvolvimento crescente das macrófitas

DATA	Densidade g/m ² seco
05/12/2014	0,70
08/12/2014	7,21
09/12/2014	37,64
11/12/2014	88,53
12/12/2014	95,06
15/12/2014	141,55
16/12/2014	162,72
18/12/2014	177,73
19/12/2014	195,99

Fonte: própria da autora

Tabela 15. Períodos de decaimento de macrófitas

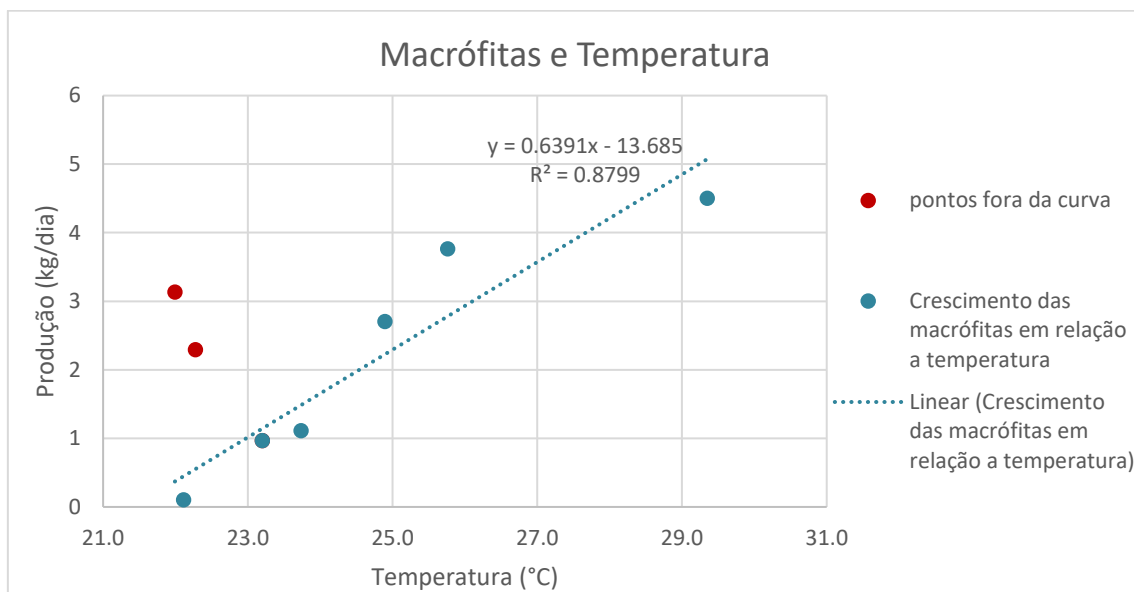
DATA	Densidade g/m ² seco
29/12/2014	198,01
05/01/2015	194,80
06/01/2015	225,54
15/01/2015	164,26
20/01/2015	234,06
27/01/2015	220,56

Fonte: própria da autora

5.5.1 Produção de macrófitas em relação à temperatura e radiação solar – 1ª fase

Durante a primeira fase de crescimento, conforme a análise da Figura 29, de maneira geral, o aumento da temperatura implica em crescimento na produção de biomassa de lemnas. Os pontos em vermelho, fora da curva, possivelmente foram influenciados por outros fatores (nutrientes, radiação solar, tempo de exposição da biomassa à radiação, entre outros).

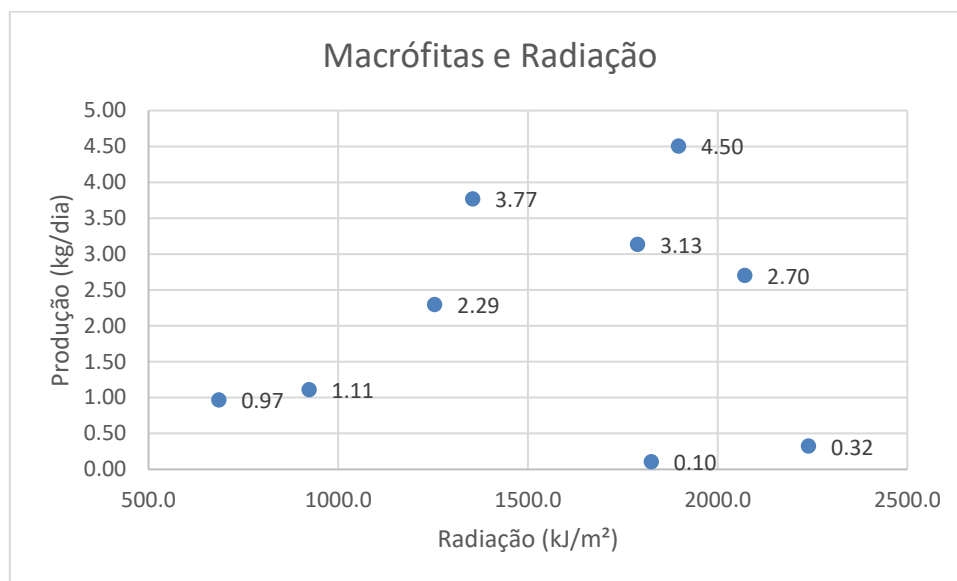
Figura 29. Dinâmica da produção de biomassa com a temperatura



Fonte: própria da autora

A produção de macrófitas também apresenta tendência de aumento com a radiação solar (Figura 30), porém os pontos encontram-se mais dispersos, havendo outros fatores que agem em conjunto no desenvolvimento da biomassa.

Figura 30. Dinâmica da produção de biomassa com a radiação solar



Fonte: própria da autora

Os pontos que apresentam menores valores no gráfico acima (0,10 e 0,32 kg/dia) correspondem as primeiras semanas de desenvolvimento das lemnas, ou seja, ao período de adaptação, por isso não houve uma resposta rápida ao efeito da luz solar.

Analisando a diferença de intensidade de radiação entre semanas consecutivas, observa-se que períodos que apresentam decréscimo consecutivo em mais de duas semanas implicam em diminuição significativa da produção de biomassa. As que tiveram um decréscimo maior em relação à semana anterior não apresentaram um decréscimo tão elevado na produção se comparado à situação acima descrita. Esse comportamento pode ser percebido entre as semanas do dia 12 e 18, conforme apresentado na Tabela 16, onde uma diminuição de 668,4 kJ/m² resultou em uma variação de 2,80 kg/dia na produção de biomassa no dia 12/12, enquanto no dia 18/12 um decréscimo de 865,8 kJ/m² levou a uma diferença de 2,02 kg/dia em relação à semana anterior.

Tabela 16. Variação da produção de biomassa em relação à radiação em semanas consecutivas

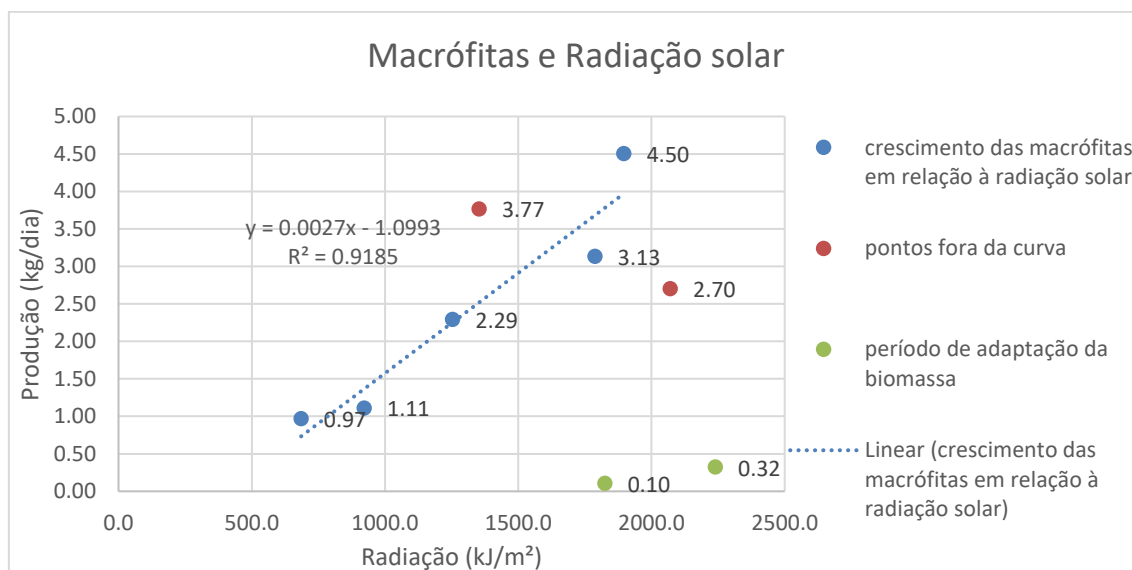
Data	Radiação (kJ/m ²)	Produção (kg/ dia)
09/12/2014	1896,4	4,50
11/12/2014	1353,7	3,77
12/12/2014	685,3	0,97
15/12/2014	1253,8	2,29
16/12/2014	1788,5	3,13
18/12/2014	922,7	1,11
19/12/2014	2070,9	2,70

Fonte: própria da autora

Os resultados analisados mostram também que a máxima produção de biomassa, 4,50 kg/dia, foi alcançada quando a densidade de macrófitas na lagoa atingiu aproximadamente 40 g/m² seco, por isso a necessidade de realizar o seu controle.

De maneira geral, percebe-se que o desenvolvimento da biomassa é influenciado principalmente pela radiação nos pontos em azul da Figura 31. Os pontos em vermelho destoam deste comportamento, possivelmente por serem influenciados por outros parâmetros em conjunto com a radiação, algo comum em sistemas abertos onde todas as variáveis mudam simultaneamente e em taxas diferentes.

Figura 31. Dinâmica da produção de biomassa com a radiação solar discretizado



Fonte: própria da autora

Comparando a radiação solar com a temperatura verifica-se que os pontos em azul da Figura 29 são marcados por uma diminuição de radiação solar, apresentando uma correlação maior com este último. Sabe-se que existe uma demora no tempo de resposta, no qual a radiação solar varia de forma mais rápida que a temperatura. Além disso, existe também o intervalo de resposta da dinâmica da biomassa com a mudança das variáveis ambientais.

5.5.2 Produção de macrófitas em relação à temperatura e radiação solar – 2ª fase

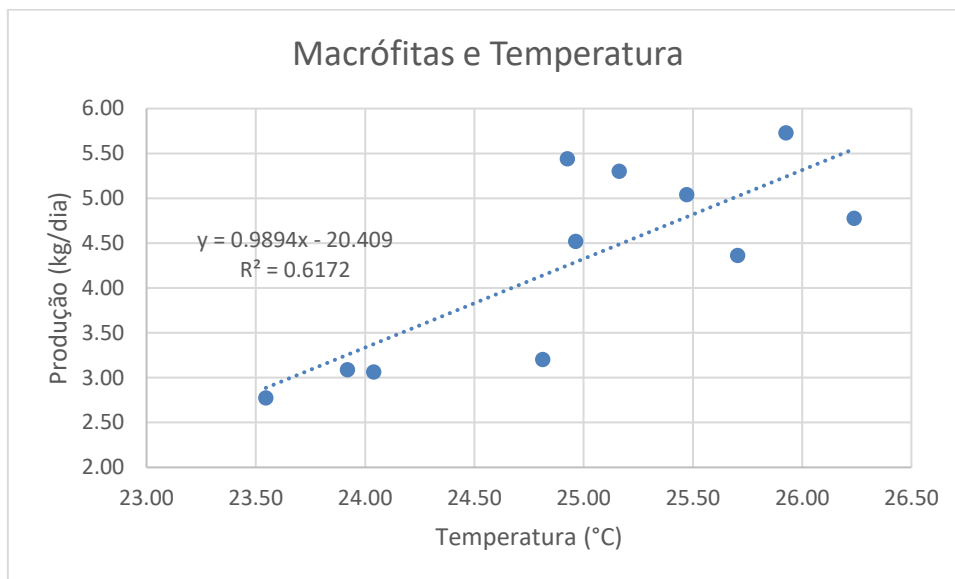
Após esta primeira fase de crescimento, passou-se a controlar a densidade de macrófitas da lagoa a fim de otimizar a produção de lemnas. Para a realização das análises de produção, além da densidade, necessita-se do registro da quantidade retirada de dentro da lagoa. Os dados de densidade existentes são referentes ao mês de fevereiro de 2015, cuja retirada média de biomassa ao dia foi de aproximadamente 4 kg/dia.

Apesar da inexistência de dados detalhados nos demais meses, sabe-se que durante o período de controle de densidade, de fevereiro a abril de 2015, teve-se uma produção de 50,3 t/ha.ano (toneladas por hectare ao ano) com uma produtividade média de $13,8 \pm 6,3$ g/m².dia em base seca (GÓMEZ et al., 2016).

A dinâmica da produção de biomassa com a temperatura (Figura 32) e radiação solar (Figura 33) apresenta tendência de crescimento com o aumento destas variáveis. Entretanto este desenvolvimento não ocorre a taxas constantes.

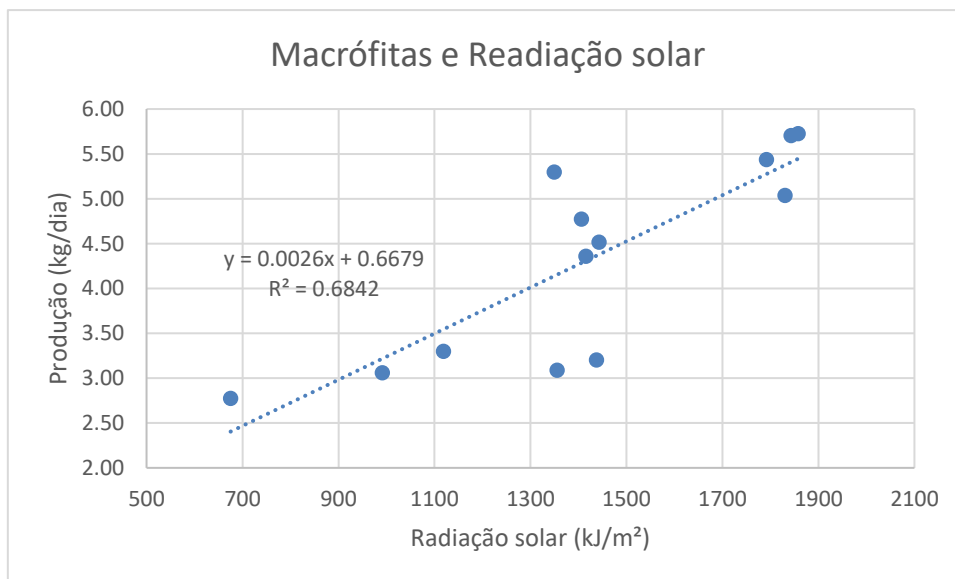
Observa-se, também, que a radiação solar apresenta uma resposta mais linear que a temperatura.

Figura 32. Dinâmica da produção de biomassa com a temperatura



Fonte: própria da autora

Figura 33. Dinâmica da produção de biomassa com a radiação solar



Fonte: própria da autora

Tanto para a radiação solar quanto para a temperatura, percebe-se uma maior dispersão da resposta da produção de biomassa quando se passa a realizar o controle de densidade da lagoa se comparado com a primeira fase de crescimento. Isso possivelmente ocorre porque outros parâmetros passam a influir de maneira mais significativa quando se efetua o controle de densidade.

5.5.3 Produção de macrófitas em relação ao CO₂

Pelo fato das macrófitas se encontrarem na superfície das lagoas em contato direto com a atmosfera elas obtêm o CO₂ necessário para a fotossíntese diretamente do ar, cuja concentração é baixa e aproximadamente constante ao longo do tempo. Portanto, apesar deste ser um fator limitante, não há como observar efeitos sobre a produção de biomassa. Além disso, apesar de baixa, a sua concentração é a máxima disponível para crescimento das lemnas, não havendo maneiras de otimizar a quantidade de CO₂ atmosférica.

Pesquisas vêm sendo feitas a nível laboratorial e tem-se constatado que plantas estimuladas por altas concentrações de CO₂ têm dado respostas positivas de aumento de produtividade vegetal. Alguns experimentos controlados constataram que, em média, ao se passar do valor da concentração de CO₂ atmosférico de 300 ppm para o valor de 600 ppm obtém-se um aumento de 30% na produtividade vegetal (IDSO; KIMBALL; ANDERSON, 1989).

5.6 Comparação produção de biomassa de algas e macrófitas

A biomassa de macrófitas se desenvolve na superfície da lagoa, enquanto a de algas ao longo da coluna de água. Assim, a produção da primeira ocorre em função de área e a segunda em função do volume.

Portanto, é necessário estabelecer uma unidade em comum para avaliação comparativa da produtividade de algas e macrófitas.

A Tabela 17 apresenta a produção de biomassa de algas e macrófitas.

Tabela 17. Produção média da biomassa de algas e macrófitas

Unidade	Produção		
	Algas	Macrófitas	
		1ª fase	2ª fase
kg/dia	3,75	2,7	2,04

Fonte: própria da autora

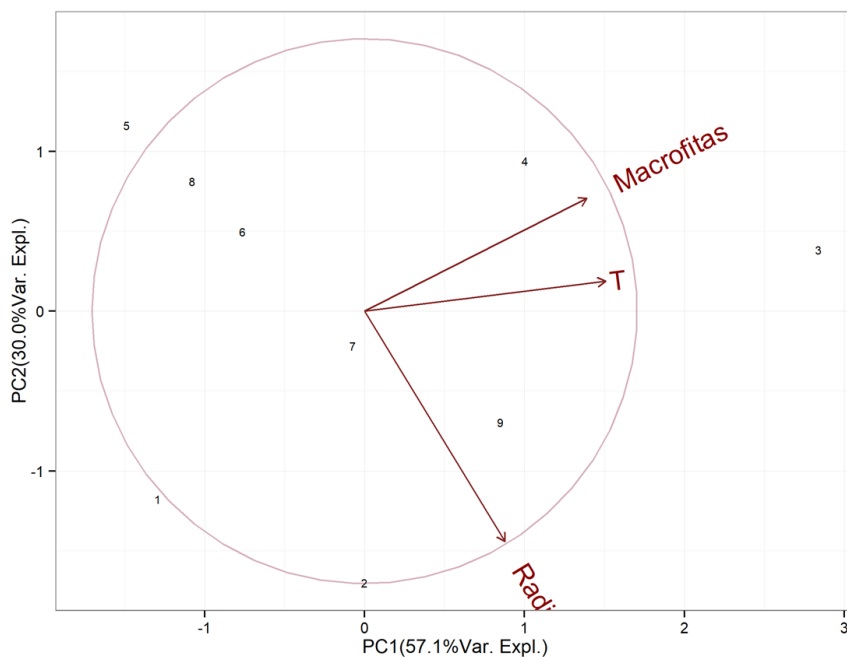
A profundidade a qual se dá o desenvolvimento das algas influi sobre elas, o que não ocorre com as macrófitas. Assim, para a profundidade de 30 cm há maior produção de microalgas que de lemnas.

5.7 Análise de componentes principais

As componentes representadas no plano (mapa fatorial) estão próximas da circunferência unitária. Isso significa que todos os parâmetros representados na Figura 34 e Figura 35 são importantes para o experimento, sendo a radiação para o caso das macrófitas e a temperatura, radiação solar e concentração de biomassa para as algas os principais para os respectivos ensaios.

Quanto menor o ângulo entre os vetores dos parâmetros maior é a correlação entre eles. Para as macrófitas o parâmetro mais importante é a temperatura, cujo coeficiente de correlação é cerca de 0,58. Entretanto, não foi realizada a análise de CO₂, pois sua concentração atmosférica é aproximadamente constante, não sendo possível avaliar o seu efeito sobre a biomassa.

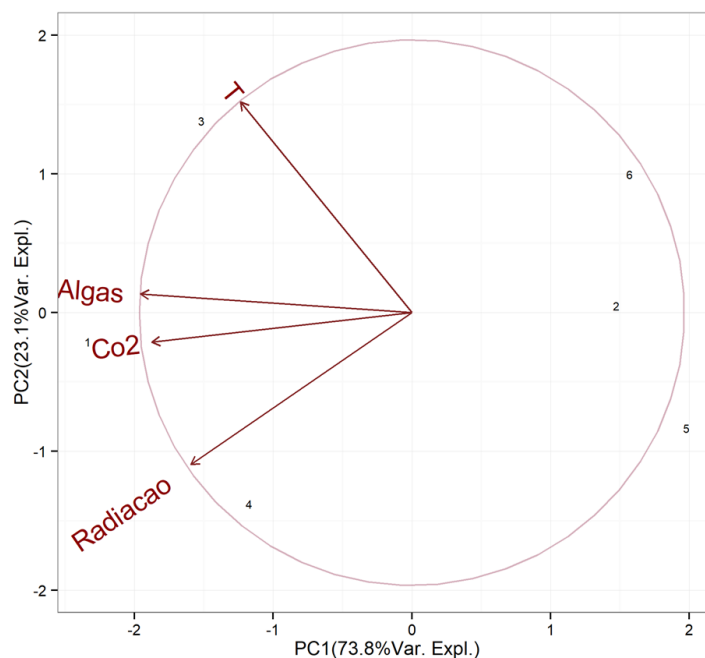
Figura 34. Mapa fatorial das macrófitas



Fonte: própria da autora

Para as algas o parâmetro mais importante é o CO₂, o qual possui um coeficiente de correlação de aproximadamente 0,92.

Figura 35. Mapa fatorial das algas



Fonte: própria da autora

5.8 Aproveitamento da biomassa

O excesso de microalgas e macrófitas removidos no processo de tratamento de efluentes podem ser utilizados como coprodutos para biocombustíveis, adubos e alimentos de uso não humano.

A separação das algas da fase líquida pode ser uma tarefa complicada, envolvendo o uso de processos, tais como floculação, precipitação e flotação por ar dissolvido, entre outros (WILLEY; BRENNEMAN; JACOBSON, 2009). Sua presença no efluente da lagoa, as quais são fontes de matéria orgânica e turbidez, limita o descarte destas águas em áreas naturais e a sua reutilização em outras aplicações (DIXO et al., 1995). A sua utilização para a incorporação de rações animais e biocombustíveis necessita de separação prévia, porém pode ser utilizada incorporada ao efluente para o uso direto na alimentação de peixes e aplicações ao solo como adubo.

As macrófitas, ao contrário das algas, podem ser facilmente colhidas do meio de cultura utilizando processos de separação simples (MURADOV et al., 2012), como por exemplo, pelo uso de redes.

A análise da composição das macrófitas (sistema Weende), realizado por Gómez et al. (2016) na lagoa em estudo, apresentou as porcentagens mostradas na Tabela 18. As espécies predominantes identificadas no período foi a *Spirodela intermedia* e *Wolffia*

columbiana. Nesta tabela, é possível identificar o alto conteúdo de proteínas e carboidratos (extratos não nitrogenados) na mistura de macrófitas presentes na lagoa. Em contrapartida, verifica-se que as macrófitas presentes na lagoa apresentam baixo conteúdo de lipídeos (extrato etéreo).

Tabela 18. Composição macrófitas

Parâmetro	Valor
Matéria seca (%)	100
Matéria orgânica (%)	76,6
Proteína bruta (%)	35,7
Fibra bruta (%)	12,3
Extrato etéreo (%)	2,23
Cinzas (%)	23,4
Extrato não nitrogenado (%)	26,3

Fonte: Gómez et al. (2016)

Neste contexto é possível identificar três possíveis formas de aproveitamento da biomassa incluindo alimentação animal, fermentação para produção de etanol, e gasificação para produção de biogás (co-digestão anaeróbia). Além disso, o alto teor de matéria orgânica e nitrogênio demonstra um potencial para a utilização em adubos, inclusive o efluente resultante da digestão anaeróbia.

Barroso (2015) avaliou a quantidade de lipídios gerada pelas microalgas cultivada na LAT deste estudo. Para isso, antes utilizou o processo de separação por flotação com ar dissolvido (FAD), cuja remoção média de SSV foi de 88,2%. O método utilizado para a quantificação de lipídios foi o de Bligh & Dyer, (1959) e resultou em uma percentagem de cerca de 7,0% de lipídios na biomassa analisada. Segundo o autor, este valor é considerado muito baixo, visto que em pesquisas apresentadas acima o teor de produção de lipídios pode chegar a 14% para algumas das espécies de microalgas cultivadas na lagoa.

Os custos envolvidos com a separação e adensamento das algas, processamento em lipídios e rendimento para a produção de biodiesel não seriam vantajosos se tratasse de cultivo puro. Entretanto, como as microalgas são subprodutos do processo de tratamento de efluente seus custos de cultivo e separação já estão contidos no processo, portanto torna-se vantajoso o seu aproveitamento para a geração de biocombustíveis.

Uma opção interessante seria a extração dos ácidos graxos e utilização no material restante para a digestão anaeróbia a fim de produzir biogás.

Uma outra utilização destas seria para a adubação e alimentação de animais, dada a grande quantidade de nitrogênio e fósforo assimilados nas células de algas, oriundos das águas residuárias e quantidades significativas de proteínas. De acordo com Redfield et al. (1963) a razão de C / N / P de algas unicelulares são tipicamente cerca de 106: 16: 1, proporção denominada taxa de "*Redfield*". O esgoto que segue para as lagoas deste estudo, após o tratamento pelo reator UASB, apresenta uma relação de C / N / P de aproximadamente 60:9:1 (BARROSO, 2015).

6 CONCLUSÕES

Em sistemas abertos é muito complexo determinar os fatores limitantes para o desenvolvimento das biomassas, pois muitos parâmetros variam de forma simultânea, tornando difícil a modelagem destes. Além disso, os próprios organismos vivos apresentam dinâmica variada.

A biomassa de macrófitas e algas apresentaram tendência de crescimento com as variáveis analisadas (radiação solar, temperatura e dióxido de carbono), sendo estes possíveis fatores limitantes do sistema. Esta correlação em alguns casos se apresentou com uma baixa linearidade, havendo outros fatores ambientais que provavelmente agiam em conjunto.

Para as algas, a influência da temperatura depende da condição do tempo. Quando discretizado em ensolarado e nublado/ chuvoso os coeficientes de determinação apresentaram valores no entorno de 0,9. A aproximação da concentração de dióxido de carbono a partir da diferença de alcalinidades se mostrou um método válido, a qual resultou em uma correlação com a biomassa aproximadamente linear ($R^2=0,87$).

O instrumento desenvolvido para medição da radiação solar mostrou-se eficiente, apesar do erro de calibração no sensor submerso causado pela baixa amplitude de conversão do sinal lido, restringindo-se apenas aos valores mais elevados. Os resultados permitiram inferir que a porcentagem de penetração da luz solar na lagoa é aproximadamente constante ao longo do dia, independente da intensidade e inclinação da radiação solar incidente. O perfil médio de penetração solar foi de 30%, sendo 47%, 27%, e 18% as porcentagens de infiltração solar a 5 cm, 12 cm e 20 cm da superfície. Além disso, o período em que a lagoa permaneceu com o misturador mecânico desligado apresentou uma maior passagem da luz no interior da lagoa se comparada com a situação contrária. Possivelmente este resultado não foi representativo da realidade, dada a baixa amostragem e a possíveis erros durante a coleta de dados.

Se considerada a radiação solar superficial incidente sobre a lagoa percebe-se uma baixa correlação linear com a produção de biomassa de algas. Isso ocorre porque o que determina o desenvolvimento das microalgas é a radiação que penetra no interior da lamina d'água. Portanto, ao considerar a porcentagem de infiltração solar o coeficiente de determinação é aproximadamente 0,8. Assim, quanto maior for a radiação solar, maior é a concentração de algas e menor a penetração solar dentro da lagoa.

As macrófitas apresentam um limite de densidade para um crescimento sem registro de efeitos adversos, cujo valor é em torno a 190 g/m² seco. Entretanto, a máxima produção ocorre em valores inferiores, entre 30 a 60 g/m² seco. Na primeira fase desta avaliação, sem controle de densidade, demonstra que a radiação solar influencia a produção de biomassa, porém com uma relação não linear, pois a produção da biomassa varia significativamente com a condição em que se dá o incremento da radiação. O mesmo ocorre para a temperatura, a qual percebe-se que em alguns momentos outros parâmetros influenciam junto a este na produção de lemnas. Se desconsiderados os pontos fora da curva, o coeficiente de determinação da produção em relação a temperatura é de cerca de 0,9.

Na segunda fase de desenvolvimento, com controle de densidade, a correlação linear é mais baixa, comparada a primeira fase. Os possíveis motivos para este comportamento podem ser o erro associado na determinação da quantidade retirada de macrófitas lagoa a qual somou-se às diferenças de densidades ou a menor influência dos parâmetros temperatura e radiação solar quando se passa a realizar o controle de densidade.

Não foi possível avaliar o efeito do dióxido de carbono na produção de macrófitas, pois a concentração atmosférica é aproximadamente constante.

A produção de macrófitas para a ETE São João Navegantes apresentou resultados menores durante o período de controle de densidade, 2,04 kg/dia, se comparada à primeira fase, 2,7 kg/dia, pois durante essa época (fevereiro a abril) a temperatura e radiação eram mais baixas. Apesar disso, o controle de densidade tende a otimizar o sistema. A produção de algas foi maior que a de macrófitas, com uma produtividade de 3,75 kg/dia para uma lâmina d'água de 30 cm, pois elas se desenvolvem ao longo da coluna d'água (volume). Portanto, a profundidade estudada resultou uma maior produtividade de algas. Apesar disso, as algas necessitam de processos separação do efluente, a qual não permite a recuperação total da biomassa de maneira acessível financeiramente. Em estudos desenvolvidos por Barroso (2015) o aproveitamento foi de cerca de 88,2%, mas este valor varia com a técnica de separação empregada.

As algas apresentaram maior correlação em relação ao dióxido de carbono e as macrófitas em relação à temperatura, o que faz crer que estes são os parâmetros que mais influenciam no desenvolvimento dessas biomassas. Entretanto, não foi realizada a análise de CO₂ para as macrófitas.

A recuperação de nutrientes é imprescindível para a sustentabilidade dos sistemas de produção agrícola. Algas e macrófitas apresentam-se como alternativas viáveis para este cenário, além de poderem ser reaproveitadas como fonte de biocombustíveis e alimentos. As macrófitas apresentam a vantagem de serem facilmente separáveis do efluente em comparação as microalgas.

Assim, a investigação dos parâmetros que influenciam no desenvolvimento da biomassa de algas e macrófitas é de grande relevância para otimizar o processo de produção, melhorando não apenas o tratamento do efluente como também, gerando mais coprodutos.

7 RECOMENDAÇÕES

- Calibrar os sensores de radiação solar durante um período mais longo, que permita cobrir uma faixa mais ampla de valores, inclusive os mais baixos de radiação solar, com registro “on line” dos dados medidos.
- Identificar com maior segurança a influência do CO₂ no desenvolvimento das algas bem como da disponibilidade de nutrientes (efluente sintético).
- Identificar as fontes de utilização do gás carbônico pelas macrófitas flutuantes, (atmosfera e parcelas presentes na água).
- Acompanhar as amostragens de radiação solar com análises de Sólidos Suspensos Voláteis, utilizando amostradores que permitam a coleta em camadas pré-determinadas.
- Monitoramento e identificação da biomassa de microalgas e macrófitas em períodos de longa duração (mínimo de 1 ano) para confirmar a relação entre os parâmetros avaliados.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACIOLI, T. S. **Cultivo da microalga *Chlorella* spp. em pequena escala visando ao aumento da produção de biomassa e óleos para biodiesel.** [s.l.] Universidade de São Paulo, 2014.

ADEQUAR. **Wetland como unidade complementar do tratamento de esgotos do bairro Jacuí em João Monlevade – MG.** Disponível em: <<http://adequarliamb.blogspot.com/2011/07/estudo-de-viabilidade-tecnica-para.html>> Acesso em: 2 de agosto de 2018.

AMON, T. et al. Biogas production from maize and dairy cattle manure- Influence of biomass composition on the methane yield. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 118, n. 1–4, p. 173–182, 2007.

ANDRADE, L. M. DE. **Produção de microalgas e caracterização de sua composição protéica e lipídica via espectrometria de massas.** [s.l.] Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2014.

ANTUNES, R. P.; ESPÍNDOLA, E. L. G. Análise do potencial de uso das macrófitas aquáticas do sistema de áreas alagadas construídas da ETE da Comunidade de Serviços Emaús (Ubatuba, SP) como adubo orgânico. p. 87, 2009.

APHA. **Standard Methods for the examination of water and wastewater.** 2^a ed. Washington: American Public Health Association, 2003.

ASSIS, F. DE; MENDEZ, M. Relação entre radiação fotossinteticamente ativa e radiação global. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 24, n. 7, p. 797–800, 1989.

BARROSO, J. C. A. J. **PRODUÇÃO DE BIOMASSA DE ALGAS EM LAGOAS DE ALTA TAXA ALIMENTADAS COM ESGOTO SANITÁRIO COM POSTERIOR SEPARAÇÃO POR FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO.** [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

BASÍLICO, G. et al. Poultry Effluent Bio-treatment with Spirodela intermedia and Periphyton in Mesocosms with Water Recirculation. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 227, n. 6, 2016.

BENEMANN, J. O. **Microalgal Biofuels: A Brief Introduction.** 2009.

BENEMANN, J. R.; OSWALD, W. J. Systems and Economic Analysis of Microalgae Ponds for Conversion of CO₂ to Biomass. **Final report to the Department of Energy, Pittsburgh Energy Technology Center**, p. DOE/PC/93204-T5, 1996.

BENETTI, Antônio Domingues. Tratamento de efluentes: características físicas, químicas e biológicas de águas naturais, potável e residuária. 14 ago. 2017, 22 dez. 2017. 34p. Notas de Aula.

BIUDES, J. F. V.; CAMARGO, A. F. M. Estudo dos fatores limitantes à produção primária por macrófitas aquáticas no Brasil. **Oecologia Australis**, v. 12, n. 01, p. 7–19, 2008.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto – 2016**. Brasília: SNSA/MCIDADES, 2018, 220 p. :il.

BREENAM, L.; OWENDE, P. Biofuel from microalgae - A review of Technologies for Production, Processing, and Extractions of Biofuels and Co-products. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, p. 557–577, 2009.

CENTRE, John Innes. **The potential in your pond**. Disponível em: <<https://phys.org/news/2015-08-potential-pond.html>> Acesso em: 11 de agosto 2018.

CHERNICHARO, C. A. DE L. **Reatores anaeróbios**. 2ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFMG, 2007.

CRAGGS, R. J. et al. Algal biofuels from wastewater treatment high rate ponds. **Water Science and Technology**, v. 63, n. 4, p. 660–665, 2011.

DAVIS, M. L.; MASTEN, S. J. **Princípios de Engenharia Ambiental**. 3ª ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda., 2016.

DERNER, R. B. et al. Microalgas, produtos e aplicações. **Ciência Rural**, v. 36, n. 6, p. 1959–1967, 2006.

DISCOVER LIFE. **Wolffia columbiana Karst. Columbian Watermeal**. Disponível em: <<https://www.discoverlife.org/mp/20q?search=Wolffia+columbiana>> Acesso em: 9 de novembro de 2018.

DIXO, N. G. H. ET AL. Removal of pathogenic organisms from the effluent of an upflow anaerobic digester using waste stabilization ponds. **Water Science and Technology**, v. 31, n. 12, p. 275–284, 1995.

DRIEVER, S. M.; VAN NES, E. H.; ROIJACKERS, R. M. M. Growth limitation of Lemna minor due to high plant density. **Aquatic Botany**, v. 81, n. 3, p. 245–251, 2005.

DUVAL, L. D.; SANTOS, A. DA C. DOS. **Biocombustíveis**. 2012.

EMPRESA DE PESQUISAS ENERGÉTICAS. **Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis 2017**. 9ª ed. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia, 2018.

GÓMEZ, F. E. et al. Estudo comparativo entre lagoas de alta taxa de produção de algas e de macrófitas no tratamento secundário de esgoto sanitário. **5º Congresso internacional de Tecnologia para o Meio Ambiente**, 2016.

GREENWAY, M.; WOOLLEY, A. Changes in plant biomass and nutrient removal over 3 years in a constructed wetland in Cairns, Australia. **Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research**, v. 44, n. 11–12, p. 303–10, 2001.

GRIS, L. R. S. et al. Produção de microalgas em fotobiorreator airlift. **IX Oktoberforum – PPGEQ**, 2010.

HILTY, John. **Wildflowers: Great Duckweed**. Disponível em: <https://www.illinoiswildflowers.info/wetland/plants/gr_duckweed.html> Acesso em: 9 de novembro de 2018.

IBGE CIDADES. **Pesquisa nacional de saneamento básico**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/30/30051>> Acesso em: 21 de setembro de 2018.

IDSO, S. B.; KIMBALL, B. A.; ANDERSON, M. G. **Greenhouse warming could magnify positive effects of CO₂ enrichment on plant growth**OAK RidgeCDIAC Communications, , 1989.

JORDÃO, E. P.; PESSOA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos**. 6^a ed. Rio de Janeiro: ABES, 2011.

JOURNEY, W. K.; SKILLICORN, P.; SPIRA, W. Duckweed aquaculture. A new aquatic farming system for developing countries. **World Bank Publication**, p. 67, 1993.

LINDSEY, Jim. **Ecology of Commaster**. Disponível em: <<http://www.commaster.eu/commaster/Plants/Flowers/SpFlowers/Lemna.minor.html>> Acesso em: 9 de novembro de 2018.

MAHAPATRA, D. M.; CHANAKYA, H. N.; RAMACHANDRA, T. V. Euglena sp. as a suitable source of lipids for potential use as biofuel and sustainable wastewater treatment. **Journal of Applied Phycology**, v. 25, n. 3, p. 855–865, 2013.

MARTINEZ, Carlos. **Fotossíntese: Parte 1**. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAGCcAL/fotossintese-1>> Acesso em: 25 de agosto de 2018.

MENEZES, M. Contribuição ao conhecimento das algas do gênero euglena (euglenophyceae) no município do Rio de Janeiro e arredores, Brasil. **Acta bot. bras.**, v. 3, n. 1, p. 49–90, 1989.

METCALF & EDDY . INC. **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse (vol. 4)**. 4^a ed. New York: McGraw - Hill Book, 2003.

MOHEDANO, R. A. et al. High nutrient removal rate from swine wastes and protein biomass production by full-scale duckweed ponds. **Bioresource Technology**, v. 112, p. 98–104, 2012.

MOHEDANO, R. D. A. Uso de macrófitas lemnáceas (*landoltia punctata*) no polimento do efluente de suinocultura e na fixação de carbono. p. 270, 2010.

MOHEDANO, R. DE A. **Tratamento de efluente e produção de alimento, em cultivo de tilápias (*Oreochromis niloticus*), através da macrófita aquática *Lemna Valdiviana* (Lemnaceae)**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

MONÇÃO, Maxwel. **O Futuro Verde: Microalgas e Biotecnologia**. Disponível em: <<http://www.microbiologia.ufrj.br/portal/index.php/pt/destaques/novidades-sobre-a-micro/364-o-futuro-verde-microalgas-e-biotecnologia>> Acesso em: 3 de agosto de 2018.

MURADOV, N. et al. Production and characterization of *Lemna minor* bio-char and its catalytic application for biogas reforming. **Biomass and Bioenergy**, v. 42, p. 123–131, 2012.

NASCIMENTO, J. R. DA S. DO. **Lagoas de Alta Taxa de produção de algas para pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.

ORAN, N. J. Water Stabilization Ponds and Aerated Lagoons. Biological Wastewater treatment Systems, Theory and operation. **Library of cataloging**, v. 10, p. 286–287, 1989.

PÁDUA, H.B. de. **Gás carbônico em águas bicarbonatadas**. Disponível em: <<http://www.portalbonito.com.br/colunistas/helcias-de-padua/251/gas-carbonico-em-aguas-bicarbonatadas>> Acesso em: 13 de outubro de 2018.

PARK, J. B. K.; CRAGGS, R. J. Wastewater treatment and algal production in high rate algal ponds with carbon dioxide addition. **Water Science and Technology**, v. 61 (3), 2010.

PARK, J. B. K.; CRAGGS, R. J.; SHILTON, A. N. Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production. **Bioresource Technology**, v. 102, p. 35–42, 2011.

PASQUALI, Adriano. **Qual é a origem da Chlorella?** Disponível em: <<http://www.paversul.com.br/origem-da-chlorella/>> Acesso em: 11 de agosto de 2018.

PEARSON, H. W.; MARA, D. D.; BARTONE, C. R. Guidelines for the minimum evaluation of the performance of full-scale waste stabilization pond systems. **Water Research**, v. 21, n. 9, p. 1067–1075, set. 1987.

PEREIRA, R. G.; FILHO, F. L. B. DE A. J. F.; MELO, M. C. D. E. P. R. B. DE. **PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA BIODIGESTÃO DA BIOMASSA RESIDUAL DE MISTURA DE PLANTAS AQUÁTICAS**. ICTR 2004 – CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA EM RESÍDUOS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. **Anais...Florianópolis: ICTR, NISAM - USP, 2004**

PEREIRA, S. DE F.; POTT, V. J.; TEMPONI, L. G. Lemnoideae (Araceae) no estado do Paraná, Brasil. **Rodriguesia**, v. 67, n. 3, p. 839–848, 2016.

PETROBRAS. **Biocombustíveis- 50 Perguntas e respostas sobre este novo mercado**. [s.l.] Comunicação Institucional do Abastecimento da Petrobras, 2007.

PILLA, L. **Físico-química II: equilíbrio entre fases, soluções líquidas e eletroquímica**. 2ª ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2010.

PITTMAN, J. K.; DEAN, A. P.; OSUNDEKO, O. The potential of sustainable algal biofuel production using wastewater resources. **Bioresource Technology**, v. 102, p. 17–25, 2011.

POTT, V. J.; POTT, A. Potencial de uso de plantas aquáticas na despoluição da água. **Embrapa**, p. 25, 2002.

PRIBADI, K. S. **Development of Scaleable Algae Production System for Biological CO2 Sequestering and Production of Bio-Fuel** Downstream Indonesia, 2009.

PROBIO HP. **O que são Macrófitas Aquáticas**. Disponível em: <http://www.ufscar.br/~probio/info_macrof.html> Acesso em: 3 de agosto de 2018.

RAMOS, L. P. et al. Biodiesel: Matérias-Primas, Tecnologias de Produção e Propriedades Combustíveis. **Revista Virtual de Química**, v. 9, n. 1, p. 317–369, dez. 2017.

REDDY, K. R. Growth Characteristics of Aquatic Macrophytes Cultured in Nutrient-enriched Water: II. Azolla, Duckweed, and Salvinia. *Journal of Aquatic Plant Management*, v. 39, n. 5928, p. 200–208, 1985.

REDFIELD, A. C.; KETCHUM, B. H.; RICHARDS, F. A. The influence of organisms on the composition of seawater. **The Sea**, v. 2, p. 26–77, 1963.

RIPLEY, L. E.; BOYLE, W. C.; CONVERSE, J. C. Improved alkalimetric monitoring for anaerobic digestion of high-strength wastes. **Journal Water Pollution Control Federation**, v. 58, n. 5, p. 406–411, 1986.

SANTIAGO, A. DA F. **Avaliação Do Desempenho De Lagoas De Alta Taxa No Tratamento De Esgoto Pré-Desinfestado Submetidas a Diferentes Níveis De Radiação Solar**. [s.l.] Universidade Federal de Viçosa, 2013.

SANTOS, F. M. DOS; SANTOS, F. A. DOS. O Combustível “Hidrogênio”. **Milenium on.line (www.ipv.pt/milenium)**, v. 31, p. 252–270, 2005.

SCHMITZ, R.; MAGRO, C.; COLLA, L. Aplicações ambientais de microalgas. **Revista CIATEC-UPF**, v. 4, n. 1, p. 48–60, 2012.

SCHNEIDER, A. A. **Flora Digital: Spirodela Intermedia W. Koch**. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/fitoecologia/florars/open_sp.php?img=16207> Acesso em: 10 de agosto de 2018.

SODA, S. et al. Kinetics of nutrient removal and biomass production by duckweed *Wolffia arrhiza* in continuous-flow mesocosms. **Ecological Engineering**, v. 57, p. 210–215, 2013.

TEIXEIRA, C. M.; MORALES, M. E. Microalga como matéria-prima para a produção de biodiesel. **Revista: Biodiesel o Novo combustível do Brasil**, p. 91–96, 2007.

VALDERRAMA, L. T. et al. Treatment of recalcitrant wastewater from ethanol and citric acid production using the microalga *Chlorella vulgaris* and the macrophyte *Lemna minuscula*. **Water Research**, v. 36, n. 17, p. 4185–4192, 2002.

VON SPERLING, M. **Lagoas de Estabilização (Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias; vol. 3)**. 2ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - DESA, UFMG, 2013.

WANG, L. et al. Cultivation of green algae *Chlorella* sp. in different wastewaters from municipal wastewater treatment plant. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 162, n. 4, p. 1174–1186, 2010.

WILLEY, P. E.; BRENNEMAN, K. J.; JACOBSON, A. E. Improved algal harvesting using suspended air flotation. **Water environment research: a research publication of the Water Environment Federation**, v. 81, n. 7, p. 702–708, 2009.

WU, H. et al. Nitrogen transformations and balance in constructed wetlands for slightly polluted river water treatment using different macrophytes. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 20, n. 1, p. 443–451, 2013.

XU, J.; SHEN, G. Growing duckweed in swine wastewater for nutrient recovery and biomass production. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 2, p. 848–853, 2011.

ZHAO, Y. et al. Pilot-scale comparison of four duckweed strains from different genera for potential application in nutrient recovery from wastewater and valuable biomass production. **Plant Biology**, v. 17, n. s1, p. 82–90, 2015.