

**PROPOSTA DE MITIGAÇÃO DA EUTROFIZAÇÃO NA LAGOA DO VIGÁRIO-RJ  
ATRAVÉS DA MACRÓFITA *Eichhornia crassipes*: DE PRAGA A  
FITORREMEIADORA**

**ELILIANE VASCONCELOS CORRÊA ALMADA**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE  
DARCY RIBEIRO – UENF  
CAMPOS DOS GOYTACAZES  
AGOSTO– 2018

**PROPOSTA DE MITIGAÇÃO DA EUTROFIZAÇÃO NA LAGOA DO VIGÁRIO-RJ  
ATRAVÉS DA MACRÓFITA *Eichhornia crassipes*: DE PRAGA A  
FITORREMEIADORA**

**ELILIANE VASCONCELOS CORRÊA ALMADA**

Tese apresentada ao Centro de Biociências e Biotecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutora em Ecologia e Recursos Naturais.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dra. Marina Satika Suzuki  
Coorientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Novo Gatts

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ  
AGOSTO DE 2018

**FICHA CATALOGRÁFICA**

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pela autora.

A444 Almada, Eliliane Vasconcelos Correa.

PROPOSTA DE MITIGAÇÃO DA EUTROFIZAÇÃO NA LAGOA DO VIGÁRIO-RJ  
ATRAVÉS DA MACRÓFITA *Eichoornia crassipes* DE PRAGA A FITORREMEIADORA /  
Eliliane Vasconcelos Correa Almada. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2018.

93 f. : il.

Bibliografia: 23-25, 54-62, 83-86, 89-90.

Tese (Doutorado em Ecologia e Recursos Naturais) - Universidade Estadual do  
Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Biociências e Biotecnologia, 2018.

Orientadora: Marina Satika Suzuki.

1. Poluição. 2. Lagoa do Vigário. 3. Aguapé. 4. Fitorremediação. 5. Modelagem  
matemática. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 577

PROPOSTA DE MITIGAÇÃO DA EUTROFIZAÇÃO NA LAGOA DO VIGÁRIO-RJ  
ATRAVÉS DA MACRÓFITA *Eichhornia crassipes*: DE PRAGA A  
FITORREMEIADORA

ELILIANE VASCONCELOS CORRÊA ALMADA

Tese apresentada ao Centro de  
Biotecnologia e Biotecnologia da  
Universidade Estadual do Norte  
Fluminense Darcy Ribeiro, como  
parte das exigências para a  
obtenção do título de Doutora em  
Ecologia e Recursos Naturais.

Aprovada em 22 de agosto de 2018.

Comissão Examinadora:

  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Cleide Ferreira da Silva Albuquerque (Dr.<sup>a</sup> em Biociências e  
Biotecnologia)- FAETEC

  
Dr. Marcelo Gomes de Almeida (Dr. em Biociências e Biotecnologia)-  
LCA/CBB/UENF

  
Profa. Dr.<sup>a</sup> Cristina Maria Magalhães de Souza (Dr.<sup>a</sup> em Biofísica) - LCA/CBB/UENF

  
Profa. Dr.<sup>a</sup> Marina Satika Suzuki (Dr.<sup>a</sup> em Biociências e Biotecnologia) -  
LCA/CBB/UENF (Orientadora)

  
Prof. Dr. Carlos Eduardo Novo Gatts (Dr. Engenharia Metalúrgica e de Materiais)  
LCFIS/CCT/UENF (Coorientador)

*“Apenas os que dialogam podem construir pontes e vínculos”.*  
(Papa Francisco)

*À minha amada filha Melissa*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por preencher e dar sentido a todas as coisas.

Aos meus pais Elizeu e Neilda, irmãos Elaine e Jônatas e sobrinhos Richard e Heitor por todo apoio, incentivo e amor incondicional.

Ao meu esposo Daniel e minha filha Melissa por compartilharem cada segundo da vida com amor e cuidado.

A minha orientadora Prof<sup>a</sup> Dra. Marina Satika Suzuki pelo conhecimento transmitido e por me tranquilizar nos momentos de ansiedade.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Carlos Eduardo Novo Gatts pelas longas tardes de orientação e auxílio nos modelos matemáticos essenciais para a realização desta tese.

Ao Laboratório de Ciências Ambientais da UENF pelo suporte na realização dos campos e análises químicas e a todos os profissionais do setor.

A Pós Graduação em Ecologia e Recursos Naturais.

Aos técnicos Diogo, Gerson e Bráulio pela boa vontade durante as árduas coletas de Agupapé.

Aos colegas Thiago Rangel e Guilherme Reis pela paciência e disponibilidade na orientação para a escolha da metodologia ideal para o desenvolvimento dos mapas de demarcação.

Aos colegas Thaisy e Edson pelos ensinamentos e colaboração na realização das análises laboratoriais.

Aos queridos alunos Mayara e Guilherme que participaram como bolsistas no projeto e foram essenciais para muitas das etapas deste trabalho, além de ótimas companhias.

Ao Laboratório de Hidrobiologia do Instituto de Biologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro pelas análises de nitrato, nitrito, fósforo dissolvido e nitrogênio total.

Ao Dr. Marcelo Almeida pelo auxílio na metodologia de digestão vegetal e na interpretação e análise dos resultados.

Aos membros da banca examinadora por terem aceitado o convite de participar da avaliação deste trabalho.

Aos meus amigos que direta ou indiretamente contribuíram para que essa caminhada fosse mais leve.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	X
LISTA DE TABELAS .....	XI
RESUMO.....	13
ABSTRACT .....	14
INTRODUÇÃO GERAL .....	15
<i>EUTROFIZAÇÃO: CAUSAS E CONSEQUÊNCIAS</i> .....	15
<i>RECUPERAÇÃO DE AMBIENTES LACUSTRES EUTROFIZADOS</i> .....	16
<i>A LAGOA DO VIGÁRIO</i> .....	21
OBJETIVO GERAL .....	22
LISTA DE CAPÍTULOS .....	22
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	23
CAPÍTULO I: O PAPEL ECOLÓGICO DA MACRÓFITA <i>EICHHORNIA CRASSIPES</i> NA LAGOA DO VIGÁRIO.....	26
RESUMO.....	27
INTRODUÇÃO .....	28
<i>E. CRASSIPES E SEU POTENCIAL DE FITORREMEDIAÇÃO</i> .....	28
<i>FITORREMEDIAÇÃO DE AMBIENTES EUTROFIZADOS POR E. CRASSIPES</i> .....	31
OBJETIVO GERAL.....	32
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	33
MATERIAL E MÉTODOS .....	33
<i>ÁREA DE ESTUDO</i> .....	33
<i>QUALIDADE DA ÁGUA DA LAGOA DO VIGÁRIO</i> .....	35
<i>BIOMASSA DE E. CRASSIPES NA LAGOA DO VIGÁRIO E ESTOQUE DE N E P EM SUA BIOMASSA</i> .....	37
<i>TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS</i> .....	37
RESULTADOS .....	38
<i>VARIAÇÕES METEOROLÓGICAS DURANTE OS PERÍODOS SECO E ÚMIDO DE AMOSTRAGEM</i> ... 38	
<i>VARIÁVEIS FÍSICO-QUÍMICAS DA LAGOA DO VIGÁRIO</i> .....	40
Nutrientes dissolvidos e particulados .....	42
Nutrientes Totais .....	42
<i>ANÁLISE DOS COMPONENTES PRINCIPAIS</i> .....	44

<i>BIOMASSA DE E. CRASSIPES NA LAGOA DO VIGÁRIO</i> .....	46
<i>ESTOQUE DE P E N NA BIOMASSA DE AGUAPÉ</i> .....	47
DISCUSSÃO .....	49
<i>QUALIDADE DA ÁGUA DA LAGOA DO VIGÁRIO E A INFLUÊNCIA DOS BANCOS DE AGUAPÉ</i> .....	49
<i>ESTOQUE DE BIOMASSA E NUTRIENTES NO AGUAPÉ</i> .....	51
CONCLUSÕES .....	54
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	54
CAPÍTULO II: O PAPEL ECOLÓGICO DA MACRÓFITA <i>Eichhornia crassipes</i> NA LAGOA DO VIGÁRIO.....	63
RESUMO.....	64
INTRODUÇÃO .....	65
<i>PRINCIPAIS FATORES RELACIONADOS AO CRESCIMENTO E A FITORREMEDIAÇÃO POR AGUAPÉ</i> .....	67
<i>MODELOS MATEMÁTICOS PARA O MANEJO DO AGUAPÉ</i> .....	69
<i>O USO DE SENSORIAMENTO REMOTO PARA O MANEJO DO AGUAPÉ</i> .....	70
OBJETIVO GERAL.....	72
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	72
MATERIAL E MÉTODOS .....	72
<i>CONSTRUÇÃO E DESCRIÇÃO DO MODELO</i> .....	73
RESULTADOS .....	75
<i>COBERTURA DE AGUAPÉ NA LAGOA DO VIGÁRIO</i> .....	75
<i>MODELO DE AUMENTO DA COBERTURA DE AGUAPÉ NA LAGOA DO VIGÁRIO</i> .....	77
DISCUSSÃO .....	79
<i>COBERTURA DE AGUAPÉ NA LAGOA DO VIGÁRIO E A INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA</i> .....	79
<i>MODELO DE CRESCIMENTO DO AGUAPÉ NA LAGOA DO VIGÁRIO</i> .....	80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	83
DISCUSSÃO GERAL .....	87
CONCLUSÕES .....	88
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	89
APÊNDICE I - IMAGENS DA LAGOA COM VIGÁRIO REFERENTES AOS ANOS DE 2014, 2015 E 2016 COM AS ÁREAS COBERTAS PELOS BANCOS DE AGUAPÉ DEMARCADAS EM AMARELO. OS ESPAÇOS DEMARCADOS EM VERMELHO CORRESPONDEM A ESPAÇOS VAZIOS OU COBERTOS POR OUTRO TIPO DE MACRÓFITAS.....	91

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Imagem da porção sul da Lagoa do Vigário de julho de 2015. Notar floração de <i>E. crassipes</i> .....	21
<b>Figura 1.1</b> Estrutura de <i>E. crassipes</i> com (a) pecíolos delgados e (b) pecíolos bulbosos (Fonte: Adaptado de Wright and Purcell 1995, <i>apud</i> van Schalkwyk, 2014).....	29
<b>Figura 1.2</b> Imagem de satélite e localização da Lagoa do Vigário. Notar a intensa urbanização ao redor da lagoa. ....	34
<b>Figura 1.3</b> Ligação da Lagoa do Vigário, através do canal do Vigário, com o Brejo Prazeres e Lagoa do Taquaruçu . Autor: Eliliane Almada. Elaboração: Gabriel Duarte. ....	35
<b>Figura 1.4</b> Variáveis meteorológicas durante os períodos de amostragem em 2015. a- volume total de chuvas mensal (mm) . b- média mensal da temperatura do ar (°C). c- media mensal da radiação global (KJ.m <sup>-2</sup> ). . ....	39
<b>Figura 1.5</b> Variação das variáveis físico-químicas ao longo das semanas de amostragem no ano de 2015. . ....	41
<b>Figura 1.6</b> Variação das concentrações de nutrientes nitrogenados e fosfatados ao longo das semanas de amostragem no ano de 2015. . ....	43
<b>Figura 1.7</b> ACP das variáveis físico-químicas medidas nas porções norte e sul da Lagoa do Vigário nos períodos seco e úmido de amostragem. NS= porção norte no período seco, NU= porção norte no período úmido, SS= porção sul no período seco e SU= porção sul no período úmido.....	46
<b>Figura 2.1</b> Exemplo de modelo conceitual relacionado ao manejo de <i>E. crassipes</i> no Lago Alice, Flórida, EUA (Mitsh, 1975).....	66
<b>Figura 2.2</b> Representação da produção líquida máxima de biomassa em K/2. Fonte: Mahujchariyawong & Ikeda (2001). . ....	70
<b>Figura 2.3</b> Variação da área coberta por Aguapé nas porções norte e sul da Lagoa do Vigário e variação da média mensal da temperatura do ar durante os anos de 2014, 2015 e 2016. . ....	75

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.1</b> Variáveis físico-químicas medidas (média ± dp; n=10) na água da Lagoa do Vigário. As letras diferentes indicam se ocorreu diferença estatística entre os locais e períodos de amostragem. ....	40
<b>Tabela 1.2</b> Concentrações de N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , N-particulado e N-total (média ± dp; n=10) nas porções sul e norte da Lagoa do Vigário durante os períodos seco e úmido de amostragem. As letras diferentes indicam se ocorreu diferença estatística entre os locais e períodos de amostragem.....	44
<b>Tabela 1.3.</b> Concentrações de P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , P-particulado e P-total (média ± dp; n=10) medidos nas porções sul e norte da Lagoa do Vigário durante os períodos seco e úmido de amostragem. As letras diferentes indicam se ocorreu diferença estatística entre os locais e períodos de amostragem.....	44
<b>Tabela 1.4</b> Correlação das variáveis físico-químicas (n=40) com os componentes principais. ....	45
<b>Tabela 1.5</b> Biomassa de <i>E. crassipes</i> em peso seco (g.m <sup>-2</sup> ) e das proporções de biomassa seca das porções radicular $\frac{PSR}{PS}$ e aérea $\frac{PSA}{PS}$ (média ± dp; n=9) nas porções sul e norte da Lagoa do Vigário durante os períodos seco e úmido de amostragem.....	47
<b>Tabela 1.6</b> Estoque de P e N na biomassa de <i>E. crassipes</i> (g.Kg <sup>-1</sup> ), estoque de P e N em <i>E. crassipes</i> por unidade de área (g.m <sup>-2</sup> ) e proporção de P e N nas porções aérea e radicular de <i>E. crassipes</i> nas porções norte e sul da Lagoa do Vigário e nos períodos seco e úmido de amostragem (média ± dp; n=9).....	48
<b>Tabela 1.7</b> Comparação de estoques de N e P por <i>E. crassipes</i> sob diferentes condições de crescimento em trabalhos disponíveis na literatura.....	52
<b>Tabela 2.1</b> Área coberta (AC) por Aguapé na Lagoa do Vigário, porcentagem da lagoa coberta (% AC) e médias mensais de temperatura do ar durante meses de 2014, 2015 e 2016.....	76
<b>Tabela 2.2</b> Variáveis utilizadas para o cálculo do estoque e N e P nos compartimentos hídrico e de Aguapé da Lagoa do Vigário.....	79

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1.</b> Principais Efeitos da Eutrofização. Fonte: Adaptado de Smith et al. (1999).....	16
<b>Quadro 2.</b> Descrição de importantes variáveis físico-químicas indicadoras da qualidade de um corpo hídrico. Fonte das descrições: CETESB (2009).....	17
<b>Quadro 3.</b> Classificação dos corpos hídricos superficiais lênticos de água doce com base em parte das variáveis físico-químicas estabelecidas pela Resolução CONAMA 357 (2005) e as possíveis destinações para cada classe.....	18
<b>Quadro 2.1</b> Equações utilizadas para o cálculo dos estoques totais de fósforo e nitrogênio nos compartimentos hídrico e de Aguapé das porções norte e sul da Lagoa do Vigário no período úmido de 2015.....	74
<b>Quadro 2.2</b> Curvas de ajuste de crescimento do Aguapé, equações de crescimento (Ct), equações da área coberta a ser limpa (Y), capacidade de suporte (Kc), ponto médio da curva de crescimento exponencial (K/2) e taxa de crescimento do Aguapé (r), correspondentes as porções sul e norte da Lagoa do Vigário.....	78

## RESUMO

Em corpos hídricos eutrofizados a macrófita flutuante *Eichhornia crassipes* tem sua proliferação favorecida e pode acarretar prejuízos ao ecossistema. Por outro lado, essa espécie absorve grande quantidade de nutrientes e sua coleta pode ser uma alternativa para a mitigação de sistemas eutrofizados. O presente estudo objetivou fornecer uma alternativa para a mitigação da eutrofização da Lagoa do Vigário, corpo hídrico urbano da cidade de Campos dos Goytacazes-RJ, a partir do uso da *E. crassipes* como fitorremediadora. Para isso, a qualidade da água da lagoa e a atual influência dos bancos de *E. crassipes* que colonizam este ecossistema foram avaliadas e previsões sobre o crescimento do Aguapé foram feitas através do uso de imagens de satélite e modelagem matemática. A Lagoa do Vigário se encontra hipereutrofizada e imprópria para atividades de contato primário e secundário devido as elevadas concentrações de nutrientes em suas águas. O papel fitorremediador dos bancos de *E. crassipes* neste ecossistema está sendo desperdiçado por falta de manejo da sua biomassa. A partir de dados de cobertura dos bancos de *E. crassipes* foi possível determinar que seu crescimento pode ser representado por uma função logística e ficou evidente que a temperatura é um fator chave para prever a proliferação desta planta. A estratégia de manejo da *E. crassipes* considerada neste estudo indica o início das coletas após a planta atingir metade da capacidade de suporte, ponto em que se espera maior crescimento e absorção de nutrientes. O manejo da *E. crassipes* na Lagoa do Vigário poderá exportar elevadas concentrações de nitrogênio e fósforo do sistema considerando o atual estoque destes nutrientes no compartimento hídrico e na biomassa desta planta.

## ABSTRACT

In aquatic eutrophic ecosystems the free-floating macrophyte *Eichhornia crassipes* proliferation is favored and can cause damages to the ecosystem. On the other hand, this species absorbs large amounts of nutrients and its harvest can be an alternative for eutrophication mitigation. The present study aimed to provide a strategy for mitigating the problems of eutrophication of the two portions of Vigário Lake (north and south), an urban lake in Campos dos Goytacazes city (RJ), through the use of *E. crassipes* as a phytoremediation plant. We evaluated the water quality and the current influence of the *E. crassipes* banks that colonize this ecosystem and made predictions about its growth, through satellite images and mathematical modeling. The Vigário Lake is hypereutrophic lake and unfit for primary and secondary contact activities due to the high nutrients concentrations in its waters. The phytoremediation role of *E. crassipes* banks in this ecosystem is being wasted due to lack of management. From the data of *E. crassipes* cover it was possible to determine that their growth can be represented by a logistic function and it was evident that the temperature is a key factor to predict the proliferation of this plant. The management strategy of *E. crassipes* considered in this study indicates the beginning of the collections after the plant reaches half of the support capacity, at which point greater growth and absorption of nutrients is expected. The management of *E. crassipes* in Vigário Lake can export high nitrogen and phosphorus concentrations from the system, considering the current stock of these nutrients in the water compartment and in this plant biomass.

## INTRODUÇÃO GERAL

### ***Eutrofização: causas e consequências***

Em geral, os corpos hídricos possuem capacidade natural de responder ao aporte de matéria orgânica e nutrientes através do processo de autodepuração, que conta com a ação decompositora de microorganismos e consequente consumo de oxigênio dissolvido na água (Derisio, 2007). No entanto, o lançamento excessivo de nutrientes pode alterar o metabolismo natural dos ecossistemas, que passam a receber e produzir uma quantidade de matéria orgânica além da sua capacidade de decomposição e assimilação. Este cenário caracteriza o processo de eutrofização que pode ser natural quando, de forma lenta e contínua, um corpo hídrico recebe nutrientes trazidos pelas chuvas e pelas águas superficiais, ou artificial quando é acelerado pela introdução de nutrientes de origem antrópica (Kahan & Ansari, 2005).

Acréscimo nas concentrações de nitrogênio (N) e fósforo (P) é, em geral, a principal causa da eutrofização já que estes estão entre os principais macronutrientes (nutrientes requeridos em maiores concentrações) que limitam a produtividade primária e suas disponibilidades influenciam a variedade e abundância dos organismos aquáticos (Horne & Goldman, 1994). O P pode ser ainda mais limitante por ocorrer naturalmente em menores concentrações (Kahan & Ansari, 2005, Kobayashi et al. 2008). A principal forma fosfatada absorvida pelos produtores primários e desencadeadora da eutrofização é o P inorgânico dissolvido (PID) (ortofosfato), que pode se apresentar sob diferentes formas iônicas ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ) (Filho et al., 2012). Já os íons amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) e nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) correspondem as formas nitrogenadas mais assimiláveis pelos organismos aquáticos (Peterson et al., 2001).

Algumas das principais consequências da eutrofização compreendem o aumento da produtividade e da biomassa fitoplanctônica e de macrófitas aquáticas, levando à maior turbidez da água e à diminuição da diversidade específica. Outro agravante é o aumento da concentração de matéria orgânica morta que se deposita no fundo e promove o consumo excessivo de oxigênio devido à ação de organismos heterotróficos, o que pode resultar em condições de anaerobiose dos corpos hídricos (Oliveira, 2004). O quadro 1 resume os principais efeitos da eutrofização em ecossistemas aquáticos.

Quadro 1. Principais Efeitos da Eutrofização. Fonte: Adaptado de Smith et al. (1999).

### **Principais Efeitos da Eutrofização em Ecossistemas Límnicos**

- 1- Aumento da biomassa e mudança na composição específica da comunidade aquática;
- 2- Possível predominância de espécies de algas produtoras de toxinas;
- 3- Formação de densos tapetes de macrófitas;
- 4- Redução da transparência da água;
- 5- Redução do valor estético do corpo hídrico;
- 6- Elevação inicial do pH e depleção da concentração de oxigênio dissolvido com conseqüente redução do pH;
- 7- Aumento da probabilidade de morte de peixes e outros organismos aquáticos;
- 8- Restrição a pesca e a atividades recreativas.

### ***Recuperação de Ambientes Lacustres Eutrofizados***

As lagoas continentais são extremamente vulneráveis às atividades humanas e tem sofrido com a falta de planejamento ambiental das cidades em expansão demográfica e econômica. Fatores como a emissão de efluentes não tratados, a degradação da vegetação ciliar e o aterramento das margens tem provocado a aceleração do processo de eutrofização das lagoas (Esteves, 2006).

Projetos para conservação e recuperação de ecossistemas lacustres eutrofizados se fazem importantes, uma vez que estes ambientes apresentam usos múltiplos como o favorecimento ao microclima, à drenagem pluvial, às atividades pesqueiras e à balneabilidade. Tais projetos envolvem um conjunto de ações que devem considerar o ecossistema e seus componentes físicos, químicos e biológicos. Algumas destas incluem um diagnóstico inicial do sistema e seu estágio de degradação, as alternativas para a recuperação, os custos envolvidos e um sistema de monitoramento e avaliação do sistema (Braga et al., 2002).

A qualidade de um corpo hídrico assim como seu estado de degradação pode ser mensurada a partir da determinação de certas variáveis físico-químicas da água, algumas das quais descritas no quadro 2.

Quadro 2. Descrição de importantes variáveis físico-químicas indicadoras da qualidade de um corpo hídrico. Fonte das descrições: CETESB (2009).

Variáveis	Descrição
Temperatura	Águas naturais podem apresentar variações de temperatura sazonais e diurnas. A temperatura pode influenciar outras variáveis físico-químicas da água e a sobrevivência e crescimento da biota, já que os organismos possuem diferentes limites de tolerância térmicos e temperaturas ótimas de crescimento.
Turbidez	É o grau de atenuação de intensidade que um feixe de luz sofre ao atravessar a água devido a presença de sólidos em suspensão, tais como partículas inorgânicas (areia, silte, argila) e detritos orgânicos, tais como algas e bactérias, plâncton em geral, etc. Valores de turbidez elevados podem ser encontrados na estação chuvosa devido à erosão das margens dos corpos hídricos que é intensificada pelo mau uso do solo. Além disso, o lançamento de esgoto doméstico e efluente industriais provoca elevação da turbidez da água.
Condutividade Elétrica	Capacidade da água em conduzir corrente elétrica. Depende das concentrações iônicas e indica a quantidade de sais existentes na coluna d'água. Representa, portanto, uma medida indireta da concentração de poluentes já que a condutividade da água aumenta à medida que mais sólidos dissolvidos são adicionados.
Oxigênio Dissolvido (OD)	Indica a capacidade de um corpo d'água em manter a vida aquática. Os corpos hídricos possuem como principais fontes de OD a atmosfera e a atividade fotossintética dos organismos produtores. A concentração de OD pode variar em função de outros fatores como temperatura, a pressão e a salinidade.
Potencial Hidrogeniônico (pH)	O pH influencia em diversas reações de equilíbrio químico que ocorrem naturalmente, além de exercer influência direta na fisiologia das espécies.
Fósforo Total	O fósforo pode se apresentar nas águas sob a forma de fosfatos orgânicos como os detergentes, por exemplo, sob a forma de ortofosfatos que se combina com cátions formando sais inorgânicos nas águas e os polifosfatos ou polímeros de ortofosfatos que são rapidamente convertidos em ortofosfatos. Algumas fontes de poluição por fósforo em águas naturais são o

	despejo de matéria orgânica fecal e detergentes de uso doméstico, efluentes industriais e águas drenadas de áreas agrícolas e urbanas.
Série de Nitrogênio (nitrogênio orgânico, amônia, nitrato e nitrito)	As principais formas de nitrogênio encontradas nos sistemas aquáticos são as formas orgânicas, nitrogênio amoniacal, nitrito, nitrato, sendo as duas primeiras as formas reduzidas e as duas últimas as formas oxidadas. Em geral, os esgotos sanitários contribuem para o lançamento de nitrogênio orgânico, devido à presença de proteínas, e nitrogênio amoniacal, pela hidrólise da uréia na água.

A resolução CONAMA N° 357 (2005) dispõe sobre diretrizes ambientais para a classificação dos corpos de água doce e alguns limites das variáveis medidas são estabelecidos para enquadrar tais ambientes nas classes 1 especial, 1, 2, 3 ou 4 (Quadro 3).

Quadro 3. Classificação dos corpos hídricos superficiais lênticos de água doce com base em parte das variáveis físico-químicas estabelecidas pela Resolução CONAMA 357 (2005) e as possíveis destinações para cada classe.

Variáveis/Classes	1	2	3	4
Mínimo de OD, em qualquer amostra (mg.L <sup>-1</sup> )	6	5	4	2
Máximo de turbidez (UNT)	40	100	100	-
pH	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9
Máximo de P total (mg.L <sup>-1</sup> )	0,02	0,03	0,05	-
Máximo de NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg.L <sup>-1</sup> )	10	10	10	-
Máximo de NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg.L <sup>-1</sup> )	1	1	1	-
Máximo de N-amoniacal (mg.L <sup>-1</sup> ) para pH7,5	3,7	3,7	13,3	-
Máximo de N-amoniacal (mg.L <sup>-1</sup> ) para 7,5 < pH ≤ 8,0	2	2	5,6	-
Máximo de N-amoniacal (mg.L <sup>-1</sup> ) para 8,0 < pH ≤ 8,5	1	1	2,2	-
Máximo de N-amoniacal (mg.L <sup>-1</sup> ) para pH > 8,5	0,5	0,5	1	-

<b>Destinação para cada classe de água doce</b>	
<b>Classe especial</b>	Abastecimento para consumo humano, com desinfecção; preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas; e preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral.
<b>Classe 1</b>	Abastecimento para consumo humano, após tratamento simplificado; proteção das comunidades aquáticas; recreação de contato primário; irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas; e a proteção das comunidades aquáticas em Terras Indígenas.
<b>Classe 2</b>	Abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional; proteção das comunidades aquáticas; recreação de contato primário; irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto; e a aquicultura e a atividade de pesca.
<b>Classe 3</b>	Abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional ou avançado; irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras; pesca amadora; recreação de contato secundário; e a dessedentação de animais.
<b>Classe 4</b>	Navegação; e harmonia paisagística.

Tendo como foco a problemática da eutrofização, os corpos de água doce também podem ser classificados de acordo com seu índice de estado trófico, estabelecido a partir da concentração de nutrientes na água (P total e N total), além de outras variáveis como transparência e concentração de clorofila-a. Tais ecossistemas podem ser classificados como oligotróficos, mesotróficos, eutróficos ou hipereutróficos, sendo lagos oligotróficos os que possuem concentrações de N total e P total inferiores a  $0,35 \text{ mg.L}^{-1}$  e  $0,01 \text{ mg.l}^{-1}$ , respectivamente. No outro extremo, lagos hipereutróficos possuem concentrações de N total e P total superiores a  $1,20 \text{ mg.L}^{-1}$  e  $0,10 \text{ mg.L}^{-1}$ , respectivamente (Smith et al., 1999).

Após a etapa de diagnóstico, as estratégias para a recuperação de áreas eutrofizadas devem envolver medidas preventivas, que incluem ações na área de

entorno, tais como: a coleta e tratamento de efluentes e o controle no uso e ocupação do solo (Klapper, 2003). Entretanto, tais medidas nem sempre são suficientes para ambientes em adiantado estágio de eutrofização devido aos processos de ciclagem de nutrientes no ecossistema, como o retorno de nutrientes pela decomposição de organismos produtores em senescência e a liberação de nutrientes pelo sedimento (Cook, et al., 2005). Medidas corretivas se fazem, portanto, necessárias a partir de processos mecânicos, químicos e biológicos, que podem ser usados isoladamente ou combinados de acordo com as necessidades do ecossistema a ser tratado (Klapper, 2002).

Algumas técnicas mecânicas para a recuperação de ambientes aquáticos eutrofizados consistem: na aeração da coluna d'água; na desestratificação ou injeção de ar comprimido nas camadas mais profundas da coluna d'água a fim de favorecer sua circulação; e na remoção de macrófitas (Barnes & Mann, 1991). Tendo em vista que o compartimento sedimentar é uma importante fonte de nutrientes em ecossistemas aquáticos (Nowlin et al., 2005), a dragagem para remoção das camadas mais superficiais do sedimento também é uma técnica mecânica que tem por objetivo inibir o processo de regeneração bêntica que alimenta a eutrofização do sistema (Peterson, 1982).

Exemplos de processos corretivos químicos incluem: a neutralização de lagos acidificados através da aplicação de cal, além do uso de substâncias químicas, como o sulfato de cobre para reduzir a comunidade fitoplanctônica (Esteves, 2011).

Como exemplo de processo corretivo biológico pode-se citar a biomaniplulação que tem como uma das práticas a redução da biomassa fitoplanctônica pelo aumento da comunidade zooplanctônica. Para isso, peixes que se alimentam preferencialmente do zooplâncton são removidos o que torna o fitoplâncton menos abundante (Sharma et al., 2011). Peixes como a carpa e a tilápia também têm sido utilizadas no controle de macrófitas aquáticas por herbivoria (Esteves, 2011).

Apesar dos processos supracitados estarem sendo utilizados para a recuperação de lagos eutrofizados, suas desvantagens também devem ser consideradas, como por exemplo, a remoção mecânica de sedimentos é uma técnica que demanda alto investimento financeiro (Peterson, 1982) e o uso de algicidas pode ser tóxico para a comunidade aquática (Svirčev et al., 2008). Neste

sentido, deve-se dar preferência a técnicas menos invasivas, que sejam econômicas e de fácil aplicação.

Dentre as técnicas apontadas como viáveis para a recuperação de ambientes eutrofizados está a fitorremediação, que consiste no uso da habilidade de plantas em reduzir os poluentes orgânicos e inorgânicos contidos no solo ou na água (Salt et al., 1998). No ambiente aquático, a macrófita flutuante *Eichhornia crassipes*, conhecida popularmente como Aguapé, se destaca como fitorremediadora, devido a sua habilidade em acumular em seus tecidos variados tipos de poluentes (Ayyasamy et al., 2009; Ochekwu & Madagwa, 2013; Malignani et al., 2015) e estimular a decomposição de material orgânico adsorvido ao seu denso sistema radicular (Loan et al., 2014). Por outro lado, o uso do potencial fitorremediador de *E. crassipes* deve ser acompanhado de uma estratégia de manejo da sua biomassa, já que seu acelerado crescimento vegetativo e o denso tapete que forma sobre a coluna d'água podem trazer prejuízos ao ecossistema (Gossett & Jr., 1971; Gopal, 1987; Bianchini, 2003).

### **A Lagoa do Vigário**

Localizada na área urbana de Campos dos Goytacazes, a Lagoa do Vigário é um exemplo de ecossistema visivelmente eutrofizado e intensamente colonizado por bancos de *E. crassipes* (Figura 1). Devido ao intenso desenvolvimento marginal de uma população que começou a se instalar a partir da década de 60 do século XX (Santos, 2007; Souza & Silva, 2009) suas águas recebem efluentes domésticos e comerciais que contribuem para a eutrofização da lagoa (Lannes, 2002; Lannes, 2004).



Figura 1. Imagem da porção sul da Lagoa do Vigário de julho de 2015. Notar floração de *E. crassipes*.

A partir do início da década de 10 do século XXI, foi elaborado um projeto de recuperação da Lagoa do Vigário por técnicos da Secretaria de Meio Ambiente de Campos dos Goytacazes. O projeto intitulado “De Olho na Água” teve aprovação da Agência Nacional das Águas (ANA) e tinha como objetivos principais, a construção de anel coletor de tratamento de esgoto em parte da Lagoa do Vigário para lançamento de efluentes na rede da empresa concessionária de águas e esgotos do município e a realocação das formas de ocupação do entorno da lagoa que se encontravam em risco de inundação (Vilaça, 2008). Em 2011, parte do projeto foi posta em prática com a demolição de aproximadamente 150 casas (Ururau, 2012) e a instalação de rede coletora e estação de tratamento de esgoto na região. Em 2016, a prefeitura da cidade inaugurou as obras do Parque Municipal da Lagoa do Vigário que compreenderam a construção de ciclovia, área verde, playground, deck para pescaria e outros atrativos. Todavia, ainda nota-se o despejo de dejetos na lagoa por residências que permanecem nas suas margens e ainda não foi apresentado um plano de recuperação da qualidade da água.

Sendo assim, apesar de medidas preventivas já estarem sendo tomadas para a recuperação da Lagoa do Vigário, tais como tratamento de esgoto e a desocupação parcial de suas margens, estas não servem como mitigadoras da concentração de nutrientes e matéria orgânica já estocados, uma vez que a saída de água e materiais do sistema se faz principalmente por um pequeno canal com pouco fluxo de água (Lannes, 2002).

## **OBJETIVO GERAL**

O objetivo da presente tese é fornecer uma alternativa para a mitigação da eutrofização na Lagoa do Vigário a partir do uso da *E. crassipes* como fitorremediadora. Para isso, pretendeu-se avaliar a qualidade da água da lagoa e a influência dos bancos de Aguapé que colonizam este ecossistema, fazer previsões sobre o seu crescimento e elaborar estratégia de coleta dessa planta que possa viabilizar seu papel fitorremediador.

## **LISTA DE CAPÍTULOS**

O trabalho está estruturado em dois capítulos, além da introdução, discussão geral e conclusões. O primeiro capítulo trata do estado de eutrofização da Lagoa do Vigário e o papel desempenhado pelo Aguapé presente neste ecossistema. Já o

segundo aborda o uso da modelagem matemática como ferramenta para a previsão do crescimento e controle do Aguapé na Lagoa do Vigário para fins de fitorremediação.

CAPÍTULO I. O papel Ecológico da macrófita *Eichhornia crassipes* na Lagoa do Vigário.

CAPÍTULO II. A modelagem matemática como ferramenta para o manejo do Aguapé na Lagoa do Vigário.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ayyasamy, P. M., Rajakumar, S., Sathishkumar, M., Swaminathan, K., Shanthid, K., Lakshmanaperumalsamy, P., Lee, S. (2009) Nitrate removal from synthetic medium and groundwater with aquatic macrophytes. *Desalination*, 242:286-296.
- Barnes, R. S. K., Mann, K. H. (1991) *Fundamentals of Aquatic Ecology*. Blackwell Science.
- Bianchini, I., Jr. (2003) Modelos de crescimento e decomposição de macrófitas aquáticas. Em: Thomaz, S. M., Bini, L. M. (eds), *Ecologia e manejo de macrófitas aquáticas*. Eduem, Maringá, 85-126.
- Braga, B., Hespanhol, I., Conejo, J. G. L., Barros, M. T. L., Veras Júnior, M. S., Porto, M. F. do A., Nucci, N. L. R., Juliano, N. M. A., Eiger, S. (2002) *Introdução à engenharia ambiental*. São Paulo : Pearson Prentice Hall, 305.
- CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. (2009) *Significado Ambiental e Sanitário das Variáveis de Qualidade das Águas e dos Sedimentos e Metodologias Analíticas e de Amostragem*.
- CONAMA (2005) Conselho Nacional do Meio Ambiente - Resolução Conama número 357, de 17 de março de 2005, páginas: 58-63. Disponível em: [www.mma.conama.gov.br/conama](http://www.mma.conama.gov.br/conama).
- Derisio, J. K. (2007) *Introdução ao Controle de Poluição Ambiental*. 3ª ed. São Paulo: Signus Editora.
- Esteves, F. A. (2011) *Fundamentos de Limnologia*. 3ª ed. Rio de Janeiro: Interciência.

- Filho, F. J., Moura, M. C. S., Marins, R. V. (2012) Fracionamento Geoquímico do fósforo em água e sedimentos do rio Corrente, Bacia hidrográfica do Paranaíba/PI. *Revista Virtual de Química*, 4:623-640.
- Gopal, B. (1987) *Water hyacinth*. Elsevier, Amsterdam.
- Gossett, D. R., Jr., W. E. N. (1971) Relationship between Nutrient Availability and Content of Nitrogen and Phosphorus in Tissues of the Aquatic Macrophyte, *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms. *Hydrobiologia*, 38:15-28.
- Horne, A. J., Goldman, C. R. (1994) *Limnology*. 2ed. McGraw-Hill Science/Engineering.
- Kahan, F. F. A., Ansari, A. A. (2005) Eutrophication: An Ecological Vision. *The Botanical Review*, 71(4):449-482.
- Klapper, H. (2003) Technologies for lake restoration. *J. Limnol.*, 62:73-90.
- Kobayashi, J. T., Thomaz, S. M., Pelicice, F. M. (2008) Phosphorus as a limiting factor for *Eichhornia crassipes* growth in the upper Paraná River floodplain. *Wetlands*, 28(4):905-913.
- Lannes, L. S. (2002). Hidroquímica do sistema alagado urbano Vigário-Taquaruçu, Campos dos Goytacazes, RJ. (Mestrado) – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, RJ.
- Lannes, L.S. (2004). Avaliação de pequenos alagados artificiais na modificação da qualidade da água utilizando a macrófita aquática *Typha domingensis* Pers. Dissertação apresentada ao centro de Biociências e Biotecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, RJ.
- Loan, N. T., Phuong, N. M., Anh, N. T. N. (2014) The role of aquatic plants and microorganisms in domestic wastewater treatment. *Environmental Engineering and Management Journal*, 13:2031-2038.
- Malignani, E., de Cabo, L. I., Faggi, A. M. (2015) Copper uptake by *Eichhornia crassipes* exposed at high level concentrations. *Environmental Science and Pollution Research*, 22:8307-8315.
- Nowlin, W. H., Evarists, J. L., Vanni, M. J. (2005) Release rates and potential fates of nitrogen and phosphorus from sediments in a eutrophic reservoir. *Freshwater Biology*, 50:301-322.
- Ochekwu, E. B., Madagwa, B. (2013) Phytoremediation potentials of water hyacinth (*Eichhornia crassipes* (Mart) Solms) in crude oil polluted water. *J. Appl. Sci. Environ. Manage.*, 17:503-507.

- Oliveira, J. F. (2004) Qualidade de Água para Consumo Humano. Lidel, 259-276.
- Peterson, B. J., Wollheim, W. M., Mulholland, P. J., Webster, J. R., Meyer, J. L., Tank, J. L., Marti, E., Bowden, W.B., Valett, H. M., Hershey, A. E., McDowell, W. H., Doods, W. K., Halminton, S. K., Gregory, S., Morall, D. D. (2001) Control of nitrogen export from watersheds by Headwater Streams. *Science*, 292: 86-90.
- Peterson, S. A. (1982) Lake restoration by sediment removal. *Water Research Bulletin*, 18:423-435.
- Salt, D. E., Smith, R. D., Raskin, I. (1998) Phytoremediation. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 49:643-668.
- Santos, J. M. C. O. (2007) Avaliação da Produção de Metano em Alagados Construídos. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes.
- Sharma, C.M., Borgstrom, R., Rosseland, B.O. (2011) Biomanipulation in Lake Årungen, Norway: A tool of biological control. In: Ansari, A. A., Singh Gill, S., Lanza, G.R., Rast, W. (eds.) *Eutrophication: causes, consequences and control*. Springer, 292-323.
- Smith, V. H., Tilman, G. D., Nekola, J. C. (1999) Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. *Environmental Pollution*, 100: 179-196.
- Souza, F. P., Silva, J. A. F. (2009) Estudo de Ocupação Espontânea na Lagoa do Vigário, no Município de Campos dos Goytacazes - RJ, propostas mitigadoras e amparo legal. *Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego, Campos dos Goytacazes/RJ.*, 3 (2): 31-50.
- Svirčev, Z., Krstić, S., Marković, S. B., Plavša, J., Lazić, L. (2008) Methods for Management of Eutrophication in Freshwater Ecosystems in Vojvodina. *Geographica Pannonica*, 12:4-11.
- Ururau. (2012). Defesa Civil realiza demolição de casas às margens da Lagoa do Vigário. [www.ururau.com.br/cidades12986](http://www.ururau.com.br/cidades12986), Campos dos Goytacazes, 06 mar.
- Vilaça, D. R. C. (2008) Lagoa do Vigário: Um tesouro formal engolido pela informalidade. Dissertação (Mestrado)- Centro Federal de Educação Tecnológica de Campos dos Goytacazes, RJ.

**CAPÍTULO I: O PAPEL ECOLÓGICO DA MACRÓFITA *Eichhornia crassipes* NA LAGOA DO VIGÁRIO**

## RESUMO

Ao mesmo tempo em que a macrófita *E. crassipes* pode ser considerada uma ameaça devido a sua rápida proliferação e aos prejuízos causados por seus densos bancos flutuantes, essa espécie pode acumular poluentes além do necessário ao seu crescimento ótimo e tem sido usada na fitorremediação de ambientes eutrofizados. Este trabalho objetivou relacionar a qualidade da água da Lagoa do Vigário e a influência exercida pelos bancos de *E. crassipes* que a colonizam. Amostras de água e de *E. crassipes* foram coletadas nos períodos seco e úmido de 2015, em duas porções da lagoa (norte e sul). As concentrações de nutrientes e a variação da biomassa de Aguapé foram determinadas. As porções norte e sul da Lagoa do Vigário se encontram hipereutróficas devido as elevadas concentrações de nitrogênio (N) e fósforo (P). Foram encontradas maiores concentrações de N-amoniaco e ortofosfato na porção norte da lagoa com valores entre 12,1 e 23,0 mg.L<sup>-1</sup> e 1,46 e 4,30 mg.L<sup>-1</sup>, respectivamente, mas essa condição não estimulou o crescimento e o estoque de N e P por *E. crassipes*. Estes resultados indicam que já foram ultrapassadas as concentrações ótimas destes nutrientes para o crescimento do Aguapé e o limite de saturação na absorção dos mesmos. A maior biomassa de Aguapé na porção sul (1564 g.m<sup>-2</sup> no período seco e 2008 g.m<sup>-2</sup> no período úmido) coincidente com concentrações menores de nutrientes na água pode indicar a atuação da *E. crassipes* na estocagem de nutrientes. Por outro lado, ocorreu diminuição de P na biomassa de *E. crassipes* da porção sul no período úmido. Além disso, quando comparados os estoques de P em *E. crassipes* por unidade de área, não foram verificadas diferenças entre os períodos seco e úmido, apesar da maior biomassa de Aguapé encontrada no período úmido. Tais resultados podem indicar a perda de P por senescência e confirmam que apesar do evidente papel fitorremediador exercido por *E. crassipes* na alocação de nutrientes da lagoa, tal habilidade está sendo desperdiçada pela falta de manejo de sua biomassa.

Palavras-chave: Aguapé, Eutrofização, Fitorremediação.

## INTRODUÇÃO

### ***Eichhornia crassipes* e seu potencial de fitorremediação**

A comunidade de macrófitas é reconhecida pelas funções ecológicas que desempenha nos ecossistemas aquáticos. Cinco tipos principais de macrófitas se distinguem pela maneira como estão dispostas na coluna d'água: I) As macrófitas aquáticas emersas apresentam raízes associadas ao sedimento e a maior proporção vegetal fora da água. Exemplo: *Phragmites australis* e *Typha domingensis*. II) Macrófitas aquáticas com folhas flutuantes são enraizadas ou ancoradas ao solo, mas a maioria das folhas flutua na superfície da água. Exemplo: pinheirinha-de-água (*Myriophyllum aquaticum*). III) Macrófitas aquáticas submersas enraizadas são ancoradas ao substrato, totalmente submersas na água. Exemplo: *Potamogeton natans*. IV) Macrófitas aquáticas submersas livres. Exemplo: *Lemna minor*. V) Macrófitas aquáticas flutuantes que não estão enraizadas ao substrato e flutuam na superfície da água. Exemplo: *Eichhornia crassipes* (Esteves, 2011).

Em um corpo hídrico as macrófitas emergentes tendem a se localizar mais próximo das margens e com o aumento da profundidade surgem as plantas enraizadas com folhas flutuantes, as submersas e as flutuantes. Os bancos de macrófitas podem alterar as características físicas dos ecossistemas, diminuindo a velocidade das correntes e incrementando, em consequência, o processo de sedimentação de materiais, o que resulta em águas menos turvas (Madsen et al., 2001). Estes podem ainda influenciar as características biológicas, proporcionando maior biodiversidade com o aumento da complexidade do habitat (Cronin et al., 2006; Thomaz & Cunha, 2010) e interferir nas condições físico-química dos corpos d'água, tanto pelo bombeamento de nutrientes do sedimento para a coluna d'água (Carignan & Kalff, 1980), quanto pela capacidade de retenção de sólidos e nutrientes em sua biomassa (Meerhoff et al., 2003; Diniz, et al., 2005).

Por influenciarem na qualidade da água, muitas macrófitas têm sido utilizadas no processo de fitorremediação de sistemas aquáticos. Dentre as espécies de macrófitas que se destacam como fitorremediadoras está a *Eichhornia crassipes* ou Aguapé que devido a sua habilidade em acumular poluentes tanto na matéria orgânica associada às suas raízes quanto em suas partes aéreas, tem sido usada como modelo para estudos do tratamento de águas contaminadas (Billore et al.,

1998; Mahujchariyawong & Ikeda, 2001; Nahlik & Mitsch, 2006; Fox, 2009; Palma-Silva et al., 2012).

Esta espécie pertencente a família Pontederiaceae é uma planta flutuante com caule estolonífero e raízes numerosas. Possui uma roseta de folhas com pecíolos que podem ser delgados ou grossos que servem de flutuadores e lâmina orbicular ou reniforme, glabra (Figura 1.1). Em geral, plantas adultas possuem crescimento vertical entre 10 e 20 cm, mas podem chegar a 1m em condições que propiciam seu crescimento e a formação de densos tapetes. Sua reprodução ocorre preferencialmente de forma vegetativa, com formação e liberação de novos indivíduos a partir dos estolões da “planta mãe”, mas também pode ocorrer menos frequentemente de forma sexuada por sementes com a formação de flores azuladas de matriz amarelada, dispostas em espigas (Pott & Pott, 2000; van Schalkwyk, 2014).

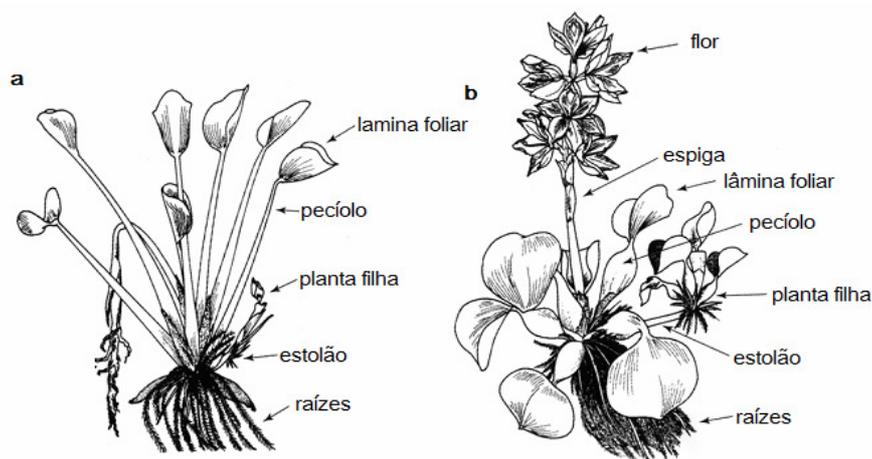


Figura 1.1 Estrutura de *Eichhornia crassipes* com (a) pecíolos delgados e (b) pecíolos bulbosos (Fonte: Adaptado de Wright and Purcell 1995, *apud* van Schalkwyk, 2014).

*E. crassipes* é uma espécie nativa da Amazônia, mas está amplamente distribuída em regiões tropicais e subtropicais (Boyd & Vickers, 1971; Bolenz et al., 1990; Téllez et al., 2008). Essa espécie pode ser encontrada em lagos, lagoas, estuários, pântanos e rios de fluxo lento (Villamagna & Murphy, 2010).

A dispersão do Aguapé se deu principalmente pelo seu uso ornamental e atualmente é uma planta indesejada em muitos países devido ao seu acelerado crescimento vegetativo que pode levar a formação de tapetes de inúmeras plantas ligadas entre si por seus estolões (Patel, 2012). Tal condição pode ocasionar a obstrução de vias navegáveis, a proliferação de vetores de doenças,

comprometimento da fotossíntese subaquática e conseqüentemente do crescimento de macrófitas submersas e da comunidade fitoplanctônica e o aumento da fertilização da água, devido a liberação de nutrientes quando estas plantas entram em estágio de decomposição (Gossett & Jr., 1971; Gopal, 1987; Billore et al., 1998; Bianchini, 2003; Téllez et al., 2008).

Por outro lado, o rápido crescimento desta espécie apesar de torná-la um risco também a confere elevado potencial de fitorremediação. Ao longo dos anos, o uso de *E. crassipes* já foi bem sucedido na fitorremediação de águas contaminadas por variados tipos de poluentes, tais como: metais pesados (cromo, cádmio, chumbo, cobre, zinco e arsênio) (Costa et al., 2000; Alvarado et al., 2008; Agunbiade et al., 2009; Junior et al., 2009; Malignani et al., 2015), petróleo (Ochekwu & Madagwa, 2013), contaminantes microbiológicos (Gopal, 1987) e nutrientes (N e P) (Wooten & Dodd, 1976; Reddy & Tucker, 1983; Diniz et al., 2005; Dhote, 2007; Ayyasamy et al., 2009).

Dentre as características desta espécie que lhe conferem vantagens como fitorremediadora estão:

- adaptação a amplas faixas de temperatura, pH e condições nutricionais (Gopal, 1987);
- elevada taxa de reprodução vegetativa que significa rápida propagação com aumento da biomassa e da capacidade filtradora (Gopal, 1987; Fox, 2009);
- seu denso sistema radicular possibilita adsorção de matéria orgânica e a otimização da ação decompositora por microorganismos associados (Loan et al., 2014), além de promover a adesão de material particulado (Billore et al., 1998) que pode ser retirado do sistema junto com a biomassa do Aguapé, reduzindo a turbidez dos corpos hídricos;
- por ser flutuante, sua retirada para a remoção de poluentes não provoca grande ressuspensão do sedimento como ocorre na retirada de espécies emersas;
- e existem variadas alternativas para o uso da biomassa do Aguapé (Pompêo, 2008).

Em ambientes naturais, a coleta mecânica da biomassa do Aguapé é uma das principais formas de controle do crescimento desta espécie, além de ser necessária quando se tem a intenção de retirar poluentes acumulados em seus tecidos. Para isso, geralmente empurra-se os bancos flutuantes para as bordas do ecossistema com o auxílio de ancinhos de cabo longo, dragas, forquilhas,

condutores flutuantes ou equipamentos mais complexos como barcos grandes com coletores do tipo esteira (Perazza et al., 1981).

A biomassa do Aguapé retirada do sistema (Perazza et al., 1981) pode gerar renda e emprego a partir da produção de ração animal (Bolenz et al., 1990; Dâmaso, 2008), biogás (Nath et al., 1984), etanol (Mishima, et al., 2008), fertilizantes agrícolas, confecção de artesanatos (Dâmaso, 2008; Martins et al., 2011) e produção de concentrados protéicos para alimentação animal (Martins et al., 2011).

Por outro lado, a logística para a remoção da *E. crassipes* não é tão simples, uma vez que essa espécie possui cerca de 90% de sua biomassa composta por água (Gopal, 1987; Martins et al., 2011) o que a torna seus bancos pesados e de difícil transporte (Villamagna & Murphy, 2010). É importante ressaltar ainda que, como outras espécies de macrófitas, os bancos de Aguapé possuem influência na estrutura da comunidade aquática já que possibilitam maior heterogeneidade do hábitat com efeitos positivos sobre a abundância e diversidade de invertebrados e conseqüentemente sobre a ictiofauna (Villamagna & Murphy, 2010). Sendo assim, a retirada desses bancos pode acarretar em alteração da composição faunística por remoção de alimento e abrigo, além da possibilidade de ocupação da área por espécies invasoras oportunistas (Perazza et al., 1981).

Em consideração às ponderações supracitadas, torna-se desaconselhável a colheita indiscriminada dos bancos de *E. crassipes* e se fazem necessários estudos mais precisos sobre a frequência e a quantidade a ser coletada a fim de otimizar seu potencial fitorremediador, reduzir gastos e força de trabalho e minimizar os possíveis prejuízos para o ecossistema.

### ***Fitorremediação de ambientes eutrofizados por E. crassipes***

O Aguapé possui elevadas taxas de crescimento, sendo sua produtividade favorecida em condições eutróficas (Reddy & D'Angelo, 1990, Greco & Freitas, 2002; Fox, 2009). Essa espécie possui capacidade de absorver nutrientes além do necessário para a manutenção do seu crescimento ótimo (Lober et al., 1984; Reddy et al., 1990) e tem se mostrado mais eficiente na retirada de N e P da água que outras macrófitas, tais como *Pistia stratiotes* (Sooknah & Wilkie, 2004), *Salvinia molesta* (Ayyasamy et al., 2009; Pistori, 2009) e *Salvinia auriculata* (Petruccio & Esteves, 1999).

O papel fitorremediador de Aguapé tem sido muito explorado em estudos que objetivam seu uso para o tratamento de efluentes e dejetos industriais (Reddy & Smith, 1987; Basseres & Pietrasanta, 1991; Jayaweera & Kasturiarachchi, 2004; Alade & Ojoawo, 2009), mas também se encontram trabalhos com o intuito de fitorremediar ambientes naturais eutrofizados. Um estudo realizado em um açude em Campina Grande (PB) verificou a eficiência de bancos de macrófitas aquáticas (*Eichhornia crassipes*, *Pistia stratiotes* e *Typha* spp.) na redução de 78% de N-amoniaco, 42% de N-nítrico, entre 23% e 86% de P-total e entre 8% e 76% de P- $\text{PO}_4^{-3}$  na água (Diniz et al., 2005). Palma-Silva et al. (2012) verificaram que durante um período de 60 dias houve um aumento de 2,6 vezes na concentração de nitrogênio total e 1,8 de fósforo total na biomassa de indivíduos de *E. crassipes* estudados em um lago hipereutrofizado no Rio Grande do Sul e sugeriram pesquisas voltadas ao desenvolvimento de um manejo adequado de *E. crassipes* para a fitorremediação de pequenos lagos eutrofizados na região subtropical do Brasil. Mais recentemente, Wang et al. (2013) indicaram a viabilidade do uso de *E. crassipes* em grande escala para remoção de N de lagos eutrofizados, após estudo realizado em um lago no sul da China. Neste estudo o Aguapé foi distribuído ao longo do lago em estruturas de plástico cobrindo uma área de 4,3 Km<sup>2</sup> e foi responsável pela redução da concentração de nitrogênio total, amônio e nitrato na água em 76%, 96% e 86%, respectivamente.

Nesse contexto, o Aguapé pode apresentar efeitos ambíguos no ambiente, desde o desequilíbrio e a intensificação da eutrofização quando sua biomassa cresce sem controle ao papel de fitorremediador que tem sido apontado como importante alternativa na recuperação de ambientes eutrofizados.

## **OBJETIVO GERAL**

Relacionar a qualidade da água de diferentes porções da Lagoa do Vigário e a influência exercida pelos bancos de Aguapé que colonizam este ecossistema.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Atualizar as informações referentes ao estado de eutrofização da Lagoa do Vigário e verificar a concentração de nutrientes (N e P) na água e no tecido do Aguapé (N e P) nas porções norte e sul da lagoa.
- Verificar a influência de variações sazonais no estado de eutrofização da Lagoa do Vigário.
- Estimar a biomassa de Aguapé na Lagoa do Vigário ao longo dos períodos de chuva e estiagem.
- Identificar o(s) fator(es) determinantes para o crescimento do Aguapé na Lagoa do Vigário.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

### *Área de Estudo*

A Lagoa do Vigário está localizada na área urbana da cidade de Campos dos Goytacazes (RJ) a margem esquerda do Rio Paraíba do Sul, entre os bairros de Guarus e Parque Prazeres (21° 45'15" S, 41° 19' 28" W) (Santos, 2007).

O município de Campos dos Goytacazes localizado na região norte do Estado do Rio de Janeiro apresenta população de aproximadamente 463.731 habitantes, sendo 418.725 residentes da área urbana (DRZ Geotecnologia e Consultoria, 2013).

Por sua latitude, a região estudada está submetida à incidência solar intensa, favorecendo a evaporação. O anticiclone tropical do Atlântico é responsável pela manutenção de dias ensolarados a maior parte do ano e a dominância dos ventos sub-úmidos de direção Nordeste (FIDERJ,1978). A região apresenta elevada incidência de precipitação nos meses de outubro a janeiro, uma diminuição no mês de fevereiro e novamente uma elevação nos meses de março e abril. A baixa incidência de chuvas nos meses de maio a agosto caracteriza o período seco. O volume total de chuvas, em torno de 1000 mm anuais e temperaturas médias entre 20 e 30 °C, caracterizam o clima da região como tropical subúmido-seco, com elevada precipitação no verão e megatérmico, com calor bem distribuído o ano todo (FIDERJ, 1978).

Até a década de 60 do século XX as ocupações no entorno da Lagoa do Vigário eram raras. A margem leste da lagoa era predominantemente ocupada por canaviais e na margem oeste havia chácaras e fazendas com a vegetação preservada. Um aterramento iniciado em 1973 dividiu a Lagoa do Vigário nas porções norte e sul (Figura 1.2), com a finalidade de que os moradores de Guarus tivessem melhor acesso ao centro da cidade. Acredita-se, que a partir de então, iniciou-se o adensamento populacional no entorno da lagoa que hoje encontra-se intensamente urbanizada (Figura 1.2) (Vilaça, 2008).

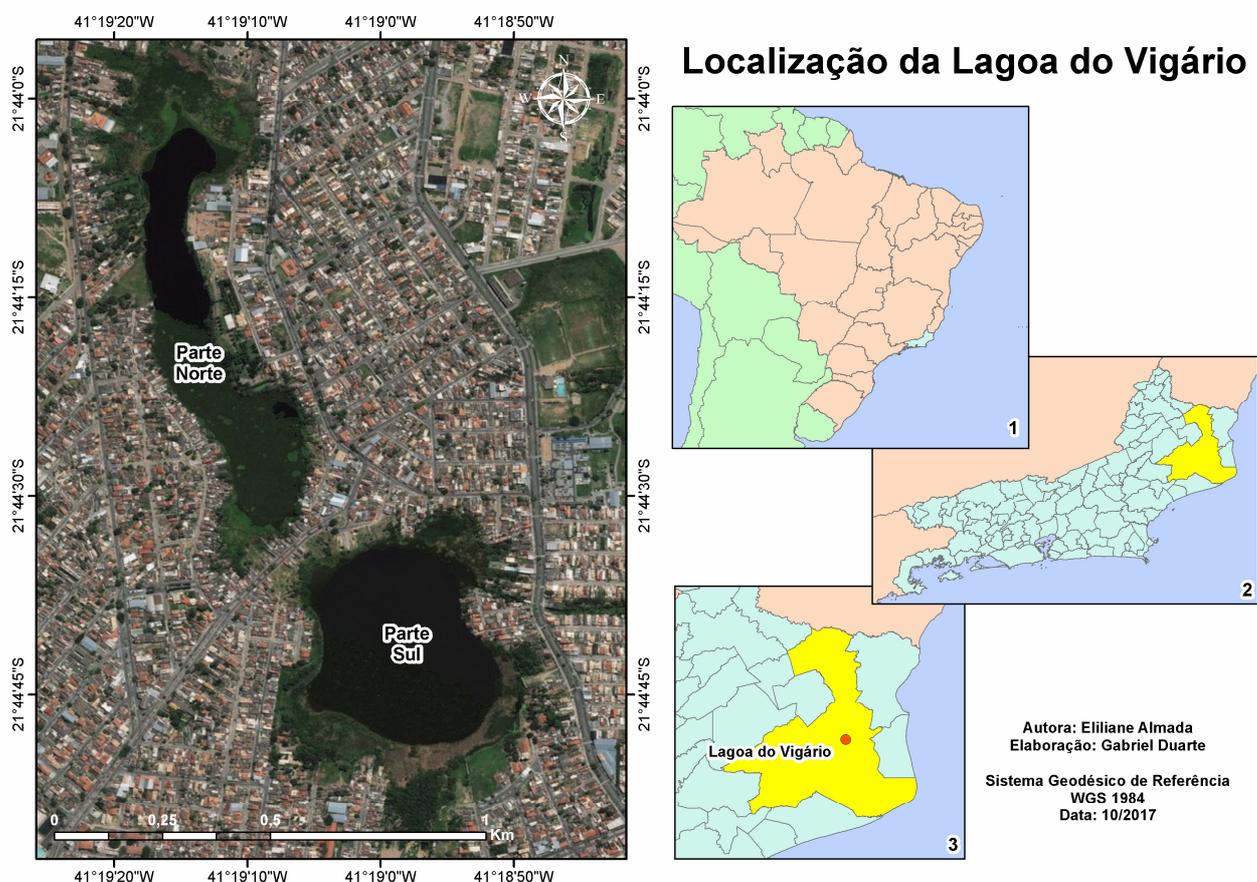


Figura 1.2 Imagem de satélite e localização da Lagoa do Vigário. Notar a intensa urbanização ao redor da lagoa.

Com área de 40,7 ha., a Lagoa do Vigário é classificada como uma lagoa de tabuleiro, formada por cursos d'água barrados pelos transbordamentos periódicos do Rio Paraíba do Sul (Soffiati, 1998). Da lagoa parte o canal do Vigário, o qual chega até um brejo no bairro Parque Prazeres que, por sua vez, também através de um canal, se interliga a Lagoa do Taquaruçu ou Lagoa dos Prazeres (Figura 1.3). Em

períodos de alta precipitação pluviométrica, o sistema prolonga-se até a Lagoa do Campelo que está ligada ao mar pelo canal Antônio Resende (Lannes, 2002).

A Lagoa do Vigário é colonizada por bancos de *Typha domingensis* próximos as margens e bancos flutuantes de *Eichhornia crassipes* mais na parte interna da lagoa que migram de acordo com a predominância dos ventos.

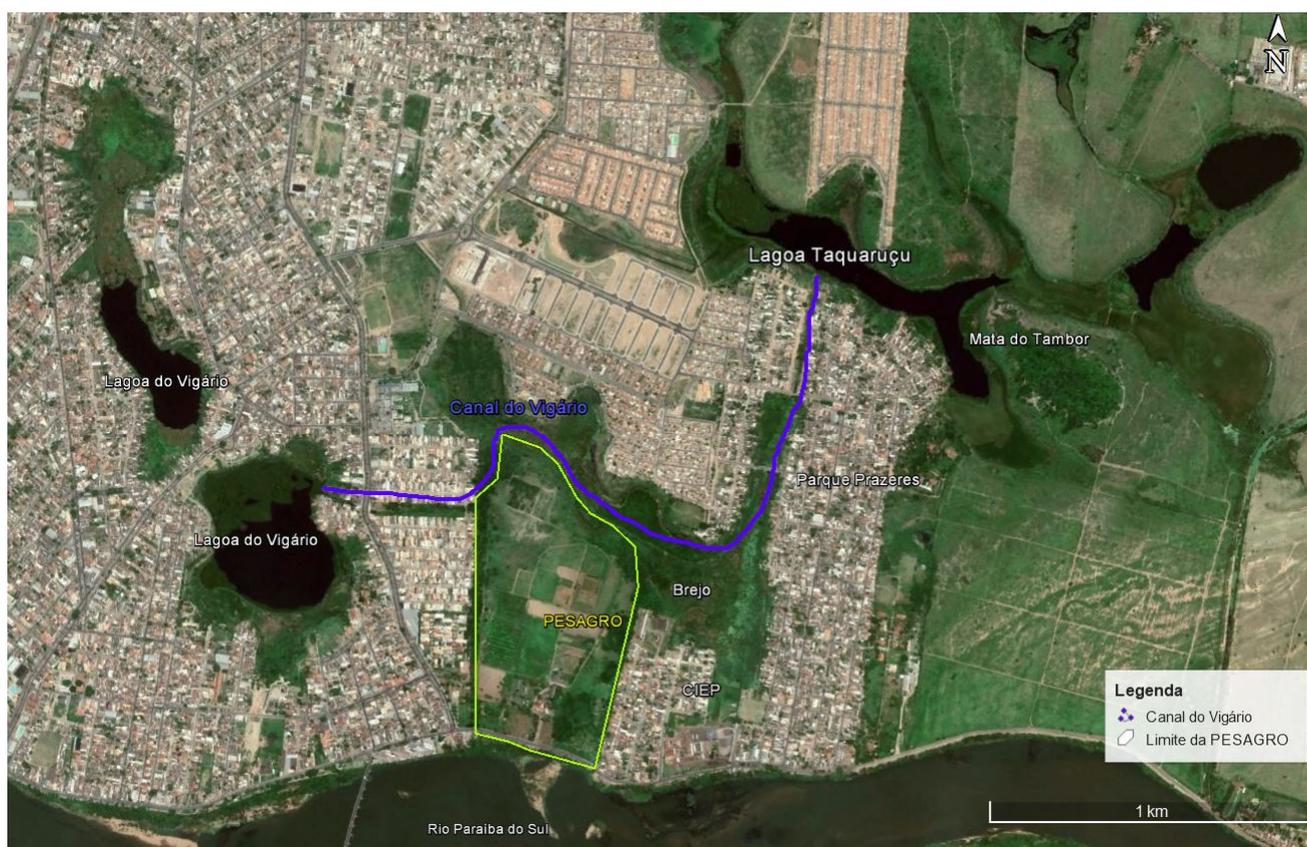


Figura 1.3 Ligação da Lagoa do Vigário, através do canal do Vigário, com o Brejo Prazeres e Lagoa do Taquaruçu . Autor: Eliliane Almada. Elaboração: Gabriel Duarte.

### Qualidade da água da Lagoa do Vigário

A fim de atualizar os dados referentes ao estado de eutrofização da Lagoa do Vigário foram realizadas duas campanhas de amostragens semanais, totalizando cinco coletas de água da lagoa no período seco (Agosto de 2015) e cinco coletas no período úmido (Outubro e Novembro de 2015). Com o objetivo de caracterizar os períodos de amostragem, utilizou-se dados de temperatura do ar, pluviosidade e

radiação global nos períodos de coleta, cedidos pela Estação Evapotranspirométrica Leag/Uenf que se encontra próximo ao local de amostragem, Lat: 21° 45' Sul; Long. 41° 18' O; Altitude 11 m, referidas ao Datum WGS 84.

Em cada uma das coletas foram amostrados quatro pontos, sendo dois na porção norte e dois na porção sul da Lagoa do Vigário. A fim de verificar a influência dos bancos de aguapé nas concentrações de nutrientes e características físico-químicas da água, em cada porção da lagoa um dos pontos de amostragem foi próximo a um banco de aguapé e o outro em uma porção livre da planta. No momento da coleta a profundidade da lagoa foi medida com o auxílio de um profundímetro e foram medidas as variáveis: temperatura da água, condutividade elétrica, pH, oxigênio dissolvido (OD) e turbidez com auxílio de potenciômetros de campo. A água foi coletada em sub superfície a aproximadamente 0,3 metros diretamente em frascos de polietileno com capacidade de 1L. As amostras foram levadas ao laboratório para a determinação das concentrações de N e P em suas diferentes formas. Para tanto, amostras não filtradas foram congeladas para a determinação de N e P totais e subalíquotas foram filtradas, com o auxílio de seringas de 50 mL, em filtro GF/F e armazenadas em refrigerador para posterior determinação das concentrações de nutrientes dissolvidos (ortofosfato, nitrato, nitrito e nitrogênio amoniacal). Os filtros foram utilizados para determinação de N e P particulados.

Na fração dissolvida, o nitrogênio amoniacal ( $\text{N-NH}_4^+$ ) foi determinado pelo método colorimétrico e posterior leitura em espectrofotômetro UV/VIS de duplo feixe (Carmouze, 1994). O nitrogênio na forma de nitrato ( $\text{N-NO}_3^-$ ), nitrito ( $\text{N-NO}_2^-$ ) e o fósforo dissolvido na forma de ortofosfato ( $\text{P-PO}_4^{3-}$ ) foram determinados por analisador em fluxo (FIA). A determinação de N-particulado foi efetuada por meio de um analisador elementar CHNS/O (Perkin Elmer, modelo 2400 Series II) e o P-particulado foi determinado sob a forma de  $\text{P-PO}_4^{3-}$ , após a digestão das amostras em tubo de vidro contendo 5 mL de solução de persulfato de potássio em sistema de autoclave (Hongve, 1994), seguida de reação colorimétrica e leitura em espectrofotômetro UV/VIS de duplo feixe (Carmouze, 1994).

O N-total foi determinado sob a forma de  $\text{N-NO}_3^-$  por um analisador em fluxo (FIA), após digestão das amostras com persulfato de potássio e ácido bórico em

solução de hidróxido de sódio 0,375 N. O P-total foi determinado na forma de  $\text{P-PO}_4^{3-}$  após digestão das amostras com persulfato de potássio em autoclave com posterior adição de solução de ácido ascórbico e solução ácida de molibdato de amônio para realização de medida colorimétrica em espectrofotômetro UV/VIS de duplo feixe (Carmouze, 1994).

#### *Biomassa de E. crassipes na Lagoa do Vigário e estoque de N e P em sua biomassa*

A biomassa de Aguapé foi amostrada a partir do lançamento aleatório de três “quadrats” de 0,25 m<sup>2</sup> nas porções norte e sul da lagoa em três semanas de amostragem de cada campanha. No laboratório, as macrófitas foram lavadas sob água corrente para retirada de material inorgânico ou orgânico aderido e tiveram suas partes aérea e radicular separadas a fim de verificar possíveis diferenças na alocação de biomassa e acumulação de N e P por partes distintas do Aguapé. Estas porções foram pesadas e secas em estufa de circulação à temperatura de 60 °C até peso constante para quantificação do peso seco (PS), da biomassa de Aguapé por unidade de área (PS.m<sup>-2</sup>), assim como da contribuição das porções aérea (PSA) e radicular (PSR) para o peso seco do Aguapé através das fórmulas  $\frac{PSA}{PS}$  e  $\frac{PSR}{PS}$ , respectivamente. Posteriormente as amostras foram moídas em moinho de faca e sub-alíquotas foram separadas para a determinação N e P nas diferentes partes das plantas.

Para a determinação da concentração de P-total nas raízes (PTR) e partes aéreas (PTA), uma digestão ácida (ácido nítrico 65% e ácido fluorídrico 48%) das amostras foi realizada em microondas, neutralização com ácido bórico e posterior leitura em IPC-OES (720 ES) (Filgueiras et al., 2000). O N-total nas raízes (NTR) e partes aéreas (NTA) do Aguapé coletado foi determinado em analisador elementar Perkin Elmer 2400 (CHNS/O).

#### *Tratamento Estatístico dos dados*

Estatística descritiva como média e erro padrão foi utilizada para expressar os resultados. Os dados obtidos foram comparados através de análise de variância (ANOVA) para determinar diferenças entre as porções norte e sul da lagoa e entre os períodos seco e úmido. Os resultados significativos da ANOVA foram distinguidos com o teste de Tukey-Kramer. Em caso de variâncias desiguais, foi realizado o teste

não paramétrico Kruskal-Wallis e a posteriori de Dunn. Todos em nível de significância  $\alpha = 0,05$ .

Análise dos Componentes Principais (ACP) foi utilizada para identificar relações entre as variáveis medidas e os locais e períodos de amostragem.

## **RESULTADOS**

### *Variações meteorológicas durante os períodos seco e úmido de amostragem*

De acordo com dados obtidos pela Estação Evapotranspirométrica Leag/Uenf Lat: 21°45' Sul ; Long. 41°18' O ; Altitude 11 m, referidas ao Datum WGS 84, o volume total de chuva e a média mensal de temperatura do ar foram crescentes ao longo dos meses de coleta, caracterizando os períodos seco e úmido de amostragem (Fig 1.4 a,b). O mesmo ocorreu para os valores médios de radiação global, com exceção do mês de setembro que apresentou média semelhante ao mês de novembro (Fig. 1.4 c).

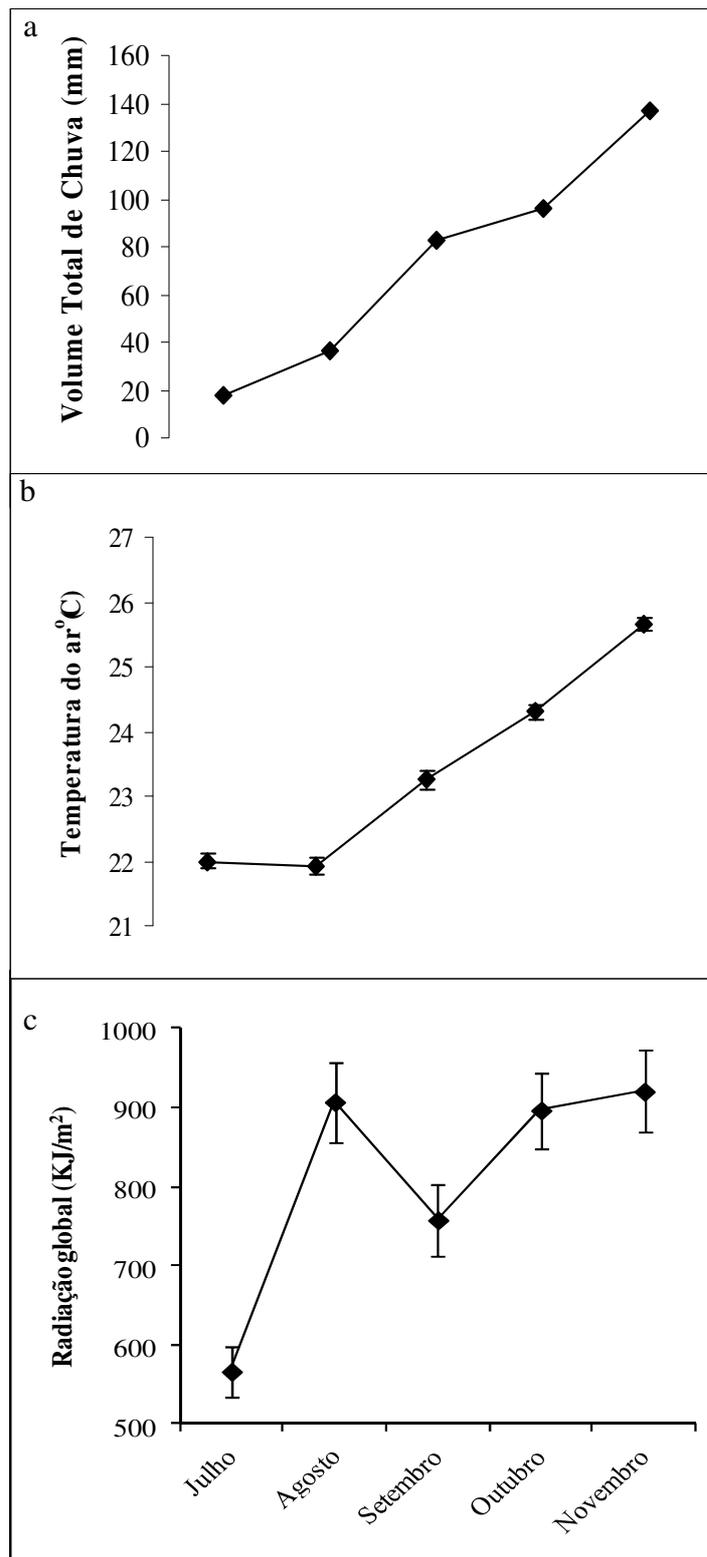


Figura 1.4 Variáveis meteorológicas durante os períodos de amostragem em 2015. a- volume total de chuvas mensal (mm) . b- média mensal da temperatura do ar (°C). c- media mensal da radiação global (KJ.m<sup>-2</sup>).

### *Variáveis físico-químicas da Lagoa do Vigário*

A princípio foram comparadas as variáveis físico-químicas das amostras coletadas próximo aos bancos de aguapé e em áreas livres dos mesmos nas porções sul e norte da lagoa e não foram encontradas diferenças estatísticas entre as mesmas ( $p > 0,05\%$ ). Sendo assim, os resultados das variáveis medidas nos dois pontos de cada lado da lagoa foram unidos a fim de comparar variações entre as porções norte e sul e entre os períodos seco e úmido de amostragem.

A lagoa possui baixa profundidade com médias de 1,1 m na porção sul e 1,2 m na porção norte e não houve variação entre as profundidades medidas nos períodos seco e úmido de amostragem. As médias de oxigênio dissolvido na Lagoa do Vigário foram predominantemente baixas durante os períodos de amostragem (Tabela 1.1, Figura 1.5), com variação dos valores absolutos entre 0 e 8,6 mg.L<sup>-1</sup>.

Ao se comparar as porções sul e norte da lagoa, no período seco foram encontradas concentrações inferiores ( $p < 0,05$ ) de oxigênio dissolvido e turbidez superior na porção sul (Tabela 1.1, Figura 1.5). Já no período úmido, além da turbidez, a porção sul apresentou valores estatisticamente superiores de pH e condutividade (Tabela 1.1).

A sazonalidade exerceu influência sobre as características da lagoa. Como esperado, os valores de temperatura foram superiores ( $p < 0,05$ ) no período úmido nas porções norte e sul e os valores de pH e turbidez amostrados na porção sul também foram superiores ( $p < 0,05$ ) no período úmido (Tabela 1.1).

Tabela 1.1 Variáveis físico-químicas medidas (média  $\pm$  dp; n=10) na água da Lagoa do Vigário. As letras diferentes indicam se ocorreu diferença estatística entre os locais e períodos de amostragem.

Porção da lagoa/Período de coleta	Temperatura (°C)	OD (mg.L <sup>-1</sup> )	pH	Condutividade ( $\mu$ S.cm <sup>-1</sup> )	Turbidez (NTU)
Sul/ Seco	23,2 $\pm$ 0,14 <sup>a</sup>	1,3 $\pm$ 0,2 <sup>a</sup>	6,9 $\pm$ 0,03 <sup>a</sup>	594 $\pm$ 7,8 <sup>a</sup>	5,7 $\pm$ 0,28 <sup>a</sup>
Norte/ Seco	23,8 $\pm$ 0,18 <sup>a</sup>	4,1 $\pm$ 0,8 <sup>b</sup>	6,8 $\pm$ 0,05 <sup>a</sup>	561 $\pm$ 7,2 <sup>ab</sup>	4,5 $\pm$ 0,18 <sup>b</sup>
Sul/Úmido	27,2 $\pm$ 0,50 <sup>b</sup>	2,9 $\pm$ 0,8 <sup>a</sup>	7,3 $\pm$ 0,06 <sup>b</sup>	600 $\pm$ 9,8 <sup>a</sup>	8,3 $\pm$ 0,38 <sup>c</sup>
Norte/ Úmido	27,6 $\pm$ 0,45 <sup>b</sup>	1,8 $\pm$ 0,7 <sup>ab</sup>	6,8 $\pm$ 0,03 <sup>a</sup>	542 $\pm$ 10 <sup>b</sup>	5,6 $\pm$ 0,24 <sup>b</sup>

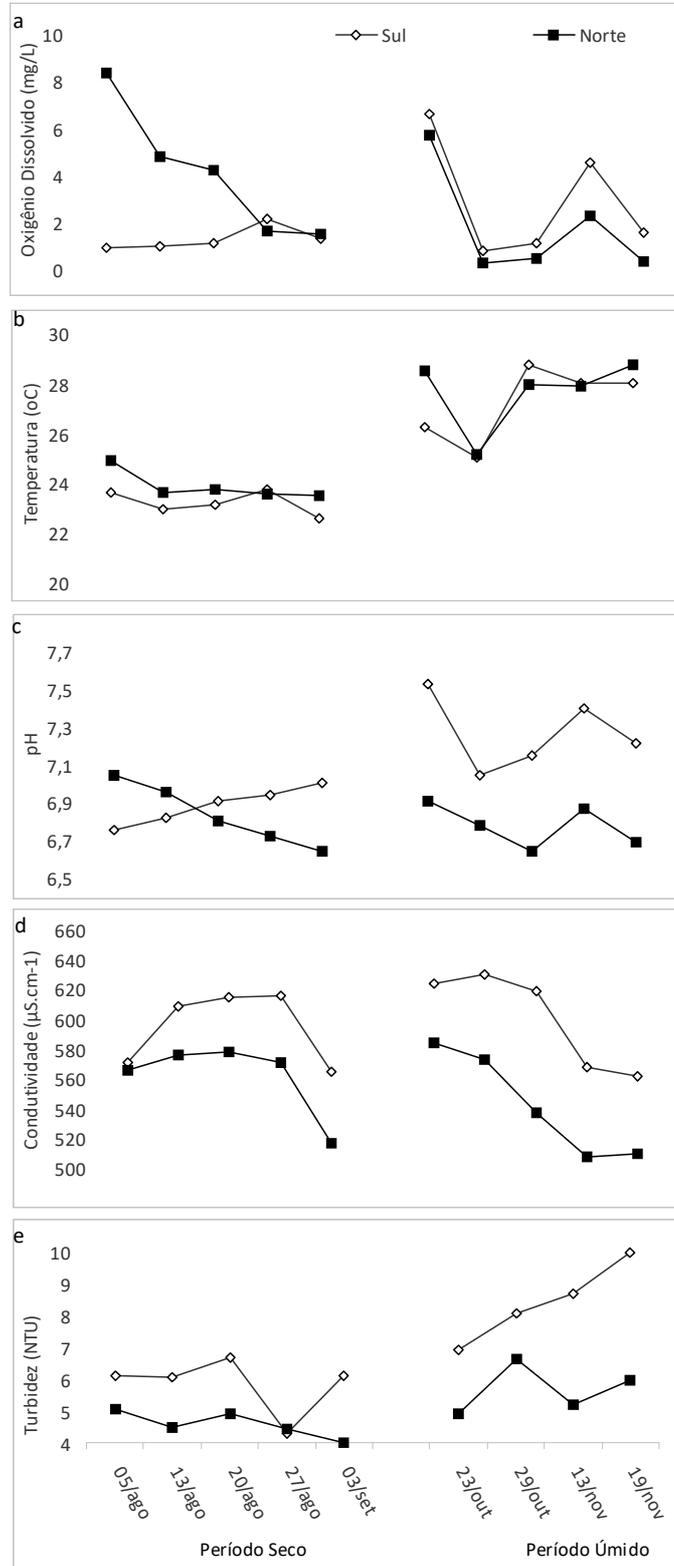


Figura 1.5 Variação das variáveis físico-químicas ao longo das semanas de amostragem no ano de 2015.

### Nutrientes dissolvidos e particulados

As concentrações de N-amoniacoal e P dissolvido na forma de  $P-PO_4^{3-}$  foram superiores ( $p < 0,05$ ) em cerca de duas vezes na porção norte da lagoa em comparação com a sul, tanto no período seco quanto no período úmido. Já as concentrações de nitrato e nitrito foram mais elevadas na porção norte apenas no período seco ( $p < 0,05$ ) (Tabelas 1.2 e 1.3, Figura 1.6).

Com a chegada do período úmido as concentrações de ortofosfato aumentaram ( $p < 0,05$ ) tanto na porção sul quanto na norte da lagoa. Tal diferença não foi encontrada em relação às concentrações de N-amoniacoal. As concentrações de nitrato e nitrito decresceram na porção norte da lagoa com a chegada do período úmido (Tabelas 1.2 e 1.3, Figura 1.6).

Na fração particulada a concentração de P não diferiu ( $p < 0,05$ ) entre as porções norte e sul e aumentou nas duas porções em cerca de 14 vezes com a chegada do período úmido. Por questões operacionais não foi possível determinar o N-particulado no período seco. No período úmido a concentração de N-particulado não diferiu entre as duas porções da lagoa (Tabela 1.3, Figura 1.6).

### Nutrientes Totais

As concentrações de N-total foram maiores na porção norte ( $p < 0,05$ ) nos dois períodos de amostragem e não diferiram entre estes (Tabela 1.2, Figura 1.6). Já em relação ao P-total, não houve diferença significativa entre as duas porções da lagoa, apesar de tendência de maiores concentrações na porção norte. No período úmido as concentrações de P-total aumentaram nas duas porções da lagoa (Tabela 1.3, Figura 1.6).

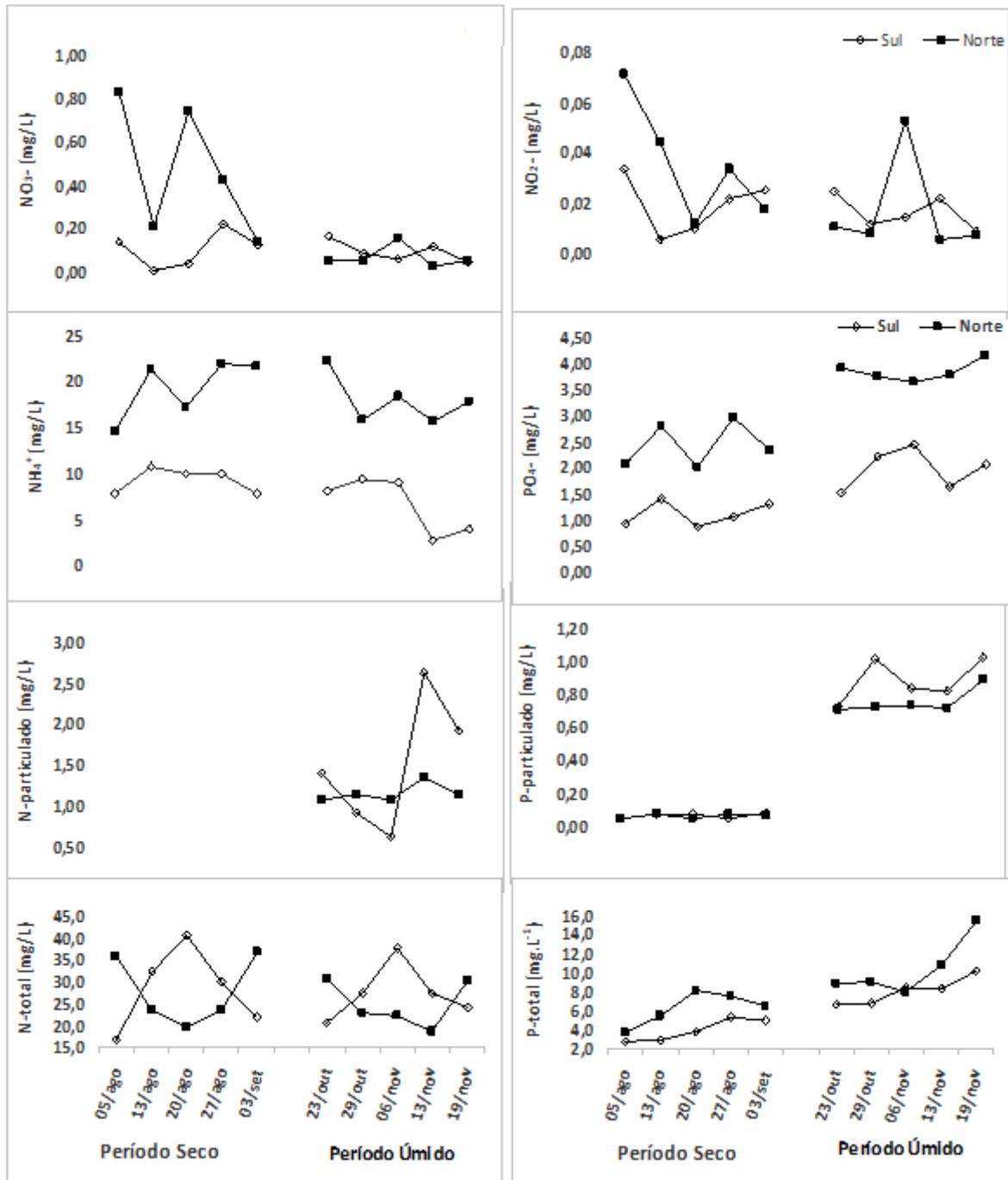


Figura 1.6 Variação das concentrações de nutrientes nitrogenados e fosfatados ao longo das semanas de amostragem no ano de 2015.

Tabela 1.2 Concentrações de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, N-particulado e N-total (média ± dp; n=10) nas porções sul e norte da Lagoa do Vigário durante os períodos seco e úmido de amostragem. As letras diferentes indicam se ocorreu diferença estatística entre os locais e períodos de amostragem.

Porção da lagoa/Período de coleta	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg.L <sup>-1</sup> )	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg.L <sup>-1</sup> )	N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg.L <sup>-1</sup> )	N-particulado (mg.L <sup>-1</sup> )	N-total (mg.L <sup>-1</sup> )
Sul/ Seco	8,87 ± 0,76 <sup>a</sup>	0,11 ± 0,03 <sup>a</sup>	0,02 ± 0,003 <sup>ac</sup>	-	19,4 ± 1,30 <sup>a</sup>
Norte/ Seco	18,36 ± 1,25 <sup>b</sup>	0,47 ± 0,13 <sup>b</sup>	0,03 ± 0,007 <sup>c</sup>	-	36,5 ± 2,27 <sup>b</sup>
Sul/Úmido	6,48 ± 0,96 <sup>a</sup>	0,09 ± 0,02 <sup>a</sup>	0,02 ± 0,002 <sup>abc</sup>	1,59 ± 0,25 <sup>a</sup>	20,3 ± 1,00 <sup>a</sup>
Norte/ Úmido	18,13 ± 1,02 <sup>b</sup>	0,07 ± 0,02 <sup>a</sup>	0,02 ± 0,002 <sup>ab</sup>	1,10 ± 0,06 <sup>a</sup>	31,8 ± 2,02 <sup>b</sup>

Tabela 1.3 Concentrações de P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, P-particulado e P-total (média ± dp; n=10) medidos nas porções sul e norte da Lagoa do Vigário durante os períodos seco e úmido de amostragem. As letras diferentes indicam se ocorreu diferença estatística entre os locais e períodos de amostragem.

Porção da lagoa/Período de coleta	P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mg.L <sup>-1</sup> )	P-particulado (mg.L <sup>-1</sup> )	P-total (mg.L <sup>-1</sup> )
Sul/ Seco	1,11 ± 0,07 <sup>a</sup>	0,06 ± 0,004 <sup>a</sup>	3,93 ± 0,35 <sup>a</sup>
Norte/ Seco	2,43 ± 0,15 <sup>b</sup>	0,05 ± 0,005 <sup>a</sup>	6,19 ± 0,65 <sup>a</sup>
Sul/Úmido	1,97 ± 0,13 <sup>c</sup>	0,88 ± 0,043 <sup>b</sup>	8,04 ± 0,63 <sup>b</sup>
Norte/ Úmido	3,84 ± 0,10 <sup>d</sup>	0,71 ± 0,028 <sup>b</sup>	10,4 ± 0,97 <sup>b</sup>

### *Análise dos Componentes Principais*

A análise de componentes principais (ACP) realizada a partir das variáveis físico-químicas da água da Lagoa do Vigário mostrou nítida distribuição de quatro agrupamentos representados pelas porções norte e sul da lagoa em cada período de amostragem. Os componentes principais 1 e 2 (CP1 e CP2) explicaram 55% da variabilidade dos dados, com 33 e 22%, respectivamente. Os pontos posicionados positivamente ao CP1 foram os de coletas realizadas no período úmido tanto na parte norte quanto na porção sul e ficaram positivamente relacionados à temperatura do ar e da água, aos nutrientes fosfatados analisados (P-particulado, P-total e P-

PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>), ao N-amoniaco, radiação, turbidez e ao pH. Já os pontos representados por coletas realizadas no período seco se alocaram negativamente ao CP1 e ficaram mais correlacionados ao N-total, N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, condutividade e OD. Já os pontos alocados positivamente ao CP2 foram os de coletas realizadas na porção norte da lagoa e estão positivamente relacionados principalmente ao N-amoniaco e ao P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, mas também ao N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, P-total, a temperatura do ar e a radiação. Já os pontos referentes a porção sul que se alocaram negativamente ao CP2 estão mais correlacionados a turbidez, pH, condutividade e P-particulado, N-total, temperatura da água e ao OD (Tabela 1.4, Figura 1.7).

Tabela 1.4 Correlação das variáveis físico-químicas (n=40) com os componentes principais.

Variável	PC 1	PC 2
pH	0.08804	-1.02940
Condutividade	-0.52823	-0.80304
Temperatura_água	1.15534	-0.17504
OD	-0.20026	-0.02069
Turbidez	0.49426	-1.04731
Temperatura_ar	1.06618	0.12847
Radiação	0.87872	0.08253
P- PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0.90673	0.75879
P_particulado	1.11753	-0.47888
P_total	1.12206	0.20848
N_amoniaco	0.11194	1.11869
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0.55087	0.38241
N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	-0.45253	0.34633
N-total	-0.20083	-0.13958

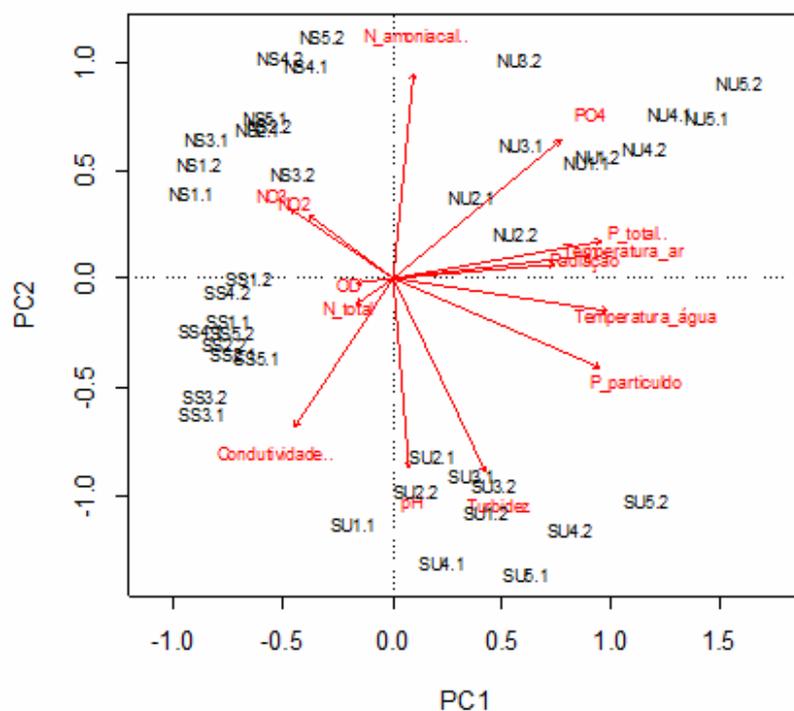


Figura 1.7 ACP das variáveis físico-químicas e limnológicas medidas nas porções norte e sul da Lagoa do Vigário nos períodos seco e úmido de amostragem. NS= porção norte no período seco, NU= porção norte no período úmido, SS= porção sul no período seco e SU= porção sul no período úmido.

### *Biomassa de E. crassipes na Lagoa do Vigário*

Biomassas médias de  $23819 \pm 894 \text{ g.m}^{-2}$  e  $1542 \pm 23,8 \text{ g.m}^{-2}$ , úmida e seca de Aguapé foram encontradas, respectivamente, sendo o peso seco correspondente a cerca de 6,5 % da biomassa total do Aguapé.

A biomassa de Aguapé em peso seco foi estatisticamente superior na porção sul, em relação à porção norte, nos dois períodos de amostragem, (40,1% maior no período seco e 35,2% maior no período úmido) e aumentou nas duas porções da lagoa com a chegada do período úmido (Tabela 1.5).

Em média a contribuição das porções aérea para o peso seco do Aguapé foi de 72%, e não foram encontradas diferenças significativas na distribuição de biomassa entre estas partes da planta nas comparações entre as porções norte e sul da lagoa e entre os períodos seco e úmido de amostragem (Tabela 1.5).

Tabela 1.5 Biomassa de *E. crassipes* em peso seco ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ) e das proporções de biomassa seca das porções radicular  $\frac{PSR}{PS}$  e aérea  $\frac{PSA}{PS}$  (média  $\pm$  dp; n=9) nas porções sul e norte da Lagoa do Vigário durante os períodos seco e úmido de amostragem.

Porção da lagoa/Período de coleta	PS ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ )	$\frac{PSR}{PS}$	$\frac{PSA}{PS}$
Sul/ Seco	1564 $\pm$ 141 <sup>a</sup>	0,321 $\pm$ 0,031 <sup>a</sup>	0,679 $\pm$ 0,031 <sup>b</sup>
Norte/ Seco	1110 $\pm$ 91,5 <sup>b</sup>	0,269 $\pm$ 0,017 <sup>a</sup>	0,731 $\pm$ 0,017 <sup>b</sup>
Sul/Úmido	2008 $\pm$ 59,4 <sup>c</sup>	0,262 $\pm$ 0,009 <sup>a</sup>	0,738 $\pm$ 0,009 <sup>b</sup>
Norte/ Úmido	1485 $\pm$ 72,0 <sup>d</sup>	0,2661 $\pm$ 0,014 <sup>a</sup>	0,739 $\pm$ 0,014 <sup>b</sup>

#### *Estoque de P e N na biomassa de Aguapé*

As concentrações médias de P encontradas nos Aguapés da porção norte foram de 5,57 e 4,93  $\text{g}\cdot\text{Kg}^{-1}$ , nos períodos seco e úmido, respectivamente. Já na porção sul as concentrações foram de 5,10 e 4,34  $\text{g}\cdot\text{Kg}^{-1}$ . Não houve diferença entre as concentrações de P nos Aguapés coletados nas duas porções da lagoa nos dois períodos de amostragem ( $p < 0,05$ ). No período úmido houve uma queda na concentração de P dos Aguapés em comparação ao período seco, entretanto só foi encontrada diferença estatística na porção sul (Tabela 1.6).

Quando foi calculado o estoque de P por área coberta por Aguapé, não verificou-se diferença estatística ( $p < 0,05$ ) entre as duas partes da lagoa e os períodos de amostragem (Tabela 1.5), apesar das diferenças encontradas em relação ao peso seco do Aguapé (Tabela 1.6).

Em relação ao estoque de P pelas diferentes partes da planta, ficou evidente a diferença entre a alocação deste nutriente nas porções norte e sul da lagoa. No sul a porção radicular deteve cerca de 63% do P nos dois períodos de amostragem e portanto a proporção de P na porção aérea em relação ao total foi inferior a encontrada no norte onde as proporções de P nas porções radicular e aérea foram próximas a 50% (Tabela 1.6).

A concentração de N na biomassa de Aguapé analisada foi cerca de três vezes superior a concentração de P. A concentração média de N encontrada nos Aguapés coletados na porção norte foi de 16,59 e 16,28  $\text{g}\cdot\text{Kg}^{-1}$  nos períodos seco e úmido, respectivamente. Já na porção sul as concentrações foram de 15,55 e 15,46

g.Kg<sup>-1</sup> nos períodos seco e úmido. As concentrações de N detectadas não diferiram entre as porções da lagoa e entre os períodos de amostragem.

Já em relação ao estoque de N por área coberta por Aguapé, verificou-se que os maiores estoques de N ocorreram na porção Sul nos dois períodos de amostragem (P<0,05) e que no período úmido houve um aumento significativo dos valores (P<0,05) nas duas porções da lagoa (Tabela 1.6).

Em relação a proporção de N nas diferentes porções do Aguapé, verificou-se que a porção radicular aloca entre 54 e 56% do N e não houve diferença entre as proporções de N nas porções radicular e aérea dos Aguapés coletados nas partes norte e sul da lagoa e nos diferentes períodos de amostragem (Tabela 1.6).

Tabela 1.6 Estoque de P e N na biomassa de *E. crassipes* (g.Kg<sup>-1</sup>), estoque de P e N em *E. crassipes* por unidade de área (g.m<sup>-2</sup>) e proporção de P e N nas porções aérea e radicular de *E. crassipes* nas porções norte e sul da Lagoa do Vigário e nos períodos seco e úmido de amostragem (média ± dp; n=9).

Porção da lagoa/Período de coleta	[P] na biomassa de <i>E. crassipes</i> (g.Kg <sup>-1</sup> )	[P] por área de <i>E. crassipes</i> (g.m <sup>-2</sup> )	Proporção de P na porção aérea: $\frac{PTA}{PT}$	Proporção de P na porção radicular: $\frac{PTR}{PT}$
Sul/ Seco	5,10 ± 0,21 <sup>b</sup>	7,95 ± 0,80 <sup>a</sup>	0,38 ± 0,01 <sup>a</sup>	0,62 ± 0,01 <sup>a</sup>
Norte/ Seco	5,57 ± 0,17 <sup>b</sup>	6,07 ± 0,35 <sup>a</sup>	0,50 ± 0,01 <sup>b</sup>	0,50 ± 0,01 <sup>b</sup>
Sul/Úmido	4,34 ± 0,16 <sup>a</sup>	8,72 ± 0,43 <sup>a</sup>	0,36 ± 0,01 <sup>a</sup>	0,63 ± 0,01 <sup>a</sup>
Norte/ Úmido	4,93 ± 0,13 <sup>a b</sup>	7,33 ± 0,43 <sup>a</sup>	0,47 ± 0,01 <sup>b</sup>	0,53 ± 0,01 <sup>b</sup>
Porção da lagoa/Período de coleta	[N] na biomassa de <i>E. crassipes</i> (g.Kg <sup>-1</sup> )	[N] por área de <i>E. crassipes</i> (g.m <sup>-2</sup> )	Proporção de N na porção aérea: $\frac{NTA}{NT}$	Proporção de N na porção radicular: $\frac{NTR}{NT}$
Sul/ Seco	15,5 ± 0,40 <sup>a</sup>	24,1 ± 2,11 <sup>a</sup>	0,46 ± 0,01 <sup>a</sup>	0,54 ± 0,01 <sup>a</sup>
Norte/ Seco	16,6 ± 0,71 <sup>a</sup>	18,3 ± 1,55 <sup>b</sup>	0,46 ± 0,01 <sup>a</sup>	0,54 ± 0,01 <sup>a</sup>
Sul/Úmido	15,5 ± 0,32 <sup>a</sup>	31,1 ± 1,14 <sup>c</sup>	0,44 ± 0,01 <sup>a</sup>	0,56 ± 0,01 <sup>a</sup>
Norte/ Úmido	16,3 ± 0,23 <sup>a</sup>	24,1 ± 1,10 <sup>d</sup>	0,45 ± 0,01 <sup>a</sup>	0,54 ± 0,01 <sup>a</sup>

## DISCUSSÃO

### *Qualidade da Água da Lagoa do Vigário e a influência dos bancos de Aguapé*

O estado trófico de um ecossistema aquático pode ser determinado por variáveis como sua concentração de nutrientes (P-total e N-total), além da transparência da água e concentração de clorofila-a (Smith et al., 1999). Tendo como base os resultados encontrados neste estudo, as duas porções da Lagoa do Vigário podem ser classificadas como hipereutróficas por apresentarem concentrações de N-total e P-total superiores a  $0,35 \text{ mg.L}^{-1}$  e  $0,01 \text{ mg.L}^{-1}$ , respectivamente (Smith et al., 1999). Além disso, os valores de OD e P-total das porções norte e sul e de N-amoniaco da parte norte enquadram a lagoa na Classe 4 da classificação de corpos hídricos de água doce estabelecida pela resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente 357/ 2005, sendo suas águas impróprias para contato primário ou secundário e propícias apenas à navegação e à harmonia paisagística.

Apesar de não ter sido possível determinar as concentrações de N-particulado do período seco, pode-se notar que as concentrações de nutrientes totais são superiores a soma das formas dissolvidas e particuladas analisadas, tendo sido encontradas baixas concentrações de N e P particulados. Isso demonstra a elevada concentração de nutrientes orgânicos dissolvidos, não analisados diretamente no presente estudo. Tais nutrientes podem ser representados por proteínas, aminoácidos, detergentes e uréia liberados em abundância através do lançamento de esgoto *in natura* (Esteves, 2011) e com sua mineralização limitada pela escassez de oxigênio na água da Lagoa do Vigário. Destacam-se também as elevadas concentrações de amônio, especialmente na porção norte. Sabe-se que em corpos hídricos rasos e lênticos com déficit de OD se espera encontrar taxas de amonificação superiores as taxas de nitrificação e, portanto maiores concentrações de  $\text{N-NH}_4^+$  (Jampeetong & Brix, 2009). Além disso, a liberação de grande quantidade de efluente doméstico contribui para a elevada concentração de N-amoniaco, devido à hidrólise da uréia na água (Udert et al., 2003).

Apesar das mais elevadas concentrações de  $\text{N-NH}_4^+$  e  $\text{P-PO}_4^{3-}$  na porção norte da lagoa, tal condição aparentemente não estimulou o maior crescimento do Aguapé já que foram encontradas maiores biomassas da planta na porção sul. Apesar do crescimento do Aguapé ser favorecido em águas enriquecidas (Gopal,

1987), após as condições ótimas de crescimento, a planta tende a parar de responder ao acréscimo de nutrientes. Reddy et al. (1990) indicaram o valor ótimo de  $1,06 \text{ mg.L}^{-1}$  de fósforo total já que valores superiores a este não promoveram o aumento da biomassa de Aguapé. Neste caso, as concentrações ideais de nitrogênio total ficariam em torno de 2,6 e  $5,3 \text{ mg.L}^{-1}$ , tendo em vista que trabalhos já indicaram razões  $\frac{N}{P}$  entre 2,5 e 5 como ideais para a maior produtividade do Aguapé (Sato & Kondo, 1981; Reddy & Tucker, 1983). Mesmo as proporções de  $\frac{N}{P}$  encontradas no presente estudo tendo sido próximas as ideais, as concentrações de N e P registradas foram muito superiores aos valores ótimos e portanto as variações na concentração de nutrientes encontradas entre as diferentes partes da lagoa não provocaram variações no crescimento da planta.

Com relação a influência que os bancos de Aguapé estão exercendo sobre a qualidade da água da Lagoa do Vigário, não houve diferença entre as variáveis físico-químicas das amostras coletadas sob ou livre de bancos de Aguapé. Isso provavelmente ocorreu devido a tais bancos flutuantes migrarem constantemente sobre toda a área da lagoa a mercê da direção e intensidade dos ventos. Este resultado indica uma homogeneidade da água o que será favorável em estratégias de manejo do Aguapé considerando que os resultados das mesmas poderão influenciar na qualidade da água de toda a lagoa.

Entretanto, a maior biomassa de Aguapé na porção sul da lagoa foi coincidente com concentrações significativamente menores ( $p < 0,05$ ) de ortofosfato e N-amoniaco na água, que são as formas mais assimiláveis de P e N por produtores primários (Peterson et al., 2001; Filho et al., 2012). Este fato pode indicar a atuação positiva dos bancos de Aguapé como compartimentos estocadores de nutrientes. Por outro lado, a porção sul também apresentou maiores valores de turbidez correlacionados ao pH, a condutividade e ao OD. Um estudo realizado no lago Chivero (Zimbabwe) ao comparar regiões com diferentes gradientes de Aguapé verificou que a presença da macrófita se correlacionava com menores valores de N-amoniaco e fosfato, mas também ocasionava maiores valores de turbidez e condutividade, devido ao acúmulo de material orgânico no entorno de suas raízes e a atividade decompositora bacteriana (Rommens et al., 2003). Outra possível razão para a porção norte apresentar águas mais enriquecidas em nutrientes pode ser o

fato de possuir um maior perímetro em relação a porção sul e portanto maior área marginal sujeita a poluição antrópica.

No período úmido ficou evidente um agravamento das condições de eutrofização que culminou em valores ainda maiores de turbidez na porção sul, maior biomassa do Aguapé e maiores concentrações dos nutrientes fosfatados determinados em toda a lagoa. Sabe-se que o aumento da temperatura da água pode influenciar uma série de fatores, como por exemplo, acelerar o metabolismo dos organismos incluindo tanto as taxas de fotossíntese e respiração quanto as taxas de decomposição da matéria orgânica (Esteves, 2011) e as temperaturas registradas no período úmido de amostragem se aproximam mais da temperatura ótima de crescimento do Aguapé (Wilson et al., 2005). Sendo assim, os maiores valores de turbidez e nutrientes no período úmido podem ter sido gerados pelo aporte de materiais de origem alóctone trazidos pela água das chuvas, assim como pela produção autóctone.

#### *Estoque de Biomassa e Nutrientes no Aguapé*

O estudo da distribuição da biomassa entre as partes do Aguapé mostrou um maior investimento em biomassa do Aguapé na porção aérea. Esse resultado condiz com a elevada disponibilidade de nutrientes na Lagoa do Vigário, já que em ambientes onde estes são abundantes espera-se um maior crescimento aéreo para a captação de carbono (Xi et al., 2004).

Com relação ao estoque de N e P por Aguapé, os valores determinados estão de acordo com os trabalhos já realizados ao redor do mundo que apresentam concentrações entre 1,5 a 51 g.Kg<sup>-1</sup> de N e 0,71 e 8,5 g.Kg<sup>-1</sup> de P (Tabela 1.7). Essa ampla faixa confirma que a habilidade do Aguapé em acumular tais nutrientes pode ser influenciada por variados fatores, tais como, diferentes condições de cultivo ou do ambiente de origem, a disponibilidade desses nutrientes na água (Xie, et al. 2004; Polomski et al., 2009; ZhiYong, et al., 2010), variações sazonais (Martins et al., 2011), assim como as partes da planta analisadas (Polomski et al., 2009; ZhiYong, et al., 2010; Martins et al., 2011) (Tabela 1.7).

Tabela 1.7 Comparação de estoques de N e P por *E. crassipes* sob diferentes condições de crescimento em trabalhos disponíveis na literatura.

Fonte	Local de amostragem	[N ] na água (mg.L-1)	[P] na água (mg.L-1)	[N] na biomassa de <i>E. crassipes</i> (g.Kg <sup>-1</sup> )	[P] na biomassa de <i>E. crassipes</i> (g.Kg <sup>-1</sup> )
Martins et al., 2011	Rio Apodi -RN- Brasil (Agosto - Outubro - Dezembro de 2008- Fevereiro de 2009)	-	-	Porção aérea: 44 - 32 - 21 - 15 Porção radicular: 20 - 18- 19 -14	Porção aérea: 4,5 - 6,4 - 5,6 - 4,2 Porção radicular: 2,5 - 3,0 - 3,6 - 2,3
Lata & Dubey, 2010	Corpos d'água de Chhattisgard- Índia	-	-	51	2,2
ZhiYong, et al., 2010	Cultivo em águas eutróficas- China	2,1 - 20	0,14-1,43	Porção aérea: 24 - 34 Porção radicular: 11 - 18	Porção aérea: 3,5 - 6,9 Porção radicular: 6,0 - 8,5
Polomski et al., 2009	Cultivo em tanques- EUA	0,4 – 37	0,07 - 6,8	Porção aérea: 1,5 - 18 Porção radicular: 11 - 13	Porção aérea: 1,5 -2,5 Porção radicular: 1,3 - 1,7
Xie, et al. 2004 a	Folhas verdes do Lago Donghu – China- Folhas verdes de cultivo - Folhas marrons de cultivo	-	-	50 - 39 - 17	3,8 - 2,6 - 0,7
Xie, et al. 2004 b	Lago Donghu, China	5 – 10	0,5 - 1	8,4 - 9,2	1,2 - 1,3
Presente estudo	Lagoa do Vigário, Brasil (período seco de 2015) Porção sul - Porção norte	19 – 36	3,9 - 6,2	Porção aérea: 15- 16 Porção radicular: 17- 19	Porção aérea: 4,2 - 5,6 Porção radicular: 6,9- 5,6
Presente estudo	Lagoa do Vigário, Brasil (período úmido de 2015) Porção sul - Porção norte	20 – 32	6,9 - 10	Porção aérea: 14 - 15 Porção radicular: 18 - 18	Porção aérea: 3,6 - 4,7 Porção radicular: 6,4 - 5,4

O estoque de N e P na biomassa de Aguapé não variou entre as plantas coletadas nas porções norte e sul da Lagoa do Vigário, apesar das diferenças nas disponibilidades de nutrientes na água entre essas porções da Lagoa. Sabe-se que o Aguapé pode continuar a assimilar nutrientes em resposta ao aumento da disponibilidade destes no meio, mas isso ocorre até um limite de saturação (Reddy et al., 1990; Petruccio & Esteves, 1999). Isso corrobora, por exemplo, as concentrações de N e P nas folhas e raízes do Aguapé no presente estudo terem sido superiores as encontradas por Xie, et al. (2004 b) que coletou Aguapé no Lago Donghu, China, menos eutrofizado que a Lagoa do Vigário, e não terem variado entre as partes sul e norte uma vez que as plantas já teriam alcançado o limite de saturação de absorção de tais nutrientes (Tabela 1.7).

Por outro lado, ocorreu uma diminuição no estoque de P pela biomassa do Aguapé da porção sul no período úmido de amostragem, indicando possível perda desse nutriente. Além disso, quando comparados os estoques de P em Aguapé por unidade de área ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ), não foram verificadas diferenças significativas entre os períodos seco e úmido de amostragem, apesar da maior biomassa de Aguapé ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ) encontrada no período úmido. Tais resultados podem indicar que o Aguapé da porção sul estava possivelmente perdendo P por senescência no período úmido. Tal estágio de decomposição provavelmente é inicial já que o P tende a ser perdido antes do N (Gopal, 1987).

Verificou-se ainda, que diferente do que ocorre na porção norte onde a alocação de N e P entre as porções radicular e aérea é semelhante, na porção sul as raízes detiveram as maiores concentrações de P. Esse resultado corrobora a possibilidade de perda de P por senescência das folhas da porção sul. Sabe-se que a velocidade de decomposição do Aguapé é maior nas folhas, seguidas pelos pecíolos e por último as raízes (Balasubramanian et al., 2012). Além disso, durante o crescimento vertical de *E. crassipes* as folhas mais velhas e mais próximas da água sofrem com a perda de flutuabilidade e entram em senescência ainda associadas a planta e próximo das raízes o que permite o processo de retranslocação dos seus nutrientes para as raízes e reciclagem dos mesmos (Center & Van, 1989).

Tais resultados confirmam que apesar do evidente papel fitorremediador exercido pelos bancos de Aguapé na alocação de nutrientes da Lagoa do Vigário, tal habilidade está sendo desperdiçada pela falta de manejo da biomassa do Aguapé

que ao ficar retida na lagoa entra em estágio de decomposição com retorno dos nutrientes para o sistema.

## CONCLUSÕES

A partir do presente estudo, foi possível atualizar os dados relacionados ao estado de eutrofização da Lagoa do Vigário e confirmar que esta se encontra hipereutrofizada em suas duas porções e tem suas águas impróprias para atividades que ainda ocorrem neste ecossistema, tais como pesca e recreação.

O agravamento das condições de eutrofização e aumento da biomassa do Aguapé no período úmido evidenciaram a importância da temperatura para seu crescimento. Em contrapartida, as concentrações de nutrientes por ultrapassarem os valores ótimos não se mostraram determinantes para variações no crescimento do Aguapé.

A partir de informações sobre a qualidade da água e da variação de biomassa e alocação de nutrientes por Aguapé na Lagoa Vigário foi possível confirmar que apesar do evidente papel fitorremediador exercido pelos bancos de Aguapé na alocação de nutrientes da Lagoa do Vigário, tal habilidade está sendo desperdiçada pela falta de manejo da biomassa desta planta que ao ficar retida na lagoa entra em estágio de decomposição com retorno dos nutrientes para o sistema. Tais constatações são escassas em estudos *in situ* e poderão subsidiar futuras ações para o manejo do Aguapé para fins de fitorremediação da Lagoa do Vigário e outros ecossistemas eutrofizados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agunbiade, F. O., Olu-Owolbi, B. I., Odebowale, K. O. (2009) Phytoremediation potential of *Eichhornia crassipes* in metal-contaminated coastal water. *Bioresource Technology*, 100:452-4526.
- Alade, G. A., Ojoawo, S. O. (2009) Purification of domestic sewage by water-hyacinth (*Eichhornia crassipes*). *International Journal of Environmental Technology and Management*, 10:286-294.
- Alvarado, S., Guédez, M., Lué-Merú, M. P., Nelson, G., Alvaro, A., Jesús, A. C., Gyula, Z. (2008) Arsenic removal from waters by bioremediation with the

- aquatic plants Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*) and Lesser Duckweed (*Lemna minor*). Bioresource Technology, 99:8436-8440.
- Ayyasamy, P. M., Rajakumarb, S., Sathishkumarc, M., Swaminathanc, K., Shanthid , K., Lakshmanaperumalsamy, P., Leea, S. (2009) Nitrate removal from synthetic medium and groundwater with aquatic macrophytes. Desalination, 242:286-296.
- Balasubramanian D., Arunachalam, K., Das, A. K., Arunachalam, A. (2012) Decomposition and nutrient release of *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms. Under different trophic conditions in wetlands of eastern Himalayan foothills. Ecological Engineering, 44: 111-122.
- Barnes, R. S. K., Mann, K. H. (1991) Fundamentals of Aquatic Ecology. Blackwell Science.
- Basseres, A., Pietrasanta, Y. (1991) Mechanisms for the purification of effluents with high nitrogen content by a plant cover of water hyacinths (*Eichhornia crassipes*), Wat. Sci. Tech., 24:229-241.
- Bianchini, I., Jr. (2003) Modelos de crescimento e decomposição de macrófitas aquáticas. Em: Thomaz, S. M., Bini, L. M. (eds), Ecologia e manejo de macrófitas aquáticas. Eduem, Maringa, 85-126.
- Billore, S. K., Bharadia, R., Kumar, A. (1998) Potential removal of particulate matter and nitrogen through roots of water hyacinth in a tropical natural wetland. Current Science, 74:154-156.
- Bolenz, S., Omran, H., Gierschner, K. (1990) Treatments of water hyacinth tissue to obtain useful products. Biological Wastes.
- Boyd, C. E., Vickers, D. H. (1971) Variation in the Elemental Content of *Eichhornia crassipes*. Hydrobiologia, 38:409-414.
- Braga, B., Hespanhol, I., Conejo, J. G. L., Barros, M. T. L., Veras Júnior, M. S., Porto, M. F. do A., Nucci, N. L. R., Juliano, N. M. A., Eiger, S. (2002) Introdução à engenharia ambiental. São Paulo : Pearson Prentice Hall, 305.
- Carignan, R., Kalff, J. (1980) Phosphorus Sources for Aquatic Weeds: Water or Sediments?. Science, 207:987-989.
- Carmouze, J. P. (1994) Metabolismos dos ecossistemas aquáticos: fundamentos teóricos, métodos de estudo e análises químicas. 1ª ed. São Paulo: Edgard Blucher/Fapesp, p.254.

- Center, T. D., Van, T. K. (1989) Alteration of Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes* (Mart. Solms) Leaf Dynamics and Phytochemistry by Insect Damage and Plant Density. *Aquatic Botany*, 35:181-195.
- CETESB -Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. (2009) Significado Ambiental e Sanitário das Variáveis de Qualidade das Águas e dos Sedimentos e Metodologias Analíticas e de Amostragem.
- CONAMA (2005) Conselho Nacional do Meio Ambiente - Resolução Conama número 357, de 17 de março de 2005, páginas: 58-63. Disponível em: [www.mma.conama.gov.br/conama](http://www.mma.conama.gov.br/conama).
- Cooke, G. D., Welch, E. B., Peterson, S. A., Nichols, S. A. (2005) Restoration and Management of Lakes and Reservoirs. 3ª Edição, CRC Press, Boca Raton.
- Costa, C. A., Schneider, I. A. H., Rubio, J. (2000) Plantas Aquáticas Secas: Uma Alternativa Moderna para Remoção de Metais Pesados de Efluentes Industriais. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, 5(1-2):19-24.
- Cronin, G., Jr, W. M. L., Schiehsler, M. A. (2006) Influence of freshwater macrophytes on the littoral ecosystem structure and function of a young Colorado reservoir. *Aquatic Botany*, 85:37-43.
- Dâmaso, D. P. O. (2008) Recolha e processamento de plantas aquáticas com vista à remoção de nutrientes. (mestrado) Engenharia do Ambiente. Universidade de Aveiro.
- Derisio, J. K. (2007) Introdução ao Controle de Poluição Ambiental. 3ª ed. São Paulo: Signus Editora.
- Dhote, S. (2007) Role of Macrophytes in improving water quality of an aquatic ecosystem. *J. Appl. Sci. Environ. Manage.*, 11(4)133-135.
- Diniz, C. R., Ceballos, B. S. O., Barbosa, J. E. L., Koning, A. (2005) Uso de macrófitas aquáticas como solução ecológica para melhoria da qualidade de água. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 9:226-230.
- DRZ Geotecnologia e Consultoria (2013) Plano Municipal de Saneamento Básico. Plano regional de saneamento com base municipalizada nas Modalidades água, esgoto e drenagem urbana. Produto 4. Diagnóstico Setorial. Campos dos Goytacazes- RJ.
- Esteves, F. A. (2011) Fundamentos de Limnologia. 3ª ed. Rio de Janeiro: Interciência.

- FIDERJ - Fundação Instituto de Desenvolvimento Econômico e Social. Indicadores climatológicos do estado do Rio de Janeiro. Série SIPE. Rio de Janeiro, 1978, 155p.
- Filgueiras, A. V., Capelo, J. L., Lavilla, I., Bendicho, C. (2000) Comparison of ultrasound-assisted extraction and microwave-assisted digestion for determination of magnesium, manganese and zinc in plant samples by flame atomic absorption spectrometry. *Talanta*, 53: 433-441.
- Filho, F. J., Moura, M. C. S., Marins, R. V. (2012) Fracionamento Geoquímico do fósforo em água e sedimentos do rio Corrente, Bacia hidrográfica do Paranaíba/PI. *Revista Virtual de Química*, 4:623-640.
- Fox, L. J. (2009) Phytoremediation of nutrient polluted stormwater runoff: Water hyacinth as a model plant. PhD Thesis, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands, 103 pp.
- Gopal, B. (1987) Water hyacinth. Elsevier, Amsterdam.
- Gossett, D. R., Jr., W. E. N. (1971) Relationship between Nutrient Availability and Content of Nitrogen and Phosphorus in Tissues of the Aquatic Macrophyte, *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms. *Hydrobiologia*, 38:15-28.
- Greco, M. K. B., Freitas, J. R. (2002) On two methods to estimate production of *Eichhornia crassipes* in the eutrophic Pampulha reservoir (MG, Brazil), *Braz. J. Biol.*, 62(3): 463-471.
- Hongve, D. (1994) Nutrient metabolism (C, N, P, and Si) in the trophogenic zone of a meromictic lake. *Hydrobiologia*, 277: 17-39.
- Horne, A. J., Goldman, C. R. (1994) *Limnology*. 2ed. McGraw-Hill Science/Engineering.
- Jampeetong, A., Brix, H. (2009) Effects of NH<sub>4</sub><sup>+</sup> concentration on growth, morphology and NH<sub>4</sub><sup>+</sup> uptake kinetics of *Salvinia natans*. *Ecological engineering*, 35: 695-702.
- Jayaweera, M.W., Kasturiarachchi, J.C. (2004) Removal of nitrogen and phosphorus from industrial wastewaters by phytoremediation using water hyacinth (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms). *Water Sci. Technol.*, 50: 217-225.
- Junior, A. C. G., Selzlein, C., Nacke, H. (2009) Uso de biomassa seca de Aguapé (*Eichhornia crassipes*) visando à remoção de metais pesados de soluções contaminadas. *Acta. Scientiarum Technology*, 31(1):103-108.

- Kahan, F. F. A., Ansari, A. A. (2005) Eutrophication: An Ecological Vision. *The Botanical Review*, 71(4):449-482.
- Klapper, H. (2003) Technologies for lake restoration. *J. Limnol.*, 62:73-90.
- Kobayashi, J. T., Thomaz, S. M., Pelicice, F. M. (2008) Phosphorus as a limiting factor for *Eichhornia crassipes* growth in the upper Paraná River floodplain. *Wetlands*, 28(4):905-913.
- Lannes, L. S. (2002) Hidroquímica do sistema alagado urbano Vigário-Taquaruçu, Campos dos Goytacazes, RJ. (Mestrado) – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, RJ.
- Lata, N., Dubey, V. (2010) *Eichhornia crassipes* a Suitable Economic Feed: The Word's Worts Aquatic Weed. *Journal of Food Technology*, 8(3):102-105.
- Loan, N. T., Phuong, N. M., Anh, N. T. N. (2014) The role of aquatic plants and microorganisms in domestic wastewater treatment. *Environmental Engineering and Management Journal*, 13:2031-2038.
- Lorber, M. N., Mishoe, J. W., Reddy, P. R. (1984) Modelling and analysis of waterhyacinth biomass. *Ecological Modelling*, 24:61-77.
- Madsen, J. D., Chambers, P. A., James, W. F., Koch, E. W., Westlak, D. F. (2001) The interaction between water movement, sediment dynamics and submersed macrophytes. *Hydrobiologia*, 444:71-84.
- Mahujchariyawong, J., Ikeda, S. (2001) Modelling of environmental phytoremediation in eutrophic river - the case of water hyacinth harvest in Tha-chin River, Thailand. *Ecological Modelling*, 142:121-134.
- Martins, D. F. F., Moura, M. F. V., Loiola, M. I. B., Souza, L. Di., Barbosa, K. M. B., Silva, Medeiros, J. F. (2011) Temporal and physiological influence of the absorption of nutrients and toxic elements by *Eichhornia crassipes*. *J. Environ. Monit.*, 13:274-279.
- Meerhoff, M., Mazzeo, N., Moss, B., Rodríguez-Gallego, L. (2003) The structuring role of free-floating versus submerged plants in a subtropical shallow lake. *Aquatic Ecology*, 37:377-391.
- Melignani, E., de Cabo, L. I., Faggi, A. M. (2015) Copper uptake by *Eichhornia crassipes* exposed at high level concentrations. *Environmental Science and Pollution Research*, 22:8307-8315.
- Mishima, D., Kuniki, M., Sei, K., Soda, S., Ike, M., Fujita, M. (2008) Ethanol production from candidate energy crops: water hyacinth (*Eichhornia*

- crassipes*) and water lettuce (*Pistia stratiotes*). Bioresour Technol, 99:2495-2500.
- Nahlik, A. M., Mitsch, W. J. (2006) Tropical treatment wetlands dominated by free-floating macrophytes for water quality improvement in Costa Rica. Ecological Engineering, 28: 246-257.
- Nath, K. J., Rao, S. V. R., Nair, S., Gilman, R. H., Mullick, D. (1984) Low cost waste water treatment with water hyacinth. Proceedings of the international conference on water hyacinth pp. 655-663.
- Nowlin, W. H., Evarists, J. L., Vanni, M. J. (2005) Release rates and potential fates of nitrogen and phosphorus from sediments in a eutrophic reservoir. Freshwater Biology, 50:301-322.
- Ochekwu, E. B., Madagwa, B. (2013) Phytoremediation potentials of water hyacinth (*Eichhornia crassipes* (Mart) Solms) in crude oil polluted water. J. Appl. Sci. Environ. Manage., 17:503-507.
- Oliveira, J. F. (2004) Qualidade de Água para Consumo Humano. Lidel, 259-276; 335-345.
- Palma-Silva P. C., Albertoni, E. F., Trindade, C. R. T., Furlanetto, L. M., Acosta, M. C. (2012) Uso de *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms para Fitorremediação de Ambientes Eutrofizados Subtropicais no Sul do Brasil. Perspectiva, Erechim, 36:73-81.
- Patel, S. (2012) Threats, management and envisaged utilization of aquatic weed *Eichhornia crassipes*: an overview. Rev. Environ. Sci. Biotechnol., 11:249-259.
- Perazza, M. C. D., Pereira, D. N., Martins, M. T. (1981) O Aguapé: meios de controle e possibilidades de utilização. Revista DAE, 18-25.
- Peterson, B.J., Wollheim, W. M., Mulholland, P.J., Webster, J.R., Meyer, J.L., Tank, J.L., Marti, E., Bowden, W.B., Valett, H.M., Hershey, A. E., McDowell, W. H., Doods, W. K., Halminton, S. K., Gregory, S., Morall, D. D. (2001) Control of nitrogen export from watersheds by Headwater Streams. Science, 292: 86-90.
- Peterson, S.A. (1982) Lake restoration by sediment removal. Water Research Bulletin, 18:423-435.
- Petrucio, M. M., Esteves, F. A. (1999) Uptake rates of Nitrogen and Phosphorus in The Water by *Eichhornia crassipes* and *Salvinia auriculata*, Rev. Brasil. Biol., 60(2):229-236.

- Pistori, R. E. T. (2009) Crescimento das macrófitas aquáticas flutuantes *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms, *Pistia stratiotes* e *Salvinia molesta* (Mitchell) em diferentes concentrações de nutrientes. Thesis Universidade Estadual Paulista.
- Polomski, R. F., Taylor, M. D., Bielenberg, D. G., Bridges, W. C., Klaine, S. J., Whitwell, T. (2009) Nitrogen and Phosphorus Remediation by Three Floating Aquatic Macrophytes in Greenhouse-Based Laboratory-Scale Subsurface Constructed Wetlands, *Water Air Soil Pollut*, 197:223-232.
- Pompêo, M. (2008) Monitoramento e Manejo de Macrófitas Aquáticas. *Oecol. Bras.*, 12(3):406-424.
- Pott, V. J. & Pott, A. (2000) Plantas aquáticas do Pantanal. EMBRAPA, Brasília. 404 p.
- Reddy, K. R., Agami, M., Tucker, J. C. (1990) Influence of phosphorus on growth and nutrient storage by water hyacinth (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms) plants, *Aquatic Botany*, 37:355-365.
- Reddy, K. R., D'Angelo, E. M. (1990) Biomass Yield and Nutrient Removal by Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*) as Influenced by Harvesting Frequency. *Biomass*, 21:27-42.
- Reddy, K.R., Smith, W.H. (Eds). (1987) *Aquatic plants for waste water treatment and resource recovery*. Magnolia Publishing, Inc., Orlando, FL.
- Reddy, K. R., Tucker, J. C. (1983) Productivity and Nutrient Uptake of Water Hyacinth, *Eichhornia crassipes* I. Effect of Nitrogen Source. *Economic Botany*, 37(2):237-247.
- Rommens, W., Maes, J., Dekeza, N., Inghelbrecht, P., Nihwatiwa, T., Holsters, E., Ollevier, F., Marshall, B., Brendonck, L. (2003) The impact of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) in a eutrophic subtropical impoundment (Lake Chivero, Zimbabwe). I. Water quality. *Arch. Hydrobiol.*, 158(3): 373–388.
- Salt, D. E., Smith, R. D., Raskin, I. (1998) Phytoremediation. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 49:643-668.
- Santos, J. M. C. O. (2007) Avaliação da Produção de Metano em Alagados Construídos. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, RJ.
- Sato, H., Kondo, T. (1981) Biomass production of water hyacinth and it's ability to remove inorganic minerals from water. I- Effect of the concentration of culture

- solution on the rates of plant growth and nutrient uptake. *Jap. J. Ecol.*, 31: 257-267.
- Sharma, C.M., Borgstrom, R., Rosseland, B.O. (2011) Biomanipulation in Lake Årungen, Norway: A tool of biological control. In: Ansari, A. A., Singh Gill, S., Lanza, G.R., Rast, W. (eds.) *Eutrophication: causes, consequences and control*. Springer, 292-323.
- Smith, V. H., Tilman, G. D. & Nekola, J. C. (1999) Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. *Environmental Pollution*, 100: 179-196.
- Soffiati, A. A. N. (1998) Aspectos Históricos das Lagoas do Norte do Estado do Rio de Janeiro in ESTEVES, Francisco de Assis (ed.). *Ecologia das Lagoas Costeiras do Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba e do Município de Macaé (RJ)*. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Sooknah, R. D., Wilkie, A. C. (2004) Nutrient removal by floating aquatic macrophytes cultured in anaerobically digested flushed dairy manure wastewater. *Ecological Engineering*, 22:27-42.
- Svirčev, Z., Krstić, S., Marković, S. B., Plavša, J., Lazić, L. (2008) Methods for Management of Eutrophication in Freshwater Ecosystems in Vojvodina. *Geographica Pannonica*, 12:4-11.
- Téllez, T. R., López, E. M. R., Granado, G. L., Pérez, E. A., López, R. M., Guzmán, J. M. S. (2008) The Water Hyacinth, *Eichhornia crassipes*: an invasive plant in the Guadiana River Basin (Spain). *Aquatic Invasions*, 3(1) 42-53.
- Thomaz, S. M., Cunha, E. R. (2010) O papel das macrófitas na estruturação de habitat em ambientes aquáticos: métodos de medida, causas e consequências para a composição das assembléias animais e biodiversidade. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 22:218-236.
- Turangan, T. M. B., Leksono, A. S., Soemarno, Arfiati, D. (2014) Invasion of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) in the surface water of Tondano lake. *Journal of current research in science*, 2:244-250.
- Udert, K. M., Larsen, T. A., Biebow, M., Gujer, W. (2003) Urea hydrolysis and precipitation dynamics in a urine-collecting system. *Water Research*, 37: 2571-2582.
- van Schalkwyk, H. (2014) Modelling biological control strategies for water hyacinth. Trabalho de pesquisa apresentado para cumprimento dos requisitos para

- Graduação em Pesquisa Operacional do Departamento de Logística, Stellenbosch University.
- Vilaça, D. R. C. (2008) Lagoa do Vigário: Um tesouro formal engolido pela informalidade. Dissertação (Mestrado)- Centro Federal de Educação Tecnológica de Campos dos Goytacazes, RJ.
- Villamagna, A., Murphy, B. (2010) Ecological and socio-economic impacts of invasive water hyacinth (*Eichhornia crassipes*): a review. *Freshwater Biology*, 55:282-298.
- Wang, Z., Zhang, Z., Zhang, Y., Zhan, J., Yan, S., Guo, J. (2013) Nitrogen removal from Lake Caohai, atypical ultra-eutrophic lake in China with large scale confined growth of *Eichhornia crassipes*. *Chemosphere*, 92:177-183.
- Wooten, J. W., Dodd, J. D. (1976) Growth of Water Hyacinths in Treated Sewage Effluent. *Economic Botany*, 30:29-37.
- Williams, J. B. (2002) Phytoremediation in Wetland Ecosystems: Progress, Problems, and Potential. *Critical Reviews in Plant Sciences* 21(6):607-635.
- Wilson, J.R., Holst, N., Rees, M. (2005) Determinants and patterns of population growth in water hyacinth. *Aquat. Bot.*, 81:51-67.
- Wright A. D, Purcell, M. F. (1995) *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms- Laubach, p.111-121. In Groves RH, Shepherd RCH, Richerson RG (eds) *The biology of Australian weeds*. Melbourne, R. G., Richerson, F. J. 314p.
- Xie, Y., Qin, H., Yu, D. (2004) Nutrient limitation to the decomposition of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*), *Hydrobiologia*, 529:105-112.
- Xie, Y., Wen, M., Yu, D., Li, Y. (2004) Growth and resource allocation of water hyacinth as affected by gradually increasing nutrient Concentrations, *Aquatic Botany*, 79:257-266.
- ZhiYong, Z., Chu, Z. J., Qin, L. H., Zhou, C. Z., Gen, C. L., Hua, Y. S. (2010) Role of *Eichhornia crassipes* uptake in the removal of nitrogen and phosphorus from eutrophic waters, *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 18:152-157.

**CAPÍTULO II: A MODELAGEM MATEMÁTICA COMO  
FERRAMENTA PARA O MONITORAMENTO E MANEJO DO  
AGUAPÉ NA LAGOA DO VIGÁRIO**

## RESUMO

Trabalhos de modelagem matemática têm sido desenvolvidos para a previsão do crescimento e controle da *Eichhornia crassipes* (Aguapé), macrófita com elevado potencial acumulador de nutrientes e, portanto fitorremediadora de ambientes eutrofizados. O presente estudo objetivou subsidiar projetos de controle do Aguapé na Lagoa do Vigário a partir de uma proposta de manejo da sua área de cobertura para fins de fitorremediação do processo de eutrofização deste ecossistema. O crescimento do Aguapé na lagoa foi estudado a partir de imagens de satélite disponíveis no Google Earth Pro, referentes aos anos de 2014, 2015 e 2016. Dados de temperatura do ar dos meses analisados foram obtidos por estação evapotranspirométrica. Curvas de ajuste não lineares foram feitas no programa QtiPlot para elaboração do modelo de crescimento e cálculo da cobertura do Aguapé a ser retirada (Y). Considerou-se a manutenção da cobertura ideal correspondente ao ponto médio da curva de crescimento exponencial a fim de manter o Aguapé em crescimento acelerado e maior absorção de nutrientes. A partir do cálculo de Y foi calculada a quantidade de nitrogênio e fósforo que será retirada do sistema. A cobertura de Aguapé nas duas porções da Lagoa do Vigário variou entre 10% e 47%, tendo apresentado um aumento abrupto em 2015 quando as temperaturas registradas foram mais elevadas. As curvas de ajuste do crescimento logístico do Aguapé apresentaram elevada correlação com os dados de cobertura medidos tanto da porção sul ( $R=0,97$ ) quanto norte ( $R=0,98$ ) da lagoa. A partir da proposta de manejo deste estudo, a coleta do Aguapé deveria ser realizada diariamente no período úmido, cerca de três meses após aumento abrupto da temperatura de modo a manter sua cobertura em 25% na porção norte e 33% na porção sul. Juntamente com a coleta do Aguapé estima-se em 30 dias, a retirada do correspondente a 19% de N e 15% de P na porção sul e 4% de N e 3,7% de P na porção norte dos estoques desses nutrientes nos compartimentos hídrico e de Aguapé da lagoa. O modelo de crescimento e a proposta de manejo do Aguapé desenvolvidos neste estudo, contribuem como um importante ponto de partida para a recuperação da Lagoa do Vigário.

Palavras-chave: Aguapé, Modelo, Fitorremediação.

## INTRODUÇÃO

Como discutido no capítulo anterior, apesar da hiperacumulação de N e P por *E. crassipes* e seu potencial fitorremediador ser largamente conhecido, tal habilidade pode ser influenciada por diferentes fatores, tais como: condições de cultivo ou do ambiente de origem, variações sazonais e concentração desses nutrientes na água (Xie, et al. 2004, b; Polomski et al., 2009; ZhiYong, et al., 2010; Martins et al., 2011). Tal complexidade de fatores demanda estudos voltados para o ecossistema específico a ser fitorremediado e o uso de ferramentas que possam analisar vários fatores de maneira integrada.

A modelagem matemática pode ser uma alternativa metodológica para esse fim uma vez que possui relevantes aplicações, tais como: a organização e compreensão de sistemas; o preenchimento de variáveis de interesse em um período sem levantamento de dados; a elaboração de hipóteses e previsões e o estabelecimento de prioridades em pesquisas (Angelini, 1999; Jr. et al., 2009).

A elaboração de um modelo matemático pode se iniciar pelo modelo conceitual que posteriormente norteará a criação do modelo quantitativo. A elaboração do primeiro se dá pelo uso de caixas e setas, as caixas representam variáveis de estado, que descrevem a condição de componentes do ecossistema e as setas ilustram as interações entre tais variáveis. Esta etapa possibilita uma visão mais compactada da questão a ser estudada assim como a formulação de hipóteses e a escolha das variáveis mais representativas a serem incluídas no modelo (Jackson et al., 2000) (Figura 2.1).

De forma geral, a elaboração de um modelo matemático inclui as seguintes fases: I) Delimitação do sistema de interesse de acordo com os objetivos almejados. II) Reconhecimento dos fenômenos do sistema com base em outros trabalhos ou em novos experimentos. III) Escolha da estrutura quantitativa geral com a dedução do modelo matemático. IV) Calibração do modelo, a partir da descoberta de que valores minimizam a diferença entre os dados observados e os calculados pelo modelo. V) Validação do modelo, a partir da verificação entre os parâmetros calibrados e os dados observados (Angelini, 1999; Jr. et al., 2009).

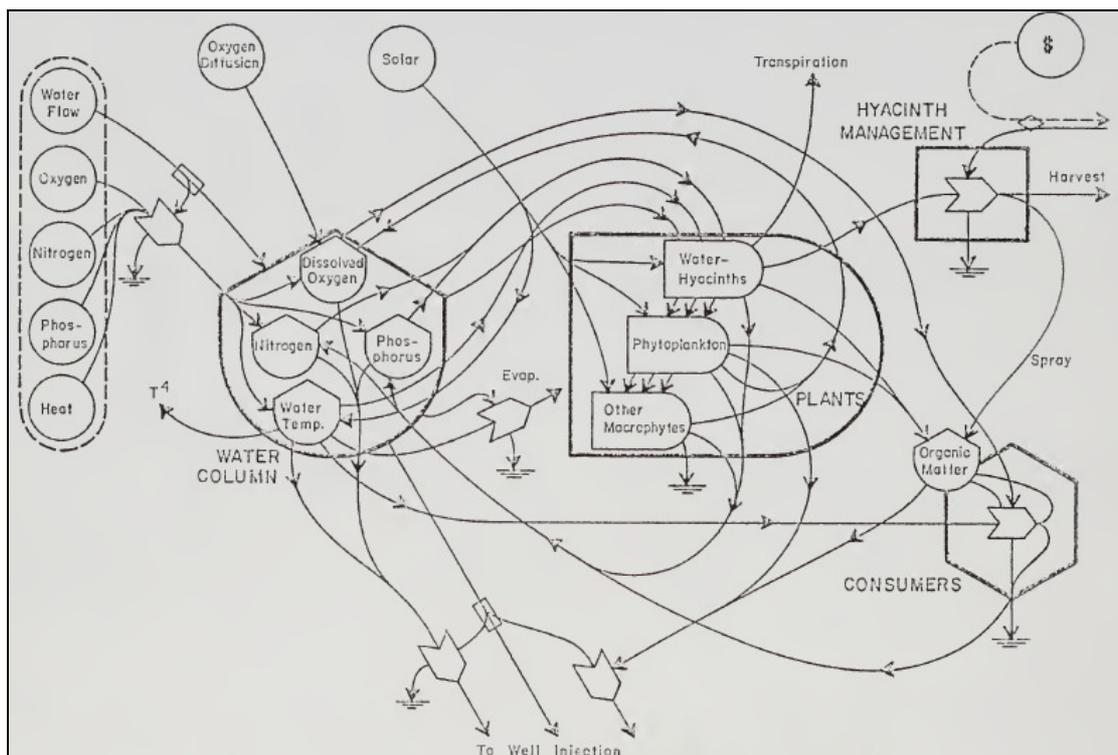


Figura 2.1 Exemplo de modelo conceitual relacionado ao manejo de *E. crassipes* no Lago Alice, Flórida, EUA (Mitsch, 1975).

No âmbito da modelagem ecológica, as equações voltadas para o crescimento populacional foram as pioneiras. Inicialmente o modelo de crescimento baseado em Malthus (1798) partia do princípio que uma população poderia aumentar em tamanho de forma exponencial dispondo de espaço e nutrientes, sem fatores limitantes ao seu crescimento. A representação matemática para tal crescimento pode ser expressa pela equação:

$$\frac{dN}{dt} = r_m \times N, \text{ sendo } N = \text{tamanho da população e } r_m = \text{taxa de crescimento}$$

da população [ $t^{-1}$ ].

Entretanto, na maioria dos ecossistemas, existem fatores que limitam o crescimento das populações, como no caso das plantas, por exemplo: luz, temperatura, nutrientes disponíveis, etc. Esta resistência do meio é representada pela equação de crescimento logístico ou Modelo de Verhulst, cuja função é sigmoidal:

$$\frac{dN}{dt} = r \times N \times \left(K - \frac{N}{K}\right), \text{ sendo } K = \text{valor máximo de } N \text{ ou a quantidade máxima}$$

de indivíduos que o ambiente suporta.

Variações do modelo de crescimento logístico têm sido usadas com diferentes objetivos para explorar o crescimento de *E. crassipes*, tendo em vista o caráter ambíguo desta planta. Trabalhos de modelagem matemática têm sido desenvolvidos com objetivos de previsão tanto da proliferação e controle do Aguapé (Gutiérrez et al., 2001; Wilson et al., 2001; Wilson et al., 2005) quanto das condições que otimizam seu crescimento para fins de utilização da sua biomassa e potencial de despoluição (Lorber et al., 1984; Aoyama & Nishizaki, 1993; Hu et al., 1998; Mahujchariyawong & Ikeda, 2001).

Na equação de crescimento do Aguapé, em geral altera-se o número de indivíduos por valores de biomassa já que o ponto em que os estolões do Aguapé se separam em diferentes indivíduos nem sempre é fácil de determinar (Wilson et al., 2001). Os valores de biomassa variam de acordo com sua taxa de crescimento intrínseca ( $r$ ) e a capacidade de suporte ( $K$ ). Em biomassas inferiores, a população tende a crescer em sua taxa de crescimento intrínseco até se aproximar de  $K$  quando sua variação de biomassa tenderá a zero (Wilson et al., 2001).

#### *Principais fatores relacionados ao crescimento e a fitorremediação por Aguapé*

A intensidade com que macrófitas aquáticas influenciam na qualidade dos sistemas é proporcional a sua biomassa que por sua vez depende além das características intrínsecas da planta, de fatores físicos, químicos e biológicos do ambiente, tais como: temperatura, pH, luminosidade, disponibilidade de nutrientes, a hidrodinâmica do sistema, taxas de decomposição vegetal e herbivoria (Bianchini, 2003). Logo, as equações de crescimento logístico do Aguapé usualmente incorporam muitos destes fatores que influenciam sua taxa de crescimento (Wilson et al., 2005; Mahujchariyawong & Ikeda, 2001).

Por outro lado, mesmo que um modelo não leve em consideração todas as variáveis envolvidas na questão analisada, ainda pode ser útil para a compreensão de processos específicos relacionados a estas plantas. Além disso, sabe-se que quanto mais complexo for o modelo, mais difícil será mostrar que ele descreve a realidade e maior será a necessidade de ferramentas computacionais sofisticadas. Por isso, usa-se o princípio da parcimônia que busca o uso de variáveis suficientes para a representação de um sistema ecológico de forma simples para sua execução, compreensão e utilidade (Jackson et al., 2000).

A temperatura e a disponibilidade de nutrientes são apontados como os principais fatores relacionados ao crescimento de *E. crassipes* (Wilson et al., 2005; Byrne et al., 2010) e ambos podem variar em um mesmo ecossistema por influência da sazonalidade, alterando a fisiologia do Aguapé e conseqüentemente suas taxas de assimilação de poluentes (Martins, et al., 2011).

A temperatura atua diretamente na distribuição e desempenho ecológico das espécies, considerando que os organismos possuem limites de tolerância e ótimos de temperatura específicos. Em geral, temperaturas em torno de 30 °C propiciam taxas de crescimento mais altas de Aguapé, apesar de esta espécie suportar entre 8 °C e 40 °C (Wilson et al., 2005).

Wilson et al. (2005) descreveram um modelo que prevê que a 30 °C e sob condições eutróficas a biomassa do Aguapé pode aumentar em cem vezes e alcançar 10 Kg.m<sup>-2</sup> em aproximadamente 50 dias. Já sob temperaturas diferentes do ótimo, tais como 20 °C ou 35 °C, levaria o dobro do tempo para atingir a mesma biomassa (Wilson et al., 2005). O mesmo modelo prevê também que a disponibilidade de nutrientes pode ser ainda mais determinante sobre a velocidade de crescimento de Aguapé, já que em concentrações de nitrogênio inorgânico inferiores a 0,1 mg.L<sup>-1</sup> o Aguapé levaria mais de 120 dias para alcançar 10 Kg.m<sup>-2</sup> sob diferentes condições de temperatura (Wilson et al., 2005).

Como todos os seres vivos, as macrófitas requerem diferentes tipos de nutrientes para o seu crescimento e manutenção de suas funções biológicas. A estratégia de sobrevivência destes organismos pode modificar como resposta a variações na disponibilidade de nutrientes provocada por fatores temporais ou espaciais (Xie et al., 2004).

Tendo como foco a fitorremediação de N e P por Aguapé, vale ressaltar que esta planta pode continuar a assimilar nutrientes em resposta ao aumento da disponibilidade destes no meio, mesmo em concentrações elevadas que não mais estimulem seu crescimento, até o seu limite de saturação (Reddy et al., 1990). Petruccio & Esteves (1999) registraram um aumento da taxa de absorção de nutrientes por Aguapé quando as concentrações de P-total e N-total no meio de cultivo aumentaram de 0,7 mg.L<sup>-1</sup> e 2,01 mg.L<sup>-1</sup> para 3,0 e 5,04 mg.L<sup>-1</sup>, respectivamente. Por outro lado, quando as concentrações foram aumentadas para 6,2 mg.L<sup>-1</sup> de N-total a assimilação reduziu indicando uma condição de saturação por parte destas plantas. Deve-se considerar também que a velocidade de assimilação

de nutrientes em um determinado ambiente tende a reduzir na medida em que a biomassa de Aguapé aumenta (Reddy et al, 1990; Hu et al. 1998). Reddy et al. (1990) encontraram maiores taxas de absorção de fósforo no início de um experimento quando a biomassa seca de Aguapé estava entre 600-900 g/m<sup>2</sup>, apesar de a planta ter alcançado até 2000 g/m<sup>2</sup> sem perda de crescimento líquido.

Logo, a estratégia mais adequada de manejo de *E. crassipes* não é óbvia e modelos que tenham como objetivo viabilizar o uso do potencial fitorremediador do Aguapé em ambientes eutrofizados devem considerar fatores associados ao crescimento da planta, assim como as condições ótimas associadas a absorção de N e P.

#### *Modelos matemáticos para o manejo do Aguapé*

A fim de verificar a disponibilidade de estudos de modelagem matemática envolvendo o Aguapé nos últimos 25 anos e quantos destes estão voltados para o potencial fitorremediador desta espécie, foi feita uma busca bibliográfica na ferramenta Google Acadêmico em março de 2017 com as palavras-chave: modelagem matemática e *Eichhornia crassipes*. Dos 754 trabalhos disponíveis, 267 tinham como foco o estudo do Aguapé e destes 72 utilizavam a modelagem matemática como ferramenta. Dos trabalhos voltados para modelagem de *E. crassipes*, 53% se dedicava ao potencial de fitorremediação desta planta, sendo que a minoria destes (15%) tinha como objetivo a fitorremediação de águas poluídas por N e P, dos quais 50%, totalizando apenas três trabalhos realizaram seus estudos para a recuperação de ambientes eutrofizados.

Sendo assim, o uso da modelagem matemática para a fitorremediação de ambientes eutrofizados por Aguapé ainda é pouco estudado. Um dos desafios dessa área de pesquisa é a previsão da quantidade da macrófita que deve ser deixada e colhida em um sistema hídrico para a retirada dos nutrientes assimilados e a frequência em que isso deve ser feito. Quando não existe um planejamento para a coleta da planta, sua produção e capacidade de fitorremediação podem ser subutilizadas (Casabianca, 1985). A melhor estratégia de coleta do Aguapé é aquela que reduz a biomassa em um tempo razoável considerando a velocidade do seu crescimento, que tenha um custo aceitável e não afete negativamente o ecossistema (Gutiérrez et al., 2001).

Mahujchariyawong & Ikeda (2001) elaboraram um modelo para a determinação da biomassa de Aguapé a ser colhida para a remoção de nutrientes de um rio eutrofizado na Tailândia. Esse trabalho se baseou em uma análise teórica da curva de crescimento logístico do Aguapé que mostra que a produção máxima de biomassa desta planta pode ser obtida por podas a fim de manter a biomassa remanescente equivalente a  $K/2$ , sendo  $K$  a capacidade de suporte ou a biomassa máxima acima da qual a quantidade de Aguapé produzida é a mesma de detrito formada por sua decomposição (Figura 2.2).

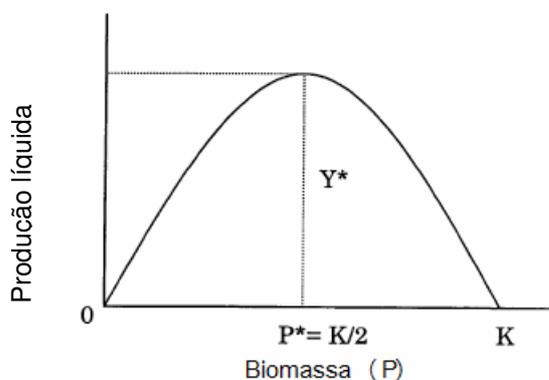


Figura 2.2 Representação da produção líquida máxima de biomassa em  $K/2$ . Fonte: Mahujchariyawong & Ikeda (2001).

Para fins de controle do Aguapé três parâmetros podem ser estudados: a biomassa, a área coberta e sua taxa de crescimento (Gutiérrez et al., 2001). A determinação da biomassa do Aguapé pode ser pouco prática e operacional, apesar de constituir a maioria dos dados existente sobre manejo do Aguapé. Outras características morfológicas de mais fácil determinação, tais como comprimento e o número médio de folhas por planta podem ser convertidos em biomassa (Center & Spencer, 1981), mas ainda assim a coleta permanece trabalhosa. O cálculo da área coberta por Aguapé é uma alternativa para facilitar seu manejo e a utilização de imagens obtidas por sensoriamento remoto pode ajudar neste sentido (Sun & Zuh, 2014).

#### *O uso de sensoriamento remoto para o manejo do Aguapé*

A aquisição de informações sobre a superfície da Terra tem sido facilitada por técnicas de sensoriamento remoto. Estas consistem no uso de satélites artificiais equipados com sensores que realizam a captação, registro e análise da radiação

eletromagnética (REM) refletida e emitida por alvos da superfície terrestre (Da Silva, 2007) sem que haja um contato físico entre o sensor e o objeto (Meneses & Almeida, 2012). A partir desta técnica diferentes alvos são identificados por características como cor, forma, tamanho, textura e localização e tem sido possível, gerar imagens relevantes para estudos, tais como, detecção e monitoramento de furacões, fenômenos oceânicos, queimadas e desflorestamentos, estimar safras agrícolas, dentre outras aplicações (Florenzano, 2008).

Atualmente, o sensoriamento é constituído por satélites com resoluções variáveis e capazes de oferecer imagens para atender a diferentes objetivos. Imagens que abrangem grandes áreas, como as de satélites do Landsat e CBERS, possuem resoluções espaciais pequenas de 30 a 20 m e por não mostrarem detalhes dos alvos são usadas em estudos regionais. Já as imagens que recobrem pequenas áreas, como as imagens Ikonos e Orbview, são associadas com resoluções espaciais maiores de até 1 m e podem ser usadas para estudos locais de detalhe (Meneses & Almeida, 2012).

Um dos desafios para o estudo com imagens de satélite pode ser a não disponibilidade e custo de imagens adequadas e de boa qualidade, principalmente quando se tratam de imagens históricas (Cha & Park, 2007). Neste sentido, o Google Earth pode ser uma econômica e acurada fonte de dados de referência para áreas de estudo, pois disponibiliza imagens de alta resolução de quase todos os lugares do mundo e possibilita a visualização em duas e três dimensões, tornando possível a interatividade do usuário, além da vetorização de pontos, linhas e polígonos (Lopes, 2009). Atualmente encontra-se disponível gratuitamente a versão profissional Google Earth Pro, que além de todas as ferramentas disponibilizadas pelas versões anteriores permite impressão com qualidade e maior velocidade de conexão com o banco de dados (Lopes, 2009).

Estudos a partir de imagens de satélite têm sido desenvolvidos para acompanhar o crescimento e distribuição do Aguapé (Turangan et al., 2014; Dube, et al., 2017). No âmbito da modelagem matemática, Sun & Zuh (2014) elaboraram um modelo de crescimento do Aguapé utilizando dados da área coberta por esta planta em diferentes momentos na Baía de Zhushanhu, Lago Taihu (China). Para isso, foram utilizadas imagens de satélite ALOS e o aumento da cobertura do Aguapé foi correspondente ao crescimento logístico já descrito em outros trabalhos que utilizaram dados de biomassa. Esta metodologia, portanto se mostrou viável

para a operacionalização dos resultados obtidos em modelos com o objetivo de orientar o manejo do Aguapé. Todavia, tal abordagem ainda é incipiente e estudos se fazem necessários para sua aplicabilidade.

## **OBJETIVO GERAL**

Propor uma estratégia de manejo do Aguapé na Lagoa do Vigário para fins de fitorremediação do seu processo de eutrofização.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Estimar a área coberta por Aguapé na Lagoa do Vigário através de imagens de satélite.
- Prever o crescimento do Aguapé nas partes norte e sul da Lagoa do Vigário utilizando-se de modelagem matemática.
- Propor uma estratégia de coleta do Aguapé de modo a otimizar seu potencial fitorremediador.
- Prever a quantidade de N e P a ser retirada da Lagoa do Vigário a partir da coleta do Aguapé.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

A fim de estimar a velocidade de crescimento do Aguapé nas duas porções da Lagoa do Vigário, a área de cobertura do Aguapé foi obtida em lugar da sua biomassa, visando uma maior aplicabilidade dos dados gerados para fins de manejo. Para isso foram analisadas 16 imagens da lagoa referentes aos anos de 2014, 2015 e 2016 disponíveis no Google Earth Pro. A delimitação visual de cada banco de Aguapé e o cálculo de sua área foram feitos utilizando a ferramenta de demarcação de polígono do Google Earth Pro. Optou-se pela demarcação visual devido a facilidade de identificação do Aguapé por sua tonalidade e textura o que foi facilitado pelas frequentes idas ao campo que possibilitaram obter familiaridade com as áreas da lagoa tipicamente colonizadas pelo Aguapé e outras plantas. Os espaços vazios e áreas cobertas por outras espécies de macrófitas tais como *Typha domingensis* e

*Pistia stratiotes* no meio dos bancos de Aguapé também foram medidos e descontados para o cálculo da cobertura de Aguapé.

Como relatado no capítulo I, a temperatura é um dos fatores mais determinantes atualmente para a variação na velocidade de crescimento do Aguapé na Lagoa do Vigário tendo em vista que as concentrações de N e P encontradas ultrapassam as condições ótimas para o seu crescimento e a planta não mais responde ao acréscimo dos mesmos. Por esse motivo, médias mensais da temperatura do ar obtidas através de dados da Estação Evapotranspirométrica Leag/Uenf Lat: 21º 45' Sul; Long. 41º 18' O; Altitude 11 m, referidas ao Datum WGS 84 foram relacionadas aos dados de cobertura vegetal.

#### *Construção e Descrição do Modelo*

Dentre as imagens analisadas, foram utilizadas as medidas correspondentes aos anos de 2014 e 2015 para a elaboração dos modelos de crescimento. Os dados de 2016 não foram utilizados devido ao hiato gerado pela indisponibilidade de imagens referentes aos meses do período úmido de 2015, provavelmente por influência da maior incidência de nuvens. A partir dos dados de cobertura de Aguapé (m<sup>2</sup>) ao longo do tempo foram elaboradas curvas de ajuste não lineares para a calibração dos valores utilizando o programa QtiPlot. As equações obtidas são descritas abaixo:

$$C(t) = Kc + \frac{C(0) - Kc}{1 + \exp\left(\frac{t - t_i}{dt}\right)}$$

t = tempo em dias

t<sub>i</sub> = tempo inicial

C(t) = Área coberta por *E. crassipes* no tempo t

C(0) = Área de *E. crassipes* no tempo t<sub>i</sub>

Kc = Capacidade de suporte (área máxima coberta)

Para  $dt = \frac{1}{r}$

$$C(t) = Kc - \frac{Kc - C(0)}{1 + e^{(-rti)} e^{(rt)}}$$

r = Taxa de aumento da área coberta por Aguapé

A fim de estimar a área coberta por Aguapé a ser limpa nas porções norte e sul da lagoa (Y), considerou-se a manutenção da cobertura ideal em  $Kc/2$ , (Mahujcharyawong & Ikeda, 2001): sendo esse valor a cobertura correspondente ao ponto médio da curva de crescimento exponencial:

$$Y = C(t) - Kc/2 \text{ quando } C(t) > Kc/2$$

$$Y = 0 \text{ quando } C(t) \leq Kc/2$$

A partir do cálculo de Y foram calculadas as quantidades de N e P que serão retiradas do sistema ( $N_y$  e  $P_y$ ) considerando os estoques desses nutrientes na *E. crassipes* por  $m^2$  ( $N_e$  e  $P_e$ ) calculados no capítulo I (Tabela 1.6-capítulo I):

$$P_y = P_e \times y$$

$$N_y = N_e \times Y$$

Posteriormente os estoques de N e P nos compartimentos hídricos e de *E. crassipes* das porções norte e sul da Lagoa do Vigário foram calculados a fim de verificar a relevância dos valores de  $P_y$  e  $N_y$  calculados. Para isso foram utilizadas as equações descritas no quadro 2.1.

Quadro 2.1. Equações utilizadas para o cálculo dos estoques totais de fósforo e nitrogênio nos compartimentos hídrico e de Aguapé das porções norte e sul da Lagoa do Vigário no período úmido de 2015.

<i>Equações</i>		
$P_{tal} = \frac{P_{ta} \times V}{1000000}$	$P_{el} = \frac{P_e \times C(K/2)}{1000}$	$P_{tl} = P_{tal} + P_{el}$
$N_{tal} = \frac{N_{ta} \times V}{1000000}$	$N_{el} = \frac{N_e \times C(K/2)}{1000}$	$N_{tl} = N_{tal} + N_{el}$
<i>Descrição das Variáveis</i>		
$P_{tal}$ (Kg)= Estoque de fósforo total na água da lagoa $N_{tal}$ = Estoque de nitrogênio total na água da lagoa (Kg)		
$P_{ta}$ (mg.L <sup>-1</sup> ) = Concentração de fósforo total na água da lagoa referente ao período úmido obtida no capítulo 1- tabela 1.3		
$N_{ta}$ (mg.L <sup>-1</sup> ) = Concentração de nitrogênio total na água da lagoa referente ao período úmido, obtida no capítulo 1- tabela 1.2.		
$V$ (L)= Estimativa do volume da total da lagoa ( $V = \text{área} \times \text{profundidade}$ ).		
$P_{el}$ (Kg)= Estoque de fósforo na <i>E. crassipes</i> presente na lagoa no início do manejo.		

$N_{el}$  (Kg)= Estoque de nitrogênio na *E. crassipes* presente na lagoa no início do manejo.

$P_e$  (g.m<sup>-2</sup>)= Concentração de fósforo total no *E. crassipes* por m<sup>2</sup> referente ao período úmido, obtida no capítulo 1 – tabela 1.6.

$N_e$  (g.m<sup>-2</sup>) = Concentração de nitrogênio total na *E. crassipes* por m<sup>2</sup> referente ao período úmido, obtida no capítulo 1 - tabela 1.6.

$C(K/2)$  (m<sup>2</sup>)= Cobertura do Aguapé no início do manejo.

$P_{tl}$  (Kg)= Estoque total de fósforo na lagoa no compartimento hídrico e de Aguapé .

$N_{tl}$  (Kg)= Estoque total de nitrogênio na lagoa no compartimento hídrico e de Aguapé.

## RESULTADOS

### Cobertura de Aguapé na Lagoa do Vigário

A área coberta por Aguapé na Lagoa do Vigário variou entre 18.988 m<sup>2</sup> e 98.846 m<sup>2</sup> na parte sul correspondendo entre 9 e 47% da área total. Já na parte norte a área coberta foi entre 19.186 m<sup>2</sup> e 83.526 m<sup>2</sup> e 10 e 44% do total (Tabela 2.1). Os mapas com os bancos de Aguapé demarcados estão apresentados no Apêndice.

Os maiores valores de cobertura foram encontrados nos meses de 2015, tanto na parte sul quanto na parte norte da lagoa. O mesmo ocorreu para os valores de temperatura que foram superiores em dezembro de 2014 e nos primeiros meses de 2015, chegando a média mensal de 27,6 °C em janeiro de 2015 (Figura 2.3).

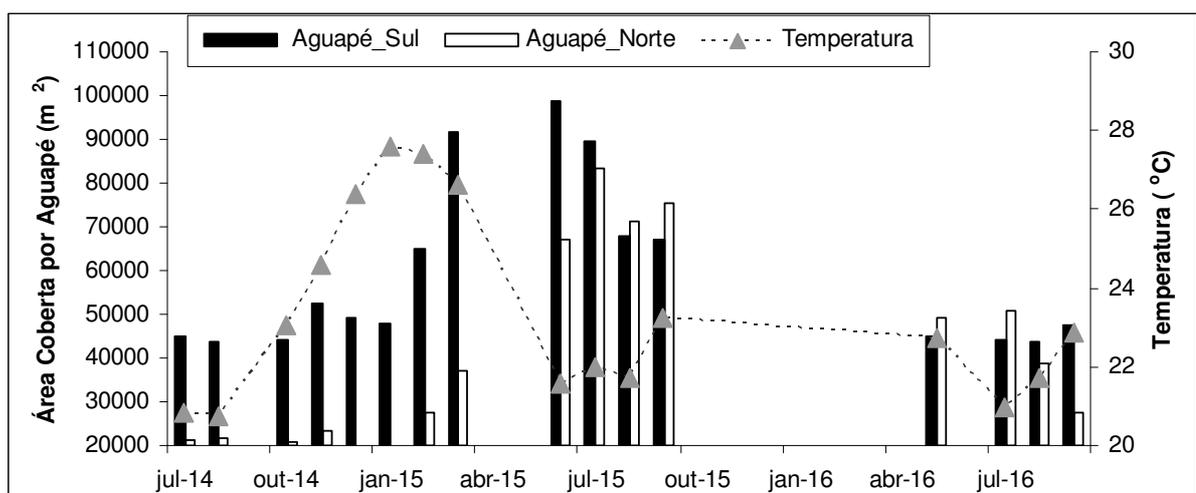


Figura 2.3 Variação da área coberta por Aguapé nas porções norte e sul da Lagoa do Vigário e variação da média mensal da temperatura do ar durante os anos de 2014, 2015 e 2016.

Tabela 2.1 Área coberta (AC) por Aguapé na Lagoa do Vigário, porcentagem da lagoa coberta (% AC) e médias mensais de temperatura do ar durante meses de 2014, 2015 e 2016.

<b>Data</b>	<b>AC Sul (m<sup>2</sup>)</b>	<b>AC Norte (m<sup>2</sup>)</b>	<b>% AC Sul</b>	<b>% AC Norte</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
<b>17-Jul-14</b>	44.804	21.267	21,3	11,2	20,8
<b>24-ago-14</b>	43.920	21.496	20,9	11,3	20,7
<b>09-out-14</b>	44.274	20.995	21,1	11,0	23,1
<b>21-nov-14</b>	52.452	23.310	25,0	12,3	24,6
<b>2- dez-14</b>	49.049	19.671	23,4	10,3	26,4
<b>12- jan-15</b>	47.723	19.186	22,7	10,1	27,6
<b>11-fev-15</b>	64.796	27.683	30,9	14,6	27,4
<b>12- mar-15</b>	91.862	37.252	43,7	19,6	26,6
<b>13- jun-15</b>	98.846	67.090	47,1	35,3	21,6
<b>26- jul-15</b>	89.397	83.526	42,6	44,0	22,0
<b>30-ago-15</b>	68.114	71.416	32,4	37,6	21,74
<b>22- set-15</b>	67.094	75.449	31,9	39,8	23,25
<b>26- mai-16</b>	44.925	48.961	21,4	25,8	22,71
<b>10- jul-16</b>	44.020	50.725	21,0	26,7	20,96
<b>25- ago-16</b>	43.798	38.644	21,0	20,3	21,69
<b>13- set-16</b>	47.388	27.399	22,6	14,4	22,89

### *Modelo de aumento da cobertura de Aguapé na Lagoa do Vigário*

As curvas de ajuste para cálculo do crescimento do Aguapé referentes ao aumento de sua cobertura corresponderam a função logística e apresentaram elevada correlação com os dados de cobertura medidos tanto da porção sul ( $R=0,97$ ) quanto norte ( $R=0,98$ ) da Lagoa do Vigário. A partir de tais modelos de crescimento se determinou a capacidade de suporte ou área máxima coberta ( $K_c$ ) de  $94.140 \text{ m}^2$  e  $76.400 \text{ m}^2$  nas porções sul e norte, respectivamente. Na porção sul o Aguapé apresentou maior taxa de crescimento intrínseca ( $r$ ) de 12% ao dia quando comparada aos 3% da porção norte (Quadro 2.2). O tempo levado para atingir o ponto médio da curva exponencial ( $K/2$ ) foi igual a 214 dias na porção sul e 268 dias na porção norte com coberturas correspondentes de  $69.685 \text{ m}^2$  e  $47.531 \text{ m}^2$ , respectivamente. Já o tempo entre o início da fase exponencial e o ponto médio da curva foi de 8 dias na porção sul e 29 dias no norte (Quadro 2.2).

A partir do modelo de crescimento do Aguapé foram elaboradas as equações para a determinação da área coberta a ser limpa nas porções norte e sul (Quadro 2.2). Sendo assim, a área coberta por Aguapé a ser limpa ( $Y$ ) a partir do 215º dia, ou seja, um dia após a cobertura atingir  $K/2$  seria de  $1.404 \text{ m}^2 \cdot \text{dia}^{-1}$  na porção sul. Já na porção norte tal área seria de  $474 \text{ m}^2 \cdot \text{dia}^{-1}$  a partir do 269º dia. Neste caso, considerando a área total de cada uma das porções da lagoa seria mantida uma cobertura de Aguapé de 33% e 25% no sul e norte, respectivamente.

Considerando os estoques de P e N no Aguapé por  $\text{m}^2$  no período úmido calculados no capítulo I (porção sul:  $P=8,72 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  e  $N_a=31,07 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ , porção norte:  $P_a=7,33 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  e  $N_a=24,12 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ) estima-se a redução de fósforo ( $P_y$ ) e nitrogênio ( $N_y$ ) no sistema a cada evento de coleta do Aguapé de 12,2 Kg e 43,6 Kg, respectivamente. Já na porção norte, a quantidade de fósforo e nitrogênio a ser exportada do sistema seria de 3,4 Kg e 11,4 Kg, respectivamente. Sendo assim, em 30 dias de coleta seriam retirados da lagoa 366 Kg de P e 1308 Kg de N no sul e 102 Kg de P e 342 Kg de N no norte.

Os somatórios dos estoques de nutrientes nos compartimentos hídrico e de Aguapé ( $P_t$  e  $N_t$ ) foram de 6.859 Kg de N e 2.465 Kg de P na parte sul e 8.392 Kg de N e 2.720 Kg de P na parte norte (os resultados das variáveis utilizadas nas equações estão expostos na Tabela 2.2). Sendo assim, os valores de P e N a serem exportados da lagoa após 30 dias de manejo correspondem a 19% do N e 15% do P na porção sul e 4% do N e 3,7% do P na porção norte desses estoques.

Quadro 2.2 Curvas de ajuste de crescimento do Aguapé, equações de crescimento (Ct), equações da área coberta a ser limpa (Y), capacidade de suporte (Kc), ponto médio da curva de crescimento exponencial (K/2) e taxa de crescimento do Aguapé (r), correspondentes as porções sul e norte da Lagoa do Vigário.

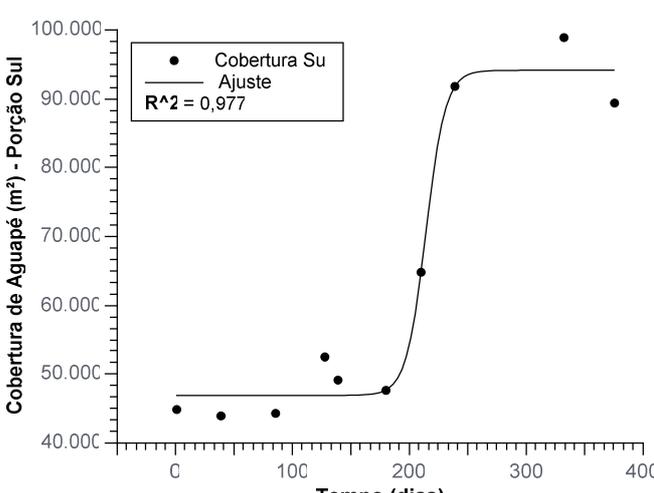
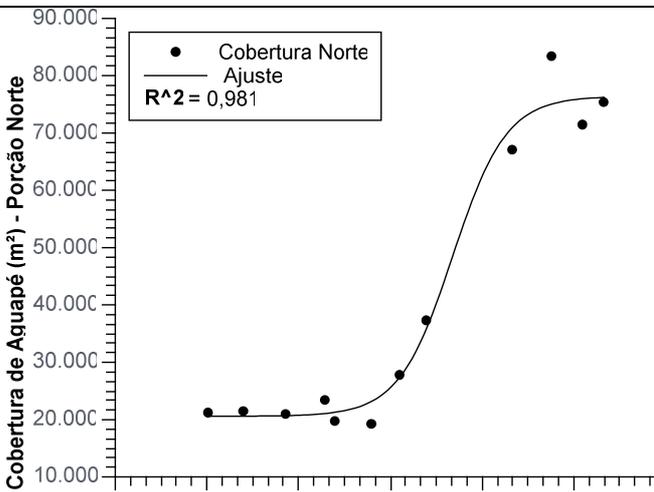
Porção Sul	
 <p style="text-align: center;"><math>C(t) = Kc - \frac{Kc - C(0)}{1 + e^{(-rt) e^{(rt)}}</math></p>	$C(t) = 94.140 - \frac{94.140 - 46.900}{1 + e^{\frac{214}{8,38} e^{0,119t}}}$ $C(t) = 94.140 - \frac{47.240}{1 + 8,12 \cdot 10^{-12} e^{0,119t}}$ $Y = 24.454 - \frac{47.240}{1 + 8,12 \cdot 10^{-12} e^{0,119t}}$ <p> <math>r = 0,12</math>  <math>Kc = 94.140 m^2</math>  <math>Kc / 2 = 69.685 m^2</math> </p>
Porção Norte	
 <p style="text-align: center;"><math>C(t) = Kc - \frac{Kc - C(0)}{1 + e^{(-rt) e^{(rt)}}</math></p>	$C(t) = 76.400 - \frac{76.400 - 20.580}{1 + e^{\frac{268}{29,2} e^{0,034t}}}$ $C(t) = 76.400 - \frac{55.820}{1 + 1,03 \cdot 10^{-4} e^{0,034t}}$ $Y = 28.869 - \frac{55.820}{1 + 1,03 \cdot 10^{-4} e^{0,034t}}$ <p> <math>r = 0,03</math>  <math>Kc = 76.400 m^2</math>  <math>Kc / 2 = 47.531 m^2</math> </p>

Tabela 2.2 Variáveis utilizadas para o cálculo do estoque e N e P nos compartimentos hídrico e de Aguapé da Lagoa do Vigário.

<b>Variáveis</b>	Porção Norte	Porção Sul
$V$ (m <sup>3</sup> )	228000	231000
$C(K/2)$ (m <sup>2</sup> )	47531	69685
$Nta$ (mg.L <sup>-1</sup> )	31,78	20,32
$Ntal$ (Kg)	7246	4694
$Ne$ (g.m <sup>-2</sup> )	24,1	31,1
$Ntel$ (Kg)	1146	2165
$Ntl$ (Kg)	8392	6859
$Pta$ (mg.L <sup>-1</sup> )	10,4	8,04
$Ptal$ (Kg)	2371	1857
$Pe$ (g.m <sup>-2</sup> )	8,72	7,33
$Pte$ (Kg)	348	608
$Ptl$ (Kg)	2465	2720

## DISCUSSÃO

### *Cobertura de Aguapé na Lagoa do Vigário e a influência da temperatura*

A área que os tapetes de Aguapé ocupam em ambientes eutrofizados pode variar devido aos diferentes fatores relacionados ao seu crescimento. Gutiérrez (2001) registrou valores de cobertura de Aguapé entre 59 e 80% em corpos hídricos eutrofizados no México. Já von Sperling (1997) estimou cobertura de 30% na Lagoa da Pampulha- MG que também sofre com o processo de eutrofização (von Sperling, 1997). No presente estudo, a cobertura de Aguapé nas duas porções da Lagoa do Vigário variou entre 10% e 47%, tendo apresentado pouca variação durante os anos de 2014 e 2016.

Em 2015 ocorreu um crescimento abrupto do Aguapé coincidente com o aumento da temperatura do ar. Temperaturas mais elevadas como as registradas neste estudo são comuns na região durante meses de verão e este estudo cria um

alerta para a proliferação do Aguapé e seus prejuízos nestas condições. Durante visitas a Lagoa do Vigário em 2015 não era incomum encontrar peixes mortos fato que coincidia com medidas de concentração de oxigênio dissolvido próximas a zero.

#### *Modelo de crescimento do Aguapé na Lagoa do Vigário*

O uso de imagens de satélite para demarcação da área coberta por Aguapé foi eficiente para demonstrar o crescimento logístico desta planta nas duas porções da lagoa. Isso corrobora os resultados obtidos por Sun & Zuh (2014) que também registraram tal tipo de crescimento por meio de dados de cobertura na Baía de Zhushanhu, Lago Taihu (China) e ressaltaram a maior efetividade desse método para fins de manejo do Aguapé em comparação aos modelos de crescimento logísticos obtidos a partir de dados de biomassa (Mahujcharyawong & Ikeda, 2001; Wilson et al., 2005).

As taxas de aumento de cobertura de 12% na porção sul e 3% no norte da Lagoa do Vigário estão próximas ao intervalo de taxas de crescimento do Aguapé encontrado na literatura entre 0,5% a 11% (Wilson et al., 2005) e são superiores a de 1,2 % relatada por Sun & Zuh (2014) provavelmente devido a temperaturas mais baixas no Lago Taihu que apresenta médias anuais entre 15 e 17 °C (Qian, 2012).

Apesar do conhecimento de que a temperatura e a disponibilidade de N e P são os principais fatores estimuladores do crescimento do Aguapé (Wilson et al., 2005), estes não justificam o seu maior crescimento na porção sul da Lagoa do Vigário. Isso porque a temperatura não difere entre as duas porções e a disponibilidade de N e P foi igual ou maior na porção norte (capítulo I -Tabelas 1.2 e 1.3). Já foi mostrado que concentrações excessivas de N e P podem levar a degeneração do metabolismo das plantas e que o excesso de N pode reduzir em 32% a velocidade de crescimento e em 9,2 % a produção de biomassa do Aguapé. Entretanto, a concentração máxima testada de N foi de 420 ml.L<sup>-1</sup>, muito superior a encontrada geralmente no ambiente e no presente estudo (Alves et al., 2003). Sendo assim, é possível que outro fator não analisado esteja inibindo o crescimento do Aguapé na porção norte da lagoa, como, por exemplo, a maior incidência de herbivoria ou a maior competição com outras espécies de macrófitas (*Typha domingensis* e *Pistia stratiotes*).

### *Proposta de manejo do Aguapé*

A necessidade de manejo do Aguapé tendo como objetivo a fitorremediação de corpos hídricos parte do princípio de que a coleta inadequada desta planta pode minimizar seu potencial despoluidor. Se uma quantidade exagerada da planta é retirada, seu crescimento pode ser desacelerado pelo aparecimento de uma fase lag e conseqüentemente, menor será a acumulação de poluentes. Por outro lado, a estagnação do tamanho populacional pode ocorrer por falta de colheitas (Malveaux, 2013).

Através do modelo de crescimento gerado neste estudo foi possível propor uma estratégia de manejo do Aguapé na Lagoa do Vigário a partir de coletas no seu pico de produção líquida ( $k/2$ ) considerando que em tal momento o Aguapé está crescendo aceleradamente e absorvendo maior quantidade de nutrientes (Mahujchariyawong & Ikeda, 2001; Ebrahim & Shaltout, 2016). Após aproximadamente três meses do pico de temperatura entre dezembro de 2014 e janeiro de 2015 o Aguapé entrou em crescimento exponencial e após 8 dias na porção sul e 29 dias no norte atingiu  $k/2$ . Dessa forma, em eventos de elevação abrupta da temperatura, uma sugestão de coleta do Aguapé seria de aproximadamente três meses e meio no sul e quatro meses no norte após a média mensal de temperatura do ar atingir cerca de 27°C.

As áreas a serem limpas seriam de 1.404  $m^2 \cdot dia^{-1}$  da porção sul e 474  $m^2 \cdot dia^{-1}$  da porção norte que correspondem a 0,7 e 0,2 % das porções sul e norte, respectivamente. Sun & Zuh (2014) propuseram a limpeza de 2.288  $m^2 \cdot dia^{-1}$  de área coberta por Aguapé, correspondendo a 0,6% da Baía de Zhushanhu na China. Entretanto, o modelo de Sun & Zuh (2014) propõe a coleta contínua do Aguapé até que se alcance uma cobertura de apenas 148  $m^2$  após 72 dias de manejo. Tal modelo difere do proposto no presente estudo tendo em vista que este não considerou a retirada do Aguapé de forma a manter seu crescimento máximo sustentável. A manutenção do Aguapé na Lagoa do Vigário se faz necessária tendo em vista que este ecossistema ainda recebe esgoto in natura e o manejo deve ocorrer de forma a manter a função despoluidora desta planta no ecossistema, além da sua função ecológica.

A partir dessa proposta de manejo seria mantida uma cobertura de Aguapé de 25% na porção norte e 33% na porção sul. Tais coberturas remanescentes estão de acordo com sugestões de outros trabalhos como, por exemplo, von Sperling (1997),

em um estudo de caso na Lagoa da Pampulha-MG sugeriu deixar pelo menos 10% das macrófitas para evitar a formação de florações da cianobactéria *Microcystis aeruginosa*. Já Malveaux (2013) ressalta a necessidade de coletas regulares do Aguapé durante a estação de crescimento e a manutenção de 33% da planta no ambiente para impedir que a capacidade de suporte seja alcançada.

Juntamente com a coleta do Aguapé da Lagoa do Vigário estima-se em 30 dias de manejo, até aproximadamente o restante do período úmido, a retirada de 366 Kg de P e 1308 Kg de N na porção sul e 102 Kg de P e 342 Kg de N na porção norte. Um estudo que objetivou avaliar a eficiência de canais cobertos de Aguapé para o tratamento de esgoto previu a retirada de 119 Kg de P e 518 Kg de N após 7 eventos de retirada do Aguapé ao longo de um ano e justificou esta pouca efetividade pela falta de planejamento para o controle do crescimento do Aguapé ao invés de deixá-lo cobrir totalmente o canal antes da retirada (Nogueira, 2003).

O cálculo da retirada de N e P através do manejo do Aguapé foi expressivo em relação a concentração desses nutrientes na água e nos bancos desta planta, o que confirma a fitorremediação por Aguapé como uma alternativa para a mitigação da eutrofização na Lagoa do Vigário. Por outro lado, ainda não é possível prever o tempo que levaria para a recuperação da lagoa, tendo em vista que esta ainda recebe esgoto in natura. Além disso, não se tem informações sobre o compartimento sedimentar da lagoa e sabe-se que a retenção e decomposição de matéria orgânica no sedimento e a posterior liberação de nutrientes para a coluna d'água pode acentuar o processo de eutrofização (Nowlin et al., 2005; Esteves, 2011). Apesar disso, espera-se pouca estratificação da Lagoa do Vigário, por sua baixa profundidade e elevada incidência de ventos, o que possibilita que a ação fitorremediadora do Aguapé tenha consequências em toda a coluna d'água e ofereça um efeito a longo prazo a partir da retirada gradual dos nutrientes liberados no sentido sedimento água.

Novos estudos deverão ser realizados a partir de outra ferramenta em conjunto com as imagens fornecidas pelo Google Earth devido a dificuldade em obter imagens nos períodos de chuva. Sun & Zhu (2014) sugerem o uso de um sistema de posicionamento global mapeador que permite a gravação de pontos, linhas e áreas para a demarcação do perímetro dos bancos de Aguapé diretamente na área de estudo. Tal demarcação por GPS também pode ser utilizada para localizar in situ as áreas de bancos de Aguapés a serem limpas.

Vale ressaltar ainda, a necessidade de novos estudos sobre os possíveis destinos para a biomassa de Aguapé a ser retirada da lagoa. A utilização desta para a produção de adubo poderia ser uma boa alternativa. Entretanto, estudos sobre a qualidade do adubo gerado se fazem necessários, como por exemplo, se estes serão livres de metais pesados ou outros contaminantes.

## **CONCLUSÕES**

O uso de dados de cobertura do Aguapé foi eficiente para a determinação do crescimento desta planta na Lagoa do Vigário. A partir de um modelo simples quando comparado a outros disponíveis na literatura foi possível propor uma alternativa para o manejo do Aguapé de modo a retirar concentrações consideráveis de nutrientes da lagoa. Para fins de manejo do Aguapé, a determinação da área da lagoa a ser limpa em lugar da quantidade de biomassa a ser retirada, como já proposto anteriormente, representa uma vantagem considerando a maior praticidade. A proposta de manejo deste estudo também sugere a retirada contínua do Aguapé após floração ocasionada por aumento abrupto da temperatura, de modo a manter seu crescimento máximo sustentável e otimizar seu potencial fitorremediador.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Alves, E., Cardoso, L. R., Scavroni, J., L. R., Ferreira, L. C., Boaro, C. S. F., Caetano, A. C. (2003) Avaliações Fisiológicas e Bioquímicas de Plantas de Aguapé (*Eichhornia crassipes*) Cultivadas Com Níveis Excessivos de Nutrientes. Planta Daninha, Viçosa-MG, 21: 27-35.
- Angelini, R. (1999) Ecossistemas e Modelagem ecológica. In: Marcelo L M Pompeo. (Org.). Perspectivas da Limnologia no Brasil. 1ed.São Luís (MA): Gráfica e Editora União, 1:1-19.
- Aoyama, I., and Nishizake, H. (1993) Uptake of nitrogen and phosphate, and water purification by water hyacinth, *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms. Water Sci. and Tech., 28:47-53.
- Bianchini, I., Jr. (2003) Modelos de crescimento e decomposição de macrófitas aquáticas. Em: Thomaz, S. M., Bini, L. M. (eds), Ecologia e manejo de macrófitas aquáticas. Eduem, Maringa, 85-126.

- Byrne, M., Hill, M., Robertson, M., King, A., Jadhav, A., Katembo, N., Wilson, J., Brudvig, R., Fisher, J. (2010) Integrated Management of Water Hyacinth in South Africa: Development of integrated management plan for water hyacinth control, combining biological control, herbicidal control and nutrient control, tailored to climatic regions of South Africa. Report to the Water Research Commission, Pretoria, South Africa.
- Casabianca, M. L. C. (1985) *Eichhornia crassipes*: Production in Repeated Harvest Systems on Waste Water in the Languedoc Region (France). *Biomass*, 7:135-160.
- Center, T. D., Spencer, N. R. (1981) The phenology and growth of water hyacinth (*Eichhornia crassipes* (Mart. Solms) in a eutrophic north-central Florida lake. *Aquatic Botany*, 10:1-32.
- Cha, S., Park, C. (2007) The utilization of Google Earth images as reference data for the multitemporal land cover classification with MODIS data of North Korea, *Korean J. Remote Sens*, 23: 483-491.
- DA Silva, R. R. (2007) Aplicação de Imagens Orbitais de Alta Resolução Espacial no Cadastro Técnico Rural Multifinalitário. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.
- Dube, T., Mutanga , O., Sibanda, M., Bangamwabo, V., Shoko, C. (2017) Evaluating the performance of the newly-launched Landsat 8 sensor in detecting and mapping the spatial configuration of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) in inland lakes, Zimbabwe. *Physics and Chemistry of the Earth*, 1-11.
- Ebrahim, E. M., Shaltout, K. H. (2016) Growth dynamics of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*): a modeling approach. *Rend. Fis. Acc. Lincei.*, 28: 169-181.
- Esteves, F. A. (2011) Fundamentos de Limnologia. 3<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro: Interciência.
- Florenzano, T.G. (2008) Os Satélites e suas Aplicações. 1 ed São José dos Campos, SP. SindCT.
- Gutiérrez, E. L., Ruiz, E. F., Uribe, E. G., Martínez, J. M. (2001) Biomass and Productivity of Water Hyacinth and Their Application in Control Programs. *In* M.H. Julien, M.P. Hill, T.D. Centre & Ding Jianqing (eds), Biological and integrated control of water hyacinth, *Eichhornia crassipes*, ACIAR Proceedings 102.

- Hu, W., Salomonsen, J., Xu, F. L., Pu, P. (1998) A model for the effects of water hyacinths on water quality in an experiment of physico-biological engineering in Lake Taihu, China. *Ecol. Model*, 107:171-188.
- Jackson, L. J., Trebitz, A. S., Cottingham, K. L. (2000) An Introduction to the Practice of Ecological Modeling, *BioScience*, 50:694-706.
- Jr., C. R. F., Ferreira, T. F., Marques, D. M. (2009) Modelagem Ecológica em ecossistemas aquáticos. Oficina de Textos. São Paulo.
- Petrucio, M. M., Esteves, F. A. (1999) Uptake rates of Nitrogen and Phosphorus in The Water by *Eichhornia crassipes* and *Salvinia auriculata*, *Rev. Brasil. Biol.*, 60(2):229-236.
- Qian, T. (2012) Study on the blue-green algal bloom control in Lake Taihu, Jiangsu, China. M.Eng.thesis, Engineering. Lund University, Sweden.
- Lopes, E. E. (2009) Proposta metodológica para validação de imagens de alta resolução do Google Earth para a produção de mapas. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Florianópolis, RS.
- Lorber, M.N., Mishoe, J.W., Reddy, P.R. (1984) Modelling and analysis of waterhyacinth biomass. *Ecological Modelling*, 24:61-77.
- Mahujchariyawong, J., Ikeda, S. (2001) Modelling of environmental phytoremediation in eutrophic river - the case of water hyacinth harvest in Tha-chin River, Thailand. *Ecological Modelling*, 142:121-134.
- Malveaux, C. (2013) Coastal Plants for Biofuel Production and Coastal Preservation. Thesis- Louisiana State University, EUA.
- Martins, D. F. F., Moura, M. F. V., Loiola, M. I. B., Souza, L. Di., Barbosa, K. M. B., Silva, Medeiros, J. F. (2011) Temporal and physiological influence of the absorption of nutrients and toxic elements by *Eichhornia crassipes*. *J. Environ. Monit.*, 13:274-279.
- Meneses, P.R., Almeida, T. (2012) Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto. 1ª. ed. Brasília, CNPq.
- Mitsch, W.J., (1975) Systems analysis of nutrient disposal in cypress wetlands and lake ecosystems in Florida. PhD Diss., University of Florida, Gainesville, FL.
- Nogueira, S. F. (2003) Balanço de nutrientes e avaliação de parâmetros biogeoquímicos em áreas alagadas construídas para o tratamento de esgoto. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, SP.

- Nowlin, W. H., Evarists, J. L., Vanni, M. J. (2005) Release rates and potential fates of nitrogen and phosphorus from sediments in a eutrophic reservoir. *Freshwater Biology*, 50: 301-322.
- Polomski, R. F., Taylor, M. D., Bielenberg, D. G., Bridges, W. C., Klaine, S. J., Whitwell, T. (2009) Nitrogen and Phosphorus Remediation by Three Floating Aquatic Macrophytes in Greenhouse-Based Laboratory-Scale Subsurface Constructed Wetlands, *Water Air Soil Pollut*, 197:223-232.
- Reddy, K. R., Agami, M., Tucker, J. C. (1990) Influence of phosphorus on growth and nutrient storage by water hyacinth (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms) plants, *Aquatic Botany*, 37:355-365.
- Ruiz, A. (2016) O legado do El Niño 2015. *Climatempo*. Disponível em: <https://www.climatempo.com.br/noticia/2016/09/22/o-legado-do-el-nino-2015-0199>.
- Stevens, M. H. H. (2009) *A Primer of Ecology with R*. Springer. New York.
- Sun, L., Zhu, Z. (2014) An Equal Sustainable Area Model for Harvesting *Eichhornia crassipes* in Environmental Phytoremediation. *Applied Mechanics and Materials Online*, 522-524: 569-572.
- Turangan, T. M. B., Leksono, A. S., Soemarno<sup>3</sup>, Arfiati, D. (2014) Invasion of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) in the surface water of Tondano lake. *Journal of current research in science*, 2:244-250.
- von Sperling, E. (1997) The process of biomass formation as the key point in the restoration of tropical eutrophic lakes. *Hydrobiologia*, 342/343: 351-354.
- Wilson, J. R., Reest, M., Holst, N., Thomas, M.B., Hill, G. (2001) Water Hyacinth Population Dynamics. In: M.H. Julien, M.P. Hill, T.D. Centre & Ding Jianqing (eds), *Biological and integrated control of water hyacinth, Eichhornia crassipes*, ACIAR Proceedings 102.
- Wilson, J.R., Holst, N., Rees, M. (2005) Determinants and patterns of population growth in water hyacinth. *Aquat. Bot.*, 81:51-67.
- Xie, Y., Wen, M., Yu, D., Li, Y. (2004) Growth and resource allocation of water hyacinth as affected by gradually increasing nutrient Concentrations, *Aquatic Botany*, 79:257-266.
- ZhiYong, Z., Chu, Z. J., Qin, L. H., Zhou, C. Z., Gen, C. L., Hua, Y. S. (2010) Role of *Eichhornia crassipes* uptake in the removal of nitrogen and phosphorus from eutrophic waters, *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 18:152-157.

## **DISCUSSÃO GERAL**

A eutrofização artificial é um dos grandes problemas ambientais causados pelo uso e ocupação do solo em áreas de entorno de corpos hídricos e os ecossistemas tropicais carecem atenção por serem menos estudados e haver escassez de informações relevantes à sua proteção (Branco et al., 2007).

A Lagoa do Vigário foi durante muito tempo negligenciada e poucas pesquisas foram desenvolvidas com o intuito de investigar seu estado de eutrofização e seus componentes bióticos e abióticos. Apesar de iniciativas terem sido tomadas recentemente para sua revitalização, existe pouco dado científico e do poder público sobre o estado da lagoa, como por exemplo, as espécies que ocorrem, dados históricos sobre a qualidade da água e do sedimento, estudos da viabilidade da atividade pesqueira, etc. A falta de informações sobre a lagoa além de representar um risco, considerando que é um ecossistema utilizado pela população, dificulta a elaboração de planos mais completos para a sua recuperação.

Considerando que as principais etapas para a recuperação de um ecossistema são o diagnóstico inicial sobre seu estágio de degradação, a avaliação e aplicação de alternativas para a sua recuperação e o posterior monitoramento (Braga et al., 2002), o presente estudo contribui com a etapa inicial de diagnóstico da qualidade da água e determinação do estado hipereutrofizado da Lagoa do Vigário, além de oferecer uma alternativa de estratégia corretiva através da fitorremediação por Aguapé.

Apesar da habilidade de fitorremediação do Aguapé ser conhecida e estudada há muitas décadas, a maioria dos trabalhos desenvolvidos se detém a determinar a absorção de nutrientes por esta planta, a partir de medidas das concentrações destes poluentes nos compartimentos hídrico e ou vegetal (Diniz et al., 2005; Palma-Silva et al., 2012; Wang et al., 2013). Estudos que indicam estratégias claras para o monitoramento do crescimento e coleta do Aguapé para fins de fitorremediação são escassos.

Neste trabalho ficou claro que a temperatura foi determinante para o crescimento do Aguapé avaliado tanto na determinação de sua biomassa nos períodos seco e úmido de 2015 (capítulo 1) quanto através da demarcação de sua cobertura que aumentou na lagoa após pico de temperatura no início de 2015 (capítulo 2). Em contrapartida, a concentração de nutrientes não influenciou a

variação de cobertura e biomassa do Aguapé. Greco e Freitas (2002) em um experimento realizado no reservatório da Pampulha-Mg também verificaram maior crescimento do Aguapé em meses mais quentes e a concentração de nutrientes não influenciou tal crescimento. Sendo assim, apesar de modelos apontarem para a importância conjunta da concentração de nutrientes e temperatura para o crescimento do Aguapé, na Lagoa do Vigário a temperatura pode ser considerada como o principal fator já que as concentrações de N e P já extrapolaram os limites ótimos de crescimento e de saturação para assimilação pelo Aguapé. Tal resultado pode facilitar a logística para o monitoramento inicial do crescimento desta planta e seu manejo, tendo em vista que a temperatura é uma variável mais fácil de ser mensurada e prevista.

É importante ressaltar ainda que para a efetividade da técnica de fitorremediação por Aguapé na Lagoa do Vigário se faz necessário que este ecossistema deixe de receber cargas alóctones de nutriente, tendo em vista que a ineficácia de medidas de controle da eutrofização a longo prazo se dá principalmente por continuidade na emissão de contaminantes (Mendes, 2017).

Faz-se necessária a continuidade dos estudos sobre a Lagoa do Vigário e a tomada de decisão dos órgãos responsáveis sobre o uso das informações já disponíveis para a recuperação da lagoa.

## **CONCLUSÕES**

Apesar de ser um corpo hídrico utilizado para atividades como pesca e recreação no seu entorno, a Lagoa do Vigário é um ecossistema visivelmente eutrofizado e as concentrações de nutrientes em suas águas o classificam como hipereutrófico e impróprio para atividades de contato primário e secundário. Os bancos de *E. crassipes*, atualmente sem controle, ao mesmo tempo em que trazem prejuízos ao ecossistema também acumulam elevadas concentrações de nutrientes em suas partes aéreas e radiculares que podem ser retirados do sistema em eventos de coleta desta planta para mitigar as condições eutróficas da lagoa.

A partir deste estudo ficou claro que, atualmente o crescimento do Aguapé na Lagoa do Vigário é influenciado principalmente por variações de temperatura e o monitoramento desta variável pode ser usado para orientar a necessidade de coleta desta planta. Dados de cobertura dos bancos de Aguapé na lâmina d'água podem

ser usados para a obtenção da curva de crescimento logístico e determinação do momento ideal para a coleta a fim de manter o máximo crescimento sustentável da *E. crassipes* e sua maior absorção de nutrientes. Na Lagoa do Vigário, em poucos meses após elevação abrupta da temperatura a cobertura do Aguapé atingiu valores ideais para a coleta, que se realizada diariamente por período relativamente curto de tempo, poderia contribuir para a exportação de consideráveis quantidades de N e P da lagoa.

O presente estudo e a continuidade do mesmo pode contribuir como um ponto de partida para a mitigação das condições hipereutróficas da Lagoa do Vigário, a partir do manejo da cobertura do Aguapé, medida corretiva pouco invasiva e relativamente fácil de ser aplicada.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Branco, C. W. C. (2007) Restoration of shallow lakes by nutrient control and biomanipulation - the successful strategy varies with lake size and climate. *Hydrobiologia*, 581(1), 269-285.
- Braga, B., Hespanhol, I., Conejo, J. G. L., Barros, M. T. L., Veras Júnior, M.S.; Porto, M. F. do A., Nucci, N. L. R., Juliano, N. M. A., Eiger, S. (2002) Introdução à engenharia ambiental. São Paulo : Pearson Prentice Hall, 305.
- Diniz, C. R., Ceballos, B. S. O., Barbosa, J. E. L., Koning, A. (2005) Uso de macrófitas aquáticas como solução ecológica para melhoria da qualidade de água. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 9:226-230.
- Esteves, F. A. (2011) Fundamentos de Limnologia. 3<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro: Interciência.
- Greco, M. K. B., Freitas, J. R. (2002) On two methods to estimate production of *Eichhornia crassipes* in the eutrophic Pampulha reservoir (MG, Brazil), *Braz. J. Biol.*, 62(3): 463-471.
- Mendes, G. B. Métodos para recuperação de ecossistemas lacustres eutrofizados e sugestões para a recuperação da Lagoa do Vigário, Campos dos Goytacazes – RJ. (Monografia) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense *campus* Campos-Guarus. Campos dos Goytacazes, RJ.
- Nowlin, W. H., Evarists, J. L., Vanni, M. J. (2005) Release rates and potential fates of nitrogen and phosphorus from sediments in a eutrophic reservoir. *Freshwater Biology*, 50:301-322.

- Palma-Silva P. C., Albertoni, E. F., Trindade, C. R. T., Furlanetto, L. M., Acosta, M. C. (2012) Uso de *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms para Fitorremediação de Ambientes Eutrofizados Subtropicais no Sul do Brasil. *Perspectiva*, Erechim, 36:73-81.
- Wang, Z., Zhang, Z., Zhang, Y., Zhan, J., Yan, S., Guo, J. (2013) Nitrogen removal from Lake Caohai, atypical ultra-eutrophic lake in China with large scale confined growth of *Eichhornia crassipes*. *Chemosphere*, 92:177-183.

APÊNDICE I - Imagens da Lagoa com Vigário referentes aos anos de 2014, 2015 e 2016 com as áreas cobertas pelos bancos de Agupé demarcadas em amarelo. Os espaços em vermelho correspondem a áreas vazias ou cobertas por outro tipo de macrófitas.

