

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP  
CENTRO DE AQUICULTURA DA UNESP

**Protocolo tecnológico para gestão da  
capacidade de suporte ambiental e outorga  
da produção de tilápias em reservatório  
neotropical sob diferentes cenários  
climáticos, zootécnicos e ambientais**

**Elisa Maia de Godoy**

Jaboticabal, São Paulo  
2022

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP  
CENTRO DE AQUICULTURA DA UNESP

**Protocolo tecnológico para gestão da  
capacidade de suporte ambiental e outorga  
da produção de tilápias em reservatório  
neotropical sob diferentes cenários  
climáticos, zootécnicos e ambientais**

**Elisa Maia de Godoy**

**Orientador: Dr. Guilherme Wolff Bueno  
Coorientadora: Dra. Tavani Rocha Camargo**

Dissertação apresentada ao  
programa de Pós-Graduação em  
Aquicultura do Centro de Aquicultura  
da UNESP - CAUNESP, como parte  
dos requisitos para obtenção do título  
de Mestre.

Jaboticabal, São Paulo  
2022

G589p

Godoy, Elisa Maia de

Protocolo tecnológico para gestão da capacidade de suporte ambiental e outorga da produção de tilápias em reservatório neotropical sob diferentes cenários climáticos, zootécnicos e ambientais / Elisa Maia de Godoy. -- Jaboticabal, 2022

116 f. : il., tabs., fotos

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: Guilherme Wolff Bueno

Coorientadora: Tavani Rocha Camargo

1. Aquicultura. 2. Águas da União. 3. Capacidade de suporte. 4. Mudanças climáticas. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

### CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:** Protocolo tecnológico para gestão da capacidade de suporte ambiental e outorga da produção de tilápias em reservatório neotropical sob diferentes cenários climáticos, zootécnicos e ambientais

**AUTORA:** ELISA MAIA DE GODOY

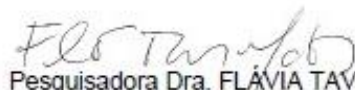
**ORIENTADOR:** Dr. GUILHERME WOLFF BUENO

**COORIENTADORA:** Dra. TAVANI ROCHA CAMARGO

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em AQUICULTURA, pela  
Comissão Examinadora:



Prof. Dr. GUILHERME WOLFF BUENO (Participação Virtual)  
Facul. de Ciências Agrárias do Vale do Ribeira – FCAVR, Campus de Registro - UNESP, Registro - SP



Pesquisadora Dra. FLÁVIA TAVARES DE MATOS (Participação Virtual)  
Núcleo Temático de Pesca e Aquicultura / Embrapa Pesca e Aquicultura, Palmas - TO



Prof. Dr. GIANMARCO SILVA DAVID (Participação Virtual)  
Rólo Regional Centro Oeste / Agência Paulista de Tecnologia do Agronegócio, Bauru - SP

Jaboticabal, 21 de fevereiro de 2022

## SUMÁRIO

|                                                                                                                                                                                      |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS .....                                                                                                                                                  | 8         |
| LISTA DE FIGURAS .....                                                                                                                                                               | 11        |
| LISTA DE TABELAS .....                                                                                                                                                               | 12        |
| AGRADECIMENTOS .....                                                                                                                                                                 | 14        |
| DEDICATÓRIA.....                                                                                                                                                                     | 15        |
| APOIO FINANCEIRO E INSTITUCIONAL .....                                                                                                                                               | 16        |
| 1. INTRODUÇÃO GERAL.....                                                                                                                                                             | 17        |
| 2. OBJETIVOS.....                                                                                                                                                                    | 24        |
| 3. REFERÊNCIAS .....                                                                                                                                                                 | 25        |
| <b>1. CAPÍTULO I .....</b>                                                                                                                                                           | <b>31</b> |
| <b>PATENTE DE INVENÇÃO: PROCESSO DE CÁLCULO DA CAPACIDADE DE SUPORTE AMBIENTAL PARA PRODUÇÃO DE PESCADOS E OUTORGA EM ÁGUAS CONTINENTAIS DA UNIÃO.....</b>                           | <b>31</b> |
| Resumo:.....                                                                                                                                                                         | 31        |
| 1.1. Campo da invenção .....                                                                                                                                                         | 32        |
| 1.2. Estado da técnica.....                                                                                                                                                          | 32        |
| 1.3. Breve descrição da invenção: processo de estruturação do protocolo tecnológico.....                                                                                             | 35        |
| 1.4. Desenvolvimento da proposta do protocolo .....                                                                                                                                  | 38        |
| Etapa 1: <i>Benchmarking</i> dos processos de certificação e atributos ambientais para produção de pescado .....                                                                     | 38        |
| Etapa 2. <i>Benchmarking</i> das abordagens para avaliação da capacidade de suporte ambiental para produção de pescado baseado no lançamento e concentração de fósforo na água ..... | 42        |
| Etapa 3: Definição dos critérios que subsidiaram a escolha das equações e modelos a serem utilizados no protocolo.....                                                               | 42        |
| Etapa 4: Sequência das equações e modelos matemáticos utilizados.....                                                                                                                | 43        |
| 1.5. O Protocolo Tecnológico: etapas do processo de desenvolvimento e aplicação.....                                                                                                 | 45        |
| Etapa 1: Análises ambientais gerais.....                                                                                                                                             | 45        |
| 1.1. Dados secundários .....                                                                                                                                                         | 45        |
| 1.2. Dados <i>in loco</i> e analisados em laboratório .....                                                                                                                          | 45        |
| Etapa 2: Mensuração do potencial lançamento de resíduos fosfatados no ambiente aquático.....                                                                                         | 47        |
| 2.1. Previsão da biomassa de pescado à ser produzida no empreendimento por meio do modelo do Coeficiente de Crescimento Térmico (TGC) .....                                          | 47        |

|                                                                                                                                                                                                         |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.2. Modelagem bioenergética nutricional para definição do lançamento de efluentes oriundos da produção aquícola.....                                                                                   | 48        |
| Etapa 3: Determinação dos limites da capacidade de suporte ambiental para produção de pescados com base na concentração de fósforo na água.....                                                         | 50        |
| 3.1. Capacidade de suporte ambiental baseada na concentração e lançamento de fósforo na água (CSAp) durante a produção de tilápia sob diferentes cenários climáticos, zootécnicos e ambientais.....     | 50        |
| 3.2. Avaliação do Índice de Estado Trófico (IET) da água durante a produção aquícola.....                                                                                                               | 54        |
| Etapa 4: Análises para tomada de decisão e gestão da outorga para produção de tilápia em águas da União .....                                                                                           | 55        |
| 4.1 Probabilidade da ocorrência dos cenários da CSAp por meio da Simulação estatística de Monte Carlo (SMC).....                                                                                        | 55        |
| 1.6. REIVINDICAÇÕES.....                                                                                                                                                                                | 57        |
| <b>2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                                                                                                                                                              | <b>60</b> |
| <b>CAPÍTULO II.....</b>                                                                                                                                                                                 | <b>65</b> |
| <b>NOVA ABORDAGEM PARA MODELAGEM DA CAPACIDADE DE SUPORTE AMBIENTAL EM RESERVATÓRIO NEOTROPICAL SOB DIFERENTES CONDIÇÕES CLIMÁTICAS E DE PRODUÇÃO DA TILÁPIA DO NILO .....</b>                          | <b>65</b> |
| Resumo:.....                                                                                                                                                                                            | 65        |
| Abstract: .....                                                                                                                                                                                         | 66        |
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>                                                                                                                                                                              | <b>66</b> |
| <b>2. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>                                                                                                                                                                       | <b>68</b> |
| 2.1. Área de estudo .....                                                                                                                                                                               | 68        |
| 2.2. Levantamento de dados secundários, históricos e das condicionantes ambientais.....                                                                                                                 | 71        |
| 2.3. Levantamento de dados <i>in loco</i> e análise em laboratório .....                                                                                                                                | 71        |
| 2.3.1. Qualidade da água .....                                                                                                                                                                          | 71        |
| 2.3.2. Dieta e alimentação .....                                                                                                                                                                        | 71        |
| 2.3.3. Desempenho zootécnico .....                                                                                                                                                                      | 72        |
| 2.4. Mensuração do potencial lançamento de resíduos no ambiente aquático ..                                                                                                                             | 72        |
| 2.4.1. Previsão da biomassa de pescado à ser produzida no empreendimento por meio da Modelagem Térmica de Crescimento Corporal (TGC).....                                                               | 72        |
| 2.4.2. Modelagem bioenergética nutricional para definição do potencial lançamento de fósforo na água oriundo da piscicultura.....                                                                       | 73        |
| 2.4.1. Simulação da carga de resíduos da produção de tilápia sob diferentes cenários climáticos.....                                                                                                    | 74        |
| 2.5. Determinação da capacidade de suporte ambiental baseada na concentração de fósforo na água (CSAp) durante a produção de tilápia sob diferentes cenários climáticos, zootécnicos e ambientais ..... | 75        |

|                                                                                                                                                                                                                  |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 2.6. Avaliação do Índice de Estado Trófico (IET) da água durante a produção aquícola .....                                                                                                                       | 78         |
| 2.7. Análises para tomada de decisão e gestão da outorga para produção de tilápia no reservatório de Chavantes .....                                                                                             | 78         |
| <b>2.7.1.</b> Probabilidade da ocorrência dos cenários da CSAp por meio da Simulação de Monte Carlo (SMC) .....                                                                                                  | 78         |
| <b>3. RESULTADOS .....</b>                                                                                                                                                                                       | <b>79</b>  |
| 3.1. Dados secundários, históricos e condicionantes ambientais .....                                                                                                                                             | 79         |
| 3.2. Dados <i>in loco</i> e laboratório .....                                                                                                                                                                    | 81         |
| <b>3.2.1.</b> Qualidade da água .....                                                                                                                                                                            | 81         |
| <b>3.2.2.</b> Dieta e alimentação .....                                                                                                                                                                          | 83         |
| <b>3.2.3.</b> Desempenho zootécnico .....                                                                                                                                                                        | 83         |
| 3.3. Mensuração do potencial lançamento de resíduos no ambiente aquático ..                                                                                                                                      | 84         |
| <b>3.3.1.</b> Previsão da biomassa de pescado à ser produzida no empreendimento por meio de Modelagem Térmica de Crescimento Corporal (TGC) .....                                                                | 84         |
| <b>3.3.2.</b> Modelagem bioenergética nutricional para definição do lançamento de fósforo oriundo da piscicultura .....                                                                                          | 85         |
| 3.4. Determinação da capacidade de suporte ambiental para produção de tilápia com base na concentração e lançamento de fósforo na água (CSAp) sob diferentes cenários climáticos, zootécnicos e ambientais ..... | 89         |
| 3.5. Avaliação do Índice de Estado Trófico (IET) .....                                                                                                                                                           | 93         |
| 3.6. Análises para tomada de decisão e gestão da outorga para produção de tilápia no reservatório de Chavantes .....                                                                                             | 93         |
| <b>3.6.1.</b> Probabilidade da ocorrência dos cenários da CSAp por meio da Simulação Monte Carlo (SMC) .....                                                                                                     | 93         |
| <b>4. DISCUSSÃO .....</b>                                                                                                                                                                                        | <b>96</b>  |
| <b>5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                                                                                                                                                                       | <b>105</b> |
| <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>                                                                                                                                                                                | <b>116</b> |

## LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

|        |                                                            |
|--------|------------------------------------------------------------|
| [P]    | Concentração de fósforo na água                            |
| A      | Área de superfície da água                                 |
| ANA    | Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico              |
| B      | Produção autorizável de peixes                             |
| BF     | Biomassa final                                             |
| CDA    | Coeficiente de digestibilidade aparente                    |
| CE     | Condutividade elétrica                                     |
| CONAMA | Conselho Nacional do Meio Ambiente                         |
| CS     | Capacidade de suporte                                      |
| CSA    | Capacidade de suporte ambiental                            |
| CSAp   | Capacidade de suporte ambiental para fósforo               |
| d      | Dias                                                       |
| EA     | Eficiência alimentar                                       |
| EB     | Energia bruta                                              |
| ED     | Energia digestível                                         |
| GPD    | Ganho de peso diário                                       |
| HeE    | Metabolismo basal                                          |
| HiE    | Incremento de calor da alimentação                         |
| IE     | Ingestão energética                                        |
| IET    | Índice de Estado Trófico                                   |
| IP     | Ingestão de fósforo                                        |
| JV     | Fase juvenil                                               |
| L      | Lipídio                                                    |
| La     | Carga anual de fósforo no reservatório                     |
| LD     | Lipídio digestível                                         |
| Lr     | Carga máxima de fósforo autorizável em todo o reservatório |
| MO     | Mortalidade                                                |
| MS     | Matéria seca                                               |
| MSD    | Matéria seca digestível                                    |
| N      | Nitrogênio                                                 |
| OD     | Oxigênio dissolvido                                        |

|       |                                                             |
|-------|-------------------------------------------------------------|
| OEMAS | Órgãos Estaduais de Meio Ambiente                           |
| P     | Fósforo total                                               |
| Pa    | Fósforo lançado na água                                     |
| PB    | Proteína bruta                                              |
| Pd    | Fósforo digestível                                          |
| PD    | Proteína digestível                                         |
| Pf    | Peso corporal final                                         |
| PF    | Fósforo nas fezes                                           |
| pH    | Potencial hidrogeniônico                                    |
| Pi    | Peso corporal inicial                                       |
| PID   | Fósforo ingerido digestível                                 |
| PM    | Peso de mercado                                             |
| Pp    | Fósforo retido no peixe                                     |
| Pr    | Fósforo na ração                                            |
| PRA   | Resíduos da perda de ração aparente durante a alimentação   |
| R.A.  | Reservatório de acumulação                                  |
| RD    | Resíduos dissolvidos                                        |
| RE    | Energia retida                                              |
| REP   | Relação de eficiência proteica                              |
| Rp    | Coeficiente de retenção de fósforo                          |
| RP    | Retenção de fósforo                                         |
| RS    | Resíduos sólidos                                            |
| RS    | Resíduos sólidos                                            |
| RSS   | Soma dos quadrados dos resíduos                             |
| RT    | Resíduos totais                                             |
| SA    | Salinidade                                                  |
| SIN   | Sistema Interligado Nacional                                |
| SIPOT | Sistema de Informações do Potencial Hidrelétrico Brasileiro |
| SMC   | Simulação Monte Carlo                                       |
| Ta    | Temperatura da água                                         |
| Tar   | Temperatura do ar                                           |
| TCA   | Taxa de conversão alimentar                                 |
| Td    | Tempo de residência da água                                 |
| TGC   | Coeficiente de crescimento térmico                          |

|        |                                           |
|--------|-------------------------------------------|
| TR     | Transparência da água                     |
| UE     | Energia urinária                          |
| UHE    | Usina hidrelétrica                        |
| Z      | Excreção branquial                        |
| z      | Profundidade média do reservatório        |
| $\rho$ | Taxa de renovação da água do reservatório |

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO I

**Figura 1.** Processo de desenvolvimento do protocolo tecnológico para identificação e definição dos critérios e das equações à serem utilizadas para gestão da capacidade de suporte ambiental. ....36

**Figura 2.** Protocolo tecnológico para gestão da capacidade de suporte ambiental com base na concentração e no lançamento de fósforo na água para tomada de decisão e gestão da outorga para produção de tilápia em empreendimentos aquícolas instalados em águas da União.....37

**Figura 3.** Estrutura dos cenários da CSAp com simulações da carga máxima de fósforo autorizável no reservatório (kg/ano) e máxima produção autorizável de peixes (t/ano). ....52

**Figura 4.** Mapa demonstrativo da probabilidade da ocorrência dos cenários da CSAp e da máxima produção autorizável de tilápia em um reservatório (t/ano) considerando o lançamento de fósforo na água (kg/t). ....56

### CAPÍTULO II

**Figura 1.** Vista aérea da fazenda de produção comercial da tilápia em sistemas de tanques-rede em Chavantes, São Paulo, Brasil. Fonte: Piscicultura Cristalina. ...69

**Figura 2.** Ilustração da morfologia dendrítica do reservatório de Chavantes e localização da área de estudo (Piscicultura Cristalina). Fonte: Organização da autora.....70

**Figura 3.** Estrutura dos cenários da CSAp em diferentes situações de operação do reservatório e com variação de dados zootécnicos, climáticos e ambientais. ....76

**Figura 4.** Curva de crescimento corporal da tilápia observada na piscicultura e estimada pelo algoritmo (TGC2). ....85

**Figura 5.** Mapa da probabilidade da ocorrência dos cenários da CSAp e da máxima produção autorizável de tilápia no reservatório de Chavantes (SP) considerando o lançamento de fósforo na água.....95

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO I

|                                                                                                                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 1.</b> Benchmarking dos processos de certificação ambiental e condicionantes pontuados pelos órgãos brasileiros para aquicultura em lagos e reservatórios com foco na geração de efluentes na água. ....  | 39 |
| <b>Tabela 2.</b> Benchmarking das abordagens utilizadas para avaliação da capacidade de suporte do ambiente aquático continental para produção de pescados. ....                                                    | 42 |
| <b>Tabela 3.</b> Modelos e equações selecionadas para gestão da capacidade de suporte ambiental do fósforo na água (CSAp) para tomada de decisão e gestão da outorga da produção de tilápia em águas da União. .... | 44 |
| <b>Tabela 4.</b> Valores do Índice de Estado Trófico e respectivas classes de trofia. ....                                                                                                                          | 55 |

### CAPÍTULO II

|                                                                                                                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 1.</b> Características morfométricas e hidrológicas do reservatório neotropical de Chavantes, São Paulo, Brasil. ....                                                                              | 70 |
| <b>Tabela 2.</b> Valores do Índice de Estado Trófico e respectivas classes de trofia. ...                                                                                                                    | 78 |
| <b>Tabela 3.</b> Valores das variáveis estocásticas de entrada na simulação de Monte Carlo (SMC) e tipo de distribuição dos valores para todos os cenários produtivos. ....                                  | 79 |
| <b>Tabela 4.</b> Dados ambientais secundários para análise e acompanhamento no campo durante a produção de tilápia no reservatório de Chavantes - SP. ....                                                   | 80 |
| <b>Tabela 5.</b> Condicionantes ambientais exigidas pelos Oemas no processo de licenciamento ambiental para aquicultura em águas continentais da União. ....                                                 | 80 |
| <b>Tabela 6.</b> Valores médios dos parâmetros da qualidade da água durante um ciclo de produção de <i>O. niloticus</i> na área aquícola no reservatório de Chavantes, São Paulo. ....                       | 82 |
| <b>Tabela 7.</b> Composição química e digestibilidade de nutrientes das dietas comerciais utilizadas durante as três fases de produção do cultivo de tilápia no reservatório de Chavantes, SP. ....          | 83 |
| <b>Tabela 8.</b> Parâmetros de desempenho da tilápia em tanques-rede na área aquícola no reservatório de Chavantes para as fases de produção Juvenil I (JVI), Juvenil II (JVII) e peso de mercado (PM). .... | 84 |
| <b>Tabela 9.</b> Exponenciais e coeficientes de crescimento térmico por fase de produção da <i>O. niloticus</i> em tanques-rede no reservatório neotropical. ....                                            | 84 |

**Tabela 10.** Rações de baixa, média e alta densidade energética com diferentes níveis de fósforo utilizadas para simulação da liberação de resíduos no meio aquático. ....87

**Tabela 11.** Simulações da liberação de resíduos no meio aquático para a produção de uma tonelada de *Oreochromis niloticus* em tanques-rede na área aquícola no reservatório de Chavantes sob diferentes cenários climáticos e zootécnicos.....88

**Tabela 12.** Cenários da capacidade de suporte ambiental para fósforo (CSAp) com simulações da carga máxima de fósforo e a produção máxima autorizável de peixes no reservatório de Chavantes e na área aquícola estudada, sob diferentes cenários climáticos e zootécnicos. ....90

**Tabela 13.** Índice de Estado Trófico da água durante o ciclo de produção da tilápia na área aquícola estudada no reservatório de Chavantes, São Paulo. ....93

**Tabela 14.** Análise de Simulação Monte Carlo (SMC) com 10.000<sup>1</sup> interações aleatórias, para as variáveis de fósforo lançado na água (Pa) e a produção máxima de peixes (B) nos cenários padrão Sipot e Fatura R.A. ....94

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela vida, pela saúde.

Aos meus pais, Vania e Edson, pelo amor e apoio incondicional e por “serem” verdadeiramente presentes em minha vida. Conheço as batalhas diárias e a trajetória ao longo dos anos para proporcionar aos seus filhos uma vida melhor, com mais oportunidades. Admiro, respeito e me inspiro! Ao meu irmão, Arthur, pelo carinho e por todos os conselhos ao longo dessa jornada, eles foram fundamentais para meu desenvolvimento pessoal e profissional, sobretudo para a tomada de decisões.

Ao meu namorado, Orlando, pela parceria, amor e cuidado. Obrigada pela paciência e compreensão nos momentos difíceis, por me apoiar nas decisões e caminhar ao meu lado!

Ao meu orientador, Dr. Guilherme Wolff Bueno, por acreditar no meu potencial e investir seu tempo no meu desenvolvimento. Um verdadeiro mentor. Obrigada pelo apoio, incentivo, pela amizade e por me desafiar a cada etapa do processo. À minha coorientadora, Dra. Tavani Rocha Camargo, por me auxiliar no desenvolvimento deste trabalho, compartilhando seus conhecimentos científicos e conselhos ao longo do caminho, eles foram realmente valiosos. Agradeço ao nosso time de trabalho do Laboratório de Inovação e Bioeconomia Aplicada na Aquicultura – BE<sup>4</sup>, os quais tenho a felicidade de chamar de amigos! Obrigada pela parceria e apoio.

A todos os amigos, presentes que a vida me deu. Obrigada pela amizade verdadeira (cada vez mais rara), pela sinceridade, pelos sorrisos e por “serem” tão próximos mesmo distantes.

A Dra. Flávia Tavares de Matos e ao Dr. Gianmarco Silva David por aceitarem serem membros da banca examinadora deste trabalho, pelo tempo e por todas as considerações para aprimorar essa dissertação. Por fim, deixo meu agradecimento aos professores e colaboradores do Centro de Aquicultura da Unesp (Caunesp) por todo o esforço dedicado para que fosse possível a realização desse mestrado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## DEDICATÓRIA

Dedico com todo meu amor aos meus pais, Vania e Edson, que realizaram com excelência a difícil tarefa de educar; e ao meu tio, José Gruber (em memória), que tem um lugar especial em meu coração.

“Mar calmo nunca fez bom marinheiro”.

(Ditado popular)

## APOIO INSTITUCIONAL E FINANCEIRO

Agradecemos a todos os colegas e *stakeholders* da cadeia produtiva da tilapicultura brasileira que compartilharam ideias e contribuíram com informações essenciais para este artigo. O desenvolvimento desta dissertação contou com o apoio fundamental da Piscicultura Cristalina Ltda, do Centro de Aquicultura da UNESP - CAUNESP, da Associação Brasileira da Piscicultura – PeixeBR, da Agência Paulista de Tecnologias dos Agronegócios – APTA, da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA por meio do Departamento de Desenvolvimento e Ordenamento da Aquicultura - DEPOA/SAP. Além do apoio da Agência Nacional de Águas – ANA e do Departamento de Ciências Agrárias e Aquícolas, Faculdade de Ciências, Universidade de Magallanes, Chile e do Departamento de Pesca e Aquicultura da *Food and Agriculture Organization of the United Nations* – FAO/ONU.

Agradecemos a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES (Código de Financiamento 001) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pelo fornecimento das bolsas pesquisa científica que possibilitaram a realização do presente trabalho (CAPES n. 88887.486401/2020-00 e 88887.500076/2020-00; CNPq n.313135/2019-3). A EMBRAPA Meio Ambiente - Programa BRS Aqua pelo apoio financeiro. Este estudo também contou com recursos da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processos nº 2018/50.022-4, nº 2018/50022-4 e nº 2019/07948-6 integrantes dos Programas de Inovação Tecnológica – PFPMCG, Pesquisa sobre Mudanças Climáticas Globais e SPRINT – *São Paulo Researchers in International Collaboration* da FAPESP. E por fim, ao “Aquário de Ideias”, a Incubadora de Empresa de Base Científica e Tecnológica da UNESP no Vale do Ribeira e do Centro de Aquicultura da Unesp e o Laboratório de Inovação e Bioeconomia Aplicada na Aquicultura – iB<sup>4</sup> Lab’s pelo apoio operacional e mentoria durante todo o mestrado.

## INTRODUÇÃO GERAL

A aquicultura é uma das atividades do setor de produção de alimentos de mais rápido crescimento, desempenhando um papel importante para o fornecimento de alimentos, segurança alimentar e geração de emprego e renda principalmente em países em desenvolvimento (FAO, 2020). De acordo com o relatório “*Fish to 2030: Prospects for Fisheries and Aquaculture*”, aproximadamente 62% do consumo global de peixes será derivado da aquicultura até 2030, com tilápia, bagre e carpa sendo as principais espécies. No Brasil, seis em cada dez peixes produzidos são tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*), classificando o país como quarto maior produtor mundial da espécie, isto representa aproximadamente 61% da produção nacional de pescados (Peixe BR, 2021), sobretudo em sistemas de tanques-rede instalados em lagos e reservatórios de águas continentais.

Entretanto, o crescimento exponencial da produção tem levantado preocupações em relação as possíveis externalidades ambientais que estes sistemas produtivos possam causar no ambiente aquático, influenciando economicamente e ambientalmente este setor do agronegócio por necessitar diretamente da determinação da capacidade de suporte (CS) deste ecossistema em relação ao de recursos naturais que promovem o fornecimento de bens e serviços de maneira sustentável (Primavera, 2006; Edwards, 2015).

O termo “Capacidade de Suporte”, apesar de receber várias definições e abordagens, tem sido historicamente abordado por cientistas das mais diversas áreas como um indicador ambiental (Bueno et al., 2011). Este conceito, começou a ser empregado na década de 1950 por Allan (1949), Scheffer (2006) e posteriormente por Odum (1988) ao estudarem ecologia de populações e comunidades. Em geral, foi definido como uma unidade de grandeza que estima a quantidade de determinado elemento ou de organismos que podem ser mantidos em um dado espaço ou ambiente, sem deteriorar ou modificar significativamente as características elementares desse ambiente (Ross et al., 2013, Ferreira et al., 2013).

Seguindo esta abordagem, o setor da aquicultura tem utilizado estudos da CS de ecossistemas aquáticos capazes de estabelecer medidas e cenários confiáveis à implantação de atividades e seu gerenciamento são fundamentais para promover a sustentabilidade dos recursos naturais (Bueno et al., 2011; Weitzman e Figueira, 2020).

O conceito de sustentabilidade também é amplo e aplicado em vários casos. Valenti et al. (2018) citam que o emprego do termo “sustentabilidade” para os sistemas aquícolas, é considerado como a gestão dos recursos financeiros, tecnológicos, institucionais, naturais e sociais, garantindo a satisfação contínua das necessidades humanas para as gerações presentes e futuras. Além disto, enfatizam que a sustentabilidade é um conceito antropocêntrico que considera as necessidades humanas acima de tudo, excluindo outros tipos de vida, a menos que afetem a espécie humana. Portanto, empreendimentos aquícolas sustentáveis devem persistir ao longo das gerações humanas.

De acordo com Boyd et al. (2020), a aquicultura ambientalmente sustentável tem por objetivo o fornecimento contínuo de nutrientes aquáticos cultivados que são benéficos para o consumo humano, sem prejudicar os ecossistemas existentes ou exceder a capacidade do planeta de renovar os recursos naturais necessários para a produção aquícola.

Nesse contexto, dentre os potenciais impactos relacionados à aquicultura em lagos e reservatórios continentais, os principais estão ligados a liberação de resíduos nitrogenados e fosfatados no ambiente, os quais comumente são provenientes das dietas e sobras de ração não consumida durante a alimentação e podem afetar diretamente a capacidade de suporte ambiental e colaborar com processos de eutrofização do ambiente aquático (Bureau e Hua, 2010; David et al., 2017a, 2017b; Bueno et al. 2019; Boyd et al. 2020).

Nas regiões tropicais e neotropicais esses nutrientes aumentam seu potencial de ação poluidora, tornando os principais elementos a serem avaliados e monitorados no ambiente aquático (Tundisi e Tundisi, 2008). Em relação aos resíduos nitrogenados, estes têm seu valor biológico dado pela proteína oriunda principalmente da dieta dos animais a qual depende de sua digestibilidade e de seu

equilíbrio de aminoácidos em relação às exigências nutricionais dos peixes (NRC, 2011), ou seja, um desequilíbrio de aminoácidos pode levar à diminuição da deposição de proteína e ao aumento da excreção de nitrogênio no ambiente aquático (Cai et al., 2016).

Os resíduos fosfatados tratam-se de um dos mais preocupantes neste contexto, uma vez que o fósforo (P) é um elemento limitante para o crescimento de algas na água, promovendo a eutrofização e impacto ambiental no ambiente aquático. Assim, quando excretado pelos peixes em quantidades e disponibilidade biológica em excesso, pode afetar diretamente a qualidade da água ou do sedimento no fundo dos lagos e reservatórios (Tundisi e Tundisi, 2008; Canale et al., 2016; Bueno et al., 2017).

Neste cenário, Penczak et al. (1982) relatam que somente 32% do P é utilizado para o metabolismo do peixe, e os 68% restantes são transferidos para o meio ambiente. Montanhini Neto e Ostrensky (2013), também citam que para produzir uma tonelada de tilápia são lançados no ambiente aproximadamente 1.040 kg de matéria orgânica, 45 kg de nitrogênio e 14 kg de fósforo. Alves e Baccarin (2005) observaram que 66% do fósforo aportado pelo arraçamento intensivo em fazendas de peixes vão para o sedimento, 11% ficam dissolvidos na água e 23% são incorporados no peixe. Situações que reforçam a necessidade de avaliar a CS e adotar operações sustentáveis nestes sistemas de produção evitando a externalidade ambiental promovida pela atividade aquícola.

O lançamento de resíduos no ambiente aquático torna-se ainda mais preocupante devido as mudanças climáticas com a ocorrência de eventos extremos como secas, inundações, tempestades, aumento da temperatura do ar e da água (Cochrane et al., 2009). A ocorrência destes eventos em ambientes com longo tempo de residência e pobre circulação de água, como alguns lagos e reservatórios, pode resultar em impactos mais intensos e se estender por uma área maior (Matta et al., 2019; D'Abramo e Slater, 2019).

Estes eventos são os principais problemas apontados por investidores, aquicultores, órgãos de fomento e legalização desta atividade, preocupação que agrava se ao considerarmos a existência de restrições e exigências legais em

alguns países para a produção de peixes em lagos e reservatórios. Em várias regiões, é necessária uma licença ambiental que tem como base a quantidade de fósforo liberada pelos peixes no ambiente aquático (Gunkel et al., 2015; Bueno et al., 2015), a qual é determinada por meio de um estudo da CS do ambiente aquático.

Segundo Ross et al. (2013), a capacidade de suporte ecológica ou ambiental (CSA) empregada na aquicultura é definida como a magnitude da produção aquícola que pode ser suportada sem levar a mudanças significativas nos processos ecológicos, serviços, espécies, populações ou comunidades no meio ambiente. A previsão da CSA é crucial para avaliar e minimizar o potencial impacto do desenvolvimento e expansão da aquicultura (Gibbs, 2007). Para isso, é necessário considerar a extensão espacial dos efeitos e as interações da atividade com o ambiente aquático onde os empreendimentos aquícolas estão instalados (Weitzman e Filgueira 2019).

No Brasil, esta temática é abordada na Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA N°430, de 13 de maio de 2011, a qual dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, que complementa e altera a Resolução N°357, de 17 de março de 2005. No documento, o artigo 7º informa que ao órgão ambiental competente poderá exigir, nos processos de licenciamento ou de sua renovação, a apresentação de estudo de capacidade de suporte do corpo receptor, ou seja, quantificar os resíduos sólidos do cultivo de peixes em águas brasileiras.

Outro instrumento normativo que norteia sobre a CS trata-se do Decreto N°10.576, de 14 de dezembro de 2020, em seu Capítulo IV, é reforçado que na hipótese de outorgas de direito de uso em lagos e reservatórios de domínio da União, o requerimento contemplará toda a capacidade de suporte para a prática da aquicultura e a compatibilidade da produção aquícola e da carga média de fósforo de cada sistema de cultivo será avaliada, a ser objeto de cessão de uso de espaço físico, com os limites estabelecidos na outorga.

Assim, se faz necessário o uso de metodologias adequadas para quantificação de resíduos para a adoção de práticas de produção mais sustentáveis

pela indústria aquícola e, conseqüentemente, a melhor gestão dos recursos naturais. Sendo de extrema importância e urgência a adoção de tecnologias, ferramentas e processos que permitam à avaliação, monitoramento e gestão da CSA dos ambientes aquáticos utilizados para produção animal. A CSA deve ser o principal indicador para tomada de decisão sobre a liberação das licenças e outorgas de uso das águas para produção de pescados, para obtenção de crédito créditos financeiros pelos aquicultores e investidores e para o planejamento financeiro e produtivo. Sendo que, em um horizonte futuro, a viabilidade deste negócio está diretamente relacionada as limitações do ambiente onde estes empreendimentos estão instalados.

O atual avanço tecnológico, têm impulsionado o desenvolvimento de modelos matemáticos de simulação e otimização de impactos ambientais os quais são amplamente aplicados em estudos hidrológicos de sistemas complexos, como reservatórios de água (Lopes e Santos, 2002). Embora uma das principais estratégias utilizadas pelos órgãos gestores e fiscalizadores para quantificar a carga de efluentes da piscicultura consista no uso de modelos hidrodinâmicos, as agências ambientais brasileiras atualmente não têm uma metodologia definida que atenda todos os cenários e situações que envolvem um país continental como é o caso do Brasil.

Em geral, vários estudos e pesquisas têm sido desenvolvidas nos últimos anos visando quantificar e mensurar os produtos residuais que os diferentes tipos de cultivos aquáticos (Cho e Bureau, 1998; Lupatsch e Kissil, 1998; Yi, 1998; Bureau e Hua, 2010; Azevedo et al., 2011), estes utilizam modelos matemáticos e realizam simulações de cenários de lançamento de efluentes ou de carga pontuais de resíduos oriundos do metabolismo dos animais. Diante da necessidade de algo mais preciso capaz de prever os resíduos da aquicultura liberados no ambiente aquático, surgiram modelos fatoriais baseado em energia, por exemplo, são capazes de oferecer uma maneira simples para descrever ou prever o fluxo de energia nos organismos em relação a nutrientes específicos, considerando o processo de utilização e transformação dos nutrientes absorvidos para a síntese corporal (Cho, 1992; Cho e Bureau, 1998; Jobling, 2011; Chowdhury et al., 2013).

No entanto, existe uma necessidade de integrar estas abordagens de quantificação de resíduos aquícolas com modelagem hidrodinâmica de ambientes aquáticos para obtenção de soluções mais precisas em determinar a CSA que é dinâmica e demanda uma série de fatores zootécnicos, climáticos e ambientais. Uma proposta foi desenvolvida por Dillon e Rigler (1974) assimilando conceitos propostos por Vollenweider (1968). Segundo Penariol (2020) este modelo de balanço de massas é uma das mais básicas aplicações de modelagem para aquicultura, baseia-se no balanço de massas de P com foco para estimar a capacidade suporte ecológica de lagos de água doce, assumindo que o P limita o crescimento do fitoplâncton e, portanto, a eutrofização.

Posteriormente, Beveridge (1984) inspirou em alguns conceitos dessa abordagem e propôs um modelo simples para a determinação da CSA para produção de pescados, esta metodologia é empregada atualmente pelo governo federal por meio da agência ANA para a emissão da outorga de uso da água para empreendimentos aquícolas em águas da União. Bueno et al. (2017) enfatizam que existe uma carência de modelos ideais para determinação da CSA com o foco na aquicultura, com destaque para as dificuldades de determinação das cargas específicas oriundas do cultivo, das fontes externas, e das interações que ocorrem no ambiente aquático. Soma-se a dificuldade em obter dados de qualidade de água de séries históricas precisos que possam ser incorporados aos modelos de CSA.

Diante do exposto, o projeto de pesquisa buscou elaborar um protocolo tecnológico que irá auxiliar na gestão da capacidade de suporte ambiental do ecossistema aquático onde a piscicultura está inserida, além de garantir a manutenção da outorga e licenciamento ambiental do empreendimento. Este processo permitirá identificar os principais atributos para gestão do lançamento de resíduos aquícolas e manutenção do ecossistema aquático somados ao acompanhamento das práticas empregadas na piscicultura.

O desenvolvimento do protocolo proposto consiste na aplicação de uma sequência de processos que permitirá definir a CSA para produção de pescados em tanques-rede sob diferentes cenários climáticos, zootécnicos e ambientais neotropicais. Esta abordagem irá incentivar um processo mais justo, participativo e de baixo custo para gestão dos empreendimentos aquícolas instalados em lagos e

reservatórios continentais. Como premissa principal, o protocolo irá atender normas aplicadas para a indústria da tilápia no Brasil.

Desta forma, como resultado desta dissertação de mestrado foram elaborados dois capítulos, sendo o Capítulo 1 intitulado: **“Patente de invenção: processo de cálculo da capacidade de suporte ambiental para produção de pescados e outorga em águas continentais da União”**, que será submetido para depósito de uma patente de invenção no Instituto Nacional de Propriedade Industrial – INPI. O capítulo 2, intitulado: **“Modelagem da capacidade de suporte ambiental em reservatório neotropical sob diferentes condições climáticas e de produção da tilápia do Nilo”** será submetido para o *Journal Aquaculture Environment Interactions*.

## **OBJETIVO GERAL**

O trabalho tem por objetivo desenvolver e validar um protocolo tecnológico que permite auxiliar na gestão da capacidade de suporte ambiental e análise da outorga para produção de tilápia-do-Nilo (*Oreochromis niloticus*) em tanques-rede em Águas da União, considerando a concentração e lançamento do fósforo na água sob diferentes cenários climáticos, zootécnicos e ambientais.

## REFERÊNCIAS

- Allan, W. 1949. Studies in African land usage in Northern Rhodesia. Rhodes-Livingstone Papers Number Fifteen. London, Oxford University Press.
- Alves, R.C.P.; Baccarin, A.E. 2005. Efeitos da produção de peixes em tanques-rede sobre sedimentação de material em suspensão e de nutrientes no Córrego da Arribada (UHE Nova Avanhandava), baixo rio Tietê. In: NOGUEIRA, M.G.; HENRY, R.; JORCIN, A. (Org.). Ecologia de reservatórios: impactos potenciais, ações de manejo e sistemas em cascata. São Carlos: Rima, 2005. p.329-347.
- ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. 2009. Nota Técnica n.009/2009/GEOOUT/SOF-ANA: atualização na metodologia de análise de pedidos de outorga para piscicultura em tanques-rede. Brasília, 2009. 3p.
- Azevedo, P.A.; Podemski, C.L.; Hesslein, R.H.; Kasian, S.E.M.; Findlay, D.L.; Bureau, D.P. 2011. Estimation of waste outputs by a rainbow trout cage farm using a nutritional approach and monitoring of lake water quality. *Aquaculture*, v.311, p.175-186. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2010.12.001>.
- Beveridge M.C.M. 1984. The Environmental Impact of Freshwater Cage and Pen Fish Farming and the Use of Simple Models to Predict Carrying Capacity. FAO Fisheries Technical Paper 255. FAO, Rome. 131p.
- Boyd, C.E., D'Abramo, L.R., Glencross, B.D., Huyben, D.C., Juarez, L.M., Lockwood, G.S., McNevin, A.A., Tacon, A.G.J., Teletchea, F., Tomasso Jr, J.R., Tucker, C.S., Valenti, W.C. 2020. Achieving sustainable aquaculture: Historical and current perspectives and future needs and challenges. *Journal of the World Aquaculture Society*, v.51, n.3, p.578-633. <https://doi.org/10.1111/jwas.12714>.
- Brasil. Decreto nº 10.576, de 14 de dezembro de 2020. Dispõe sobre a cessão de uso de espaços físicos em corpos d'água de domínio da União para a prática da aquicultura. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2019-2022/2020/decreto/D10576.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/decreto/D10576.htm) Acesso em: 20 dez. 2020.
- Bueno, G. W.; Mattos, B. O.; Neu, D. H.; David, F. S.; Feiden, A.; Boscolo, W. R. 2019. Stability and phosphorus leaching of tilapia feed in water. *Ciência Rural*, v.49, p.1-8. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20180429>.

- Bueno, G.W.; Bureau, D.; Skipper-Horton, J.O.; Roubach, R.; Mattos, F.T.; Bernal, F.E.M. 2017. Mathematical modeling for the management of the carrying capacity of aquaculture enterprises in lakes and reservoirs. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.52, n.9, p.695-706. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2017000900001>.
- Bueno, G.W. 2015. Modelo bioenergético nutricional e balanço de massas para o monitoramento e estimativa de efluentes da produção comercial de tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*) em reservatório tropical. Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília. 127p. Tese de Doutorado.
- Bueno, G.W., Ostrensky, A., Canzi, C., Matos, F.T., Roubach, R. 2015. Implementation of aquaculture parks in Federal Government waters in Brazil. *Rev. Aquacult.* V.7, p.1–12. <https://doi.org/10.1111/raq.12045>.
- Bueno, G.W.; Matos, F.T.; Canzi, C.; Sampaio, M.B.; Barone, R.S.C.; Roubach, R. 2011. A Capacidade de Suporte: Produção de Peixes em Reservatórios. *Panorama da Aquicultura*, v. 21, p. 48-63.
- Bureau, D.P.; Hua, K. 2010. Towards effective nutritional management of waste outputs in aquaculture, with particular reference to salmonid aquaculture operations. *Aquaculture Research*, v.41, p.777-792. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2009.02431.x>.
- Cai, H.; Ross, I.G.; Telfer, T.C.; Changwen, W.; Zhu, A.; Zhao, S.; Xu, M. 2016. Modelling the nitrogen loadings from large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) cage aquaculture. *Environmental Science and Pollution Research*, v.23, p.7529- 7542. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-6015-0>.
- Canale, R.P.; Whelan, G.; Switzer, A.; Eisch, E. 2016. A bioenergetic approach to manage production and control phosphorus discharges from a salmonid hatchery. *Aquaculture*, v.451, p.137-146. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2015.09.008>.
- Cho, C.Y. 1992. Feeding systems for rainbow trout and other salmonids with reference to current estimates of energy and protein requirements. *Aquaculture*, v.100, p.107-123. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(92\)90353-M](https://doi.org/10.1016/0044-8486(92)90353-M).
- Cho, C.Y.; Bureau, D.P. 1998. Development of bioenergetic models and the Fish-PrFEQ software to estimate production, feeding ration and waste output in

- aquaculture. *Aquatic Living Resources*, v.11, p.199-210. [https://doi.org/10.1016/S0990-7440\(98\)89002-5](https://doi.org/10.1016/S0990-7440(98)89002-5).
- Chowdhury, M.A.K.; Siddiqui, S.; Hua, K.; Bureau, D.P. 2013. Bioenergetics-based factorial model to determine feed requirement and waste output of tilapia produced under commercial conditions. *Aquaculture*, v.410/411, p.138-147. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.06.030>.
- Cochrane, K.; Young, C.; Soto, D.; Bahri, T. 2009. Climate change implications for fisheries and aquaculture. *FAO Fisheries and aquaculture technical paper*, v. 530, p. 212.
- CONAMA - Brasil. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>.
- CONAMA - Brasil. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011.
- D'Abramo, L.R.; Slater, M.J. 2019. Climate change: Response and role of aquaculture. *Journal of the World Aquaculture Society*, v.50, n.4. p.710-714. <https://doi.org/10.1111/jwas.12643>.
- David, F. S.; Proença, D. C.; Valenti, W. C. 2017a. Nitrogen budget in integrated aquaculture systems with Nile tilapia and Amazon River prawn. *Aquaculture International*, v.25, n.5, p.1733-1746. <https://doi.org/10.1007/s10499-017-0145-y>.
- David, F. S.; Proença, D. C.; Valenti, W. C. 2017b. Phosphorus Budget in integrated multitrophic aquaculture systems with Nile Tilapia, *Oreochromis niloticus*, and Amazon River Prawn, *Macrobrachium amazonicum*. *Journal of the World Aquaculture Society*, v.48, n.3, p.402–414. <https://doi.org/10.1111/jwas.12404>.
- Dillon, P.J.; Rigler, F.H. 1974. A test of a simple nutrient budget model predicting the phosphorus concentration in lake water. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, v.31, p.1771-1778. <https://doi.org/10.1139/f74-225>.
- Edwards, P. 2015. Aquaculture environment interactions: past, present and likely future trends. *Aquaculture*. v. 447, p. 2-14. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2015.02.001>.
- FAO - Food and Agriculture Organization. 2020. The state of World Fisheries and Aquaculture (SOFIA) – Sustainability in action. FAO, Rome. 206p.

- Ferreira, J.G.; Grant, J.; Verner-Jefferys, D.W.; Taylor, N.G. 2013. Modelling frameworks for determination of carrying capacity for aquaculture. In: Christou P, Savin R, Costa-Pierce B, Misztal I, Whitelaw B (eds) *Sustainable Food Production*, pp. 986–1049. Springer, New York, NY.
- Gibbs, M.T. 2007. Sustainability performance indicators for suspended bivalve aquaculture activities. *Ecological Indicators*. v. 7, n. 1, p. 94-107. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2005.10.004>.
- Gunkel, G., Matta, E., Selge, F., Silva, G.M.N., Carmo, S.M. 2015. Carrying capacity limits of net cage aquaculture in Brazilian reservoirs. *Brazilian Journal of Environmental Sciences*, n. 36, p. 128-144. <https://doi.org/10.5327/Z2176-947820151008>.
- Jobling, M. 2011. Bioenergetics in aquaculture settings. In: Farrell, A.P. (Ed.). *Encyclopedia of Fish Physiology: from genome to environment*. Amsterdam: Elsevier. p.1664-1674. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374553-8.00152-0>.
- Lopes, J.E.G.; Santos, R.C.P. 2002. *Capacidade de reservatórios*. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 44p.
- Lupatsch, I.; Kissil, G.W. Predicting aquaculture waste from gilthead seabream (*Sparus aurata*) culture using a nutritional approach. *Aquatic Living Resources*, v.11, p.265-268, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0990-7440\(98\)80010-7](https://doi.org/10.1016/S0990-7440(98)80010-7).
- Matta, E.; Koch, H.; Selge, F.; Simshäuser, M.N.; Rossiter, K.; Silva, G.M.N.; Gunkel, G.; Hinkelmann, R. 2019. Modeling the impacts of climate extremes and multiple water uses to support water management in the Icó-Mandantes Bay, Northeast Brazil. *Journal of Water and Climate Change*, v. 10, n. 4, p. 893-906, 2019. <https://doi.org/10.2166/wcc.2018.254>.
- Montanhini Neto, R.; Ostrensky, A. 2013. Nutrient load estimation in the waste of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* (L.) reared in cages in tropical climate conditions. *Aquaculture Research*, v.46, p.1309-1322. <https://doi.org/10.1111/are.12280>.
- Moura, R.S.T., Valenti, W.C., Henry-Silva, G.G., 2016. Sustainability of Nile tilapia netcage culture in a reservoir in a semi-arid region. *Ecological Indicators*. 66, 574–582. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.01.052>.
- NRC. National Research Council. 2011. *Nutrient requirements of fish and shrimp*. Washington: National Academy Press. 392p.

- Odum, E.P. 1998. *Ecologia*. Rio de Janeiro. 1 ed. 468p.
- Peixe BR. 2021. *Anuário da Associação Brasileira de Piscicultura*. Peixe BR: São Paulo. 141p.
- Penariol, I.C. 2020. *Produção intensiva de tilápia em tanques rede - Impactos e capacidade suporte ecológica em área aquícola de reservatório hidrelétrico do sudeste brasileiro*. Programa de Pós Graduação em Aquicultura. Tese de Doutorado. 78p.
- Penczak, T.; Galicka, W.; Molinski, M.; Kusto, E.; Zalewski, M. 1982. The enrichment of a mesotrophic lake by carbon, phosphorus and nitrogen from the cage aquaculture of rainbow trout, *Salmo gairdneri*. *Journal of Applied Ecology*, v.19, p.371- 393. <https://doi.org/10.2307/2403474>.
- Primavera, J.H. 2006. Overcoming the impacts of aquaculture on the coastal zone. *Ocean and Coastal Management*. v. 49, n. 9-10, p. 531-545. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2006.06.018>.
- Ross, L.G., Telfer, T.C., Falconer, L., Soto, D., Aguilar-Manjarrez, J., Asmah, R., Bermúdez, J., Beveridge, M.C.M., Byron, C. J., Clément, A., Corner, R., Costa-Pierce, B.A., Cross, S., De Wit, M., Dong, S., Ferreira, J.G., Kapetsky, J.M., Karakassis, I., Leschen, W., Little, D., Lundebye, A.-K., Murray, F.J., Phillips, M., Ramos, L., Sadek, S., Scott, P.C., Valle-levinson, A., Waley, D., White, P.G. e Zhu, C. 2013. Carrying capacities and site selection within the ecosystem approach to aquaculture. In L.G. Ross, T.C. Telfer, L. Falconer, D. Soto e J. Aguilar-Manjarrez, eds. *Site selection and carrying capacities for inland and coastal aquaculture*, pp. 19–46. FAO/Institute of Aquaculture, University of Stirling, Expert Workshop, 6–8 December 2010. Stirling, the United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland. FAO Fisheries and Aquaculture Proceedings n. 21. Rome, FAO. 282 pp.
- Tundisi, T.M.; Tundisi, J.G. 2008. *Limnologia: Editora Oficina de Textos: São Paulo–SP*, 631p.
- Vollenweider, R.A. 1968. The scientific basis of lake eutrophication, with particular reference to phosphorus and nitrogen as eutrophication factors. Tech. Rep. DAS/DSI/68.27. OECD, Paris. 159 p.
- Weitzman, J.; Filgueira, R. 2019. The evolution and application of carrying capacity in aquaculture: towards a research agenda. *Reviews in Aquaculture*, v. 12, n. 3, p. 1297-1322. <https://doi.org/10.1111/raq.12383>.

Yi, Y. 1998. A bioenergetics growth model for Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) based on limiting nutrients and fish standing crop in fertilized ponds. *Aquacultural Engineering*, v.18, p.157-173. [https://doi.org/10.1016/S0144-8609\(98\)00028-4](https://doi.org/10.1016/S0144-8609(98)00028-4).

## 1. CAPÍTULO I

### PATENTE DE INVENÇÃO: PROCESSO DE CÁLCULO DA CAPACIDADE DE SUPORTE AMBIENTAL PARA PRODUÇÃO DE PESCADOS E OUTORGA EM ÁGUAS CONTINENTAIS DA UNIÃO

Elisa Maia de Godoy<sup>1</sup>, Tavani R. Camargo<sup>1</sup>, Maicon R. Brande<sup>1</sup>; Guilherme Wolff Bueno<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Centro de Aquicultura, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Jaboticabal, SP, Brasil;

<sup>2</sup>Departamento de Engenharia Pesqueira, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Registro, SP, Brasil

**Resumo:** Processo de obtenção de parâmetros de cultivo em aquicultura e uso do mesmo. É descrito a inovação de processo que quantifica os resíduos fosfatados oriundos da produção de pescados integrado com equações de metabolismo energético e modelagem hidrodinâmica de corpos da água tropicais para determinação da capacidade de suporte ambiental em ambientes aquáticos sob a influência de fazendas aquícolas com diferentes cenários zootécnicos, climáticos e ambientais. A invenção se aplica na área de processamento e mensuração de dados e informações para propósitos administrativos e de gestão ambiental e produtiva da produção de pescados em lagos e reservatórios que empregam o sistema de cultivo em tanques-rede, onde uma série de processos integrados e sequenciais com equações e algoritmos específicos permitem direcionar para uma seleção de cenários que analisam potenciais externalidade ambientais, limites máximos de produção do pescado em determinado recurso hídrico baseado no lançamento e concentração do fósforo como elemento limitante para a gestão da outorga de produção dos organismos aquáticos. Este processo poderá ser licenciado e transferido para comercialização da tecnologia em sistemas automatizados, aplicativos, *softwares* e aplicação em operação que visam a sustentabilidade deste agronegócio.

**PALAVRAS-CHAVE:** aquicultura, águas da União, capacidade de suporte, mudanças climáticas.

### **1.1. Campo da invenção**

A presente inovação de processo representa uma nova metodologia para quantificar os resíduos fosfatados oriundos dos animais aquáticos, sendo uma ferramenta de gestão da capacidade de suporte ambiental baseado na concentração e lançamento do fósforo total na água (CSAp) de ambientes aquáticos tropicais em áreas aquícolas para a produção de pescado. Inclui uma série de cálculos, modelos matemáticos e algoritmos sequenciais que permitem avaliar o metabolismo dos animais aquáticos por meio de uma modelagem bioenergética nutricional a qual integra com a modelagem hidrodinâmica dos corpos da água onde estão instaladas as fazendas aquícolas e simulação de cenários de riscos ambientais e climáticos em relação a produção de organismos aquáticos. Este processo estima a carga de resíduos oriundos das excretas dos animais somadas ao desperdício de ração durante a alimentação.

Atualmente, os órgãos ambientais não definiram qual seria a ferramenta ou método ideal para quantificação de carga dos cultivos aquícolas, devido a diversidade e gama de fatores que envolvem a avaliação de sistemas complexos como são os ambientes aquáticos onde são instalados os empreendimentos aquícolas continentais. Esse fato traz prejuízos para o setor do agronegócio brasileiro, que necessita de tais estudos e valores para obter sua licença ambiental, o seguro aquícola, o crédito bancário e todas as autorizações legais preconizadas na Resolução nº 413, de 26 de julho de 2009, no Decreto 4.895/2013 e no Decreto Nº10.576, de 14 de dezembro de 2020. Assim, este processo tecnológico inovador apresenta uma nova abordagem que irá definir a CSAp, agregando valor ao processo e ao produto ao aplicar um manejo zootécnico “eco-friendly”, que poderá ser empregado nos processos das fazendas e na gestão da outorga de água e capacidade de suporte ambiental de empreendimentos aquícolas sustentáveis.

### **1.2. Estado da técnica**

As patentes concedidas nos Estados Unidos: US5652708A - “*Method for assessing Environmental impact of manufacture and disposal of product*”; Além das patentes do European Patent Office: EP1197895A2 - “*Method and system for calculating environmental impacts of products*”; EP1776664A2 - “*System and method for optimizing animal production based on dynamic nutrient information*” e

EP3790404A1 - “*Net energy model for companion animals and methods*”; compreendem em métodos tecnológicos com processos e etapas sequenciais que permitem mensurar o impacto ambiental e a externalidade gerada em sistemas de produção animal. No entanto, a patente em tela traz critérios e cálculos distintos do proposto na presente invenção por ser específico para ambiente tropical e neotropical e por considerar cenários específicos para produção de *Oreochromis niloticus* produzidas em tanques-rede em lagos e reservatórios.

De acordo com Ross et al. (2013), a abordagem utilizada para o cálculo da capacidade de suporte (CS) para a aquicultura pode ser baseada fundamentalmente em quatro métodos: o método físico, o método baseado na produção, o método ecológico e o método social. Na abordagem física, quantifica-se a área do corpo d'água que apresenta potencial para a aquicultura, mas não se abordam os limites de produção de organismos aquáticos. No método que considera os níveis de produção, estima-se a quantidade máxima em escala de organismos aquáticos que pode ser produzida em um dado ambiente. Geralmente, restringe-se a áreas menores, dentro de uma bacia hidrográfica, assumindo-se que a produção não ultrapasse a capacidade suporte definida no método ecológico.

No método ecológico, considera-se a máxima produção aquícola que pode ser suportada pelo ambiente, sem que haja alterações significativas nas relações ecológicas, espécies e populações. Para tal cálculo, são discutidos os papéis e os impactos de cada espécie na cadeia trófica, necessitando-se levar em consideração o impacto de cada espécie separadamente. Quando a modelagem está relacionada à quantidade de insumos utilizados no cultivo (ração), o cálculo da capacidade de suporte ecológica é uma ferramenta extremamente importante para o manejo do processo como um todo. No método social, considera-se a produção aquícola máxima que pode ser realizada sem que haja impactos sociais adversos (Ross et al., 2013).

O desenvolvimento de métodos analíticos para o cálculo da capacidade de suporte ambiental em reservatórios no Brasil e no mundo ainda é um assunto que necessita ser estudado com maior atenção, devido ao fato da aquicultura ser considerada uma atividade impactante, por utilizar rações ricas em nutrientes que poluem o meio ambiente. Dessa forma, o desenvolvimento de uma metodologia

robusta que considere de forma integrada os métodos é de fundamental importância para o desenvolvimento da atividade de forma sustentável, pois não se ultrapassaria a quantidade máxima de ração que cada ambiente poderia assimilar, não comprometendo o ecossistema e a produção, pela possível deterioração da qualidade da água.

Atualmente, não existem modelos ideais ou estabelecidos para a definição da capacidade de suporte com o foco na aquicultura devido à dificuldade de determinarem-se as cargas específicas do cultivo e as fontes externas que interagem com o ambiente aquático. Alguns modelos foram desenvolvidos ou adaptados para serem utilizados como ferramentas na determinação da capacidade de suporte para a produção de pescados em reservatórios. Os principais modelos ou sistemas de análise da CS são: VISQ; STELLA® - Structural Thinking Experimental Learning Laboratory with Animation; QualRes; Dillon e Rigler; ECOPATH Modeling; DELPH 3D; OECD Model; Vollenweider; MOHID – 3D Water Modeling System; Eco Lab. - DHI - Water Environment Health (Bueno et al, 2017).

No entanto, estes modelos matemáticos não apresentam a possibilidade de *input* de dados zootécnicos específicos dos animais baseados no metabolismo do fósforo e nitrogênio integrado com a temperatura da água e balanço energético do animal para determinar a carga de resíduos gerados pelos animais. Sendo baseados na análise hidrodinâmica da água e com baixa precisão para a determinação dos efluentes aquícolas. Estes autores utilizam uma metodologia similar ao cálculo de lançamento de esgoto ou efluentes de cidades e indústria para a atividade aquícola, conteúdos que são totalmente diferentes em relação a composição e a comportamento dos resíduos na água.

Além disto, por tratarmos de animais pecilotérmicos, a excreção de nutrientes está diretamente relacionada a temperatura da água, que é prevista na inovação proposta. Caso não apresentado em nenhuma das metodologias e abordagens propostas para avaliação da CSA para a aquicultura. Por outro lado, os modelos propostos para aquicultura por Kubitza, Cho e Bureau, 1998; Lupatsch e Kissil (1998); Yi (1998); Bureau e Hua (2010); Azevedo et al. (2011) baseiam-se somente na quantificação de efluentes dos animais sem apresentar uma

metodologia para determinar a capacidade de suporte do ambiente aquático – integrando fatores limnológicos do ambiente aquático e fisiológicos dos animais em produção. Assim, este novo processo tecnológico poderá ser aplicado na indústria aquícola, sendo escalonável, repetível e por necessitar de poucos recursos tecnológicos para aplicação (computador e dados da temperatura da água), tornando de baixo custo e fácil aplicação pela indústria aquícola, órgãos de fomento, legalização e fiscalização desta atividade.

### **1.3. Breve descrição da invenção: processo de estruturação do protocolo tecnológico**

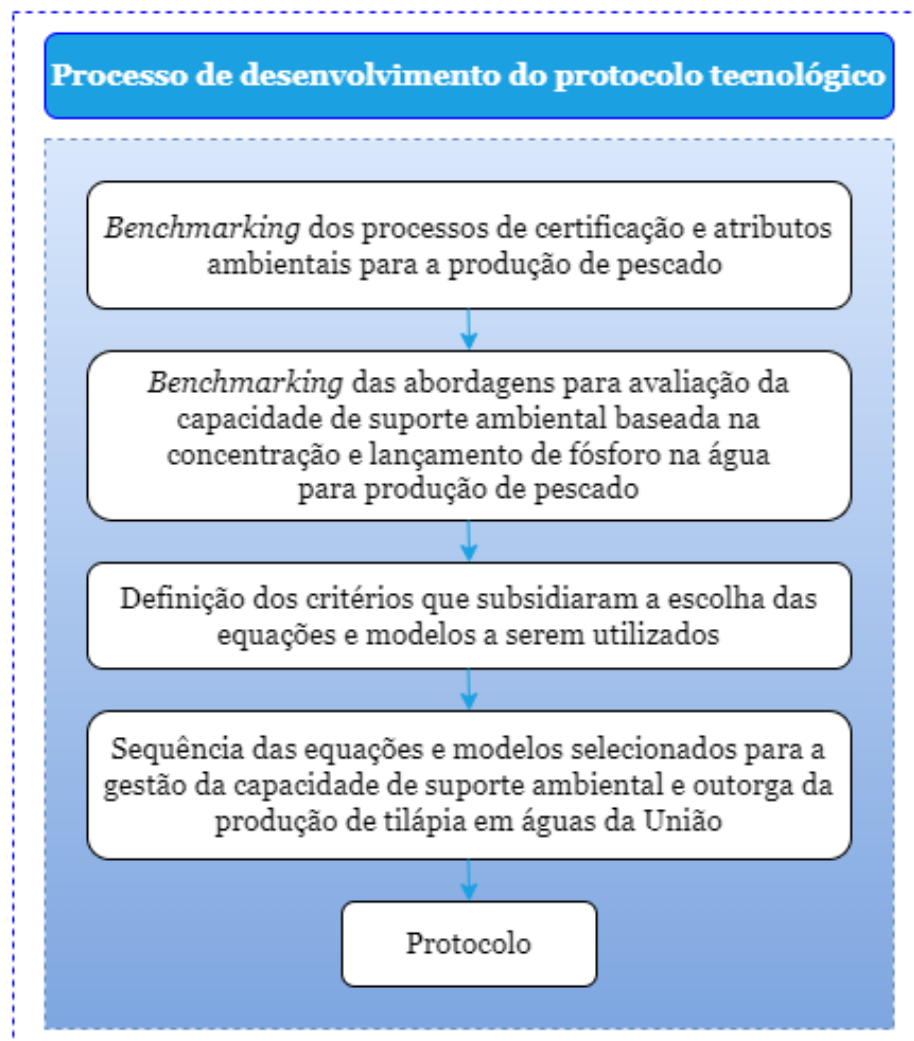
Toda a metodologia do estudo foi estruturada em quatro etapas para o desenvolvimento do protocolo tecnológico, uma série de processos foram realizados para identificação e definição dos critérios e das equações que devem ser utilizadas para gestão da capacidade de suporte ambiental do fósforo na água (CSAp) visando a tomada de decisão e gestão da outorga para produção de tilápia em tanques-rede instalados em águas da União.

Iniciamos o processo com a identificação dos principais atributos para gestão do lançamento de resíduos aquícolas e manutenção do ecossistema aquático baseado nos resíduos fosfatados gerados durante a produção de pescado e a concentração do fósforo total na água, bem como dos principais métodos utilizados por pesquisadores, empresas e órgãos gestores e fiscalizadores para mensuração da capacidade de suporte ambiental relacionada a atividade aquícola. Adicionalmente, estabelecemos importantes critérios a serem seguidos para definição dos atributos ambientais, modelos e equações que contemplariam o protocolo tecnológico, de modo a torná-lo o mais próximo da realidade do produtor, da indústria aquícola brasileira e das exigências e normativas dos órgãos de deliberação desta atividade no Brasil (Figura 1).

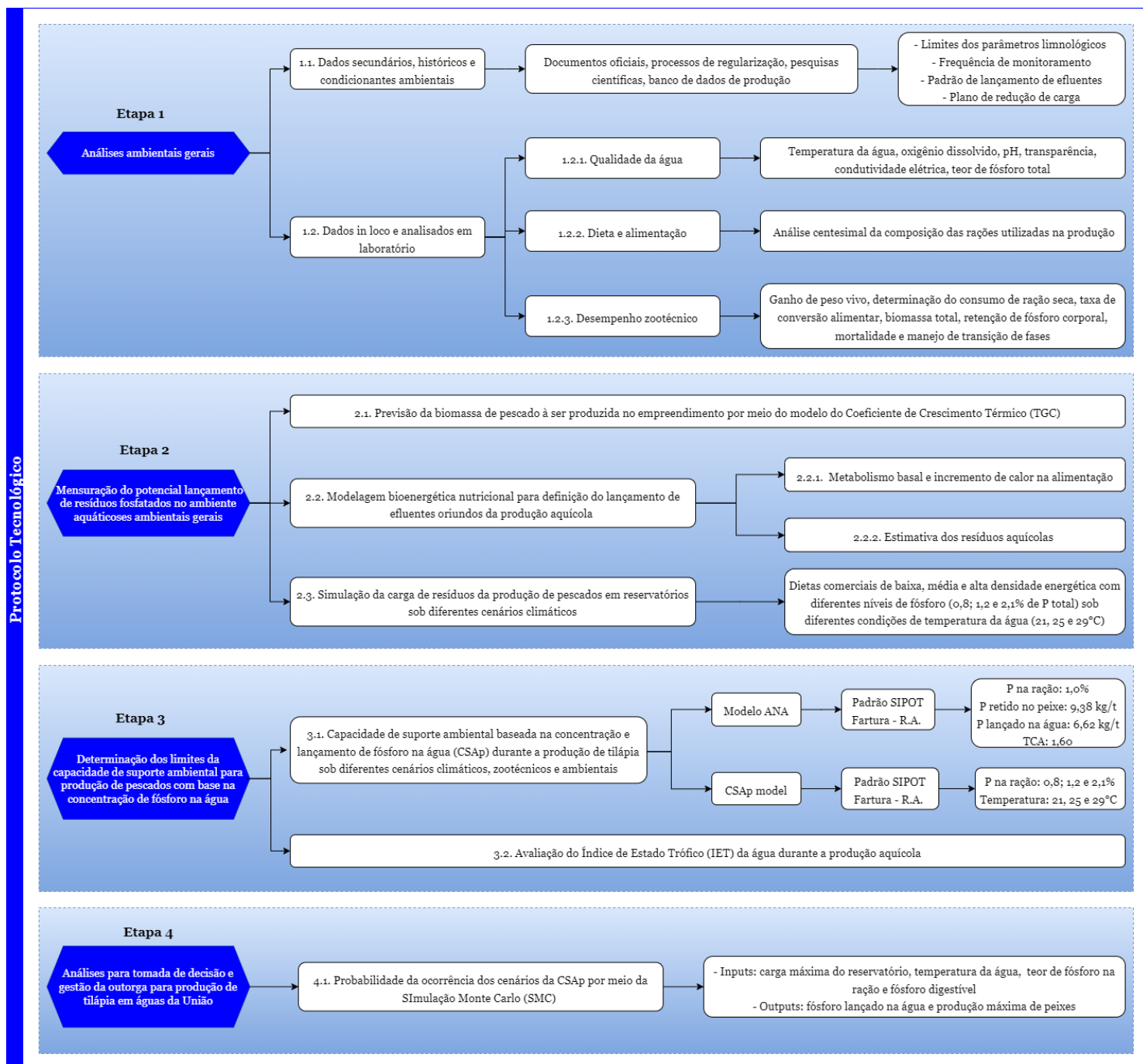
Posteriormente, seguimos com a elaboração do protocolo que compreende as seguintes etapas: i) análises ambientais gerais; ii) mensuração do potencial lançamento de resíduos fosfatados no ambiente aquático; iii) determinação dos limites da capacidade de suporte ambiental para fósforo em relação a produção de

pescados; iv) aplicação de ferramentas que auxiliam a tomada de decisão e gestão da outorga da produção de tilápia em Águas da União.

Posteriormente, realizou-se a validação da proposta do protocolo tecnológico, esta consistiu na realização de um estudo de caso em um empreendimento comercial produtor de *O. niloticus* em tanque-rede no reservatório da Usina Hidrelétrica de Chavantes, estado de São Paulo (Figura 2).



**Figura 1.** Processo de desenvolvimento do protocolo tecnológico para identificação e definição dos critérios e das equações à serem utilizadas para gestão da capacidade de suporte ambiental.



**Figura 2.** Protocolo tecnológico para gestão da capacidade de suporte ambiental com base na concentração e no lançamento de fósforo na água para tomada de decisão e gestão da outorga para produção de tilápia em empreendimentos aquícolas instalados em águas da União.

#### **1.4. Desenvolvimento da proposta do protocolo**

##### **Etapa 1: *Benchmarking* dos processos de certificação e atributos ambientais para produção de pescado**

Para identificar os principais atributos para gestão do lançamento de resíduos aquícolas e manutenção do ecossistema aquático, realizou-se um *benchmarking* dos principais processos de monitoramento, gestão e certificação ambiental da produção de pescados e dos condicionantes pontuados pelos órgãos ambientais brasileiros para aquicultura em lagos e reservatórios com foco na geração de efluentes na água (Tabela 1). Paralelamente, realizou-se entrevistas com 28 *stakeholders* da indústria de tilápia brasileira e da FAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*) para auxiliar na identificação dos atributos visando atender mercados nacionais e internacionais.

**Tabela 1.** Benchmarking dos processos de certificação ambiental e condicionantes pontuados pelos órgãos brasileiros para aquicultura em lagos e reservatórios com foco na geração de efluentes na água.

| Órgão Certificador                                                                 | Dimensão Ambiental                                   |                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                    | Princípio / Ponto de controle                        | Critério                                                                                            | Indicador / Requisito                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|    | Conservar o habitat natural e a biodiversidade local | Efeitos da eutrofização                                                                             | Variação percentual diurna no oxigênio dissolvido (DDDO) das águas receptoras em relação ao oxigênio dissolvido na saturação para a salinidade e temperatura específicas da água é $\leq 65\%$ .<br>• $DDDO = [(máx. \text{ oxigênio dissolvido (mg/L)} / \text{saturação máx. de oxigênio dissolvido tabulado (mg/L)}) \times 100] - [(mín. \text{ oxigênio dissolvido (mg/L)} / \text{saturação mín. de oxigênio dissolvido tabulado (mg/L)}) \times 100]$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|                                                                                    |                                                      | Qualidade da água em águas receptoras oligotróficas                                                 | Limite da visibilidade do disco de Secchi (10 metros) acima do qual a produção não é certificável.<br>Quando a visibilidade do disco Secchi for $\leq 5,0$ metros, o limite da concentração de fósforo total nas águas receptoras é $\leq 20 \mu\text{g/L}$ e o limite da concentração de clorofila a em águas receptoras é $\leq 4,0 \mu\text{g/L}$ .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|                                                                                    | Conservar recursos hídricos                          | Eficiência na utilização de nutrientes                                                              | Quantidade de fósforo total adicionada ao sistema de cultivo por tonelada de peixe produzido por ano é $\leq 27 \text{ kg}$ .<br>$\text{Total P Input/t} = \text{fração percentual de P no material de entrada} \times \text{quantidade total de material de entrada}$ .<br>Quantidade de fósforo total liberada do sistema de cultivo por tonelada de peixe produzido por ano é $\leq 20 \text{ kg}$ . O aporte de fósforo será calculado utilizando a Equação: $\text{Total P Input/t} - 7,5 \text{ kg/t} = \text{kg P/t}$ ou medido nos efluentes, se houver tratamento pós-cultivo.<br>Cálculo e verificação da quantidade de nitrogênio total aportada ao sistema de cultivo. Equação: $\text{Total N Input/t} = \text{fração percentual de N no material de entrada} \times \text{quantidade total de material de entrada}$ .<br>Cálculo e verificação da quantidade de nitrogênio total liberado pela atividade aquícola. Equação: $\text{Total N Input/t} - 21,2 \text{ kg/t} = \text{kg N/t}$ . |
|   | Meio ambiente                                        | Gestão de águas e resíduos                                                                          | Os parâmetros de qualidade da água dos efluentes devem estar de acordo com os regulamentos nacionais. Quando as regulamentações nacionais não estiverem em vigor, os parâmetros de qualidade da água devem obedecer aos seguintes parâmetros: amônia ( $\text{NH}_4$ ) $\leq 1 \text{ mg/L}$ , nitrito ( $\text{NO}_2$ ) $\leq 1 \text{ mg/L}$ , nitrato ( $\text{NO}_3$ ) $\leq 15 \text{ mg/L}$ , fósforo ( $\text{PO}_4$ ) $\leq 0,2 \text{ mg/L}$ , oxigênio dissolvido $\geq 5 \text{ mg/L}$ , valor do índice trófico $< 6$ . Equação: $\text{Índice Trófico} = \log. ((\text{CHL} \times \text{DO} \times \text{N} \times \text{P}) + 1,5) / 1,2$ .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|  | Gestão ambiental                                     | Está implementado um estudo de impacto ambiental (EIA)?                                             | Deverá ser efetuado um estudo de impacto ambiental (EIA) contendo, no mínimo: carga de efluentes BOD/COD; carga de efluentes de nitrito e nitrato de nitrogênio de Kjeldahl; carga de efluentes de P; carga de efluentes sólidos em suspensão e outros.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|                                                                                    | Efluente                                             | Os impactos são medidos em conformidade com a legislação e no seguimento dos resultados do EIA/EMP? | É da responsabilidade dos produtores ou organizações de produtores garantir que qualquer processo com impacto na água recipiente não exceda os alvos no plano de gestão ambiental. A gerência da unidade de produção deve conseguir demonstrar o cumprimento e conhecimento da legislação em entrevista. Devem existir registros e consentimentos de descarte, que são válidos e funcionam dentro dos limites em cada local.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |

|                                                                                   |                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | Meio ambiente     | <p>Controle da qualidade da água e sedimento</p> <p>Tanques-rede ou currais em água doce ou salobra</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | <p>Para mensurar o potencial da aquicultura em causar eutrofização em lagos e reservatórios usados para produção em tanques-rede, eles devem ser classificados de acordo com o Tempo de Retenção Hidráulica (TRH) da seguinte forma: • TRH longo: mais de 3 anos • TRH moderado: 1-3 anos • TRH curto: menos de 1 ano</p> <p>Técnicas para determinação do TRH:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Descarga anual do lago: <math>TRH = \text{Volume do lago (m}^3\text{)} / \text{Descarga do lago (m}^3\text{/ano)}</math></li> <li>• Corrente de entrada para o lago: <math>TRH = \text{Volume do lago (m}^3\text{)} / [\text{corrente de entrada (m}^3\text{/ano)} + \text{Precipitações diretas (m}^3\text{/ano)}] - \text{Evaporação do lago (m}^3\text{/ano)}</math></li> </ul> <p>A ingestão máxima de ração diária permitida pelo BAP em tanques e currais em lagos e reservatórios serão baseados no Tempo de Retenção Hidráulica (TRH) da seguinte forma:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• TRH longo - 2,5 kg/ha/dia x área de superfície da água do lago (ha)</li> <li>• TRH moderado - 5,0 kg/ha/dia x área de superfície da água do lago (ha)</li> <li>• TRH curto - 7,5 kg/ha/dia x área de superfície da água do lago (ha)</li> </ul> <p>A qualidade da água do corpo d'água, incluindo seu ponto de descarga, se aplicável, deve atender aos critérios BAP de qualidade da água do efluente, com amostragens realizadas seguindo as diretrizes de aplicação.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Carga de nitrogênio e fósforo (kg/yr) = <math>[(\text{Ração total (kg)} \times \text{Nitrogênio (\% na ração)}) / 100] - [(\text{Peixe produzido (kg)} \times \text{Nitrogênio (\% na ração)}) / 100]</math></li> <li>• Índice de carga de nitrogênio (kg/MT peixe) = <math>\text{Carga de nitrogênio (kg/ano)} / \text{Peixe produzido (MT/ano)}</math></li> <li>• Índice de carga de fósforo (kg/MT fpeixe) = <math>\text{Carga de fósforo (kg/ano)} / \text{Produção de peixe (MT/ano)}</math></li> </ul> <p>A porcentagem de nitrogênio na ração é a porcentagem de proteína bruta dividida por 6,25. O teor de fósforo na ração para tilápia é de cerca de 1%, mas o valor exato deve ser medido ou obtido junto ao fabricante da ração.</p> |
|  | Qualidade da água | <p>A norma exige, quando apropriado, medidas de gerenciamento de efluentes para reduzir os impactos adversos na qualidade da água dos corpos d'água que recebem efluentes.</p> <p>A norma exige limites específicos adequados de carga de nutrientes liberados ao meio ambiente.</p> <p>A norma exige um sistema de gerenciamento de área legalmente obrigatório, devidamente definido e operacional que assegure que todas as instalações aquícolas participantes adaptem suas práticas usando uma abordagem planejada para limitar os impactos regionais na qualidade da água para evitar a eutrofização regional e a autopoluição.</p> <p>A norma exige um sistema de gerenciamento de área juridicamente vinculativo, devidamente definido e operacional que assegure que todas as instalações de aquicultura participantes cooperem para garantir que um sistema de planejamento baseado na capacidade de carga seja usado para minimizar o impacto na qualidade local da água</p> | <p>Monitoramento e registro da qualidade do efluente ou da água receptora, e que pode incluir parâmetros-chave que precisam ser abordados, quando aplicável: Nitrato/Nitrogênio (impactos sobre a água do mar), Nutrientes - Fósforo/Fósforo (impactos sobre a água doce), Oxigênio dissolvido, Salinidade, Sólidos Suspensos, pH.</p> <p>Definição de pontos de referência máximos (por exemplo, limites gerais de concentração ou limites específicos de instalações de aquicultura) ou sistemas obrigatórios (por exemplo, presença de um filtro adequado) para evitar a poluição.</p> <p>Quando apropriado é esperado que inclua normas que cobrem sistemas de produção que liberam efluentes que têm o potencial de impacto sobre a qualidade da água, por exemplo, aquicultura alimentada/intensiva em lagos e raceways.</p> <p>Espera-se que os limites específicos adequados sejam específicos às práticas culturais, e projetados para garantir o mínimo de poluição. Espera-se que a verificação inclua uma revisão das evidências de que os limites específicos são cumpridos.</p> <p>As práticas poderiam incluir o desenvolvimento de padrões regionais de qualidade ambiental baseados no monitoramento regional da qualidade da água e a alimentação das fazendas quando os limites são aproximados ou excedidos para reduzir seu impacto (por exemplo, melhorando os sistemas de tratamento de água ou reduzindo a produção). Outra abordagem possível seria estabelecer limites de produção regional com base no planejamento da capacidade de carga.</p> <p>Espera-se que a verificação inclua uma revisão da modelagem da capacidade de carga, resultados do monitoramento regional da qualidade da água, planejamento local e políticas de licenciamento.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |

|                                                                                    |                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    | Análise da demanda hídrica                   | A ANA analisa o pedido de outorga em função da capacidade do corpo hídrico de diluir a carga de fósforo gerada nos empreendimentos de piscicultura, de modo que não haja alterações negativas na qualidade da água e não se despreze a classe de enquadramento do corpo hídrico estabelecida pela Resolução CONAMA n° 357/2005. | <p>Modelo de Dillon e Rigler (1974) para determinação da carga anual ([P] de fósforo autorizável no reservatório com as equações:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Concentração de fósforo na água ([P], em mg/m<sup>3</sup>): <math>[P] = L \cdot (1 - R) / (z \cdot p)</math></li> <li>Coefficiente de retenção de fósforo pelos sedimentos (R), calculado pela equação proposta por Straskraba (1996): <math>R = 0,761 \cdot (1 - e^{-10,293 \cdot (1/p)})</math></li> <li>Máxima carga de fósforo autorizável (L, em mg/m<sup>2</sup>): <math>L = (\Delta[P] \cdot z \cdot p) / (1 - R)</math></li> <li>Carga de fósforo autorizável em todo o reservatório (Lr, em mg/ano e deve, por conveniência, ser convertido para kg/ano): <math>Lr = L \cdot A</math></li> <li>Proporção de fósforo que vai para a água por cada tonelada de peixe produzida (Pa, em kg P/ton): <math>Pa = (Pr \cdot TCA) - Pp</math></li> <li>Produção autorizável de peixes (B, em ton/ano): <math>B = Lr / Pa</math></li> <li>Quantidade autorizável de ração (Mr, em ton/ano): <math>Mr = B \cdot TCA</math></li> <li>Quando necessário uma análise mais criteriosa: Modelagem Hidrodinâmica Ambiental (MHA) no corpo hídrico.</li> </ul> |
|   | Índices de Qualidade das Águas               | Índice do Estado Trófico, que estabelece o grau de trofia dos corpos hídricos, avaliando o enriquecimento por nutrientes e seus efeitos relacionados ao crescimento excessivo de algas.                                                                                                                                         | <p>Aplicação do Índice do Estado Trófico (IET) em reservatórios utilizando como variáveis a clorofila a (CLA, em µg/L) e fósforo total (PT, em mg/L):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><math>IET (CL) = 10 \times (6 - ((0,92 - 0,34 \times (\ln CL)) / \ln 2))</math></li> <li><math>IET (PT) = 10 \times (6 - ((1,77 - 0,42 \times (\ln PT)) / \ln 2))</math></li> <li>IET calculado pela média aritmética simples: <math>IET = [IET (PT) + IET (CL)] / 2</math></li> </ul> <p>Classificação do Estado Trófico para reservatórios segundo Índice de Carlson (1977) modificado: Ultraoligotrófico <math>IET \leq 47</math>; Oligotrófico <math>47 &lt; IET \leq 52</math>; Mesotrófico <math>52 &lt; IET \leq 59</math>; Eutrófico <math>59 &lt; IET \leq 63</math>; Supereutrófico <math>63 &lt; IET \leq 67</math>; Hipereutrófico <math>IET &gt; 67</math>.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|    | Resolução N° 357, de 17 de março de 2005     | Condições e padrões de qualidade das águas                                                                                                                                                                                                                                                                                      | <p>Para águas doces de classes 1 e 2, quando o nitrogênio for fator limitante para eutrofização, nas condições estabelecidas pelo órgão ambiental competente, o valor de nitrogênio total (após oxidação) não deverá ultrapassar 1,27 mg/L para ambientes lênticos e 2,18 mg/L para ambientes lóticos, na vazão de referência.</p> <p>Oxigênio dissolvido (OD), em qualquer amostra, não inferior a 5 mg/L O<sub>2</sub>.</p> <p>Fósforo total:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>até 0,030 mg/L, em ambientes lênticos;</li> <li>até 0,050 mg/L, em ambientes intermediários, com tempo de residência entre 2 e 40 dias, e tributários diretos de ambiente lêntico.</li> </ol>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|  | Decreto N° 10.576, de 14 de dezembro de 2020 | Da outorga de direito de uso de recursos hídricos                                                                                                                                                                                                                                                                               | <p>Na hipótese de outorgas de direito de uso em lagos e reservatórios de domínio da União, o requerimento contemplará toda a capacidade de suporte do reservatório calculada pela ANA para a prática da aquicultura, descontados os usos correspondentes às outorgas vigentes.</p> <p>A Secretaria de Aquicultura e Pesca do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento será responsável pela avaliação da compatibilidade da produção aquícola e da carga média de fósforo de cada sistema de cultivo, a ser objeto de cessão de uso de espaço físico, com os limites estabelecidos na outorga.</p> <p>A Secretaria de Aquicultura e Pesca do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento encaminhará anualmente à ANA relatório referente à produção aquícola instalada (tonelada por ano) e à carga média de fósforo gerada pelos sistemas de cultivos (quilograma por dia) nos corpos hídricos.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |

## **Etapa 2. *Benchmarking* das abordagens para avaliação da capacidade de suporte ambiental para produção de pescado baseado na concentração e no lançamento de fósforo na água**

Esta etapa teve como objetivo apontar as principais abordagens aplicadas por pesquisadores, empresas aquícolas e órgãos gestores e fiscalizadores para mensuração da capacidade de suporte ambiental da produção de pescados e servir de base para definição das equações e modelos a serem utilizados no protocolo tecnológico (Tabela 2).

**Tabela 2.** Benchmarking das abordagens utilizadas para avaliação da capacidade de suporte do ambiente aquático continental para produção de pescados.

| <b>Modelo / Ferramenta</b>                      | <b>Referência / Fonte</b>                                                                                               |
|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Modelo hidrodinâmico de Dillon e Rigler         | Dillon e Rigler (1974)                                                                                                  |
| Modelo de Vollenweider                          | Vollenweider (1975)                                                                                                     |
| Modelo de Ono e Kubitza                         | Ono e Kubitza (2003)                                                                                                    |
| Ecopath with Ecosim                             | <a href="http://www.ecopath.org">www.ecopath.org</a> (NOAA)                                                             |
| Modelo Aquability®                              | Bueno et al. (2019)                                                                                                     |
| Modelos estatísticos                            | Beveridge (1993); Huiwen e Yinglan (2007)                                                                               |
| AWATS                                           | Dudley, Panchang and Newell (2000)                                                                                      |
| MOM (Modelling-Ongrowing fish farms-Monitoring) | Ervik et al. (1997); Hansen et al. (2001); Stigebrandt et al. (2004)                                                    |
| DEPOMOD                                         | Cromey, Nickell e Black (2002)                                                                                          |
| MERAMOD                                         | Sams (2004)                                                                                                             |
| AquaModel                                       | <a href="http://www.aquamodel.org">www.aquamodel.org</a>                                                                |
| FARM model                                      | Ferreira, Hawkins e Bricker (2007)                                                                                      |
| MOHID Water modelling system                    | <a href="http://www.mohid.com/">http://www.mohid.com/</a>                                                               |
| Módulo ECO Lab (DHI Water e Environment)        | <a href="https://www.mikepoweredbydhi.com">https://www.mikepoweredbydhi.com</a>                                         |
| STELLA™                                         | <a href="https://www.iseesystems.com/">https://www.iseesystems.com/</a>                                                 |
| VENSIM®                                         | <a href="http://www.vensim.com/">http://www.vensim.com/</a>                                                             |
| DELPH 3D                                        | <a href="https://www.ixblue.com/products/delph-software-suite">https://www.ixblue.com/products/delph-software-suite</a> |

## **Etapa 3: Definição dos critérios que subsidiaram a escolha das equações e modelos a serem utilizados no protocolo**

O objetivo dessa etapa é indicar os critérios que subsidiaram a escolha das equações a serem empregadas no protocolo tecnológico, e que devem ser considerados previamente a aplicação do mesmo, os quais devem considerar:

- a) *Ser viável para ambientes tropicais e neotropicais*: por se tratar de um país como o Brasil, o reservatório está constantemente sujeito a mudanças em função do regime pluviométrico e variações climáticas, principalmente a temperatura da água, sendo necessário considerar tais fatores.
- b) *Ser aplicável para piscicultura intensiva em grandes corpos hídricos*: tendo como foco avaliar pisciculturas comerciais em reservatórios, os modelos utilizados devem considerar a morfologia do ambiente e o fluxo de energia dos nutrientes dentro de um sistema biológico, desde o processo de utilização até a transformação dos nutrientes absorvidos para a síntese corporal do peixe.
- c) *Malha amostral*: ser suficiente para o levantamento das informações necessárias e ser viável considerando a prática de coleta das amostras.
- d) *Custo para coleta e análise*: não requerer alto investimento para coleta e análise de amostras em campo, de modo a ser acessível ao produtor representando também uma acurácia e precisão que atenda os padrões exigidos nos processos de análise pelos órgãos legais;
- e) *Aplicabilidade para coleta de amostras em relação a logística em campo*: deve haver acesso da propriedade até o laboratório, preferencialmente por rodovias, para facilitar o transporte das amostras coletadas.

#### **Etapa 4: Sequência das equações e modelos matemáticos utilizados**

De modo a atender os atributos e critérios definidos na Etapa 3, optamos pelo uso dos modelos e equações presentes na Tabela 3 para gestão da capacidade de suporte ambiental para fósforo para tomada de decisão e gestão da outorga para produção de tilápia em empreendimentos aquícolas instalados em reservatórios neotropicais.

**Tabela 3.** Modelos e equações selecionadas para gestão da capacidade de suporte ambiental do fósforo na água (CSAp) para tomada de decisão e gestão da outorga da produção de tilápia em águas da União.

| Processo                                                                                        | Ferramenta                                | Metodologia                                                                                                                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Previsão da biomassa de pescado a ser produzida no empreendimento                               | Coefficiente de crescimento térmico (TGC) | Iwana e Tautz (1981)                                                                                                                              |
| Mensuração do potencial lançamento de resíduos no ambiente aquático                             | Modelagem bioenergética nutricional       | Cho e Bureau (1998) com valores de referência para <i>O. niloticus</i> neste ambiente de produção obtidos em Bueno et al. (2022) e Brande (2019). |
| Simulação de cenários dos limites da capacidade de suporte ambiental para fósforo               | Modelo hidrodinâmico Aquability®          | Dillon e Rigler (1974) e Beveridge (1984) adaptado por Bueno et al. (2017)                                                                        |
| Análise da qualidade da água por meio da concentração de fósforo durante a produção de pescados | Índice de estado trófico (IET)            | CETESB; CONAMA, Resolução Nº 357, de 17 de março de 2005                                                                                          |
| Análise da probabilidade de ocorrência dos cenários da CSAp                                     | Simulação Monte Carlo (SMC)               | Software @RISK 7.6 Professional (Palisade Corporation, Ithaca, New York, EUA, registro ID número 7112268)                                         |

## **1.5. O Protocolo Tecnológico: etapas do processo de desenvolvimento e aplicação**

### **Etapas 1: Análises ambientais gerais**

#### **1.1. Dados secundários**

##### **1.1.1. Dados secundários e históricos do empreendimento aquícola e condicionantes ambientais**

Essa etapa tem como objetivo eleger alguns dos parâmetros mais importantes para análise em campo antes de iniciar o empreendimento aquícola e durante as etapas subsequentes. Para isso, é necessário um levantamento de informações secundárias, pesquisas científicas, documentos oficiais e processos de regularização junto aos órgãos públicos.

Além disso, é necessária a identificação das condicionantes ambientais exigidas pelos Órgãos Estaduais de Meio Ambiente (Oemas) durante o processo de licenciamento ambiental de áreas aquícolas e também de parques aquícolas em águas continentais da União, as quais deliberam sobre os principais tópicos que devem ser avaliados e monitorados em relação as condições do ambiente aquático sob influência da produção de pescados de acordo com o apresentado na Tabela 1.

#### **1.2. Dados *in loco* e analisados em laboratório**

##### **1.2.1. Frequência amostral, período e procedimentos**

O objetivo dessa etapa é definir quais amostras devem ser coletadas em campo, bem como a frequência, período e os procedimentos para coleta, preservação e processamento das mesmas em laboratório.

##### **a. Qualidade da água**

Análise dos parâmetros pH, oxigênio dissolvido, transparência e condutividade da água devem ser realizadas quinzenalmente com sonda multi-parâmetros previamente calibrada e testada. A análise da temperatura da água deve ser realizada semanalmente na superfície dos tanques-rede (média 1,5 metros com no mínimo cinco observações obtidas em horários próximos) e também em uma área mínima de 500 m acima do fluxo da água

em relação ao cultivo para servir de controle, seguindo o aplicado por Fialho et al. (2021).

Mensalmente, com uma garrafa de Von Dorn, amostras de água do reservatório devem ser coletadas para determinar os teores totais de fósforo seguindo a metodologia proposta por APHA (2017) método 4500-P B5. Em seguida. Os valores médios obtidos serão submetidos à análise de variância e, quando observadas diferenças significativas entre as médias, será aplicado o teste de Tukey a 5% de significância.

b. Dieta e alimentação

Amostras das rações utilizadas em cada fase do ciclo de cultivo devem ser coletadas aleatoriamente dos lotes (300 g de cada dieta), identificadas e preservadas em sacos térmicos a -10°C e enviadas para laboratório para posterior análise centesimal e comparação com os valores fornecidos no rótulo das rações comerciais seguindo o proposto por NRC (2011).

c. Desempenho zootécnico

Mensalmente, minimamente 3% dos indivíduos de cada fase de produção ou 50 indivíduos (categorizada de acordo com o peso corporal) e safra obtida na piscicultura onde está sendo avaliada a capacidade de suporte ambiental devem ser retirados para pesagem, manejo de transição das fases do cultivo e avaliação da mortalidade. A avaliação dos índices de desempenho zootécnico subsidiará os cálculos dos seguintes parâmetros:

- i. Consumo de ração seca =  $\text{ração seca total} / \Sigma (\text{n}^\circ \text{ de peixes} \times \text{n}^\circ \text{ de dias})$ ;
- ii. Ganho de peso vivo =  $(\text{peso corporal final (g peixe-1)} / \text{n}^\circ \text{ final de peixe}) - (\text{peso corporal inicial (g peixe-1)} / \text{n}^\circ \text{ inicial de peixe})$ ;
- iii. Taxa de conversão alimentar =  $\text{consumo de ração} / \text{ganho de peso vivo seco}$ ;
- iv. Biomassa total =  $\text{n}^\circ \text{ de peixes} \times \text{peso individual}$ ;
- v. Eficiência alimentar =  $\text{ganho de peso vivo seco} / \text{consumo de ração}$ ;

## **Etapas 2: Mensuração do potencial lançamento de resíduos fosfatados no ambiente aquático**

### **2.1. Previsão da biomassa de pescado à ser produzida no empreendimento por meio do modelo do Coeficiente de Crescimento Térmico (TGC)**

Deve-se aplicar o modelo matemático TGC que considera a temperatura da água e o ciclo de produção (em dias) como um fator analítico em relação ao metabolismo do animal. O peso corporal é a variável dependente do somatório graus-dias que, de acordo com as oscilações térmicas do ambiente aquático ao longo do período produtivo, estas variáveis implicarão significativamente no desempenho produtivo do animal (Brett, 1979; Iwama e Tautz, 1981; Dumas et al., 2010).

Primeiramente, calcula-se o coeficiente de crescimento térmico (TGC<sup>1</sup> estimado) a partir do exponencial de crescimento corporal ( $1-b = 0,3333$ ), conforme o definido por Iwama e Tautz (1981) e adaptado por Dumas et al. (2010), Equação 01:

$$TGC = \frac{P_f^{(1-b)} - P_i^{(1-b)}}{(Ta \times d)} \times 100 \quad \text{Eq. 01}$$

Sendo,  $P_i$  e  $P_f$  = peso corporal inicial e final (g/peixe), respectivamente,  $d$  = dias de cultivo,  $Ta$  = temperatura da água (°C) e  $1-b$  = exponencial de crescimento corporal.

Em seguida, ajusta-se o exponencial de crescimento mediante a ferramenta *Solver* do software Microsoft Office Excel® utilizando a função soma residual dos quadrados (RSS) e define-se um novo coeficiente de crescimento térmico (TGC<sup>2</sup> ajustado) e peso final dos animais para cada fase de produção, conforme Equação 02. Esta abordagem estabelece uma relação entre o crescimento corporal observado em campo e o previsto pelo modelo, de modo a obter a melhor precisão para o exponencial e coeficiente de crescimento térmico corporal.

$$TGC, P_f = \left\{ P_i^{(1-b)} + \left[ \frac{TGC \times (Ta \times d)}{100} \right] \right\}^{\left[ \frac{1}{(1-b)} \right]} \quad \text{Eq. 02}$$

A partir da definição do novo TGC para determinada espécie e ambiente aquático/área aquícola, multiplica-se o peso vivo individual corporal (PV) do peixe pelo número de dias futuros de cada lote ou safra.

O valor de peso vivo (PV) de cada peixe deve ser multiplicado pela quantidade total de animais em uma determinada área resultará na biomassa de PV atual e futura para determinado empreendimento aquícola. Com destes cenários baseados na biomassa em produção ou à ser produzida, item fundamental para o cálculo de capacidade de suporte ambiental, define-se o potencial de lançamento dos resíduos oriundos da produção aquícola.

## **2.2. Modelagem bioenergética nutricional para definição do lançamento de efluentes oriundos da produção aquícola**

A quantificação do lançamento dos potenciais efluentes da produção aquícola em tanques-rede segue a abordagem da modelagem bioenergética fatorial de Cho e Bureau (1998) com valores e exponenciais matemáticos ajustados para a espécie *Oreochromis niloticus* produzidas em tanques-rede em ambiente neotropical (Brande, 2019 e Bueno et al. 2022), que permite determinar os resíduos fosfatados particulados (SP) e dissolvidos (SD) para cada lote, safra ou empreendimento estudado. Esta metodologia é aplicada da seguinte forma:

### *a. Metabolismo basal (HeE) e incremento de calor da alimentação (HiE)*

De acordo com o recomendado por Cho e Bureau (1998), o metabolismo basal (HeE, kJ/peixe) é calculado em função da temperatura metabólica e peso corporal (potência de 0,8 do peso vivo do peixe), conforme apresentado na Equação 03, em que (a + bT) é a relação da temperatura (T) com HeE e do peso corporal metabólico (PV<sup>0.8</sup>).

$$HeE = (a + bT) \times PV^{0.8} \quad \text{Eq. 03}$$

O incremento calórico da alimentação (HiE, kJ/peixe) é estimado utilizando 70 observações de 40 estudos publicados entre 1989 e 2015 apresentados por Chowdhury et al. (2013) e dos valores calculados por Bueno (2022) para *O. niloticus* cultivada em tanques-rede em reservatório

tropical. Para isso, considera-se a diferença entre a ingestão energética (IE, kJ/peixe) e a soma da energia para o metabolismo basal (HeE, kJ/peixe), fezes (FE, kJ/peixe), fezes não-fecais (UE + ZE, kJ/peixe) e a perda de energia e energia retida (RE). O RE é obtido a partir da diferença entre a energia bruta obtida no peso final e inicial dos peixes de cada ciclo de produção. O custo de energia da urina (UE) e das brânquias (ZE) é calculado como  $24,9 \cdot (UN + ZN)$  kJ/peixe onde, UN e ZN são as perdas de nitrogênio urinário e branquial de acordo com o proposto para a espécie por Kaushik, (1998) na equação 04:

$$HiE = IE - FE - RE - (UE + ZE) - HeE \quad \text{Eq. 04}$$

*b. Estimativa dos resíduos aquícolas*

O total de resíduos liberados pela piscicultura refere-se aos resíduos sólidos (RS) gerados pela alimentação durante a produção, pelos resíduos da ração e os resíduos dissolvidos (RD). Desta forma, a saída de resíduos sólidos e dissolvidos são estimados utilizando as Equações 05 e 06, respectivamente.

$$RS = MS \text{ ingerida} \times (1 - CDA \text{ do fósforo na MS}) \quad \text{Eq. 05}$$

Onde RS é o total de resíduos sólidos, MS é a matéria seca, a CDA é o coeficiente de digestibilidade aparente do fósforo. Os resíduos dissolvidos de fósforo são estimados a partir da diferença entre os valores digestíveis e retidos nos peixes (Eq. 06).

$$RDP = (P \text{ ingerido} \times CDA \text{ do P}) - P \text{ retido} \quad \text{Eq. 06}$$

Onde RDP são os resíduos dissolvidos fosfatados. Desta forma, obtém-se o fluxo de energia e nutrientes para os sistemas de produção avaliados por meio do modelo bioenergético aplicando valores específicos para a tilápia do Nilo criadas neste reservatório de acordo com o apresentado por Brande (2019); Fialho et al (2021) e Bueno et al. (2022).

*c. Simulação da carga de resíduos da produção de pescados em reservatórios sob diferentes cenários climáticos*

Utilizando os dados zootécnicos obtidos pela modelagem do TGC e na estimativa de resíduos pela modelagem bioenergética nutricional, realiza-se a simulação da carga de resíduos liberada pela produção de pescados em grandes reservatórios de água sob diferentes cenários climáticos. Para isso, serão utilizadas as variáveis:

- i. Dietas comerciais de baixa, média e alta densidade energética das rações com diferentes níveis de fósforo total (0,8; 1,2 e 2,1% de P total)
- ii. Diferentes condições de temperatura da água na área aquícola (21, 25 e 29°C)

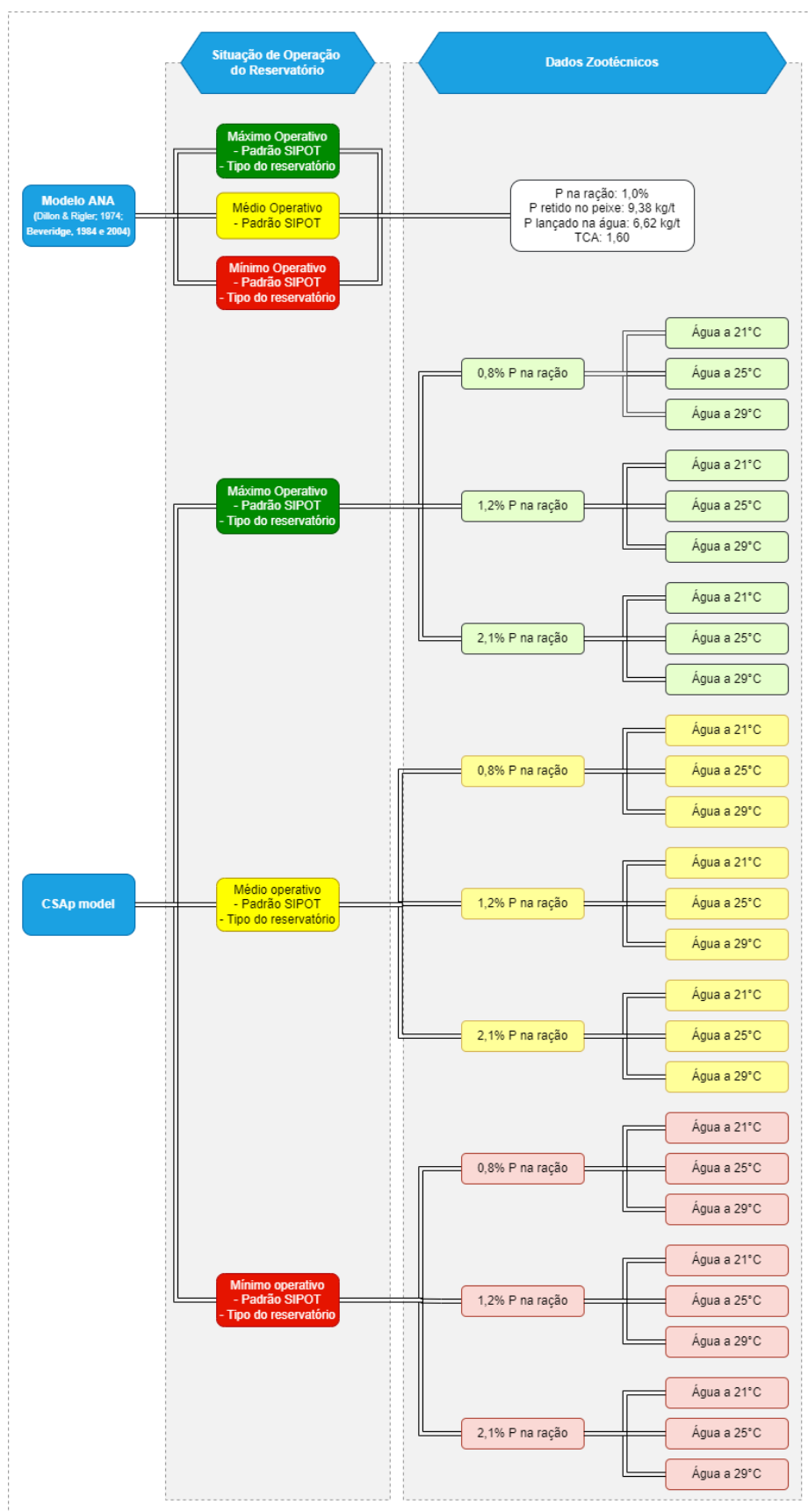
### **Etapas 3: Determinação dos limites da capacidade de suporte ambiental para produção de pescados com base na concentração e lançamento de fósforo na água**

#### **1.1. Capacidade de suporte ambiental baseada na concentração e lançamento de fósforo na água (CSAp) durante a produção de tilápia sob diferentes cenários climáticos, zootécnicos e ambientais**

A partir das características e dos dados hidrológicos do reservatório onde será desenvolvida a atividade aquícola, serão elaborados cenários da CSAp com simulações da carga máxima de fósforo autorizável (kg/ano), bem como a produção máxima autorizável de peixes (t/ano) por meio do modelo matemático Aquability (Tabela 3).

Para isso, foram consideradas diferentes situações de operação do reservatório (máximo, médio e mínimo operativo) com dados hidrológicos disponibilizados pelo Sistema de Informações do Potencial Hidrelétrico Brasileiro (SIPOT), como: cota (m), área (km<sup>2</sup>), volume (hm<sup>3</sup>), vazão média (m<sup>3</sup>/s), tempo de residência (anos) e taxa de renovação da água (anos); e dados zootécnicos padronizados pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) da produção de tilápia (Figura 3), tais como: i) fósforo contido na ração (1,0%), ii) fósforo retido no peixe (9,38 kg/t), iii) fósforo lançado na água (6,62 kg/t) e iv) taxa de conversão alimentar (média

de 1:1,6). Além disso, serão elaborados cenários (CSAp model) com variações da temperatura da água e dos dados zootécnicos obtidos por meio da simulação da carga de resíduos da produção de pescados em reservatórios, conforme metodologia descrita na seção 1.5, etapa 2, (2.2 c).



**Figura 3.** Estrutura dos cenários da CSAp com simulações da carga máxima de fósforo autorizável no reservatório (kg/ano) e máxima produção autorizável de peixes (t/ano).

Considerando ainda que um mesmo reservatório pode ser, ao longo de seu percurso, do tipo fio d'água e de acumulação, o que implica diretamente em suas características limnológicas físicas e químicas (Tundisi e Matsumura-Tundisi, 2003; Nogueira et al., 2008; Perbiche-Neves e Nogueira, 2010; Nogueira et al, 2012), devem ser elaborados cenários da CSAp com dados limnológicos específicos para região de implantação do empreendimento aquícola, por exemplo, a dimensão longitudinal, profundidade, tempo de residência da água entre outros fatores que influenciam a dinâmica dos nutrientes na água dos reservatórios.

Definido os cenários para CSAp, inicia-se a aplicação do modelo o qual considera que a concentração de fósforo na água ( $[P]$ , em  $\text{mg/m}^3$ ) é uma função da carga anual de fósforo ( $La$ , em  $\text{mg/m}^2/\text{ano}$ ), do coeficiente de retenção de fósforo ( $R_p$ ), da profundidade média ( $z$ , em metros), e da taxa de renovação da água do reservatório ( $\rho$ , em anos) (Equação 07).

$$[P] = \frac{La \times (1 - R_p)}{(z \times \rho)} \quad \text{Eq. 07}$$

Em que  $z$  é calculada pela razão entre o volume e a área do corpo hídrico;  $\rho$  é calculada pela razão entre a vazão média e o volume máximo do reservatório; e  $R_p$  é o coeficiente de retenção do P proveniente do estudo realizado por Straškraba (1996), obtido por meio da Equação 08:

$$R_p = 0,761 \times (1 - \exp^{(-0,0282 \times (td \times 365))}) \quad \text{Eq. 08}$$

Onde,  $td$  é o tempo de residência da água no reservatório (anos). O parâmetro da concentração  $P$  na Eq. 07 refere-se ao  $\Delta[P]$  que é o incremento na concentração de fósforo na água para uma determinada carga  $La$  por meio da Equação 09:

$$La = \frac{(\Delta [P] \times z \times \rho)}{(1 - R)} \quad \text{Eq. 09}$$

Em que  $\Delta[P]$  é dado pela concentração atual de  $P$  na água do reservatório subtraída da concentração máxima permitida por Lei (Resolução Conama nº 357/2005). A partir do  $\Delta[P]$  máximo autorizável, calcula-se o  $La$  máximo autorizável, isto é, a quantidade de fósforo que pode ser adicionada à água (Equação 09).

Em seguida, calcula-se o  $L_a$  em função de um  $\Delta[P]$  de 5 mg/m<sup>3</sup>. Valor definido pela ponderação dada em relação ao incremento máximo de 1/6 da concentração permitida de fósforo pela Resolução Conama nº 357/2005 para corpos hídricos de Classe II, a qual enquadra-se a atividade aquícola, o correspondente a 5 mg de fósforo por m<sup>3</sup> de água (ANA, 2009). Os 5/6 restantes são destinados a outros usos em que haja aportes de fósforo, como a diluição de esgotos domésticos e industriais, além do aporte natural.

Em seguida, calcula-se a carga de fósforo autorizável no reservatório todo ( $L_r$ , em mg/ano), utilizando o  $L_a$ , que representa a máxima carga de fósforo autorizável por metro quadrado multiplicando o valor obtido pela área de superfície d'água ( $A$ , em m<sup>2</sup>) do reservatório (Equação 10) e calcula-se  $L_r$  (em kg/ano) por meio da Equação 11, em que  $V$  (hm<sup>3</sup>) é o volume na cota considerada.

$$L_r = L_a \times A \quad \text{Eq. 10}$$

$$L_r = \frac{(\Delta[P] \times V \times \rho)}{(1-Rp)} \quad \text{Eq. 11}$$

Posteriormente, converte-se o  $L_r$  em produção anual autorizável de peixes ( $B$ , em t/ano), por meio da estimativa da proporção de  $P$  na água ( $P_a$ ) para cada tonelada de peixe produzida (Equação 12).

$$B = \frac{L_r}{P_a} \quad \text{Eq. 12}$$

### **3.2. Avaliação do Índice de Estado Trófico (IET) da água durante a produção aquícola**

Nesta etapa do processo, o IET tem por finalidade classificar corpos d'água em diferentes graus de trofia, ou seja, avaliar a qualidade da água quanto ao enriquecimento por nutrientes, como o fósforo total ( $P$ ) (Lamparelli, 2004). A Equação 13, consiste em uma transformação linear dos valores de Carlson (1977) modificada por Kratzer e Brezonik (1981). Posteriormente, o corpo d'água é classificado de acordo com os estados de trofia: ultraoligotrófico, oligotrófico, mesotrófico, eutrófico, supereutrófico e hipereutrófico, de acordo com o índice de Carlson (1977), conforme a Tabela 4.

$$IET(P) = 10 \times \left\{ 6 - \frac{\ln\left(\frac{48}{P_t}\right)}{\ln(2)} \right\} \quad \text{Eq. 13}$$

Onde P é a concentração de fósforo total medida na superfície da água, em  $\mu\text{g.L}^{-1}$  e Ln é o logaritmo.

**Tabela 4.** Valores do Índice de Estado Trófico e respectivas classes de trofia.

| Valor do IET | Estado Trófico    |
|--------------|-------------------|
| < 20         | Ultraoligotrófico |
| 21 - 40      | Oligotrófico      |
| 41 - 50      | Mesotrófico       |
| 51 - 60      | Eutrófico         |
| > 61         | Hipereutrófico    |

#### **Etapla 4: Análises para tomada de decisão e gestão da outorga para produção de tilápia em águas da União**

##### **4.1 Probabilidade da ocorrência dos cenários da CSAp por meio da Simulação estatística de Monte Carlo (SMC)**

A aplicação da SMC tem como objetivo estimar a probabilidade da ocorrência dos cenários da CSAp elaborados na Etapa 3. Para isso, utiliza-se a simulação Monte Carlo que trata-se de um modelo computacional que, por meio de uma série de cálculos probabilísticos, estima a chance de um evento futuro acontecer. Por meio da simulação, é possível estimar a probabilidade da ocorrência dos cenários da CSAp conforme a situação de operação do reservatório, por meio do *software* @RISK 7.6 Professional (Palisade Corporation, Ithaca, New York, EUA, registro ID número 7112268).

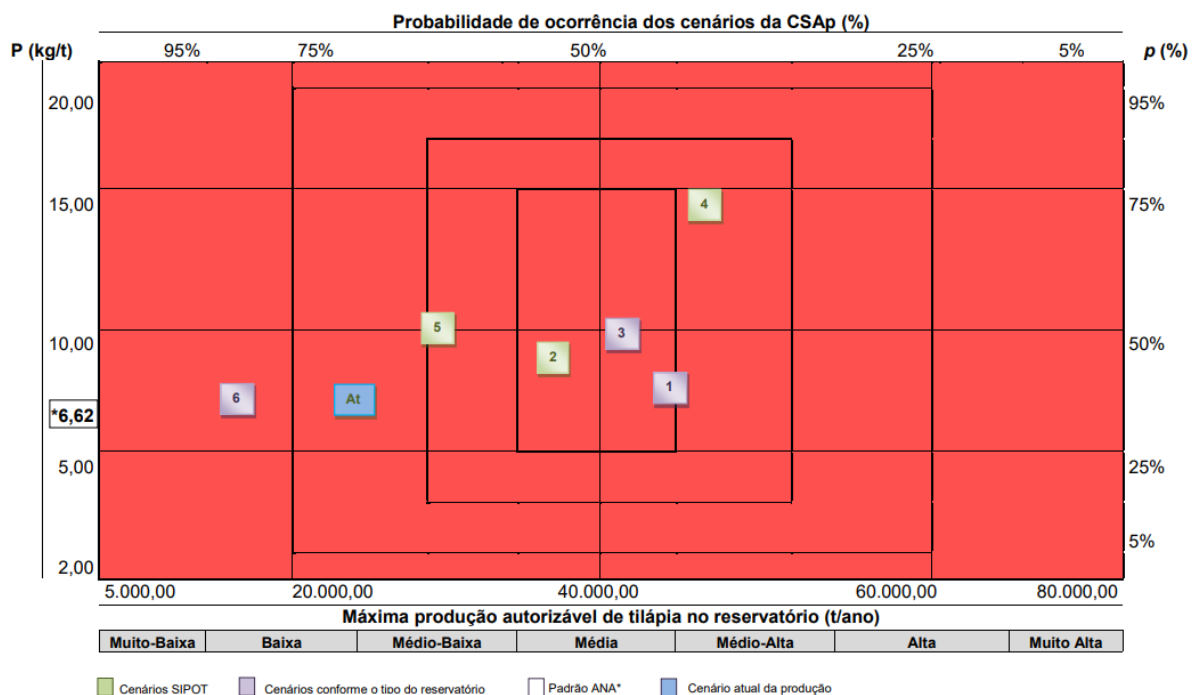
Estima-se a probabilidade da ocorrência dos valores da produção máxima de peixes (B) e fósforo lançado na água (Pa) (variáveis estocásticas de saída) utilizando 10.000 interações. Como variáveis estocásticas de entrada utiliza-se a carga máxima do reservatório, temperatura da água, teor de fósforo na ração e fósforo digestível. Estas variáveis foram definidas com base nas informações necessárias para o cálculo da capacidade de suporte do reservatório pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e para a outorga de uso da água para fins de aquicultura.

A partir disto, realiza-se a SMC por meio de interações entre as variáveis estocásticas para cada variável de saída mediante o proposto por Gentle (1998) e Vose (2008), conforme a Equação 14 de probabilidade estocástica:

$$\int_a^b f(x_1, x_2, x_3 \dots x_k) x = \text{probabilidade} \{a \leq x \leq b\} \text{ Eq. 14}$$

Sendo, f = função probabilística;  $x_{(1,2,3,\dots,k)}$  = variáveis estocásticas de saída; a e b = intervalo de probabilidade de ocorrência de  $B_k$  e  $P_{ak}$ .

Os resultados obtidos são dispostos em um mapa que permite identificar a probabilidade de ocorrência de cada cenário simulado em relação ao percentual possível de ocorrer dado a temperatura da água, o lançamento de fósforo na água, as condições zootécnicas e ambientais consideradas. Isto permitirá ao gestor e aquicultor tomar decisão e gerir a outorga de água dada na condicionante ambiental para produção de tilápia em águas da União. Assim, poderá aplicar as melhores práticas de produção e monitoramento da CSAp para cada área aquícola instalada em determinado reservatório.



**Figura 4.** Mapa demonstrativo da probabilidade da ocorrência dos cenários da CSAp e da máxima produção autorizável de tilápia em um reservatório (t/ano) considerando o lançamento de fósforo na água (kg/t).

## 1.6. Reivindicações

1. Processo de obtenção de parâmetros de cultivo em aquicultura, caracterizado pelo fato de compreender as seguintes etapas:

- a) Processo de predição e determinação do crescimento térmico corporal dos animais aquáticos por meio de equação matemática com algoritmos específicos desenvolvidos para a espécie *Oreochromis niloticus* criadas em clima tropical e neotropical;
- b) Estimativa de requisitos energéticos dos animais por meio de algoritmo matemático;
- c) Cálculo da carga de nutrientes lançadas da produção aquícola no ambiente aquático e definição da capacidade de suporte ambiental para produção máxima de pescado em lagos e reservatórios continentais por meio de equação matemática e processos integrados de análise.

2. Processo de obtenção de parâmetros de cultivo em aquicultura, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo algoritmo:  $M1 = \left[ \left( \left[ \text{peso final} \right]^{\left( \text{exponencial de crescimento corporal do animal} \right)} - \left[ \text{Peso inicial} \right]^{\left( \text{exponencial de crescimento corporal do animal} \right)} \right) / \left( \sum_{\text{período (dias)=0}}^{\text{ciclo de produção dias(temperatura (°C))=período em dias}} \left[ \text{período de cultivo em dias}_i \right] \right) \right] * 100$ .

3. Processo de obtenção de parâmetros de cultivo em aquicultura, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo algoritmo matemático ser dado pelo cálculo do metabolismo basal (HeE, kJ peixe<sup>-1</sup>) onde utiliza-se a função da temperatura metabólica e peso corporal (potência de 0,8 do peso vivo do peixe), sendo: metabolismo basal = (relação da temperatura °C + temperatura basal em °C) \* Peso corporal<sup>0,8</sup>. Em que, (a + bT) é a relação da temperatura (T) com HeE e do peso corporal metabólica (BW<sup>0,8</sup>). Em seguida, calcula-se o incremento calórico da alimentação (HiE, kJ peixe<sup>-1</sup>), utiliza-se a diferença entre a ingestão energética (IE, kJ peixe<sup>-1</sup>) e a soma da energia para o metabolismo basal (HeE, kJ peixe<sup>-1</sup>) e para os valores obtidos para fezes (FE, kJ peixe<sup>-1</sup>), fezes não-fecal (UE + ZE, kJ peixe<sup>-1</sup>), perda de energia e energia retida (RE), por meio da Equação =  $HiE = IE - FE - RE - (UE + ZE) - HeE$ .

4. Processo de obtenção de parâmetros de cultivo em aquicultura, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato da etapa utilizar equação matemática para calcular a capacidade de suporte do ambiente aquático (CS) dado pela determinação da concentração de fósforo na água ([P], em  $\text{mg}/\text{m}^3$ ) usando a função da carga anual de fósforo (em  $\text{mg}/\text{m}^2\cdot\text{ano}$ ), divide-se pelo coeficiente de retenção de fósforo ( $R_p$ ) subtraindo de 1, onde os valores obtidos são divididos pelo dado da profundidade média ( $z$ , em metros), e a taxa de renovação da água do reservatório ( $\rho$ , em  $\text{anos}^{-1}$ ), descritos da seguinte forma  $[P] = La (1 - R_p) / (z \cdot \rho)$ . Onde: ( $z$ ) é a profundidade média calculada pela razão entre o volume e a área do corpo hídrico; ( $\rho$ ) é a taxa de renovação, calculada pela razão entre a vazão média e o volume máximo do corpo hídrico onde está o empreendimento aquícola;  $R_p$  é o coeficiente de retenção do fósforo calculado:  $R_p = 1 / (1 + \text{exponente fixo } 0,614 \cdot p^{0,491})$ . Em seguida, utiliza-se o parâmetro da concentração de fósforo total na água durante o ano  $\Delta[P]$ . Seguindo a equação matemática, calcula-se a concentração máxima de fósforo total na água em função de um  $\Delta[P]$  de  $5 \text{ mg}/\text{m}^3$ . Em seguida, calcula-se a carga de fósforo autorizável no reservatório (considerando toda a área de superfície), que estará em  $\text{mg}/\text{ano}$ , multiplicando o valor obtido pela área de superfície d'água ( $A$ , em  $\text{m}^2$ ) do ambiente aquático. Calcula-se a carga de resíduos sólidos e dissolvidos ( $TR$ ) = Matéria seca ingerida via ração  $\times$  (1 – coeficiente de digestibilidade aparente da ração com base na matéria seca).

Calcula-se a capacidade de suporte pelo algoritmo M3 que será = carga máxima de fósforo total no ambiente aquático ( $\text{kg}/\text{ano}$ ) / fósforo total lançado na água oriundo da produção aquícola ( $\text{kg}/\text{t}$  animais) definido na equação M2, multiplicado pela área de espelho d'água ou superfície, em  $\text{m}^2$ .

5. Uso do processo, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por processamento e mensuração de dados e informações para propósitos administrativos e de gestão ambiental e produtiva da produção de pescados em lagos e reservatórios que empregam o sistema de cultivo em tanques-rede, onde uma série de processos integrados e sequenciais com equações e algoritmos específicos permitem direcionar para uma seleção de cenários que analisam potenciais externalidade ambientais, limites máximos de produção do pescado em determinado recurso hídrico baseado no lançamento e concentração do fósforo

como elemento limitando para a determinação da capacidade de suporte ambiental e gestão da outorga para produção dos organismos aquáticos em lagos e reservatórios tropicais e neotropicais.

## 2. Referências Bibliográficas

- ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. 2009. Nota Técnica n.009/2009/GEOUT/SOF-ANA: atualização na metodologia de análise de pedidos de outorga para piscicultura em tanques-rede. Brasília, 2009. 3p.
- APHA, 2017. Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association, Washington, DC.
- Azevedo, P.A.; Podemski, C.L.; Hesslein, R.H.; Kasian, S.E.M.; Findlay, D.L.; Bureau, D.P. 2011. Estimation of waste outputs by a rainbow trout cage farm using a nutritional approach and monitoring of lake water quality. *Aquaculture*, v.311, p.175-186. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2010.12.001>.
- Beveridge, M. 1993. Cage and pen fish farming: carrying capacity models and environmental impact. FAO Fisheries Technical Paper. n. 255. Rome, FAO. 131 p.
- Brande, M.R. 2019. Modelagem financeira e risco econômico da produção comercial de tilápia (*Oreochromis niloticus*) em lagos e reservatórios tropicais. Jaboticabal: Centro de Aquicultura da Universidade Estadual Paulista. 102 p. Dissertação de Mestrado.
- Brasil. Decreto nº 10.576, de 14 de dezembro de 2020. Dispõe sobre a cessão de uso de espaços físicos em corpos d'água de domínio da União para a prática da aquicultura.
- Brasil. Decreto nº 4.895, de 25 de novembro de 2003. Dispõe sobre a autorização de uso de espaços físicos de corpos d'água de domínio da União para fins de aquicultura, e dá outras providências.
- Brett, J.R.; Groves, T.D.D. 1979. Physiological energetics. In: Fish physiology. Hoar, W.S., Randall D.J.; Brett, J.R. (Eds.) Academic Press Inc. Ltd., London, Vol. VIII.
- Bueno, G.W.; Bernal, F.E.M.; Roubach, R.; Skipper-Horton, J.O.; Fialho, N.S.; Sampaio, F.G.; Bureau, D.P. 2022. Mathematical modelling of waste outputs in the aquatic environmental from commercial cage farm under tropical climate conditions. *Aquaculture Environment Interactions*, NO PRELO.
- Bueno, G. W.; Roubach, R.; Bernal, F. E.; Godoy, E. M.; Mattos, F. T.; Valenti, W. C. 2019. Aquability-metodologia para determinação de resíduos e gestão da capacidade de suporte para produção de pescados em

- reservatórios. Embrapa Pesca e Aquicultura-Capítulo em livro técnico (INFOTECA-E).
- Bueno, G.W.; Bureau, D.; Skipper-Horton, J.O.; Roubach, R.; Mattos, F.T.; Bernal, F.E.M. 2017. Mathematical modeling for the management of the carrying capacity of aquaculture enterprises in lakes and reservoirs. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.52, n.9, p.695-706. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2017000900001>.
- Bueno, G.W. 2015. Modelo bioenergético nutricional e balanço de massas para o monitoramento e estimativa de efluentes da produção comercial de tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*) em reservatório tropical. Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília. 127p. Tese de Doutorado.
- Bureau, D.P.; Hua, K. 2010. Towards effective nutritional management of waste outputs in aquaculture, with particular reference to salmonid aquaculture operations. *Aquaculture Research*, v.41, p.777-792. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2009.02431.x>.
- Carlson, R.E. 1977. A trophic state index for lakes. *Limnology and oceanography*, v.22, n.2, p.361-369. <https://doi.org/10.4319/lo.1977.22.2.0361>.
- Cho, C.Y.; Bureau, D.P. 1998. Development of bioenergetic models and the Fish-PrFEQ software to estimate production, feeding ration and waste output in aquaculture. *Aquatic Living Resources*, v.11, p.199-210. [https://doi.org/10.1016/S0990-7440\(98\)89002-5](https://doi.org/10.1016/S0990-7440(98)89002-5).
- Chowdhury, M.A.K.; Siddiqui, S.; Hua, K.; Bureau, D.P. 2013. Bioenergetics-based factorial model to determine feed requirement and waste output of tilapia produced under commercial conditions. *Aquaculture*, v.410/411, p.138-147. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.06.030>.
- CONAMA - Brasil. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>.
- CONAMA - Brasil. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 413, de 26 de junho de 2009.
- Cromey, C.J., Nickell, T.D.; Black, K.D. 2002. DEPOMOD modelling the deposition and biological effects of waste solids from marine cage farms. *Aquaculture*. v.214, n.1-4, p.211-239. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(02\)00368-X](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(02)00368-X).

- Dillon, P.J.; Rigler, F.H. 1974. A test of a simple nutrient budget model predicting the phosphorus concentration in lake water. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, v.31, p.1771-1778. <https://doi.org/10.1139/f74-225>.
- Dudley, R.W.; Panchang, V.G.; Newell, C.R. 2000. Application of a comprehensive modeling strategy for the management of net-pen aquaculture waste transport. *Aquaculture*, v.187, n.3-4, p.319-349. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(00\)00313-6](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(00)00313-6).
- Dumas, A.; France, J; Bureau, D.P. 2010. Modelling growth and body composition in fish nutrition: where have we been and where are we going? *Aquaculture Research*, 41, 161-181. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2009.02323.x>.
- Ervik, A., Hansen, P.K., Aure, J., Stigebrandt, A., Johannessen, P. & Jahnsen, T. 1997. Regulating the local environmental impact of intensive marine fish farming I. The concept of the MOM system (Modelling-Ongrowing fish farms-Monitoring). *Aquaculture*, v.158, n.1-2, p.85-94. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(97\)00186-5](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(97)00186-5).
- Ferreira, J.G., Hawkins, A.J.S., Bricker, S.B. 2007. Management of productivity, environmental effects and profitability of shellfish aquaculture – the Farm Aquaculture Resource Management (FARM) model. *Aquaculture*, v.264, p.160-174. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.12.017>.
- Fialho, N.S.; Valenti, W.C.; David, F.S.; Godoy, E.M.; Proença, D.C.; Roubach, R.; Bueno, G.W. 2021. Environmental sustainability of Nile tilapia net-cage culture in a neotropical region. *Ecological Indicators*, v. 129, p. 108008. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108008>.
- Gentle, J.E. 1998. Random number generation and Monte Carlo methods. Springer, New York, New York, USA.
- Hansen, P.K., Ervik, A., Schaaning, M., Johannessen, P., Aure, J., Jahnsen, T.; Stigebrandt, A. 2001. Regulating the local environmental impact of intensive, marine fish farming: II. The monitoring programme of the MOM system (Modelling-Ongrowing fish farms-Monitoring). *Aquaculture*, v.194, n.1-2, p.75-92. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(00\)00520-2](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(00)00520-2).
- Huiwen, C., Yinglan, Y. 2007. Management of marine cage aquaculture. Environmental carrying capacity method based on dry feed conversion rate. *Env. Sci. Pollut. Res.* v. 14, n. 7, p. 463-469. <https://doi.org/10.1065/espr2007.05.423>

- Iwama, G. K.; Tautz, A. F. 1981. A Simple Growth Model for Salmonids in Hatcheries. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 38: 649-656. <https://doi.org/10.1139/f81-087>.
- Kaushik, S.J. 1998. Nutritional bioenergetics and estimation of waste production in non-salmonids. *Aquatic Living Resources*, v.11, p.211-217. [https://doi.org/10.1016/S0990-7440\(98\)89003-7](https://doi.org/10.1016/S0990-7440(98)89003-7).
- Kratzer, C.R.; Brezonik, P.L.A. 1981. Carlson-type trophic state index for nitrogen in Florida lakes. *Water Resour. Bull.*, Baton Rouge, v.17, n.4, p.713-715. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1981.tb01282.x>.
- Lamparelli, M.C. 2004. Grau de trofia em corpos d'gua do Estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento. 2004. 207f. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Lupatsch, I.; Kissil, G.W. 1998. Predicting aquaculture waste from gilthead seabream (*Sparus aurata*) culture using a nutritional approach. *Aquatic Living Resources*, v.11, p.265-268. [https://doi.org/10.1016/S0990-7440\(98\)80010-7](https://doi.org/10.1016/S0990-7440(98)80010-7).
- Nogueira, M.G.; Neves, G.P.; Naliato, D.A.O. 2012. Limnology of Two Contrasting Hydroelectric Reservoirs (Storage and Run-of-River) in Southeast Brazil, *Hydropower - Practice and Application*, Dr. Hossein Samadi-Boroujeni (Ed.), ISBN: 978-953-51-0164-2, InTech. <https://doi.org/10.5772/31829>.
- Nogueira, M.G.; Reis-Oliveira, P.C. & Britto Y.T. 2008 Zooplankton assemblages (Copepoda and Cladocera) in a cascade of reservoirs of a large tropical river (SE Brazil). *Limnetica*, Vol.27, pp. 151-170.
- NRC. National Research Council. 2011. Nutrient requirements of fish and shrimp. Washington: National Academy Press. 392p.
- Perbiche-Neves, G. e Nogueira, M.G. 2010. Multidimensional effects on cladoceran (Crustacea, Anomopoda) assemblages in two cascade reservoirs (SE - Brazil). *Lakes and Res.: Research and Manag.*, v.15, p. 151-164.
- Ross, L.G., Telfer, T.C., Falconer, L., Soto, D., Aguilar-Manjarrez, J., Asmah, R., Bermúdez, J., Beveridge, M.C.M., Byron, C. J., Clément, A., Corner, R., Costa-Pierce, B.A., Cross, S., De Wit, M., Dong, S., Ferreira, J.G., Kapetsky, J.M., Karakassis, I., Leschen, W., Little, D., Lundebye, A.-K., Murray, F.J., Phillips, M., Ramos, L., Sadek, S., Scott, P.C., Valle-levinson, A., Waley, D., White, P.G. e Zhu, C. 2013. Carrying capacities and site selection within the ecosystem approach to aquaculture. In L.G. Ross, T.C. Telfer, L. Falconer,

- D. Soto e J. Aguilar-Manjarrez, eds. Site selection and carrying capacities for inland and coastal aquaculture, pp. 19–46. FAO/Institute of Aquaculture, University of Stirling, Expert Workshop, 6–8 December 2010. Stirling, the United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland. FAO Fisheries and Aquaculture Proceedings n. 21. Rome, FAO. 282 pp.
- Scottish Association for Marine Science (SAMS). 2004. Ecosystem approach for sustainable aquaculture. In The ECASA Toolbox [online]. United Kingdom. [www.ecasa.org.uk](http://www.ecasa.org.uk).
- Stigebrandt, A., Aure, J., Ervik, A. & Hansen, P.K. 2004. Regulating the local environmental impact of intensive marine fish farming: III. A model for estimation of the holding capacity in the Modelling-Ongrowing fish farm-Monitoring system. *Aquaculture*, v.234, n.1-4, p.239-261. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2003.11.029>.
- Straškraba, M. 1996. Lake and reservoir management, Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie: Verhandlungen, v.26, p.193-209. <https://doi.org/10.1080/03680770.1995.11900703>.
- Tundisi, J.G. e Matsumura-Tundisi, T. 2003 Integration of research and management in optimizing multiple uses of reservoirs: the experience in South America and Brazilian case studies. *Hydrobiologia*, Vol.500, pp. 231–42.
- Vollenweider, R.A. 1975. Input-output models with special reference to the phosphorus loading concept in limnology. *Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie*, v.37, p.53-84. <https://doi.org/10.1007/BF02505178>.
- Vose, D. 2008. *Risk analysis: A quantitative guide*. John Wiley e Sons, New York, New York, USA.
- YI, Y. 1998. A bioenergetics growth model for Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) based on limiting nutrients and fish standing crop in fertilized ponds. *Aquacultural Engineering*, v.18, p.157-173. [https://doi.org/10.1016/S0144-8609\(98\)00028-4](https://doi.org/10.1016/S0144-8609(98)00028-4).

## CAPÍTULO II

### NOVA ABORDAGEM PARA MODELAGEM DA CAPACIDADE DE SUPORTE AMBIENTAL EM RESERVATÓRIO NEOTROPICAL SOB DIFERENTES CONDIÇÕES CLIMÁTICAS E DE PRODUÇÃO DA TILÁPIA DO NILO

Elisa Maia de Godoy<sup>1</sup>, Tavani R. Camargo<sup>1</sup>, Maicon da Rocha Brande<sup>1</sup>;  
Gianmarco S. David<sup>1,3</sup>; Fernanda G. Sampaio<sup>6</sup>; Flávia T. Matos<sup>4</sup>; Pablo O.  
Gallardo<sup>5</sup>; Guilherme W. Bueno<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Aquaculture Center, São Paulo State University (UNESP), Jaboticabal, SP, Brazil;

<sup>2</sup>Department of Fishery Engineering, São Paulo State University (UNESP), Registro, SP, Brazil;

<sup>3</sup>São Paulo's Agency for Agribusiness Technology (APTA), Jaú, SP, Brazil.

<sup>4</sup> Brazilian Agricultural Research Corporation - Embrapa, Palmas, TO, Brazil.

<sup>5</sup> Department of Agricultural and Aquaculture Sciences, Faculty of Sciences, University of Magallanes, Punta Arenas, Chile;

<sup>6</sup> Brazilian Agricultural Research Corporation – Embrapa Environment, Ministry of Livestock and Food Supply, Jaguariúna, SP, Brazil.

**RESUMO:** O estudo avaliou uma nova abordagem desenvolvida (CSAp model) para determinar a capacidade de suporte ambiental em relação ao lançamento e concentração de fósforo na água (CSAp) sob diferentes condições climáticas e de produção da tilápia (*Oreochromis niloticus*) criadas em tanques-rede no reservatório neotropical em Chavantes, São Paulo, Brasil. Utilizaram-se dados históricos de 178 lotes de produção da *O. niloticus* e climáticos de 2010 a 2021. Durante um ciclo de produção de ~215 dias realizaram avaliaram a composição das rações comerciais utilizadas e o desempenho zootécnico dos peixes criados em 55 tanques-rede de 48m<sup>3</sup>. Aplicou-se CSAp model para simular a carga de P-total lançada na água com uso de três rações comerciais contendo 0,8; 1,2 e 2,1% P-total sob temperaturas da água de 21, 25 e 29°C. O CSAp model simulou 50 cenários de CSAp e 10.000 interações possíveis considerando a carga de P-total e o limite máximo de produção de peixes para este ambiente aquático. A ração com 1,2% de P-total fornecida sob 21, 25 e 29°C, liberaram no ambiente aquático 5,4; 7,8 e 8,6kg de P-total por tonelada de tilápia. Em média, 50% dos cenários e simulações avaliadas para CSAp encontram-se na faixa produtiva de 22.000 a 50.000 ton. peixes ao ano. O uso de menores níveis de P-total digestível das rações pode reduzir em até duas vezes o lançamento de fósforo no ambiente, resultando no incremento da CSAp. A aplicação desta abordagem se mostrou eficiente para simular e estimar a produção de resíduos no ambiente aquático provenientes da atividade aquícola.

**PALAVRAS-CHAVE:** aquicultura, águas da União, capacidade de suporte, mudanças climáticas.

**ABSTRACT:** The study tested a new developed approach (CSAp model) to determine the environmental carrying capacity in relation to the release and concentrations of phosphorus in water (CSAp) under different climatic and production conditions of tilapia (*Oreochromis niloticus*) raised in cages in the Chavantes Neotropical reservoir, São Paulo, Brazil. Historical data from 178 production lots of *O. niloticus* and climatic conditions from 2010 to 2021 were used. During a production cycle of ~215 days, evaluated the composition of the commercial feeds and zootechnical performance of fish raised in 55 cages of 48 m<sup>3</sup>. CSAp model was applied to simulate the load of P-total released into the water using commercial feeds containing 0.8; 1.2 and 2.1% P-total at water temperatures of 21, 25 and 29°C. The CSAp model simulated 50 CSAp scenarios and 10,000 possible interactions considering the total-P load and the maximum fish production limit for this aquatic environment. The feed with 1.2% total-P, fed at 21, 25 and 29°C, released 5.4 into the aquatic environment; 7.8 and 8.6 kg of P-total per ton of tilapia. On average, 50% of the scenarios and simulations evaluated for CSAp are in the productive range of 22,000 to 50,000 tons. fish per year. The use of lower levels of digestible total-P in the feed and higher water temperature can reduce by up to three times the release of phosphorus into the environment, resulting in an increase in CSAp. Thus, the application of this approach proved to be efficient to simulate and estimate the production of waste in the aquatic environment from aquaculture activities.

**KEY-WORDS:** aquaculture, Union waters, carrying capacity, climate change.

## 1. Introdução

O crescimento constante da aquicultura de tilápia em sistemas de produção instalados em lagos e reservatórios tem levantado preocupações em relação à liberação de alimentos e resíduos nos ambientes aquáticos circundantes. Os resíduos fosfatados trata-se de um dos mais preocupantes, uma vez que o fósforo é um elemento limitante para o crescimento de algas na água, sobretudo em ambientes tropicais e neotropicais, implicando na eutrofização e comprometendo os usos múltiplos de grandes reservatórios de água. Os impactos potenciais da criação de tilápias nos corpos d'água naturais tornam-se exacerbados quando se consideram os requisitos legais em alguns países para a produção de peixes em lagos e reservatórios públicos (Bueno et al. 2015; Falconer et al., 2019; Bohnes e Laurent, 2021).

Atualmente, as agências ambientais da Ásia e da América do Sul e vários outros países não têm uma metodologia definida para quantificar as cargas de

efluentes da piscicultura (Xie et al., 1997; Glencross, 2008; Trung et al. 2011; Bueno et al., 2017). A falta de metodologias adequadas para a determinação da emissão de resíduos tem gerado complicações para o setor aquícola, uma vez que são necessárias algumas medidas para a obtenção de licença ambiental, seguro aquícola, crédito bancário e autorizações legais para o exercício da atividade. As dificuldades relacionadas ao desenvolvimento da atividade aquícola têm desestimulado cada vez mais a participação dos empresários rurais, gerando incertezas quanto à sustentabilidade do setor e prevendo o uso dos recursos naturais.

Os estudos utilizados para prever a liberação de resíduos da aquicultura e a capacidade de suporte no ambiente aquático, que é baseada na concentração de fósforo lançada no ambiente, consideram todo o processo como um "sistema de produção fechado", onde a entrada e a saída de nutrientes ocorrem sem avaliar as diferentes respostas fisiológicas dos animais e as influências que o ambiente aquático exerce diretamente em relação a excreção de nutrientes pelos peixes - geralmente com uma sub ou superestimativa das concentrações que esses resíduos causam (Ferreira et al., 2008; Weitzman e Filgueira, 2019; Bueno et al. 2022).

Assim como outras atividades do agronegócio, a aquicultura necessita de instrumentos e ferramentas modernas que permitam o monitoramento e a gestão ambiental para reduzir seus impactos ao longo do processo produtivo (Nobile et al. 2020). Em países *players* da produção de *O. niloticus* como o Brasil e a China, onde a aquicultura representa grande parte da produção pesqueira e a expansão da aquicultura praticada em lagos e reservatórios continentais poderá apresentar um aumento de 35% na produção de pescado mundial, o desenvolvimento de métodos de monitoramento ambiental de baixo custo é o principal fator indicado para implementação das boas práticas de manejo e operações sustentáveis em toda a cadeia de produção (Ross et al., 2013; Fitzsimmons, 2021; Sampaio et al., 2021).

A atividade aquícola em grandes lagos e reservatórios de água tem se expandido no Brasil que possui ~8 mil km de lâmina de água disponíveis para aquicultura – isto equivale a Portugal e Espanha juntos em área territorial. Sobretudo, o país destaca-se na produção de tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*)

que representa aproximadamente 61% da produção nacional e classificando o país como o quarto maior produtor em termos globais (Valenti et al, 2021; Peixe BR, 2021). No entanto, apesar de favorecer as economias locais e regionais, a aquicultura pode resultar em impactos negativos no meio ambiente, levantando preocupações em relação a sustentabilidade da atividade (Agostinho et al., 2016; Lima et al., 2016; Fialho et al., 2021; Godoy et al., 2022).

Diante desse cenário, o lançamento de resíduos fosfatados no ambiente aquático torna-se ainda mais preocupante com a ocorrência de eventos climáticos extremos como secas, inundações, tempestades, aumento da temperatura do ar e da água o que, naturalmente em ambientes com longo tempo de residência e pobre circulação de água como alguns lagos e reservatórios, estes impactos podem ser mais intensos e se estender por uma área maior (Matta et al., 2019; D'Abramo e Slater, 2019).

O atual avanço tecnológico impulsionou o desenvolvimento de modelos matemáticos de simulação e otimização de impactos ambientais, estes têm sido amplamente aplicados em estudos hidrológicos de sistemas complexos, como reservatórios de água (Lopes e Santos, 2002; Falconer et al., 2019). Fato que se agrava ainda mais, quando considerado as especificidades que uma abordagem para CSA aplicada em ambientes públicos sob influências de empreendimentos aquícolas (Ferreira et al. 2013).

Nesse contexto, o trabalho avaliou uma nova abordagem desenvolvida (CSAp model) para determinar a capacidade de suporte ambiental em relação ao lançamento e concentração de fósforo na água sob diferentes condições climáticas e de produção da tilápia (*Oreochromis niloticus*) criadas em tanques-rede no reservatório neotropical em Chavantes, São Paulo, Brasil.

## **2. Material e Métodos**

### **2.1. Área de estudo**

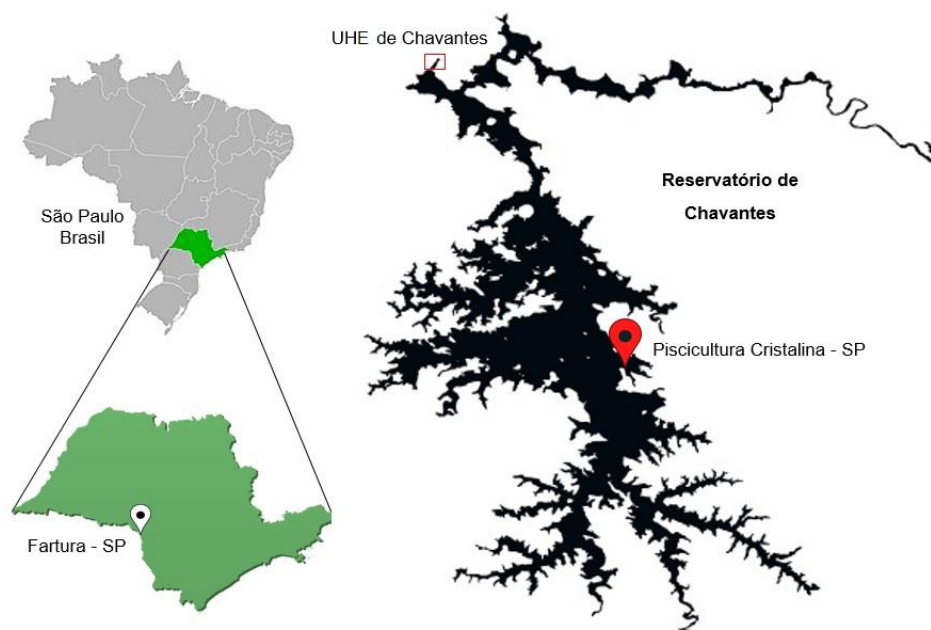
O estudo foi desenvolvido em uma fazenda comercial produtora de tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*) em tanques-rede em sistema intensivo instalada no reservatório da Usina Hidrelétrica de Chavantes, no município de Fartura, São

Paulo, Brasil (644.481 E, 7.413.975 N) (Figura 1). Situado na bacia hidrográfica do rio Paranapanema, na divisa dos estados do Paraná e São Paulo, Brasil (municípios de Ribeirão Claro e Chavantes, respectivamente).



**Figura 1.** Vista aérea da fazenda de produção comercial da tilápia em sistemas de tanques-rede em Chavantes, São Paulo, Brasil. Fonte: Piscicultura Cristalina.

A área classificação climática desta região é clima subtropical úmido (Cfa, segundo a classificação climática de Köppen). O reservatório de Chavantes possui ~400 km<sup>2</sup>, com potência instalada de geração de energia elétrica de 414 MW e com função de acumular água para a regularização da vazão à jusante, sendo assim um típico reservatório de armazenamento com forma dendrítica (Figura 2).



**Figura 2.** Ilustração da morfologia dendrítica do reservatório de Chavantes e localização da área de estudo (Piscicultura Cristalina). Fonte: Organização da autora.

O formato geográfico do reservatório influencia na estrutura e funcionamento no regime hídrico deste reservatório artificial, conferindo a ele maior estabilidade física, profundidade, volume, área, variação do nível da água e ocorrência de estratificação térmica sazonal (Soares et al., 2008; Nogueira et al., 2012). Assim, foram identificadas as principais características morfométricas e hidrológicas deste reservatório (Tabela 1), para utilizarmos na modelagem matemática posterior.

**Tabela 1.** Características morfométricas e hidrológicas do reservatório neotropical de Chavantes, São Paulo, Brasil.

| Parâmetro <sup>1</sup>                   | Valor de Referência |
|------------------------------------------|---------------------|
| Cota (m)                                 | 465,23 a 474,00     |
| Área (km <sup>2</sup> )                  | 301,78 a 402,53     |
| Volume de água (hm <sup>3</sup> )        | 5.754 a 8.795       |
| Vazão média afluente (m <sup>3</sup> /s) | 321 a 400           |
| Profundidade média (m)                   | Até 90              |
| Tempo de residência da água (dias)       | > 130               |

<sup>1</sup> Sistema de Informações do Potencial Hidrelétrico Brasileiro (SIPOT); Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

## **2.2. Levantamento de dados secundários, históricos e das condicionantes ambientais**

Para averiguar a conformidade do empreendimento com as condicionantes dos órgãos ambientais e legislações vigentes, realizou-se um levantamento de informações de documentos oficiais, processos de regularização, pesquisas científicas e dados secundários referentes ao estado de São Paulo, a Bacia Hidrográfica do Paranapanema, a UHE de Chavantes e ao município de Fartura. Dados históricos zootécnicos de 178 lotes de produção da *O. niloticus* e climáticos de 2010 a 2021, desta mesma região também foram utilizados para *input* de dados no modelo CSAp.

## **2.3. Levantamento de dados *in loco* e análise em laboratório**

### **Qualidade da água**

Durante sete meses, quinzenalmente foram realizadas 61 observações dos parâmetros de pH, oxigênio dissolvido, transparência e condutividade utilizando sonda YSI multi-parâmetros na área da piscicultura e na montante e jusante do reservatório. A temperatura da água (°C) foi analisada semanalmente na superfície dos tanques (média 1,5 metros com no mínimo cinco observações obtidas em horários próximos) e também em uma área mínima de 500 m acima do fluxo da água em relação ao cultivo para servir de controle, seguindo o aplicado por Fialho et al. (2021). No mesmo período, mensalmente, foram coletadas 32 amostras de água do reservatório com uma garrafa de Von Dorn, destas foram analisadas as concentrações de fósforo total seguindo a metodologia proposta por APHA (2017). Os valores médios obtidos foram submetidos à análise de variância e, quando observadas diferenças significativas entre as médias, foi aplicado o teste de Tukey a 5% de significância.

### **Dieta e alimentação**

Durante um ciclo ~215 dias de produção da *O. niloticus*, três rações comerciais foram utilizadas na fazenda de acordo com o peso do peixe: pellets de 4mm durante a fase JVI; pellets de 6mm durante a fase JVII; e pellets de 8mm até atingir o PM. Amostras das rações utilizadas nas três fases do cultivo foram coletadas aleatoriamente (300g de cada dieta), identificadas e preservadas em

sacos térmicos a  $-10^{\circ}\text{C}$  e enviadas para laboratório para posterior análise centesimal e comparação com os valores fornecidos no rótulo das rações comerciais.

### **Desempenho zootécnico**

Durante aproximadamente oito meses (um ciclo/safra), foram acompanhados 55 tanques-rede de  $48\text{m}^3$ , sob densidade de estocagem inicial de  $\sim 35\text{ kg.m}^{-3}$  de tilápia-do-Nilo (*Oreochromis niloticus*) com peso inicial corporal de  $30 \pm 5,80$  para abate com peso corporal final de aproximadamente 850g. O ciclo de produção foi dividido em três estágios: Juvenil I (JVI) – 30 a 150g; Juvenil II (JVII) - de 150 a 500g; e Peso de Mercado (PM) – 500 a 850g. Mensalmente 150 indivíduos de cada lote e fase de produção foram coletados para biometria e a avaliação dos índices de desempenho zootécnico:

- a. Consumo de ração seca =  $\text{ração seca total} / \Sigma (\text{n}^{\circ} \text{ de peixes} \times \text{n}^{\circ} \text{ de dias})$ ;
- b. Ganho de peso vivo =  $(\text{peso corporal final (g peixe}^{-1}) / \text{n}^{\circ} \text{ final de peixe}) - (\text{peso corporal inicial (g peixe}^{-1}) / \text{n}^{\circ} \text{ inicial de peixe})$ ;
- c. Taxa de conversão alimentar =  $\text{consumo de ração} / \text{ganho de peso vivo seco}$ ;
- d. Biomassa total =  $\text{n}^{\circ} \text{ de peixes} \times \text{peso individual}$ ;
- e. Eficiência alimentar =  $\text{ganho de peso vivo seco} / \text{consumo de ração}$ ;

## **2.4. Mensuração do potencial lançamento de resíduos no ambiente aquático**

### **Previsão da biomassa de pescado à ser produzida no empreendimento por meio da Modelagem Térmica de Crescimento Corporal (TGC)**

A partir das informações de crescimento corporal dos peixes, tempo de cultivo e temperatura da água obtidas pelo acompanhamento do desempenho zootécnico e análise dos parâmetros limnológicos, aplicou-se o modelo matemático TGC (Equação 01) para definição dos coeficientes e exponenciais de crescimento para cada fase de produção da tilápia na área de estudo, de acordo com a metodologia proposta por Iwama e Tautz (1981):

$$TGC = \frac{Pf^{(1-b)} - Pi^{(1-b)}}{(Ta \times d)} \times 100 \quad \text{Eq. 01}$$

Sendo, Pi e Pf = peso corporal inicial e final (g/peixe), respectivamente, d = dias de cultivo, Ta = temperatura da água (°C) e 1-b = exponencial de crescimento corporal (1-b = 0,3333).

Posteriormente, ajustou-se o exponencial de crescimento mediante a ferramenta *Solver* do *software* Microsoft Office Excel© utilizando a função soma residual dos quadrados (RSS) e definiu-se um novo coeficiente de crescimento térmico (TGC<sup>2</sup> ajustado) e peso final dos animais para cada fase de produção, conforme Equação 02. Esta abordagem estabelece uma relação entre o crescimento corporal observado em campo e o previsto pelo modelo, de modo a obter a melhor precisão para o exponencial e coeficiente de crescimento térmico corporal seguindo o proposto por Cho e Bureau (1998) e Dumas et al. (2010).

$$TGC^2, Pf = \left\{ Pi^{(1-b)} + \left[ \frac{TGC \times (Ta \times d)}{100} \right] \right\}^{\left[ \frac{1}{(1-b)} \right]} \quad \text{Eq. 02}$$

### **Modelagem bioenergética nutricional para definição do potencial lançamento de fósforo na água oriundo da piscicultura**

A simulação da carga de fósforo lançada na água proveniente da piscicultura foi calculada pela modelagem bioenergética fatorial de Cho e Bureau (1998), assumindo os valores de produção da tilápia do Nilo produzida em tanques-rede em ambiente neotropical por Bueno et al. (2015). Para isso, calculou-se o metabolismo basal (HeE) de acordo com o recomendado por Cho e Bureau (1998) pela Equação 03.

$$HeE = (a + bT) \times PV^{0.8} \quad \text{Eq. 03}$$

Em que (a + bT) é a relação da temperatura (T) com HeE (kJ/peixe) e do peso corporal metabólico (PV<sup>0.8</sup>). Posteriormente, estimou-se o incremento calórico da alimentação (HiE) utilizando 70 observações de 40 estudos publicados entre 1989 e 2015 apresentados por Chowdhury et al. (2013) e dos valores calculados por Bueno (2015) para *O. niloticus* produzida em tanques-rede em reservatório tropical, conforme a Equação 04.

$$HiE = IE - FE - RE - (UE + ZE) - HeE \quad \text{Eq. 04}$$

Em que, IE (kJ/peixe) = ingestão energética; fezes (FE, kJ/peixe); energia retida (RE); fezes não-fecais (UE + ZE, kJ/peixe); metabolismo basal (HeE, kJ/peixe).

Seguiu-se com a estimativa do total de resíduos (sólidos e dissolvidos) liberados pela piscicultura resultantes do processo de alimentação durante a produção, das sobras de ração e das fezes e urinas, conforme as Equações 05 e 06.

$$RS = MS \text{ ingerida} \times (1 - CDA \text{ do fósforo na MS}) \quad \text{Eq. 05}$$

Em que, RS = total de resíduos sólidos; MS = matéria seca; CDA = coeficiente de digestibilidade aparente do fósforo.

$$RDP = (P \text{ ingerido} \times CDA \text{ do P}) - P \text{ retido} \quad \text{Eq. 06}$$

Em que, RDP = resíduos dissolvidos fosfatados; P = fósforo ingerido e retido; CDA = coeficiente de digestibilidade aparente do fósforo. Desta forma, obteve-se o fluxo de energia e nutrientes na piscicultura estudada, aplicando valores específicos para a tilápia do Nilo criadas neste reservatório de acordo com o apresentado por Bueno et al. (2015); Brande (2019); Fialho et al (2021).

### **Simulação da carga de resíduos da produção de tilápia sob diferentes cenários climáticos**

Com os dados zootécnicos obtidos pela modelagem do TGC e os dados da estimativa de resíduos obtidos pela modelagem bioenergética nutricional, realizou-se a simulação da carga de resíduos da produção de tilápia no reservatório de Chavantes sob diferentes cenários climáticos. Para compor os cenários, utilizou-se as seguintes variáveis:

- a. Dietas comerciais de baixa, média e alta densidade energética com diferentes níveis de fósforo (0,8; 1,2 e 2,1% de P total);
- b. Diferentes condições de temperatura da água (21, 25 e 29°C).

## **2.5. Determinação da capacidade de suporte ambiental baseada na concentração de fósforo na água (CSAp) durante a produção de tilápia sob diferentes cenários climáticos, zootécnicos e ambientais**

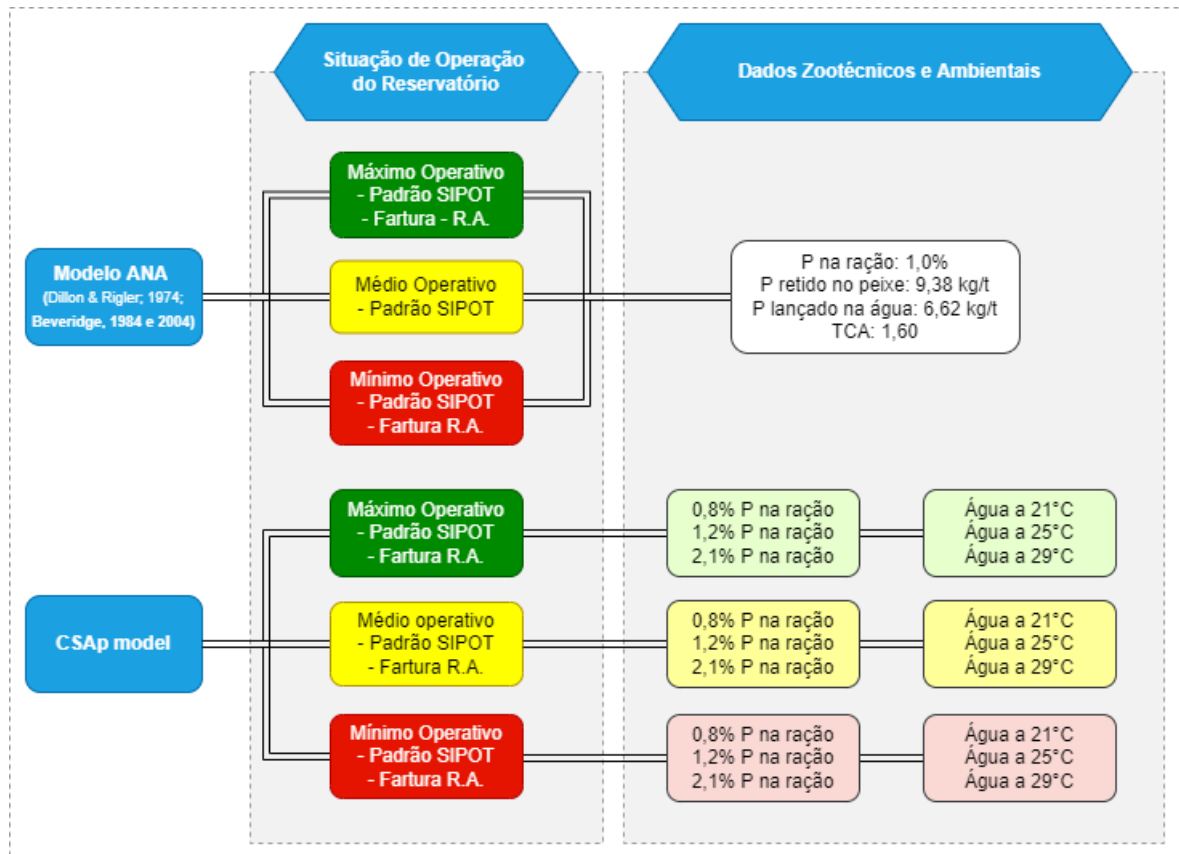
A partir das características morfométricas e dos dados hidrológicos do reservatório de Chavantes, foram elaborados cenários da CSAp com simulações da carga máxima de fósforo autorizável (kg/ano), bem como a produção máxima autorizável de peixes (t/ano) por meio do modelo hidrodinâmico de Dillon e Rigler (1974), utilizando os dados de resíduos fosfatados obtidos por meio da modelagem bioenergética conforme proposto por Bueno et al. (2017).

Na elaboração dos cenários, foram consideradas diferentes situações de operação hidrológicas do reservatório (máximo, médio e mínimo operativo) com dados morfométricos e hidrológicos disponibilizados pelo Sistema de Informações do Potencial Hidrelétrico Brasileiro (SIPOT), como: cota (m), área (km<sup>2</sup>), volume (hm<sup>3</sup>), vazão média (m<sup>3</sup>/s), tempo de residência (anos) e taxa de renovação da água (anos). Além de dados zootécnicos padronizados pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) para produção de tilápia, tais como: fósforo contido na ração (1,0%), fósforo retido no peixe (9,38 kg/t), fósforo lançado na água (6,62 kg/t) e taxa de conversão alimentar (1,6). Diante do *input* de dados utilizados e do modelo utilizado para o cálculo da capacidade de suporte do ambiente aquático (Dillon & Rigler, 1974; Beveridge, 1984), estes foram nomeados como Cenários ANA - Padrão SIPOT (Figura 3).

Além disso, por se tratar de um grande reservatório com características distintas ao longo de seu percurso, realizou-se também cenários específicos para a região de Fartura - SP, referente a localização da área aquícola deste estudo. Assim, realizou-se um levantamento de dados morfométricos e hidrológicos da UHE de Chavantes obtidos por meio de séries históricas do Sistema Interligado Nacional (SIN/ONS), da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2020) e de estudos científicos realizados na região de Fartura (Nogueira et al., 2012).

Ainda, estes cenários foram elaborados com *input* de dados zootécnicos e ambientais como as variações da temperatura da água conforme o observado na

piscicultura e dados da liberação de fósforo na água de acordo com a ração utilizada, obtidos por meio da simulação de carga de resíduos da produção de tilápia neste estudo.



**Figura 3.** Estrutura dos cenários da CSAp em diferentes situações de operação do reservatório e com variação de dados zootécnicos, climáticos e ambientais.

Para a definição da capacidade de suporte ambiental (CSAp), considerou-se que a concentração de fósforo na água ( $[P]$ , em  $\text{mg}/\text{m}^3$ ) é uma função da carga anual de fósforo ( $La$ , em  $\text{mg}/\text{m}^2/\text{ano}$ ), do coeficiente de retenção de fósforo ( $Rp$ ), da profundidade média ( $z$ , em metros), e da taxa de renovação da água do reservatório ( $\rho$ , em anos) (Equação 07).

$$[P] = \frac{La \times (1 - Rp)}{(z \times \rho)} \quad \text{Eq. 07}$$

Em que  $z$  é calculada pela razão entre o volume e a área do corpo hídrico;  $\rho$  é calculada pela razão entre a vazão média e o volume máximo do reservatório; e  $Rp$  é o coeficiente de retenção do P proveniente do estudo realizado por Straškraba (1996), obtido por meio da Equação 08:

$$Rp = 0,761 \times (1 - \exp^{(-0,0282 \times (td \times 365))}) \text{ Eq. 08}$$

Onde,  $td$  é o tempo de residência da água no reservatório (anos). O parâmetro da concentração  $P$  na Eq. 07 refere-se ao  $\Delta[P]$  que é o incremento na concentração de fósforo na água para uma determinada carga  $La$  por meio da Equação 09:

$$La = \frac{(\Delta[P] \times z \times \rho)}{(1 - R)} \text{ Eq. 09}$$

Em que  $\Delta[P]$  é dado pela concentração atual de  $P$  na água do reservatório subtraída da concentração máxima permitida por Lei (Resolução Conama Nº 357/2005). A partir do  $\Delta[P]$  máximo autorizável, calcula-se o  $La$  máximo autorizável, isto é, a quantidade de fósforo que pode ser adicionada à água (Equação 09).

A carga anual de fósforo no reservatório ( $La$ ) é calculada considerando o  $\Delta[P]$  de 5 mg/m<sup>3</sup> na função (Eq. 11). Valor definido pela ponderação dada em relação ao incremento máximo de 1/6 da concentração permitida de fósforo pela Resolução Conama nº 357/2005 para corpos hídricos de Classe II, a qual enquadra-se a atividade aquícola, o correspondente a 5 mg de fósforo por m<sup>3</sup> de água (ANA, 2009). Os 5/6 restantes são destinados a outros usos em que haja aportes de fósforo, como a diluição de esgotos domésticos e industriais, além do aporte natural.

Em seguida, calcula-se a carga de fósforo autorizável no reservatório todo ( $Lr$ , em mg/ano), utilizando o  $La$ , que representa a máxima carga de fósforo autorizável por metro quadrado multiplicando o valor obtido pela área de superfície d'água ( $A$ , em m<sup>2</sup>) do reservatório (Equação 10) e calcula-se  $Lr$  (em kg/ano) por meio da Equação 11, em que  $V$  (hm<sup>3</sup>) é o volume na cota considerada.

$$Lr = La \times A \text{ Eq. 10}$$

$$Lr = \frac{(\Delta[P] \times V \times \rho)}{(1 - Rp)} \text{ Eq. 11}$$

Posteriormente, converte-se o  $Lr$  em produção anual autorizável de peixes ( $B$ , em t/ano), por meio da estimativa da proporção de  $P$  na água ( $Pa$ ) obtida pela modelagem bioenergética para cada tonelada de peixe produzida (Equação 12).

$$B = \frac{Lr}{Pa} \quad \text{Eq. 12}$$

## 2.6. Avaliação do Índice de Estado Trófico (IET) da água durante a produção aquícola

Com os valores obtidos de carga e concentração de fósforo na água, complementa-se a abordagem do modelo CSAp realizando a classificação corpos d'água sob diferentes graus de trofia. Isto permite avaliar a qualidade da água quanto ao enriquecimento por nutrientes, como o fósforo total (P) dado pela Equação 13, a qual consiste em uma transformação linear dos valores de Carlson (1977) modificada por Kratzer e Brezonik (1981). Posteriormente, o corpo d'água é classificado conforme os estados de trofia: ultraoligotrófico, oligotrófico, mesotrófico, eutrófico, supereutrófico e hipereutrófico, de acordo com o índice de Carlson (1977), apresentado na Tabela 2.

$$IET(P) = 10 \times \left\{ 6 - \frac{\ln\left(\frac{48}{P_t}\right)}{\ln(2)} \right\} \quad \text{Eq. 13}$$

Onde P é a concentração de fósforo total medida na superfície da água, em  $\mu\text{g.L}^{-1}$  e Ln é o logaritmo.

**Tabela 2.** Valores do Índice de Estado Trófico e respectivas classes de trofia.

| Valor do IET | Estado Trófico    |
|--------------|-------------------|
| < 20         | Ultraoligotrófico |
| 21 - 40      | Oligotrófico      |
| 41 - 50      | Mesotrófico       |
| 51 - 60      | Eutrófico         |
| > 61         | Hipereutrófico    |

## 2.7. Análises para tomada de decisão e gestão da outorga para produção de tilápia no reservatório de Chavantes

### Probabilidade da ocorrência dos cenários da CSAp por meio da Simulação de Monte Carlo (SMC)

A última etapa do modelo CSAp, consiste na aplicação da Simulação Monte Carlo para estimar a probabilidade da ocorrência dos cenários da CSAp conforme a situação de operação do reservatório. Utilizando o *software* @RISK 7.6

Professional (Palisade Corporation, Ithaca, New York, EUA, registro ID número 7112268) integrado ao modelo CSAp que formara um mapa para tomada de decisão em relação a probabilidade de ocorrência de cenários de CSAp. Estimou-se a probabilidade da ocorrência dos valores da produção máxima de peixes (B) e fósforo lançado na água (Pa) (variáveis estocásticas de saída) utilizando 10.000 interações. Para todos os cenários definiu-se como variáveis estocásticas de entrada (Tabela 3), sendo: carga máxima do reservatório, temperatura da água, teor de fósforo na ração e fósforo digestível. Estas variáveis foram definidas com base nas informações necessárias para o cálculo da capacidade de suporte do reservatório pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e para a outorga de uso da água para fins de aquicultura.

A partir disto, realizou-se as SMC por meio de interações entre estas variáveis estocásticas para cada variável de saída mediante o proposto por Gentle (1998) e Vose (2008), conforme a Equação 14 de probabilidade estocástica:

$$\int_a^b f(x_1, x_2, x_3 \dots x_k) x = \text{probabilidade } \{a \leq x \leq b\} \text{ Eq. 14}$$

Sendo, f = função probabilística;  $x_{(1,2,3,\dots,k)}$  = variáveis estocásticas de saída; a e b = intervalo de probabilidade de ocorrência de  $B_k$  e  $Pa_k$ .

**Tabela 3.** Variáveis estocásticas de entrada na simulação de Monte Carlo (SMC) e tipo de distribuição dos valores para todos os cenários produtivos avaliados.

| Variáveis estocásticas                      | Valores    |            | Distribuição |
|---------------------------------------------|------------|------------|--------------|
|                                             | Mínimo     | Máximo     |              |
| CSAp Padrão Sipot (kg biomassa peixe/ano)   | 210.697,50 | 263.258,87 | Uniforme     |
| CSAp Fartura – R.A. (kg biomassa peixe/ano) | 112.156,34 | 263.899,58 | Uniforme     |
| Temperatura da água (°C)                    | 20         | 30         | Triangular   |
| Teor de fósforo total na ração (%)          | 0,83       | 2,12       | Triangular   |
| Teor de fósforo digestível na ração (%)     | 0,53       | 1,22       | Triangular   |

Sipot = Sistema de Informações do Potencial Hidrelétrico Brasileiro; R.A. = Reservatório de acumulação.

### 3. Resultados

#### 3.1. Dados secundários, históricos e condicionantes ambientais

Os parâmetros mais importantes para o monitoramento ambiental no campo antes da implantação do empreendimento e durante a produção aquícola em águas da União foram oxigênio dissolvido, fósforo total, nitrogênio, pH, clorofila, turbidez

e profundidade do reservatório, sendo que esses dados foram acompanhados no reservatório de Chavantes (Tabela 4).

De forma complementar, levantou-se informações sobre as condicionantes ambientais exigidas pelos Órgãos Estaduais de Meio Ambiente (Oemas) no processo de licenciamento ambiental referentes a resíduos provenientes da produção de pescados em águas da União (Tabela 5).

**Tabela 4.** Dados ambientais secundários para análise e acompanhamento no campo durante a produção de tilápia no reservatório de Chavantes - SP.

| Parâmetro                                 | Valor de Referência                                                                                        |
|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Oxigênio dissolvido (OD) <sup>1</sup>     | Não inferior a 5 mg/L O <sub>2</sub>                                                                       |
| Fósforo total <sup>1</sup>                | Até 30 mg/m <sup>3</sup> , em ambientes lênticos<br>Até 50 mg/m <sup>3</sup> , em ambientes intermediários |
| Nitrogênio amoniacal total <sup>1</sup>   | 13,3 mg/L N, para pH ≤ 7,5                                                                                 |
|                                           | 5,6 mg/L N, para 7,5 < pH ≤ 8,0                                                                            |
|                                           | 2,2 mg/L N, para 8,0 < pH ≤ 8,5                                                                            |
|                                           | 1,0 mg/L N, para pH > 8,5                                                                                  |
| pH <sup>1</sup>                           | 6,0 a 9,0                                                                                                  |
| Clorofila a <sup>1</sup>                  | Até 30 µg/L                                                                                                |
| Turbidez <sup>1</sup>                     | Até 100 UNT                                                                                                |
| Profundidade do reservatório <sup>2</sup> | ≥ 4m                                                                                                       |

<sup>1</sup>Conama - Resolução Nº 357, de 17 de março de 2005; Conama - Resolução Nº 413, de 26 de junho de 2009.

<sup>2</sup>Instrução Normativa Interministerial Nº 07, de abril de 2005. República Federativa do Brasil, Brasília.

Os dados foram classificados de acordo com a finalidade, uso e relação no processo de outorga e licenciamento ambiental da atividade visando auxiliar no atendimento das condicionantes ambientais em relação a capacidade de suporte ambiental para produção de pescados em águas continentais (Tabela 5).

**Tabela 5.** Condicionantes ambientais exigidas pelos Oemas no processo de licenciamento ambiental para aquicultura em águas continentais da União.

| Parâmetros        | Condicionantes exigidas pelos OEMAS                                                                                                                                                                                                                                       |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Qualidade da Água | Deve ser realizado anualmente o monitoramento da qualidade física, química e biológica da área e localização do empreendimento, obedecendo que os resultados não ultrapassem o limite estabelecido pelos parâmetros relatados no Art. 4º da Resolução CONAMA Nº 357/2005. |
|                   | Os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados, direta ou indiretamente, nos corpos de água desde que obedeçam às seguintes condições:<br>- pH entre 5 a 9;                                                                                        |

- temperatura: inferior a 40°C, sendo que a elevação da temperatura do corpo receptor não deverá exceder 3°C;
- materiais sedimentáveis: até 1 ml/litro em teste de 1 hora em cone Imhoff. Para o lançamento em lagos e lagoas, cuja velocidade de circulação seja praticamente nula, os materiais sedimentáveis deverão estar ausentes;
- regime de lançamento com vazão máxima de até 1,5 vezes a vazão média do período de atividade diária do agente poluidor;
- óleos e graxas: óleos minerais até 20 mg/L, óleos vegetais e gorduras animais até 50 mg/L;
- ausência de materiais flutuantes.

**Técnicos,  
Manejo,  
outros**

Recomenda-se que os tanques-rede sejam instalados em águas com baixas concentrações de fósforo e com baixo tempo de retenção para evitar a floração de cianobactérias.

Apresentar plano que reduza carga poluidora do uso de ração comercial para que apresentem melhor eficiência ao aproveitamento, bem como os destinos dos resíduos sólidos gerados pela atividade dos tanques-rede.

Fonte: Adaptado da Rede Nacional de Pesquisa e Monitoramento Ambiental da Aquicultura em Águas da União – Coordenação geral da Embrapa Meio Ambiente.

### 3.2. Dados *in loco* e laboratório

#### Qualidade da água

As variáveis da qualidade da água coletadas durante a produção de tilápia do Nilo no reservatório de Chavantes, sugeriu que os parâmetros limnológicos mantiveram-se dentro dos preconizados pela Resolução CONAMA Nº 357/2005, com valores médios de oxigênio dissolvido, fósforo total e pH de 8,7 mg/L, 40,53 mg/m<sup>3</sup>, 7,3 (Tabela 6).

**Tabela 6.** Valores médios dos parâmetros da qualidade da água durante um ciclo de produção de *O. niloticus* na área aquícola no reservatório de Chavantes, São Paulo.

| Variável                      | Mês da Produção            |                            |                           |                           |                           |                           |                           |
|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
|                               | 1                          | 2                          | 3                         | 4                         | 5                         | 6                         | 7                         |
| <b>Ta</b> (°C)                | 26,00 ± 0,05 <sup>a</sup>  | 28,00 ± 0,08 <sup>a</sup>  | 29,20 ± 0,08 <sup>a</sup> | 25,60 ± 0,00 <sup>a</sup> | 24,50 ± 0,05 <sup>a</sup> | 22,80 ± 0,02 <sup>b</sup> | 21,50 ± 0,3 <sup>b</sup>  |
| <b>Tar</b> (°C)               | 27,70 ± 0,14 <sup>a</sup>  | 32,50 ± 0,01 <sup>a</sup>  | 36,60 ± 0,00 <sup>a</sup> | 29,80 ± 0,00 <sup>a</sup> | 28,50 ± 0,02 <sup>a</sup> | 26,10 ± 0,01 <sup>b</sup> | 25,5 ± 0,01 <sup>b</sup>  |
| <b>pH</b>                     | 7,41 ± 0,23 <sup>a</sup>   | 7,22 ± 0,12 <sup>a</sup>   | 7,83 ± 0,19 <sup>a</sup>  | 6,52 ± 0,08 <sup>a</sup>  | 6,91 ± 0,10 <sup>a</sup>  | 8,20 ± 0,21 <sup>a</sup>  | 7,62 ± 0,10 <sup>a</sup>  |
| <b>CE</b> (μS/cm)             | 46,10 ± 1,44 <sup>a</sup>  | 38,31 ± 2,53 <sup>a</sup>  | 50,01 ± 0,95 <sup>a</sup> | 44,20 ± 1,50 <sup>a</sup> | 51,02 ± 2,12 <sup>a</sup> | 35,11 ± 1,12 <sup>a</sup> | 35,01 ± 1,0 <sup>a</sup>  |
| <b>AS</b> (μS/cm)             | 0,02 ± 3,12 <sup>a</sup>   | 0,07 ± 2,75 <sup>a</sup>   | 0,02 ± 1,88 <sup>a</sup>  | 0,04 ± 1,15 <sup>a</sup>  | 0,02 ± 1,45 <sup>a</sup>  | 0,02 ± 1,45 <sup>a</sup>  | 0,02 ± 2,17 <sup>a</sup>  |
| <b>OD</b> (mg/L)              | 9,01 ± 0,67 <sup>a</sup>   | 9,02 ± 0,88 <sup>a</sup>   | 8,51 ± 0,10 <sup>a</sup>  | 8,32 ± 0,51 <sup>a</sup>  | 8,43 ± 0,49 <sup>a</sup>  | 9,12 ± 0,83 <sup>a</sup>  | 9,22 ± 0,17 <sup>a</sup>  |
| <b>TR</b> (m)                 | 3,80 ± 0,25 <sup>a</sup>   | 3,51 ± 0,02 <sup>a</sup>   | 4,03 ± 0,01 <sup>a</sup>  | 2,81 ± 0,00 <sup>a</sup>  | 3,12 ± 0,02 <sup>a</sup>  | 3,50 ± 0,01 <sup>a</sup>  | 4,03 ± 0,01 <sup>a</sup>  |
| <b>N</b> (mg/m <sup>3</sup> ) | 60,01 ± 4,60 <sup>a</sup>  | 51,61 ± 6,74 <sup>a</sup>  | 30,52 ± 3,89 <sup>a</sup> | 10,21 ± 4,80 <sup>b</sup> | 10,42 ± 6,10 <sup>b</sup> | 32,00 ± 5,75 <sup>a</sup> | 21,33 ± 7,10 <sup>b</sup> |
| <b>P</b> (mg/m <sup>3</sup> ) | 60,54 ± 13,10 <sup>a</sup> | 71,10 ± 14,12 <sup>a</sup> | 50,02 ± 8,11 <sup>a</sup> | 11,01 ± 7,41 <sup>b</sup> | 20,12 ± 6,56 <sup>b</sup> | 40,02 ± 9,01 <sup>a</sup> | 31,05 ± 8,80 <sup>a</sup> |

**Ta**= Temperatura da água; **Tar**= Temperatura do ar; **pH**= Potencial hidrogeniônico; **CE**= Condutividade elétrica; **SA**= Salinidade; **OD**= Oxigênio dissolvido; **TR**= Transparência; **N**= Nitrogênio total; **P**= Fósforo total. Valores submetidos a análise de variância e, quando observadas diferenças significativas, aplicação do teste de Tukey a 5% de significância.

## Dieta e alimentação

As três dietas utilizadas ao longo do ciclo de produção da tilápia na piscicultura estudada, apresentaram valores próximos de 31% de proteína bruta, 90% de matéria seca, 1,2% de fósforo total e 16 MJ/kg de energia bruta (Tabela 7).

**Tabela 7.** Composição química e digestibilidade de nutrientes das dietas comerciais utilizadas durante as três fases de produção do cultivo de tilápia no reservatório de Chavantes, SP.

| Composição                       | JVI  | JVII | PM   |
|----------------------------------|------|------|------|
| Matéria seca (MS), %             | 90,3 | 89,9 | 90,3 |
| Matéria seca digestível (MSD), % | 67,7 | 61,0 | 67,5 |
| Energia bruta (EB), MJ/kg        | 16,9 | 16,5 | 16,5 |
| Energia digestível (ED), MJ/kg   | 13,1 | 12,5 | 11,7 |
| Proteína bruta (PB), %           | 31,4 | 31,1 | 31,3 |
| Proteína digestível (PD), %      | 28,1 | 27,7 | 28,0 |
| Extrato livre de nitrogênio*     | 36,5 | 38,7 | 39,1 |
| Fósforo (P), %                   | 1,2  | 1,2  | 1,2  |
| Fósforo digestível (Pd), %       | 0,7  | 0,7  | 0,6  |
| PD/ED                            | 21,5 | 22,2 | 23,9 |

JVI= Juvenil I; JVII= Juvenil II; PM= Peso de mercado. \*Extrato livre de nitrogênio calculado como diferença entre % de matéria seca e a soma da % de proteína bruta, % de lipídios e % de cinzas.

## Desempenho zootécnico

Os parâmetros de desempenho dos peixes durante todo o ciclo produtivo demonstraram biomassa final de  $35 \pm 9,77$ ;  $84 \pm 7,90$  e  $97 \pm 15,44$  kg/m<sup>3</sup>, taxa de conversão alimentar de 1,4; 1,7 e 1,8 que resultou na eficiência alimentar de 0,74, 0,65 e 0,61 para as respectivas fases de JVI, JVII e PM (Tabela 8). Os dados do peso corporal e temperatura da água foram utilizados para compor o modelo do coeficiente de crescimento térmico (TGC).

**Tabela 8.** Parâmetros de desempenho da tilápia em tanques-rede na área aquícola no reservatório de Chavantes para as fases de produção Juvenil I (JVI), Juvenil II (JVII) e peso de mercado (PM).

| Parâmetros                | JVI        | JVII       | PM          |
|---------------------------|------------|------------|-------------|
| Pi (g)                    | 30 ± 5,80  | 152 ± 4,11 | 506 ± 9,34  |
| Pf (g)                    | 152 ± 4,11 | 506 ± 9,34 | 864 ± 22,45 |
| GPD (g/peixe/dia)         | 2,7 ± 2,78 | 3,1 ± 4,29 | 6,5 ± 7,32  |
| MO (%)                    | 6,4 ± 5,66 | 3,4 ± 2,14 | 2,2 ± 3,53  |
| BF (kg/m <sup>3</sup> )   | 35 ± 9,77  | 84 ± 7,90  | 97 ± 15,44  |
| TCA (ração:ganho de peso) | 1,4 ± 1,47 | 1,7 ± 0,90 | 1,8 ± 1,10  |
| EA (ganho de peso:ração)  | 0,7 ±      | 0,6 ± 1,10 | 0,6 ± 1,56  |

Pi = peso inicial; Pf = peso final; GPD = ganho de peso diário (g/peixe/dia); MO = mortalidade; BF = biomassa final; TCA = taxa de conversão alimentar (ração:ganho de peso); EA = eficiência alimentar (ganho de peso:ração).

### 3.3. Mensuração do potencial lançamento de resíduos no ambiente aquático

#### Previsão da biomassa de pescado à ser produzida no empreendimento por meio de Modelagem Térmica de Crescimento Corporal (TGC)

Os valores da predição do crescimento corporal e o ajuste da relação de crescimento por meio da análise da soma residual com os valores reais levantados em campo estão apresentados na Tabela 9.

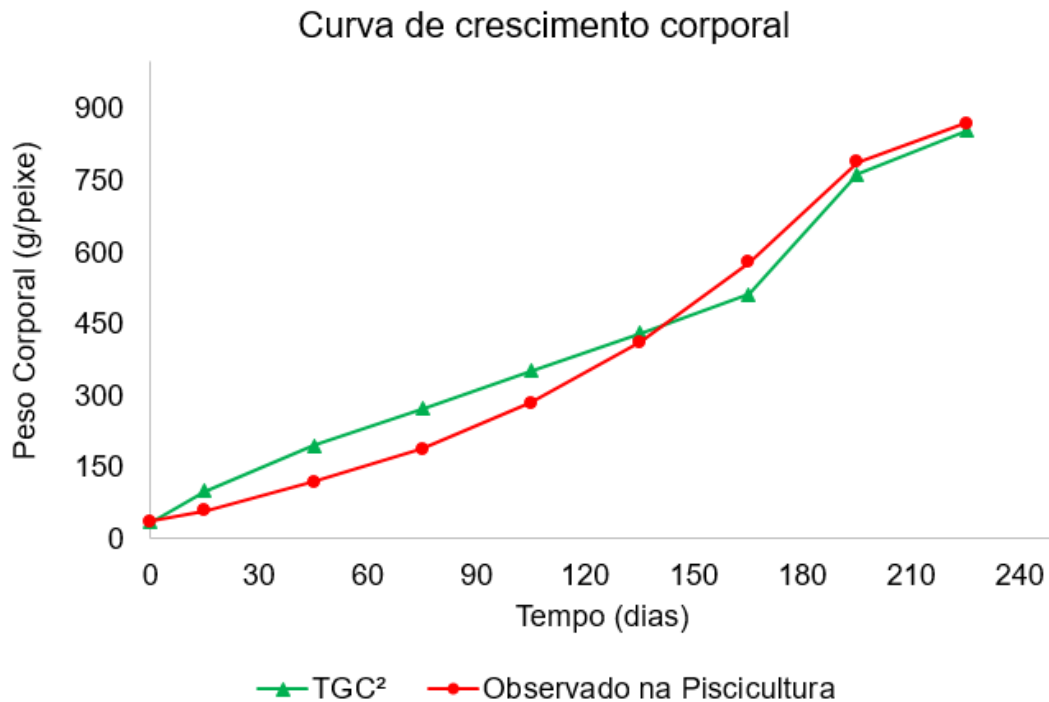
**Tabela 9.** Exponenciais e coeficientes de crescimento térmico por fase de produção da *O. niloticus* em tanques-rede no reservatório neotropical.

| Fase de crescimento | Categoria de peso corporal (g) | TGC <sup>1</sup> | Revisado <sup>2</sup> |          |
|---------------------|--------------------------------|------------------|-----------------------|----------|
|                     |                                |                  | TGC                   | TGC exp. |
| Juvenil I           | 30 – 150                       | 0,147            | 1,147                 | 0,5332   |
| RSS                 | -                              | 88               | 37                    | -        |
| Juvenil II          | 150 – 500                      | 0,116            | 12,870                | 0,9501   |
| RSS                 | -                              | 1.554            | 7.729                 | -        |
| Peso de mercado     | 500 - 850                      | 0,109            | 19,122                | 0,8532   |
| RSS                 | -                              | 1.039            | 1.202                 | -        |

<sup>1</sup>Os coeficientes de peso corporal e exponenciais foram determinados através da análise dos mínimos quadrados. <sup>2</sup>Coeficientes de crescimento térmico (TGC) ajustado de acordo com o proposto na Eq.2. RSS = soma dos quadrados residuais.

A partir do cálculo do TGC<sup>2</sup> para cada categoria de peso (JVI = 1,147; JVII = 12,870 e PM = 19,122), obtiveram-se os novos coeficientes (JVI= 0,5332; JVII=

0,9501 e  $PM = 0,8532$ ) para *O. niloticus* e definiu-se a curva de crescimento estimada pelo modelo (Figura 4).



**Figura 4.** Curva de crescimento corporal da tilápia observada na piscicultura e estimada pelo algoritmo (TGC<sup>2</sup>).

#### **Modelagem bioenergética nutricional para definição do lançamento de fósforo oriundo da piscicultura**

As composições químicas e digestibilidade de nutrientes de dietas comerciais com diferentes níveis de fósforo foram utilizadas para a simulação de resíduos fosfatados lançados no ambiente aquático sob diferentes condições climáticas (Tabela 10). As rações de baixa, média e alta densidade energética contêm teores de fósforo com valores próximos a 0,8; 1,2 e 2,1%, respectivamente.

Considerando a realidade da área aquícola estudada (ração com 1,2% de fósforo), para produzir uma tonelada de *Oreochromis niloticus* em tanques-rede a temperaturas de 21, 25 e 29°C, são lançados na água 5,37, 7,81 e 8,63 kg de fósforo total, respectivamente (Tabela 11). Nas mesmas condições de temperatura, quando reduzimos o teor de fósforo na ração para 0,8%, são lançados no ambiente 3,28, 4,99 e 5,17kg de fósforo por tonelada de peixe produzida, o equivalente, em média, a 1,6 vezes menos fósforo. Estes são os resultados das simulações da

liberação de resíduos fosfatados no meio aquático com uso das diferentes rações comerciais (Tabela 11).

**Tabela 10.** Rações de baixa, média e alta densidade energética com diferentes níveis de fósforo utilizadas para simulação da liberação de resíduos no meio aquático.

| Ração de baixa densidade energética  | Valores da Indústria |                  |        |         |        |        |       |        |            |            |       |
|--------------------------------------|----------------------|------------------|--------|---------|--------|--------|-------|--------|------------|------------|-------|
|                                      | TGC <sup>2</sup>     | Exp <sup>2</sup> | MS (%) | MSD (%) | PB (%) | PD (%) | P (%) | Pd (%) | EB (MJ/kg) | ED (MJ/kg) | PD/ED |
| Juvenil I                            | 1,147                | 0,533            | 90,69  | 53,76   | 39,53  | 32,16  | 0,83  | 0,53   | 15,91      | 11,25      | 28,59 |
| Juvenil II                           | 12,870               | 0,950            | 90,22  | 59,93   | 31,89  | 25,24  | 0,87  | 0,49   | 17,70      | 13,67      | 18,46 |
| Peso de Mercado                      | 19,123               | 0,853            | 89,37  | 61,68   | 23,65  | 21,03  | 0,85  | 0,49   | 16,34      | 11,67      | 18,03 |
| Ração de média densidade energética* | Valores da Indústria |                  |        |         |        |        |       |        |            |            |       |
|                                      | TGC <sup>2</sup>     | Exp <sup>2</sup> | MS (%) | MSD (%) | PB (%) | PD (%) | P (%) | Pd (%) | EB (MJ/kg) | ED (MJ/kg) | PD/ED |
| Juvenil I                            | 1,147                | 0,533            | 90,27  | 67,66   | 31,40  | 28,10  | 1,24  | 0,71   | 16,91      | 13,05      | 21,53 |
| Juvenil II                           | 12,870               | 0,950            | 89,94  | 60,98   | 31,08  | 27,72  | 1,21  | 0,69   | 16,49      | 12,50      | 22,17 |
| Peso de Mercado                      | 19,123               | 0,853            | 90,27  | 67,53   | 31,33  | 27,97  | 1,28  | 0,74   | 16,53      | 16,53      | 16,92 |
| Ração de alta densidade energética   | Valores da Indústria |                  |        |         |        |        |       |        |            |            |       |
|                                      | TGC <sup>2</sup>     | Exp <sup>2</sup> | MS (%) | MSD (%) | PB (%) | PD (%) | P (%) | Pd (%) | EB (MJ/kg) | ED (MJ/kg) | PD/ED |
| Juvenil I                            | 1,147                | 0,533            | 91,24  | 63,52   | 39,71  | 35,35  | 2,12  | 1,22   | 17,57      | 12,89      | 27,43 |
| Juvenil II                           | 12,870               | 0,950            | 91,21  | 62,41   | 35,58  | 31,35  | 2,11  | 1,22   | 16,96      | 12,48      | 25,11 |
| Peso de Mercado                      | 19,123               | 0,853            | 91,65  | 59,15   | 26,51  | 22,36  | 2,09  | 1,11   | 16,96      | 11,48      | 19,47 |

**TGC** = Coeficiente de Crescimento Térmico Corporal; **Exp** = exponencial; **MS** = matéria seca; **MSD** = matéria seca digestível; **PB** = proteína bruta; **PD** = proteína digestível; **P** = fósforo total; **Pd** = fósforo digestível; **EB** = energia bruta; **ED** = energia digestível; **PD/ED** = relação proteína digestível:energia digestível. \*Rações utilizadas durante o ciclo de cultivo da tilápia na piscicultura comercial estudada.

Assim, pode-se compor os principais *input* de dados no modelo bioenergético fatorial e determinar as taxas de retenção e excreção de fósforo para cada categoria de peso da tilápia produzida em tanques-rede considerando diferentes cenários climáticos e zootécnicos (Tabela 11).

**Tabela 11.** Simulações da liberação de resíduos no meio aquático para a produção de uma tonelada de *Oreochromis niloticus* em tanques-rede na área aquícola no reservatório de Chavantes sob diferentes cenários climáticos e zootécnicos.

| Parâmetros                                                          | 0,8% P total |       |       | 1,2% P total* |       |       | 2,1% P total |       |       |
|---------------------------------------------------------------------|--------------|-------|-------|---------------|-------|-------|--------------|-------|-------|
|                                                                     | Temperatura  |       |       | Temperatura   |       |       | Temperatura  |       |       |
|                                                                     | 21°C         | 25°C  | 29°C  | 21°C          | 25°C  | 29°C  | 21°C         | 25°C  | 29°C  |
| <b>Fósforo</b>                                                      |              |       |       |               |       |       |              |       |       |
| Ingestão de Fósforo, g/peixe                                        | 7,65         | 10,32 | 10,13 | 9,74          | 13,14 | 13,59 | 19,19        | 25,91 | 25,50 |
| Fósforo Ingerido Digestível, g/peixe                                | 4,43         | 5,98  | 5,89  | 5,58          | 7,53  | 7,78  | 10,67        | 14,41 | 14,38 |
| Retenção de Fósforo, g/peixe                                        | 4,36         | 5,33  | 4,96  | 4,36          | 5,33  | 4,96  | 4,36         | 5,33  | 4,96  |
| Fósforo via Brânquias e Urinário, g/peixe                           | 0,07         | 0,64  | 0,93  | 1,22          | 2,20  | 2,82  | 6,31         | 9,08  | 9,42  |
| Fósforo nas Fezes, g/peixe                                          | 3,22         | 4,34  | 4,24  | 4,16          | 5,61  | 5,81  | 8,52         | 11,50 | 11,12 |
| <b>Resíduo Sólido do Cultivo</b>                                    |              |       |       |               |       |       |              |       |       |
| Fósforo total, kg/t                                                 | 3,22         | 4,34  | 4,24  | 4,16          | 5,61  | 5,81  | 8,52         | 11,50 | 11,12 |
| <b>Resíduo Total (Sólido + Dissolvido)</b>                          |              |       |       |               |       |       |              |       |       |
| Fósforo total, kg/t                                                 | 3,28         | 4,99  | 5,17  | 5,37          | 7,81  | 8,63  | 14,83        | 20,58 | 20,54 |
| <b>Dados da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA)</b> |              |       |       |               |       |       |              |       |       |
| Fósforo total, kg/t                                                 | 3,90         | 3,90  | 3,90  | 9,82          | 9,82  | 9,82  | 24,22        | 24,22 | 24,22 |
| Fósforo retido no peixe, kg/t                                       | 9,38         | 9,38  | 9,38  | 9,38          | 9,38  | 9,38  | 9,38         | 9,38  | 9,38  |

\*Cenários de lançamento de resíduos correspondentes a ração utilizada na área aquícola no reservatório de Chavantes, SP.

### **3.4. Determinação da capacidade de suporte ambiental para produção de tilápia com base na concentração e lançamento de fósforo na água (CSAp) sob diferentes cenários climáticos, zootécnicos e ambientais**

A capacidade de suporte ambiental e a produção máxima autorizável de peixes em todo o reservatório de Chavantes apresentou variações quando calculados sob as diferentes situações de operação do reservatório. Quando o nível d'água baixa e passa a operar do máximo para o médio operativo, a CSAp reduz em 13,32%, o correspondente a menos 5.298 toneladas de peixe ao ano. Reduzindo ainda mais o nível d'água, quando o reservatório passa do médio para o mínimo operativo, a CSAp reduz em 7,66%, o correspondente a menos 2.641 toneladas de peixe ao ano.

Quando comparamos o cenário da CSAp padrão SIPOT e o cenário específico para a região de Fartura na situação mínimo operativo do reservatório, observou-se diferença expressiva com redução de 46,77% da carga máxima de fósforo, o correspondente a menos 14.885 toneladas de peixe ao ano autorizáveis (Tabela 12).

Com relação a área aquícola estudada, observou-se que o uso de rações com maior teor de fósforo sob as diferentes temperaturas da água, reduz a produção máxima de peixes quando comparado ao cálculo da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico com dados zootécnicos padronizados para a produção de tilápia (cenários de 01 a 05).

Fato evidenciado nos cenários de 06 a 50, que foram desenvolvidos com o *input* de dados obtidos por meio da modelagem do coeficiente de crescimento térmico e a bioenergética nutricional. Considerando a realidade da piscicultura estudada (1,2% de P na ração, cenários de 21 a 35), nota-se que na temperatura de 21°C, a máxima produção autorizável no reservatório aumenta 23% quando comparada com o cálculo da ANA. No entanto, a temperatura de 29°C, a produção reduz em 23%. Ainda, a ração com alta densidade energética (2,1% de P) resultou em redução da produção em duas a três vezes, dependendo da condição de temperatura da água.

**Tabela 12.** Cenários da capacidade de suporte ambiental para fósforo (CSAp) com simulações da carga máxima de fósforo e a produção máxima autorizável de peixes no reservatório de Chavantes e na área aquícola estudada, sob diferentes cenários climáticos e zootécnicos.

| Nível d'água do reservatório (n.a.)   Situação de Operação                  | Máximo Operativo<br>(Padrão Sipot) | Médio Operativo<br>(Padrão Sipot) | Mínimo Operativo<br>(Padrão Sipot) | Máximo Operativo<br>(Fartura - R.A.) | Mínimo Operativo<br>(Fartura - R.A.) |
|-----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
|                                                                             | Cenário 01                         | Cenário 02                        | Cenário 03                         | Cenário 04                           | Cenário 05                           |
| Cota (m) *                                                                  | 474,00                             | 470,29                            | 465,23                             | 472,60                               | 467,90                               |
| Área (km²) **                                                               | 402,53                             | 349,12                            | 301,78                             | 387,32                               | 333,98                               |
| Volume (hm³) **                                                             | 8.795                              | 7.368                             | 5.754                              | 8.321                                | 6.669                                |
| Vazão média afluente - Qmlt (m³/s) *                                        | 400,00                             | 346,94                            | 322,36                             | 400,00                               | 170,00                               |
| Profundidade média na cota consid. - z (m)                                  | 21,85                              | 21,10                             | 19,07                              | 21,48                                | 19,97                                |
| Tempo de residência - td (anos)                                             | 0,697                              | 0,673                             | 0,566                              | 0,660                                | 1,244                                |
| Tempo de residência - td (dias)                                             | 254,48                             | 245,79                            | 206,59                             | 240,77                               | 454,03                               |
| Taxa de renovação da água no reservatório - p (anos)                        | 0,045                              | 0,047                             | 0,056                              | 0,048                                | 0,025                                |
| $\Delta[P]$ (mg/m³) ***                                                     | 5,00                               | 5,00                              | 5,00                               | 5,00                                 | 5,00                                 |
| Coeficiente de retenção de P - R ****                                       | 0,760                              | 0,760                             | 0,759                              | 0,761                                | 0,761                                |
| <b>Dados zootécnicos para a espécie estudada</b>                            |                                    |                                   |                                    |                                      |                                      |
| P ração (kg/t) - Pr (1% P - total)                                          | 10,00                              | 10,00                             | 10,00                              | 10,00                                | 10,00                                |
| P retido no peixe (kg/t) - Pp *****                                         | 9,38                               | 9,38                              | 9,38                               | 9,38                                 | 9,38                                 |
| <b>P lançado na água (kg/t) - Pa</b>                                        | <b>6,62</b>                        | <b>6,62</b>                       | <b>6,62</b>                        | <b>6,62</b>                          | <b>6,62</b>                          |
| TCA                                                                         | 1,60                               | 1,60                              | 1,60                               | 1,60                                 | 1,60                                 |
| <b>Capacidade de Suporte Ambiental para P da UHE Chavantes (CSAp)</b>       |                                    |                                   |                                    |                                      |                                      |
| <b>Carga máxima do reservatório Lr (kg/ano)</b>                             | <b>263.258,87</b>                  | <b>228.183,68</b>                 | <b>210.697,50</b>                  | <b>263.899,58</b>                    | <b>112.156,34</b>                    |
| <b>Produção máxima de peixes B (t/ano) - ANA</b>                            | <b>39.767,20</b>                   | <b>34.468,83</b>                  | <b>31.827,42</b>                   | <b>39.863,99</b>                     | <b>16.942,05</b>                     |
| <b>Capacidade de Suporte Ambiental para P Área Aquícola (UHE Chavantes)</b> |                                    |                                   |                                    |                                      |                                      |
| <b>Ração de 0,8% de P e temperatura da água de 21°C</b>                     | <b>Cenário 06</b>                  | <b>Cenário 07</b>                 | <b>Cenário 08</b>                  | <b>Cenário 09</b>                    | <b>Cenário 10</b>                    |
| Temperatura da água (°C)                                                    | 21                                 | 21                                | 21                                 | 21                                   | 21                                   |
| P ração (kg/t) - (0,8% P - total)                                           | 8,00                               | 8,00                              | 8,00                               | 8,00                                 | 8,00                                 |
| P retido no peixe (kg/t) - Pp                                               | 4,09                               | 4,09                              | 4,09                               | 4,09                                 | 4,09                                 |
| <b>P lançado na água (kg/t) - Pa</b>                                        | <b>3,28</b>                        | <b>3,28</b>                       | <b>3,28</b>                        | <b>3,28</b>                          | <b>3,28</b>                          |
| <b>Nova produção máxima de peixes (t/ano) - 0,8% P 21°C</b>                 | <b>80.141,85</b>                   | <b>69.464,18</b>                  | <b>64.141,00</b>                   | <b>80.336,90</b>                     | <b>34.142,88</b>                     |

| <b>Ração de 0,8% de P e temperatura da água de 25°C</b>              | <b>Cenário 11</b> | <b>Cenário 12</b> | <b>Cenário 13</b> | <b>Cenário 14</b> | <b>Cenário 15</b> |
|----------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Temperatura da água (°C)                                             | 25                | 25                | 25                | 25                | 25                |
| P ração (kg/t) - Pr (0,8% P - total)                                 | 8,00              | 8,00              | 8,00              | 8,00              | 8,00              |
| P retido no peixe (kg/t) - Pp                                        | 5,00              | 5,00              | 5,00              | 5,00              | 5,00              |
| <b>P lançado na água (kg/t) - Pa</b>                                 | <b>4,99</b>       | <b>4,99</b>       | <b>4,99</b>       | <b>4,99</b>       | <b>4,99</b>       |
| <b>Nova produção máxima (t/ano) - 0,8% P 25°C</b>                    | <b>52.775,75</b>  | <b>45.744,19</b>  | <b>42.238,72</b>  | <b>52.904,19</b>  | <b>22.484,08</b>  |
| <b>Ração de 0,8% de P e temperatura da água de 29°C</b>              | <b>Cenário 16</b> | <b>Cenário 17</b> | <b>Cenário 18</b> | <b>Cenário 19</b> | <b>Cenário 20</b> |
| Temperatura da água (°C)                                             | 29                | 29                | 29                | 29                | 29                |
| P ração (kg/t) - Pr (0,8% P - total)                                 | 8,00              | 8,00              | 8,00              | 8,00              | 8,00              |
| P retido no peixe (kg/t) - Pp                                        | 5,00              | 5,00              | 5,00              | 5,00              | 5,00              |
| <b>P lançado na água (kg/t) - Pa</b>                                 | <b>5,17</b>       | <b>5,17</b>       | <b>5,17</b>       | <b>5,17</b>       | <b>5,17</b>       |
| <b>Nova produção máxima (t/ano) - 0,8% P 29°C</b>                    | <b>50.906,54</b>  | <b>44.124,03</b>  | <b>40.742,71</b>  | <b>51.030,43</b>  | <b>21.687,74</b>  |
| <b>Ração de 1,2% de P e temperatura da água de 21°C <sup>2</sup></b> | <b>Cenário 21</b> | <b>Cenário 22</b> | <b>Cenário 23</b> | <b>Cenário 24</b> | <b>Cenário 25</b> |
| Temperatura da água (°C)                                             | 21                | 21                | 21                | 21                | 21                |
| P ração (kg/t) - Pr (1,2% P-total)                                   | 12,00             | 12,00             | 12,00             | 12,00             | 12,00             |
| P retido no peixe (kg/t) - Pp                                        | 4,09              | 4,09              | 4,09              | 4,09              | 4,09              |
| <b>P lançado na água (kg/t) - Pa</b>                                 | <b>5,37</b>       | <b>5,37</b>       | <b>5,37</b>       | <b>5,37</b>       | <b>5,37</b>       |
| <b>Nova produção máxima (t/ano) - 1,2% P 21°C</b>                    | <b>48.980,30</b>  | <b>42.454,43</b>  | <b>39.201,06</b>  | <b>49.099,51</b>  | <b>20.867,11</b>  |
| <b>Ração de 1,2% de P e temperatura da água de 25°C <sup>2</sup></b> | <b>Cenário 26</b> | <b>Cenário 27</b> | <b>Cenário 28</b> | <b>Cenário 29</b> | <b>Cenário 30</b> |
| Temperatura da água (°C)                                             | 25                | 25                | 25                | 25                | 25                |
| P ração (kg/t) - Pr (1,2% P-total)                                   | 12,00             | 12,00             | 12,00             | 12,00             | 12,00             |
| P retido no peixe (kg/t) - Pp                                        | 5,00              | 5,00              | 5,00              | 5,00              | 5,00              |
| <b>P lançado na água (kg/t) - Pa</b>                                 | <b>7,81</b>       | <b>7,81</b>       | <b>7,81</b>       | <b>7,81</b>       | <b>7,81</b>       |
| <b>Nova produção máxima (t/ano) - 1,2% P 25°C</b>                    | <b>33.719,52</b>  | <b>29.226,91</b>  | <b>26.987,20</b>  | <b>33.801,59</b>  | <b>14.365,55</b>  |
| <b>Ração de 1,2% de P e temperatura da água de 29°C <sup>2</sup></b> | <b>Cenário 31</b> | <b>Cenário 32</b> | <b>Cenário 33</b> | <b>Cenário 34</b> | <b>Cenário 35</b> |
| Temperatura da água (°C)                                             | 29                | 29                | 29                | 29                | 29                |
| P ração (kg/t) - Pr (1,2% P-total)                                   | 12,00             | 12,00             | 12,00             | 12,00             | 12,00             |
| P retido no peixe (kg/t) - Pp                                        | 5,00              | 5,00              | 5,00              | 5,00              | 5,00              |
| <b>P lançado na água (kg/t) - Pa</b>                                 | <b>8,63</b>       | <b>8,63</b>       | <b>8,63</b>       | <b>8,63</b>       | <b>8,63</b>       |
| <b>Nova produção máxima (t/ano) - 1,2% P 29°C</b>                    | <b>30.514,15</b>  | <b>26.448,61</b>  | <b>24.421,80</b>  | <b>30.588,41</b>  | <b>12.999,96</b>  |

| <b>Ração de 2,1% de P e temperatura da água de 21°C</b> | <b>Cenário 36</b> | <b>Cenário 37</b> | <b>Cenário 38</b> | <b>Cenário 39</b> | <b>Cenário 40</b> |
|---------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Temperatura da água (°C)                                | 21                | 21                | 21                | 21                | 21                |
| P ração (kg/t) - Pr (2,1% P-total)                      | 21,00             | 21,00             | 21,00             | 21,00             | 21,00             |
| P retido no peixe (kg/t) - Pp                           | 4,09              | 4,09              | 4,09              | 4,09              | 4,09              |
| <b>P lançado na água (kg/t) - Pa</b>                    | <b>14,83</b>      | <b>14,83</b>      | <b>14,83</b>      | <b>14,83</b>      | <b>14,83</b>      |
| <b>Nova produção máxima (t/ano) - 2,1% P 21°C</b>       | <b>17.754,40</b>  | <b>15.388,90</b>  | <b>14.209,62</b>  | <b>17.797,61</b>  | <b>7.563,92</b>   |
| <b>Ração de 2,1% de P e temperatura da água de 25°C</b> | <b>Cenário 41</b> | <b>Cenário 42</b> | <b>Cenário 43</b> | <b>Cenário 44</b> | <b>Cenário 45</b> |
| Temperatura da água (°C)                                | 25                | 25                | 25                | 25                | 25                |
| P ração (kg/t) - Pr (2,1% P-total)                      | 21,00             | 21,00             | 21,00             | 21,00             | 21,00             |
| P retido no peixe (kg/t) - Pp                           | 5,00              | 5,00              | 5,00              | 5,00              | 5,00              |
| <b>P lançado na água (kg/t) - Pa</b>                    | <b>20,58</b>      | <b>20,58</b>      | <b>20,58</b>      | <b>20,58</b>      | <b>20,58</b>      |
| <b>Nova produção máxima (t/ano) - 2,1% P 25°C</b>       | <b>12.791,53</b>  | <b>11.087,26</b>  | <b>10.237,62</b>  | <b>12.822,66</b>  | <b>5.449,58</b>   |
| <b>Ração de 2,1% de P e temperatura da água de 29°C</b> | <b>Cenário 46</b> | <b>Cenário 47</b> | <b>Cenário 48</b> | <b>Cenário 49</b> | <b>Cenário 50</b> |
| Temperatura da água (°C)                                | 29                | 29                | 29                | 29                | 29                |
| P ração (kg/t) - Pr (2,1% P-total)                      | 21,00             | 21,00             | 21,00             | 21,00             | 21,00             |
| P retido no peixe (kg/t) - Pp                           | 5,00              | 5,00              | 5,00              | 5,00              | 5,00              |
| <b>P lançado na água (kg/t) - Pa</b>                    | <b>20,54</b>      | <b>20,54</b>      | <b>20,54</b>      | <b>20,54</b>      | <b>20,54</b>      |
| <b>Nova produção máxima (t/ano) - 2,1% P 29°C</b>       | <b>12.816,32</b>  | <b>11.108,74</b>  | <b>10.257,46</b>  | <b>12.847,51</b>  | <b>5.460,15</b>   |

R.A. = Reservatório de acumulação.

<sup>1</sup> Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA. 2021. Boletim da piscicultura em águas da União 2020. Relatório anual de produção – RAP. Relatório anual de produção - RAP. Câmara Técnica de Gestão de Usos Múltiplos de Recursos Hídricos (CT-UM) e Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo (SigRG). Ofício CRH nº 03/2021 de 14 de janeiro de 2021. Parecer CT-UM nº 01/2021.

<sup>2</sup> Cenários com a situação real da área aquícola estudada.

\* No cenário Médio Operativo (Padrão Sipot), os valores das cotas e vazões correspondem a média de dados históricos da UHE Chavantes de 2010 a 2021 disponibilizados pelo Sistema Interligado Nacional (SIN) - ONS. No cenário Máximo e Mínimo Operativo (UHE Chavantes - Fartura), os valores das cotas e vazões foram retirados do trabalho de Nogueira et al. (2012), correspondente a região específica de Fartura, SP (aproximadamente 25km de distância do empreendimento aquícola avaliado nesse estudo). Fonte: Nogueira, M.G.; Perbiche-Neves, G.; Naliato, D.A.O. 2012. Limnology of Two Contrasting Hydroelectric Reservoirs (Storage and Run-of-River) in Southeast Brazil, Hydropower - Practice and Application, Dr. Hossein Samadi-Boroujeni (Ed.), ISBN: 978-953-51-0164-2, InTech.

\*\* No cenário Médio Operativo (Padrão Sipot), os valores de área e volume correspondem ao valor médio da UHE Chavantes conforme apresentado no Catálogo de metadados da ANA (2020) no Relatório técnico de atualização das curvas Cota x Área x Volume da UHE de Chavantes (Quadro 8-3 - Curvas Cota x Área x Volume revisada em 2016, pag. 28). No cenário Máximo e Mínimo Operativo (UHE Chavantes - Fartura), os valores de área e volume correspondem as respectivas cotas conforme apresentado no Relatório técnico de atualização das curvas Cota x Área x Volume de 2020 (Quadro 8-3 - Curvas Cota x Área x Volume revisada em 2016, p. 56 e 67, respectivamente).

\*\*\*  $L_r = (\Delta[P] * V_{min} * (1/td)) / (1-R)$ . Adaptado de: Dillon, P.J.; Rigler, F.H. 1974. A test of a simple nutrient budget model, predicting the phosphorus concentration in lake water. J.Fish.Res.Can. 1771-78.

\*\*\*\*  $R = 0,761 * (1 - \exp(-0,0282 * (td * 365)))$ . Fonte: Straškraba, M. 1996. Lake and reservoir management, Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie: Verhandlungen, v.26, p.193-209.

\*\*\*\*\* Pr: Valores comuns de mercado. Para Pp: Dantas, M.C.; Attayde, J.L. 2007. Nitrogen and phosphorus content of some temperate and tropical freshwater fishes. Journal of Fish Biology 70:100-108.

### 3.5. Avaliação do Índice de Estado Trófico (IET)

Ao longo do ciclo de produção da tilápia, a área aquícola apresentou predominância do estado oligotrófico (Tabela 13), indicando não haver influência da produção aquícola nesta área do reservatório durante o período do estudo.

**Tabela 13.** Índice de Estado Trófico da água durante o ciclo de produção da tilápia na área aquícola estudada no reservatório de Chavantes, São Paulo.

| Índice de Estado Trófico (IET) |     |                   |
|--------------------------------|-----|-------------------|
| Mês                            | IET | Classificação     |
| Outubro                        | 30  | Oligotrófico      |
| Novembro                       | 32  | Oligotrófico      |
| Dezembro                       | 27  | Oligotrófico      |
| Janeiro                        | 04  | Ultraoligotrófico |
| Fevereiro                      | 14  | Ultraoligotrófico |
| Março                          | 24  | Oligotrófico      |
| Abril                          | 20  | Oligotrófico      |

### 3.6. Análises para tomada de decisão e gestão da outorga para produção de tilápia no reservatório de Chavantes

#### Probabilidade da ocorrência dos cenários da CSAp por meio da Simulação Monte Carlo (SMC)

Em geral, a simulação demonstrou 90% de probabilidade do lançamento de fósforo na água ser maior do que 6,62kg/t, valor utilizado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) para o cálculo da máxima produção autorizável de peixes no reservatório (Tabela 14). No entanto, observou-se a probabilidade de 50% da produção de peixes ocorrer dentro dos valores calculados pela ANA (cenários de 01 a 04).

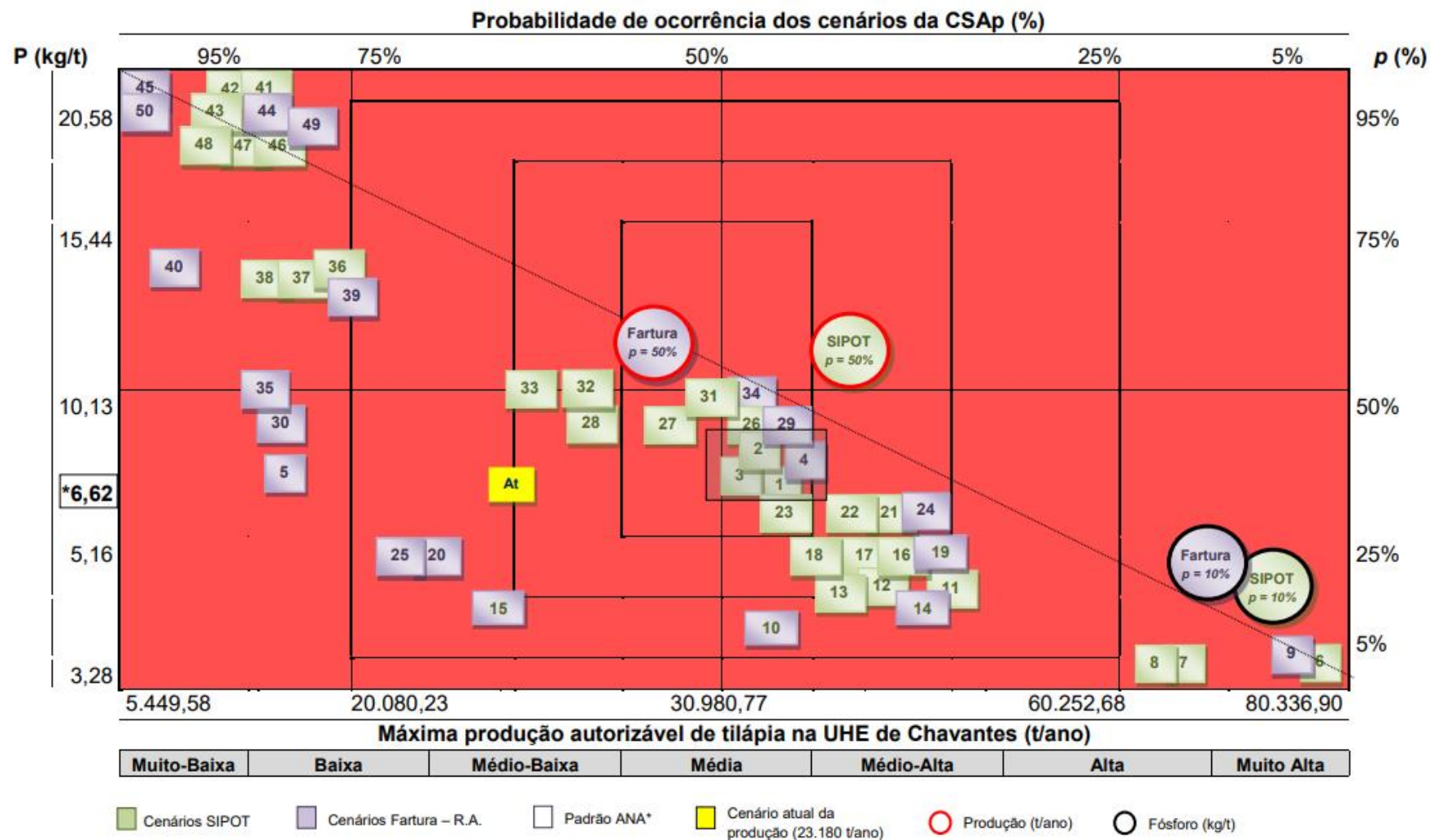
Considerando os cenários padrão SIPOT, para a produção de uma tonelada de tilápia com peso médio de 850g, a simulação demonstrou 50% de probabilidade do lançamento de fósforo na água ocorrer próximo a 10,77kg, o correspondente a 21 dos 30 cenários elaborados e uma produção de 21.712,15 toneladas de peixes ao ano. Nos cenários específicos de Fartura, embora a simulação não tenha demonstrado diferenças relevantes no lançamento de fósforo na água quando comparadas com os cenários do padrão Sipot, observou-se 50% de probabilidade da máxima produção autorizável de peixes no reservatório reduzir ~21%.

**Tabela 14.** Análise de Simulação Monte Carlo (SMC) com 10.000<sup>1</sup> interações aleatórias, para as variáveis de fósforo lançado na água (Pa) e a produção máxima de peixes (B) nos cenários padrão Sipot e Fartura R.A.

| <b>Indicadores</b> | <b>Cenários Padrão SIPOT</b> |                  | <b>Cenários Fartura R.A.</b> |                  |
|--------------------|------------------------------|------------------|------------------------------|------------------|
|                    | <b>Pa (kg/t)</b>             | <b>B (t/ano)</b> | <b>Pa (kg/t)</b>             | <b>B (t/ano)</b> |
| Média              | 11,29                        | 23.464,22        | 11,26                        | 18.853,36        |
| DP                 | 3,89                         | 9.023,57         | 3,86                         | 8.494,87         |
| Moda               | 10,81                        | 14.860,73        | 8,80                         | 16.314,97        |
| Mediana            | 10,77                        | 21.712,15        | 10,77                        | 17.123,32        |
| <b>Percentil</b>   |                              |                  |                              |                  |
| <b>5%</b>          | 5,77                         | 12.602,43        | 5,75                         | 8.543,75         |
| <b>25%</b>         | 8,43                         | 16.895,06        | 8,35                         | 12.688,45        |
| <b>50%</b>         | 10,77                        | 21.712,15        | 10,77                        | 17.123,32        |
| <b>75%</b>         | 13,79                        | 27.859,08        | 13,74                        | 23.145,00        |
| <b>95%</b>         | 18,42                        | 40.840,71        | 18,38                        | 35.225,67        |

<sup>1</sup>Probabilidade 95%; DP = desvio padrão.

Diante dos resultados, elaborou-se um mapa de probabilidade e capacidade produtiva do reservatório de Chavantes (Figura 5). Em média, 50% dos cenários encontram-se na faixa produtiva de vinte e dois a cinquenta mil toneladas de peixes ao ano, representando uma capacidade média de produção de tilápia neste ambiente aquático.



**Figura 5.** Mapa da probabilidade da ocorrência dos cenários da CSAp e da máxima produção autorizável de tilápia no reservatório de Chavantes (SP) considerando a concentração e o lançamento de fósforo na água.

#### 4. Discussão

A qualidade da água na área aquícola no reservatório de Chavantes apresentada na Tabela 6, indica que os valores médios obtidos foram adequados para o desempenho produtivo da tilápia. Moura et al. (2016) e Fialho et al. (2021), também acompanharam fazendas de produção de *O. niloticus* em tanques-rede instaladas em reservatório neotropical e obtiveram valores de qualidade de água próximos aos deste estudo, tendo atingido uma performance zootécnica satisfatória para esta espécie.

As concentrações médias de fósforo total na água mantiveram-se dentro dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 357/05 sendo de 50 mg/m<sup>3</sup> para água de Classe 2 em ambientes de transição, exceto para dois meses de coleta (60,54 mg/m<sup>3</sup> e 71,10 mg/m<sup>3</sup>). Embora, David et al., (2017) tenham afirmado que o fornecimento de ração é o principal fator que afeta o orçamento de fósforo nos sistemas de produção aquícolas, neste estudo a concentração pode ter sido influenciada tanto pela atividade aquícola como por atividades antrópicas externas, (lançamento de efluentes domésticos e agricultura localizados no entorno do reservatório). Por tratar-se de um reservatório com usos múltiplos, dificulta-se a identificação do principal contribuinte do incremento deste nutriente no sistema (Nogueira et al., 2012; Montanhini Neto et al., 2017; Rosanova et al., 2019).

Nogueira et al., (2012), em um estudo comparativo das variáveis limnológicas em dois reservatórios (acumulação e fio d'água) na bacia do rio Paranapanema, observou-se que o fósforo expôs uma notável variação espacial e temporal no reservatório de acumulação (especificamente para a UHE de Chavantes), onde concentrações mais elevadas foram medidas nas zonas sob influência de rios tributários. Montanhini Neto et al. (2017) salientam que as leis que regulam a outorga da água para a aquicultura e definem os cálculos de capacidade de suporte, não devem ignorar que o corpo d'água pode conter fósforo em níveis que excedem os valores recomendados ou, pior ainda, que o ambiente em questão já possa estar eutrófico. Assim, isto deve ser considerado na aplicação desta abordagem em recursos hídricos semelhantes, a fim de obter maior acurácia e precisão nos cálculos de capacidade de suporte ambiental.

Outro fator importante que deve ser monitorado é a temperatura da água, por influenciar diretamente no desempenho dos peixes e na ingestão alimentar (Houlihan *et al.*, 2001; Bueno *et al.*, 2019). Durante o ciclo de produção da tilápia no reservatório de Chavantes, a temperatura da água oscilou de 21 a 29°C com média de 25,4°C, aproximando-se dos limites adequados para o conforto térmico de peixes tropicais (entre 26 e 30°C) segundo Boyd e Tucker (1998). Embora tenha sido relatado que a *O. niloticus* pode manter sua atividade metabólica e fisiológicas normais e sobreviver em temperaturas próximas de 16°C (Sifa *et al.*, 2002).

A modelagem do coeficiente de crescimento térmico (TGC) obteve uma precisão de 85,4% para a predição da biomassa de pescado sob diferentes temperaturas da água. Esta abordagem também tem sido empregada em estudos realizados com *Oncorhynchus mykiss*, *Salmo salar*, *Sparus aurata* e outras variedades genéticas de *Oreochromis niloticus* (Bureau *et al.*, 2006; Dumas *et al.*, 2010; Jauralde *et al.*, 2013; Brande, 2019). Isto reforça que o uso de modelos matemáticos para predição do crescimento corporal e estimativa dos requisitos alimentares dos peixes podem ser utilizados para maximizar a eficiência e melhorar o crescimento animal, sobretudo quando consideram no cálculo fatores como a temperatura da água (Jobling, 2011; Chowdhury *et al.*, 2013; Bueno *et al.*, 2017).

Embora as três dietas utilizadas ao longo do ciclo de produção apresentassem composições nutricionais semelhantes (~31% de PB, ~90% de MS, ~1,2% de PT e ~16 MJ/kg de EB), foram observadas diferenças entre as composições informadas pelo fabricante e as análises laboratoriais. Isto evidencia a necessidade de análise e controle da composição dos lotes de ração utilizadas pelos empreendimentos aquícolas. Principalmente, devido ao impacto financeiro que este item representa em um negócio aquícola, podendo atingir 70% do custo total de produção (Brande, 2019; Calixto *et al.*, 2020; Moraes *et al.*, 2020).

Além do impacto econômico, o principal fator que influencia na sustentabilidade deste sistema de produção refere-se à externalidade ambiental gerada principalmente pelo lançamento de resíduos oriundos das rações não consumidas e das excretas dos animais na água (Montanhini Neto e Ostrensky, 2015; Bueno *et al.*, 2019). Porém, este excedente da alimentação pode estar sendo consumido e aproveitados por outros organismos aquáticos. Nobile *et al.*, (2018) e

Brandão et al. (2021), relatam que os peixes selvagens aceitam ração residual da piscicultura em tanques-rede a ponto de mudar sua dieta e a relação de interação peixe-comida. Assim, a atividade de piscicultura pode influenciar as interações tróficas e estes nutrientes podem estar sendo incorporados por outros organismos do ecossistema aquático.

Dentre os principais nutrientes responsáveis pelo impacto ambiental no sistema aquático, o fósforo lançado na água tem causado maiores consequências por resultar na eutrofização do ambiente aquático. Em um estudo realizado na indústria aquícola de salmão na Noruega, Wang et al. (2012) descobriram que 70% do fósforo das rações oferecidas aos peixes foi liberado para o ambiente aquático. Montanhini-Neto e Ostrensky (2015), relataram que a produção de uma tonelada de tilápia libera aproximadamente 1.040 kg de matéria orgânica, 45 kg de nitrogênio e 14 kg de fósforo diretamente nas águas circunvizinhas. Moura et al. (2016), ao avaliarem a sustentabilidade da produção de *O. niloticus* em um reservatório, citam que somente 17% do fósforo da alimentação foi retido no peixe. Alves e Baccarin (2005) também avaliando a carga de P de cultivos de tilápia observaram 23% do fósforo oriundo da alimentação dos animais é retido na biomassa corporal, enquanto 66% são depositados no sedimento de fundo e 11% na coluna de água após a excreção pelos peixes.

Ao avaliarmos os principais fatores que influênciam o lançamento de resíduos orgânicos oriundos de uma fazenda aquícola comercial, verificamos que para a produção de uma tonelada de tilápia sob temperatura média de 25°C com rações de 0,8; 1,2 e 2,1% de fósforo, promoveu uma retenção média do P pelo peixe de 51, 40 e 20%, respectivamente. Esses resultados corroboram com o encontrado por Boyd et al. (2007) e Osti et al. (2018), que estimaram que a biomassa de tilápia recuperou 40% e 46% do fósforo aplicado da ração, respectivamente. Hardy e Gatlin (2002) observaram uma redução de mais de 50% das perdas fecais e excretórias de fósforo pela redução do fósforo da dieta, corroborando a hipótese acima. Bueno et al. (2017) afirmam que os peixes dispersam nutrientes não utilizados para rações e matéria orgânica diretamente das gaiolas para as águas circunvizinhas, dificultando o tratamento dos efluentes. Este fator pode

comprometer na análise da CSAp por influenciar nos valores de concentração de P na água utilizados para a modelagem.

O resíduo total de P lançado na água variou de 3,3 a 20,5 kg por tonelada de tilápia produzida, o equivalente a uma variação de 42 a 80% do fósforo que entrou no sistema na forma de ração de acordo com a composição da mesma e a temperatura da água. Vários estudos demonstram que, para produzir uma tonelada de peixe, as descargas de fósforo na água variaram de 6,1 a 15,9 kg para as espécies *Ictalurus punctatus*, *Oreochromis niloticus*, *Salmo salar*, *Oncorhynchus mykiss*, e o camarão *Litopenaeus vannamei* (Shearer et al., 1994; Boyd e Tucker, 1995; Boyd e Teichert-Coddington, 1995; Boyd e Green, 1998; Liu et al., 2004; David et al., 2015; Moura et al. 2016; Fialho et al, 2021; Godoy et al., 2022).

Assim, temos uma relação direta entre a temperatura da água, a qualidade da dieta/ração, o manejo e a quantidade de resíduo liberada no ambiente, demonstrando a importância de considerar os eventos climáticos integrados com as operações zootécnicas ao realizarmos a modelagem de crescimento e simulação de resíduos oriundos dos sistemas de produção aquícolas.

A ração com maior teor de fósforo (2,1% de P) resultou em baixa retenção de P pela tilápia e maior geração de resíduos quando comparada as demais rações utilizadas na simulação de resíduos, sobretudo a temperatura de 29°C. Esse resultado pode estar associado ao requisito de P digestível da tilápia, o qual está em torno de 0,4 a 0,8% segundo estudos realizados (Boscolo et al. 2005; Miranda et al., 2008; Furuya et al. 2010; NRC, 2011). Estudos de nutrição relatam que o balanceamento da ração e a redução de fósforo, podem favorecer uma diminuição significativa na excreção de P e, conseqüentemente, melhorar a qualidade da água (Hardy, 1999; Bueno et al., 2012).

Com relação a CSAp na UHE de Chavantes, a carga máxima estimada foi de 263.258 kg de fósforo ao ano, considerando a situação máximo operativo do reservatório (nível 95% do volume da água). Essa carga corresponde a uma produção de 39.767 toneladas de tilápia ao ano, o equivalente a um incremento produtivo de 41% em relação a capacidade de suporte de 23.180 t/ano que foi outorgada para aquicultura pela ANA - agência federal que delibera a outorga da

água para estes fins no Brasil - conforme dados informados pelo SAP/MAPA (2021). Demonstrando uma distinção e diferença nos valores de CSAp em relação ao observado neste estudo.

Neste contexto, Correia e Dias (2003), traz um apontamento relevante, ao explicarem que cada reservatório de água tem um regime próprio de operação em função do volume de água disponível no curso represado, tendo como um dos fatores de influência a necessidade do ajuste de descarga em função dos excedentes armazenados em épocas de cheias e de complementação de descargas em situações de estiagens. Assim, é necessário considerar tal fator para o cálculo da CSAp, sobretudo devido a UHE de Chavantes localizar-se em uma zona de transição climática, estando sujeita a variações de temperatura, precipitação, ventos, entre outros fatores.

O uso de rações com menor teor de fósforo (0,8% de PT a temperatura da água de 21, 25 e 29°C) proporcionou um incremento produtivo de até duas vezes maior em relação ao cenário calculado pela ANA. Os cenários em que a tilápia é alimentada com ração de 1,2% de fósforo total a temperatura de 21°C, apresentaram um incremento produtivo de 23% e um decréscimo de 15 e 23% com a mesma ração e temperatura da água a 25 e 29°C, respectivamente. Esta diferença obtida entre o que é outorgado pela agência do governo (SAP/MAPA, 2021) e o encontrado pelo CSAp model pode chegar a 80%. Isto ocorre quando utilizam o teor de P na ração, TCA e proporção de P retida na carcaça do peixe estático, e consideram o mesmo valor para todas as espécies de peixes, ambientes aquáticos, épocas do ano e demais condições na modelagem da capacidade de suporte.

Fato extremamente preocupante, pois as possíveis externalidades ambientais (positivas e negativas) que estes sistemas produtivos possam causar no ambiente aquático, influenciam todo este setor do agronegócio que necessita diretamente da determinação da CSA a qual está diretamente relacionada a manutenção de um ecossistema aquático em equilíbrio e sustentável. O uso de dados e cálculos com baixa acurácia, com valores que foram calculados há anos e que são utilizados no presente para a gestão da outorga e tomada de decisão das políticas públicas em águas da União por países *players* dessa modalidade de

cultivo, como é o caso do Brasil, pode representar um sério risco ambiental e financeiro para toda a cadeia de produção aquícola. Este evento também foi ressaltado por Montanhini-Neto et al. (2017); Bueno et al. (2019) e Nobile et al (2020) em relação as práticas empregadas nas políticas públicas para empreendimentos aquícolas em lagos e reservatórios tropicais e neotropicais.

A metodologia aplicada neste estudo obteve uma precisão de 96% quando comparada ao obtido no modelo e os valores reais encontrados, demonstrando ser mais precisa que a abordagem utilizada atualmente pelos órgãos governamentais para regular e gerir a atividade. Isso ocorreu devido a integração de diversas equações que possibilitaram a predição e simulação de dados com diferentes cenários de produção. Além disto, esta metodologia permite calcular de forma dinâmica as interações zootécnicas, climáticas e ambientais que ocorrem nestes ambientes.

Outro fator importante a considerar para o cálculo da CSAp, trata-se da localização geográfica onde foi instalada a fazenda de peixe, pois os reservatórios artificiais de usina hidrelétrica, especialmente naqueles de maior porte, ocorre a formação de compartimentos diferenciados de grande complexidade espacial e temporal que podem influenciar as condições limnológicas do corpo hídrico (Nogueira et al., 1999; Pomari, 2010; Nogueira et al., 2012).

Diante do exposto, a avaliação da CSAp separando regiões do reservatório de Chavantes com características dendrítica e fio d'água, permitiu obter uma melhor precisão na modelagem da capacidade de suporte. Quando comparado as duas situações de mínimo operativo do reservatório (padrão Sipot e Fartura – R.A.), foi observado diferença expressiva nos resultados da capacidade de suporte e da máxima produção de peixes. Essa diferença pode estar relacionada a limnologia e a morfometria do local, sendo este um compartimento do reservatório com uma área abrigada, conferindo a ele menor vazão e maior tempo de residência, resultando em maior concentração de fósforo na água.

Segundo Straškraba e Tundisi (1999), o tempo de residência é de grande importância ecológica em reservatórios, pois determina em grande parte os processos de mistura na coluna d'água. Corroborando com esta afirmação, Pomari

(2010), avaliando os efeitos da tilapicultura em tanques-rede sobre as assembleias zooplancônicas do Reservatório de Chavantes, relata que Fartura está localizada em uma zona de transição rio-reservatório, o que confere a ela características hidrodinâmicas diferenciadas da região lacustre encontrada próxima à barragem.

David et al. (2015), estimando a capacidade de carga ecológica da produção de tilápia em um grande reservatório da bacia de Ilha Solteira, ressaltou a importância de um estudo cuidadoso e detalhado de condições limnológicas em cada local aquícola, de modo a evitar estimativas que levem em consideração o reservatório como um todo, uma vez os ecossistemas são movidos por complexas interações com grande número de variáveis. Assim, fica evidente a importância do uso de abordagens que permitam analisar cada compartimento do reservatório de forma separada, considerando cada cenário específico em tempo real. Isto é uma dificuldade encontrada por vários órgãos de gestão e monitoramento ambiental destes ambientes.

O Índice de Estado Trófico (IET) da água, no período do monitoramento, a média do IET manteve-se oligotrófica, indicando não haver influência da produção aquícola nesta área do reservatório. Tal fato, relaciona-se aos estudos anteriores realizados em Chavantes, que classificaram este reservatório como um sistema oligotrófico e eventualmente mesotrófico em alguns períodos do ano (Pagioro et al., 2005; Nogueira et al., 2006; Nogueira et al., 2012; Penariol, 2020).

No período de janeiro a fevereiro, mesmo com o aumento da biomassa e consumo de ração dos peixes em aproximadamente 85% durante a produção, as concentrações de Pt decaíram para ultraoligotrófico. Esse resultado pode estar associado a ocorrência de ventos que propiciam a formação de correntes e ondas que interferem na agitação da massa líquida, na dispersão dos resíduos e na dissolução do oxigênio do ar na água (Ayroza, 2012).

Zhang et al. (2008), utilizando o IET para avaliar a eutrofização em 35 reservatórios no Sudoeste da China enfatizaram a eficiência do uso desta ferramenta a qual permitiu a conclusão de que as principais fontes de poluição são os resíduos industriais e domésticos. Bueno et al. (2008) e Ribeiro Filho et al. (2011), ao avaliarem uma área onde estavam instaladas piscicultura em

tanques-rede no reservatório de Itaipu - fronteira do Brasil, Paraguai e Argentina em região neotropical - encontraram áreas oligo, meso e eutróficas em situação de transição, demonstrando que variações podem ocorrer de reservatório para reservatório, bem como em diferentes áreas de um mesmo reservatório.

Ao calcularmos 10 mil interações possíveis para CSAp, o lançamento de fósforo na água oriundo deste sistema de produção apresentou uma probabilidade de 50% do lançamento ocorrer próximo a 10,77kg para a produção de uma tonelada de tilápia no reservatório de Chavantes, valor semelhante ao observado em outros estudos (David et al., 2015; Moura et al. 2016; Fialho et al, 2021; Godoy et al., 2022).

Montanhini Neto et al. (2017), aferindo a capacidade de suporte de oito reservatórios também no rio Paranapanema, estimou que as cargas totais de nutrientes aportados ao ambiente são de 78% da matéria orgânica, 65% do nitrogênio e 72% do fósforo, e concluiu que as estimativas de CSA para produção de pescados nestes ambientes deveriam ser limitadas a 3,5 km<sup>2</sup> e com produção potencial inferior a 100 mil toneladas ano<sup>-1</sup>. Isto representaria um quinto dos valores atuais recomendados pelos órgãos governamentais que deliberam sobre a outorga para produção de peixes nestes ambientes (MAPA, 2021).

Segundo dados do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2021), a capacidade de suporte do reservatório de Chavantes, segundo cálculo da ANA, encontra-se em 23.180 toneladas de peixe ao ano. No presente estudo, em média 50% dos cenários calculados encontram-se na faixa produtiva de 22 a 50 mil toneladas de peixes ao ano, representando uma capacidade média de produção de tilápia neste reservatório. Penariol (2020) também estudando a CS deste reservatório

Novamente, isto evidencia a urgência em implantarmos novas abordagens mais modernas e precisas que permitem avaliar a CSAp considerando cada característica da espécie para produção, as condições de manejo e os fatores climáticos e limnológicos que irão afetar os processos de outorga da água para a produção de pescado em águas continentais.

Outro ponto à ser considerado neste cenário, deve-se fomentar e implementar tecnologias acessíveis e de baixo custo nas fazendas e áreas estratégicas que influenciam estes empreendimentos. Assim, será possível realizar o monitoramento seguro e rápido da água, dos sedimentos e demais fatores necessários para a gestão ambiental e da capacidade de suporte para fins de aquicultura (Boyd et al., 2007; Ferreira et al. 2008; Byron e Costa-Pierce, 2010; Ross et al., 2013; Sampaio et al. 2021), isto é fundamental para que realmente possamos implementar práticas mais modernas e que auxiliem em operações mais seguras e sustentáveis para o setor aquícola.

## 5. Conclusões

A aplicação desta nova abordagem é eficiente e obteve uma precisão de 96% em relação à estimativa da capacidade de suporte ambiental do fósforo para produção de pescados sob diferentes condições climáticas e de produção da tilápia (*Oreochromis niloticus*) criadas em tanques-rede em um reservatório neotropical.

O uso de menores níveis de fósforo total digestível das rações, mesmo sob maiores temperaturas da água, pode reduzir em até duas vezes o lançamento de fósforo no ambiente, resultando no incremento da capacidade de suporte ambiental para produção de pescados neste ambiente. Em média, 50% dos cenários e simulações avaliadas para a capacidade de suporte ambiental baseada na concentração e lançamento de fósforo na água encontram-se na faixa produtiva de 22.000 a 50.000 toneladas de tilápia ao ano no reservatório de Chavantes, São Paulo.

## 6. Referências Bibliográficas

- Agostinho, A.A.; Gomes, L.C.; Santos, N.C.L.; Ortega, J.C.G.; Pelicice, F.M. 2016. Fish assemblages in Neotropical reservoirs: colonization patterns, impacts and management. *Fisheries Research*, v.173, p.26-36. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2015.04.006>.
- Alves R.C.P.; Baccarin A.L. 2005. Efeitos da produção de peixes em tanques-rede sobre sedimentação de material em suspensão e de nutrientes no Córrego da Arribada (UHE Nova Avanhandava), baixo Rio Tietê. In: *Ecologia de Reservatórios: Impactos Potenciais, Ações de Manejo e Sistemas em Cascata* (ed. by M.G. Nogueira, R. Henry & A. Jorcin), pp 329–348. São Carlos, Rima.
- ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. 2009. Nota Técnica n.009/2009/GEOOUT/SOF-ANA: atualização na metodologia de análise de pedidos de outorga para piscicultura em tanques-rede. Brasília, 2009. 3p.
- ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. 2020. Catálogo de metadados da ANA. Relatório técnico de atualização das curvas Cota x Área x Volume da UHE de Chavantes. 115p. Disponível em <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/b8f0487a-df73-4f8d-8b22-bb49cf9f3683>.
- APHA, 2017. Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association, Washington, DC.
- Ayroza, D.M.M.R. 2012. Características limnológicas em áreas sob influência de piscicultura em tanques-rede no reservatório da UHE de Chavantes, rio Paranapanema, SE/S, Brasil. Programa de Pós Graduação em Aquicultura da Unesp – Centro de Aquicultura da Unesp. Jaboticabal. 130p. Tese de Doutorado.
- Beveridge M.C.M. 1984. The Environmental Impact of Freshwater Cage and Pen Fish Farming and the Use of Simple Models to Predict Carrying Capacity. FAO Fisheries Technical Paper 255. FAO, Rome. 131p.
- Beveridge M.C.M. 2004. Cage aquaculture. Fishing News Books, Oxford, 3 ed. 368 p.
- Bohnes, F.A.; Lauren, A. 2021. Environmental impacts of existing and future aquaculture production: comparison of technologies and feed options in

- Singapore. Aquaculture, v. 532, p. 736001. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.736001>.
- Boscolo, W.R.; Feiden, A.; Bombardelli, R.A. Signor, A; Gentelini, A.L.; Souza, B.E. 2005. Exigências de fósforo para alevinos de tilápiado-nilo (*Oreochromis niloticus*). Acta Scientiarum Animal Sciences. v.27, p.87-91, 2005.
- Boyd, C. E., and B. Green. 1998. Dry matter, ash, and elemental composition of pond-cultured tilapia (*Oreochromis aureus* and *O. niloticus*). J. World Aquacult. Soc., v.29: p.125–128.
- Boyd, C. E., and D. Teichert-Coddington. 1995. Dry matter, ash, and elemental composition of pond-cultured *Penaeus vannamei* and *P. stylirostris*. J. World Aquacult. Soc., v.26: p.88–92. <https://doi.org/10.1111/j.1749-7345.1995.tb00214.x/full>.
- Boyd, C.E., Tucker, C., Mcnevin, A., Bostick, K., Clay, J., 2007. Indicators of resource use efficiency and environmental performance in fish and crustacean aquaculture. Reviews in Fisheries Science 15, 327-360. <https://doi.org/10.1080/10641260701624177>.
- Boyd, C.E.; Tucker, C.S. 1998. Pond Aquaculture Water Quality Management. Boston: Kluwer Academic Publishers. 700p.
- Brandão, H.; Lange, D.; Blanco, D.R.; Ramos, I.P.; Sousa, J.Q.D.; Nobile, A.B.; Carvalho, E.D. 2021. Rede de interações peixe-alimento ao redor de piscicultura com tanque-rede em um reservatório neotropical. Acta Limnologica Brasiliensia, v.33. <https://doi.org/10.1590/S2179-975X10919>.
- Brande, M.R. 2019. Modelagem financeira e risco econômico da produção comercial de tilápia (*Oreochromis niloticus*) em lagos e reservatórios tropicais. Jaboticabal: Centro de Aquicultura da Universidade Estadual Paulista. 102 p. Dissertação de Mestrado.
- Bueno, G. W., Feiden, A., Neu, D. H., Lui, T. A., Wächter, N., Boscolo, W. R. 2012. Digestibilidade do fósforo em dietas como estratégia nutricional para redução de efluentes da tilapicultura. Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia, v.64, p.183-191. <https://doi.org/10.1590/S0102-09352012000100026>.
- Bueno, G. W.; Mattos, B. O.; Neu, D. H.; David, F. S.; Feiden, A.; Boscolo, W. R. 2019. Stability and phosphorus leaching of tilapia feed in water. Ciência Rural, v.49, p.1-8. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20180429>.

- Bueno, G.W. 2015. Modelo bioenergético nutricional e balanço de massas para o monitoramento e estimativa de efluentes da produção comercial de tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*) em reservatório tropical. Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília. 127p. Tese de Doutorado.
- Bueno, G.W.; Bureau, D.; Skipper-Horton, J.O.; Roubach, R.; Mattos, F.T.; Bernal, F.E.M. 2017. Mathematical modeling for the management of the carrying capacity of aquaculture enterprises in lakes and reservoirs. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.52, n.9, p.695-706. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2017000900001>.
- Bueno, G.W.; Matos, F.T.; Canzi, C.; Sampaio, M.B.; Barone, R.S.C.; Roubach, R. 2011. A Capacidade de Suporte: Produção de Peixes em Reservatórios. *Panorama da Aquicultura*, v. 21, p. 48-63.
- Bureau, D., K. Hua, C. Y. Cho. 2006. Effect of feeding level on growth and nutriente deposition in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss Walbaum*) growing from 150 to 600 g. *Aquaculture Research*. 37: 1090-1098. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2006.01532.x>.
- Byron, C.; Costa-Pierce, B.A. 2010. Carrying capacity tools for use in the implementation of an ecosystems approach to aquaculture. In: FAO expert workshop on aquaculture site selection and carrying capacity estimates for inland and coastal waterbodies. Institute of Aquaculture, University of Stirling, Stirling, UK, 6–8 Dec 2010.
- Calixto, E. S., Santos, D. F. B., Lange, D., Galdiano, M. S., Rahman, I. U. 2020. Aquaculture in Brazil and worldwide: overview and perspectives. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, v. 5, n. 1, p. 098-107. <https://doi.org/10.24221/jeap.5.1.2020.2753.098-107>.
- Câmara Técnica de Gestão de Usos Múltiplos de Recursos Hídricos (CT-UM) e Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo (SigRG). Ofício CRH nº 03/2021 de 14 de janeiro de 2021. Parecer CT-UM nº 01/2021. 16p. Disponível em <https://sigrh.sp.gov.br/public/uploads/events//CRH/9456/parecer-ct-um-para-o-crh-09fev2021.pdf>.
- Carlson, R.E. 1977. A trophic state index for lakes. *Limnology and oceanography*, v.22, n.2, p.361-369. <https://doi.org/10.4319/lo.1977.22.2.0361>.

- Cho, C.Y.; Bureau, D.P. 1998. Development of bioenergetic models and the Fish-PrFEQ software to estimate production, feeding ration and waste output in aquaculture. *Aquatic Living Resources*, v.11, p.199-210. [https://doi.org/10.1016/S0990-7440\(98\)89002-5](https://doi.org/10.1016/S0990-7440(98)89002-5).
- Chowdhury, M.A.K.; Siddiqui, S.; Hua, K.; Bureau, D.P. 2013. Bioenergetics-based factorial model to determine feed requirement and waste output of tilapia produced under commercial conditions. *Aquaculture*, v.410/411, p.138-147. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.06.030>.
- CONAMA - Brasil. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>.
- Correia, M.F.; Dias, M.A.F.S. 2003. Variação do nível do reservatório de Sobradinho e seu impacto sobre o clima da região. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 8, n. 1, p.157-168.
- D'Abramo, L.R.; Slater, M.J. 2019. Climate change: Response and role of aquaculture. *Journal of the World Aquaculture Society*, v.50, n.4. p.710-714. <https://doi.org/10.1111/jwas.12643>.
- Dantas, M.C.; Attayde, J.L. 2007. Nitrogen and phosphorus content of some temperate and tropical freshwater fishes. *Journal of Fish Biology*. v. 70, n. 1, p. 100-108. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2006.01277.x>.
- David, F. S.; Proença, D. C.; Valenti, W. C. 2017b. Phosphorus Budget in integrated multitrophic aquaculture systems with Nile Tilapia, *Oreochromis niloticus*, and Amazon River Prawn, *Macrobrachium amazonicum*. *Journal of the World Aquaculture Society*, v.48, n.3, p.402–414. <http://dx.doi.org/10.1111/jwas.12404>.
- David, G. S., Carvalho, E. D. D., Lemos, D., Silveira, A. N., Dall'Aglio-Sobrinho, M. 2015. Ecological carrying capacity for intensive tilapia (*Oreochromis niloticus*) cage aquaculture in a large hydroelectrical reservoir in Southeastern Brazil. *Aquacultural Engineering*, v.66, p.30-40. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaeng.2015.02.003>.
- Dillon, P.J.; Rigler, F.H. 1974. A test of a simple nutrient budget model predicting the phosphorus concentration in lake water. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, v.31, p.1771-1778. <https://doi.org/10.1139/f74-225>.

- Dumas, A.; France, J.; Bureau, D.P. 2010. Modelling growth and body composition in fish nutrition: where have we been and where are we going? *Aquaculture Research*, 41, 161-181. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2009.02323.x>.
- Falconer, L., Ozretich, R., Ekpeki, A., Telfer, T. 2019. Carrying capacity and production models for aquaculture within freshwater lake systems in Europe. EU H2020 TAPAS project Deliverable 5.6 Report. 21p.
- Ferreira, J.G.; Grant, J.; Verner-Jefferys, D.W.; Taylor, N.G. 2013. Modelling frameworks for determination of carrying capacity for aquaculture. In: Christou P, Savin R, Costa-Pierce B, Misztal I, Whitelaw B (eds) *Sustainable Food Production*. Springer, New York, NY. p. 986–1049.
- Ferreira, J.G.; Hawkins, A.J.S.; Monteiro, P.; Moore, H.; Service, M.; Pascoe, P.L.; Ramos, L.; Sequeira, A. 2008. Integrated assessment of ecosystem-scale carrying capacity in shellfish growing areas. *Aquaculture*, v. 275, n. 1-4, p. 138-151, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2007.12.018>.
- Fialho, N.S.; Valenti, W.C.; David, F.S.; Godoy, E.M.; Proença, D.C.; Roubach, R.; Bueno, G.W. 2021. Environmental sustainability of Nile tilapia net-cage culture in a neotropical region. *Ecological Indicators*, v.129, p.108008. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108008>.
- Fitzsimmons, K. 2021. Tilapia farming: prospects of the future. International Technical Seminar on Tilapia. Food and Agriculture Organization of the United Nations – FAO. Disponível em [http://infofish.org/tilapia/media/attachments/2021/12/02/keynote-2\\_fitzsimmmons\\_tilapia-farming-prospects-of-the-future.pdf](http://infofish.org/tilapia/media/attachments/2021/12/02/keynote-2_fitzsimmmons_tilapia-farming-prospects-of-the-future.pdf).
- Furuya et al. 2010. Tabelas brasileiras para a nutrição de tilápias. Toledo: GFM, 100p.
- Gentle, J.E. 1998. Random number generation and Monte Carlo methods. Springer, New York, New York, USA.
- Glencross, B.D. 2008. A factorial growth and feed utilization model for barramundi, *lates calcarifer*, based on Australian production conditions. *Aquaculture Nutrition*, v.14, n.4, p.360-373, 2008. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2095.2007.00543.x>.
- Godoy, E. M., David, F. S., Fialho, N. S., Proença, D. C., Camargo, T. R., Bueno, G. W. 2022. Environmental sustainability of Nile tilapia production on rural

- family farms in the tropical Atlantic Forest region. *Aquaculture*, v. 547, p. 737481. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.737481>.
- Hardy, R.W. 1999. Collaborative opportunities between fish nutrition and other disciplines in aquaculture: an overview. *Aquaculture*, v. 177, n. 1-4, p. 217-230. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(99\)00086-1](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(99)00086-1).
- Hardy, R.W.; Gatlin, D. 2002. Nutritional strategies to reduce nutrient losses in intensive aquaculture. In: Cruz-Suárez, L. E., Ricque-Marie, D., Tapia Salazar, M., Gaxiola-Cortés, M. G., Simoes, N. (Eds.). *Avances en Nutrición Acuícola VI. Memorias del VI Simposium Internacional de Nutrición Acuícola*. 3 al 6 de Septiembre del 2002. Cancún, Quintana Roo, México.
- Houlihan, D.; Boujard, T.; Jobling, M. 2001. *Food Intake in Fish*. Blackwell Science, Oxford, 440p.
- Iwama, G. K.; Tautz, A. F. 1981. A Simple Growth Model for Salmonids in Hatcheries. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 38: 649-656. <https://doi.org/10.1139/f81-087>.
- Jauralde, I.; Martínez-Llorens, S.; Tomás, A., Ballestrazzi, R., Jover, M. 2013. A proposal for modelling the thermal-unit growth coefficient and feed conversion ratio as functions of feeding rate for gilthead sea bream (*Sparus aurata*, L.) in summer conditions. *Aquaculture Research*, v.44, n.2, p.242-253. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2011.03027.x>.
- Jobling, M. 2011. Bioenergetics in aquaculture settings. In: Farrell, A.P. (Ed.). *Encyclopedia of Fish Physiology: from genome to environment*. Amsterdam: Elsevier. p.1664-1674. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374553-8.00152-0>.
- Kratzer, C.R.; Brezonik, P.L.A. 1981. Carlson-type trophic state index for nitrogen in Florida lakes. *Water Resour. Bull.*, Baton Rouge, v.17, n.4, p.713-715. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1981.tb01282.x>.
- Lima, A. C., Agostinho, C. S., Sayanda, D., Pelicice, F. M., Soares, A. M., Monaghan, K. A. 2016. The rise and fall of fish diversity in a neotropical river after impoundment. *Hydrobiologia*, v.763, n.1, p.207-221. <https://doi.org/10.1007/s10750-015-2377-z>.
- Liu, K. K. M., F. T. Barrows, R. W. Hardy, and F. M. Dong. 2004. Body composition, growth performance, and product quality of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed diets containing poultry fat, soybean/corn lecithin, and menhaden

- oil. Aquaculture, v.238, p.309–328.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2004.03.022>.
- Lopes, J.E.G.; Santos, R.C.P. 2002. Capacidade de reservatórios. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 44p.
- Matta, E.; Koch, H.; Selge, F.; Simshäuser, M.N.; Rossiter, K.; Silva, G.M.N.; Gunkel, G.; Hinkelmann, R. 2019. Modeling the impacts of climate extremes and multiple water uses to support water management in the Icó-Mandantes Bay, Northeast Brazil. *Journal of Water and Climate Change*, v. 10, n. 4, p. 893-906, 2019. <https://doi.org/10.2166/wcc.2018.254>.
- Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA. 2021. Boletim da piscicultura em águas da União 2020. Relatório anual de produção – RAP. 88p. Disponível em <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/aquicultura-e-pesca/aquicultura-1/boletim-aquicultura-em-aguas-da-uniao-2020.pdf>.
- Miranda, E.C.; Pezatto, C.A.; Pezzato, L.E. et al. 2008. Disponibilidade aparente de fósforo em ingredientes pela tilápia-do-Nilo (*Oreochromis niloticus*). *Acta Scientiarum Animal Sciences*. v.22, p.669-675. <https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v22i0.2910>.
- Montanhini Neto, R. and Ostrensky, A. 2015. Evaluation of commercial feeds intended for the Brazilian production of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.): nutritional and environmental implications. *Aquacult Nutr*, 21: 311-320. <https://doi.org/10.1111/anu.12154>
- Montanhini Neto, R., Nocko, H.R. and Ostrensky, A. 2017. Carrying capacity and potential environmental impact of fish farming in the cascade reservoirs of the Paranapanema River, Brazil. *Aquac Res*, 48: 3433-3449. <https://doi.org/10.1111/are.13169>
- Moraes, C. R. F., Attayde, J. L., Henry-Silva, G. G. 2020. Stable isotopes of C and N as dietary indicators of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) cultivated in net cages in a tropical reservoir. *Aquaculture Reports*, v.18, p.100458. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2020.100458>.
- Moura, R.S.T., Valenti, W.C., Henry-Silva, G.G. 2016. Sustainability of Nile tilapia net-cage culture in a reservoir in a semi-arid region. *Ecological indicators*, v.66, p.574-582. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.01.052>.
- National Research Council - NRC. 2011. Nutrient Requirements of Fish and Shrimp. National Academy Press, Washington, DC.392p.

- Nobile, A. B., Cunico, A. M., Vitule, J. R. S., Queiroz, J., Vidotto-Magnoni, A. P., Garcia, D. A. Z., Orsi, M. L., Lima, F. P., Acosta, A. A., da Silva, R. J., do Prado, F. D., Porto-Foresti, F., Brandão, H., Foresti, F., Oliveira, C., & Ramos, I. P. 2020. Status and recommendations for sustainable freshwater aquaculture in Brazil. *Reviews in Aquaculture*, 12(3), 1495–1517. <https://doi.org/10.1111/raq.12393>
- Nobile, A.B., Zanatta, A.S., Brandão, H., Zica, E.O., Lima, F.P., Freitas-souza, D., Carvalho, E.D., Silva, R.J. and Ramos, I.P. 2018. Cage fish farm act as a source of changes in the fish community of a Neotropical reservoir. *Aquaculture*, 495, 780-785. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.06.053>.
- Nogueira, M.G.; Henry, R.; Maricatto, F.E. 1999. Spatial and temporal heterogeneity in the Jurumirim Reservoir, São Paulo, Brazil. *Lakes and Reservoirs: Research and Management*. v. 4, n. 3-4, p. 107-120. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1440-1770.1999.00086.x>
- Nogueira, M.G.; Jorcin A.; Vianna, N.C.; Britto Y.C. 2006. Reservatórios em cascata e os efeitos na limnologia e organização das comunidades bióticas (fitoplâncton, zooplâncton e zoobentos): Um estudo de caso no rio Paranapanema (SP/PR). In: *Ecologia de reservatórios: Impactos potenciais, ações de manejo e sistemas em cascata*, M.G. Nogueira, R. Henry & A. Jorcin, (Eds.), 83-125, Rima, São Carlos, Brasil.
- Nogueira, M.G.; Neves, G.P.; Naliato, D.A.O. 2012. Limnology of Two Contrasting Hydroelectric Reservoirs (Storage and Run-of-River) in Southeast Brazil, *Hydropower - Practice and Application*, Dr. Hossein Samadi-Boroujeni (Ed.), ISBN: 978-953-51-0164-2, InTech. <https://doi.org/10.5772/31829>.
- Osti, J. A. S.; Moraes, M. A. B.; Carmo, C. F.; Mercante, C.T.J. 2017. Nitrogen and phosphorus flux from the production of Nile tilapia through the application of environmental indicators. *Brazilian Journal of Biology*, v. 78, p. 25-31. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.02116>.
- Pagioro, T.A.; Thomaz, S.M.; Roberto, M.C. 2005. Caracterização limnológica abiótica dos reservatórios. In: *Biocenoses em reservatórios: padrões espaciais e temporais*, L. Rodrigues, S.M. Thomaz, A.A. Agostinho & L.C. Gomes (Eds.), 17-37, Rima, São Carlos, Brasil.

- Peixe BR. 2021. Anuário da Associação Brasileira de Piscicultura. Peixe BR: São Paulo. 141p.
- Penariol, I.C. 2020. Produção intensiva de tilápia em tanques rede - Impactos e capacidade suporte ecológica em área aquícola de reservatório hidrelétrico do sudeste brasileiro. Programa de Pós Graduação em Aquicultura. Tese de Doutorado. 78p.
- Pomari, J. 2010. Efeitos da tilapicultura em tanques-rede sobre as assembléias zooplanctônicas do Reservatório de Chavantes, rio Paranapanema (SP/PR). Programa de Pós Graduação em Ciências Biológicas – AC: Zoologia. Dissertação de Mestrado. 204p.
- Ribeiro Filho, R., Petrere Junior, M., Benassi, S., Pereira, J. 2011. Itaipu reservoir limnology: eutrophication degree and the horizontal distribution of its limnological variables. *Brazilian Journal of Biology*, 71(4), 889–902. <https://doi.org/10.1590/S1519-69842011000500010>.
- Rosanova, C.; Pinho, E. S.; Matos, F. T.; Akama, A.; Bueno, G. W.; Macedo, D. B. 2019. Monitoramento da aquicultura em reservatórios continentais por meio do índice de estado trófico. *Embrapa Pesca e Aquicultura*-Artigo em periódico indexado (ALICE).
- Ross, L.G., Telfer, T.C., Falconer, L., Soto, D., Aguilar-Manjarrez, J., Asmah, R., Bermúdez, J., Beveridge, M.C.M., Byron, C. J., Clément, A., Corner, R., Costa-Pierce, B.A., Cross, S., De Wit, M., Dong, S., Ferreira, J.G., Kapetsky, J.M., Karakassis, I., Leschen, W., Little, D., Lundebye, A.-K., Murray, F.J., Phillips, M., Ramos, L., Sadek, S., Scott, P.C., Valle-levinson, A., Waley, D., White, P.G. e Zhu, C. 2013. Carrying capacities and site selection within the ecosystem approach to aquaculture. In L.G. Ross, T.C. Telfer, L. Falconer, D. Soto e J. Aguilar-Manjarrez, eds. *Site selection and carrying capacities for inland and coastal aquaculture*, pp. 19–46. FAO/Institute of Aquaculture, University of Stirling, Expert Workshop, 6–8 December 2010. Stirling, the United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland. FAO Fisheries and Aquaculture Proceedings n. 21. Rome, FAO. 282 pp.
- Sampaio, F.G.; Araújo, C.A.S.; Dallago, B.S.L.; Stech, J.L.; Lorenzzetti, J.A.; Alcântara, E.; Losekann, M.E.; Marin, D.B.; Leão, J.A.D.; Bueno, G.W. 2021. Unveiling low-to-high-frequency data sampling caveats for aquaculture

- environmental monitoring and management. *Aquaculture Reports*, 20, 100764. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2021.100764>.
- Shearer, K. D., T. Asgard, G. Andorsdottir, and G. H. Aas. 1994. Whole body elemental and proximate composition of Atlantic salmon (*Salmo salar*) during the life cycle. *J. Fish Bio.*, v.44, p.785–797. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1994.tb01255.x>.
- Soares, M.C.S., Marinho, M.M., Huszar, V.L.M., Branco, C.W.C., Azevedo, S.M.F.O. 2008. The effects of water retention time and watershed features on the limnology of two tropical reservoirs in Brazil. *Lakes and Reservoirs: Research and Management*, 13(4), 257–269. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1440-1770.2008.00379.x>
- Straškraba, M. 1996. Lake and reservoir management, *Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie: Verhandlungen*, v.26, p.193-209. <https://doi.org/10.1080/03680770.1995.11900703>.
- Straskraba, M.; Tundisi, J. G. 1999. *Reservoir Water Quality Management: Guidelines of Lake Management*. Kusatsu, Japan: International Lake Environmental Committee, v.9, 227p.
- Trung, D.V.; Diu, N. T.; Hao, N.T.; Glencross, B. 2011. Development of nutritional model to define the energy and protein requirements of tilapia, *Oreochromis niloticus*. *Aquaculture*. v.463, p.193-200,. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2011.07.029>.
- Valenti, W. C., Barros, H. P., Moraes-Valenti, P., Bueno, G. W., Cavalli, R. O. 2021. Aquaculture in Brazil: past, present and future. *Aquaculture Reports*, v. 19, p. 100611. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2021.100611>.
- Vose, D. 2008. *Risk analysis: A quantitative guide*. John Wiley and Sons, New York, New York, USA.
- Wang, X.; Olsen, L.M.; Reitan, K.I.; Olsen, Y. 2012. Discharge of nutrient wastes from salmon farms: environmental effects, and potential for integrated multi-trophic aquaculture. *Aquacult Environ. Interact.* v.2, n.3, p.267-283. <https://doi.org/10.3354/aei00044>.
- Weitzman, J.; Filgueira, R. 2019. The evolution and application of carrying capacity in aquaculture: towards a research agenda. *Reviews in Aquaculture*, v. 12, n. 3, p. 1297-1322. <https://doi.org/10.1111/raq.12383>.

- Xie S., Cui Y., Yang Y. & Liu J. (1997) Energy budget of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*, in relation to ration size. *Aquaculture* 154, 57–68.
- Zhang, L.; Jacob, D. J.; Boersma, K. F.; Jaffe, D. A.; Olson, J. R.; Bowman, K. W.; Worden, J. R.; Thompson, A. M.; Avery, M. A.; Cohen, R. C.; Dibb, J. E.; Flocke, F. M.; Fuelberg, H. E.; Huey, L. G.; Mcmillan, W. W.; Singh, H. B.; Weinheimer, A. J. 2008. Transpacific transport of ozone pollution and the effect of recent Asian emission increases on air quality in North America: an integrated analysis using satellite, aircraft, ozone sonde, and surface observations, *Atmos. Chem. Phys.*, v.8, p.6117-6136. <https://doi.org/10.5194/acp-8-6117-2008>.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A dissertação demonstrou de forma clara e objetiva o desenvolvimento de uma invenção e um estudo científico que se aplica na área de processamento e mensuração de dados e informações para propósitos administrativos e de gestão ambiental e produtiva da produção de pescados em lagos e reservatórios que empregam o sistema de cultivo em tanques-rede. A aplicação da invenção, que consiste em uma série de processos integrados e sequenciais com equações e algoritmos específicos, permitem direcionar para uma seleção de cenários que analisam a capacidade de suporte ambiental e limites máximos de produção de pescado em determinado recurso hídrico baseado no lançamento e na concentração do fósforo como elemento limitante para a gestão da outorga da produção. Este processo poderá ser licenciado e transferido para comercialização da tecnologia em sistemas automatizados, aplicativos, *softwares* e aplicação em operação que visam a sustentabilidade deste agronegócio.

O nova abordagem desenvolvida (CSAp model) que permite calcular e gerir a capacidade de suporte ambiental em relação ao lançamento e concentração de fósforo na água (CSAp) sob diferentes condições climáticas e de produção da tilápia (*Oreochromis niloticus*) criadas em tanques-rede no reservatório neotropical, auxiliará em processos e políticas públicas ao aprimorar ferramentas de mensuração das externalidades ambientais e análises do lançamento de resíduos aquícolas por meio de soluções tecnológicas modernas aplicadas neste importante setor do agronegócio Brasileiro. Isto sintetiza de forma prática e objetiva novas abordagens e procedimentos a serem incorporados pela indústria aquícola, órgãos de fiscalização e outorga no Brasil e em países de clima tropical e neotropical.