



RELATÓRIO FINAL E PROPOSIÇÃO DE MEDIDAS



HYDRO
SCIENCE

CONTRATO SEXEC N° 07/2018 - ELABORAÇÃO DE ESTUDOS
PARA ANÁLISE DA CONDIÇÃO AMBIENTAL DO SISTEMA
PERILAGUNAR PIRATININGA-ITAIPU – NITERÓI

PORTO ALEGRE, ABRIL DE 2021

RELATÓRIO FINAL E PROPOSIÇÃO DE MEDIDAS

Preparado para:

PREFEITURA MUNICIPAL DE NITERÓI - RJ

SECRETARIA EXECUTIVA

Niterói – RJ

Preparado por:

HYDROSCIENCE CONSULTORIA AMBIENTAL

Porto Alegre, RS

Distribuição:

01 cópia *Prefeitura Municipal de Niterói – RJ*

01 cópia *Hidroscience Consultoria e Restauração Ambiental Eireli*

Mês/Ano	Documento
Abril/2021	RE_FINAL_V03

Controle de Produção do Documento

	Profissional	Qualificação	Registro Profissional	Assinatura	Rubrica
Elaborado	Tiago Finkler Ferreira	Biólogo Ms. Dr. Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental	CRBIO RS 41024		

Dados da empresa

Razão Social: Hidroscience Consultoria e Restauração Ambiental Ltda
Nome Fantasia: HYDROSCIENCE
CNPJ: 01.486.607/0001-96
Endereço: Rua Joaquim Nabuco 15 conj. 304, CEP 90050-340, Porto Alegre- RS. Fone: (0xx- 51) 3062-7549, fax (0xx- 51) 3224 2946
E-mail para contato: contato@hydroscience.com.br ; contato@phoslock.com.br

As informações contidas neste documento e nos arquivos anexados são de propriedade exclusiva da Hydroscience e podem conter assuntos comerciais, de propriedade intelectual ou outras informações confidenciais, protegidas pelas leis aplicáveis.

Sumário

1.	Apresentação.....	5
2.	Área de estudo	6
3.	Modelagem das ações e medidas estudadas.....	10
3.1.	Modelagem Hidrodinâmica – DELFT3D-FLOW	13
3.2.	Modelagem de Qualidade de Água DELFT3D-WAQ.....	14
3.3.	Cenários estudados	15
4.	Ações e medidas selecionadas	22
5.	Resultados esperados para as ações recomendadas	24
5.1.1.	Efeitos das alterações hidrodinâmicas.....	24
5.1.2.	COT	53
5.1.3.	Fósforo total	58
5.1.4.	Amônia	66
5.1.5.	Comunidades biológicas.....	71
6.	Modelo de Gestão do Sistema Lagunar Piratininga-Itaipu.....	74
6.1.	Ações para recuperação do sistema.....	76
6.1.1.	Implantação do Projeto de Alagados Construídos.....	76
6.1.2.	Abatimento das cargas poluentes nas sub-bacias	77
6.1.3.	Desobstrução do Túnel do Tibau	81
6.1.4.	Plano de recuperação e manejo do Canal de Itaipu	82
6.1.5.	Dragagem do Canal de Camboatá.....	86
6.1.6.	Dragagens localizadas da Lagoa de Piratininga.....	87
6.2.	Ações de remediação <i>in situ</i>	88
6.2.1.	Tecnologias existentes	90
6.2.2.	Considerações gerais e tecnologia indicada	101
7.	Considerações sobre o estudo	104
8.	Estimativas de custos	106
8.1.	Alteamento do Molhe	106
8.2.	Prolongamento do Molhe	107
8.3.	Dragagem Canal de Itaipu	107

8.4.	Proteção contra erosão	108
8.5.	Alagados construídos.....	109
8.6.	Abatimento de cargas poluidoras	109
8.7.	Dragagem do Canal de Camboatá	113
8.8.	Dragagem localizada na Lagoa de Piratininga	113
8.9.	Dragagem na Lagoa de Piratininga para redução da fonte interna de fósforo como remediação	114
8.10.	Remediação in situ com bentonita ativada com lantânio (PHOSLOCK) 114	
9.	Referências	118

1. APRESENTAÇÃO

Este documento apresenta o **RELATÓRIO FINAL E PROPOSIÇÃO DE MEDIDAS** para recuperação da qualidade ambiental do sistema lagunar Piratininga-Itaipu, elaborado ao longo do projeto *“Estudos para Análise da Condição Ambiental do Sistema Lagunar Piratininga- Itaipu e Proposição das Ações necessárias à melhoria da sua dinâmica ambiental e hídrica, bem como a redução do aporte de nutrientes às lagoas, visando os usos múltiplos”*, referente ao contrato SEXEC nº 07/2018 entre a empresa HIDROSCIENCE CONSULTORIA E RESTAURAÇÃO AMBIENTAL EIRELI e a Prefeitura Municipal de Niterói.

Neste relatório são apresentadas e discutidas as ações propostas para recuperação da qualidade ambiental do Sistema Lagunar Piratininga-Itaipu. O objetivo desse relatório é apresentar os efeitos esperados das ações propostas a partir dos resultados de simulações computacionais, propor um modelo de gestão e estimar os custos envolvidos nas ações propostas. Em relatórios anteriores foram apresentados os resultados do diagnóstico ambiental do sistema lagunar, as simulações do cenário atual e todas as simulações de prognóstico que incluem alterações morfodinâmicas e simulações de qualidade de água em diferentes cenários futuros considerando intervenções hidrodinâmicas e/ou abatimento de cargas poluentes. A partir dos resultados obtidos ao longo do estudo e apresentados nos relatórios anteriores foram selecionadas as obras e ações de maior relevância para recuperação ambiental do sistema. Portanto, o presente documento apresenta somente os resultados dos cenários futuros de qualidade da água selecionados como alternativas propostas para melhoria do sistema lagunar Piratininga-Itaipu com execução em curto e longo prazo.

Após a identificação da área de estudo (Capítulo 2), são apresentadas de forma resumida as metodologias de simulação computacional aplicada e os cenários simulados. As ações e medidas recomendadas visando à recuperação ambiental do sistema são apresentadas no Capítulo 4. Os resultados das simulações computacionais para os cenários selecionados são apresentados e discutidos no Capítulo 6. Com base nas intervenções propostas, recomenda-se a implantação de um modelo de gestão para acompanhar e garantir a recuperação e a manutenção da qualidade ambiental do

sistema (Capítulo 6). Nesse capítulo são também apresentadas as diversas alternativas existentes na atualidade para remediação de ambientes aquáticos, desde intervenções físicas, químicas e biológicas, com o objetivo de recuperar o sistema lagunar num cenário de curto prazo. Para cada uma das alternativas são apresentadas as vantagens e desvantagens técnicas, elencando-se ao final o conjunto de intervenções mais adequadas para as condições do sistema. No Capítulo 7 são apresentadas algumas considerações do estudo realizado. E por fim, no Capítulo 8, são apresentadas estimativas de custo para implantação das ações propostas.

2. ÁREA DE ESTUDO

O município de Niterói está localizado na porção oriental da Baía de Guanabara e tem como limites ao norte o município de São Gonçalo, a leste o município de Maricá, ao sul o oceano Atlântico e a oeste a baía de Guanabara (Figura 1). De acordo com o último censo realizado pelo IBGE (IBGE, 2010), Niterói apresentava uma densidade demográfica de 3.640,8 hab/km², com um total de 487.562 habitantes e uma área territorial de 134.074 km² (IBGE, 2017). Para o ano de 2020, a população estimada no município é de 515.317 habitantes (IBGE, 2010).

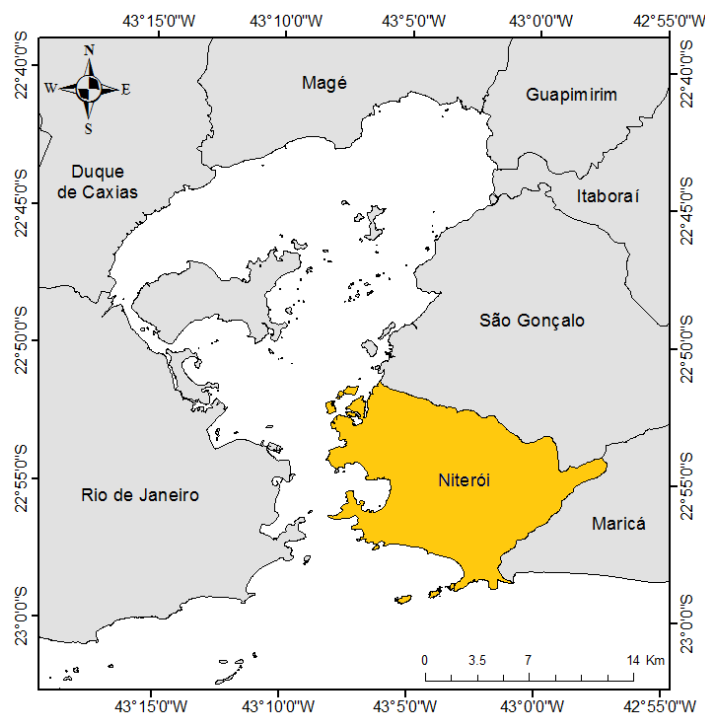


Figura 1: Localização do município de Niterói e cidades ao entorno.

O município possui 52 bairros, os quais estão separados em 5 distintas regiões de planejamento (Figura 2) a saber: Praias da Baía, Zona Norte, Pendotiba, Zona Leste e Região Oceânica. A última compreende uma área com cerca de 50 km², com costas orientada no sentido leste-oeste, dotada de unidades geomorfológicas extremamente dinâmicas e posicionadas em um contexto de alta valorização imobiliária. A Região Oceânica é composta por onze bairros: Cafubá, Camboinhas, Engenho do Mato, Itacoatiara, Itaipu, Jacaré, Jardim Imbuí, Maravista, Piratininga, Santo Antônio e Serra Grande (Projeto Conceitual – Volume I, Parque Orla Piratininga, 2018).



Figura 2: Regiões administrativas e bairros do município de Niterói. Fonte: Secretaria Municipal de Urbanismo e Mobilidade (SMU) - Prefeitura Municipal de Niterói.

O sistema lagunar Piratininga- Itaipu abrange uma área de 46,48 km² (3,5% da área do município), sendo delimitado pelas cristas dos morros da Viração, Proventório, Sapezal, Santo Inácio e pelas Serras Grandes (Morro do Cantagalo e Jacaré) e da Tiririca (Knoppers *et al.*, 1984). A área que compreende o sistema lagunar e a área costeira adjacente são um dos mais importantes polos de turismo e lazer da cidade. Porém, ao longo das últimas décadas, as lagoas vêm sofrendo um acelerado processo de urbanização e antropização, que resultou na transformação de diversas características originais do local. Tais modificações foram causadas principalmente por intervenções antrópicas no sistema lagunar e também pelo maior aporte de esgoto doméstico lançado *in natura* nos corpos d'água, pela população que foi se estabelecendo em seu entorno (Projconsult, 2015).

Os principais problemas que o sistema lagunar enfrenta hoje são a perda de espelho d'água e a qualidade precária das águas devido ao elevado despejo de esgoto doméstico "in natura". Apesar do aumento de cobertura do sistema de saneamento, nos últimos 15 anos, com a implantação das Estações de Tratamento de Esgotos Cambinhas e Itaipu, as redes coletoras de esgoto não atendem às habitações irregulares, localizadas nas margens dos rios e das lagoas. A Lagoa de Piratininga apresenta problemas decorrentes da eutrofização com ocorrência frequente de baixos níveis de oxigênio na água. A Lagoa de Itaipu, por sua vez, enfrenta problemas relacionados à perda significativa de área do seu espelho d'água decorrente do assoreamento da mesma (Rodrigues, 2004), além de contaminação significativa por esgotos domésticos.



Figura 3: Foto de satélite com identificação do Sistema Lagunar Piratininga-Itaipu.

3. MODELAGEM DAS AÇÕES E MEDIDAS ESTUDADAS

Durante o desenvolvimento deste projeto, ***“Estudos para Análise da Condição Ambiental do Sistema Lagunar Piratininga- Itaipu e Proposição das Ações necessárias à melhoria da sua dinâmica ambiental e hídrica”***, foram realizados levantamentos de dados físicos e meteorológicos e oceanográficos da área de interesse, incluindo coletas e análises da fauna aquática e qualidade da água.

O monitoramento realizado ao longo de um ano, apresentado no ***Relatório da Qualidade Ambiental Atual do Sistema Lagunar – Análise Integrada***, apontou que a qualidade ambiental do Sistema Lagunar Piratininga-Itaipu se encontra degradada. A qualidade da água nas lagoas vem sendo bastante afetada pelos lançamentos pontuais e difusos de cargas poluentes e também pelo elevado tempo de residência da Lagoa de Piratininga. O monitoramento da qualidade de água das lagoas indicou que, atualmente, as variáveis que mais contribuem para a degradação do sistema, causando

o desenquadramento da Classe I para águas salinas segundo a Resolução CONAMA 357/2005, são: carbono orgânico total (COT), amônia e fósforo total.

O elevado aporte de nutrientes no sistema lagunar ocasiona incremento da biomassa algal, principalmente de cianobactérias potencialmente tóxicas. Além do risco de produção de cianotoxinas, a maior biomassa de algas na coluna d'água diminui a penetração de radiação fotossinteticamente ativa, afetando as atividades metabólicas das espécies viventes abaixo da camada superficial. No período noturno, a grande biomassa algal consome todo o oxigênio produzido durante o dia, provando quedas significativas de OD que podem resultar em mortandades de peixes de acordo com a temperatura e outros fatores ambientais. Após o pico de crescimento, a comunidade fitoplanctônica começa a morrer e uma grande quantidade de nutrientes torna-se disponível para os decompositores, o que diminui ainda mais as concentrações de oxigênio dissolvido. Com as reduções nos valores de OD, as comunidades nectônicas e bentônicas tendem a morrer, visto que as condições ambientais se tornam impróprias.

A partir dos dados levantados foram realizadas simulações computacionais da atual condição hidrodinâmica, morfodinâmica e de qualidade da água do Sistema Lagunar Piratininga- Itaipu. As simulações computacionais foram realizadas com o modelo Delft-3D. O modelo é uma suíte de ferramentas consagrada internacionalmente, utilizada amplamente em estudos de qualidade da água e avaliação de impactos ambientais em recursos hídricos. O módulo DELFT3D-FLOW foi utilizado nas simulações hidrodinâmicas e o DELFT3D-WAQ é o módulo utilizado nas simulações de qualidade da água.

Os dados levantados em campo e os estudos de modelagem computacional subsidiaram informações para o entendimento das características e condições atuais do sistema lagunar e, conseqüentemente, para a avaliação e proposição de intervenções e ações visando à recuperação ambiental das lagoas. Com o uso da modelagem como ferramenta de análise de prognóstico foi possível avaliar os

possíveis efeitos de diferentes intervenções físicas sobre o padrão hidrodinâmico e da qualidade da água nas lagoas.

De acordo com os estudos realizados e apresentados nos relatórios anteriores, entende-se que a recuperação do sistema lagunar Piratininga-Itaipu requer esforços em duas diferentes frentes de atuação. A primeira e mais importante delas é o abatimento de cargas poluidoras que chegam até as lagoas e, a segunda, são as obras hidráulicas com o objetivo de melhorar a circulação e renovação das águas. Ambas as frentes de atuação possuem seus benefícios, limitações, custos e, eventualmente, impactos. As ações de redução do aporte de cargas e melhoria no sistema de saneamento deve ser com certeza a prioridade e foco central de atuação do município. Porém, sabe-se que este é um processo de médio e longo prazo e que requer um trabalho intenso de fiscalização individualizada em todas as unidades residenciais e comerciais existentes nas bacias contribuintes para as lagoas para garantir que as unidades estejam lançando seus esgotos de forma adequada na rede e assim aumentar a eficácia da rede coletora. Além disso, é importante que seja realizado monitoramento intensivo na rede de coleta e transporte de esgoto bruto, incluindo as estações elevatórias.

Mesmo que se garanta que grande parte da carga poluente seja coletada e tratada é esperado que ainda haja lançamentos de cargas pontuais e/ou eventuais para o interior das lagoas. Mais de 93% da bacia hidrográfica da Região Oceânica escoam para o sistema lagunar Piratininga-Itaipu. Isto é, praticamente toda a drenagem e efluentes não coletados desta região acabam desaguando nesse sistema lagunar. Temos aqui uma bacia urbana, com grande adensamento populacional, drenando suas águas para uma laguna que se encontra parcialmente confinada nas condições atuais. Há casos semelhantes a esse em diversos locais no país e no mundo e sabe-se do desafio de manter essas lagoas em condições ambientais satisfatórias mesmo em regiões com elevado índice de cobertura de rede de coleta e tratamento de esgoto. Isto acontece devido ao carreamento de cargas difusas pelo sistema de drenagem e em decorrência de eventuais lançamentos irregulares ou extravasores. Como exemplo disso, em Niterói, tem-se as diversas estações elevatórias no entorno das lagoas. As estações

elevatórias são componentes do sistema da rede coletora de esgoto que devem possuir extravasores em caso de qualquer problema nas unidades de bombeamento. Porém, o extravasamento de esgoto por essas unidades e seus lançamentos nos recursos hídricos devem ser monitorados e contidos.

Outras fontes de cargas poluentes são as áreas irregulares e regiões de difícil acesso que não possuem estrutura mínima para implantação da rede coletora de esgoto. Ou seja, por mais que sejam realizados esforços no sentido de abater todos os lançamentos irregulares de esgoto é preciso considerar que ainda assim ocorrerão eventuais lançamentos de cargas poluentes na lagoa de forma direta ou indireta, principalmente nas áreas mais precárias.

Diante dessas dificuldades e desafios de se eliminar completamente o aporte de cargas poluentes na lagoa, é importante que sejam estudadas possibilidades de realização de algumas obras hidráulicas mínimas para favorecer o fluxo e a troca de água do sistema, deixando o ambiente com maior capacidade de suporte para receber as cargas poluentes remanescentes. Essas obras hidráulicas não devem ser vistas como as únicas soluções para recuperação ambiental do sistema já que são intervenções que não atuam na redução da origem do problema, que é a poluição difusa e os lançamentos clandestinos de esgoto na bacia. Essas obras devem ser consideradas, portanto, para minimizar os efeitos das cargas que não podem ser abatidas, principalmente num cenário de curto e médio prazo, diante da dificuldade de se controlar a poluição difusa numa região densamente urbanizada. E, evidentemente, quanto maior for a capacidade de abatimento de carga, menor será a necessidade de intervenções hidráulicas e menores os efeitos dessas obras.

3.1. MODELAGEM HIDRODINÂMICA – DELFT3D-FLOW

A modelagem hidrodinâmica do sistema foi realizada com o modelo DELFT 3D-Flow. O software simula em duas dimensões (2D) ou em três dimensões (3D), fluxos não-estáveis e fenômenos de transportes resultantes da ação de variação de níveis, forçantes meteorológicas e processos baroclínicos. A aplicação do modelo em módulo 3D se torna interessante em situações onde o fluxo horizontal apresenta variação

significativa no campo vertical. Esta variação pode ser gerada pela ação do vento, rugosidade, força de Coriolis, geometria de fundos e possíveis baroclinicidades.

Quanto aos sistemas de equações resolvidas pelo modelo estas são: Equação horizontal do movimento; Equação da Continuidade; e Equação de transporte para constituintes conservativos. Estas equações são formuladas em coordenadas ortogonais ou esféricas.

O modelo DELFT3D-Flow resolve as equações de Navier-Stokes para fluidos incompressíveis, sob a aproximação de águas rasas e Boussinesq. Na equação do momentum vertical a aceleração vertical é desprezada, de forma ter como resultado aproximação hidrostática. Nos modelos 3D a velocidade vertical é calculada através da equação da continuidade.

3.2. MODELAGEM DE QUALIDADE DE ÁGUA DELFT3D-WAQ

O modelo Delft3D-WAQ resolve as equações de advecção-difusão-reação para diversos tipos de substâncias. As informações das condições hidrodinâmicas (correntes, elevação de nível, densidade, viscosidade turbulenta e tensão de cisalhamento de fundo) são obtidas a partir do acoplamento com o módulo hidrodinâmico Delft3D-Flow.

O Delft3D-WAQ permite especificar uma gama de processos físicos e biogeoquímicos correlacionados. Esses processos ficam armazenados em uma biblioteca de processos do Delft3D (PLCT - *Process Library Configuration Tool*) e podem ser selecionados e modificados de acordo com o interesse do usuário. Dentre esses processos incluem-se: sedimentação e ressuspensão, reaeração, mineralização de substâncias inorgânicas, nitrificação, adsorção de metais pesados, volatilização de micropoluentes orgânicos, entre outros.

A modelagem de qualidade da água do Complexo Lagunar Itaipu-Piratininga envolveu a simulação de uma série de variáveis físico-químicas representativas dos aspectos qualitativos em ecossistemas aquáticos (Quadro 1).

Quadro 1: Variáveis simuladas com módulo DELFT3D-WAQ.

Variáveis	Unidade
Salinidade	g/kg (‰)
Oxigênio Dissolvido (OD)	mg/L
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO ₅)	mg/L
Carbono Orgânico Total (COT)	mg/L
Amônia (NH ₄)	mg/L
Nitrato (NO ₃)	mg/L
Fósforo Total (PT)	mg/L
Coliformes Termotolerantes	NMP/100mL

3.3. CENÁRIOS ESTUDADOS

Com o objetivo de propor ações de recuperação do sistema lagunar Piratinga-Itaipu foram avaliados diversos cenários de prognóstico, que incluíram diferentes cenários de abatimento das cargas poluentes e também a execução de obras para melhoria da circulação e troca de água com o mar aumentando assim a capacidade suporte do sistema.

Essas simulações tiveram como objetivo definir metas para melhoria no sistema de esgotamento sanitário nas bacias hidrográficas de forma a garantir a recuperação e manutenção das lagoas em Classe I, segundo o padrão estabelecido na Resolução CONAMA 357/05. Desta forma, além de intervenções diretas nas lagoas, avaliou-se o efeito que possíveis melhorias no saneamento das bacias trariam para a lagoa, reforçando a necessidade de continuidade e expansão das obras que estão em andamento.

Foram simulados 19 cenários com o objetivo de avaliar os efeitos de cada intervenção de forma isolada e em conjunto. A Figura 4 apresenta de forma resumida os cenários simulados. Dentre os cenários hidrodinâmicos estudados, foram simuladas intervenções no Canal de Itaipu, Canal de Camboatá e Túnel do Tibau com o objetivo de aumentar o fluxo de água. O aumento da troca de água com o mar na Lagoa de Piratininga pode ser alcançado pela desobstrução do Túnel do Tibau e dragagem do Canal de Camboatá. No caso da Lagoa de Itaipu, o aumento da troca de água com o mar pode ser intensificado com a dragagem do canal de Itaipu e com obras para reduzir os processos de assoreamento que ocorre neste canal.

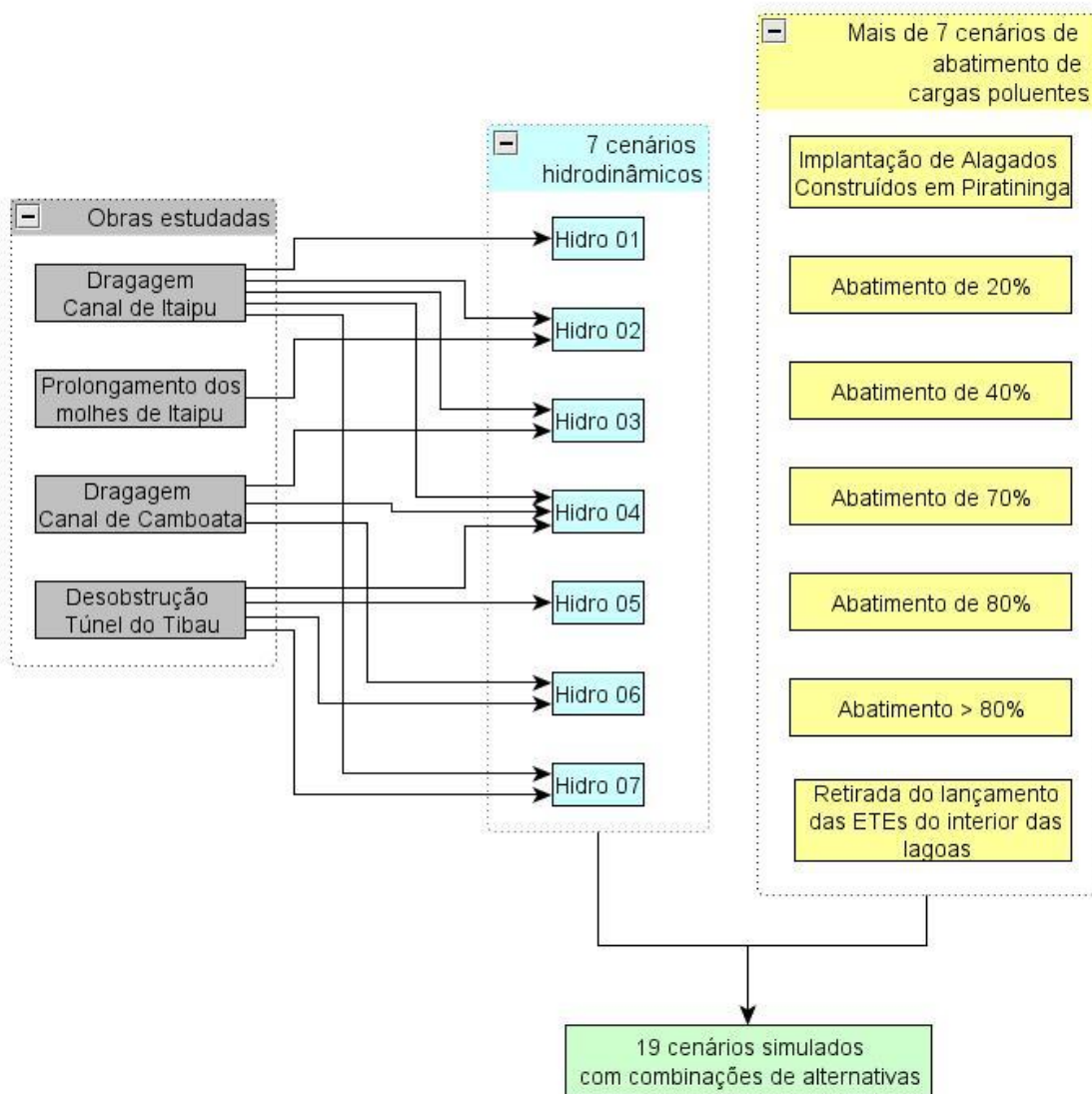


Figura 4: Cenários simulados.

O assoreamento do Canal de Itaipu ocorre em função da perda de sedimento da praia para o interior da Lagoa de Itaipu. Para avaliar essa dinâmica e propor soluções, foi realizada a modelagem morfodinâmica do Canal de Itaipu. Esse estudo possibilitou definir as estruturas necessárias para interromper a entrada de sedimento para o interior da Lagoa de Itaipu. O estudo morfodinâmico completo foi apresentado no relatório ***“MODELAGEM COMPUTACIONAL DE MORFODINÂMICA COSTEIRA: ESTUDO DE ALTERNATIVAS DE INTERVENÇÃO NOS MOLHES DE FIXAÇÃO DA DESEMBOCADURA DA LAGUNA DE ITAIPU”***.

Dos diversos cenários simulados, a alternativa que se mostrou a mais eficiente para a interrupção do transporte de sedimento para o interior da lagoa considerou três intervenções distintas: (i) o alteamento dos molhes; (ii) a dragagem do Canal de Itaipu na cota -2m (Figura 6); e (iii) prolongamento dos molhes em 140m (Figura 7).

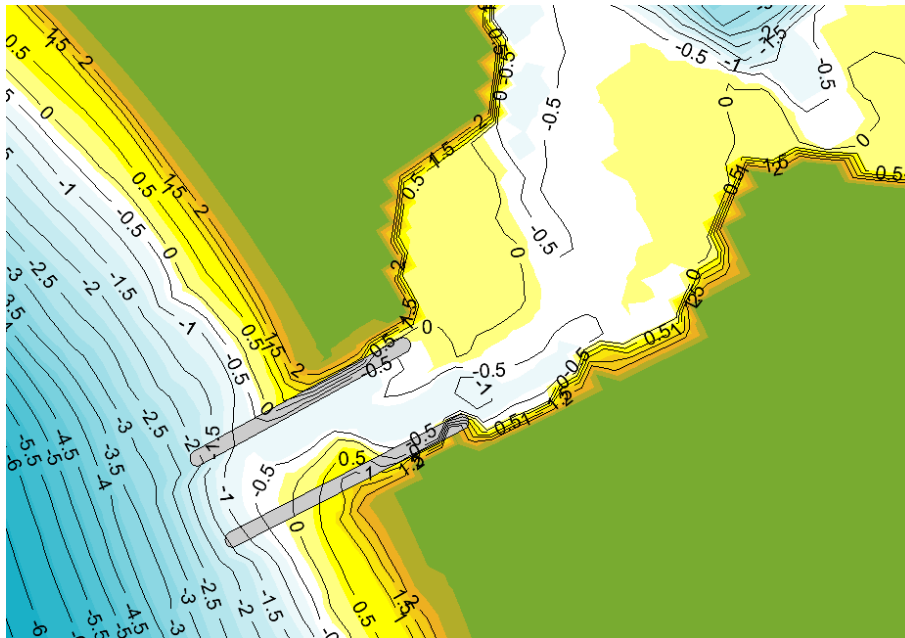


Figura 5: Condição atual do Canal de Itaipu.

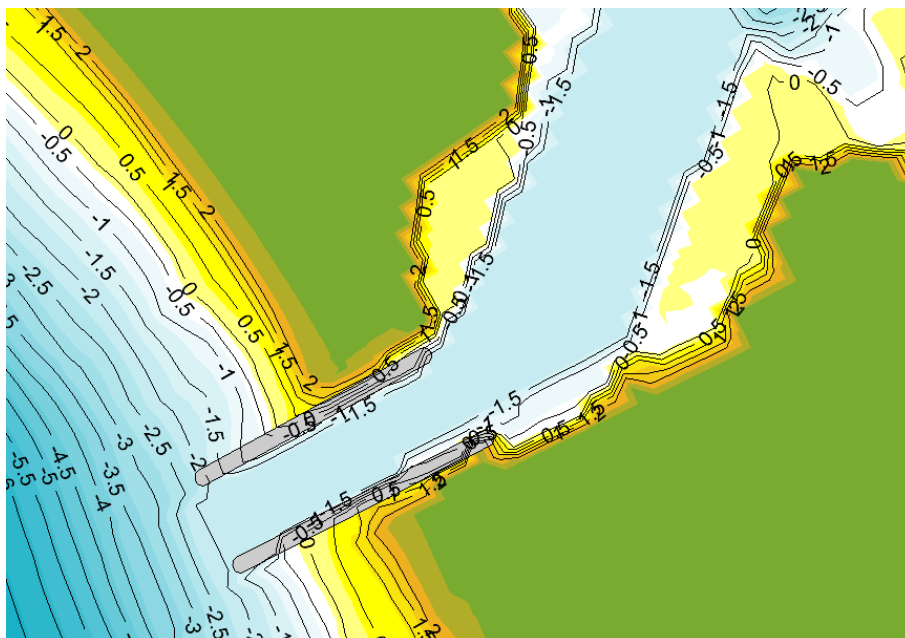


Figura 6: Dragagem na área interna do Canal de Itaipu até a cota -2m (IBGE).

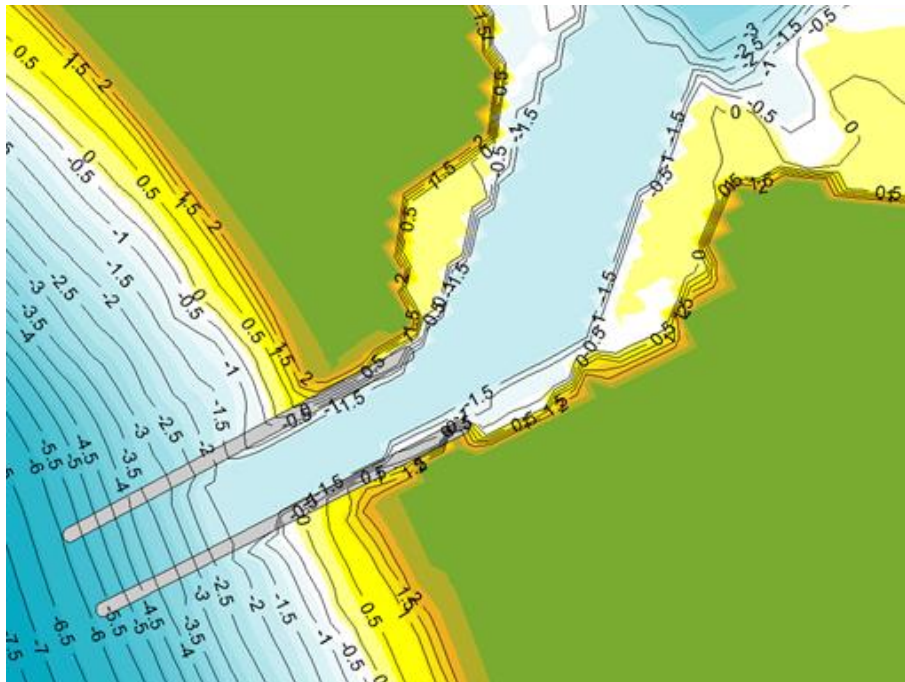


Figura 7: Dragagem na área interna do Canal de Itaipu até a cota -2 m (IBGE) e prolongamento dos molhes em 140 m.

O alteamento dos molhes se justifica pela necessidade de impedir o transporte de sedimento por cima dos molhes, como ocorre atualmente em parte do seu comprimento. A dragagem do Canal de Itaipu tem por finalidade aumentar a troca de água entre a Lagoa de Itaipu e o mar, diminuindo o seu tempo de residência e aumentando a capacidade suporte do sistema, com impacto na hidrodinâmica e no padrão de dispersão e depuração das cargas poluidoras que chegam nesta lagoa. O prolongamento dos molhes em 140m tem por objetivo reduzir a entrada de sedimento para o interior da Lagoa de Itaipu e com isso garantir a manutenção da batimetria no canal de Itaipu na cota desejada por um longo período sem que sejam necessárias atividades de dragagem muito frequentemente.

Além das obras no Canal de Itaipu, foram estudadas ainda a dragagem no Canal de Camboatá (Figura 8) e a desobstrução do Túnel do Tibau (Figura 9).

As intervenções sugeridas foram estudadas quanto aos aspectos hidrodinâmicos e, posteriormente, sobre a qualidade de água.

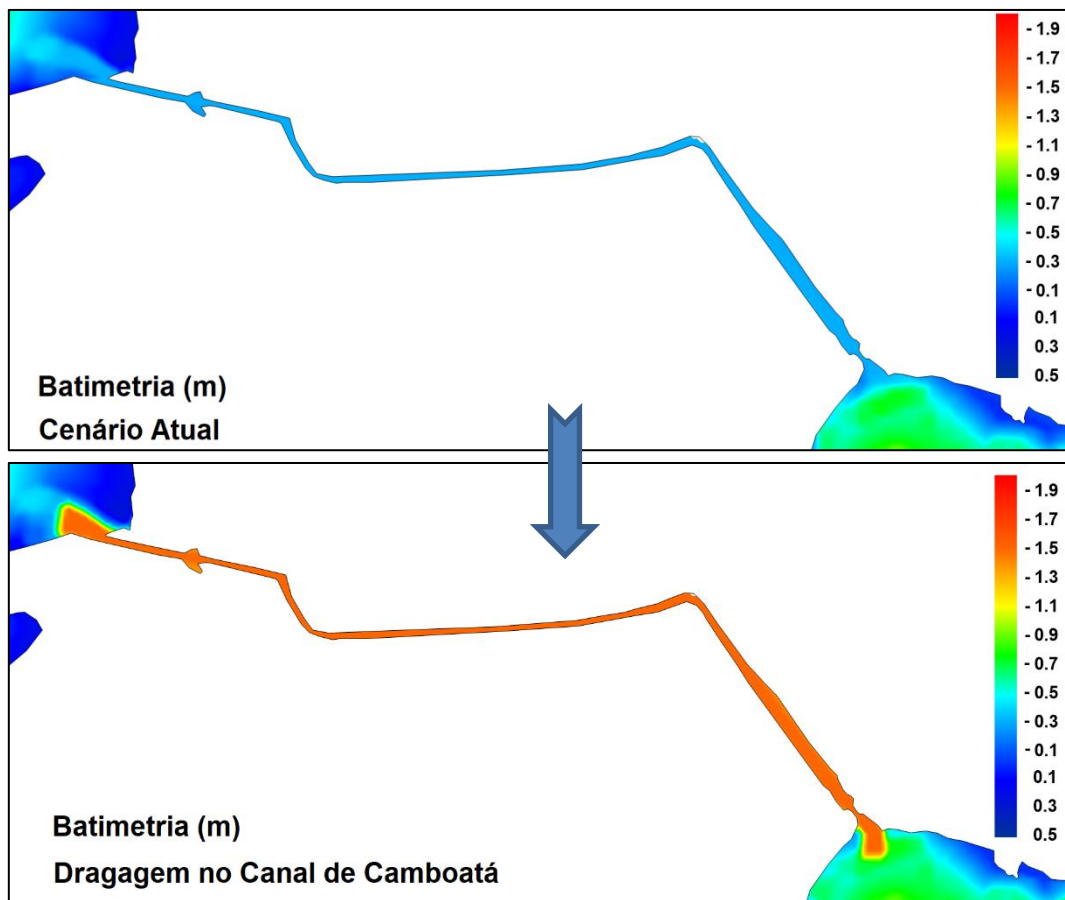


Figura 8: Dragagem na área interna do Canal de Camboatá até a cota -1,5 m (IBGE).

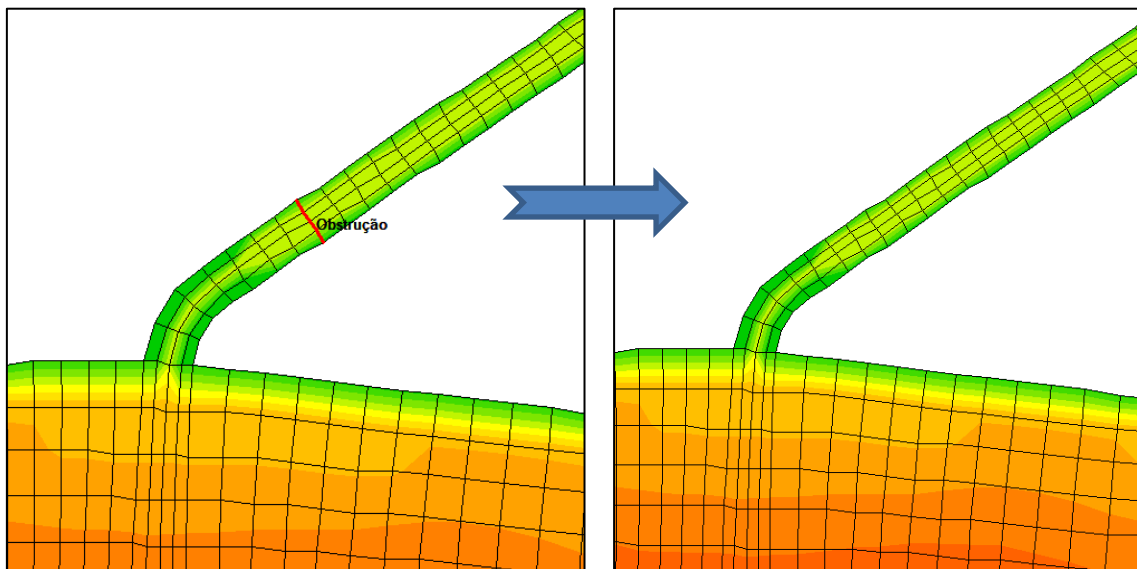


Figura 9: Desobstrução do Túnel do Tibau.

Dentre os cenários de abatimento de cargas simulados estão:

- **Diferentes percentuais de abatimentos de carga nas bacias:** foram simulados cenários com abatimentos de **20% a 99%** da carga poluente oriunda das bacias contribuintes ao sistema lagunar. Esses cenários podem ser alcançados com aumento da cobertura do sistema de coleta de esgoto e, principalmente, com combate às ligações clandestinas do sistema pluvial. Além disso, parte da carga orgânica proveniente das bacias é decorrente de falhas operacionais nas elevatórias de esgoto. Os abatimentos consideram também a melhoria do controle operacional das elevatórias de esgoto bruto do sistema de esgotamento sanitário.
- **Implantação dos Alagados Construídos na Lagoa de Piratininga:** esse sistema é composto pelos Jardins Filtrantes e bacias de sedimentação com o objetivo de atuar na redução das cargas poluidoras recebidas pela Lagoa de Piratininga por seus contribuintes. Esta alternativa simulada não traz benefícios diretos para a Lagoa de Itaipu. A eficiência considerada para o abatimento de cargas provido pelos Alagados Construídos foi estabelecida de acordo com informações disponíveis no projeto (**Elaboração do Projeto Básico, Executivo e Estudos Multidisciplinares Para a Implantação do Parque Orla Piratininga**) e é apresentada no Quadro 2.
- **Retirada do lançamento dos efluentes das ETEs do interior das lagoas:** este cenário teve por objetivo avaliar o efeito desses lançamentos de esgoto tratado sobre a hidrodinâmica e a qualidade de água do sistema. As cargas das ETEs inseridas nos diversos cenários simulados foram embasadas em medições e análises laboratoriais realizadas durante este estudo e também em dados fornecidos pela concessionária, apresentadas abaixo (Quadro 3). Esses dados foram apresentados e discutidos anteriormente em outros relatórios, como **“Relatório de Caracterização do Efluente da Estação de Tratamento de Esgoto de Itaipu”**, **“2º Relatório de Caracterização do Efluente da Estação de Tratamento de Esgoto de Cambinhas”** e **“Modelagem de qualidade de água**

do Sistema Lagunar Piratininga-Itaipu - Fase II: Simulação de cenários com vistas às ações de recuperação”.

Quadro 2: Eficiência de remoção dos Alagados Construídos (Jardins Filtrantes e bacias de sedimentação).

Sub-bacia	Variável	Eficiência de remoção %
Rio Cafubá	PT	79
	NO3	74
	DBO	76
	SST	85
Rio Arrozal	PT	33
	NO3	32
	DBO	33
	SST	72
Rio Jacaré	PT	62
	NO3	46
	DBO	42
	SST	73

Quadro 3: Cargas das ETEs inseridas nas simulações.

Variáveis	ETE Itaipu	ETE Camboinhas
Vazão	80 L/s	164 L/s
Salinidade	0 g/kg	0 g/kg
Oxigênio Dissolvido (OD)	2 mg/L	2 mg/L
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO ₅)	22,9 mg/L	66 mg/L
Carbono Orgânico Total (COT)	10 mg/L	10 mg/L
Amônia (NH ₄)	0,53 mg/L	0,8 mg/L
Nitrato (NO ₃)	0 mg/L	0 mg/L
Fósforo Total (PT)	1,57 mg/L	0,53 mg/L
Coliformes Termotolerantes	1,1x10 ⁵ NMP/100mL	1,1x10 ⁵ NMP/100mL

Os resultados de todos os cenários avaliados foram apresentados e discutidos no relatório **“MODELAGEM DE QUALIDADE DE ÁGUA DO SISTEMA LAGUNAR PIRATININGA-ITAIPU - FASE II: SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS COM VISTAS AS AÇÕES DE RECUPERAÇÃO”** e **“MODELAGEM DE QUALIDADE DE ÁGUA DO SISTEMA LAGUNAR PIRATININGA-ITAIPU - FASE III: SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS ADICIONAIS COM VISTAS AS AÇÕES DE RECUPERAÇÃO DO SISTEMA LAGUNAR PIRATININGA-ITAIPU”**.

4. AÇÕES E MEDIDAS SELECIONADAS

Após a análise dos resultados das simulações de todos os cenários simulados, apresentadas nos relatórios **“MODELAGEM DE QUALIDADE DE ÁGUA DO SISTEMA LAGUNAR PIRATININGA-ITAIPU FASE II: SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS COM VISTAS AS AÇÕES DE RECUPERAÇÃO”** e **“MODELAGEM DE QUALIDADE DE ÁGUA DO SISTEMA LAGUNAR PIRATININGA-ITAIPU - FASE III: SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS ADICIONAIS COM VISTAS AS AÇÕES DE RECUPERAÇÃO DO SISTEMA LAGUNAR PIRATININGA-ITAIPU”**, foram definidas as ações prioritárias para a recuperação do sistema.

De acordo com todos os resultados apresentados nos relatórios supracitados foram selecionadas as obras com prioridade de execução para horizontes de curto prazo e longo prazo e estão apresentadas no Quadro 4.

Devido à complexidade de se abater as cargas difusas geradas nas bacias, sugere-se que no cenário de curto prazo sejam realizadas obras hidráulicas como a Dragagem do Canal de Itaipu e a Desobstrução do Túnel do Tibau juntamente com a implantação do projeto Alagados Construídos e abatimento de 40% da carga. A medida que os abatimentos das cargas poluentes vão sendo executados ao longo dos anos para percentuais ainda maiores, tendo como meta o abatimento de 80% da carga atual, algumas dessas obras não precisam mais ser mantidas, como a dragagem do Canal de Itaipu.

No cenário de curto prazo o único parâmetro que não será enquadrado é o fósforo na Lagoa de Piratininga. Na Lagoa de Piratininga o fósforo somente alcançará níveis desejáveis com abatimento de carga acima de 80%. Por isso, no cenário de curto prazo deve-se prever a implantação de programa de monitoramento e Plano Emergencial para controle de eutrofização desta lagoa, discutido posteriormente no Capítulo 6.

A retirada do lançamento das ETEs não está sendo recomendada no quadro abaixo, pois apesar dos resultados indicarem que sua retirada é bastante benéfica para o sistema lagunar Piratininga-Itaipu, entende-se que é necessário avaliar também os

efeitos de outras alternativas locais de lançamento desses efluentes e suas viabilidades técnicas e econômicas.

Quadro 4: Ações recomendadas no horizonte de curto prazo e longo prazo para enquadramento do sistema lagunar Piratininga-Itaipu por região.

Região	Curto prazo	Longo prazo
Piratininga	1°) Implantação dos Alagados Construídos; 2°) Desobstrução do Túnel do Tibau; 3°) Abatimento de pelo menos 40% da carga gerada na bacia; 4°) Dragagem do Canal de Camboatá; 5°) Implantação de programa de monitoramento e Plano Emergencial para controle de eutrofização; 6°) Dragagens localizadas	1°) Manutenção dos Alagados Construídos; 2°) Desobstrução do Túnel do Tibau; 3°) Abatimento de pelo menos 80% da carga gerada na bacia;
Itaipu	1°) Abatimento de pelo menos 40% da carga gerada na bacia; 2°) Dragagem do Canal de Itaipu; 3°) Alçamento dos molhes de Itaipu; 4°) Plano de manejo do sedimento do canal;	1°) Abatimento de pelo menos 80% da carga gerada na bacia; 2°) Manutenção dos molhes existentes; 3°) Plano de manejo do sedimento do canal;

Vale destacar que no Canal de Camboatá o enquadramento só é alcançado caso haja a retirada dos lançamentos das ETEs ou a dragagem do mesmo em conjunto com a dragagem do Canal de Itaipu, a desobstrução do Túnel do Tibau, a implantação do projeto Alagados Construídos e ainda o abatimento superior a 20% de carga nas bacias. Caso não houvesse mais nenhuma outra obra hidráulica além da desobstrução do Túnel do Tibau, seria necessário abater mais de 80% das cargas nas bacias. Por receber o lançamento direto de efluente tratado da ETE Cambinhas, grande parte desse canal é caracterizada como zona de mistura do efluente tratado, que dificulta o enquadramento nessa região. Caso não seja executada a dragagem do Canal de Camboatá em conjunto com as demais obras recomendadas no Quadro 15, sugere-se que seja realizado estudo específico para avaliar as melhores possibilidades de lançamento dos efluentes das ETEs.

5. RESULTADOS ESPERADOS PARA AS AÇÕES RECOMENDADAS

Diferentes variáveis foram simuladas nos modelos de qualidade da água, sendo elas: salinidade, DBO, COT, OD, amônia, nitrato, fósforo total e coliformes termotolerantes. Tanto o monitoramento da qualidade de água das lagoas quanto as simulações do cenário atual, realizados ao longo de um ano, indicaram que as variáveis com maior problema atualmente são COT, amônia e fósforo total. Por isso, os resultados das simulações de prognóstico de qualidade de água foram discutidos com enfoque nesses três parâmetros (COT, amônia e fósforo total), com o objetivo de buscar condições para que tais variáveis alcancem e se mantenham em concentrações condizentes com a Classe 1 da Resolução CONAMA 357/2005 para águas salobras e salinas, já que atualmente estas variáveis se encontram em desacordo com tais limites em todo o sistema por grandes períodos.

Os cenários dos abatimentos das cargas combinados com as alterações hidrodinâmicas das obras hidráulicas trazem resultados bastante positivos para a melhoria da qualidade da água do sistema, principalmente num cenário de curto prazo em que não é possível garantir percentuais elevados de abatimento de carga.

A seguir, são discutidos detalhadamente os resultados obtidos para os principais cenários simulados que subsidiaram a decisão quanto às recomendações de intervenções.

5.1.1. Efeitos das alterações hidrodinâmicas

As alterações hidrodinâmicas propostas provocam modificações na hidrodinâmica do sistema lagunar, afetando os tempos de residência, nível d'água e salinidade das lagoas. A seguir são detalhados os impactos das alterações hidrodinâmicas dos principais cenários.

5.1.1.1. Tempo de Residência

O tempo de residência das lagoas em cada um dos cenários de alterações hidrodinâmicas foi avaliado através do estudo de descarga (Flushing). Esse estudo permite identificar a capacidade de renovação hidráulica de um sistema a partir da

concentração de um constituinte conservativo. A Figura 10 e a Figura 11 apresentam as séries temporais da concentração desse constituinte, em termos percentuais, para as Lagoas de Piratininga e Itaipu, respectivamente. Essas figuras apresentam os resultados do cenário atual comparado aos cenários futuros de alterações hidrodinâmicas contemplados nos cenários **HIDRO 4**, **HIDRO 5** e **HIDRO 7**.

O tempo de residência das águas da Lagoa de Itaipu no cenário atual é baixo, com renovação de 80% da água em 15 dias e renovação de 90% em 2 meses. Essa renovação rápida e constante das águas da Lagoa de Itaipu ocorre devido a sua ligação direta com o mar pelo o Canal de Itaipu. A dragagem do Canal de Itaipu promoveria uma renovação hidráulica ainda maior, com troca de 90% das águas em cerca de 15 dias no cenário **HIDRO 4** (Figura 11).

Na Lagoa de Piratininga a renovação hidráulica no cenário atual é bastante diferente de Itaipu. A renovação das águas de Piratininga é afetada pela obstrução do Túnel do Tibau, que limita a influência maregráfica e eleva o tempo de residência, resultando em 10 % de renovação em 15 dias e 90% de renovação em 9 meses (Figura 10). Esta atual condição na lagoa de Piratininga é prejudicial para a qualidade de água e dispersão das cargas que chegam até esse sistema. Por isso, as obras estudadas tiveram como objetivo principal encontrar soluções para melhorar a taxa de renovação hidráulica das águas da Lagoa de Piratininga.

Os resultados das simulações indicam que apenas a desobstrução do Túnel do Tibau (**HIDRO 5**) seria capaz de reduzir o tempo de residência da Lagoa de Piratininga, com renovação de 90% em 6 meses, e a execução de todas as obras propostas (**HIDRO 4**), promoveria a renovação de 90% das águas em 3 meses (Figura 10). Estima-se, também, que em 15 dias ocorreria uma renovação significativa das águas na Lagoa de Piratininga nos cenários **HIDRO 4 e 5**, na região mais próxima ao Túnel do Tibau, enquanto o corpo da lagoa continuaria a apresentar renovação de apenas 25% no **HIDRO 4** e 15% no **HIDRO 5** (Figura 12). Na Lagoa de Piratininga, com a execução de todas as obras (**HIDRO 4**), seria possível alcançar renovação próxima de 40% após 30 dias no corpo da lagoa e com a desobstrução do Túnel do Tibau isolada (**HIDRO 5**) a

renovação após 30 dias seria de 30% (Figura 13). A renovação em 60 dias atualmente é de 30% no corpo da lagoa e com a desobstrução do Túnel do Tibau (**HIDRO 5**) passará a ser de 50%, podendo chegar a 70% com a execução de todas as obras (**HIDRO 4**), como mostra a Figura 14.

Após 120 dias a renovação das águas da Lagoa de Piratininga no cenário atual é de 50% (Figura 16), mas com a desobstrução do Túnel do Tibau (**HIDRO 5**), a renovação se aproximaria de 70% já em 90 dias (Figura 15) e 80% em 120 dias (Figura 16). Com a execução de todas as obras a renovação completa (**HIDRO 4**), ocorreria em 90 dias (Figura 15).

Os resultados do cenário **HIDRO 7**, que combina as obras de dragagem do Canal de Itaipu com a desobstrução do Túnel do Tibau, se mostraram similares ao **HIDRO 5** na Lagoa de Piratininga, como pode ser visto nas figuras abaixo. Isso indica que a dragagem do Canal de Itaipu contribui muito pouco para a renovação da Lagoa de Piratininga. Quando se compara os resultados do **HIDRO 7** com o **HIDRO 4**, é possível constatar que a dragagem do Canal do Camboatá contribui de forma significativa para a redução do tempo de residência da Lagoa de Piratininga, reduzindo a renovação de 90% em 6 meses para 3 meses em conjunto com a desobstrução do Túnel do Tibau.

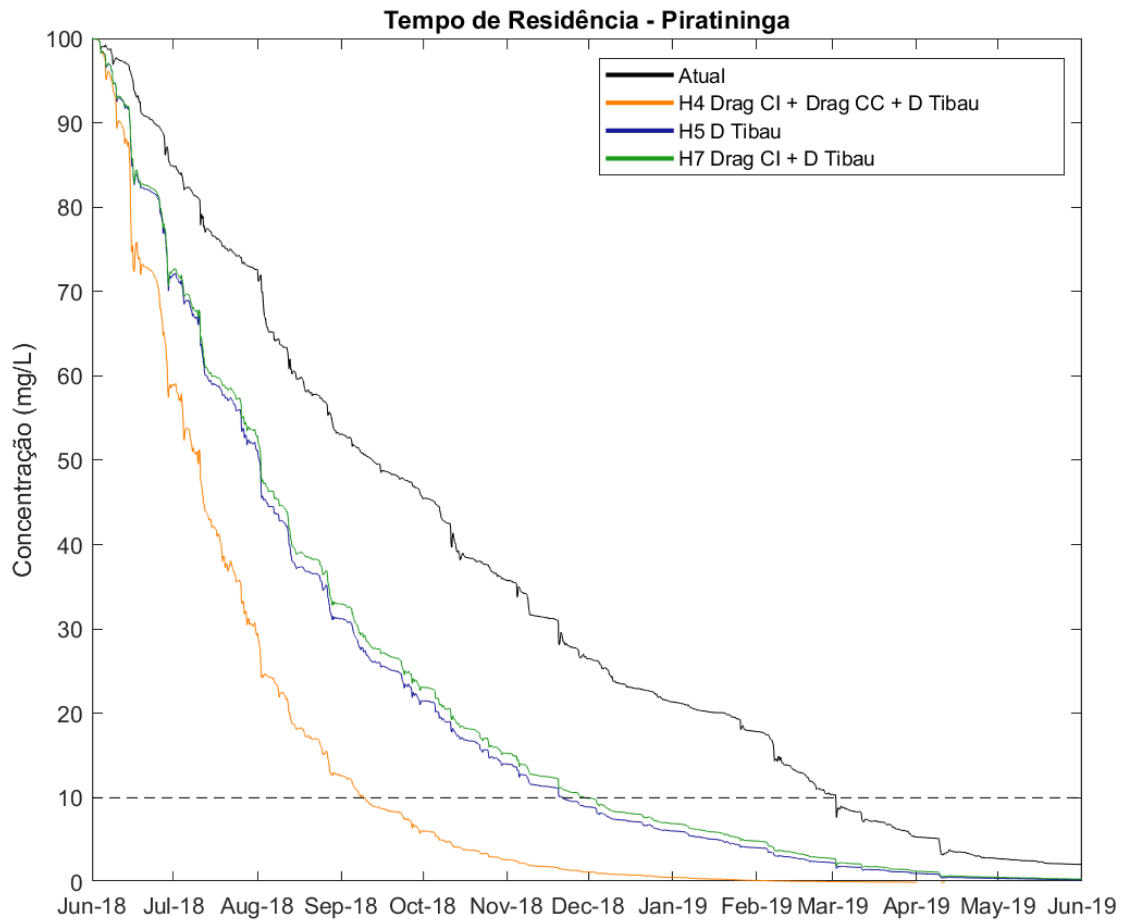


Figura 10: Tempo de Residência dos principais cenários de alterações hidrodinâmicas avaliados na Lagoa de Piratininga.

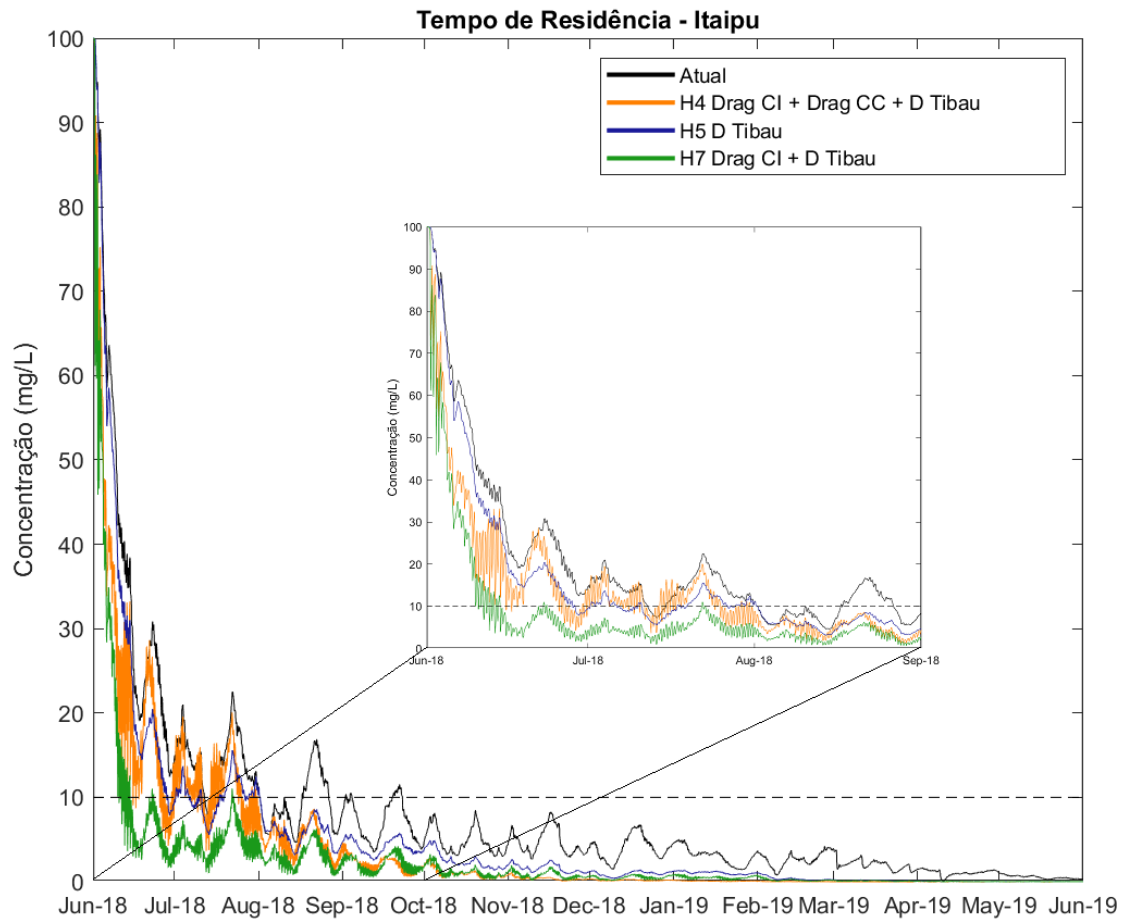


Figura 11: Tempo de Residência dos principais cenários de alterações hidrodinâmicas avaliados na Lagoa de Itaipu.

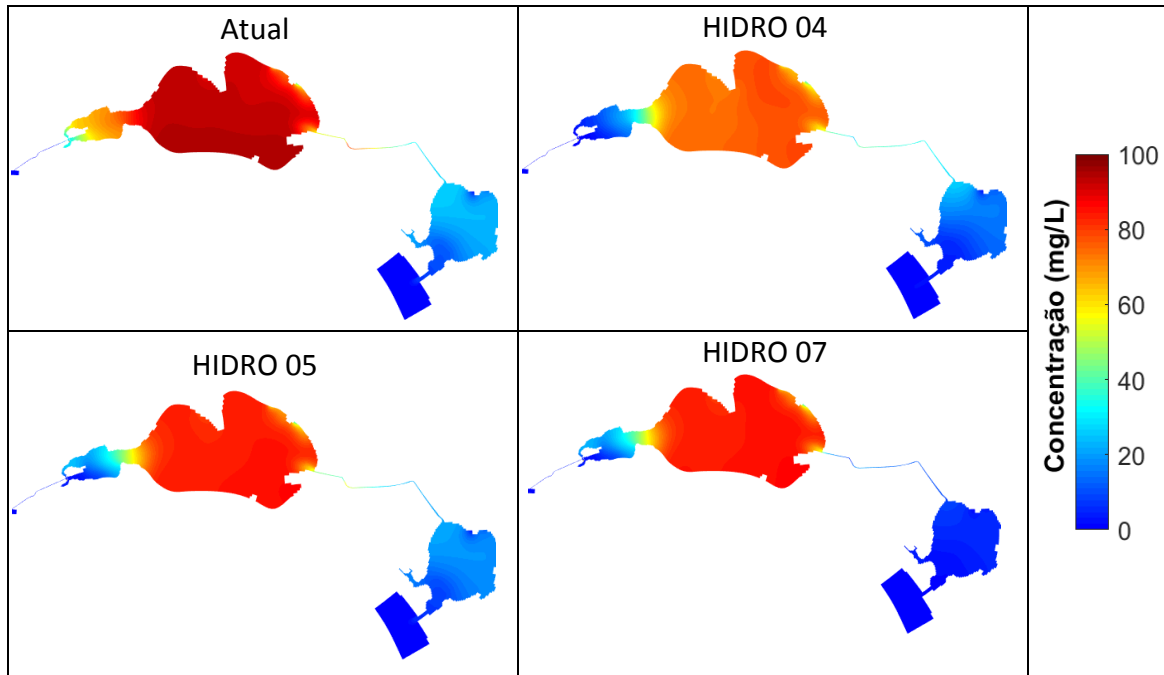


Figura 12: Análise de descarga (flushing) do 15º dia para os principais cenários simulados.

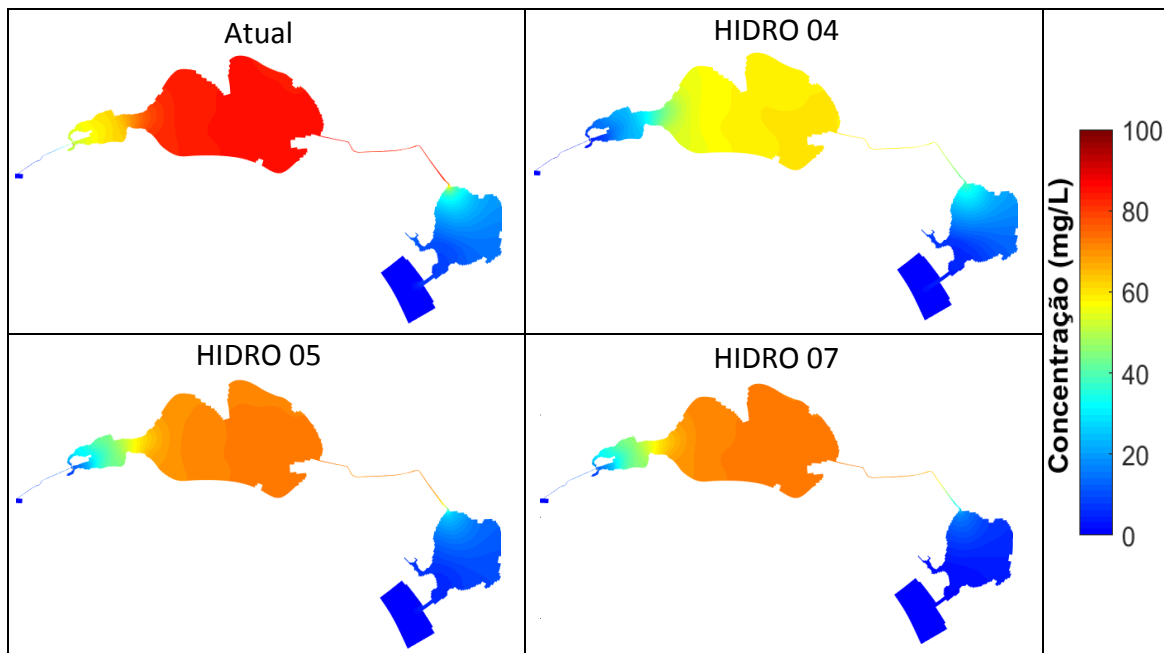


Figura 13: Análise de descarga (flushing) do 30º dia para os principais cenários simulados.

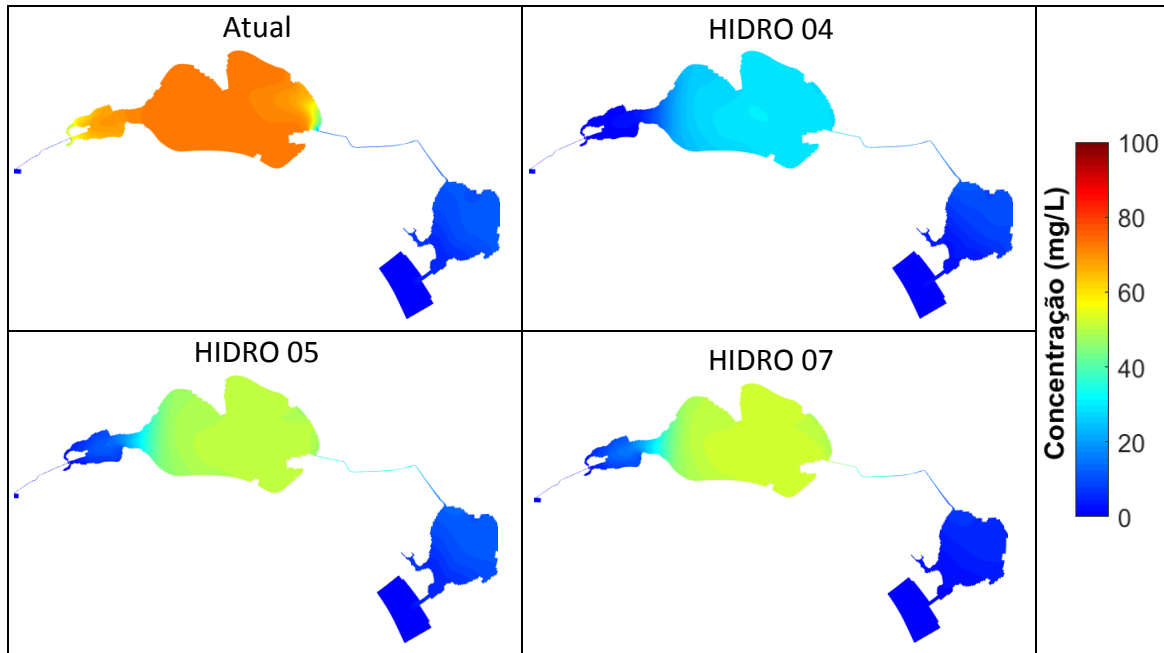


Figura 14: Análise de descarga (flushing) do 60º dia para os principais cenários simulados.

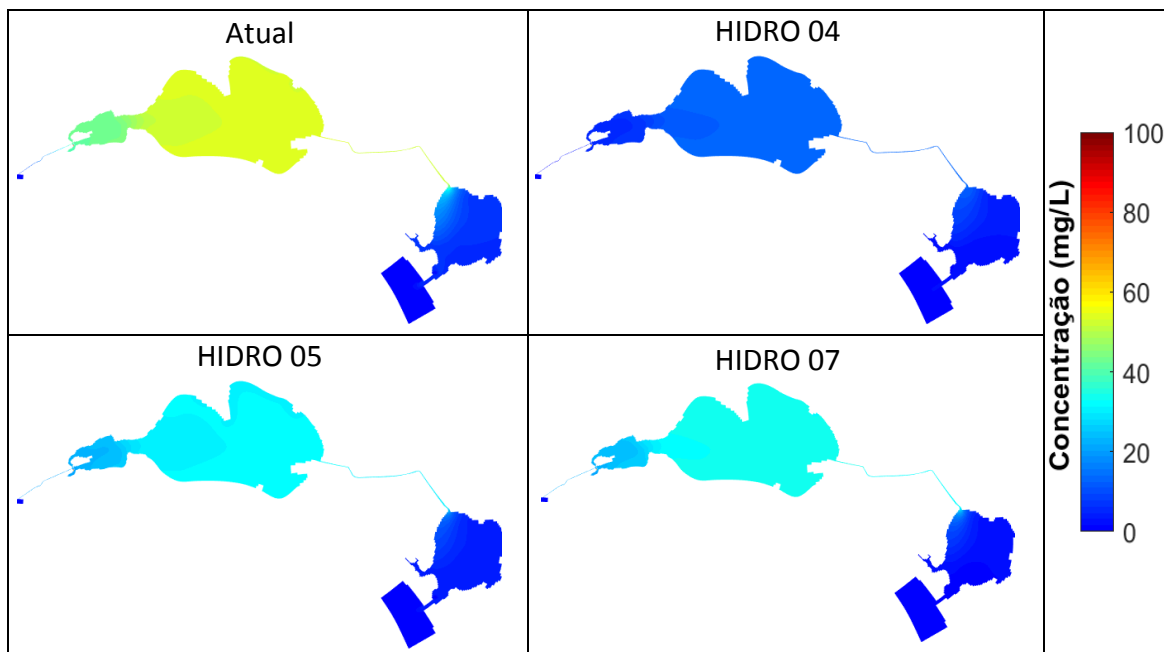


Figura 15: Análise de descarga (flushing) do 90º dia para os principais cenários simulados.

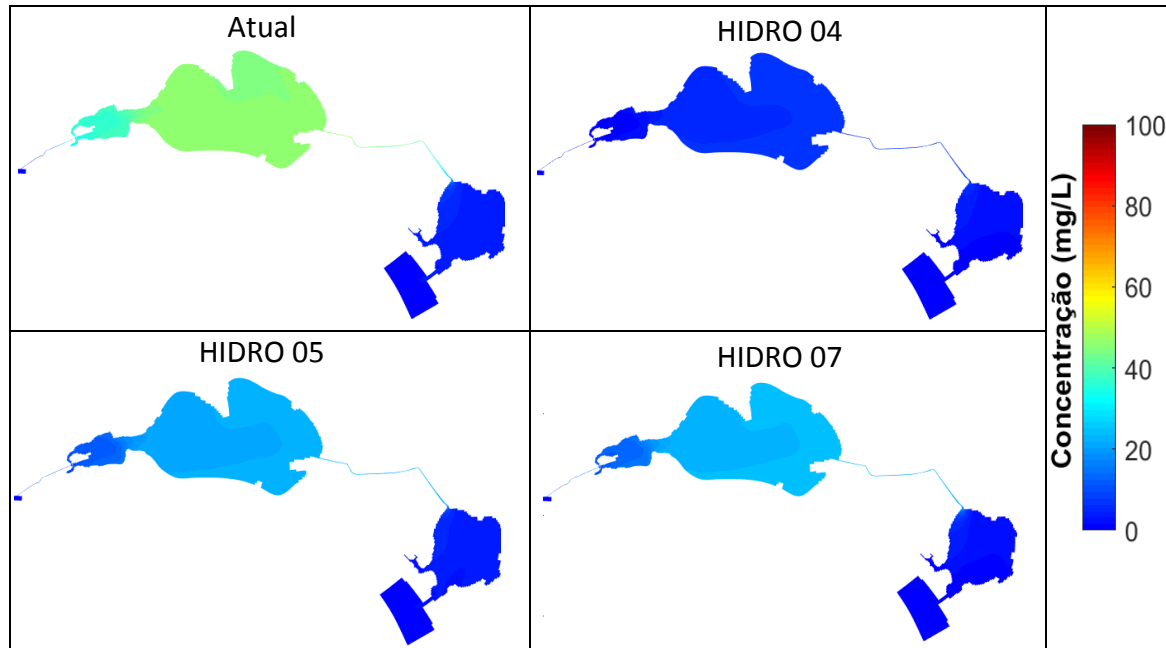


Figura 16: Análise de descarga (flushing) do 120º dia para os principais cenários simulados.

5.1.1.2. Nível d'água

A. Lagoa de Itaipu

O nível d'água da Lagoa de Itaipu é regido principalmente pela variação do nível maregráfico. Assim como no mar, ao longo de um dia são observados dois ciclos de maré no interior da Lagoa de Itaipu. Na série de nível simulada ao longo de um ano, os valores de nível no mar no cenário atual variaram de 1,0m a -0,5m. Na Lagoa de Itaipu o valor máximo na condição atual é de 0,82m, associado também a um evento de chuva, e o mínimo foi 0,05m durante um longo período de estiagem e baixo nível maregráfico. O nível médio da Lagoa de Itaipu no cenário atual é de 0,36m.

As alterações hidrodinâmicas estudadas, como a desobstrução do Túnel do Tibau e as dragagens do Canal de Itaipu e Camboatá, alteram os padrões hidrodinâmicos, refletindo nas oscilações de nível e seus valores mínimos, máximos e médios. A Figura 17 apresenta a variação do nível d'água no cenário atual e em outros cenários estudados num dos períodos simulados, fevereiro até o final de abril de 2019. A Figura 18 apresenta a variação do nível nos mesmos cenários, porém num período mais curto para facilitar a visualização dos resultados em cada um dos cenários.

A dragagem do Canal de Itaipu, consideradas no **HIDRO 4** e **HIDRO 7**, provocariam aumento da oscilação do nível de água na Lagoa de Itaipu, aumentando o nível máximo e diminuindo o nível mínimo. As variações de nível ao longo do dia seriam ainda mais rápidas e intensas (Figura 17), com variação de 1 metro em 6 horas no interior da laguna como pode ser visto na Figura 18. Esse aumento expressivo na oscilação do nível em Itaipu é decorrente da dragagem do Canal de Itaipu. A dragagem do Canal de Camboatá pouco interfere no nível da Lagoa de Itaipu, como pode ser visto na Figura 17 e Figura 18 através da comparação dos resultados entre os cenários **HIDRO 04** e **HIDRO 7**. Além disso, a desobstrução do Túnel do Tibau também não interfere no nível da Lagoa de Itaipu, como pode ser visto na Figura 17 e Figura 18 através dos resultados do cenário **HIDRO 5** que são iguais ao cenário atual.

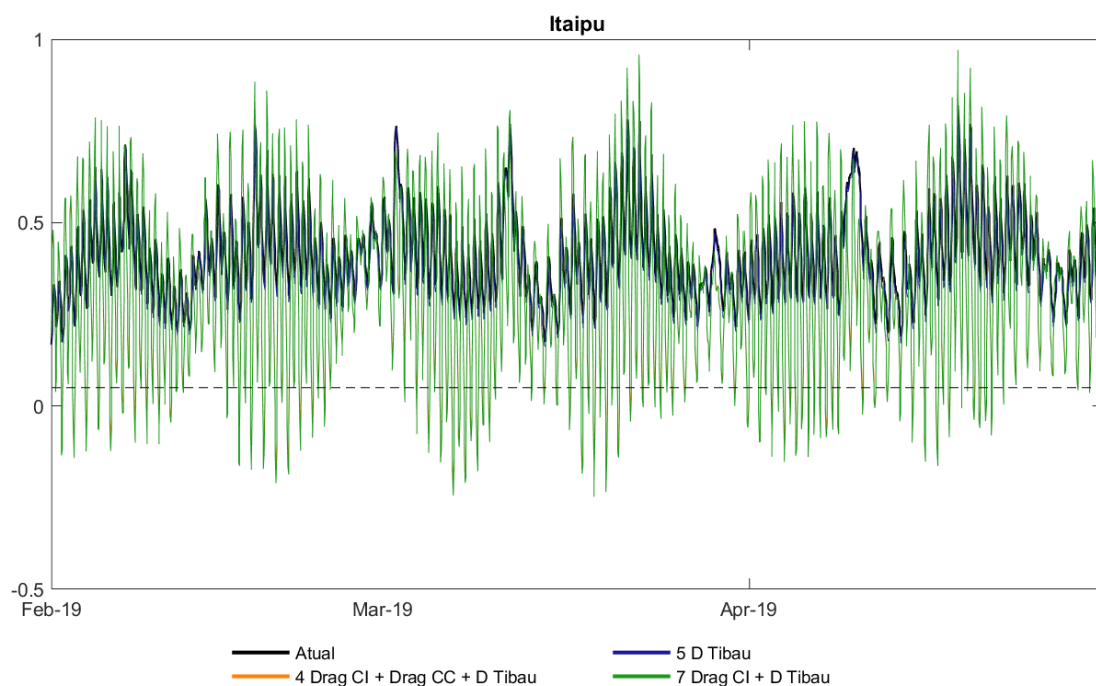


Figura 17: Variação do nível d'água em Itaipu entre fevereiro a abril de 2019 no cenário atual, HIDRO 04, HIDRO 05 e HIDRO 07.

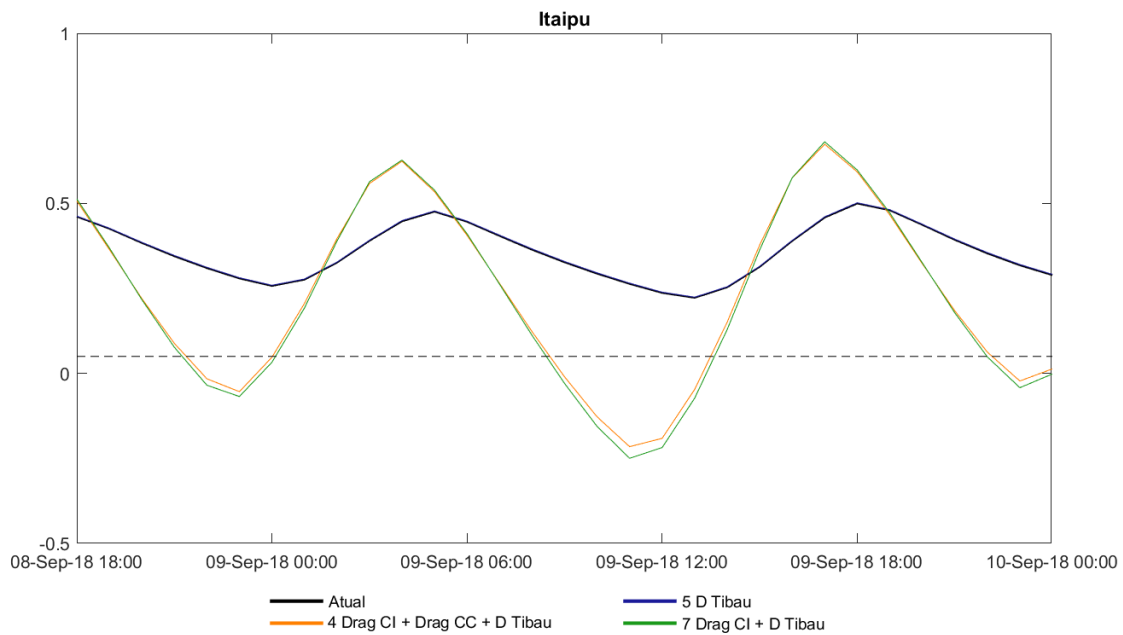


Figura 18: Variação do nível d'água em Itaipu durante algumas horas no cenário atual, HIDRO 04, HIDRO 05 e HIDRO 07.

A Figura 19 e a Figura 20 apresentam a variação do nível na Lagoa de Itaipu no cenário atual, no cenário **HIDRO 7** (Dragagem no Canal de Itaipu e desobstrução do Túnel do Tibau) e no **HIDRO 7 sem ETE**, considerando dragagem no Canal de Itaipu, a desobstrução do Túnel do Tibau e também a retirada do lançamento das ETEs Cambinhas e Itaipu. Tanto em período mais longo (Figura 19) como num período mais curto (Figura 20) não se observa qualquer diferença de nível entre os três cenários, indicando que assim como a dragagem do Canal de Camboatá não impacta no nível de Itaipu de forma expressiva, a retirada dos lançamentos das ETEs também não altera o nível na Lagoa de Itaipu.

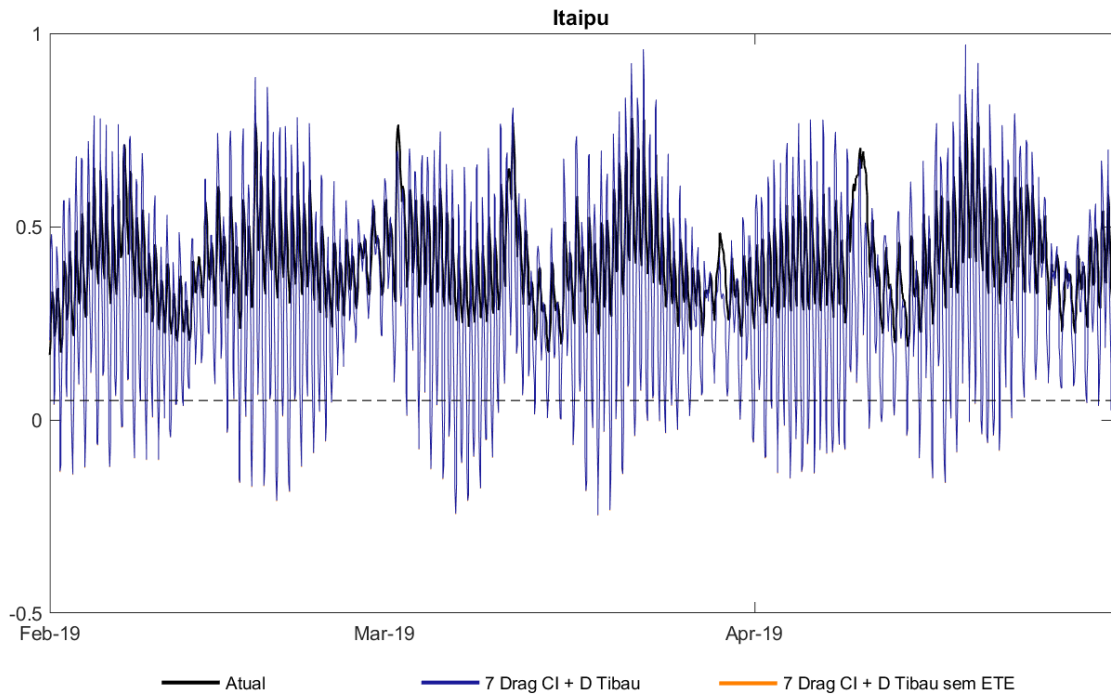


Figura 19: Variação do nível d'água em Itaipu entre fevereiro a abril de 2019 no cenário atual, HIDRO 07 e HIDRO 07 sem ETE.

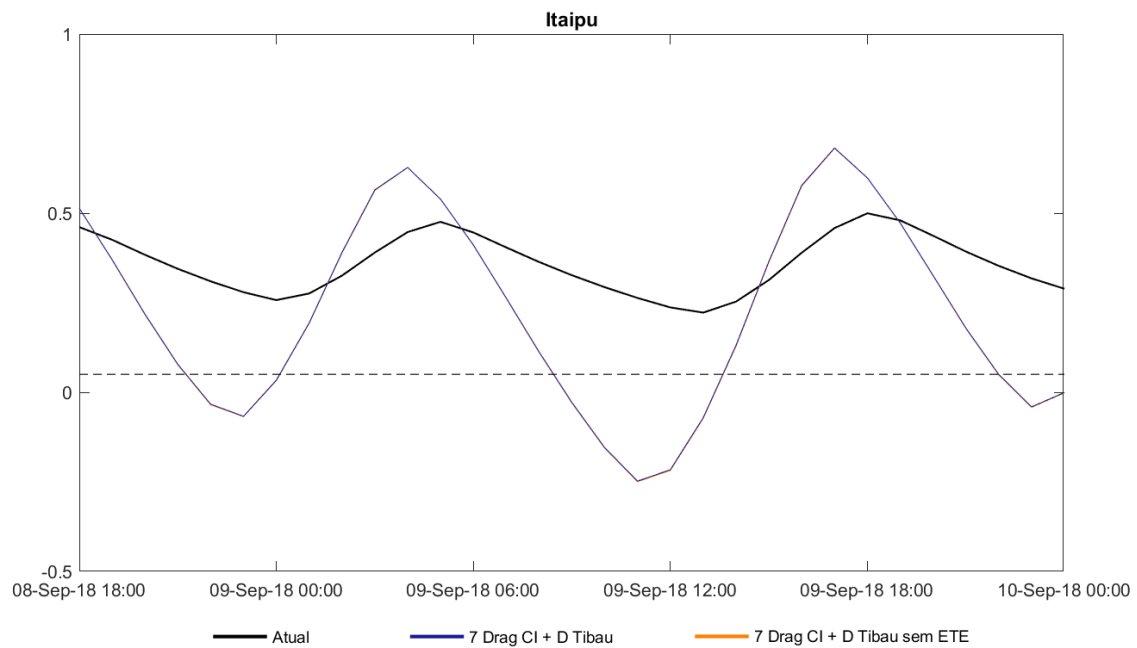


Figura 20: Variação do nível d'água em Itaipu durante algumas horas no cenário atual, HIDRO 07 e HIDRO 07 sem ETE.

Na Figura 21 é possível verificar os níveis mínimos, máximos e médios na Lagoa de Itaipu para cada um dos cenários. Os cenários que consideraram a dragagem do Canal de Itaipu tiveram aumento do nível máximo de 0,82m para 0,99m, redução do nível mínimo de 0,05m para -0,29m ou -0,32m, e diminuição do nível médio em 9 cm (de 0,36m para 0,27m). A desobstrução do Túnel do Tibau de forma isolada (**HIDRO 5**) diminui apenas 2 cm o nível máximo e 1 cm o nível médio na Lagoa de Itaipu. A retirada dos lançamentos das ETEs Camboinhas e Itaipu (**HIDRO 7 sem ETE**) não altera os níveis máximos, mínimos e médios de Itaipu quando comparados a simulação **HIDRO 07**. Os resultados demonstram que a obra hidráulica de maior relevância para a Lagoa de Itaipu é a dragagem do Canal de Itaipu. As demais obras trazem pouco efeito sobre os níveis e a hidrodinâmica da Lagoa de Itaipu.

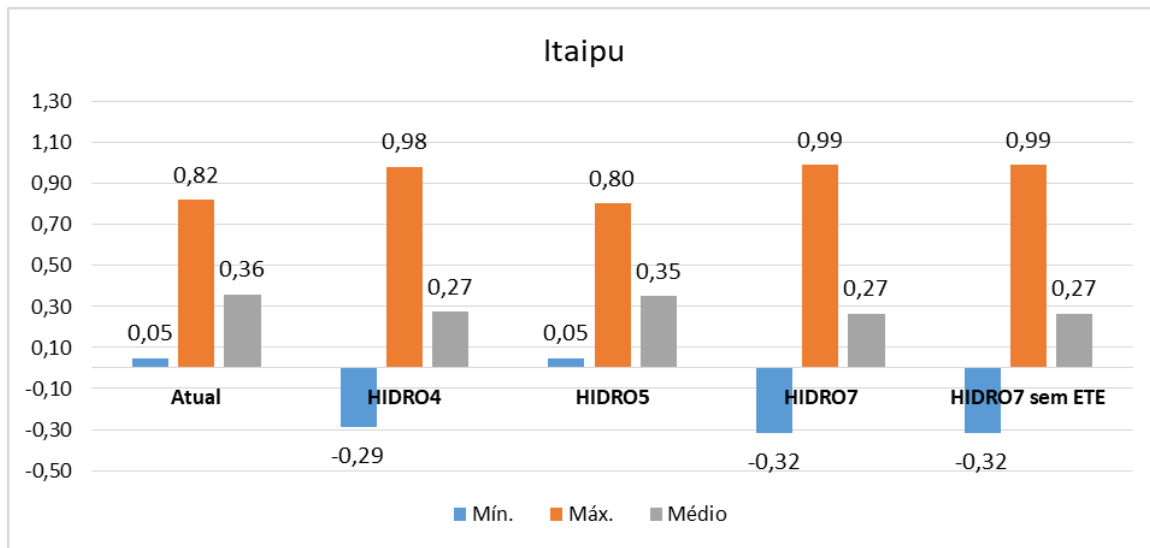


Figura 21: Níveis máximos, mínimos e médios observados na Lagoa de Itaipu no cenário atual e nos cenários de alterações hidrodinâmicas.

b. Lagoa de Piratininga

Atualmente, as variações do nível d'água da Lagoa de Piratininga são influenciadas principalmente pela componente hidrológica, ou seja, pelas vazões dos contribuintes. A influência da maré nos níveis d'água da Lagoa de Piratininga é muito mais reduzida do que em Itaipu. A influência maregráfica na Lagoa de Piratininga é bastante dissipada devido à restrição do seu fluxo com mar, limitado ao Túnel de Tibau e, de

forma indireta, pelo Canal de Camboatá e Lagoa de Itaipu. Essas regiões que ligam a Lagoa de Piratininga ao mar agem como filtros importante de maré, fazendo com que não haja oscilação de nível de alta frequência em Piratininga, diferente do que é observado em Itaipu, onde ocorrem dois ciclos de maré ao longo do dia.

De acordo com a série de nível simulada ao longo de um ano para o cenário atual, o menor nível d'água em Piratininga foi de 0,29 m, ocorrido em um momento de longa estiagem. Por sua vez, o nível máximo em Piratininga foi 0,85 m e esteve associado a um evento de chuva expressivo, ocorrido de abril, equivalente a um tempo de retorno de 10 anos. Para o cenário atual, o nível médio na Lagoa de Piratininga é de 0,46 m.

As alterações hidrodinâmicas estudadas, como a desobstrução do Túnel do Tibau e a dragagem do Canal de Camboatá, afetariam os padrões hidrodinâmicos da Lagoa de Piratininga, impactando nas oscilações de nível e em seus valores mínimos, máximos e médios. A Figura 22 apresenta a oscilação do nível de Piratininga na condição atual e nos principais cenários hidrodinâmicos de interesse, em um ponto central da lagoa.

A influência da maré no nível d'água da Lagoa de Piratininga se torna mais expressiva nos cenários de obras de dragagem do Canal de Camboatá e desobstrução do Túnel do Tibau. Os resultados do cenário **HIDRO 4** apontam que a realização de todas as obras hidráulicas estudadas, incluindo a desobstrução do Túnel do Tibau e a dragagem do Canal de Camboatá e do Canal de Itaipu, também reduziria os níveis mínimos, médios e máximos da Lagoa de Piratininga. A desobstrução do Túnel de Tibau facilitaria a entrada de água do mar na lagoa, compensando parcialmente a saída de água facilitada pela dragagem do Canal de Camboatá. Por causa dessas questões hidrodinâmicas, é recomendável que a desobstrução do Túnel do Tibau seja realizada antes da dragagem do Canal de Camboatá.

No cenário da implantação de todas as obras hidráulicas estudadas, os níveis mínimo, médio e máximo esperados na Lagoa de Piratininga chegariam a 0,17 m, 0,37 m e 0,62 m, respectivamente. Com isso, a Lagoa de Piratininga no cenário **HIDRO 4**, sofreria redução de seu espelho d'água, com redução de 12 cm no nível mínimo e 11

cm no nível médio, em comparação ao cenário atual. Apesar dessas reduções de nível médio com todas as obras (**HIDRO 4**), essas não são suficientes para aumentar significativamente as áreas secas na condição de nível médio, apenas nos instantes de nível mínimo. A área seca nesse cenário seria de 7,9 ha no instante de nível mínimo. Estima-se que nos instantes de nível mínimo a área seca represente 2,4% da área de modelagem de Piratininga. Nas simulações referentes à condição atual não foram observadas áreas secas nos instantes de nível mínimo na grade computacional.

O cenário de desobstrução do Túnel do Tibau de forma isolada, **HIDRO 5**, também provocaria alterações nos níveis da Lagoa de Piratininga, porém, menos expressivas, com mínimos, médios e máximos chegando a 0,29 m, 0,41 m e 0,68 m (Figura 24). Em relação ao cenário atual, a desobstrução isolada do túnel causaria apenas uma redução no nível médio de 5 cm e não afetaria o nível mínimo. Já o nível máximo seria bastante reduzido, chegando até 0,68 m, ou seja, 17 cm menor que o atual. Destaca-se que as condições atuais simuladas consideram obstrução parcial do túnel devido aos desmoronamentos recentes e assoreamento na área junto ao mar.

O cenário que combina a dragagem do Canal de Itaipu com a desobstrução do Túnel do Tibau, **HIDRO7**, apresenta valores de níveis muito semelhantes ao **HIDRO 5** que levou em consideração apenas a desobstrução do Túnel do Tibau (Figura 22). Esses resultados indicam que a dragagem do Canal de Itaipu interfere pouco na Lagoa de Piratininga, mantendo níveis máximos, médios e mínimos muito semelhantes ao cenário **HIDRO 5** (Figura 24).

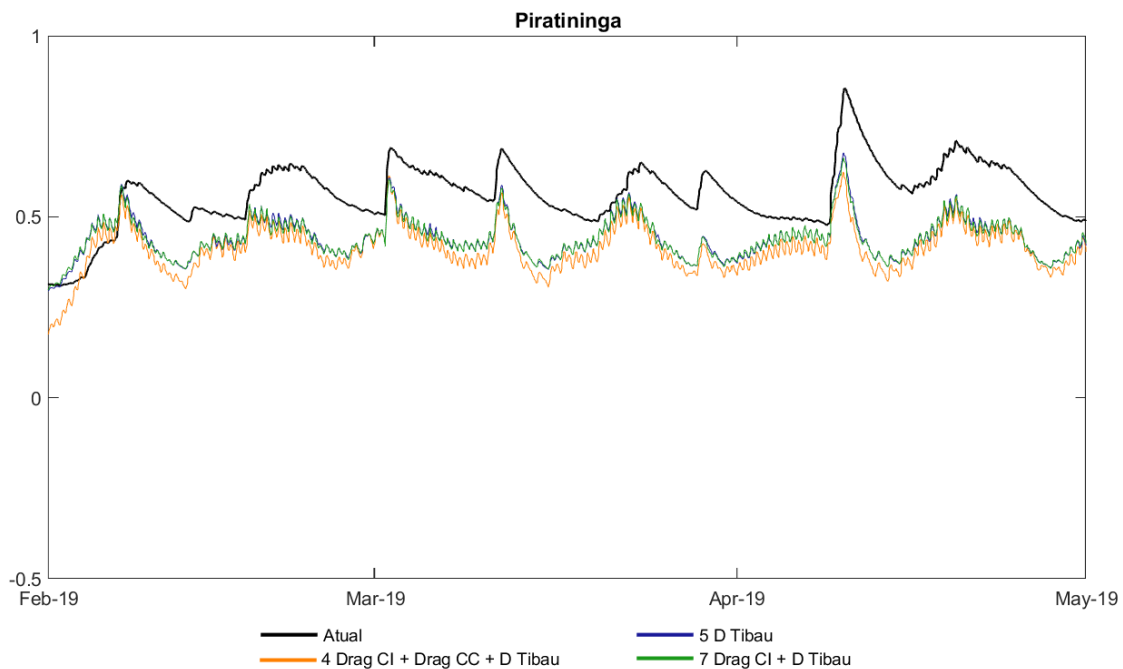


Figura 22: Variação do nível d'água em Piratininga entre fevereiro a abril de 2019 no cenário atual, HIDRO 04, HIDRO 05 e HIDRO 07.

A Figura 23 apresenta a variação do nível na Lagoa de Piratininga no cenário atual, no cenário **HIDRO 7** (dragagem do Canal de Itaipu e a desobstrução do Túnel do Tibau) e no cenário **HIDRO 7 sem ETE**, considerando a dragagem do Canal de Itaipu, a desobstrução do Túnel do Tibau e também a retirada do lançamento das ETEs Camboinhas e Itaipu. Enquanto o cenário HIDRO 7 apresenta considerável diferença dos valores do nível em relação ao cenário atual, não se observa variação expressiva do nível entre o cenário **HIDRO 7** e o **HIDRO 7 sem ETE**. Tais resultados indicam que a retirada dos lançamentos das ETEs não altera o nível na Lagoa Piratininga de forma expressiva, mantendo os mesmos valores de nível médio, mínimo e máximo em relação ao cenário **HIDRO 07** (Figura 24).

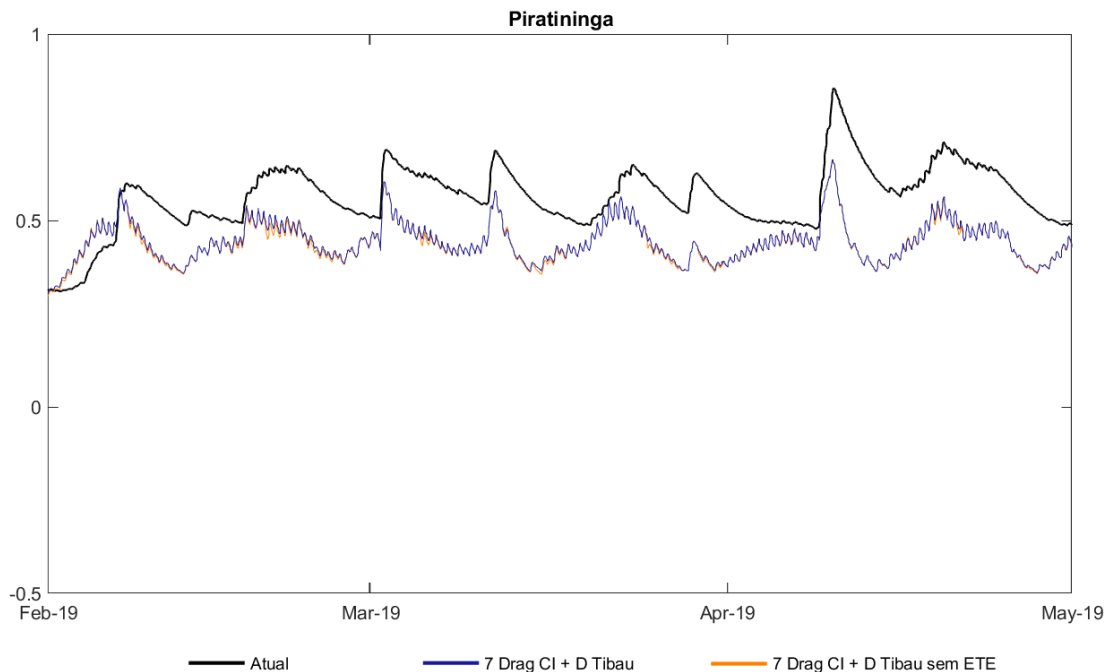


Figura 23: Variação do nível d'água em Piratininga entre fevereiro a abril de 2019 no cenário atual, HIDRO 07 e HIDRO 07 sem ETE.

A análise conjunta de todos os cenários indica que a obra hidráulica mais relevante para a Lagoa de Piratininga é a desobstrução do Túnel do Tibau. Na sequência, a segunda obra que tem mais efeitos sobre a hidrodinâmica da Lagoa de Piratininga é a dragagem do Canal do Camboatá. Já as obras de dragagem do Canal de Itaipu e de retirada dos lançamentos das ETEs pouco interferem no nível da Lagoa de Piratininga.

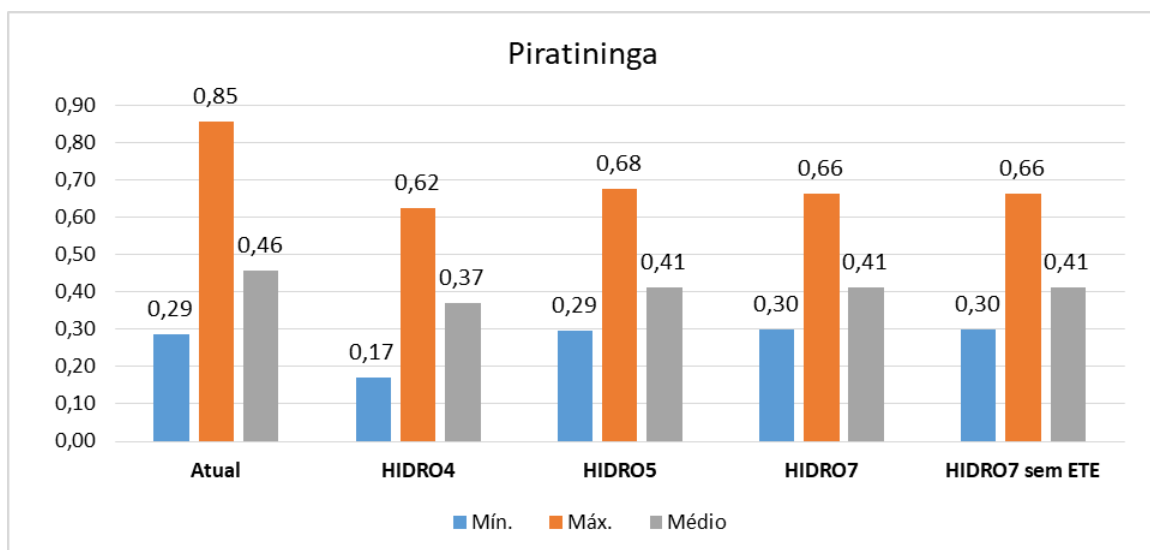


Figura 24: Níveis máximos, mínimos e médios observados na Lagoa de Piratininga no cenário atual e nos cenários de alterações hidrodinâmicas.

c. Canal de Camboatá

O canal de camboatá é responsável pela ligação entre as lagoas Itaipu e Piratininga e recebe os efluentes da ETE Camboinhas. A variação do nível no canal é maior nas proximidades da Lagoa de Itaipu e diminui nas proximidades da Lagoa de Piratininga. O sentido do escoamento da água no canal é bastante variável, invertendo seu fluxo quatro vezes por dia. Entretanto, em eventos de maré muito baixa, essa inversão de fluxo não ocorre, e o fluxo se mantém no sentido de Piratininga para Itaipu.

No cenário atual, o leito do canal de camboatá se encontra no nível -0,30 m, e as profundidades mínima, média e máxima da coluna d'água no canal são de 0,54 m, 0,73 m e 1,13 m, respectivamente. A dragagem proposta para o Canal de Camboatá alteraria a cota do fundo do canal de -0,30m para -1,50m, sendo 120 cm mais profundo do que na condição atual. Desse modo, apesar da redução nos níveis d'água mínimos, médios e máximos, a dragagem do canal promoveria aumento da profundidade d'água no canal.

No cenário que contempla a execução de todas as obras propostas, **HIDRO 4**, o nível mínimo da água em um ponto no meio do canal de camboatá seria 0,08 m enquanto que no cenário atual é de 0,24m (Figura 25, Figura 26 e Figura 29). Porém, com a dragagem, mesmo que haja uma redução da cota do nível da água, haveria um aumento de profundidade, passando de 1,13 m no cenário atual para 1,58 m com a dragagem.

A desobstrução do Túnel do Tibau altera os níveis no Canal de Camboatá. No cenário **HIDRO 5**, cota do nível médio passaria de 0,43 m para 0,39 m e o nível máximo seria reduzido de 0,83 m para 0,77 m (Figura 25, Figura 26 e Figura 29). Já o nível mínimo não teria alterações significativas.

A dragagem do Canal de Itaipu não afetaria os níveis de água do Canal de Camboatá como pode ser visto através da comparação entre os resultados do **HIDRO 7** e **HIDRO 5**, que apresentaram valores muito semelhantes (Figura 25, Figura 26 e Figura 29).

lançamento dos efluentes das ETEs reduziu apenas 1 cm dos níveis mínimos, médios e máximos no Canal de Camboatá.

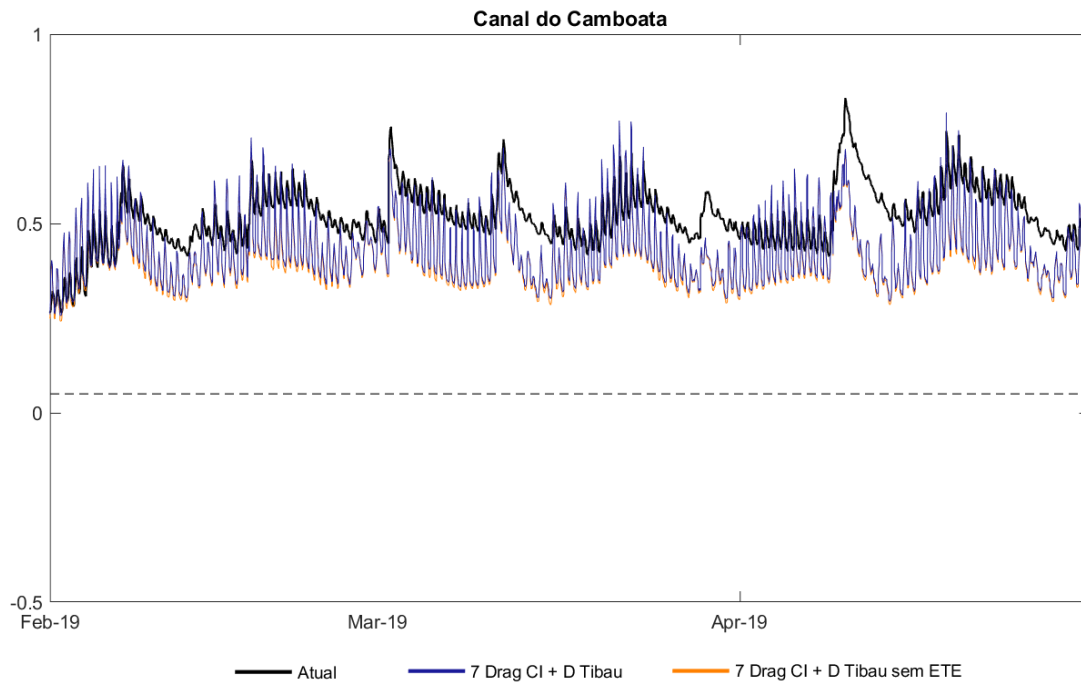


Figura 27: Variação do nível d'água no Canal de Camboatá entre fevereiro a abril de 2019 no cenário atual, HIDRO 07 e HIDRO 07 sem ETE.

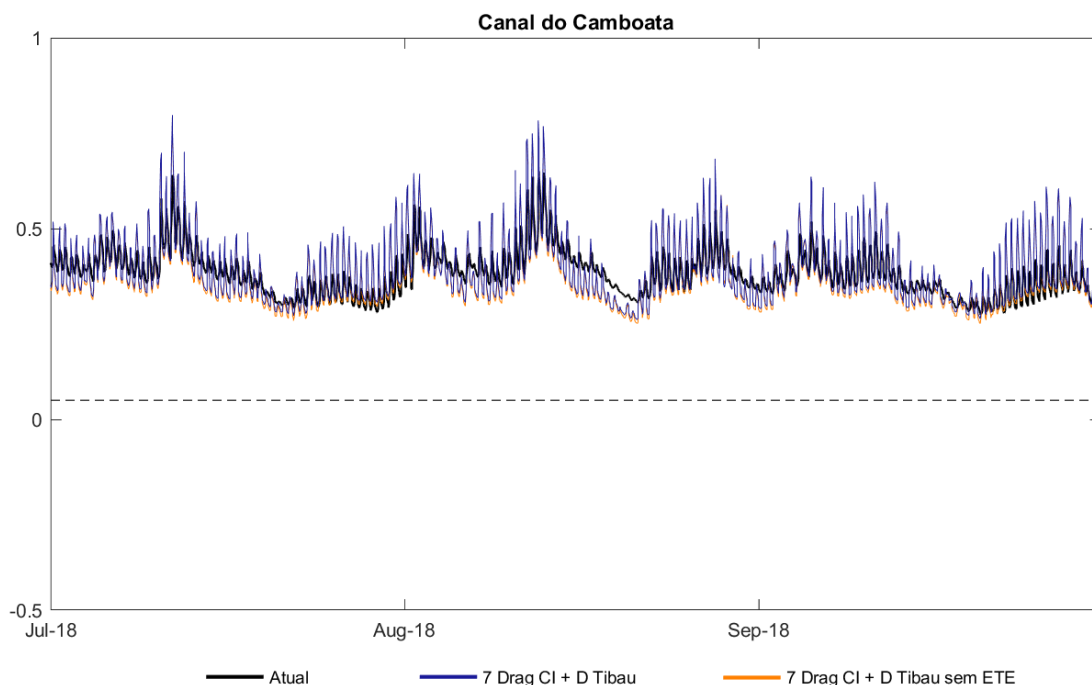


Figura 28: Variação do nível d'água no Canal de Camboatá entre julho a outubro de 2019 no cenário atual, HIDRO 07 e HIDRO 07 sem ETE.

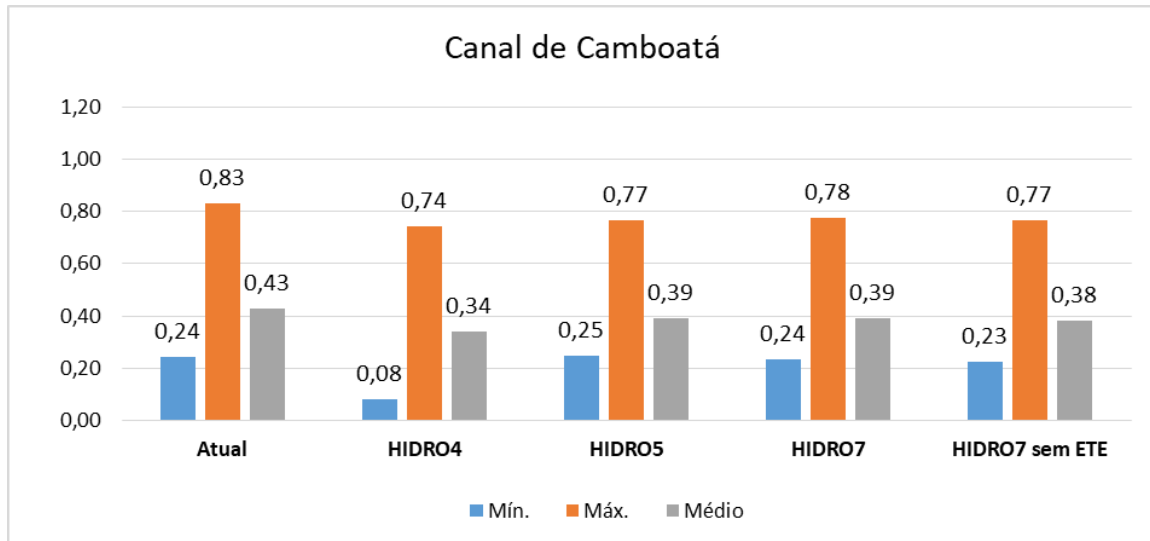


Figura 29: Níveis máximos, mínimos e médios observados no Canal de Camboatá no cenário atual e nos cenários de alterações hidrodinâmicas.

5.1.1.3. Salinidade

No cenário atual, a salinidade na Lagoa de Itaipu se mantém elevada, acima 30 g/Kg, quando não há eventos de chuva. No entanto, eventos de precipitação com volumes expressivos reduzem a salinidade na Lagoa de Itaipu, podendo chegar a valores inferiores a 10 g/Kg. A salinidade média atualmente na Lagoa de Itaipu é de 29 g/Kg. Na Lagoa de Piratininga a salinidade é inferior à de Itaipu, devido às restrições atuais na conexão com o mar, e também com menor variabilidade, aproximadamente 20 g/Kg em período de estiagem e 12 g/Kg em período chuvoso, e com média de 19 g/Kg no cenário atual.

A variabilidade da salinidade na lagoa de Itaipu é maior do que na lagoa de Piratininga, tanto no cenário atual como nos futuros, devido a sua comunicação direta com o mar. O impacto dos eventos de chuva também é mais expressivo na Lagoa de Itaipu em decorrência da maior diferença de salinidade entre a lagoa, cuja média se aproxima de 30 g/Kg, e a contribuição do escoamento superficial resultante do evento de precipitação, cuja salinidade é zero.

Os resultados da simulação indicam que o evento chuvoso de abril de 2019 provocaria queda bastante expressiva nas concentrações de salinidade da Lagoa de

Itaipu, chegando próximo de 5 g/Kg, independente das obras (Figura 31). O impacto desse evento chuvoso na salinidade da Lagoa de Piratininga varia entre os cenários, que exibem quedas de 5 a 7 g/Kg na salinidade simulada (Figura 30). O aumento da salinidade após os eventos chuvosos é mais rápido na Lagoa de Itaipu, devido à sua comunicação direta com o mar, e em poucos dias a salinidade retorna aos níveis antecedentes à chuva. Na Lagoa de Piratininga, a concentração da salinidade anterior ao evento chuvoso de abril só seria retomada após cerca de um mês.

As obras propostas melhorariam a qualidade da água das lagoas devido à redução no tempo de residência, resultado do aumento da comunicação com o mar. Entretanto, a maior troca de água das lagoas com o mar também acarretaria em expressivo aumento da salinidade, em comparação a situação no cenário atual. As obras de desobstrução do Túnel do Tibau e Dragagem do Canal de Camboatá aumentariam consideravelmente a salinidade da Lagoa de Piratininga, devido à maior comunicação com o mar (Figura 30).

O impacto das obras no aumento da salinidade das lagoas é mais expressivo na Lagoa de Piratininga. Com a desobstrução do túnel do Tibau a salinidade na Lagoa de Piratininga atingiria valores superiores a 30 g/Kg no período de estiagem. A mudança expressiva nos níveis de salinidade da Lagoa de Piratininga pode resultar em modificação nas comunidades biológicas presentes. A salinidade na Lagoa de Itaipu aumentaria cerca de 5 g/Kg com a dragagem do Canal de Itaipu, porém, com valores mínimos bastante similares aos do cenário atual (Figura 31).

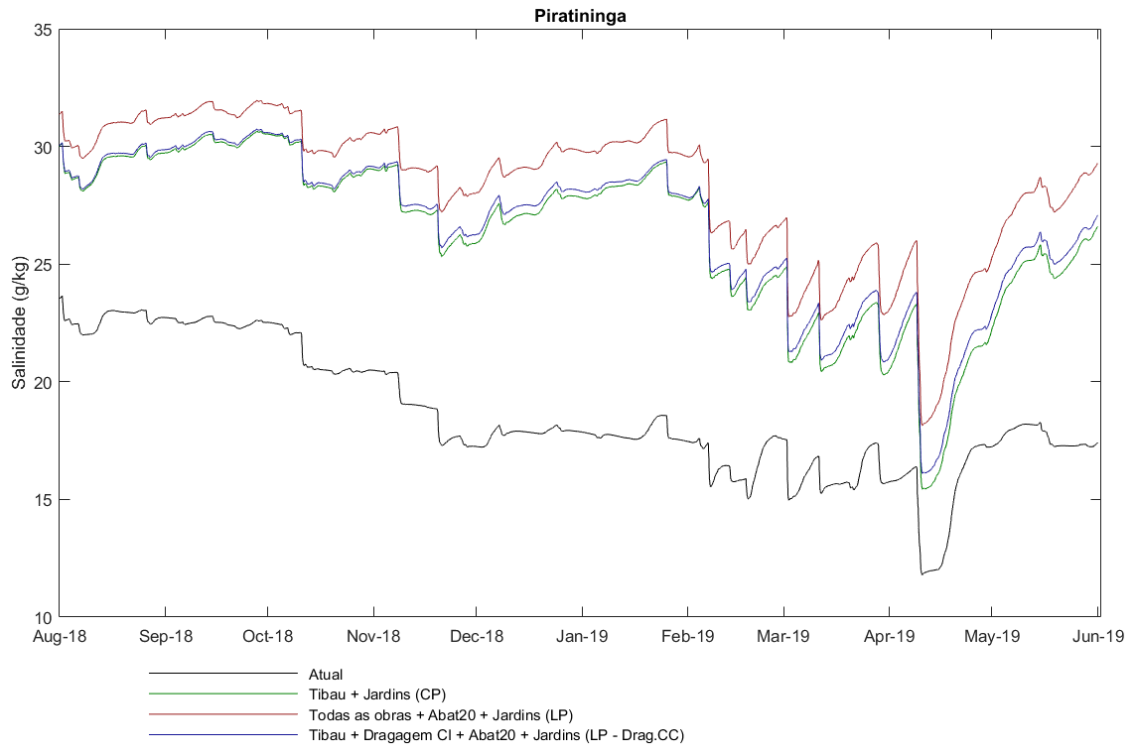


Figura 30: Salinidade da Lagoa de Piratinga nos principais cenários simulados. O termo “Jardins” refere-se ao projeto de Alagados Construídos, que inclui as bacias de sedimentação além dos Jardins Filtrantes.

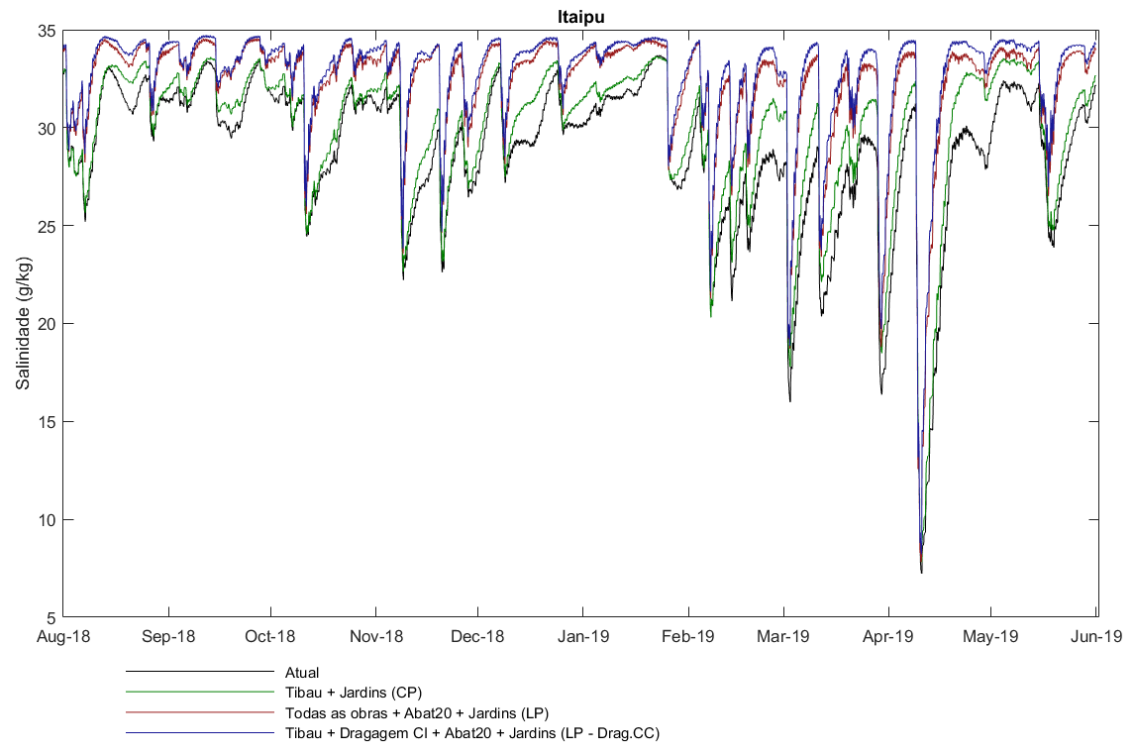


Figura 31: Salinidade da Lagoa de Itaipu nos principais cenários simulados. O termo “Jardins” refere-se ao projeto de Alagados Construídos, que inclui as bacias de sedimentação além dos Jardins Filtrantes.

A salinidade no Canal de Camboatá é bastante variável em todos os cenários. Por ser um ambiente bastante dinâmico, os valores de salinidade no Canal de Camboatá possuem forte oscilação ao longo do tempo e do espaço. Na extremidade mais próxima à Lagoa de Itaipu, as concentrações de salinidades se assemelham a esta lagoa e a extremidade oposta possui características mais similares à Lagoa de Piratininga. A Figura 32 apresenta a variação temporal da salinidade no meio Canal de Camboatá, com condições intermediárias em relação às suas extremidades. Na condição atual, os valores de salinidade no meio do Canal de Camboatá variam entre 0 g/Kg e 33 g/Kg, com valor médio de 20 g/Kg. A desobstrução do Túnel do Tibau de forma isolada (**HIDRO 05**) aumentaria a salinidade média no Canal de Camboatá para 25 g/Kg, porém com valores ainda oscilando entre 0 g/Kg a 33 g/Kg. Com a implantação de todas as obras (**HIDRO 04**), que inclui a dragagem do Canal de Camboatá, o aumento da salinidade média seria ainda maior, 29 g/Kg, e com valores variando entre 2 g/Kg a 34 g/Kg. A salinidade no cenário com dragagem do Canal de Itaipu associada à desobstrução do Túnel do Tibau (**HIDRO 07**) seria inferior ao cenário com a implantação de todas as obras, com concentração média de 27 g/Kg e valores variando entre 0 g/Kg e 34 g/Kg.

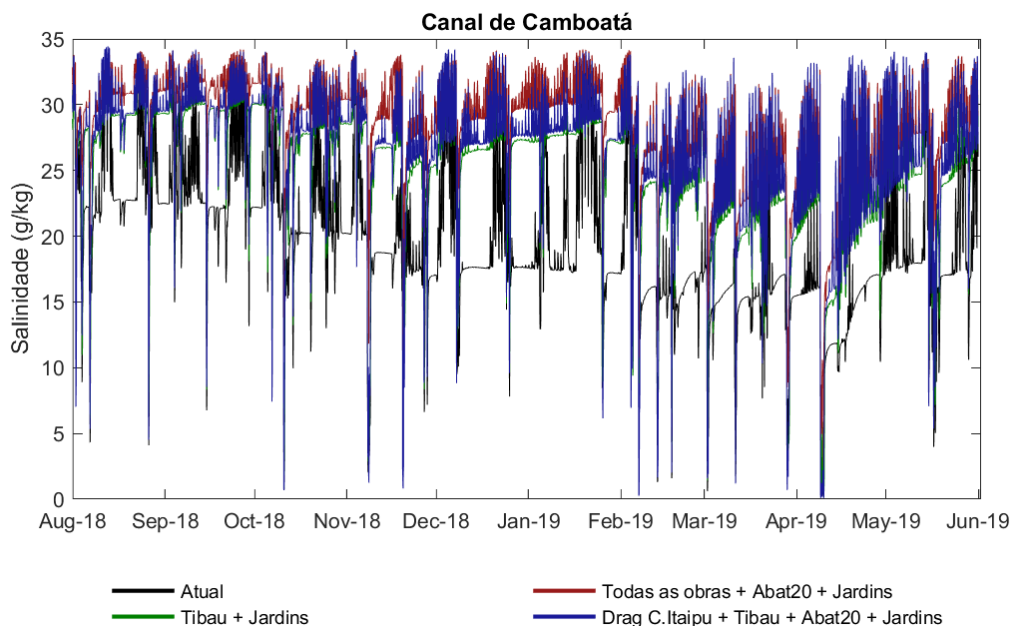


Figura 32: Salinidade no Canal de Camboatá nos principais cenários simulados. O termo “Jardins” refere-se ao projeto de Alagados Construídos, que inclui as bacias de sedimentação além dos Jardins Filtrantes.

Salinidades abaixo de 20 g/Kg são observadas na Lagoa de Piratininga em quase todo o período chuvoso no cenário atual e cerca de 90% do tempo nos demais cenários HIDRO 3 (Figura 34). No período seco, ambas as lagoas apresentam salinidade superior a 20 g/Kg durante todo o período, com exceção da Lagoa de Piratininga nos cenários atual, nos quais a salinidade supera 20 g/Kg somente 60% do tempo (Figura 33). Para o período total simulado, salinidades superiores a 20 g/Kg são observadas em ambas as lagoas em 100% do tempo nos cenários HIDRO 4, 5 e 7 (Figura 35).

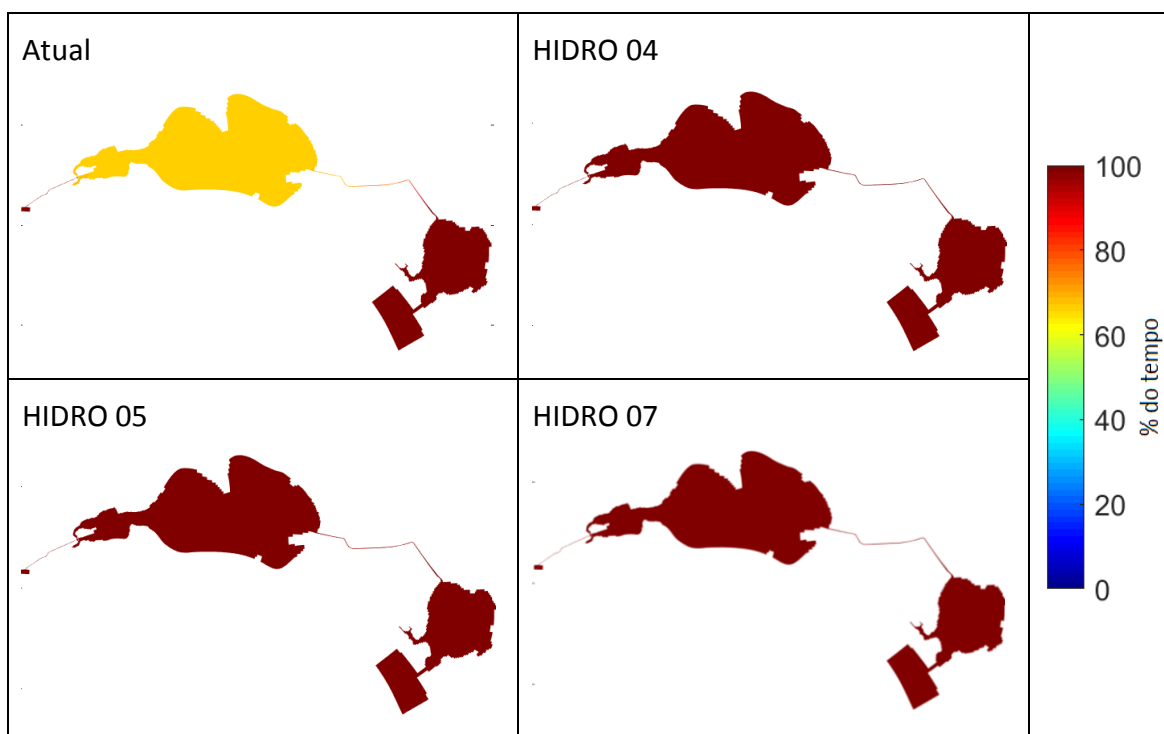


Figura 33: Tempo da permanência de salinidade superiora 20 g/Kg no período seco para os principais cenários simulados.

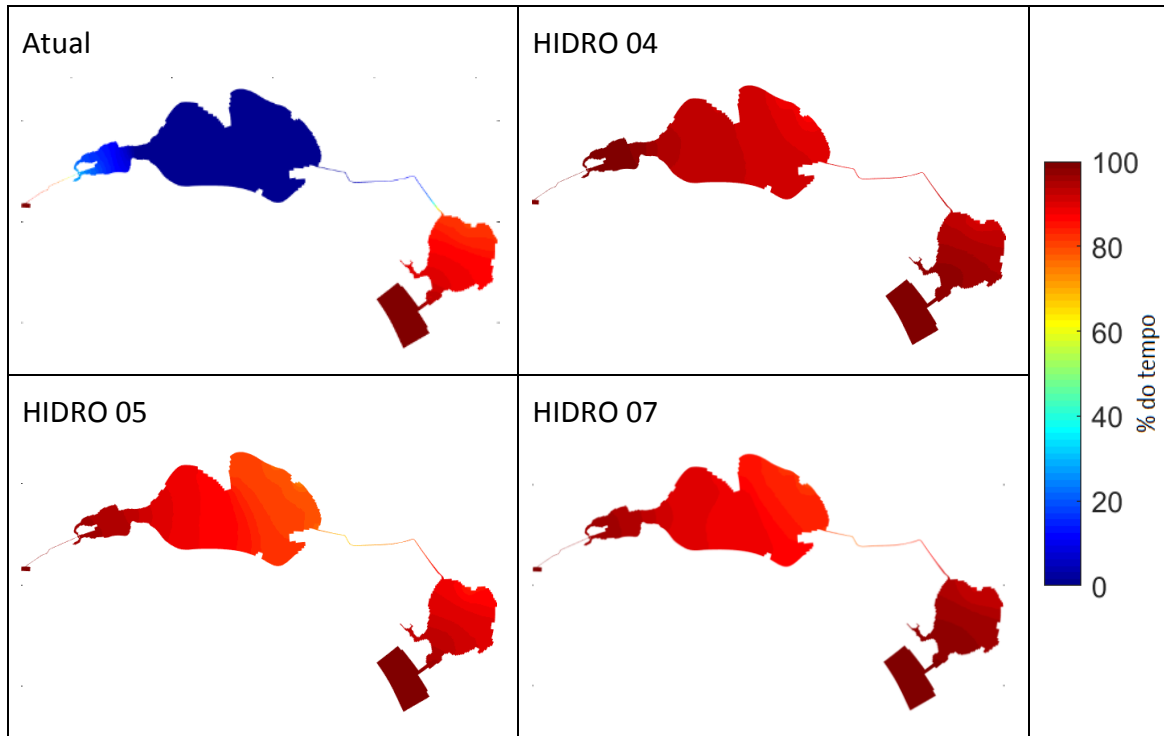


Figura 34: Tempo da permanência de salinidade superiora 20 g/Kg no período chuvoso para os principais cenários simulados.

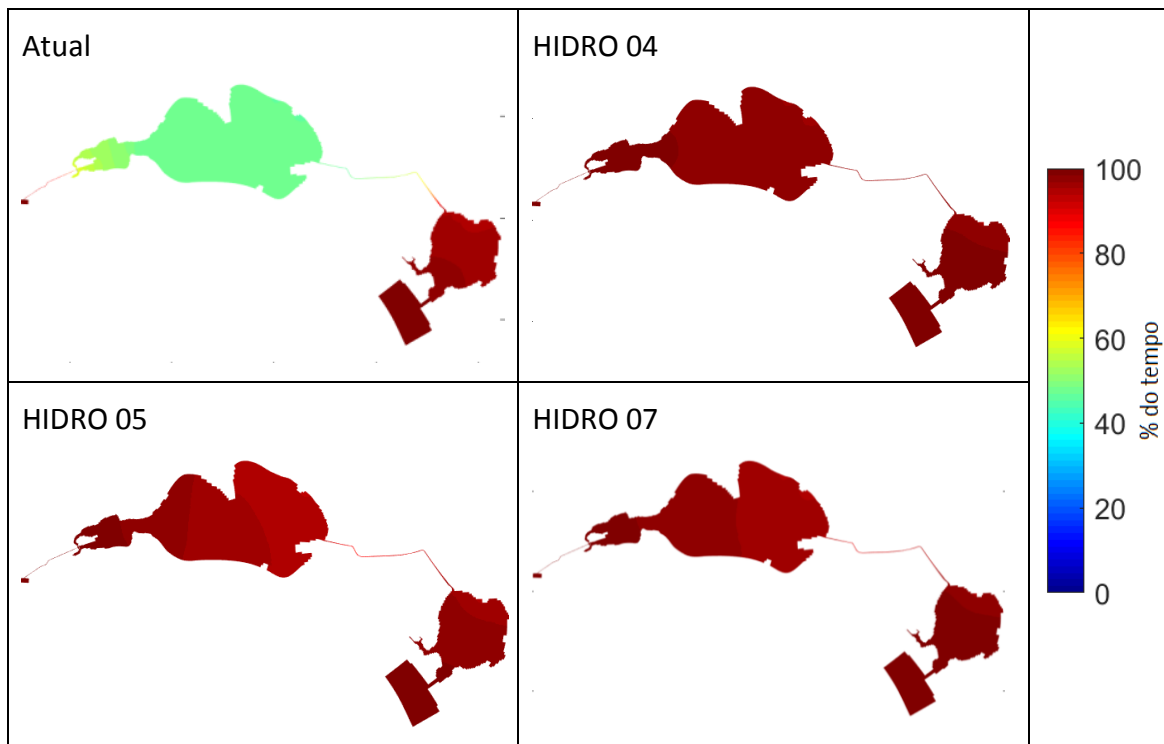


Figura 35: Tempo da permanência de salinidade superiora 20 g/Kg no ano todo para os principais cenários simulados.

Salinidade superior a 25 g/Kg não é observada na Lagoa de Piratininga no cenário atual em nenhum dos períodos e na Lagoa de Itaipu é observada em 100% do tempo. Os cenários **HIDRO 4, 5 e 7** apresentam salinidade superior a 25 g/Kg em todo o período seco para ambas as lagoas (Figura 36). No período chuvoso, o cenário que contempla todas as obras hidráulicas, **HIDRO 4**, exibe salinidade superior a 25 g/Kg em cerca de 90 % do tempo para a Lagoa de Itaipu e a região próxima ao Túnel do Tibau, mas somente 40 % do tempo para a região central da Lagoa de Piratininga (Figura 37). No cenário que contemplam a desobstrução do Túnel do Tibau isoladamente (**HIDRO 5**) a salinidade supera 25 g/Kg na Lagoa de Itaipu em cerca de 70% do tempo no período chuvoso e esse percentual aumenta para 90% caso a desobstrução seja realizada em combinação com a dragagem do Canal de Itaipu (Figura 37). Concentrações acima de 25 g/Kg na Lagoa de Piratininga a desobstrução do Túnel do Tibau isolada ou em conjunto com a dragagem de Itaipu seria igual com permanência de 100% no período seco, 10% no período chuvoso e 70% ao longo de todo o ano.

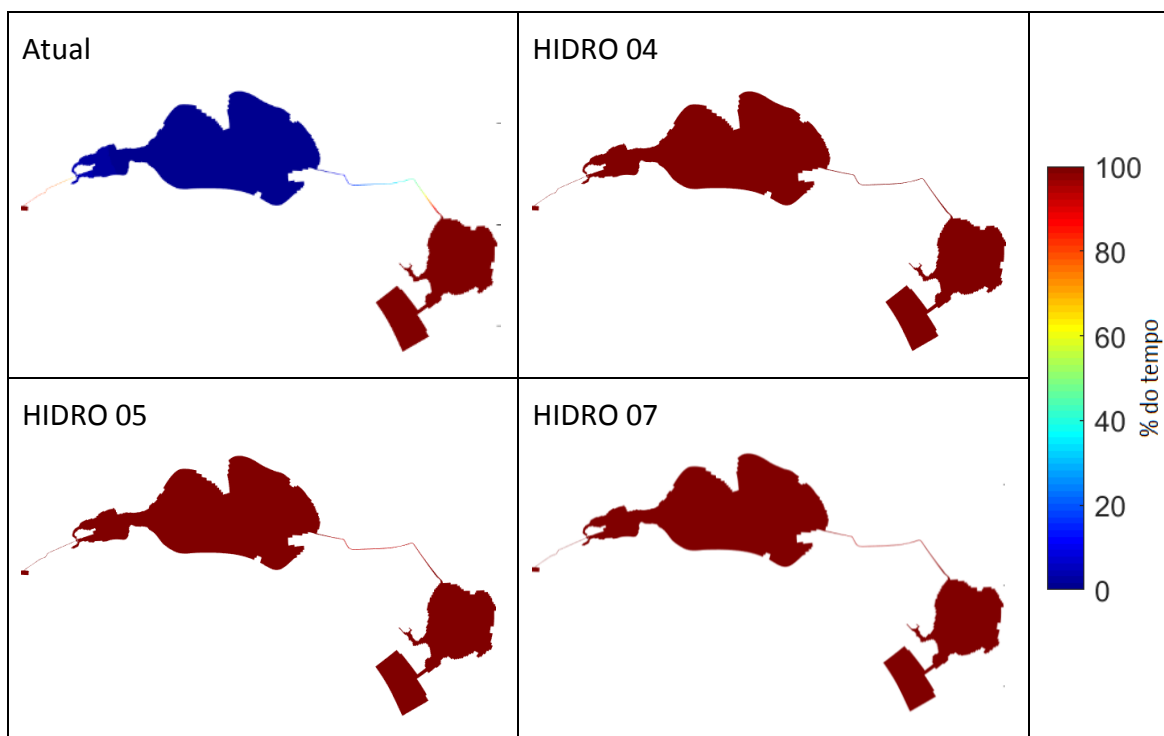


Figura 36: Tempo da permanência de salinidade superiora 25 g/Kg no período seco para os principais cenários simulados.

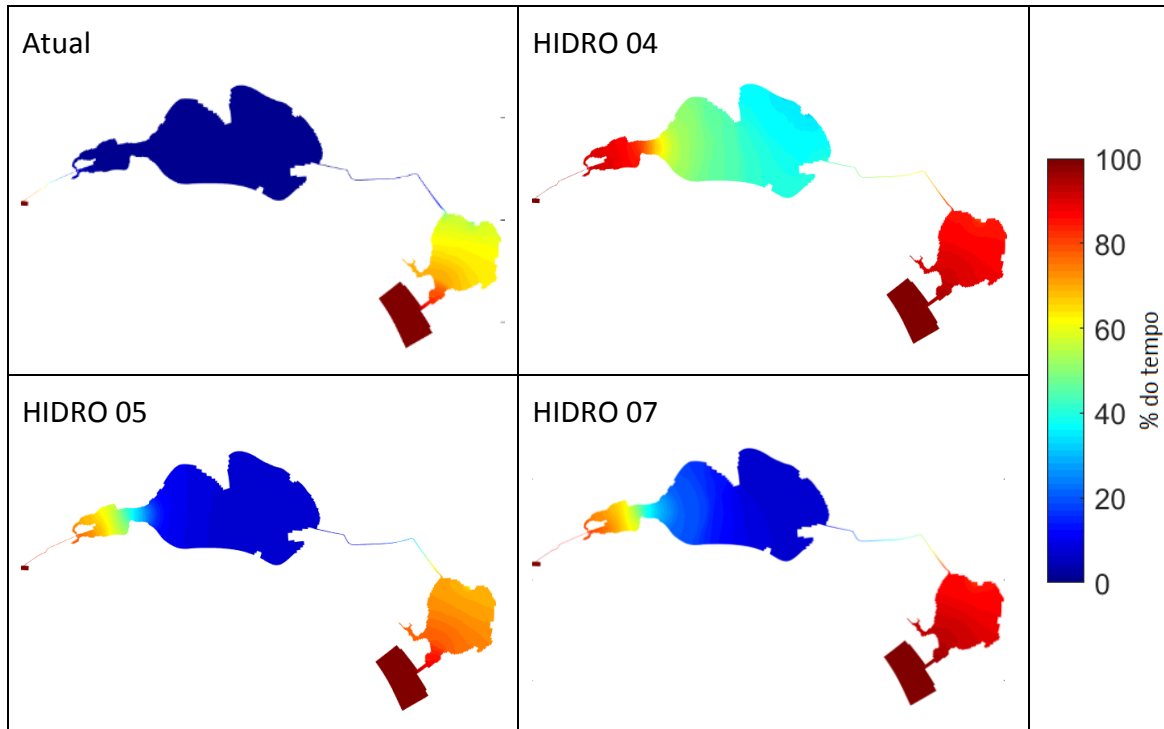


Figura 37: Tempo da permanência de salinidade superiora 25 g/Kg no período chuvoso para os principais cenários simulados.

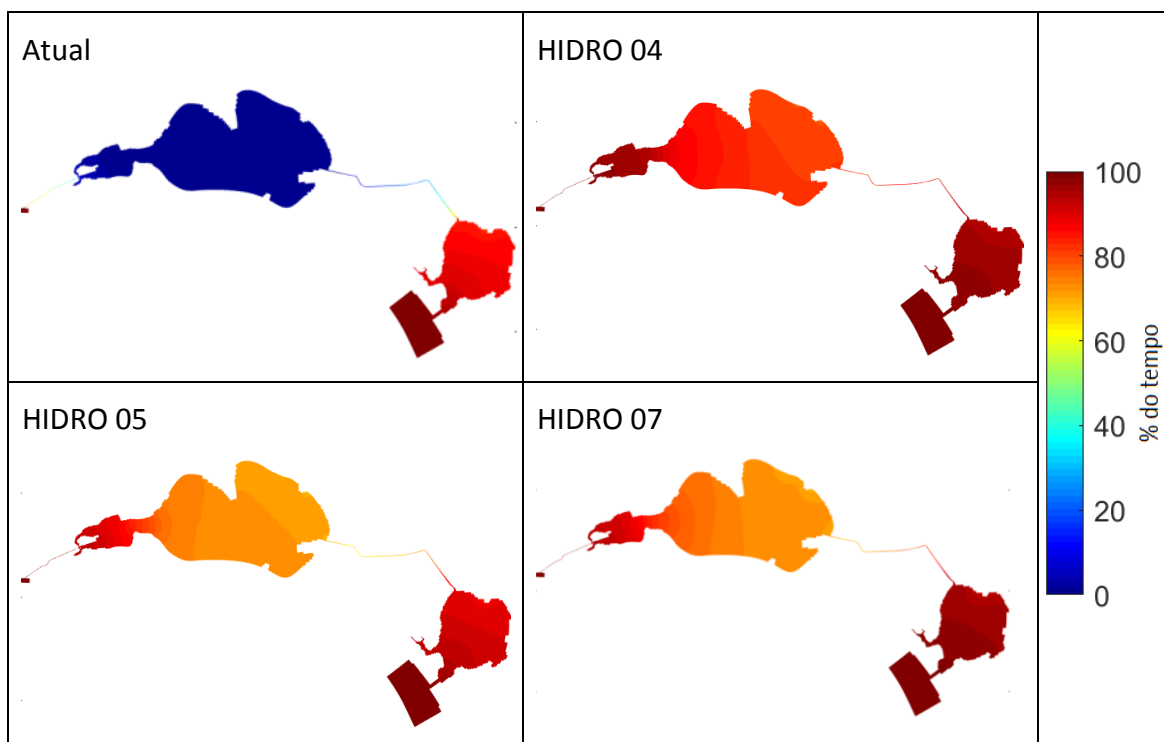


Figura 38: Tempo da permanência de salinidade superiora 25 g/Kg no ano todo para os principais cenários simulados.

A Lagoa de Piratininga apresenta salinidade superior a 30 g/Kg no cenário **HIDRO 04** com 80% e no **HIDRO 05** e **HIDRO 07** com aproximadamente 30% do tempo durante o período seco, sendo que no cenário atual não se observa valores acima de 30 g/Kg nem mesmo no período seco. Já a Lagoa de Itaipu em todos os cenários apresenta valores acima de 30 g/Kg em quase 100% do tempo seco (Figura 39).

No período chuvoso a Lagoa de Piratininga não ultrapassa valor de 30 g/Kg em nenhum dos cenários. Em Itaipu a permanência de salinidade acima de 30 g/Kg no cenário **HIDRO 04** é 70% no período chuvoso (Figura 40).

Em Piratininga a salinidade acima de 30 g/Kg poderia ser observada em até 30% no período seco e 10% ao longo de todo o ano para os cenários com desobstrução do Túnel do Tibau (**HIDRO 05** e **HIDRO 07**). Para o cenário de todas as obras, **HIDRO 04**, a permanência de salinidade acima de 30 g/Kg seria ainda maior na Lagoa de Piratininga, com 80% do tempo no período de estiagem e 40% do tempo ao longo de todo ano (Figura 39, Figura 40 e Figura 41).

Na Lagoa de Itaipu, os cenários que contemplam a dragagem do canal de Itaipu (**HIDRO 04** e **07**) exibem salinidade superior a 30 g/Kg em cerca de 90 % de todo o período simulado e 70% no período chuvoso (Figura 40 e Figura 41). Já o cenário **HIDRO 05** apresenta percentual de 60% do tempo acima de 30 g/Kg ao longo de todo o ano na Lagoa de Itaipu, sendo que no cenário atual esse percentual é de 50% nessa lagoa (Figura 41).

De forma geral, os resultados do cenário **HIDRO 07** demonstram que a salinidade na Lagoa de Itaipu é similar ao cenário **HIDRO 04** e que na Lagoa de Piratininga os resultados do cenário **HIDRO 07** se aproximam dos resultados do **HIDRO 05**. Isso só confirma que a dragagem no Canal de Itaipu é a obra mais relevante para a Lagoa de Itaipu e que na Lagoa de Piratininga a desobstrução do Túnel do Tibau é a obra que mais traz efeitos importantes sobre a hidrodinâmica, o tempo de residência os níveis de água e também a salinidade para essa lagoa.

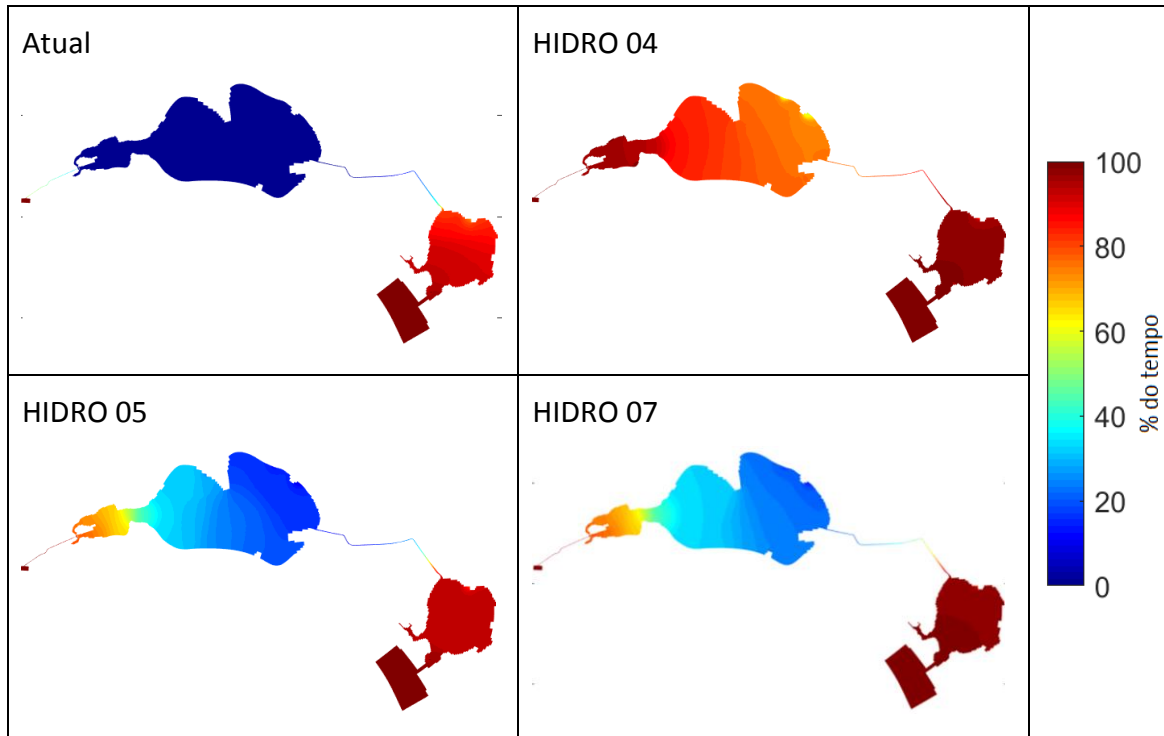


Figura 39: Tempo da permanência de salinidade superiora 30 g/Kg no período seco para os principais cenários simulados.

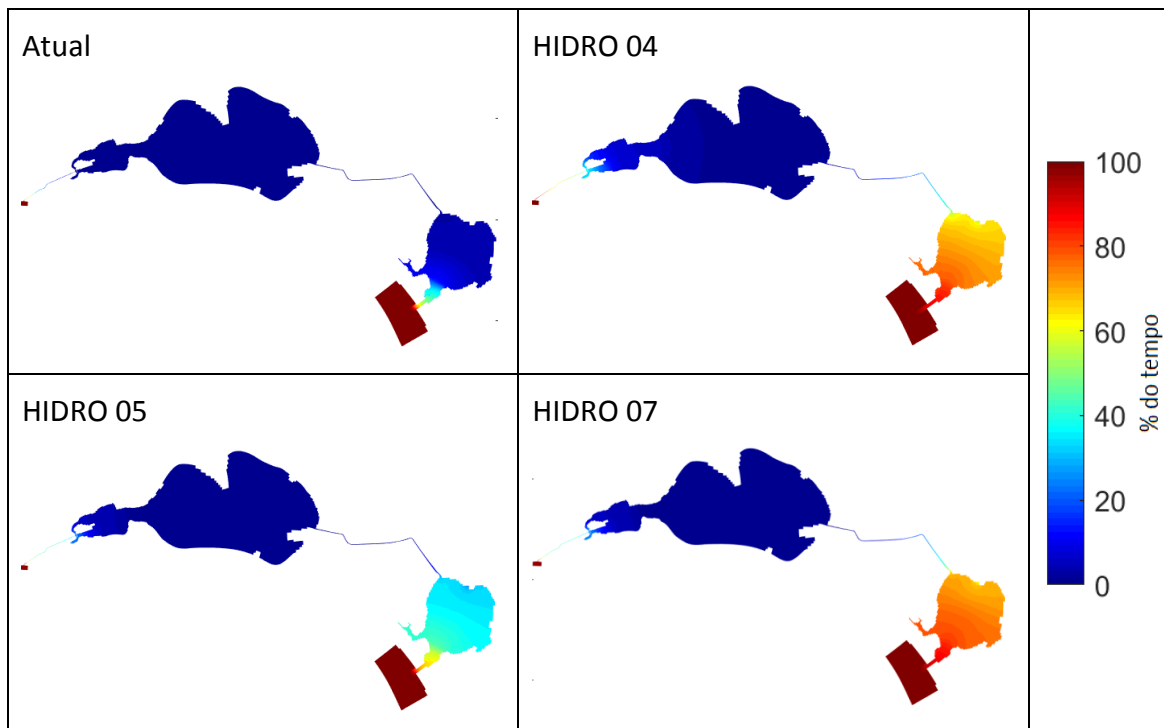


Figura 40: Tempo da permanência de salinidade superiora 30 g/Kg no período chuvoso para os principais cenários simulados.

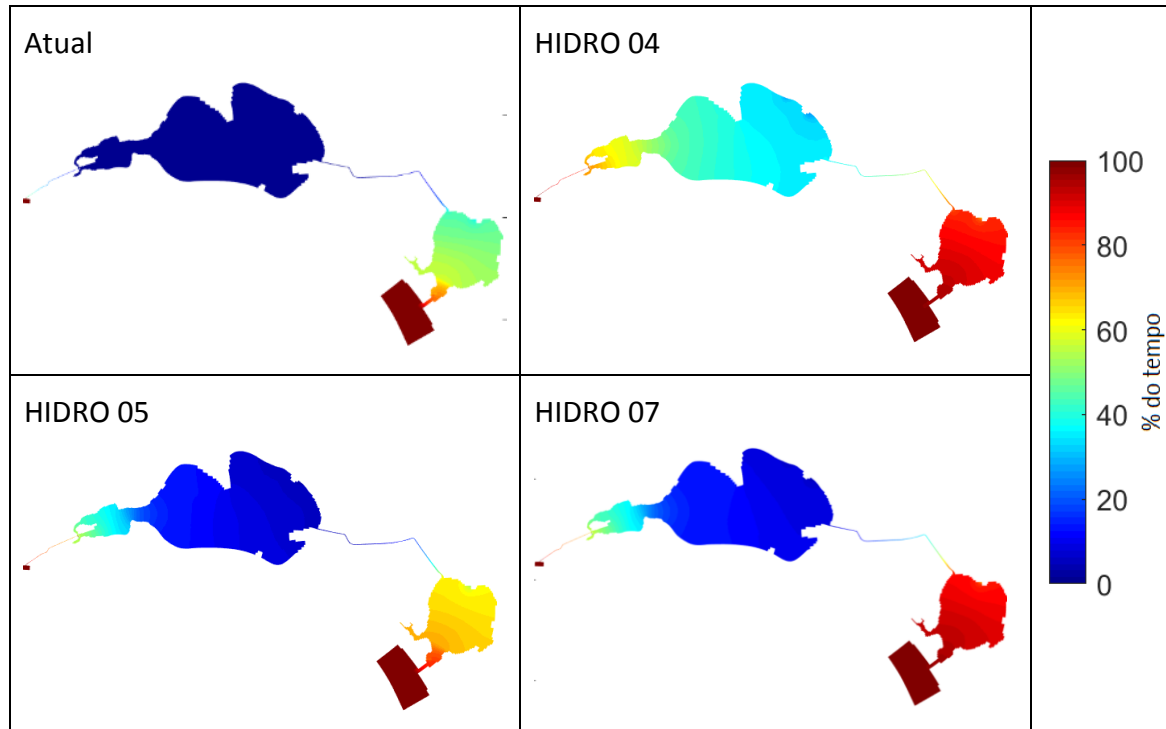


Figura 41: Tempo da permanência de salinidade superiora 30 g/Kg no ano todo para os principais cenários simulados.

5.1.2. COT

O limite máximo de COT para águas salinas e salobras de classe 1 é de 3,0 mg/L, e para águas de classe 2 é de 5,0 mg/L. No cenário atual, a Lagoa de Piratininga permanece acima de 3,0 mg/L ao longo de todo o ano e acima de 5,0 mg/L durante todo o período de estiagem (Figura 42 e Figura 45). No cenário atual, a Lagoa de Itaipu tem concentrações de COT acima de 3,0 mg/L durante aproximadamente 60% do tempo ao longo de todo o ano simulado (Figura 43 e Figura 45).

A implantação das obras já previstas num curto prazo, os Alagados Construídos (jardins filtrantes e bacias de sedimentação) em conjunto com a desobstrução do Túnel do Tibau, reduziria de forma expressiva a concentração de COT em ambas as lagoas, mas principalmente na Lagoa de Piratininga (Figura 42, Figura 43 e Figura 45). Em Itaipu a redução seria pequena, porém suficiente para permanecer com valores um pouco abaixo de 3 mg/L na maior parte do tempo (Figura 43).

O cenário de todas as obras hidráulicas em conjunto com abatimento de 20 % e a implantação dos Alagados Construídos resultaria em concentrações máximas de COT

próximas de 2,5 mg/L na Lagoa de Itaipu, e concentrações abaixo de 3,0 mg/L na Lagoa de Piratininga em quase todo o período simulado, com exceção dos primeiros dias de agosto de 2018. Resultados semelhantes são alcançados nos cenários com a dragagem do Canal de Itaipu, desobstrução do Túnel do Tibau, implantação dos Alagados Construídos e abatimento de 20% ou 40%. Esses resultados demonstram que a dragagem do Canal do Camboatá e o aumento do abatimento da carga de 20% para 40% pouco influenciaria nas concentrações de COT das duas lagoas (Figura 42 e Figura 43).

A retirada do lançamento dos efluentes das ETEs no sistema lagunar traria redução considerável nas concentrações de COT em ambas as lagoas. Em Piratininga, a redução da concentração seria equivalente ao cenário de abatimento de carga de 70% nas bacias. Em Itaipu, a concentração média de COT seria reduzida ainda mais, com concentrações máximas inferior a 2 mg/L e média de 1,6 mg/L. O abatimento de carga de 70% e 80% em conjunto com as obras já previstas também reduziriam significativamente as concentrações de COT nas duas lagoas, porém em Itaipu a concentração média ainda seria superior em relação ao cenário sem ETE (Figura 43).

No meio do Canal de Camboatá as concentrações de COT são bastante elevadas devido às concentrações da Lagoa Piratininga que passam por esse canal e também ao lançamento das ETEs. Além do cenário atual, o cenário que apresentou concentração média de COT acima do limite de classe 1 foi o cenário que considera apenas as obras já em fase de execução, que inclui a desobstrução do Túnel de Tibau em conjunto a implantação do projeto dos Alagados Construídos. Os demais cenários apresentam valor médio próximo a 3mg/L, porém a maioria deles apresentam concentrações acima de 3 mg/L em diversos momentos (Figura 44). Os únicos cenários que mantêm as concentrações de COT abaixo de 3 mg/L ao longo do todo o tempo é o cenário que considera a retirada o lançamento das ETEs e o cenário que considera a dragagem do Canal de Camboatá em conjunto com demais obras hidráulicas e com o abatimento de carga de 20% e implantação do projeto dos Alagados Construídos (Figura 45).

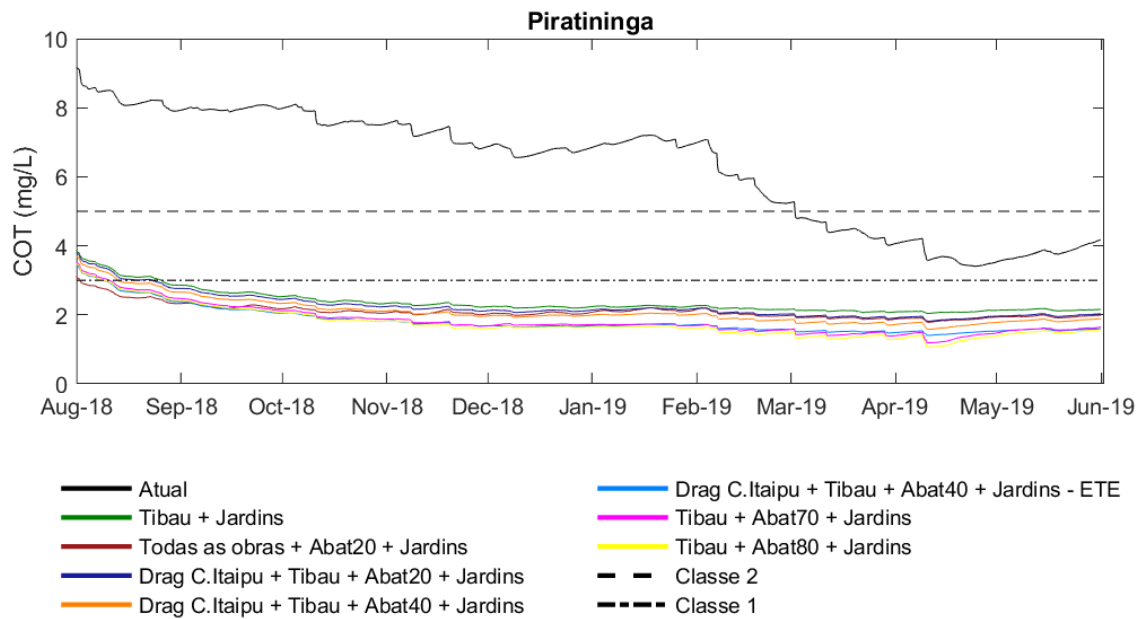


Figura 42: COT na Lagoa de Piratininga simulado nos principais cenários. O termo “Jardins” refere-se ao projeto de Alagados Construídos, que inclui as bacias de sedimentação além dos Jardins Filtrantes.

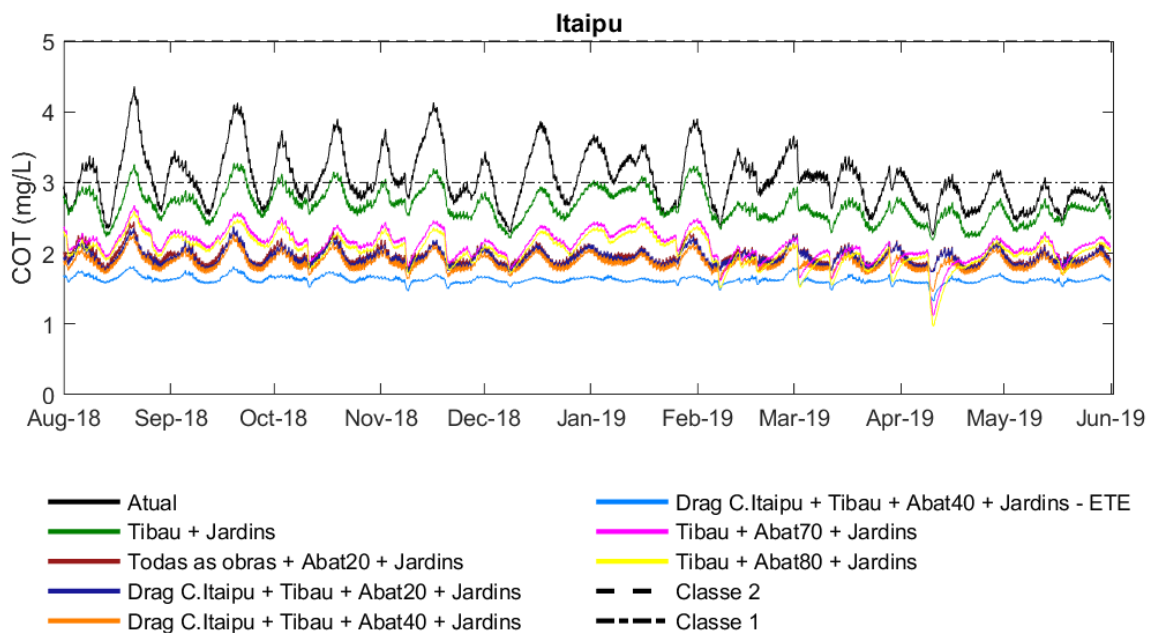


Figura 43: COT na Lagoa de Itaipu simulado nos principais cenários. O termo “Jardins” refere-se ao projeto de Alagados Construídos, que inclui as bacias de sedimentação além dos Jardins Filtrantes.

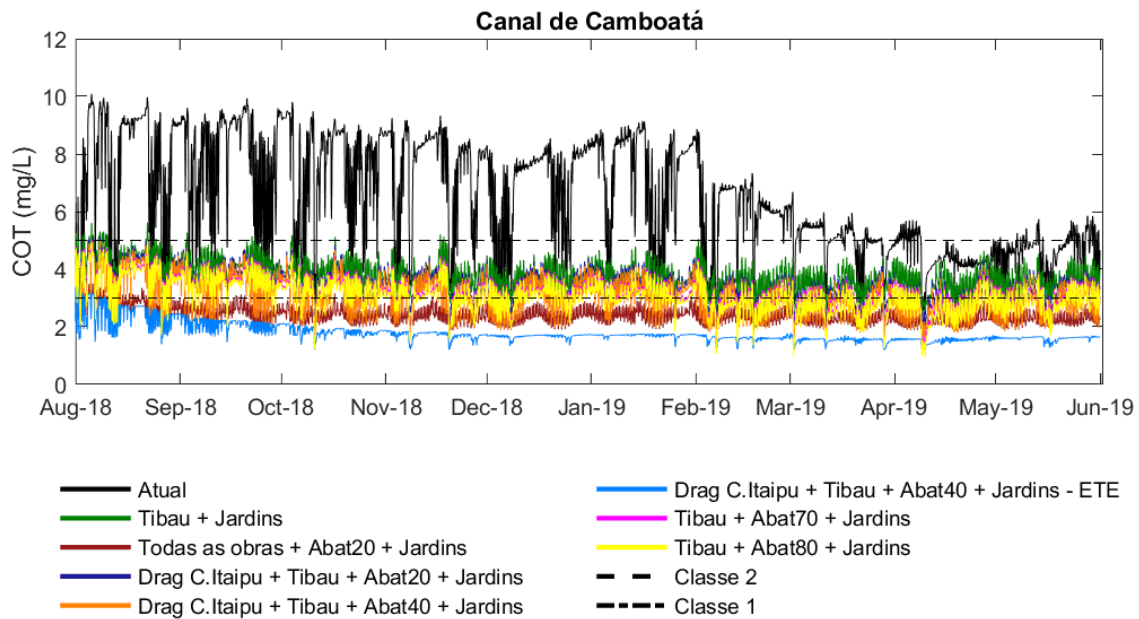


Figura 44: COT no Canal de Camboatá simulado nos principais cenários. O termo “Jardins” refere-se ao projeto de Alagados Construídos, que inclui as bacias de sedimentação além dos Jardins Filtrantes.

A Figura 45 apresenta o tempo, em termos percentuais, em que o COT ultrapassou o valor limite de Classe I, 3 mg/L, ao longo de todo o ano. Como mencionado anteriormente, a implantação das obras já previstas, desobstrução do Túnel do Tibau e implantação de Alagados Construídos, seriam suficientes para enquadrar ambas as lagoas em Classe I. Porém, o COT no Canal de Camboatá seria enquadrado ao longo de todo tempo caso houvesse também a dragagem desse canal ou a retirada do lançamento da ETE Camboinhas nesse canal. Nos demais cenários, haveria concentrações acima de 3 mg/L em torno de 60% a 90% do tempo na região próxima ao ponto de lançamento da ETE Camboinhas.

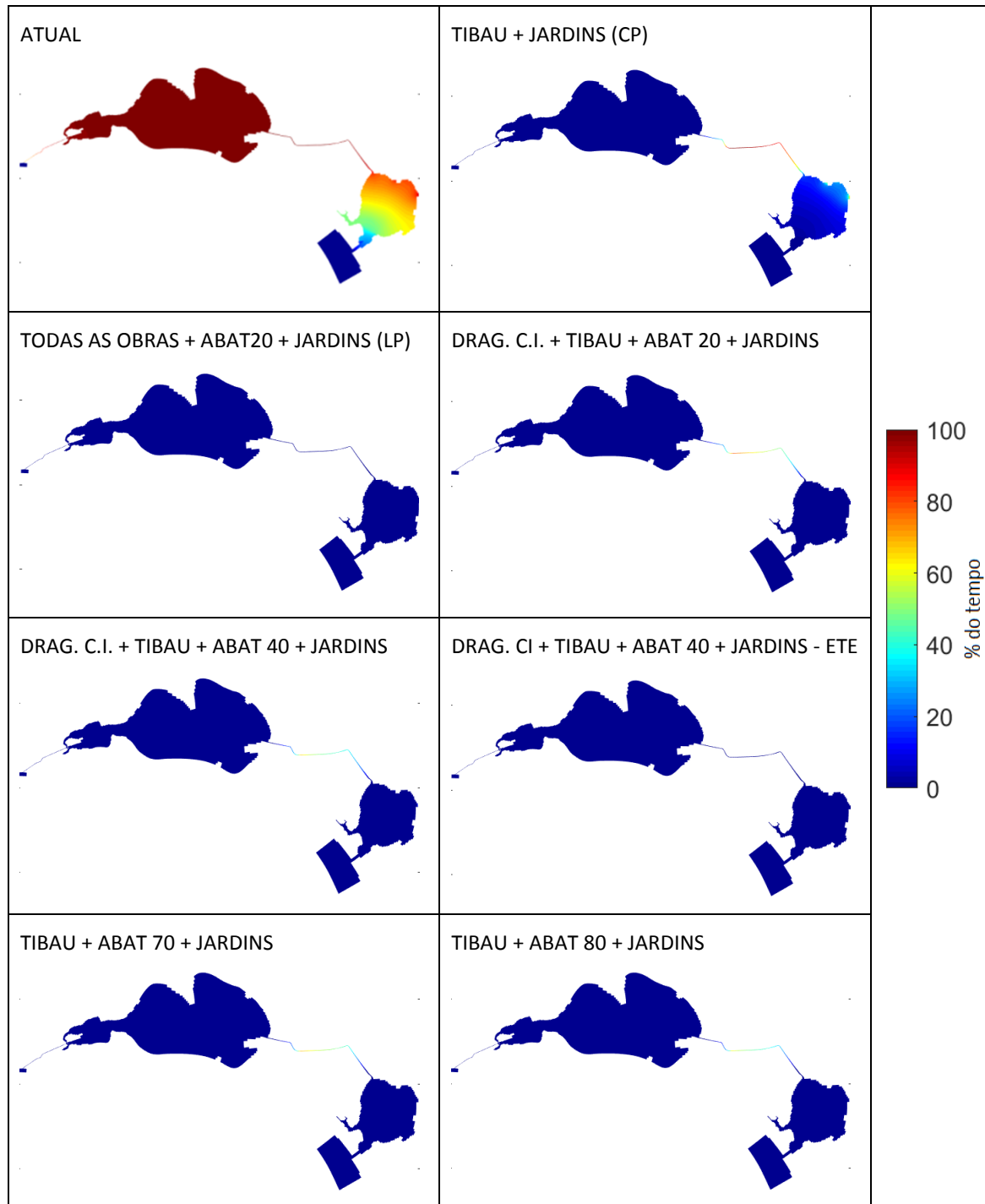


Figura 45: Tempo da permanência de concentrações de COT superiores a 3,0 mg/L no ano todo para os principais cenários. O termo “Jardins Filtrantes” refere-se ao projeto de Alagados Construídos, que inclui as bacias de sedimentação além dos Jardins Filtrantes.

5.1.3. Fósforo total

Os limites máximos de fósforo total preconizados pela resolução CONAMA 357/05 que levam em consideração o tempo de residência se aplicam apenas para águas doces. As águas salobras e salinas possuem um único limite de fósforo para cada classe, independentemente do tempo de residência, tal como mostra o quadro abaixo. Esta é uma limitação da referida resolução e que deve ser ponderada, já que em ambientes estuarinos estrangulados ou com significativa heterogeneidade espacial, como a Lagoa de Piratininga, podem ocorrer condições específicas de salinidade e tempo de residência que tornam o ambiente tipicamente lântico e mais sensível. Além disso, os limites de fósforo para águas salobras são menos restritivos que de água doce e água salina, conforme apresentado a seguir.

Quadro 5: Limites de fósforo total segundo a Resolução CONAMA 357/05.

Tipo	Classe	Caracterização do ambiente quanto o tempo de residência	Valor máximo
Água Doce (Salinidade < 0,5 ‰)	I	Lântico ¹	0,020 mg/L
		Intermediário ² e tributário de ambiente lântico	0,025 mg/L
		Lótico ³	0,100 mg/L
	II	Lântico ¹	0,030 mg/L
		Intermediário ² e tributário de ambiente lântico	0,050 mg/L
		Lótico ³	0,100 mg/L
Água Salobra (0,5 ‰ < Salinidade < 30 ‰)	I	-	0,124 mg/L
	II	-	0,186 mg/L
Água Salina (Salinidade > 30 ‰)	I	-	0,062 mg/L
	II	-	0,093 mg/L

¹ Ambiente com tempo de residência menor que dois dias

² Ambiente com tempo de residência entre 2 a 40 dias

³ Ambiente com tempo de residência maior que 40 dias

De acordo com bibliografia especializada (OECD, 1982; Hakanson and Jansson, 1983; Hakanson and Boulion, 2002; Hakanson et al., 2006), ambientes com salinidade superior a 20‰, como é o caso da Lagoa de Piratininga, concentrações de fósforo acima de 0,04 mg/L são consideradas tipicamente eutróficas (Figura 46). Portanto, ambientes com tais concentrações estão propensos à ocorrência de florações de cianobactérias potencialmente tóxicas, conforme se observa frequentemente, no verão, em Piratininga.

A. Fresh water systems, salinity < 5‰					
Trophic level	Secchi* (m)	Chl-a (µg/l)	Total-N (µg/l)	Total-P (µg/l)	Cyanobacteria** (µg ww/l)
Oligotrophic	>5	<2	<60	<8	<2.2
Mesotrophic	3-5	2-6	60-180	8-25	2.2-250
Eutrophic	1-3	6-20	180-430	25-60	250-1400
Hypertrophic	<1	>20	>430	>60	>1400
B. Brackish systems, salinity 5-20‰					
Oligotrophic	>8	<2	<70	<10	<9.5
Mesotrophic	4.5-8	2-6	70-220	10-30	9.5-380
Eutrophic	1.5-4.5	6-20	220-650	30-90	380-2500
Hypertrophic	<1.5	>20	>650	>90	>2500
C. Marine systems, salinity >20‰					
Oligotrophic	>11	<2	<110	<15	<55
Mesotrophic	6-11	2-6	110-290	15-40	55-680
Eutrophic	2-6	6-20	290-940	40-130	680-4040
Hypertrophic	<2	>20	>940	>130	>4040

Relationships between chlorophyll, TP, TN and salinity calculated from Håkanson (2006).
* Secchi depth calculated from Håkanson (2006), see table 9.
** Concentration of cyanobacteria (CB) calculated from our model when TP/TP is set to 15, surface water temperature to 17.5 °C and the salinity to 2.5, 12.5 and 36, respectively for fresh water, brackish and marine systems.

Figura 46: Níveis tróficos para diferentes concentrações de fósforo e salinidade. Fonte: OECD, 1982; Hakanson and Jansson, 1983; Hakanson and Boulion, 2002; Hakanson et al., 2006.

Diante do exposto, sugere-se a adoção de um limite máximo desejável de concentração de fósforo total equivalente a **0,04 mg/L** para a Lagoa de **Piratininga**, como forma de controlar os sintomas da eutrofização nessa lagoa, como florações e cianobactérias e queda de oxigênio. Já na **Lagoa de Itaipu** pode-se adotar o limite tal como preconiza a resolução CONAMA 357/05, máximo de **0,124 mg/L**, devido ao baixo tempo de residência e salinidade média de 29 g/kg, caracterizado como ambiente salobro com elevada troca de água com o mar.

Na simulação do cenário atual, as concentrações de fósforo total da Lagoa de Piratininga ultrapassam o limite recomendado e os limites da Resolução CONAMA 357/05 de águas salobras classe 1 e 2 em todo o período simulado (Figura 47). Na Lagoa de Itaipu as concentrações de fósforo do cenário atual também são superiores ao limite de classe 1 de águas salobras em grande parte do tempo e de classe 2 em alguns períodos, como pode ser visto na Figura 48.

Com a implantação apenas das obras já previstas e em fase de execução, Alagados Construídos (Jardins Filtrantes e as bacias de sedimentação) e a desobstrução do Túnel do Tibau, a concentração de fósforo na Lagoa de Piratininga já seria reduzida consideravelmente. No entanto, esse valor ainda seria bastante elevado e distante do

limite recomendado de 0,04 mg/L. Este cenário também não mudaria de forma expressiva as concentrações de fósforo na Lagoa de Itaipu, e valores acima de 0,124 mg/L seria observados durante aproximadamente 60% do tempo (Figura 50).

No cenário com a implantação dos Alagados Construídos e o abatimento de 20% da carga em conjunto com todas as obras hidráulicas as concentrações de fósforo em Itaipu oscilariam entre 0,05 e 0,12 mg/L, sendo suficiente para enquadrar a concentração de fósforo em Itaipu (Figura 48). Nesse cenário, a Lagoa de Piratininga apresentaria concentrações inferiores ao limite máximo para água salobra de classe 1 (Figura 47), mas não seria capaz de alcançar concentrações abaixo do limite recomendado. Quando se compara este cenário de todas as obras hidráulicas, em conjunto com a implantação dos Alagados Construídos e o abatimento de 20% da carga nas bacias, com o cenário excluindo apenas a dragagem do Canal de Camboatá, observa-se que a dragagem do Canal de Camboatá ajuda a reduzir um pouco as concentrações de fósforo na Lagoa de Piratininga, porém alcançando ainda valores insatisfatórios e acima do limite recomendado (Figura 47). No caso da Lagoa de Itaipu a dragagem do Canal de Camboatá pouco interfere na concentração de fósforo nessa lagoa (Figura 48). Caso haja um aumento de batimento de carga nas bacias de 20% para 40% em conjunto com a implantação dos Alagados Construídos, desobstrução do Tibau e dragagem do Canal de Itaipu se observaria uma leve redução de fósforo em ambas as lagoas (Figura 47 e Figura 48).

A retirada dos lançamentos das ETEs traz um efeito bastante positivo para as concentrações de fósforo nas lagoas, principalmente em Itaipu. Na comparação dos resultados entre os cenários observa-se que há uma redução de 22% do valor médio da concentração de fósforo em Piratininga e de 42% dos valores médios e mínimos de fósforo encontrados na Lagoa de Itaipu. Os valores de fósforo em Itaipu sem ETE em conjunto com a dragagem do Canal de Itaipu, desobstrução do Tibau, abatimento de 40% de carga nas sub-bacias e implantação dos Alagados Construídos tiveram quedas expressivas, chegando a valores inferiores a 0,04 mg/L em pelo menos 80% do tempo (Figura 51). Já em Piratininga este cenário não promoveria enquadramento do fósforo.

Caso não seja realizada mais nenhuma outra intervenção além daquelas já previstas, desobstrução do Túnel do Tibau e implantação dos Alagados Construídos, é necessário que sejam realizadas ações visando o abatimento de 80% das cargas que são geradas nas bacias da Lagoa de Piratininga de modo a enquadrar as concentrações de fósforo (Figura 47). Já na Lagoa de Itaipu será necessário abater 70% das cargas das bacias contribuintes caso não haja nenhuma outra intervenção além daquelas obras já previstas em Piratininga, desobstrução do Túnel do Tibau e implantação dos Alagados Construídos (Figura 48). Porém, caso seja realizada a dragagem do Canal de Itaipu seria necessário abater apenas 20% das cargas geradas nas bacias.

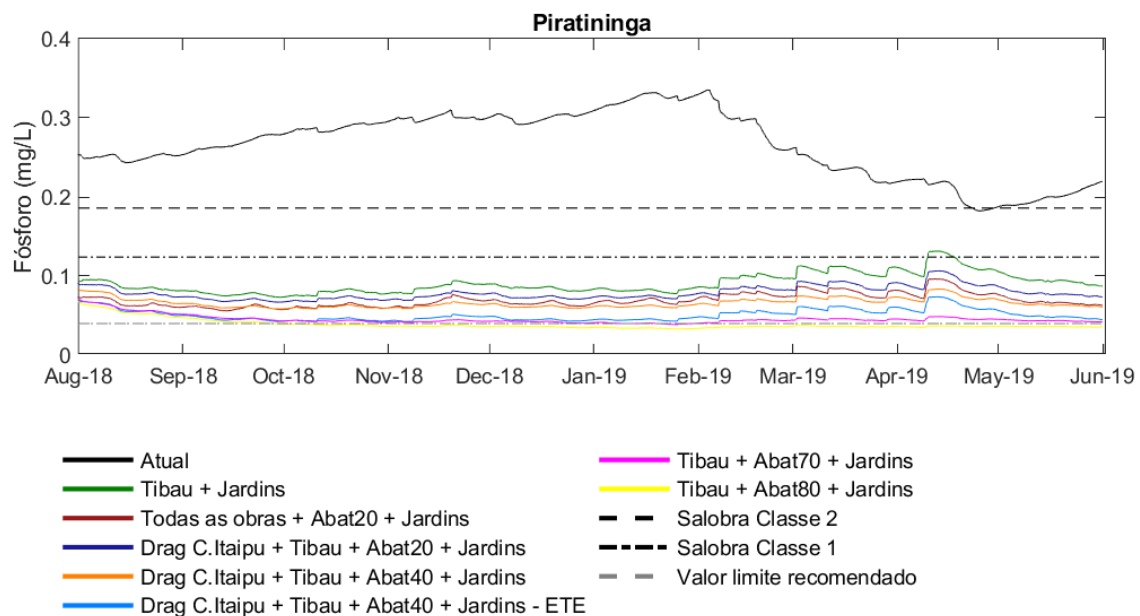


Figura 47: Fósforo total na Lagoa de Piratininga para os principais cenários simulados. O termo “Jardins” refere-se ao projeto de Alagados Construídos, que inclui as bacias de sedimentação além dos Jardins Filtrantes.

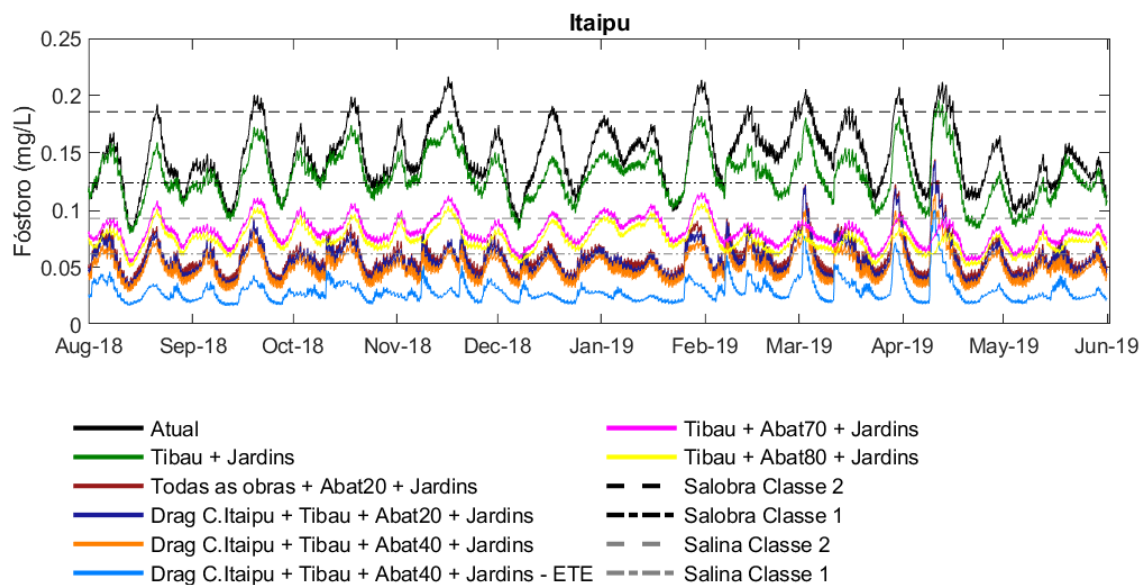


Figura 48: Fósforo total na Lagoa de Itaipu para os principais cenários simulados. O termo “Jardins” refere-se ao projeto de Alagados Construídos, que inclui as bacias de sedimentação além dos Jardins Filtrantes.

No Canal de Camboatá as concentrações de fósforo são bastante elevadas devido às concentrações das lagoas e também ao lançamento da ETE Cambinhas. Com a implantação das obras previstas e em fase de execução, a concentração de fósforo na Lagoa de Piratininga terá redução expressiva, refletindo na queda do fósforo também no Canal de Camboatá, com valor médio 0,2 mg/L e máximo de 0,3 mg/L, representando reduções de aproximadamente 35% no Canal de Camboatá (Figura 49). No entanto, ainda assim serão concentrações acima do valor limite para águas salobras de Classe 1 (0,124 mg/L). Com a implantação de todas as obras, incluindo a dragagem do Canal de Camboatá e o abatimento de 20% e a implantação do projeto dos Alagados Construídos, as concentrações de fósforo no Canal permaneceriam abaixo do limite na maior parte do tempo (Figura 50). Outro cenário que apresentou concentração de fósforo abaixo do valor limite ao longo de todo o período simulado foi o cenário com retirada do lançamento da ETE em conjunto com outras intervenções (Figura 49 e Figura 50). Os cenários que consideraram a implantação das obras já em fase de execução em conjunto com o abatimento de 70% e 80% da carga apresentaram valor médio de fósforo próximo de 0,124 mg/L, porém com permanência de concentrações excedentes ao limite em até 60% do tempo para o

abatimento de carga de 70% e até 40% do tempo para o abatimento de 80% da carga (Figura 50).

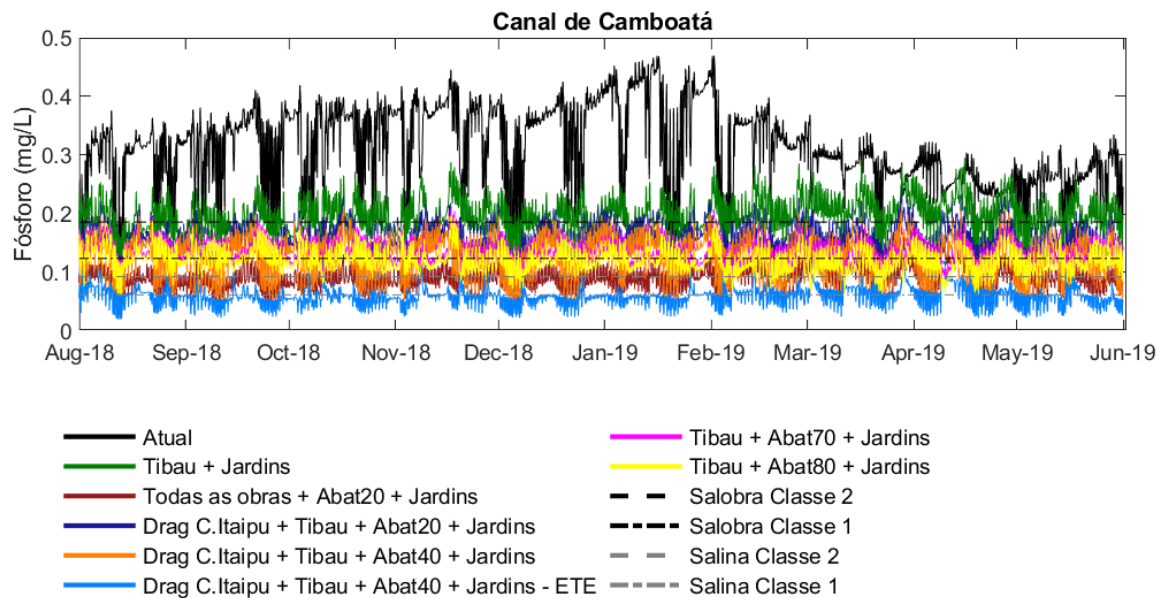


Figura 49: Fósforo total no Canal de Camboatá para os principais cenários simulados. O termo “Jardins” refere-se ao projeto de Alagados Construídos, que inclui as bacias de sedimentação além dos Jardins Filtrantes.

A Figura 50 apresenta o percentual do tempo ao longo de um ano em que o fósforo esteve acima 0,124 mg/L, limite de classe I para água salobra, a ser aplicado na Lagoa de Itaipu e a Figura 51 apresenta a permanência de valores acima de 0,04 mg/L, limite recomendado para Piratininga.

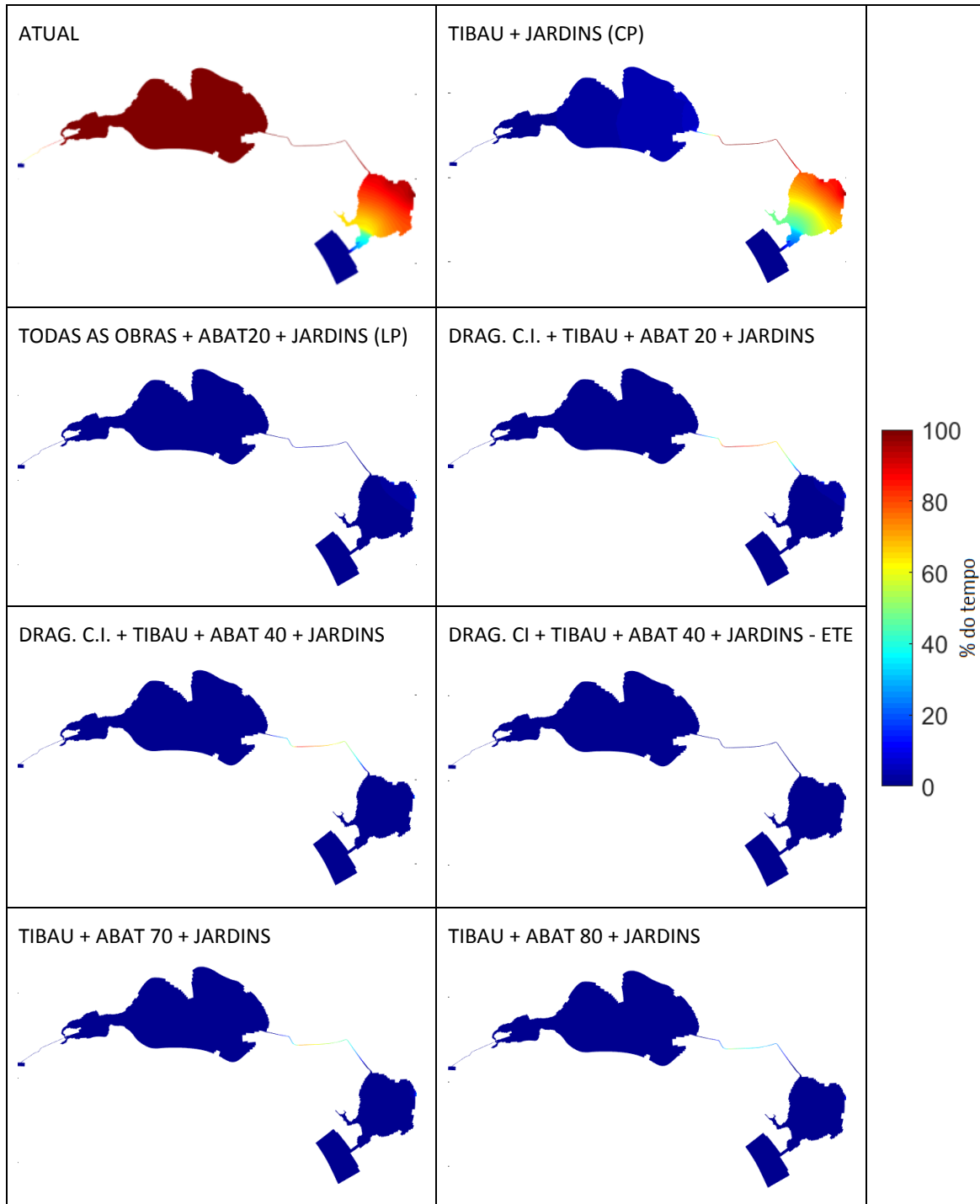


Figura 50: Tempo da permanência de concentrações de fósforo total superiores a 0,124 mg/L (limite Classe I de água salobra) no ano todo para os principais cenários simulados. O termo “Jardins Filtrantes” refere-se ao projeto de Alagados Construídos, que inclui as bacias de sedimentação além dos Jardins Filtrantes.

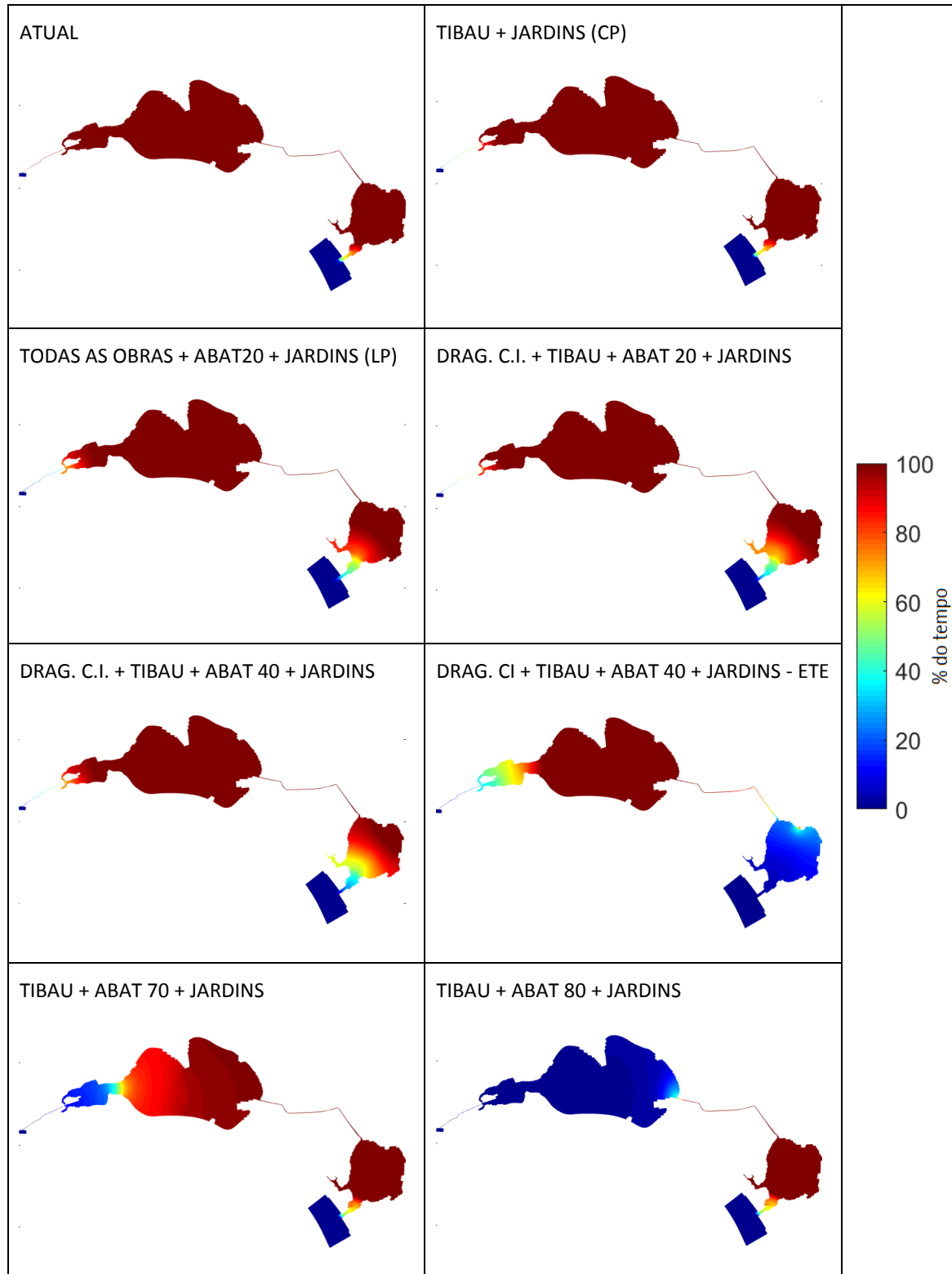


Figura 51: Tempo da permanência de concentrações de fósforo total superiores a 0,04 mg/L (limite recomendado para a Lagoa de Piratininga) no ano todo para os principais cenários simulados. O termo “Jardins Filtrantes” refere-se ao projeto de Alagados Construídos, que inclui as bacias de sedimentação além dos Jardins Filtrantes.

5.1.4. Amônia

Os limites máximos de amônia para águas salinas e salobras de classe 1 e 2 são 0,40 mg/L e 0,70 mg/L, respectivamente. No cenário atual, de acordo com a simulação, as concentrações de amônia da Lagoa de Piratininga se mantem acima de 0,4 mg/L em boa parte do tempo, variando entre 0,4 mg/L a 0,8 mg/L na Lagoa de Itaipu (Figura 52 e Figura 53).

A implantação dos Alagados Construídos em conjunto com a desobstrução do Túnel do Tibau apresentou queda expressiva na concentração de amônia na Lagoa de Piratininga, sendo suficiente para mantê-la enquadrada em classe I em aproximadamente 95% do tempo (Figura 55). Porém, como essas obras já previstas se restringem à lagoa de Piratininga, não se observa queda significativa de amônia na Lagoa de Itaipu neste cenário (Figura 53 e Figura 55).

A implantação dos Alagados Construídos e o abatimento de 20% da carga em conjunto com todas as obras propostas seria suficiente para reduzir as concentrações de amônia da Lagoa de Itaipu para valores inferiores a 0,40 mg/L em boa parte do período simulado, com exceção de curtos períodos durante alguns eventos chuvosos (Figura 53). Para a Lagoa de Piratininga, este cenário seria capaz de reduzir as concentrações para valores inferiores ao limite máximo de classe 1, mesmo durante o evento de chuva intensa de abril (Figura 52).

A dragagem do Canal de Camboatá não altera as concentrações de amônia em nenhuma das lagoas, como pode ser visto através da comparação entre os cenários das figuras abaixo. A dragagem do Canal de Camboatá reduz a concentração de amônia apenas no próprio canal, sendo capaz manter as concentrações de amônia abaixo do seu limite em pelo menos 70% do tempo juntamente com o abatimento de 20% de carga nas bacias, implantação dos Alagados Construídos e desobstrução do Túnel do Tibau. Essa condição de enquadramento do Canal de Camboatá não se repete nem mesmo se houver aumento no abatimento de carga das bacias para 40% (Figura 55).

Assim como a dragagem do Canal de Camboatá, outra obra capaz de manter esse canal dentro dos limites da classe I é a retirada do lançamento da ETE Camboinhas desse canal (Figura 55). Os demais cenários simulados não são suficientes para manter o Canal de Camboatá enquadrado em classe I para amônia sem que haja a retirada do lançamento da ETE Camboinhas ou a dragagem desse canal.

A retirada do lançamento das ETEs Camboinhas e Itaipu também reduziria de forma expressiva as concentrações de amônia nas duas lagoas, com queda de 22% da concentração média de Piratininga e de Itaipu (Figura 52 e Figura 53). O aumento do abatimento de carga de 20% para 40% nas bacias, em conjunto com a dragagem do canal de Itaipu, desobstrução do Túnel do Tibau e implantação dos Alagados Construídos, também produziria uma queda relevante da concentração de amônia na Lagoa Piratininga, porém pouco expressiva em Itaipu (Figura 52 e Figura 53).

Nos cenários que consideram apenas as obras já previstas, desobstrução do Túnel do Tibau e implantação dos Alagados Construídos, seria necessário abater 80% da carga nas bacias para garantir que a concentração de amônia na Lagoa de Itaipu permaneça abaixo do seu limite ao longo de todo o ano (Figura 53 e Figura 55). Já em Piratininga bastaria abater 20% da carga gerada na bacia em conjunto com as demais obras já previstas para que a amônia se mantenha abaixo de 0,4 mg/L ao longo de todo do ano.

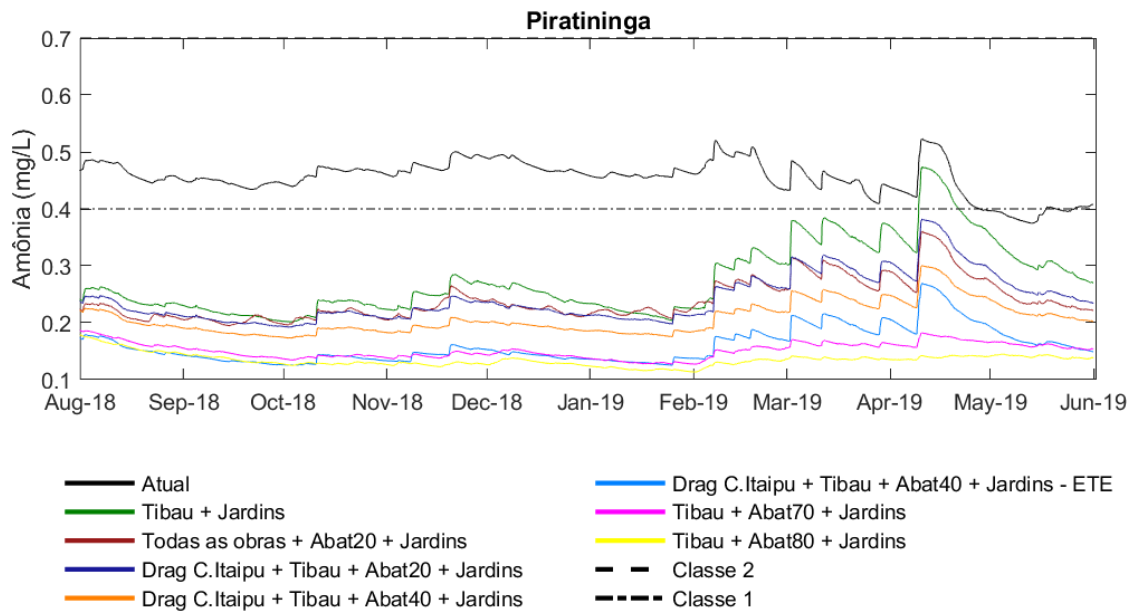


Figura 52: Amônia na Lagoa de Piratininga para os principais cenários simulados. O termo “Jardins” refere-se ao projeto de Alagados Construídos, que inclui as bacias de sedimentação além dos Jardins Filtrantes.

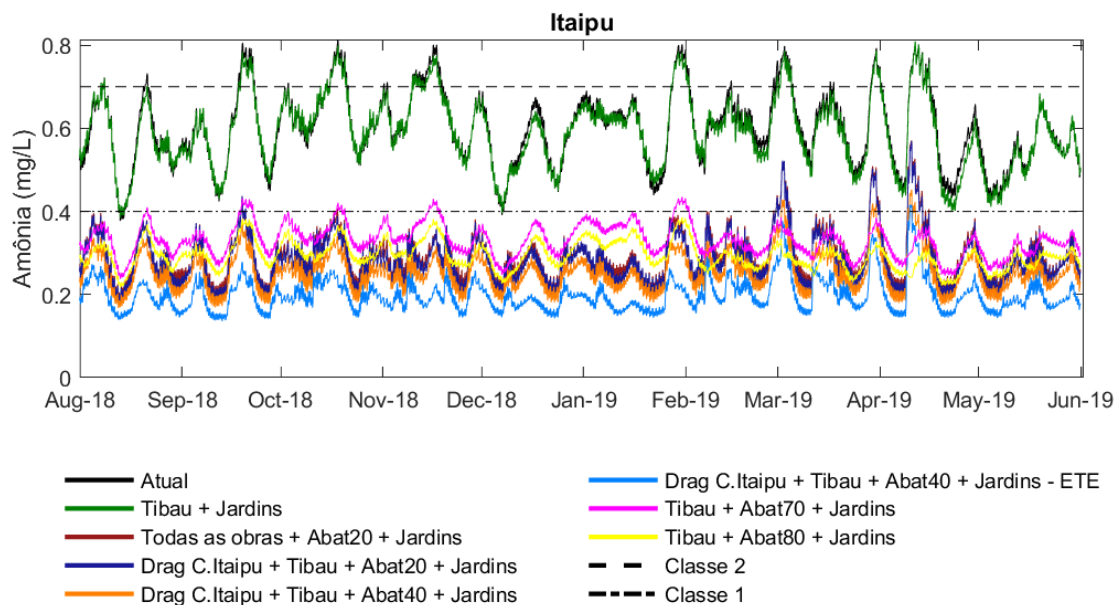


Figura 53: Amônia na Lagoa de Itaipu para os principais cenários simulados. O termo “Jardins” refere-se ao projeto de Alagados Construídos, que inclui as bacias de sedimentação além dos Jardins Filtrantes.

As concentrações de amônia no Canal de Camboatá permanecem acima do limite de Classe I na maioria dos cenários simulados (Figura 54). O cenário que considera a implantação de todas as obras hidráulicas juntamente com o abatimento de 20% da carga e a implantação do projeto dos Alagados Construídos apresentaria concentração

média de 0,36 mg/L e valor máximo de 0,64 mg/L, sendo que até 40% do tempo os valores estariam acima do limite (Figura 55). O único cenário que apresentou concentrações de amônia abaixo do limite ao longo de todo o período simulado foi o cenário com retirada do lançamento das ETEs em conjunto com as outras intervenções. Os demais cenários apresentam valores médios e máximos acima do limite legislativo (Figura 54 e Figura 55).

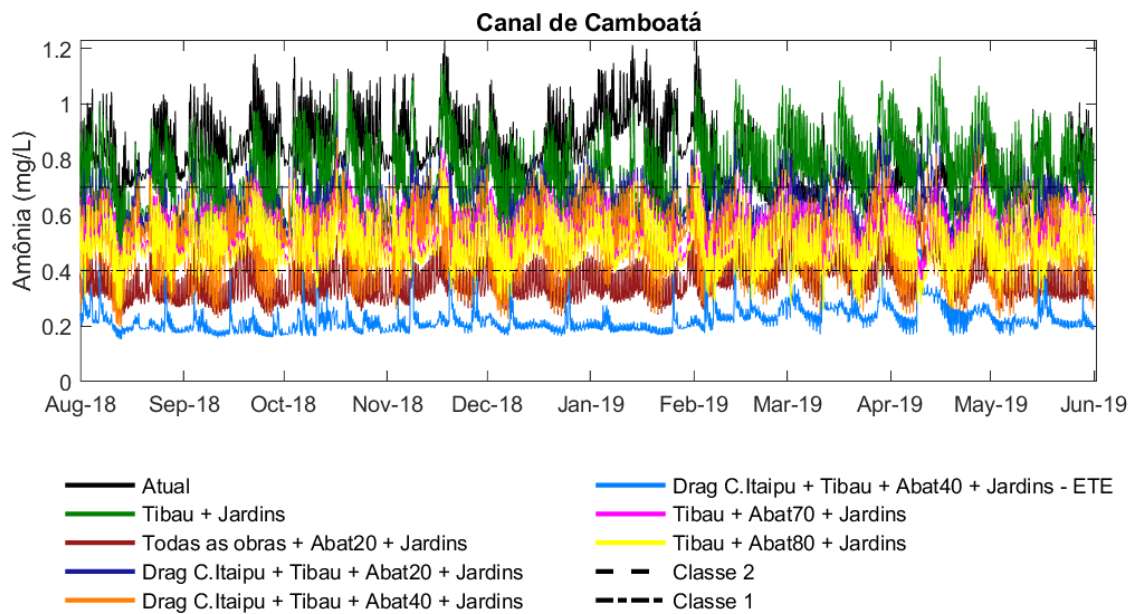


Figura 54: Amônia no Canal de Camboatá para os principais cenários simulados.

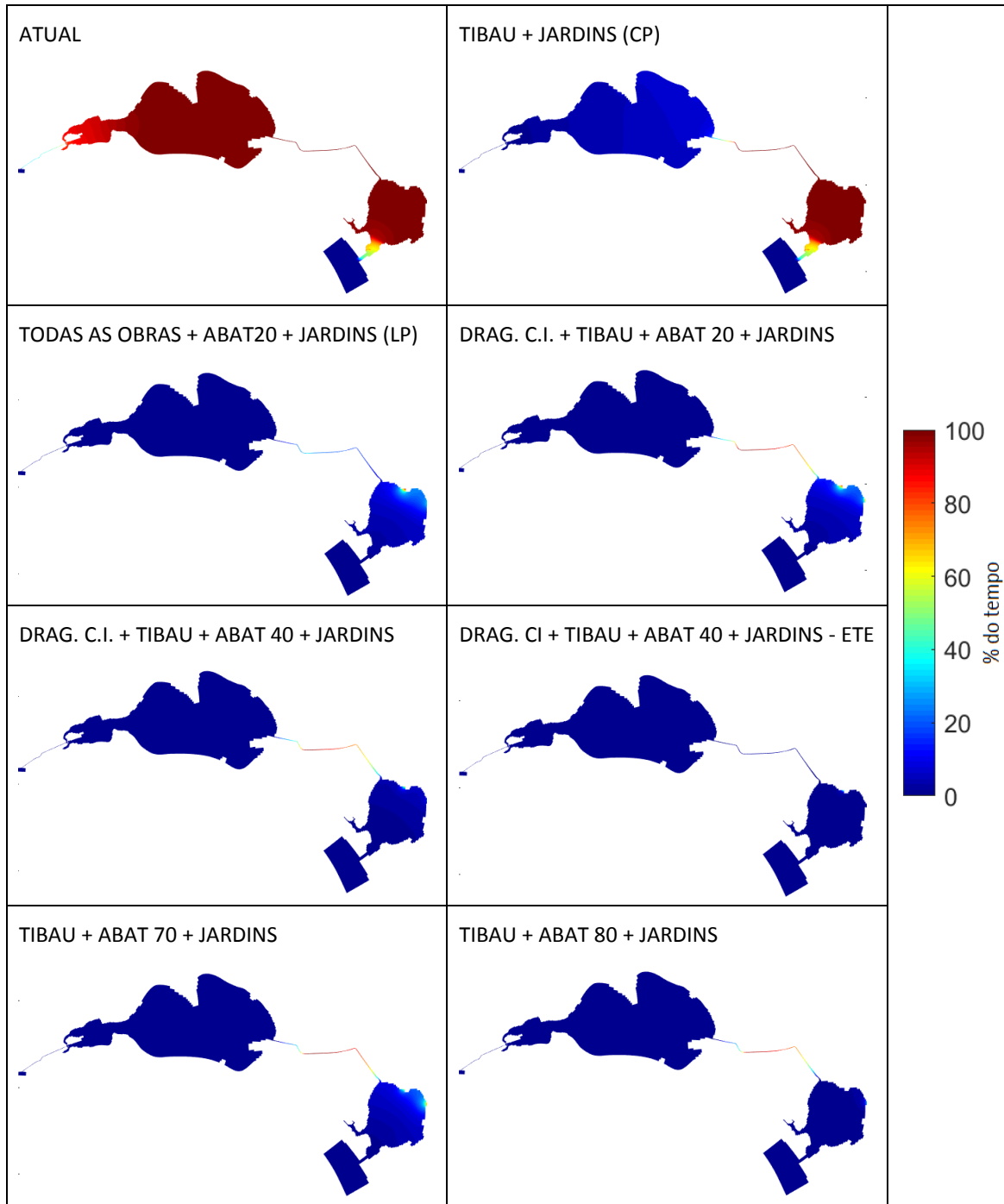


Figura 55: Tempo da permanência de concentrações de amônia superiores a 0,40 mg/L ao longo de todo o ano para os principais cenários simulados. O termo “Jardins Filtrantes” refere-se ao projeto de Alagados Construídos, que inclui as bacias de sedimentação além dos Jardins Filtrantes.

5.1.5. Comunidades biológicas

As ações propostas para melhoria da condição hídrica do sistema lagunar de Piratininga-Itaipu, além de proporcionarem melhoria na qualidade da água, resultariam em alteração da estrutura das comunidades existentes no sistema. A execução das atividades de dragagem no Canal de Itaipu e a desobstrução do Túnel do Tibau podem contribuir para uma melhoria na dinâmica e circulação da massa d'água, possibilitando uma rápida recolonização e favorecendo o uso do habitat por outras espécies.

A dragagem do Canal de Itaipu possibilitaria a alteração de uma série de fatores bióticos e abióticos, tais como temperatura da água, sólidos em suspensão, nutrientes inorgânicos e micronutrientes orgânicos, responsáveis pela regulação do crescimento e sucessão das espécies planctônicas. Além disso, poderão ser observadas mudanças na dominância de espécies com relação às condições tróficas do ambiente. Conforme apresentado nos relatórios trimestrais de monitoramento, atualmente a elevada concentração de fósforo total associado a altas temperaturas promove condições favoráveis para a dominância de cianobactérias. A dominância de uma espécie ou grupo, como o das cianobactérias, reduz a diversidade, tanto de espécies fitoplanctônicas quanto espécies zooplanctônicas. A competição por recurso alimentar favorece um grupo e ocorre uma substituição das formas palatáveis por impalatáveis, alterando a estrutura e dinâmica dos consumidores (WOLFINGBARGER, 1999). Deste modo, diversas espécies ou grupos fitoplanctônicos podem se tornar ausentes, uma vez que o recurso é consumido majoritariamente pelas espécies dominantes. A mudança de nicho alimentar acarreta um efeito *bottom-up* no zooplâncton, levando a modificações na composição da comunidade. Muitas espécies desaparecem como consequência das toxinas algais ou do comprometimento do sistema de filtração dos organismos (MATSUMURA-TUNDISI et al., 1986).

Além disso, com a diminuição do tempo de residência a quantidade de partículas orgânicas e inorgânicas tende a diminuir, o que irá ocasionar maior penetrância de radiação fotossinteticamente ativa na água e incremento das taxas de produção. O

resultado é o aumento da profundidade da zona fótica e incremento nos teores de oxigênio dissolvido.

Como reflexo da alteração da qualidade d'água e reestruturação das comunidades fitoplanctônicas e zooplanctônicas, espera-se que também ocorra uma alteração positiva na assembleia de peixes e crustáceos da lagoa. De acordo com um estudo realizado por Branco et al. (2009), após eventos de dragagem, ocorreu um incremento no número de espécies de peixes, abundância e biomassa, justificados pelo aumento da profundidade e melhoria dos padrões de circulação. Com o aumento da profundidade do Canal de Itaipu, as espécies marinhas estuarino-dependentes (espécies que desovam no mar e utilizam obrigatoriamente o ambiente estuarino como criadouro para larvas e juvenis) teriam maior facilidade para acessar a lagoa. Ademais, com a melhora na qualidade da água as taxas de reprodução das espécies estuarino-residentes tendem a melhorar, resultando em aumento da riqueza e densidade da comunidade ictioplanctônica. Peixes expostos a poluentes apresentam retardo no crescimento, maturação sexual tardia, baixo desenvolvimento gonadal e baixa fecundidade (MUNKITTRICK et al., 1991).

A dragagem do Canal do Camboatá, assim com a dragagem do Canal de Itaipu, deve melhorar a qualidade da água, favorecendo as comunidades viventes na região. Devido à baixa profundidade do Canal de Camboatá, resultante do constante aporte de sólidos, e à pouca profundidade da coluna d'água, a radiação incidente aumenta a temperatura da água. Essa elevação de temperatura altera as propriedades físico-químicas da água, principalmente as concentrações de oxigênio dissolvido, que decaem significativamente com o aumento da temperatura da água. Somado a isso, o contínuo aporte de matéria orgânica no canal reduz os valores de OD devido às elevadas taxas de respiração, tanto na coluna d'água quanto no sedimento, as quais aumentam com a elevação de temperatura.

Também devido à baixa profundidade do Canal de Camboatá, a incidência de ventos ressuspendem os sedimentos, aumentando a disponibilidade de partículas orgânicas e inorgânicas na massa d'água. Como consequência, as taxas de produção

são limitadas, pois a comunidade produtora não tem acesso a radiação fotossinteticamente ativa em toda coluna d'água. Com a dragagem do canal esperam-se maiores valores de oxigênio dissolvido, decorrentes da menor temperatura e das maiores taxas de produtividade primária. Ademais, é esperada uma alteração positiva na estrutura da comunidade bentônica, visto que com a redução das taxas de respiração a matéria orgânica alóctone pode ser colonizada pelo perifíton (algas, fungos e bactérias), tornando-se palatável para bentos e crustáceos. Essa maior disponibilidade alimentar pode favorecer a colonização de novas espécies no sistema.

Outro benefício da dragagem do canal está relacionado ao deslocamento da ictiofauna e carcinofauna entre as lagoas. O fluxo das comunidades neotônicas entre as lagoas está comprometido pelo fato do Canal de Camboatá encontrar-se muito assoreado. Esse fator, associado à obstrução do Túnel do Tibau, acarreta em baixa diversidade e pouca abundância de peixes na lagoa de Piratininga. Além disso, com a melhora da qualidade hídrica do canal e maior oferta de alimento, diferentes espécies poderão utilizá-lo para reprodução.

No que concerne à Lagoa de Piratininga, as deficiências existentes na renovação hídrica do sistema e elevada carga de poluentes da bacia são os principais fatores responsáveis pela má qualidade da água. Considerando as ações de desobstrução do Túnel do Tibau, dragagem no Canal de Camboatá e abatimento de cargas de bacia, espera-se uma melhoria significativa na qualidade ambiental do sistema. Contudo, diante do constante aporte de cargas das bacias contribuintes nos últimos anos, a lagoa ainda apresentará problemas com relação às concentrações de nutrientes, visto a elevada disponibilidade interna no sedimento. Mesmo diante das intervenções de abatimento das cargas atuais, a grande quantidade de fósforo prontamente disponível pode ocasionar eventos de floração no sistema. Devido à elevada temperatura da água, o metabolismo dos organismos produtores aumenta a assimilação de ortofosfato, o que causa aumento da biomassa algal e eventos de floração de cianobactérias (MAIER & TAKINO, 1985). O controle da disponibilidade de nutrientes é fundamental para evitar esses quadros de eutrofização, possibilitando também maior transparência da coluna d'água e aumento da diversidade de comunidade aquática.

6. MODELO DE GESTÃO DO SISTEMA LAGUNAR PIRATININGA-ITAIPU

Conforme apresentado anteriormente, com base na análise dos resultados das simulações computacionais, foram avaliadas diversas intervenções físicas consideradas relevantes para promover melhorias na renovação hidráulica e qualidade da água das lagoas de Piratininga e Itaipu. Além dessas obras, foram simulados cenários de abatimento de cargas poluidoras, por meio da melhoria no sistema de saneamento nas bacias, obras fundamentais para recuperação ambiental do ecossistema e a melhoria das condições de balneabilidade.

O objetivo dessas obras é atender, em médio prazo, o enquadramento de Classe I preconizado pela Resolução CONAMA Nº 357/2005 e permitir os usos múltiplos sustentáveis, conforme definidos pelo CLIP - Subcomitê da Bacia Hidrográfica das Lagoas de Piratininga e Itaipu, tais como:

- banho, recreação e natação;
- iatismo e lazer náutico (caiaques, canoas, stand-up paddle, windsurf, pedalinhos e outros);
- navegação de embarcações motorizadas somente nos trechos sinalizados;
- fundeio de pequenas embarcações e atracadouro de pescadores artesanais;
- pesca artesanal (linha, covo, tarrafa e rede)
- pesca amadora e esportiva (com e sem guia);
- valorização paisagística;
- manutenção dos habitats e populações saudáveis de espécies nativas;
- dessedentação de animais silvestres;
- observação da vida silvestre, em especial aves e jacarés;
- pesquisa científica e ensino;
- extração de água da lagoa de Piratininga para combate a incêndios florestais;
- Serviços ambientais (amenização climática, amortecimento de cheias).

O modelo de gestão proposto para o Sistema Lagunar Piratininga-Itaipu foi definido a partir das ações necessárias para recuperação do sistema lagunar, incluindo as obras recomendadas de curto prazo e de longo prazo e também as ações de remediação *in situ* consideradas necessárias no cenário de curto prazo, além dos monitoramentos recomendados nas lagoas e suas bacias.

O Quadro 6 apresenta as ações recomendadas por ordem prioridade com vistas à recuperação e manutenção do Sistema Lagunar Piratininga-Itaipu. Algumas dessas ações possuem caráter temporário e são recomendadas apenas no cenário de curto prazo devido as dificuldades de se alcançar elevados percentuais de abatimento de carga poluentes, como é o caso da dragagem do Canal de Itaipu e do Canal do Camboatá, além do plano emergencial para controle de eutrofização na Lagoa de Piratininga.

Quadro 6: Ações recomendadas no horizonte de curto prazo e longo prazo para enquadramento do sistema lagunar Piratininga-Itaipu por ordem de prioridade.

Região	Ordem de prioridade	Ação	Curto Prazo	Longo Prazo
Piratininga	1°	Implantação dos Alagados Construídos	X	X
	2°	Desobstrução do Túnel do Tibau	X	X
	3°	Abatimento de carga gerada na bacia	40%	80%
	4°	Dragagem do Canal de Camboatá	X	-
	5°	Implantação de programa de monitoramento e ações de remedição para controle de eutrofização	X	-
	6°	Dragagens localizadas	X	-
Itaipu	1°	Abatimento de pelo menos 40% da carga gerada na bacia	40%	80%
	2°	Dragagem do Canal de Itaipu	X	-
	3°	Alteamento dos molhes de Itaipu	X	X
	4°	Plano de manejo do sedimento do canal	X	X

A Figura 56 apresenta as relações entre as ações recomendadas com vistas à recuperação e manutenção do Sistema Lagunar Piratininga-Itaipu, incluindo as ações de abatimento de cargas, as obras hidráulicas, os monitoramentos e o plano emergencial de eutrofização.

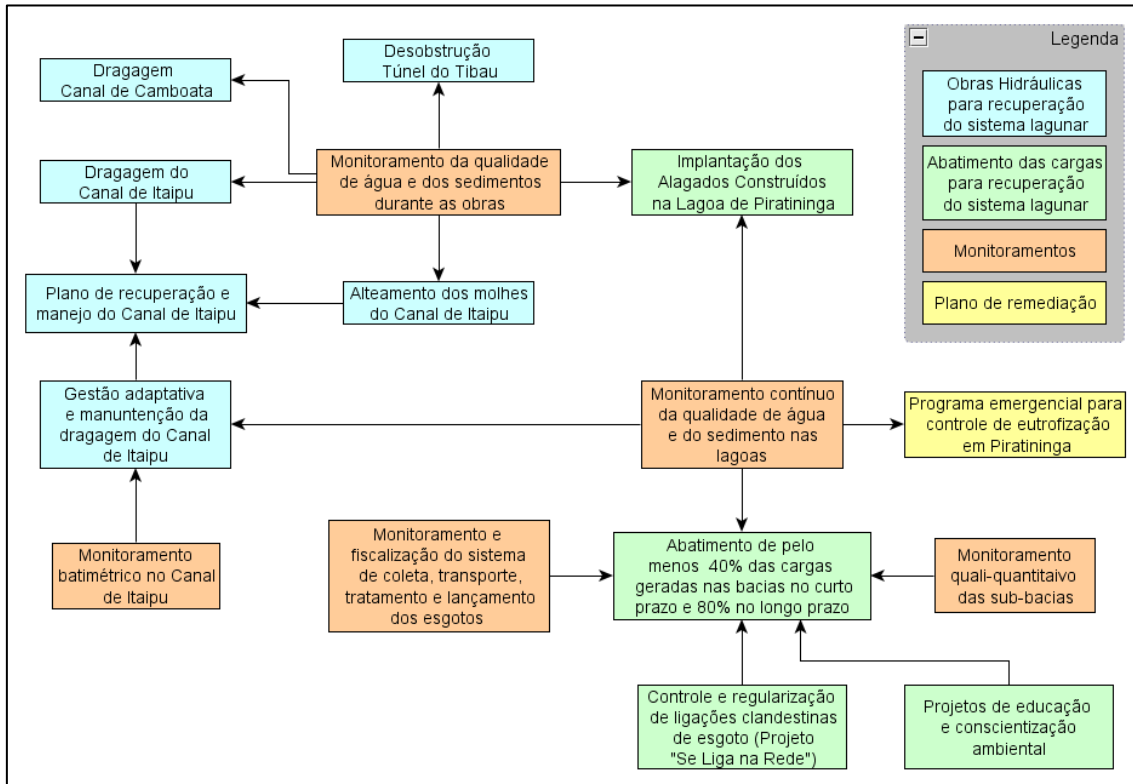


Figura 56: Relação entre as ações de gestão recomendadas para recuperação e manutenção do Sistema Lagunar Piratininga e Itaipu.

Os monitoramentos propostos serão detalhados em documento específico, “PLANO DE MONITORAMENTO DO SISTEMA LAGUNAR PIRATININGA-ITAIPU”, apresentando em conjunto com o presente relatório. As ações de recuperação propostas, que incluem as ações de abatimento de carga e as obras hidráulicas, serão discutidas a seguir no item 6.1. No item 6.2 são apresentadas ações de remediação *in situ* para controle da carga poluidora presentes no cenário de curto prazo, principalmente na Lagoa de Piratininga.

6.1. AÇÕES PARA RECUPERAÇÃO DO SISTEMA

Neste capítulo são discutidas as justificativas, a importância e descrição de cada uma das ações recomendadas para a gestão do Sistema Lagunar Piratininga-Itaipu.

6.1.1. Implantação do Projeto de Alagados Construídos

O projeto dos Alagados Construídos, que inclui a implantação de Jardins Filtrantes e bacias de sedimentação, já está em fase de implantação. Segundo o projeto, a

eficiência de abatimento das cargas é bastante elevada, conforme apresentada anteriormente no Quadro 2, e seus efeitos sobre a qualidade de água da Lagoa de Piratininga seriam bastante positivos, de acordo com os percentuais de eficiência do projeto.

No caso da amônia, a redução da concentração na Lagoa de Piratininga com a implantação dos Alagados Construídos foi correspondente ao abatimento de 20% da carga em todas as bacias que contribuem para o sistema. Para o fósforo, a resposta foi ainda melhor e a implantação dos Alagados Construídos foi semelhante ao efeito esperado com o abatimento de 40% das cargas geradas em todas as bacias. O COT foi o parâmetro que mais mostrou redução na Lagoa de Piratininga, com concentração inferior àquelas esperadas com abatimento de 40% das cargas geradas nas bacias.

No entanto, apesar das boas respostas do projeto dos Alagados Construídos, ele sozinho não é suficiente para recuperar o sistema lagunar de Piratininga-Itaipu. É necessário que também sejam realizados abatimentos de cargas nas bacias e em conjunto com algumas obras hidráulicas, principalmente no cenário de curto prazo em que percentuais muito elevados de abatimento de carga não são factíveis. Vale ressaltar ainda que os Alagados Construídos foram dimensionados para atender à vazão média dos rios Cafubá, Arrozal e Jacaré e que não possuem capacidade para abater cargas em eventos hidrológicos elevados. De qualquer forma, entende-se que esta é uma boa solução para abater carga no sistema e recomenda-se sua implantação em Piratininga. Recomenda-se também que seja estudada a possibilidade de implantação de projeto semelhante na Lagoa de Itaipu como alternativa para abater a carga que chega a esta lagoa. É importante que após a implantação seja realizado monitoramento contínuo da qualidade de água dos Alagados Construídos para verificar a sua eficiência ao longo do tempo.

6.1.2. Abatimento das cargas poluentes nas sub-bacias

Os resultados dos cenários simulados, apresentados e discutidos neste e em documentos anteriores, indicam que os abatimentos de cargas nas bacias são de extrema importância para a recuperação do sistema lagunar Piratininga-Itaipu e esse

com certeza deve ser o foco principal de atuação dos órgãos e gestores públicos. No entanto, conforme já mencionado anteriormente, sabe-se que este é um processo de médio e longo prazo e que requer um trabalho intenso de fiscalização individualizada em todas as unidades residenciais e comerciais existentes nas bacias contribuintes para as lagoas.

Os resultados das simulações indicam que sem a execução de nenhuma obra hidráulica além da desobstrução do Túnel do Tibau já em fase de execução, seria necessário abater percentuais de carga muito elevados para recuperar este sistema lagunar. Em Itaipu seria necessário abater 80% da carga. Em Piratininga, mesmo considerando a implantação dos Alagados Construídos e a desobstrução do Túnel do Tibau, também seria preciso ainda abater 80%. Caso não haja desobstrução do Túnel do Tibau e nem a implantação dos Alagados Construídos, estima-se que o abatimento de carga necessário para recuperar a Lagoa de Piratininga deveria ser próximo a 100%.

Esses percentuais de abatimento não são factíveis num cenário de curto e médio prazo e bastante desafiadores a longo prazo. Por isso, recomenda-se que nesse momento sejam feitas associações de obras hidráulicas em conjunto com ações de abatimento da carga nas bacias. Além disso, vale destacar que por mais que sejam realizados esforços no sentido de abater todos os lançamentos irregulares de esgoto é preciso considerar que ainda assim ocorrerão eventuais lançamentos de cargas poluentes na lagoa de forma direta ou indireta e que as obras hidráulicas auxiliarão a capacidade deste ambiente em se recuperar e se reestabelecer após um evento atípico de descarga de poluente. Um dos possíveis aportes de cargas é o lançamento de esgoto bruto através das estações elevatórias da rede de esgoto da região. Como já mencionado, os extravassores dessas estações elevatórias fazem com que o efluente seja lançado nas lagoas em decorrência de eventual problema operacional. Apesar dos extravassores serem permitidos nesse tipo de projeto, é preciso que haja um monitoramento desses lançamentos e posterior análise de seus impactos no sistema lagunar.

O abatimento expressivo do aporte de carga poluente poderá ser alcançado com a implantação de uma série de ações e projetos a serem implantados nas bacias hidrográficas e nas áreas marginais das lagoas. Essas ações englobam: (i) a implantação de um projeto de regularização de ligações clandestinas de esgoto; (ii) a implantação de programa de educação ambiental; e (iii) e o monitoramento e fiscalização do Sistema de Esgotamento Sanitário de Niterói (SES Niterói).

(i) Implantação do Projeto Se Liga na Rede

Este é um projeto de regularização de ligações clandestinas de esgoto e é uma das principais ações que devem ser implantadas para garantir o sucesso das reduções do aporte de cargas para o interior das lagoas.

Em geral, os abatimentos de carga nas bacias são alcançados pela ampliação e/ou melhoria do sistema de esgotamento sanitário da região. Em Niterói, a cobertura da rede de coleta de esgoto é bastante elevada, próxima a 95%, sem muita possibilidade de expansão. Apesar da elevada cobertura da rede de esgoto observa-se que a carga de poluentes que chega às lagoas é ainda bastante elevada e superior à capacidade suporte deste sistema lagunar.

Atualmente, em Niterói já existe o programa “**Programa Se Liga**” de regularização das ligações prediais de esgoto. Porém, é fundamental que haja uma intensificação deste projeto, com fiscalização sistemática e contínua das ligações de esgoto, e instruções para a correta dos esgotos das residências à rede já implantada.

O programa de fiscalização e regularização de ligações prediais de esgoto compreende visitas domiciliares para identificação do destino das águas descartadas pelos sistemas hidráulico-prediais das edificações com utilização de ferramentas e instrumentos específicos. Identificada a irregularidade, o proprietário do imóvel deverá ser notificado e informado sobre os procedimentos e obras que deverão ser executados por ele para adequação da rede. O proprietário terá um prazo para a execução das obras e finalizado esse prazo a unidade deverá passar por nova

fiscalização. Caso não tenham sido feitas as devidas adequações, o proprietário poderá sofrer multas e outras penalidades por parte do município.

Diversos municípios no Brasil vêm desenvolvendo projetos similares (“Se liga na rede”) e vêm apresentando resultados expressivos de melhoria na qualidade de água de seus recursos hídricos depois de um ou dois anos de intensa fiscalização. Alguns municípios brasileiros têm adotados programas de subsídios financeiros para ligação do esgoto de famílias com menor renda, trazendo resultados expressivos para sistema de coleta e tratamento de esgoto.

Considerando o Sistema de Esgotamento Sanitário de Niterói já instalado e as ações do Projeto “Se Liga” de forma intensa e contínua, estima-se que poderão ser alcançados percentuais expressivos de redução das cargas nas bacias, tendo como meta o abatimento de 40% a 80% da carga. Considera-se que, juntamente com outras ações, é possível alcançar a meta desde que **as ações do Projeto Se Liga sejam intensas, contínuas e sistemáticas.**

(ii) Projeto de educação ambiental

Sugere-se que juntamente com a execução do Programa Se Liga seja implantado também um projeto de educação e conscientização sobre esgoto e as seus impactos no meio. Sugere-se a implantação de um projeto de **Comunicação Social e Educação Ambiental**. Essas atividades abordam a importância do saneamento e da participação popular através das corretas ligações prediais e também abrange tópicos mais globais sobre a qualidade ambiental do sistema lagunar.

O programa poderá abranger também a realização de **cursos de capacitação de profissionais** para realização das obras relacionadas à regularização das ligações prediais, incluindo técnicos e pedreiros.

(iii) Fiscalização do Sistema de Esgotamento Sanitário de Niterói

Sugere-se que sejam realizadas fiscalizações contínuas no transporte do esgoto bruto e na qualidade do efluente tratado que é lançado nas lagoas.

No entorno das lagoas Piratininga e Itaipu há aproximadamente 35 estações elevatórias da rede de esgoto, segundo a concessionária Água de Niterói. As estações elevatórias são componentes da rede de transporte de esgoto que servem para bombear o esgoto quando ele não consegue mais ser transportado por gravidade. Essas unidades possuem, por norma, extravassores em caso de qualquer problema nas unidades de bombeamento. E os extravassores fazem com que o efluente ainda bruto seja lançado nas lagoas em decorrência de eventual problema operacional. Apesar dos extravassores serem permitidos nesse tipo de projeto, é preciso que haja um monitoramento desses lançamentos e posterior análise de seus impactos no sistema lagunar. Sugere-se que seja avaliada a possibilidade de instalação de hidrômetros nos extravassores e monitorados periodicamente os volumes de esgoto bruto lançados no sistema. Além disso, está sendo proposto o monitoramento de qualidade de água nas lagoas na proximidade dessas estações elevatórias. Os detalhes do monitoramento proposto são apresentados no **“PLANO DE MONITORAMENTO AMBIENTAL DO SISTEMA LAGUNAR PIRATININGA ITAIPU”**.

Outra medida importante é o monitoramento periódico do efluente tratado que é lançado nas lagoas. No **“PLANO DE MONITORAMENTO AMBIENTAL DO SISTEMA LAGUNAR PIRATININGA ITAIPU”** são descritos os detalhes do monitoramento proposto.

6.1.3. Desobstrução do Túnel do Tibau

Diante de todos os resultados dos cenários simulados, a desobstrução do Túnel do Tibau se mostrou fundamental para a recuperação da Lagoa de Piratininga. Sem a desobstrução, o tempo de residência desta lagoa é de quase um ano, o que torna esse ambiente bastante sensível e com baixa capacidade para suportar as cargas que chegam até o sistema lagunar. Apenas com a desobstrução do Túnel do Tibau, o tempo de residência cai em um terço, conforme anteriormente.

Apesar da desobstrução do Túnel do Tibau ser condição necessária à recuperação da Lagoa de Piratininga esta obra não é condição suficiente. Sugere-se que a desobstrução do túnel seja realizada em conjunto com as ações para abatimento de

carga. Porém, mesmo que sejam alcançados elevados abatimentos de carga nas bacias, recomenda-se que o Túnel do Tibau seja sempre mantido desobstruído, garantindo assim um fluxo mínimo com o mar, aumentando a capacidade suporte para que esta lagoa consiga se reestabelecer após eventuais aportes de cargas.

Ressalta-se que apesar da desobstrução do Túnel do Tibau melhorar a circulação e a qualidade de água da Lagoa de Piratininga, esta obra também irá causar o aumento da salinidade, podendo alterar a icitiofauna e a biodiversidade local.

De acordo com os dados do monitoramento quinzenal, a salinidade na Lagoa de Piratininga estava com média de 25 g/Kg no período anterior à obstrução do Túnel do Tibau, chegando a valor máximo de 33 g/Kg. Com a obstrução do Túnel do Tibau a salinidade média foi reduzida para 20 g/Kg, mas mesmo assim se observou momentos com salinidade de 25 g/Kg.

A desobstrução do Túnel do Tibau será responsável por elevar os níveis de salinidade para valores médios de 25 g/Kg e com valores máximos acima de 30 g/Kg, segundo os resultados simulados. Evidentemente o aumento da salinidade altera o ambiente e traz impactos para o meio, porém este ambiente já apresenta salinidade bastante elevada, ainda que variável, em função da construção do Túnel do Tibau e até mesmo, anteriormente, quando havia abertura da barra. Em condições naturais é provável que a Lagoa de Piratininga permanecia em concentrações de salinidade baixas por longos períodos e com elevações bruscas e bastantes altas quando a barra era rompida. Por isso, este é um ambiente que naturalmente sofre oscilações e adaptações em função da variação da salinidade.

Desta forma, entende-se que os benefícios de aumentar a circulação e a qualidade de água na Lagoa de Piratininga, nesse caso, são superiores às variações de salinidade já ocorrida e por isso, recomenda-se que o Túnel do Tibau seja mantido sempre desobstruído.

6.1.4. Plano de recuperação e manejo do Canal de Itaipu

Um dos atuais problemas observados é o assoreamento do Canal de Itaipu com a perda de sedimento da praia para o interior da lagoa de Itaipu, obstruindo o fluxo entre a Lagoa de Itaipu e mar. Por isso, diferentes cenários de intervenção sobre esse canal foram estudados quanto aos aspectos hidrodinâmicos, morfodinâmicos e de qualidade de água com o intuito de avaliar os efeitos de cada obra.

A modelagem morfodinâmica do Canal de Itaipu teve o objetivo de compreender a dinâmica do sedimento entre a praia e a Lagoa de Itaipu, bem como definir as estruturas necessárias para interromper a entrada de sedimento para o interior da Lagoa de Itaipu. O estudo morfodinâmico completo foi apresentado no relatório ***“MODELAGEM COMPUTACIONAL DE MORFODINÂMICA COSTEIRA: ESTUDO DE ALTERNATIVAS DE INTERVENÇÃO NOS MOLHES DE FIXAÇÃO DA DESEMBOCADURA DA LAGUNA DE ITAIPU”***.

De acordo com os estudos realizados, a solução que se mostrou mais eficiente e duradoura para melhoria da qualidade de água do sistema engloba um conjunto de ações: (i) o alteamento dos molhes; (ii) a dragagem do Canal de Itaipu na cota -2m; e (iii) prolongamento dos molhes em 140m. Porém, recomenda-se que sejam executadas as obras de alteamento dos molhes, a dragagem do canal e o monitoramento e manejo sistemático do sedimento.

O **alteamento dos molhes** se justifica pela necessidade de impedir o transporte de sedimento por cima dos molhes, como ocorre atualmente em parte do seu comprimento. Porém, se for realizado apenas o alteamento dos molhes, sem a dragagem do canal, não haverá melhoria na qualidade de água da lagoa, visto que o canal já está assoreado e o fluxo de água da lagoa se encontra prejudicado. O alteamento dos molhes por si só não traria nenhuma melhoria para a qualidade de água das lagoas num cenário de curto prazo, mas essa obra é importante para aumentar a longevidade dos efeitos da dragagem sugerida.

A **dragagem do Canal de Itaipu** tem por finalidade aumentar a troca de água entre a Lagoa de Itaipu e o mar, diminuindo o seu tempo de residência e aumentando a capacidade suporte do sistema, com impacto na hidrodinâmica e no padrão de

dispersão e depuração das cargas poluidoras que chegam nesta lagoa. Os resultados apresentados anteriormente demonstram que esta obra tem efeito bastante positivo nas concentrações dos constituintes na Lagoa de Itaipu. Por exemplo, caso não seja realizada a dragagem do Canal de Itaipu seria necessário abater 70% das cargas das bacias para manter esta lagoa em padrões de Classe I segundo a Resolução CONAMA 357/05. Com a dragagem do canal, o abatimento de 20% já seria suficiente para manter esta lagoa abaixo de 0,124 mg/L. Dentre as obras estudadas do Canal de Itaipu, essa é a que de fato trará melhorias mais rápidas e expressivas para a qualidade de água para a Lagoa de Itaipu. As demais ações no canal tem a função de auxiliar na manutenção da dragagem ao longo do tempo.

Cabe salientar que além do efeito positivo para a qualidade da água, a dragagem do Canal de Itaipu causará duas alterações importantes no sistema. A primeira delas é o aumento da salinidade, podendo influenciar a composição da icitiofauna e a biodiversidade local. Porém, no caso da Lagoa de Itaipu esse efeito será minimizado, pois as concentrações de salinidade atualmente já se encontram bastante elevadas, entre 10 g/Kg a 30 g/kg dependendo das precipitações e da maré. Com a dragagem do Canal de Itaipu a salinidade máxima na Lagoa de Itaipu aumentaria cerca de 5 g/Kg, porém, com valores mínimos bastante similares aos do cenário atual. Na Lagoa de Piratininga o aumento da salinidade foi de no máximo 3 k/Kg e ocorreu no cenário referente a dragagem do Canal de Itaipu em conjunto com a dragagem do Canal de Camboatá.

A outra importante modificação causada pela dragagem do Canal de Itaipu é a diminuição nos níveis d'água das lagoas, e conseqüente redução da área do espelho d'água, principalmente nos instantes de nível mínimo. Em Itaipu, a dragagem de Itaipu acarretaria em 8,8 ha de áreas secas nas margens da grade de simulação, o que representa 8% da área da grade computacional utilizada para a modelagem. No entanto, estas áreas secas seriam molhadas a cada 6 horas e não permaneceriam secas por longos períodos, sendo molhadas a cada ciclo de maré. Acredita-se que essa redução do nível da água não afetaria significativamente a biota aquática e a biodiversidade, somente a cota de vegetação ripária.

Além disso, a dragagem do Canal de Itaipu na cota -2m pode trazer alguns outros efeitos indesejáveis, como a perda de usos de áreas comuns, aumento do risco de afogamento e possível necessidade de fortalecimento interno das margens da lagoa contra erosão.

O **prolongamento dos molhes em 140m** tem por objetivo apenas de reduzir a entrada de sedimento para o interior da Lagoa de Itaipu e com isso garantir a manutenção da batimetria no canal de Itaipu na cota desejada por um longo período sem que sejam necessárias atividades de dragagem frequentemente. Porém, sabe-se que o prolongamento dos molhes traria diversos outros impactos para a região e tem custo bastante elevado.

Por isso, recomenda-se que no Canal de Itaipu seja realizada a dragagem inicial em conjunto com o alteamento dos molhes e a implantação de um plano de manejo do sedimento do canal incluindo a dragagem periódica para manutenção de fluxo neste canal.

Após a dragagem do Canal de Itaipu e do alteamento dos molhes é importante que seja realizado monitoramento sistemático da batimetria do canal e seus efeitos sobre a hidrodinâmica e a qualidade de água. Sugere-se que as dragagens periódicas de manutenção do fluxo do canal sejam realizadas a partir das análises dos resultados de monitoramento da batimetria do canal em comparação aos resultados do monitoramento da qualidade de água das lagoas. Recomenda-se que seja realizado um manejo adaptativo do sedimento levando em consideração os seus efeitos sobre a qualidade de água do sistema à medida que outras obras de melhoria venham a ser executadas.

A partir dos monitoramentos poderão ser identificadas as necessidades de maior ou menor volume de dragagem dependendo da evolução das ações de abatimento das cargas poluentes geradas nas bacias. Com o avanço das obras de melhorias do sistema de esgotamento sanitário é possível reduzir os volumes de dragagem no canal ao longo do tempo mantendo a qualidade da água das lagoas. Espera-se que num cenário de médio prazo sejam realizadas apenas dragagens pontuais e localizadas.

A partir do manejo adaptativo do sedimento do canal poderá se definir o volume e a frequência de dragagem. Além disso, o manejo adaptativo tem por objetivo garantir o melhor reaproveitamento do sedimento. Sugere-se que os sedimentos do canal sejam realocados preferencialmente para áreas adjacentes ao canal que estão em processo de erosão.

6.1.5. Dragagem do Canal de Camboatá

Os resultados das simulações realizadas indicam que a dragagem do Canal de Camboatá auxilia na renovação e conseqüentemente na melhoria da qualidade de água no próprio Canal de Camboatá e também da Lagoa de Piratininga. No entanto, a melhoria na qualidade de água alcançada por esta obra na Lagoa de Piratininga é inferior às demais ações estudadas, além de trazer alguns efeitos indesejáveis. A dragagem deste canal favorece a saída de água da Lagoa de Piratininga fazendo com que o haja leve redução do nível d'água desta lagoa, tal como discutido anteriormente. Ao avaliar os efeitos positivos e negativos desta obra, ainda assim recomenda-se a dragagem deste canal, visando à recuperação da qualidade de água do sistema, porém com algumas ressalvas:

- A dragagem deste canal tem menor relevância e prioridade, devendo ocorrer apenas na impossibilidade de execução de outras soluções recomendadas;
- Esta obra só deve ser executada após a desobstrução do Túnel do Tibau. Caso o Canal de Camboatá seja dragado antes do Túnel do Tibau poderá haver efeitos opostos dos desejáveis, conforme já discutido anteriormente no relatório Modelagem de Qualidade de Água do Sistema Lagunar Piratininga-Itaipu - Fase II: Simulação de Cenários com vistas às ações de recuperação.

Conforme já citado, a dragagem do Canal de Camboatá diminuiria os níveis d'água da Lagoa de Piratininga, reduzindo, conseqüente, a área do espelho d'água, principalmente nos instantes de nível mínimo. Na Lagoa de Piratininga, a dragagem do Canal de Camboatá juntamente com desobstrução do Túnel do Tibau e a dragagem do

Canal de Itaipu, resultaria em 7,9 ha de áreas secas durante os instantes de nível mínimo, o que representa 2,4% da área da grade do modelo nessa lagoa. Nesse cenário seriam observadas áreas secas na Lagoa de Piratininga durante 20% durante todo o ano simulado, permanecendo secas de forma ininterrupta por até duas semanas.

Quanto a salinidade, as obras de dragagem do Canal de Camboatá podem elevar as concentrações de salinidade na Lagoa de Piratininga em até 3 ppm acima dos valores que seriam obtidos com a desobstrução total do Túnel do Tibau.

6.1.6. Dragagens localizadas da Lagoa de Piratininga

Um dos atuais problemas da Lagoa de Piratininga é o assoreamento e as regiões rasas em algumas áreas da lagoa. Sugere-se que sejam realizadas dragagens em regiões específicas da lagoa com o objetivo de aumentar a profundidade de áreas bastante assoreadas, principalmente ao longo da extensão do canal de cintura e onde serão instalados os Alagados Construídos. Nessas áreas há exposição do sedimento extremamente rico em matéria orgânica que provoca mau odor e inclusive risco de atolamento. Assim, a dragagem dessas áreas, além de aumentar o volume da lagoa, teria como objetivo principal aumentar a qualidade ambiental e estética da Lagoa, reduzindo a exposição de lodo e odores. A Figura 57 apresenta as áreas de dragagem sugeridas, totalizando 120 hectares. Sugere-se que seja realizada a dragagem de 0,5m de profundidade. Com isso, o volume total a ser dragado é de 0,6 hm³.



Figura 57: Área de dragagem na Lagoa de Piratininga.

6.2. AÇÕES DE REMEDIAÇÃO *IN SITU*

As ações propostas apresentadas acima tem o potencial de promover a recuperação da qualidade da água do Sistema Lagunar Piratininga-Itaipu em longo prazo. No cenário de curto prazo estão sendo recomendadas ações que melhorarão a qualidade da água de forma expressiva, porém insuficientes para reduzir as concentrações de fósforo a níveis desejáveis, principalmente no caso da Lagoa de Piratininga. Com as concentrações de fósforo esperadas nessa lagoa no cenário de curto prazo não se descarta a possibilidade ocorrência de eutrofização. Atualmente, devido essas concentrações elevadas de fósforo, observam-se florações de cianobactérias geralmente no verão quando a temperatura e os níveis de radiação estão mais elevados. Nas Figura 58 e Figura 59 pode-se verificar manchas de floração heterogeneamente distribuídas na área na Lagoa de Piratininga, ocorridas recentemente em janeiro de 2020. Esses eventos podem resultar em mortandades de peixes devido à queda de oxigenação durante a noite e/ou produção de cianotoxinas conforme já observado no passado.



Figura 58: Manchas de florações de cianobactérias ocorridas em janeiro de 2020. Fonte: Google Earth. Data da imagem: 06/01/2020.



Figura 59: Manchas de florações de cianobactérias ocorridas em janeiro de 2020. Fonte: Google Earth. Data da imagem: 24/01/2020.

Diante disso, são apresentadas tecnologias e soluções para recuperação da qualidade da água mais comuns adotadas no Brasil e no mundo. A apresentação dessas soluções baseou-se tanto em bibliografia científica quanto em fontes comerciais (quando não havia literatura científica disponível). Desta forma, são apresentadas desde tecnologias consagradas na atualidade até soluções desprovidas de qualquer comprovação científica, mas que são ofertadas também para recuperação de ambientes aquáticos.

6.2.1. Tecnologias existentes

Atualmente, no mercado há um vasto conjunto de tecnologias que podem ser utilizadas para controle da eutrofização. A seguir, apresenta-se uma análise sucinta das tecnologias que já foram testadas e estão disponíveis no mercado nacional e internacional para recuperação de ecossistemas eutrofizados. De modo geral, as metodologias podem ser classificadas em físicas, químicas e biológicas. A literatura técnica ressalta a necessidade de controle do aporte de nutrientes, em conjunto com as ações de recuperação dos ambientes eutrofizados, para alcançar o controle da qualidade desses ambientes em longo prazo (Lüring, 2020).

6.2.1.1. Métodos Físicos

O emprego de métodos físicos para recuperação de ambientes aquáticos é aplicado em ambientes eutrofizados há décadas, especialmente no controle de cianobactérias. Dentre as tecnologias disponíveis no mercado nacional e internacional destacam-se a dragagem, aeração, ultrassom de baixa e alta frequência e radiação ultravioleta.

a. Dragagem

Dentre os métodos físicos citados, a dragagem é o mais promissor, visto que atua diretamente na fonte interna de eutrofização. A remoção de sedimento do sistema reduz o estoque interno e as concentrações de fósforo total liberadas para a coluna d'água. Como resultado, limita-se a disponibilidade de nutrientes para comunidade fitoplanctônica e, conseqüentemente, também a proliferação das cianobactérias.

Vale ressaltar que a dragagem localizada proposta no item 6.1 não atende aos objetivos de remediação de ambientes eutrofizados, pois ainda que essas dragagens localizadas reduzam também a fonte interna de fósforo, elas deveriam ser executadas em toda a área da lagoa e em volumes expressivos para se obter o efeito desejado de redução da fonte interna de fósforo. Além disso, cabe ressaltar que dependendo do processo de dragagem adotado pode haver grande ressuspensão de sedimentos e nutrientes durante o processo, impactando severamente o sistema caso medidas de contingência não forem tomadas.

O maior obstáculo envolvido é a dificuldade de disposição do material dragado. A areia de boa qualidade, com pouca matéria orgânica, após dragada, pode ser disposta em locais adequados ou mesmo ser utilizada em outras atividades, como na construção civil. Entretanto, quando contaminado ou composto de muita matéria orgânica, o sedimento dragado é de difícil disposição final, não podendo ser utilizado na construção civil e nem disposto em ambientes naturais, uma vez que pode se tornar fonte de eutrofização ou de outros tipos de contaminação ambiental. Ademais, os custos de atividades de dragagem costumam ser muito elevados, resultado dos equipamentos e mão de obra especializada envolvidos na atividade. Outra questão importante a ser considerada é que dependendo do método empregado, o processo implica em ressuspensão de sólidos, matéria orgânica e nutrientes dissolvidos para a coluna da água, podendo impactar bastante o ambiente. A ressuspensão de constituintes particulados ou dissolvidos aumenta turbidez e afeta a fauna aquática diretamente. Além disso, a disponibilização de matéria orgânica na massa da água pode deplecionar significativamente os teores de oxigênio e a ressuspensão de fósforo pode resultar em eventos intensos de floração de cianobactérias. Sendo assim, a escolha de métodos menos perturbadores ao ambiente, como uso de dragas de sucção, com dispositivos para atenuar a ressuspensão de partículas, ao invés de retroescavadeiras e batelões, é fundamental. De qualquer modo, independentemente da escolha é importante contar com medidas de contingência como cortinas de sedimentos e remediadores para fósforo para atenuar os impactos das partículas e nutrientes ressuspensos durante o processo.

b. Aeração

Alguns métodos de aeração são utilizados em ambientes eutrofizados para aumentar o teor de oxigênio dissolvido da água. O uso dessas tecnologias não atua no controle de nutrientes e não reduz o número de células de cianobactérias no ambiente. Nesse caso, os sistemas de bolhas de ar, aeradores, misturadores e fontes misturam as células de cianobactérias na coluna d'água, o que pode diminuir a concentração dessas apenas na camada superficial do sistema, distribuindo as mesmas em toda massa da água. Vale ressaltar que o uso dessas técnicas em ambientes rasos pode ressuspender os

sedimentos, aumentando a turbidez e disponibilizando ainda mais fósforo na coluna d'água, o que favorece novos eventos de floração (Mucci e Luling, 2020). Essa solução também implica em custo energético constante.

c. Ultrassom

O ultrassom é um método utilizado para destruir as células das cianobactérias de ambientes eutrofizados. No que concerne ao uso de ultrassom, as ressonâncias de baixa frequência não possuem capacidade para destruir as células das cianobactérias, o que só é alcançado com ultrassom de alta frequência (Mucci e Luling, 2020). Esse por sua vez, apesar de reduzir as densidades também age em organismos não alvos, como outras espécies fitoplanctônicas, zooplanctônicas e até mesmo na comunidade ictioplanctônica (Mucci e Luling, 2020). Além disso, o rompimento das células de cianobactérias pode desencadear a liberação de toxinas na água, pois esses compostos secundários são armazenados no interior das células.

Outra questão importante é o baixo alcance do ultrassom. O potencial de lise de células seria apenas possível em uma distância de poucos metros (Mucci e Luling, 2020). A solução, assim como algicidas, não trata a fonte do problema da floração, que são os nutrientes, sendo apenas um paliativo de baixa eficiência e potencialmente impactante para o plâncton. Vale salientar que a solução demanda também alto custo energético.

d. Radiação Ultravioleta

O método consiste na emissão de um espectro eletromagnético sobre o meio que se deseja desinfetar, tem uso amplo, não restrito à aplicação em ambientes eutrofizados. Quando penetra a parede celular de um organismo, a radiação UV danifica a estrutura do DNA, ou seja, ocorrem mudanças na estrutura do DNA e há erro na transcrição de proteínas fundamentais para o funcionamento celular. Estes erros ocasionam a morte celular e diminuição das densidades de microrganismos. A eficiência da aplicação do método está em torno de 99,9%, mas pode apresentar riscos ambientais.

Outra desvantagem na utilização da radiação para recuperação de ambientes eutrofizados é a ação da radiação em organismos não alvos, como por exemplo, peixes, crustáceos e demais invertebrados aquáticos. A ação da radiação nas células desses organismos pode levar a desestabilização na estrutura dessas comunidades, desta forma, ocasionando alterações na rede trófica do sistema.

Além disso, a aplicação de radiação UV somente é viável em ambientes pequenos, como aquários e lagos ornamentais, onde haja uma área mínima para alcance da radiação das lâmpadas de ultra-violeta. Essa tecnologia de tratamento é inviável e ineficiente para grandes ambientes, além de demandar alto custo energético.

6.2.1.2. Métodos químicos e físico-químicos

Dentre os métodos químicos, vale destacar os algicidas, o peróxido de hidrogênio, os herbicidas, os coagulantes e os compostos sequestradores de fosfato (*phosphate binders*).

a. Algicidas

Os algicidas são compostos químicos utilizados na eliminação de algas azuis ou algas verdes. Alguns dos algicidas mais comuns no mercado para controle das florações de algas são a base de sulfato de cobre. Após aplicação do algicida, o cobre aplicado acaba se complexando e, conseqüentemente, é carregado para o fundo, onde permanece no sedimento (MOZETO & ZAGATTO, 2006). A aplicação de algicidas a base de sulfato de cobre pode ocasionar problemas de toxicidade para as espécies de peixes e demais organismos vivos nos ambientes aquáticos, o que pode indiretamente reduzir o crescimento, a reprodução e a alimentação dos organismos expostos (BOYD, 1990).

Além disso, a aplicação de sulfato de cobre em ambientes com frequentes eventos de floração algal pode ocasionar a diminuição das concentrações de oxigênio dissolvido. Isso ocorre porque a morte repentina das algas irá aumentar as taxas de decomposição do ambiente e, conseqüentemente, diminuir as concentrações de oxigênio dissolvido (WURTS & DURBOROW, 1992).

b. Peróxido de Hidrogênio

O peróxido de hidrogênio é um composto químico amplamente utilizado para desinfecção e controle de microrganismos. Sua ação se deve ao ataque à membrana lipídica, DNA e outros componentes da célula, ocasionando a lise celular. Por se tratar de um composto constituído basicamente de água e oxigênio, não há formação de subprodutos tóxicos. Porém, o rápido efeito proporcionado após a aplicação pode levar ao surgimento de densas massas orgânicas na coluna d'água e, conseqüentemente, a liberação de fortes odores oriundos do processo de decomposição celular.

A eficácia do seu uso é amplamente dependente do tipo e densidade das cianobactérias e composição química da água. Além do peróxido de hidrogênio, outros oxidantes fortes podem ser utilizados para combate à cianobactérias em corpos d'água eutrofizados, como ozônio, cloro e permanganato de potássio (Lüring & Mucci, 2020).

Assim como o sulfato de cobre, os resultados da aplicação de peróxido de hidrogênio no ambiente apenas exercem efeito paliativo, visto que o principal causador do problema, que é o excesso de nutrientes, não é volátil. Assim, o fósforo, nitrogênio e carbono permanecem na água ou no sedimento disponível para recorrência de florações. Desta forma, mesmo que esta opção seja menos agressiva ao meio ambiente, ela não atua sobre a fonte da eutrofização, apenas sobre a consequência, que são as algas.

c. Herbicidas

Os herbicidas são componentes importantes nos programas de controle de plantas aquáticas, pois representam um método de controle rápido, barato e eficiente. São utilizados em diversos países para controle das macrófitas aquáticas, principalmente as pertencentes à família Hydrocharitaceae. No Brasil, o único herbicida autorizado e com registro no Ministério da Agricultura, Pecuária e abastecimento (MAPA) e na ANVISA, é o fluridone (1-metil-3-fenil-5-[3-(trifluorometil)-fenil]-4-(1H)- piridinona). Apesar de apresentar eficiência comprovada no controle das macrófitas, a utilização do herbicida fica comprometida por problemas relacionados ao equilíbrio ecológico do ambiente aquático e a aspectos técnicos, como diluição e o tempo de contato entre o agente de

controle e a planta alvo (SHEARER, 1996). Segundo Netherland et al (1993), a eficácia do fluridone é altamente dependente do tempo de exposição e da concentração do produto na água. Além disso, a eficiência do produto no controle de algas é limitada apenas a algumas espécies, sendo ineficiente em espécies unicelulares, coloniais e filamentosas.

d. Coagulantes

A recuperação de ambientes aquáticos eutrofizados também pode ser feita com a aplicação de coagulantes, como o sulfato de alumínio. Nos Estados Unidos, compostos a base de alumínio são amplamente utilizados no controle de cianobactérias e na redução de nutrientes (fósforo total) no sistema, através das metodologias de *flock & sink* (flocular e decantar). Essa metodologia consiste em aplicar produtos que promovam a coagulação e floculação das cianobactérias em flocos que decantem ao fundo, removendo-as da coluna d'água. Porém, a dissolução dos flocos formados pode ocorrer após sua formação e até mesmo decantação, especialmente em lagos rasos sob ação do vento. A dissolução dos flocos acarreta liberação das células e dos nutrientes à coluna d'água.

Além da possível dissolução dos flocos formados, a aplicação de coagulantes à base de alumínio é problemática devido à toxicidade do alumínio, que pode causar até mesmo sufocamento de peixes (Lürling, 2020). Quitosana tem sido sugerida como alternativa aos coagulantes à base de alumínio, porém, pode causar a lise das células de cianobactérias quando sujeitas à exposição prolongada (Mucci et al., 2017). Vale destacar também que em ambientes onde há aporte contínuo de cargas da bacia, o uso de coagulantes se torna inviável pelo fato de que aplicações contínuas gerariam muito lodo em função dos flocos formados, causando toxicidade para sedimento e para a coluna da água no caso de ressuspensão em função do vento ou inversões térmicas.

e. Bentonita ativada com Lantânio (Phoslock®)

A bentonita ativada com lantânio é um remediador físico químico desenvolvido pela empresa governamental australiana SCIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation). O produto é resultado de uma modificação iônica da argila

bentonita por meio da adição do elemento lantânio (La^{+3}), uma terra rara que possui elevada especificidade iônica por íons de ortofosfato (PO_4^{-3}). O ortofosfato é a forma dissolvida de fósforo, sendo o nutriente limitante para produtores primários. O produto é composto por 95% de bentonita, na forma de grânulos, e 5% de lantânio. O remediador é considerado inócuo para a fauna aquática e seguro para o meio ambiente e humanos segundo literatura científica.

Na presença do íon ortofosfato (PO_4^{-3}) o produto forma um complexo mineral insolúvel conhecido como rabdofânio ($\text{LaPO}_4 \cdot n \text{H}_2\text{O}$). A ligação iônica ocorre com maior eficiência em uma faixa de pH de 5 a 9 (ROSS *et al.*, 2008), sendo permanente em pHs de 4 a 11 (ROBB *et al.*, 2003). Uma vez formado o complexo, a ligação iônica permanece estável mesmo sob condições anóxicas (AKHURST *et al.*, 2004; ROBB *et al.*, 2003; ROSS *et al.*, 2008). A teoria é de que com a redução do nutriente no meio aquático, por meio da aplicação de Phoslock, o crescimento de cianobactérias é controlado. A morte das células é gradual, sem que haja uma rápida liberação de toxinas para a massa da água. Uma tonelada de Phoslock é capaz de remover 34 kg de FRD ou ortofosfato (PO_4), ou 11 kg de fósforo total (P).

Segundo o fabricante, depois de aplicado sobre a superfície do corpo d'água, a argila decanta rapidamente em até 24 h, formando uma fina camada de partículas de 1 a 2 mm sobre o sedimento. Esta camada se comportaria como o próprio sedimento, misturando-se com material inorgânico e orgânico do fundo, sendo também naturalmente colmatada com o tempo.

Além da adsorção do fósforo disponível na massa da água, o excedente de produto sobre o sedimento permanece adsorvendo os influxos de fósforo do fundo, até que os sítios de ligação disponíveis se encontrem saturados. Desta forma, o remediador inibe a fonte de interna de eutrofização no sistema.

Na atualidade, o produto se encontra consagrado no meio científico internacional e nacional, com inúmeras publicações científicas em periódicos indexados. No Brasil, há exemplos de aplicação em lagos urbanos, sujeitos a intenso aporte de cargas, e

reservatórios de abastecimento humano no Rio de Janeiro (Guandu/CEDAE), Salvador, (Joanes/EMBASA).

Por ser uma bentonita quimicamente ativada, o Phoslock possui potencial para adsorver metais pesados dissolvidos na água, podendo ser utilizado para adsorver metais como cobre, cádmio, prata e zinco. Resultados de testes de adsorção de cobre (Cu), por exemplo, foram similares aos observados aos outros estudos com bentonita pura, demonstrando uma capacidade mínima de adsorção entre 5 e 10 mg Cu/g de Phoslock.

f. Método Oxyplus

Método oxyplus consiste na aplicação de ozônio e radical hidroxila para desinfecção. A aplicação de ozônio no ambiente age diretamente na parede celular dos microrganismos, causando ruptura celular. Como o produto Oxyplus é um composto químico oxidante, vale ressaltar que atua diretamente sobre as comunidades aquáticas, eliminando a microbiota, como algas, zooplâncton, larvas e ovos de peixes. Desta forma, não atua somente no controle das densidades de algas no ambiente, mas na estrutura de outras comunidades associadas aos sistemas aplicados. Cabe ressaltar que o Oxyplus não apresenta ação direta sobre as concentrações de fósforo, principal nutriente responsável pela eutrofização, uma vez que este elemento não pode ser eliminado por oxidação.

Como o ozônio apresenta ação de desinfecção, a aplicação do mesmo para controle das densidades algas pode apenas ter um efeito temporário no controle das algas, similar a ação dos algicidas. Em função da elevada taxa de crescimento e proliferação de algas como cianobactérias, as florações podem retornar em poucos dias. Sendo assim, esta tecnologia é apenas paliativa e não resolveria os problemas decorrentes da eutrofização, visto que não exerce controle nas concentrações de nutrientes no ambiente.

6.2.1.3. Métodos biológicos

Os métodos biológicos procuram modificar o ecossistema, de modo a promover um ambiente menos favorável para as cianobactérias. Uma das maneiras de atingir esse

objetivo é diminuir a disponibilidade de nutrientes, o que pode ser alcançado através da degradação biológica destes.

a. Macrófitas

As macrófitas são plantas utilizadas no tratamento de esgoto sanitário, em wetlands construídos. São plantas com alta capacidade de assimilação de nutrientes, consequentemente retirando-os do seu substrato. Seu uso como método biológico de controle de ambientes eutrofizados se dá pela sua capacidade de assimilar os nutrientes do ambiente aquático, assim, ao serem removidas do ambiente, levam consigo os nutrientes que foram assimilados. O uso de macrófitas no controle e recuperação de ambientes eutrofizados pode se dar através da sua plantação ativa ou pela simples remoção daquelas previamente existentes no ambiente.

A povoação do espelho d'água por macrófitas pode causar alguns problemas ao ecossistema, devido ao seu acelerado crescimento vegetativo e o denso tapete que forma sobre a coluna d'água, como a limitação da penetração de luz solar. Ademais, a necessidade de controle requer que sua remoção seja realizada de maneira recorrente, e seu descarte realizado em ambiente adequado.

b. Biorremediadores

A Biorremediação é o processo pelo qual organismos vivos tais como, microrganismos, fungos, plantas, algas verdes ou suas enzimas são utilizados/introduzidos para reduzir ou remover - remediar - contaminações no ambiente. A biorremediação também é conhecida como bioaugmentação, pois propicia um aumento da população microbiana degradadora, auxiliando os microrganismos nativos. Esta técnica tem por objetivo melhorar o potencial biodegradador de um ambiente contaminado, sendo os microrganismos introduzidos chamados de inoculantes, bioaditivos ou ainda biorremediadores (Gaylarde, et al., 2001).

As tecnologias de Biorremediação podem geralmente ser classificadas como "in-situ" ou "ex-situ". A Biorremediação "in-situ" envolve tratar o material contaminado no próprio local, enquanto a "ex-situ" consiste na remoção do material contaminado para

tratamento em local externo ao de sua origem. Entretanto, nem todos os contaminantes são facilmente tratados pela biorremediação.

Os processos biológicos de descontaminação, enquadrados na categoria de biorremediação, utilizam, geralmente, microrganismos do próprio ambiente (autóctones/endógenos) ou introduzidos no ambiente (alóctones/exógenos), em estado nativo, encontrados em solos e em águas subterrâneas com capacidade de biodegradar xenobióticos (compostos químicos estranhos a um organismo ou sistema biológico), resultando em produtos de degradação com estrutura menos recalcitrante em relação à molécula original, ou na mineralização do xenobiótico, produzindo compostos químicos simples, como: CO₂, H₂O, NH₃, SO₄⁻² e PO₄⁻² (Gaylarde, et al., 2001).

A biorremediação é muito utilizada para tratamento de águas residuárias para abatimento do excesso de matéria orgânica e redução de odores. Como em sistemas de tratamento de efluentes já existem microrganismos decompositores, a aplicação de biorremediadores teria a função de contribuir para esse processo com cepas de bactérias específicas e enzimas que catalisariam a degradação da matéria orgânica.

Contudo, cabe salientar que geralmente os produtos biorremediadores contém um substrato rico em nutrientes para que as microorganismos possam se proliferar no meio. O problema é que para ambientes naturais eutrofizados, esse acréscimo de nutrientes é indesejável, pois contribui para florações de algas. Por este motivo, biorremediadores não contribuem para controle de cianobactérias, podendo na realidade agravar os sintomas. O uso destes produtos se mostra mais interessante para catalisar a degradação de matéria orgânica em estações de tratamento de efluentes, onde se deseja geralmente reduzir as concentrações de DBO antes do efluente ser lançado em um corpo receptor, bem como odores. Por outro lado, as bactérias não reduzem as concentrações de fósforo total no meio aquático, uma vez que o fósforo não é volátil. Diferentemente do nitrogênio e carbono que possuem uma fase gasosa, o fósforo permanece no sistema, podendo apenas ser transformado pelas bactérias de forma

particulada (orgânica) em inorgânica (dissolvida) ou transformado em biomassa bacteriana.

O uso destes produtos em ambientes naturais deve ter como objetivo principal a redução de matéria orgânica, quando esta estiver de fato muito elevada, pois não contribuem para a redução de fósforo. Sendo assim, para uso em lagos eutrofizados, recomenda-se a aplicação concomitante de sequestradores de fósforo para evitar florações de cianobactérias e possibilitar a reversão do processo de eutrofização de fato.

c. **Mudballs (Bolas de lama)**

O princípio das mudballs é similar ao dos biorremediadores, isto é, baseia-se em utilizar microrganismos efetivos para melhorar a decomposição da matéria orgânica presente no lodo depositado em ambientes aquáticos. O princípio das *Mudballs* é acrescentar ao sistema uma variedade de microrganismos decompositores, como bactérias do ácido láctico, leveduras e bactérias fototróficas, fazendo com que os mesmos maximizem a capacidade do sistema em depurar a matéria orgânica (ZARINA et al., 2013).

Os microrganismos são acrescentados ao ambiente aquático na forma de pequenas bolas de barro/lama, daí o nome da técnica. Após a entrada no sistema, a ideia é que as bactérias presentes nas *Mudballs* comecem a decompor o lodo, e as bactérias autotróficas consumam os gases prejudiciais que possam ser liberados nesse processo, como metano, amônia e sulfeto de hidrogênio. A decomposição enriquece a água com aminoácidos e sacarídeos, o que aumentaria a densidade de fitoplâncton, que por sua vez aumentaria a concentração de oxigênio na água.

Um dos grandes obstáculos deste método é justamente a disponibilização ativa de nutrientes para a coluna de água, que pode trazer efeitos indesejáveis ao sistema. Lurling et al. (2010) demonstraram que os EM presentes nas *Mudballs* ou *Bokashi-balls* não conseguem controlar florações de cianobactérias. Segundo os autores, em experimentos controlados, não foi observada diferença nas densidades de cianobactérias entre o controle e o tratamento com *EM-mudball*. De maneira oposta, as concentrações de clorofila-a foram significativamente maiores com o tratamento em

função do enriquecimento da água com nutrientes. Isso pode causar problemas para a biota do ecossistema, visto que altas produções de oxigênio durante o dia pressupõem alta taxa de consumo durante a noite, podendo baixar níveis de oxigênio dissolvido da água a valores próximos de zero nos períodos noturnos.

Em relação à decomposição do lodo, não há evidências científicas da eficiência do produto para tal fim na literatura. Mesmo que o produto fosse capaz de decompor matéria orgânica particulada e recalcitrante no sedimento de uma lagoa, o mesmo estaria liberando grandes quantidades de fósforo dissolvido para a coluna, efeito indesejável que resultaria em florações de cianobactérias.

6.2.2. Considerações gerais e tecnologia indicada

Entre os métodos apresentados, alguns têm efeitos apenas paliativos, não agindo sobre a causa da eutrofização: o excesso de nutrientes. Outros métodos apresentam pouca eficiência, com resultados restritos a pequenos intervalos de tempo e somente nas imediações da área tratada. O uso de certos algicidas, por exemplo, além de oferecer sério risco para fauna aquática e ser cumulativo no meio ambiente, não atua sobre a fonte do problema, que é o excesso de nutrientes responsável pelo crescimento descontrolado das algas. Assim, o produto se torna apenas um paliativo tóxico que não resolve o problema, uma vez que as florações retornam continuamente devido a disponibilidade do excesso de fósforo.

Alguns métodos de tratamento não possuem eficiência comprovada na literatura técnica no combate à eutrofização ou floração de cianobactérias, como a aeração e a utilização de *mudballs*.

Dentre os métodos para recuperação de ambientes eutrofizados, alguns são capazes de combater o excesso de nutrientes, como os coagulantes e os sequestradores de fósforo. Esses produtos capturam os nutrientes da coluna d'água, imobilizando-os ao fundo e tornando-os indisponíveis. Em particular, no sistema lagunar Piratininga-Itaipu os métodos exequíveis que promoveriam os melhores resultados seriam a dragagem do material de fundo da Lagoa de Piratininga ou a aplicação de produtos sequestrantes de fósforo. Não se recomenda o uso de

coagulantes devido à formação de mais lodo no fundo da lagoa, que já se encontra assoreada. Ademais, o uso de coagulantes não garante a imobilização do fósforo no sedimento de fundo, pois os flocos formados tendem a se desmanchar e disponibilizar os nutrientes em função da ação ressuspensão causada pelo vento. Os coagulantes a base de alumínio são tóxicos, e oferecem elevado risco para a fauna aquática e possibilidade de mortandades de peixes.

O Quadro 7 apresenta pontos positivos e negativos de alguns dos métodos descritos acima para controle de eutrofização e floração de cianobactérias.

Quadro 7: Prós e contras de alguns métodos de controle de eutrofização e floração de cianobactérias.

MÉTODOS DE TRATAMENTO	PRÓS	CONTRAS
Métodos físicos		
Aeradores mecânicos (fontes, misturadores, etc)	Oxigenação da massa d'água.	Ação restrita à área dos equipamentos; Possibilidade de ressuspensão de sedimentos e fósforo; Consumo de energia elétrica.
Ultrassom de alta intensidade	Eficiente na destruição de células de cianobactérias no campo próximo.	Ação restrita ao local e momento de aplicação; Efeitos sobre organismos não alvos; Alto custo energético Não reduz a concentração de nutrientes
Escavação ou dragagem	Remoção da fonte interna de nutrientes	Aumento de turbidez; Perturbação do ecossistema.
Métodos químicos		
Algicidas	Eficiente na destruição de células de cianobactérias.	Curta duração, necessita reaplicação. Não reduz a concentração de nutrientes
Peróxido de hidrogênio	Eficiente na destruição de células de cianobactérias.	Curta duração, necessita reaplicação; Forte oxidante, age na destruição de células não alvo. Não reduz a concentração de nutrientes
Herbicidas	Eficiente na destruição de células de cianobactérias.	Possíveis efeitos colaterais decorrentes da toxicidade do produto. Não reduz a concentração de nutriente
Coagulantes	Imobilização de células de cianobactérias e nutrientes; Longa duração (meses).	Possibilidade de desagregação dos flocos, liberando nutrientes e fomas tóxicas para o caso do alumínio.
Bentonita ionicamete ativada com lantânio (Phoslock)	Imobilização do fósforo da coluna d'água e sedimento; Longa duração (meses ou anos).	O produto é importado e, portanto, para alguns ambientes pode-se tornar uma solução onerosa.
Métodos biológicos		
Macrófitas	Diminuição da turbidez; Longa duração (meses).	Necessidade de remoção periódica das plantas.
Mudballs (bolas de lama)	Não há evidências científicas de eficácia e funcionamento	Não há evidências científicas de eficácia e funcionamento

Como a Lagoa de Piratininga é um ambiente muito raso (<1,5 m), com elevado teor de matéria orgânica e fósforo no sedimento, entende-se que a solução mais indicada seria a bentonita ativada com lantânio (Phoslock) associada com a dragagem. Indica-se a dragagem para remover o excesso de matéria orgânica no sistema e aumentar a profundidade principalmente em áreas litorâneas onde há matéria orgânica exposta, causando mau odor. O desassoreamento iria contribuir também maior renovação hidráulica e longevidade da Lagoa de Piratininga.

Como o custo para dragagem é muito elevado e existem dificuldades para disposição do material dragado, poderia se priorizar inicialmente a dragagem em áreas onde as profundidades são inferiores a 0,5 m. Essas áreas correspondem a aproximadamente 40% da área total da lagoa (130 ha). Com base em trabalhos científicos supracitados, não há evidências ou estudos de caso que suportem o uso de bolas de lama (mudballs) para redução do volume de lodo em sedimentos, sendo a dragagem até o momento o único método para essa finalidade.

Em relação à qualidade da água, conforme descrito anteriormente, o maior problema da Lagoa de Piratininga é a elevada concentração de fósforo total que favorece florações de cianobactérias no verão. Mesmo após todas as obras avaliadas e indicadas, as simulações mostraram que as concentrações ainda permaneceriam tipicamente eutróficas. Deste modo, o uso do remediador de bentonita ativada com lantânio teria o potencial de isoladamente melhorar a condição trófica do sistema, já outros parâmetros como amônia, DBO e coliformes, por exemplo, atenderiam os limites preconizados para água de Classe 1, tanto salobra quanto salina. Atualmente, esses parâmetros já atende as condições de Classe 1 na maior parte do tempo.

7. CONSIDERAÇÕES SOBRE O ESTUDO

A recuperação do sistema lagunar Piratininga-Itaipu requer esforços em duas diferentes frentes de atuação. A primeira e mais importante delas é o abatimento de cargas poluidoras que chegam até as lagoas e a segunda são as obras hidráulicas com o objetivo de melhorar a circulação e renovação das águas. Ambas as frentes de atuação possuem seus efeitos, dificuldades, custos e impactos, conforme apresentado acima.

As ações para redução do aporte de cargas e melhoria no sistema de saneamento devem ser com certeza a prioridade e foco central de atuação do município. Porém, sabe-se que este é um processo de médio e longo prazo e que requer um trabalho intenso de fiscalização individualizada em todas as unidades residenciais e comerciais existentes nas bacias contribuintes das lagoas. Por outro lado, sabe-se que a execução de obras hidráulicas pode trazer alguns efeitos indesejáveis para o sistema. Por isso, ao invés de buscar soluções de engenharia com obras hidráulicas ainda mais impactantes do que aquelas já avaliadas em estudos pretéritos, o estudo da Hydrosience buscou alcançar o equilíbrio entre a implantação de obras hidráulicas com os abatimentos de cargas necessárias para recuperação e manutenção da qualidade ambiental do sistema.

Além disso, o estudo realizado trouxe uma série de avanços no entendimento e conhecimento do sistema lagunar, apresentados em detalhes nos relatórios anteriores, e que foram utilizados para embasar tomadas de decisão, tais como:

- Estudos morfodinâmicos e o monitoramento de nível e correntes trazendo maior confiabilidade aos resultados e maior entendimento sobre os efeitos das obras hidráulicas na qualidade de água do sistema;
- Monitoramento ambiental e calibração dos modelos hidrodinâmicos e de qualidade água que permitiram uma representação robusta em relação a todos estudos realizados anteriormente no sistema, com capacidade de predição e simulação de cenários hipotéticos;
- Avaliação dos efeitos das obras hidráulicas sobre a qualidade de água do sistema, incluindo a dragagem do Canal de Itaipu, dragagem do Canal de Camboatá e desobstrução do Túnel do Tibau;
- Estudos de abatimentos de carga e seus efeitos na qualidade de água do sistema;
- Efeito combinado do abatimento de cargas com as obras hidráulicas;
- Definição de metas de abatimento de carga em diferentes horizontes de projeto;

- Avaliação e definição de ações de remediação in situ para acelerar o processo de recuperação ambiental de qualidade de água considerando as cargas da bacia e o passivo de nutrientes no sedimento do sistema.

8. ESTIMATIVAS DE CUSTOS

O modelo de gestão proposto inclui a execução e manutenção das obras sugeridas. Os custos das medidas propostas foram estimados a partir dos custos de material e mão de obra envolvidos e da comparação com obras similares no país. Ressalta-se que as estimativas realizadas são aproximadas, pois, não há projeto executivo que possibilite um orçamento adequado dos custos envolvidos. O Quadro 8 apresenta um resumo dos custos aproximados para as obras propostas para recuperação do sistema lagunar, detalhados na sequência.

Quadro 8: Custos aproximados das obras propostas para recuperação do sistema lagunar.

Obras	Custo aproximado em reais
Alteamento do Molhe (por molhe)	737 mil
Prolongamento do Molhe (por molhe)	12 milhões
Prolongamento do Molhe em 140 m	21 milhões
Dragagem do Canal de Itaipu	3,0 milhões
Proteção contra erosão das margens internas caso haja prolongamento do molhe em 140m	2,5 milhões
Elaboração do projeto básico e executivo dos alagados construídos	1,7 milhões*
Programa “Se Liga”	1,5 milhões
Dragagem do Canal de Camboatá	777 mil
Dragagens localizadas na Lagoa de Piratininga	18 milhões
Dragagem da Lagoa de Piratininga para redução da fonte interna de fósforo	90 milhões
Remediação <i>in situ</i> com Phoslock (1 ano de tratamento)	4,5 milhões

* Segundo Concorrência Pública Nº 001/2018

8.1. ALTEAMENTO DO MOLHE

Considerando o molhe existente como núcleo, o alteamento para uma altura de 6,2 metros resulta em área transversal trapezoidal de 98,33m². Nessas condições, estima-se um volume necessário de 2.949,96 m³. A estimativa de custo para um comprimento de 30 metros, considerando o custo unitário de 250,00 por metro cúbico, resulta em um custo aproximado de R\$ 737.490,00.

- *Custo unitário = R\$ 250,00/m³*
- *Volume necessário = 2.949,96 m³ por molhe*
- *Custo total = R\$ 737.490,00 por molhe*

8.2. PROLONGAMENTO DO MOLHE

O volume de material necessário para o prolongamento do molhe foi estimado a partir de uma área transversal trapezoidal de 245,16 m². Para o prolongamento do molhe foi estimado um custo unitário de R\$ 300,00 por metro cúbico. O volume necessário de material foi estimado em 19.612,8 m³ para o prolongamento para 80 metros e 34.322,4 m³ para 140 metros. O prolongamento do molhe para 80 metros resultou em um custo aproximado de R\$ 5.883.840,00 por molhe. Similarmente, o custo estimado para prolongamento do molhe para 140 metros foi de R\$ 10.296.720,00.

- *Custo unitário = R\$ 300,00/m³*
- *Custo total – 80 metros = R\$ 5.883.840,00 por molhe*
- *Custo total – 140 metros = R\$ 10.296.720,00 por molhe*

8.3. DRAGAGEM CANAL DE ITAIPU

A estimativa de custo da dragagem do Canal de Itaipu foi realizada a partir do cálculo do volume a ser dragado e do custo unitário da retroescavadeira por metro cúbico. O material a ser dragado no canal de Itaipu é constituído majoritariamente por areia que pode ser reutilizada na área de praia adjacente. O cálculo do volume a ser dragado no Canal de Itaipu foi realizado com base na configuração atual do Canal e a configuração desejada após dragagem, indicadas na Figura 60 e Figura 61.

- *Volume a dragar = 96.746 m³*
- *Custo unitário = 30,00/m³*
- *Custo total = 2.902.380,00*

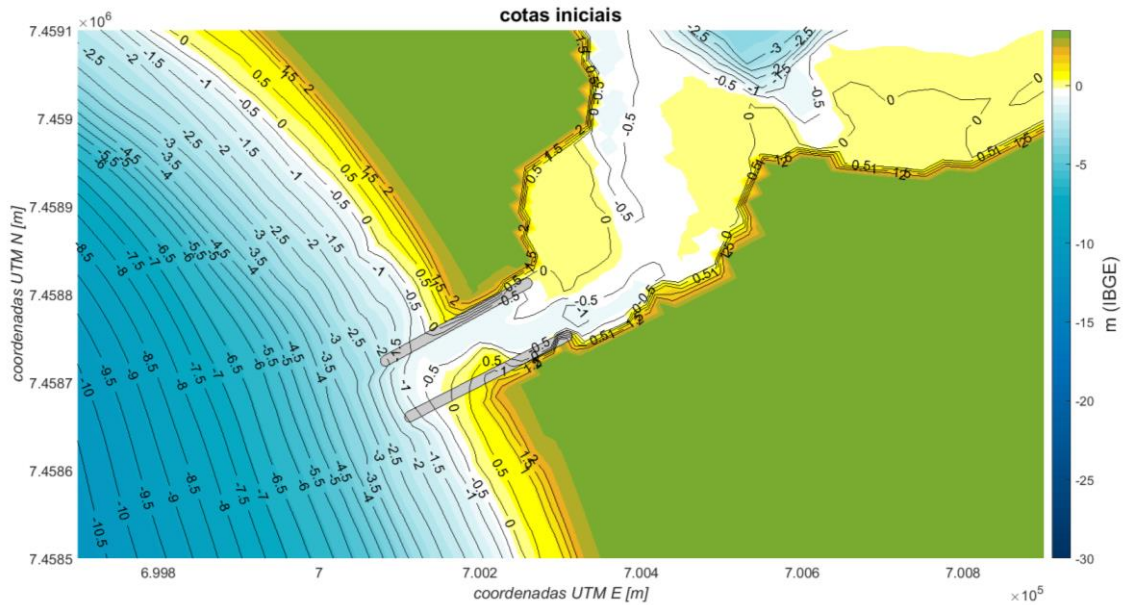


Figura 60: Conformação atual do Canal de Itaipu, considerada na estimativa de volume a ser dragado.

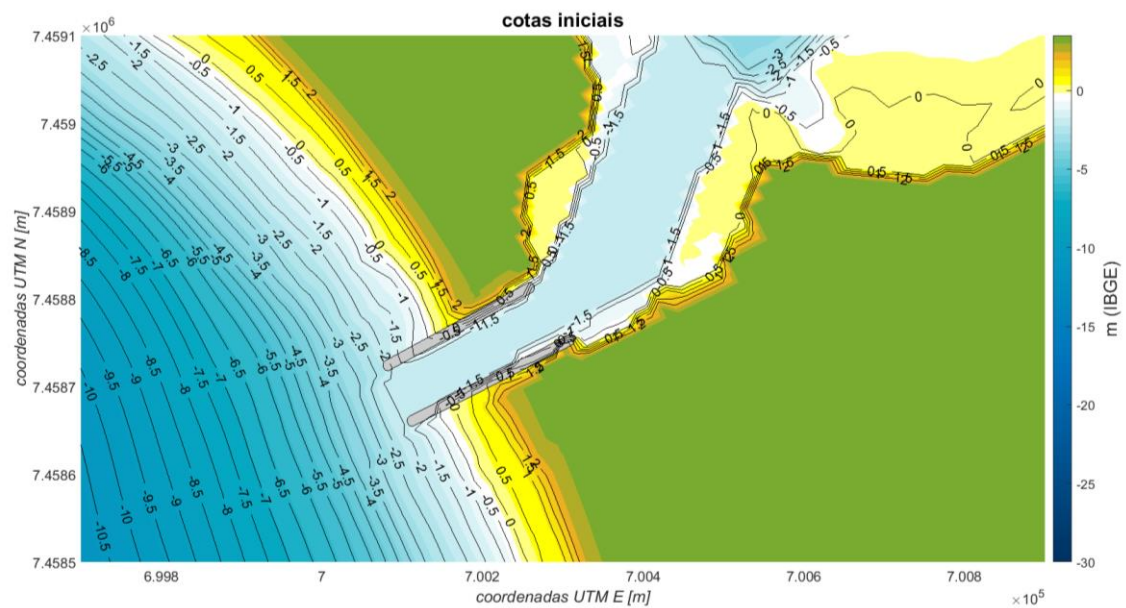


Figura 61: Conformação desejada do Canal de Itaipu, considerada na estimativa de volume a ser dragado.

8.4. PROTEÇÃO CONTRA EROSÃO

Como mencionado anteriormente, caso haja prolongamento do molhe em 140m, é necessário que se faça uma proteção das margens internas, estimada em 2,5 milhões.

8.5. ALAGADOS CONSTRUÍDOS

O projeto dos Alagados Construídos visa abater as cargas que chegam à Lagoa de Piratininga, através de um sistema de direcionamento e filtração das águas dos principais rios contribuintes da Lagoa de Piratininga. O projeto não engloba a Lagoa de Itaipu, e, portanto afeta diretamente somente as cargas recebidas pela Lagoa de Piratininga. Os Alagados Construídos são parte do projeto Parque Orla de Piratininga (POP), que contempla outras melhorias na região da orla dessa lagoa.

O custo estimado para a elaboração do projeto básico e executivo dos Alagados Construídos em Piratininga é de aproximadamente 1,7 milhões de reais, segundo consta na Concorrência pública Nº 001/2018.

8.6. ABATIMENTO DE CARGAS POLUIDORAS

Niterói possui quase a totalidade de sua área urbana servida de rede coletora de esgoto. As cargas poluidoras de esgoto que atingem as lagoas são provenientes de ligações clandestinas de esgoto na rede de drenagem urbana e, em menor escala, de eventuais extravasamentos das elevatórias do sistema de coleta e transporte de esgoto. Além disso, a ocorrência de ocupações irregulares na área de drenagem das lagoas, desprovida de rede coletora de esgoto ou soluções individuais, também contribui para o aporte de carga poluidora para as lagoas.

O abatimento das cargas poluidoras também será realizado através do controle e regularização das ligações clandestinas de esgoto na drenagem urbana, e implantação de rede coletora nas regiões atualmente desprovidas. O município dispõe de um programa de combate às ligações clandestinas de esgoto – “Programa Ligado na Rede”. O reforço das atividades de fiscalização do programa, em conjunto com as obras de implantação da rede, é necessário para atingir as reduções estimadas de carga. A ausência de estatísticas atualizadas sobre a quantidade de ligações clandestinas impossibilita previsões de custo e tempo necessários para atingir as metas propostas.

Outra opção para o abatimento de cargas é a implementação de sistemas alternativos de saneamento. Esses projetos já estão sendo realizados na bacia do Rio Jacaré e constituem-se de um plano de escoamento definido em sub-bacias de esgotamento. As redes coletoras são do tipo coletor simples, executadas em becos e vielas, onde os efluentes são lançados em coletores já existentes. As ligações domiciliares são feitas por caixas de inspeção com ligação, nas redes coletoras implantadas, através de tubos de PVC de 100mm. A implementação desse sistema alternativo pode contribuir na redução do aporte de esgotos para o sistema lagunar.

A seguir, é apresentada uma estimativa de custos para o Programa de controle e regularização de ligações clandestinas de esgoto, que abrange os bairros localizados nas áreas de contribuição das lagoas. A estimativa de custos foi realizada com base no número de domicílios e de habitantes de cada bairro e número de fiscalizações a serem realizadas por bairro. O número de domicílios e de habitantes foi obtido de estatísticas apresentadas pelo censo do IBGE de 2010, apresentado no Quadro 10. Os custos das atividades de fiscalização foram baseados em orçamento de programa similar, realizado em município do sul do país (Florianópolis), apresentado em detalhes no Quadro 10. O valor total estimado para o programa com duração de doze meses é de R\$ 1.572.817,57.

Quadro 9: Número de domicílios e de habitantes por bairro e estimativa de imóveis a serem fiscalizados durante o programa.

Bacia	Bairro	Domicílios	Habitantes	Hab./domicilio	Estimativa de imóveis a fiscalizar (25% do número de domicílios)
Itaipu	Camboinhas - Niterói (RJ)	1.013	3.138	3,1	253
Itaipu	Itaipu - Niterói (RJ)	2.096	6.320	3,0	524
Itaipu	Santo Antônio - Niterói (RJ)	1.459	4.758	3,3	365
Itaipu	Maravista - Niterói (RJ)	3.190	10.056	3,2	798
Itaipu	Engenho do Mato - Niterói (RJ)	3.230	10.038	3,1	808
Itaipu	Serra Grande - Niterói (RJ)	2.943	9.246	3,1	736
Itaipu	Total	13.931	43.556		
Piratininga	Cafubá - Niterói (RJ)	993	3.289	3,3	248
Piratininga	Jacaré - Niterói (RJ)	1.004	3.563	3,5	251
Piratininga	Piratininga - Niterói (RJ)	5.044	16.098	3,2	1.261
Piratininga	Jardim Imbuí - Niterói (RJ)	376	1.127	3,0	94
Piratininga	Total	7.417	24.077		
<u>TOTAL</u>		<u>21.348</u>	<u>67.633</u>		<u>5.337</u>

Quadro 10: Orçamento preliminar para programa com 12 meses de duração.

DESCRIÇÃO	UNIDADE	QTDE	CUSTO UNIT.	CUSTO TOTAL
Administração local				
Administração do contrato				
aluguel de imóvel (sede do programa com 2 cômodos para equipe e reunião/atendimento, copa e banheiro)	meses	12	R\$ 2.146,76	R\$ 25.761,12
engenheiro residente	meses	12	R\$ 13.942,09	R\$ 167.305,08
técnico de saneamento/edificações/ambiente (coordenador)	meses	24	R\$ 4.335,79	R\$ 104.058,96
estagiário/bolsista durante contrato (cinco)	un.	12	R\$ 4.482,95	R\$ 53.795,40
comunicação social				
elaboração e execução do plano				
serviços de comunicação	meses	12	R\$ 3.411,58	R\$ 40.938,96
materiais para comunicação	meses	12	R\$ 3.468,60	R\$ 41.623,20
assessor de imprensa	meses	12	R\$ 4.887,04	R\$ 58.644,48
profissional criador de conteúdo técnico ambiental	meses	12	R\$ 4.887,04	R\$ 58.644,48
serviços de inspeção				
vistoria de instalações prediais				
vistoria de instalações prediais de esgoto - imóvel público, comercial e residencial unifamiliar, com até 12 pontos de inspeção	un.	4100*	R\$ 16,40	R\$ 67.240,00
vistoria de instalações prediais de esgoto - imóvel público, comercial e residencial unifamiliar, com até 20 pontos de inspeção	un.	800*	R\$ 29,08	R\$ 23.264,00
vistoria de instalações prediais de esgoto - imóvel público, comercial e residencial unifamiliar, com mais de 20 pontos de inspeção	un.	600*	R\$ 49,05	R\$ 29.430,00
retorno de vistoria para constatação de regularização	un.	1200*	R\$ 16,40	R\$ 19.680,00
inspeção em ponto de contribuição com o lançamento de corante	un.	70000*	R\$ 7,59	R\$ 531.300,00
aluguel de veículo (cinco veículos)	un.	12	R\$ 11.347,90	R\$ 136.174,80
equipe de inspeção fixa - apoio à fiscalização	meses	12	R\$ 12.478,89	R\$ 149.746,68
estrutura básica para base local itinerante				
aluguel de sede itinerante	meses	12	R\$ 1.325,94	R\$ 15.911,28
aparelho de comunicação (smartphone com plano anual de pacote de dados)	un.	7	R\$ 1.123,77	R\$ 7.866,39
estrutura básica para o evento (notebook, mesas, cadeiras, projetos, caixa amplificadora, microfone, roteador de dados)	un.	1	R\$ 18.704,61	R\$ 18.704,61
materiais de consumo e limpeza	meses	12	R\$ 412,94	R\$ 4.955,28
estrutura básica para a sede				
estrutura (mesas, cadeiras, armários, telefone, internet, impressora, notebook)	un.	1	R\$ 9.408,01	R\$ 9.408,01
materiais de consumo e limpeza (resma de papel, caneta, borracha, cartucho, material de limpeza)	meses	12	R\$ 697,07	R\$ 8.364,84
TOTAL				R\$ 1.572.817,57

* Dados foram obtidos das estatísticas apresentadas pelo censo do IBGE de 2010.

8.7. DRAGAGEM DO CANAL DE CAMBOATÁ

A estimativa de custo da dragagem do Canal de Camboatá foi realizada a partir do cálculo do volume a ser dragado e do custo unitário da retroescavadeira por metro cúbico. O cálculo do volume a ser dragado no Canal de Camboatá foi realizado com base na configuração atual do Canal e a configuração desejada após dragagem, indicadas na Figura 62.

- *Volume a dragar* = 25.893 m³
- *Custo unitário* = 30,00/m³
- *Custo total* = 776.796,00

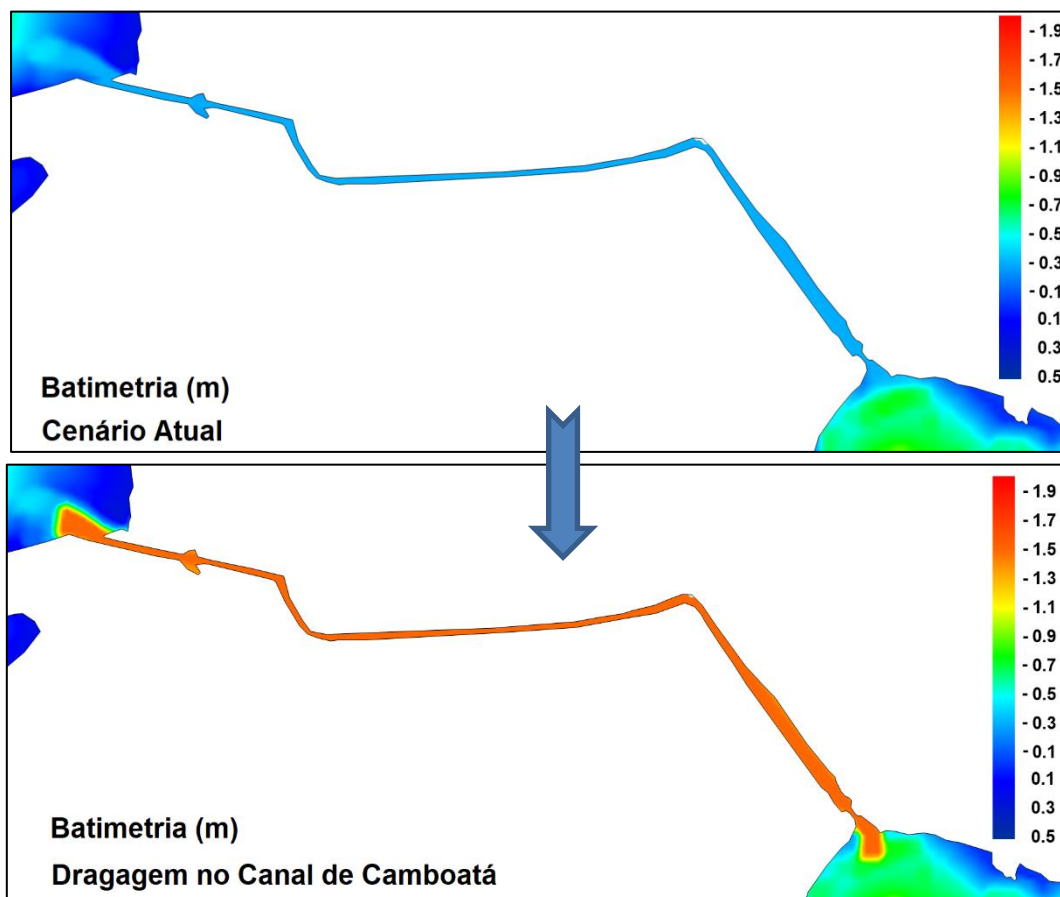


Figura 62: Dragagem na área interna do Canal de Camboatá até a cota -1,5 m (IBGE).

8.8. DRAGAGEM LOCALIZADA NA LAGOA DE PIRATININGA

A estimativa de custo da dragagem localizada foi realizada a partir do cálculo do volume a ser dragado e do custo unitário da retroescavadeira por metro cúbico.

- *Volume a dragar* = 600.000 m³

- *Custo unitário = 30,00/m³*
- *Custo total = 18.000.000,00*

8.9. DRAGAGEM NA LAGOA DE PIRATININGA PARA REDUÇÃO DA FONTE INTERNA DE FÓSFORO COMO REMEDIAÇÃO

Como mencionado, uma das alternativas para reduzir a fonte interna de fósforo e, conseqüentemente, minimizar a possibilidade de eventos de florações é a execução da dragagem em toda a Lagoa de Piratininga. A dragagem para remoção do aporte interno de fósforo deve ocorrer por toda a Lagoa de Piratininga com retirada de no mínimo 0,5m de profundidade, utilizando retroescavadeira e batelão. Com isso o volume de dragagem é de aproximadamente 1,435 hm³, com custo estimado em R\$ 45 milhões. Porém, recomendamos que seja dragado em torno de 1m para aumentar a profundidade de modo mais efetivo uma vez que a profundidade média da lagoa é de 0,5m. Com isto o custo seria aproximadamente R\$ 90 milhões.

8.10. REMEDIAÇÃO IN SITU COM BENTONITA ATIVADA COM LANTÂNIO (PHOSLOCK)

O uso do remediador físico químico de bentonita ativada com lantânio é indicado somente para a Lagoa de Piratininga, onde há problemas de floração de cianobactérias em função das concentrações de fósforo elevadas e longo tempo de residência. Atualmente o tempo de residência é de aproximadamente 9 meses e mesmo com a realização de todas obras de recuperação indicadas continuará sendo superior a 3 meses, tempo suficiente para desenvolvimento de florações (Moss, 1990, Scheffer, 1998).

Com base nos dados de qualidade da água e sedimento levantados na Lagoa de Piratininga durante 2018 e 2019, é possível realizar uma estimativa da dosagem total do remediador que seria necessária para reduzir o estoque de fósforo na massa da água e sedimento, bem como controlar as cargas da bacia anualmente.

A dosagem do remediador é calculada especificamente para cada corpo da água em função da concentração de fósforo total na coluna da água e de fósforo solúvel passível de ser liberada do sedimento em curto, médio e, eventualmente, longo prazo. Estas concentrações são multiplicadas pelo volume do lago e volume de

sedimento considerados para o tratamento. Além disso, podem ser consideradas as cargas das bacias contribuintes como fontes de nutrientes a serem também controladas.

No tratamento de águas doces, a concentração de fósforo potencialmente disponível, isso é, o estoque de fósforo, é multiplicado por 100 para obter a dosagem total, pois 100g de Phoslock® imobilizam 1g de fósforo (na forma solúvel PO₄-3). O cálculo da fonte interna de eutrofização em ambientes aquáticos leva em consideração as frações de fósforo prontamente disponíveis, as quais se referem à porção de fósforo na água intersticial, fósforo ligado a óxidos de Mn/Fe e fósforo orgânico ligado a detritos e bactérias.

O Relatório Integrado (Hydroscience, 2019b) indica os resultados de concentração de fósforo total encontradas em amostras de água e sedimento do Sistema Lagunar Piratininga Itaipu para diferentes pontos (Figura 63 e Figura 64). Segundo os resultados desse relatório, a concentração média de fósforo total registrada na coluna d'água para a Lagoa de Piratininga corresponde a 0,25 mg/L. Para o sedimento, considerando o valor médio dos pontos amostrais da Lagoa de Piratininga (123 mg de fósforo total por kg de sedimento), a quantidade de fósforo total na primeira camada de sedimento (0 – 3 cm) da lagoa de Piratininga, levando em consideração a área de 318 ha da lagoa, é de aproximadamente 1173 kg.

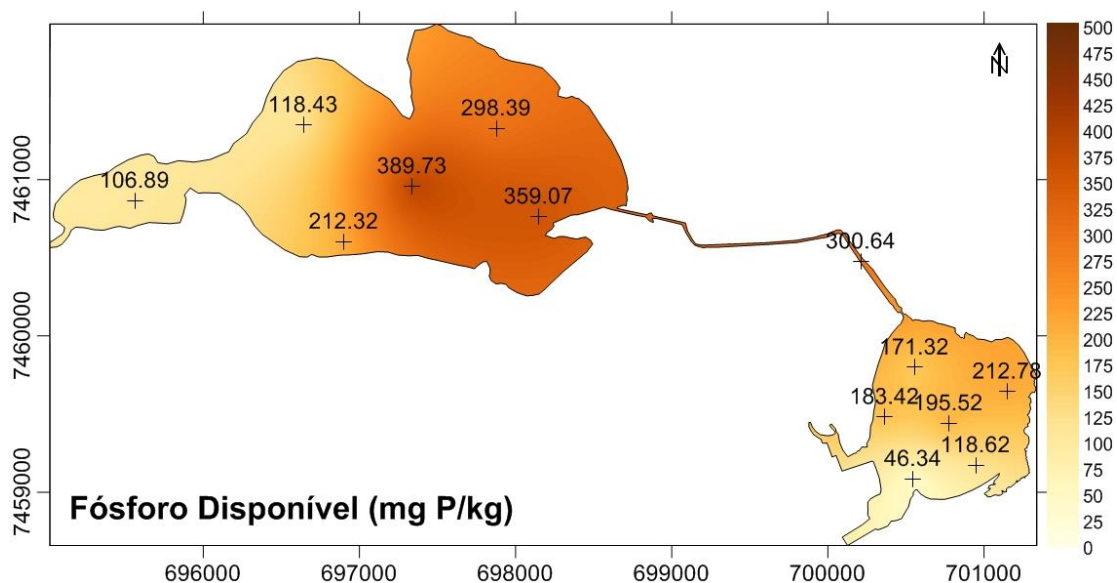


Figura 63: Distribuição espacial das concentrações de fósforo do sedimento prontamente disponíveis (0-5 cm) no sistema lagunar de Piratininga-Itaipu. Fonte: Hydroscience, 2019b.

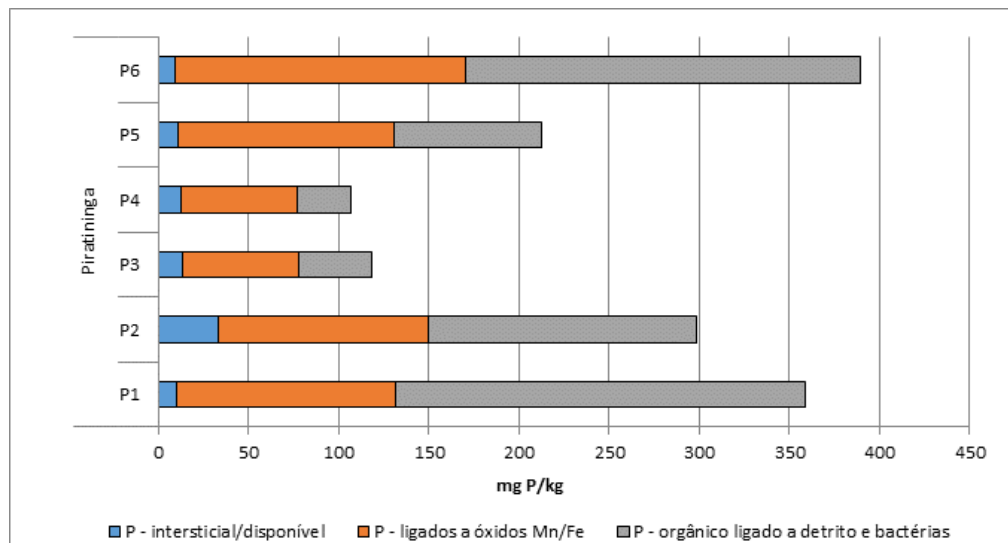


Figura 64: Distribuição das concentrações de fósforo do sedimento prontamente disponíveis (0-5 cm) no sistema lagunar de Piratininga-Itaipu. Fonte: Hydrosience, 2019b.

Considerando o controle das fontes de fósforo da coluna d'água e sedimento da Lagoa, a dosagem de Phoslock necessária para o tratamento da coluna da água e no Quadro 12 e a dosagem total estimada contemplando também o tratamento do sedimento é apresentada no Quadro 13.

Quadro 11: Estimativa de fósforo biodisponível na coluna d'água e respectiva dosagem de Phoslock para controle.

Concentração de Fósforo (PT) na Coluna da Água	0,25 g/m ³
Volume de água – Lagoa de Piratininga	2.741.064 m ³
Carga de Fósforo (PT) a ser tratada na Coluna da água	685 kg PT
Dosagem Phoslock (100:1)	68,5 ton

Quadro 12: Dosagem total de Phoslock® para remediação e controle da Lagoa de Piratininga.

FONTES DE PT	DOSAGEM DE PHOSLOCK (ton)
Coluna d'água	68,5 ton
Sedimento	117,3 ton
Total	185,8 ton

Além do fósforo presente na coluna d'água e no sedimento da Lagoa, devem ser consideradas, no futuro, as cargas de fósforo advindas dos contribuintes da lagoa. Essas cargas foram levantadas em amostragens de campo e publicadas nos relatórios de hidrologia (Hydrosience, 2018; Hydrosience, 2019b; Hydrosience, 2019c;

Hydroscience, 2019c) e estão compiladas na tabela acima. Porém, como as mesmas sofrerão redução no futuro próximo em função da instalação dos Alagados Construídos e melhorias no saneamento na bacia, a dosagem para as cargas deverá ser calculada posteriormente.

Aplicação do produto

A aplicação do produto é realizada com uso de embarcação de baixo calado, dotada de equipamento motobomba, especializada para dispersão homogênea do produto na área de interesse (Figura 65).



Figura 65: Demonstração do modo de aplicação da bentonita ativada com lantânio (Lagoa da Pampulha, 2017).

Custo estimado do tratamento

Segundo o fornecedor o custo atual do produto é de R\$ 24,50 por kilograma. Considerando a dosagem total estimada o custo total seria de aproximadamente R\$ 4.552.100,00.

9. REFERÊNCIAS

- BRANCO, J.O.; FREITAS, JR., F; VERANI, J.R. & HOSTIM-SILVA, M. 2009. Ictiofauna do Saco da Fazenda, Itajaí, SC. In: Branco, J.O.; Lunardon-Branco, M.J. & Bellotto, V.R. (org.) Estuário do rio Itajaí-Açu, Santa Catarina: caracterização ambiental e alterações antrópicas. Universidade do Vale do Itajaí, Itajaí. 207-226 pp.
- BOYD, C.E. water quality in ponds for aquaculture. Auburn: Alabama Agricultural Experiment station, Auburn University, 1990. 482 p.
- BUDSAEREECHAI S, KAMWIALISAK K, NGERNYEN Y (2012) Adsorption of lead, cadmium and copper on natural and acid activated bentonite clay
- CAVALCANTI, M.A.M.P. 1996. Impacto dos sistemas de saneamento “in situ” nas águas subterrâneas no bairro de Piratininga – Município de Niterói (RJ). Dissertação para o Programa de Pós Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia da Universidade de São Paulo. 128p.
- DING, S., SUN, Y., YANG, C., & XU, B. (2009). Removal of copper from aqueous solutions by bentonite and the factors affecting it. Ministry of Science and Technology, 19, 0489–0492.
- DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. Métodos e técnicas de tratamento de água. São Carlos: Rima, 2005. v. 2, 784 p.
- EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SiBCS (3ª edição). 2013.
- FONTENELLE, T.H; CORREÂ, W.B. 2012. Uso e cobertura do solo (1976-2011) e os desafios do planejamento urbano-ambiental integrado na Região Oceânica de Niterói. Revista GeoNORTE, Edição Especial, v. 3, n. 4, p1345-1357.
- FONTENELLE, T.H; CORREÂ, W.B. 2014. Impactos da Urbanização no Espelho D’água dos Sistemas Lagunares de Itaipu e de Piratininga, Niterói (RJ), Entre 1976 e 2011. Boletim de Geografia, v. 32, n.2, p. 150-157.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Demográfico 2010. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. Disponível em: <<http://censo2010.ibge.gov.br>>.

- INEA – Instituto Estadual do Ambiente. Elaboração do Plano Estadual De Recursos Hídricos do Estado do Rio de Janeiro. RT-01 – Estudos Hidrológicos e Vazões Extremas. Revisão 2. 2014.
- KNOOPERS, B.A. 1986. Diagnóstico Ambiental do Sistema Lagunar Piratininga / Itaipú, Niterói, – Boletim FBCN, vol. 24.
- MAIER, M.H. & TAKINO, M. 1985a Limnologia de reservatórios do sudeste do Estado de São Paulo, Brasil. II. Circulação e estratificação da água. B. Inst. Pesca, São Paulo, 12(1): 11-43.
- MATSUMURA-TUNDISI, T. 1986. Latitudinal distribution of Calanoida copepods in freshwater aquatic systems of Brazil. Rev. Brasil.Biol. 46(3):527-553.
- MOZETO, A. A.; ZAGATTO, P. A. Introdução de agentes químicos no ambiente. In: ZAGATTO, P. A.; BERTOLETTI, E. (Ed.). Ecotoxicologia aquática: métodos e aplicações. São Carlos: Rima, 2006. p. 15-38
- MUNKITTRICK, K.R.; PORTT, C.B.; VAN DER KRAAK, G.J.; SMITH, I.R. & ROKOSH, D.A. 1991 Impact of bleached kraft mill effluent on population characteristics, liver MFO activity, and serum steroids of the Lake Superior white sucker (*Catostomus commersoni*) population. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science, vol. 48, pp-1-10.
- NETHERLAND, M. D.; GETSINGER, K. D.; TURNER, E. G. Fluridone concentration and exposure time requirements for control of Eurasian watermilfoil and hydrilla. J. Aquat. Plant Manag., v. 31, p. 189-194, 1993.
- LANGLAIS, B., RECKHOW, D. and BRINCK, D., (Eds.), Ozone in water treatment: application and engineering. Lewis Publishers, Inc., Chelsea, Michigan, USA (1991).
- LURLING, M. TOLMA, Y. & OOSTERHOUT, F. (2010). Cyanobacteria blooms cannot be controlled by Effective Microorganisms (EM®) from mud- or Bokashi-balls. Hydrobiologia volume 646, pages133–143.
- LÜRLING M, TOLMAN Y. (2014). Beating the blues: Is there any music in fighting cyanobacteria with ultrasound? Water Res 66:361–373.
- LÜRLING, M AND MUCCI, M. (2020). Mitigating eutrophication nuisance: in-lake measures are becoming inevitable in eutrophic waters in the Netherlands.

- PALUDAN, C., & Jensen, H. S. (1995). Sequential extraction of phosphorus in freshwater wetland and lake sediment: significance of humic acids. *Wetlands*, 15(4), 365-373.
- PMN, Prefeitura Municipal de Niterói. 2015. Diagnóstico de Drenagem do Plano Municipal de Saneamento Básico de Niterói.
- PMN, Prefeitura Municipal de Niterói. 2018. Projeto Conceitual - Parque Orla Piratininga, Volume I e II.
- PROJCONSULT, Engenharia de projetos LTDA. Projeto Básico de Revitalização e Recuperação Ambiental do Complexo Lagunar Piratininga / Itaipu, Município de Niterói – RJ. Produto 15: Relatório final do projeto. 37p.
- PROSEMA. 2014. Projeto Executivo de macro e midro drenagem de 10 Sub-Bacias da Região Oceânica De Niterói – RJ. 165 f. Governo do Rio de Janeiro.
- PSENNER, R., Pucsko, R., & Sage, M. (1984). Fractionation of Organic and Inorganic Phosphorus Compounds in Lake Sediments, An Attempt to Characterize Ecologically Important Fractions(Die Fraktionierung Organischer und Anorganischer Phosphorverbindungen von Sedimenten, Versuch einer Definition Okologisch Wichtiger Fraktionen). *Archiv fur Hydrobiologie*, 1(1).
- RODRIGUES, R.C. 2004. Caracterização da Cobertura Vegetal e do Uso do Solo da Bacia Hidrográfica do Sistema Lagunar Piratininga – Itaipu Niterói – RJ. Monografia apresentada ao curso de Pós-Graduação em Geotecnologias aplicadas à análise ambiental e bacias hidrográficas da Universidade Federal Fluminense. 55p.
- SEMADS – Bacias Hidrográficas e Rios Fluminenses Síntese Informativa por Macrorregião Ambiental Rio de Janeiro. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, Estado do Rio de Janeiro. Projeto PLANÁGUA SEMADS/GTZ. 2011.
- SEMUR (Secretaria Municipal de Urbanismo e Controle Urbano). 2018. A História da Cidade de Niterói. Disponível em: <<http://urbanismo.niteroi.rj.gov.br>>.
- SHEARER, J. F. Development of a fungal pathogen for biocontrol of the submersed aquatic macrophyte *Hydrilla verticillata*. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON BIOLOGICAL CONTROL OF WEEDS, 9., 1996, Stellenbosch. Proceedings... Stellenbosch: 1996. p. 473-477.

- STOWA (1992) Ecologische Beoordeling em beheer van oppervlaktewater: Beoordelingssystem voor stromende wateren op basis van macrofauna. STOWA Report 92-8.
- USEPA - United States Environmental Protection Agency. Alternative disinfectants and oxidants guidance manual. 1999.
- VALENÇA, A. P. M. C; SANTOS, P. J. P. Macrobenthic community for assessment of estuarine health in tropical areas (Northeast, Brazil): review of macrofauna classification in ecological groups and application of AZTI Marine Biotic Index. Marine Pollution Bulletin, v. 64, n. 9, p. 1809-1820, 2012.
- WOLFINGBARGER, W. C. 1999. Influences of biotic and abiotic factors on seasonal succession of zooplankton in Hugo reservoir, Oklahoma, U.S.A. Hydrobiologia 400:13-31.
- WURTS, W. A. & DURBOROW, R. M. Interactions of pH, Carbon Dioxide, Alkalinity and Hardness in Fish Ponds. Southern Regional Aquaculture Center, Frankfort. n. 464, 1992.
- ZARINA, Z., YAACOB, ND., BAKRI, AMM., RUZAIDI, CM. (2013). Potential of Mud Ball From Biolarvacide From Fermented Malaysia's Ulam Herbs. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 7(5): 236-241