



**MODELAGEM DE QUALIDADE DE ÁGUA DO SISTEMA LAGUNAR PIRATININGA-ITAIPU
FASE II: SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS COM VISTAS AS AÇÕES DE RECUPERAÇÃO**



**HYDRO
SCIENCE**

**CONTRATO SEXEC Nº 07/2018 - ELABORAÇÃO DE ESTUDOS
PARA ANÁLISE DA CONDIÇÃO AMBIENTAL DO SISTEMA
PERILAGUNAR PIRATININGA-ITAIPU – NITERÓI**

PORTO ALEGRE, 14 DE ABRIL DE 2020

MODELAGEM DE QUALIDADE DE ÁGUA DO SISTEMA LAGUNAR PIRATININGA-ITAIPU

FASE II: SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS COM VISTAS AS AÇÕES DE RECUPERAÇÃO

CONTRATO SEEXEC Nº 07/2018 - ELABORAÇÃO DE ESTUDOS PARA ANÁLISE DA CONDIÇÃO AMBIENTAL DO SISTEMA PERILAGUNAR PIRATININGA-ITAIPU - NITERÓI

Preparado para:

*PREFEITURA MUNICIPAL DE NITERÓI - RJ
SECRETARIA EXECUTIVA
Niterói – RJ*

Preparado por:

*HIDROSCIENCE CONSULTORIA E RESTAURAÇÃO AMBIENTAL EIRELI
Porto Alegre - RS*

Distribuição:

01 cópia – Prefeitura Municipal de Niterói – RJ.

01 CÓPIA – HIDROSCIENCE Consultoria e Restauração Ambiental EIRELI.

Mês/Ano	Documento
Abril, 2020	RE_WAQ_Cenarios_Futuros.docx

Controle de Produção do Documento

Profissional	Qualificação	Registro Profissional	Cargo/Função	Assinatura
Tiago Finkler Ferreira	Biólogo Ms. Dr. Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental	CRBIO RS 41024	Coordenação Geral e Responsabilidade técnica dos serviços	

Sumário

1.	Apresentação	5
2.	Área de estudo	6
3.	Ações e medidas estudadas	10
4.	Modelagem	15
4.1.	Modelagem Hidrodinâmica – DELFT3D-FLOW	15
4.1.1.	Principais Equações	16
4.2.	Discretização Espacial e Batimetria	21
4.2.1.	Grade Numérica	21
4.2.2.	Batimetria	27
4.2.3.	Parâmetros Físicos da Modelagem Hidrodinâmica	30
4.3.	Modelagem de Qualidade de Água DELFT3D-WAQ	30
4.3.1.	Condição Inicial	32
4.3.2.	Condições de Contorno	32
4.3.3.	Calibração do Modelo de Qualidade da Água	34
5.	Cenários simulados	35
5.1.	Cenários futuros considerando apenas as alterações hidrodinâmicas	36
5.2.	Cenários futuros considerando abatimento de cargas isoladamente	36
5.3.	Cenários futuros considerando alterações hidrodinâmicas em conjunto com abatimento de cargas	37
6.	Resultados das Simulações Computacionais	38
6.1.	Cenários futuros - alterações hidrodinâmicas	39
6.1.1.	Nível d'água	40
6.1.2.	Tempo de residência	68
6.1.3.	Salinidade	76
6.1.4.	COT	87
6.1.5.	Fósforo total	93

6.1.6.	Amônia	98
6.1.7.	Considerações das alterações hidrodinâmicas sobre a qualidade de água do sistema lagunar Piratininga-Itaipu	103
6.2.	Cenários futuros - abatimento de cargas.....	103
6.2.1.	COT.....	103
6.2.2.	Fósforo total	107
6.2.3.	Amônia	110
6.2.4.	Considerações dos cenários de abatimento de cargas nas bacias e seus efeitos sobre a qualidade de água do sistema lagunar Piratininga-Itaipu ...	112
6.3.	Cenários futuros - alterações hidrodinâmicas em conjunto com abatimento de cargas.....	113
6.3.1.	COT.....	113
6.3.2.	Fósforo total	118
6.3.3.	Amônia	123
6.3.4.	Considerações dos cenários de alterações hidrodinâmica em conjunto com os abatimentos de cargas nas bacias e seus efeitos sobre a qualidade de água do sistema lagunar Piratininga-Itaipu.....	126
7.	Seleção das ações e medidas para recuperação do sistema	128
8.	Referências.....	135
9.	Anexos	138

1. APRESENTAÇÃO

Este documento apresenta o Relatório de **MODELAGEM DE QUALIDADE DE ÁGUA DO SISTEMA LAGUNAR PIRATININGA-ITAIPU - FASE II: SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS COM VISTAS AS AÇÕES DE RECUPERAÇÃO** para melhoria 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 aos 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 estudadas para recuperação da qualidade ambiental do Sistema Lagunar Piratininga-Itaipu e os resultados esperados na qualidade de água do sistema. O objetivo desse relatório é apresentar os efeitos das ações propostas a partir de simulações computacionais. Os resultados do diagnóstico ambiental do sistema lagunar bem como as simulações do cenário atual e das alterações morfodinâmicas foram apresentados em relatórios anteriores; portanto, o presente documento apresenta somente os resultados dos cenários futuros de qualidade da água.

Após a identificação da área de estudo (Capítulo 2), são apresentadas as ações e medidas estudadas visando à recuperação ambiental do sistema (Capítulo 3). Na sequência são apresentadas a metodologia utilizada (Capítulo 4), os cenários simulados (Capítulo 5) e os resultados esperados sobre a qualidade da água do sistema para cada um dos cenários simulados no modelo de qualidade de água (Capítulo 6). Com base nas simulações, foram selecionadas e elencadas, em ordem de prioridade, as ações e medidas a serem tomadas visando à recuperação ambiental do sistema e discutidos os resultados esperados (Capítulo 7).

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 2018, a população estimada no município é de 511.786 habitantes (IBGE, 2010).

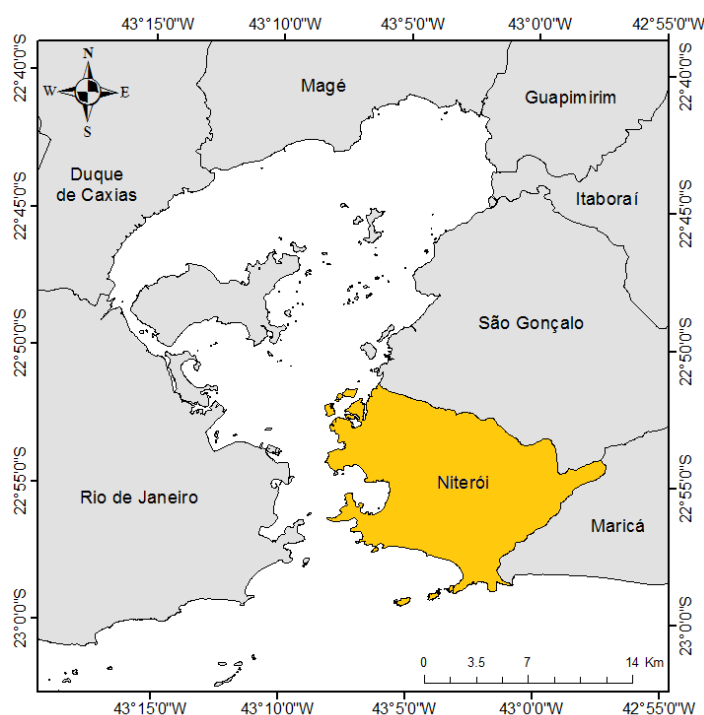


Figura 1: Localização do município de Niterói e cidades ao entorno.

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 ainda 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).

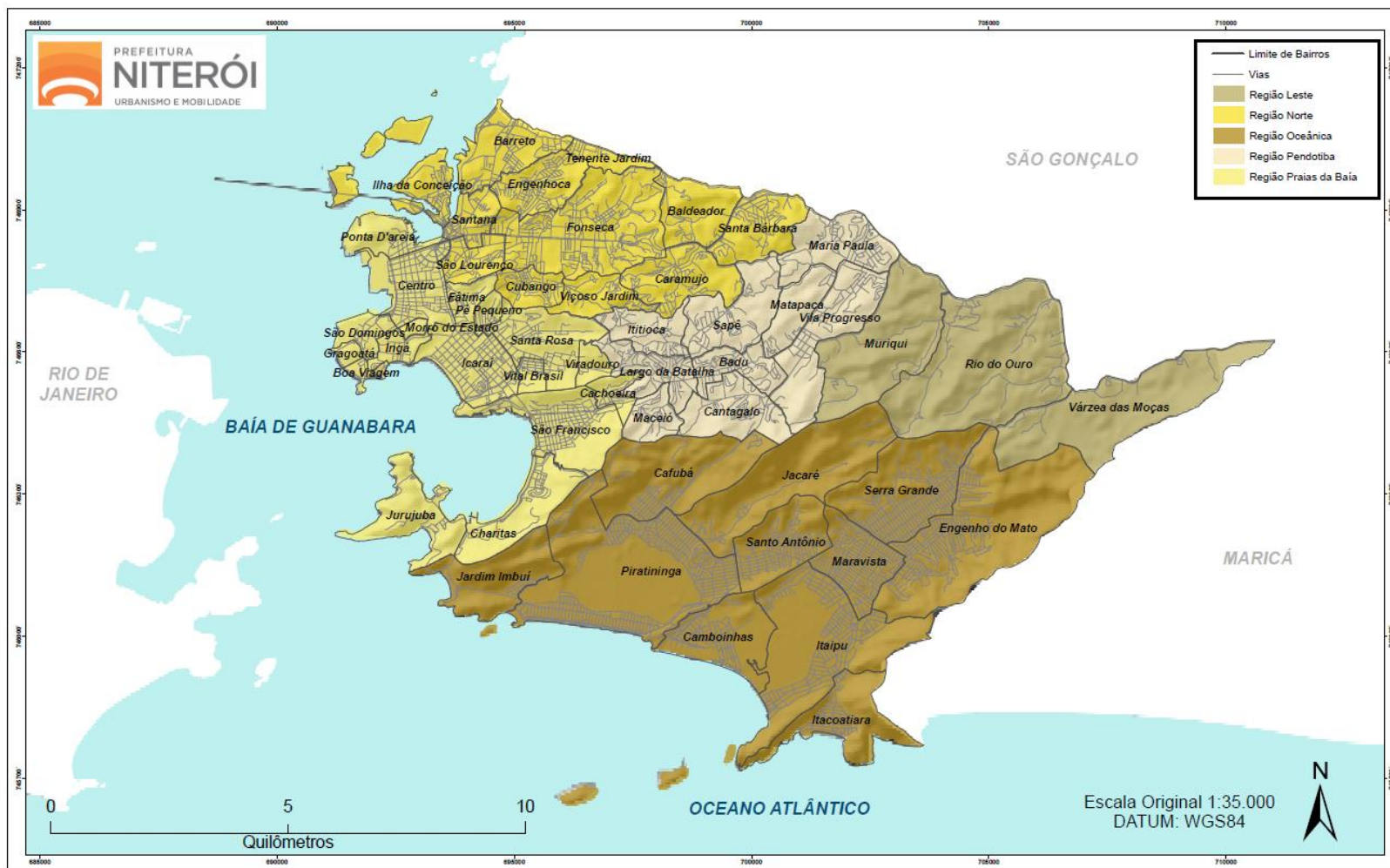


Figura 2 : Regiões administrativas e bairros do município de Niterói. Fonte: Secretaria Municipal de Urbanismo e Mobilidade (SMU) - Prefeitura Municipal de Niterói.

O sistema lagunar 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. A área do espelho d'água da Lagoa de Itaipu é de 1 km², acrescida de 2 km² de alagadiço, e tem profundidade média de 1,30 m na lagoa e 0,10 m no alagadiço. Já a Lagoa de Piratininga, apresenta 2,87 km² de área de espelho d'água, com profundidade média de 0,50 m (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, o 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". Atualmente, a Lagoa de Piratininga apresenta problemas associados à eutrofização que resultam em níveis baixos de oxigênio na água. Enquanto isso, a Lagoa de Itaipu enfrenta problemas relacionados à perda significativa de área do seu espelho d'água decorrente do assoreamento da mesma (Rodrigues, 2004). Apesar do salto na abrangência do sistema de saneamento nos últimos 15 anos na Região Oceânica com a implantação das ETEs Cambinhas e Itaipu, as redes coletoras de esgoto não atendem às habitações irregulares nas margens dos rios e das lagoas.

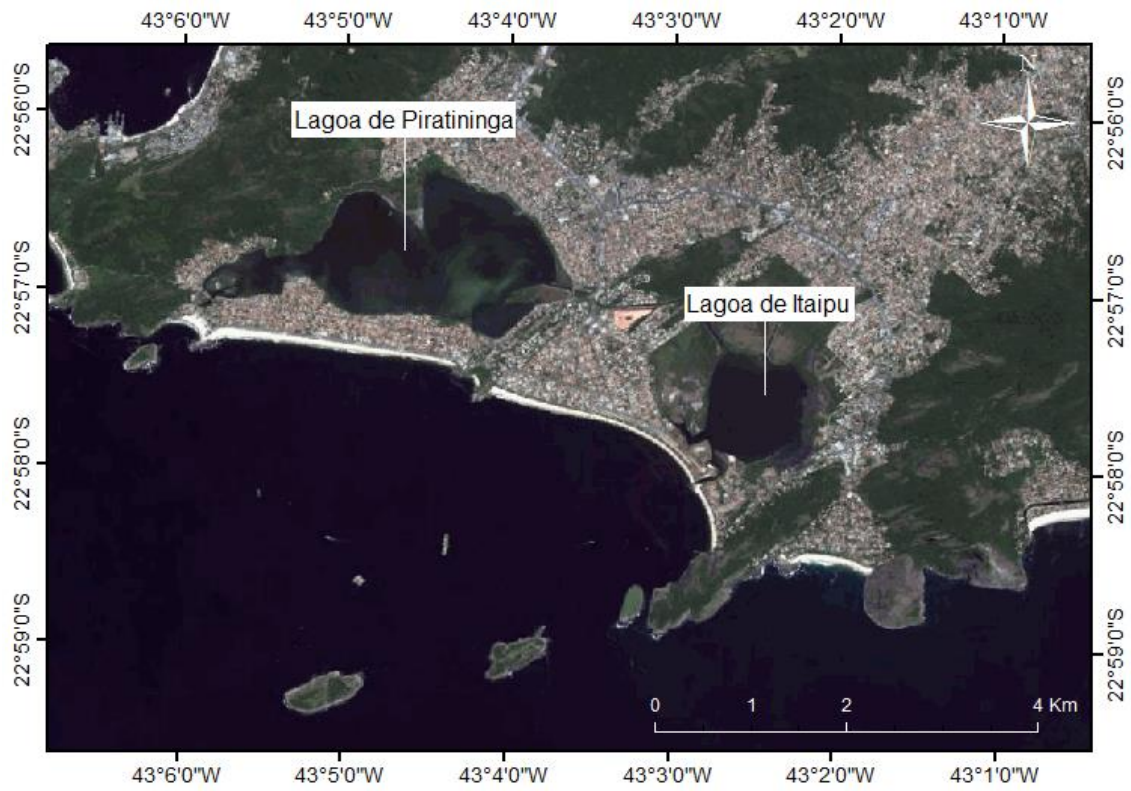


Figura 3: Lagoas de Piratininga e Itaipu.

3. 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. A partir dos dados levantados foram realizadas simulações computacionais da atual condição hidrodinâmica, morfodinâmica e de qualidade da água do Sistema Lagunar Piratininga- Itaipu.

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. Tanto o monitoramento da qualidade de água das lagoas como o modelo de qualidade de água do cenário atual indicaram que as variáveis com maior problema atualmente, e com concentrações acima do limite da Classe I para águas salinas, são COT, amônia e fósforo total. O diagnóstico indica ainda que a fauna aquática também vem sofrendo com a pressão antrópica. O elevado aporte de nutrientes no sistema lagunar ocasiona incremento da biomassa algal, principalmente das cianobactérias. A maior densidade de algas na coluna d’água diminui a penetrância de radiação fotossinteticamente ativa, dificultando o crescimento e atividades metabólicas das espécies viventes abaixo da camada superficial. 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 os valores de oxigênio dissolvido. Com as reduções nos valores de OD, as comunidades nectônicas e bentônicas tendem a morrer, visto que as condições ambientais são impróprias.

Os dados levantados em campo e os estudos de modelagem computacional basearam a compreensão das características e condições atuais do sistema lagunar e o estudo das alternativas de intervenções e ações visando à recuperação ambiental das lagoas. Com o uso da modelagem como ferramenta de análise de prognóstico, pode-se avaliar os possíveis efeitos de diferentes intervenções físicas sobre o padrão

hidrodinâmico e da qualidade da água nas lagoas. Dentre as obras estudadas estão a dragagem do Canal do Itaipu, a recuperação e o prolongamento dos molhes, a dragagem do Canal de Camboatá e a desobstrução do Túnel do Tibau. Além dessas intervenções, avaliaram-se os efeitos de diferentes abatimentos de cargas poluidoras que chegam às lagoas com o intuito de 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.

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. Por isso, durante os estudos foi realizada a modelagem morfodinâmica do Canal de Itaipu com 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 morfodinâmicos realizados, a alternativa que se mostrou a mais eficiente na interrupção do transporte de sedimento para o interior da lagoa considera três intervenções distintas: (i) o alteamento dos molhes; (ii) a dragagem do Canal de Itaipu na cota -2m ; e (iii) prolongamento dos molhes em 140m. 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 na cota -2m 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.

As intervenções sugeridas pelos estudos morfodinâmicos também tem efeitos sobre a dinâmica de correntes e oscilação do nível na lagoa. Por isso, estas proposições foram estudadas também quanto aos seus efeitos sobre a hidrodinâmica (cenários hidrodinâmicos futuros HIDRO 1 a 4) e, posteriormente, sobre a qualidade de água.

Além das intervenções sugeridas pelo estudo morfodinâmico, avaliou-se através da modelagem hidrodinâmica e de qualidade de água, a desobstrução do Túnel de Tibau e a dragagem do Canal de Camboatá na cota -1,5m (HIDRO 5 e 6). Segue a descrição de cada um dos cenários hidrodinâmicos futuros simulados e as figuras ilustrando cada uma das intervenções:

- **HIDRO 1:** Considerou apenas a dragagem Canal de Itaipu na cota -2m;
- **HIDRO 2:** Considerou a dragagem Canal de Itaipu na cota -2m + o prolongamento dos molhes de Itaipu em 140m;
- **HIDRO 3:** Considerou a dragagem Canal de Itaipu na cota -2m + o prolongamento dos molhes de Itaipu em 140m + a dragagem do Canal de Camboatá na cota -1,5m;
- **HIDRO 4:** Considerou a implantação de todas a obras estudadas, sendo elas a dragagem Canal de Itaipu na cota -2m + o prolongamento dos molhes de Itaipu em 140m + a dragagem do Canal de Camboatá na cota -1,5m + a desobstrução do Túnel do Tibau;
- **HIDRO 5:** Considerou apenas a desobstrução do Túnel do Tibau;
- **HIDRO 6:** Considerou a dragagem do Canal de Camboatá na cota -1,5m + a desobstrução do Túnel do Tibau;

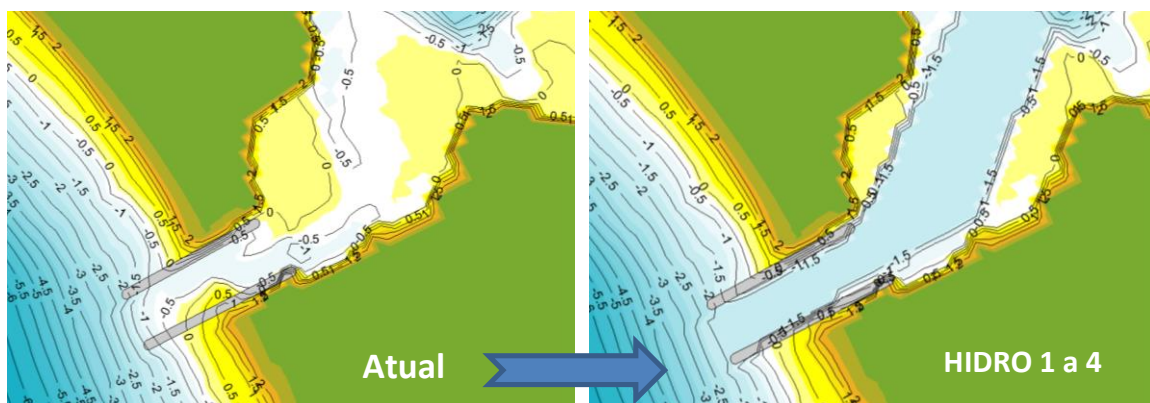


Figura 4: Dragagem na área interna do Canal de Itaipu até a cota -2 m (IBGE) considerada nos cenários hidrodinâmicos futuros HIDRO 1, HIDRO 2, HIDRO 3 e HIDRO 4.

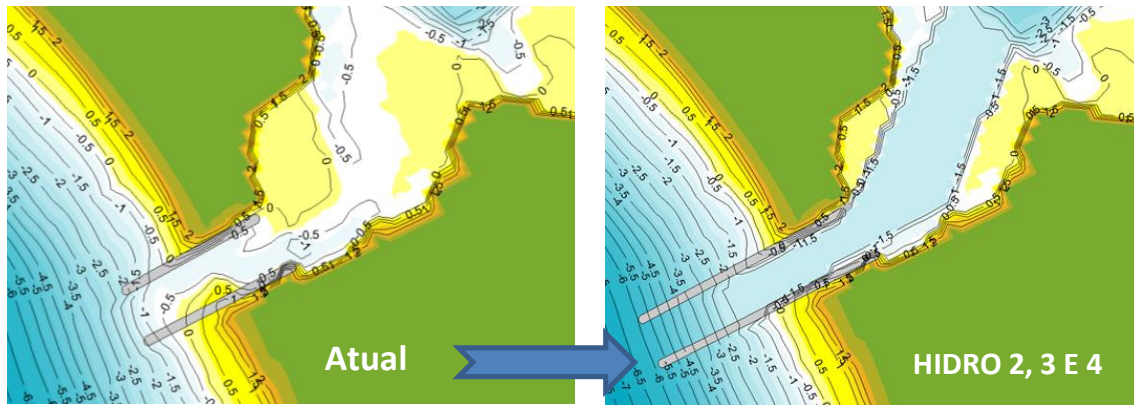


Figura 5: Dragagem na área interna do Canal de Itaipu até a cota -2 m (IBGE) e prolongamento dos molhes em 140 m considerados nos cenários hidrodinâmicos futuros HIDRO 2, HIDRO 3 e HIDRO 4.

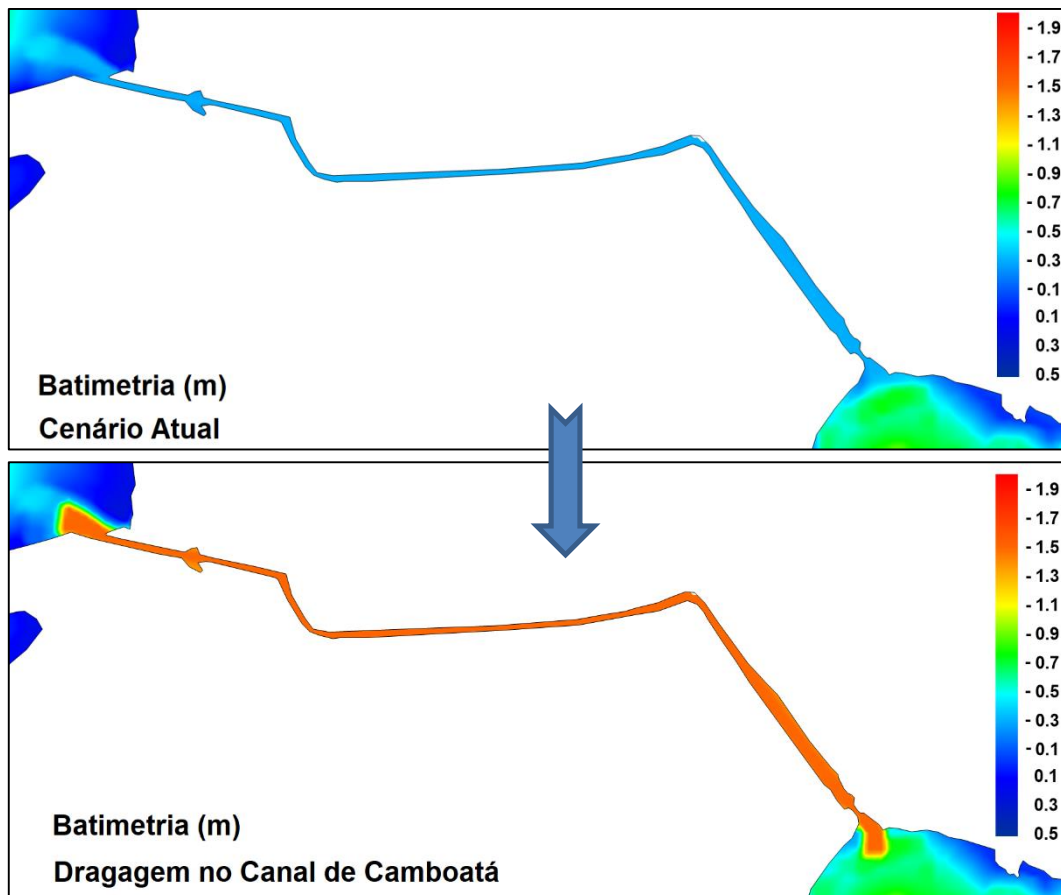


Figura 6: Dragagem na área interna do Canal de Camboatá até a cota -1,5 m (IBGE) considerada nos cenários hidrodinâmicos futuros HIDRO 3, HIDRO 4 e HIDRO 6.

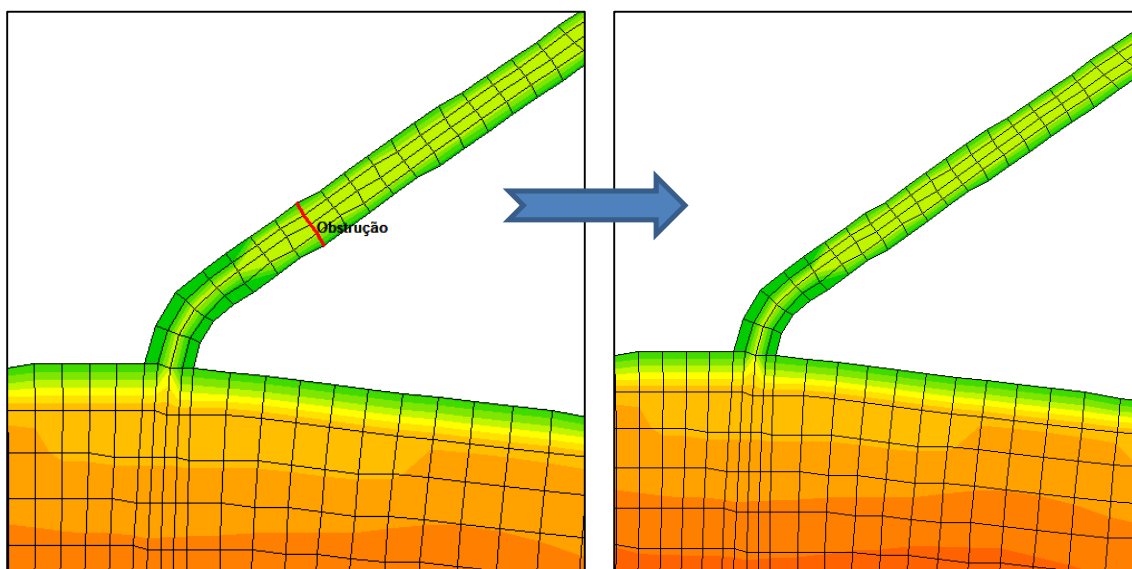


Figura 7: Desobstrução do Túnel do Tibau considerada nos cenários hidrodinâmicos futuros HIDRO 5 e HIDRO 6.

Além dos cenários hidrodinâmicos futuros, em que foram previstas intervenções físicas no sistema, avaliou-se o abatimento de cargas produzidas nas bacias contribuintes e que são carregados até às lagoas, impactando diretamente a qualidade de água das lagoas. Foram estudados três cenários de abatimento de carga conforme descrição abaixo:

- **Abatimento 1:** Abatimento de 20% da carga poluente das bacias contribuintes ao sistema lagunar;
- **Abatimento 2:** Abatimento de 40% da carga poluente das bacias contribuintes ao sistema lagunar;
- **Abatimento 3:** Abatimento da carga poluente das bacias contribuintes à Lagoa de Piratininga, através da implantação dos Jardins Filtrantes;

Com isso, os cenários futuros de qualidade de água levaram em consideração as intervenções físicas nas lagoas e os abatimentos de cargas de forma isolada e combinadas entre si, resultando em três grupos de cenários descritos abaixo:

- I. As intervenções estruturais e suas alterações hidrodinâmicas, tendo como base os modelos hidrodinâmicos futuros HIDRO 1 a HIDRO 6. Primeiramente, as simulações de qualidade de água foram realizadas para cada um desses **cenários hidrodinâmicos futuros isoladamente**. Para esses cenários se considerou o aporte de poluentes atual. O objetivo desses

cenários foi avaliar o efeito de cada obra sobre as concentrações das variáveis de qualidade de água estudadas e verificar se estas intervenções seriam suficientes para recuperação do sistema e reenquadramento da qualidade de água em Classe I;

- II. **Cenários futuros de abatimento de cargas** geradas nas bacias contribuintes, considerando a hidrodinâmica atual, com o objetivo de avaliar se a redução nos aportes de cargas seria suficiente para recuperar a qualidade de água do sistema, sem que fosse necessária qualquer intervenção na hidrodinâmica do sistema;
- III. **Cenários futuros combinando alterações hidrodinâmicas e abatimentos de carga**. Foram simulados cinco cenários combinando as intervenções hidrodinâmicas com diferentes reduções nos aportes de carga poluente.

4. MODELAGEM

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 responsável pelas simulações de qualidade da água.

4.1. 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 de ação de variação de níveis, forçantes meteorológica 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.

4.1.1. Principais Equações

Coordenadas σ

O sistema de coordenadas σ foi introduzido em modelos atmosféricos (PHILLIPS, 1957). O eixo vertical consiste em camadas limitadas por planos sigma (σ), os quais acompanham a batimetria e o nível d'água. Esta representação para o eixo vertical possibilita a obtenção de feição suavizada para a batimetria (DELFT3D, 2011).

Segundo DELFT3D (2011) o número de camadas é constante em todo o domínio, independentemente da profundidade local. A distribuição da espessura relativa de cada camada σ é usualmente não uniforme. Esta propriedade associada ao sistema de coordenadas σ permite resolver regiões do domínio vertical (por exemplo, o transporte de sedimentos próximo ao fundo).

$$\sigma = \frac{z - S}{d - S} = \frac{z - S}{H} \quad \text{Equação 1}$$

Onde,

z = a coordenada vertical no espaço físico;

S = a elevação do nível d'água, acima do plano de referência ($z = 0$);

d = profundidade abaixo do plano de referência, e

H = profundidade local total ($H = d + S$)

Equação da Continuidade

A equação da continuidade (homogênea verticalmente) é dada por:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d+S)U\sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d+S)U\sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} = Q$$

Equação 2

Onde,

$\sqrt{G_{\xi\xi}}$ = coeficiente usado na transformação de coordenadas curvilíneas para coordenadas retangulares;

$\sqrt{G_{\eta\eta}}$ = coeficiente usado na transformação de coordenadas curvilíneas para coordenadas retangulares;

ξ, η = coordenadas no sistema cartesiano;

U = velocidade média (na vertical) na direção S, e

Q = contribuições para o fluxo (fonte ou sumidouro) por unidade de área.

Equação do Momentum na Direção Horizontal

As equações do momentum, nas direções S e η , são dadas por:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d+S} - \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{SS}}}{\partial \xi} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - fv = -\frac{1}{\rho_o \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_\xi + F_\xi + \frac{1}{(d+S)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_{mol} + \max(v_{3D}, v_V^{amb}) \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_\xi$$

Equação 3

e,

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d+S} - \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + fu = -\frac{1}{\rho_o \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_\eta + F_\eta + \frac{1}{(d+S)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_{mol} + \max(v_{3D}, v_V^{amb}) \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_\eta$$

Equação 4

Onde,

u = componente vetorial da velocidade na direção x ou S;

v = componente vetorial da velocidade na direção y ou η ;

f = parâmetro de Coriolis;

t = tempo;

v_{mol} = coeficiente de viscosidade cinemática (molecular);

v_{3D} = parte da viscosidade devido a turbulência 3D;

v_v^{amb} = componente vertical da viscosidade do meio (ambiente);

As variações de densidade são negligenciadas, exceto nos termos que expressam os gradientes de pressões baroclínicas ($P\xi$ e $P\eta$). As forças $F\xi$ e $F\eta$ nas equações acima representam o desequilíbrio horizontal nas tensões de Reynolds. $M\xi$ e $M\eta$ representam as contribuições externas (fontes ou sumidouros) - forças externas devido a estruturas hidráulicas externas, descarga ou fonte de água, cisalhamento devido a ondas, etc (DELFT3D, 2011).

Velocidades Verticais

A velocidade vertical (ω) é calculada através de uma adaptação da equação da continuidade no sistema de coordenadas σ . A velocidade vertical ω é definida nas superfícies σ e, portanto, relativa ao movimento dessas superfícies. As velocidades verticais w no sistema de coordenadas cartesianas não estão consideradas no sistema de equações do modelo. A velocidade vertical w é expressa como função das velocidades horizontais (u e v), profundidade da coluna d'água (H), elevação do nível d'água (ξ) e velocidade vertical (ω), de acordo com:

$$w = \omega + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left[u \sqrt{G_{\eta\eta}} \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial \xi} + \frac{\partial S}{\partial \xi} \right) + \sqrt{G_{\xi\xi}} \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial \eta} + \frac{\partial S}{\partial \eta} \right) \right] + \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial t} \right)$$

Equação 5

Pressão Hidrostática

Ao se aproximar o sistema em estudo pelas equações de águas rasas, a equação vertical para o *momentum* é reduzida à equação de pressão hidrostática. As acelerações verticais devido aos efeitos de flutuabilidade, assim como aquelas devidas

às rápidas variações da topografia de fundo (batimetria), não são consideradas. (Delft3D, 2011). Portanto:

$$\frac{\partial P}{\partial \sigma} = -\rho g H \quad \text{Equação 6}$$

Após a integração da equação acima, a pressão hidrostática é dada por:

$$P = P_{atm} + gH \int_{\sigma}^0 \rho(\xi, \eta, \sigma, t) d\sigma \quad \text{Equação 7}$$

Ao adotar a densidade da água como sendo constante e, considerando-se a pressão atmosférica, para o gradiente de pressão (gradiente de pressão barotrópico) têm-se:

$$\frac{1}{\rho_o \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_{\xi} = \frac{g}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial S}{\partial \xi} + \frac{1}{\rho_o \sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial P_{atm}}{\partial \xi}$$

$$\frac{1}{\rho_o \sqrt{G_{\eta\eta}}} P_{\eta} = \frac{g}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial S}{\partial \eta} + \frac{1}{\rho_o \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial P_{atm}}{\partial \eta} \quad \text{Equação 8}$$

Parâmetro de Coriolis

O parâmetro de Coriolis (f) depende da latitude geográfica (ϕ) e da velocidade angular de rotação da Terra, Ω : $f = 2\Omega \sin(\phi)$.

Tensão de Reynolds

As forças F_{ξ} e F_{η} nas equações do *momentum* representam o desequilíbrio horizontal nas tensões de Reynolds. As tensões de Reynolds são determinadas usando o conceito de viscosidade turbulenta. Este conceito estabelece que as componentes (em cada direção) das tensões de Reynolds são o produto entre o fluxo dependente do coeficiente de viscosidade turbulenta e sua correspondente componente média devido ao tensor raio de deformação. O coeficiente horizontal de viscosidade turbulenta (ν_H) é muito maior de que sua contra parte vertical (ν_V).

O coeficiente horizontal de viscosidade turbulenta é assumido como sendo a superposição de três partes: uma parte devido a “turbulência bi-dimensional (2D)”, uma parte devido a “turbulência tri-dimensional (3D)”, e uma parte devido a viscosidade “ambiente” ou viscosidade molecular. A turbulência 2D (v_{2D}) é associada as contribuições do movimento e forças horizontais que não são resolvidas na grade horizontal (mais especificamente na sub-grade da escala de turbulência). Por outro lado, a turbulência 3D se refere à turbulência tridimensional e é resolvida pelo modelo através de sub-modelos de fechamento turbulento. Por fim, a viscosidade molecular é representada por (v_H^{amb}). Enfim, o coeficiente de viscosidade turbulenta é expresso por:

$$v_H = v_{2D} + v_V = v_{2D} + v_{3D} + v_H^{amb} \quad \text{Equação 9}$$

Os sub-modelos de fechamento turbulento avaliam somente os efeitos resultantes do cisalhamento. O coeficiente vertical de viscosidade turbulenta (v_V) é definido por:

$$v_V = v_{mol} + \max(v_V^{amb}, v_{3D}) \quad \text{Equação 10}$$

O sistema de coordenadas σ rotaciona o tensor de cisalhamento em relação ao sistema de coordenadas cartesiano, o que implica no acréscimo de termos adicionais (STELLING & VAN KESTER, *op. cit.*). Além disso, o tensor de cisalhamento é redefinido assumindo-se que a escala horizontal é muito maior do que a profundidade (BLUMBERG & MELLOR, 1985). As forças F_ξ e F_η são utilizadas na forma:

$$F_\xi = \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \tau_{\xi\xi}}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \tau_{\xi\eta}}{\partial \eta}$$

$$F_\eta = \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \tau_{\eta\xi}}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \tau_{\eta\eta}}{\partial \eta} \quad \text{Equação 11}$$

Equação de Estado

A densidade da água (ρ) é uma função da salinidade (s) e da temperatura (T). O modelo Delft utiliza uma relação empírica (ECKART, 1958):

$$\rho = \frac{1000P_o}{\lambda + \alpha_o P_o} \quad \text{Equação 12}$$

Onde,

$$\lambda = 1779,5 + 11,25t - 0,0745T^2 - (3,80 + 0,01T)s;$$

$$\alpha_o = 0,6980$$

$$P_o = 5890 + 38T - 0,375T^2 + 3s$$

Os resultados da simulação hidrodinâmica foram utilizados para a simulação de qualidade da água no módulo WAQ do modelo DELFT3D.

4.2. DISCRETIZAÇÃO ESPACIAL E BATIMETRIA

4.2.1. Grade Numérica

Para resolver os processos de circulação do Complexo Lagunar Itaipu-Piratininga em escalas espacial e temporal adequadas, dois domínios computacionais foram criados. Foi utilizada a técnica conhecida como decomposição de domínio (“domain decomposition”), a partir da qual um modelo é dividido em domínios menores. A decomposição do domínio permite o refinamento local da grade, tanto na direção horizontal quanto na direção vertical. O refinamento de grade na direção horizontal significa que, em um domínio, são usados menores tamanhos de malha do que em outros domínios. No caso de um refinamento de grade na vertical, um domínio, por exemplo, pode usar dez camadas verticais e, outro, uma única camada (promediado na vertical).

A comunicação entre os domínios ocorre ao longo de fronteiras internas. Os cálculos são realizados simultaneamente, em modo de computação paralela, reduzindo o tempo total de simulações do domínio completo de cálculo do modelo.

O primeiro domínio criado abrange a Lagoa de Itaipu, Canal de Camboatá e Lagoa de Piratininga. Este possui 508x68 elementos de cálculo e resolução horizontal variando de 5 m a 50 m. O segundo domínio abrange o Túnel do Tibau e região oceânica adjacente. Possui 38x255 elementos de cálculo e resolução horizontal variando de 1 m a 5 m.

O número de elementos e dimensões das grades implementadas representaram um compromisso entre os objetivos do projeto, a manutenção da capacidade

computacional em níveis aceitáveis e a descrição dos processos hidrodinâmicos mais relevantes para a região de interesse (gerados pela ação combinada das marés, descarga fluvial e ventos atuantes em superfície).

Da Figura 8 até a Figura 19 são apresentados os domínios computacionais criados, com detalhes nos diferentes sub-ambientes modelados.

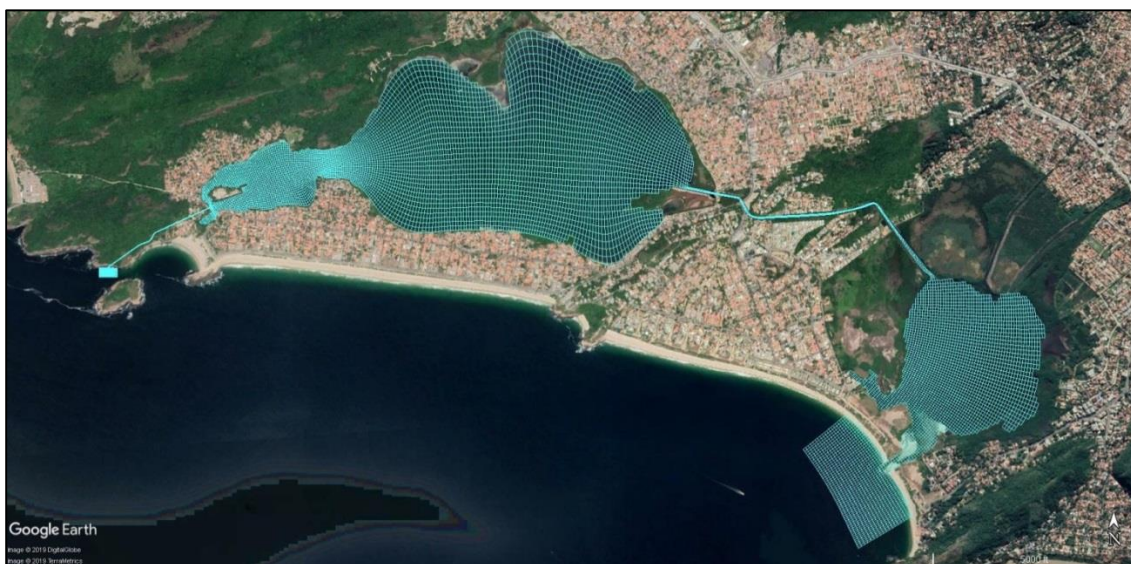


Figura 8: Vista geral em planta das grades de cálculo do modelo Delft3D-FLOW implementadas para o Complexo Lagunar Itaipu-Piratininga, em Niterói.



Figura 9: Vista geral em perspectiva das grades de cálculo do modelo Delft3D-FLOW implementadas para o Complexo Lagunar Itaipu-Piratininga, em Niterói.

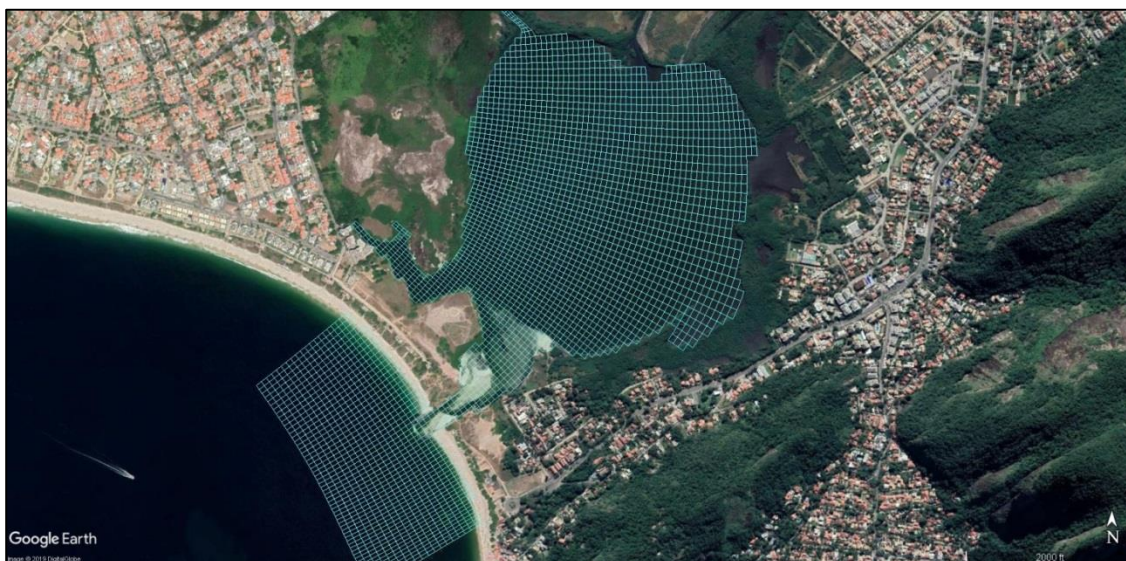


Figura 10: Vista em planta da grade de cálculo do modelo Delft3D-FLOW na Lagoa de Itaipu.

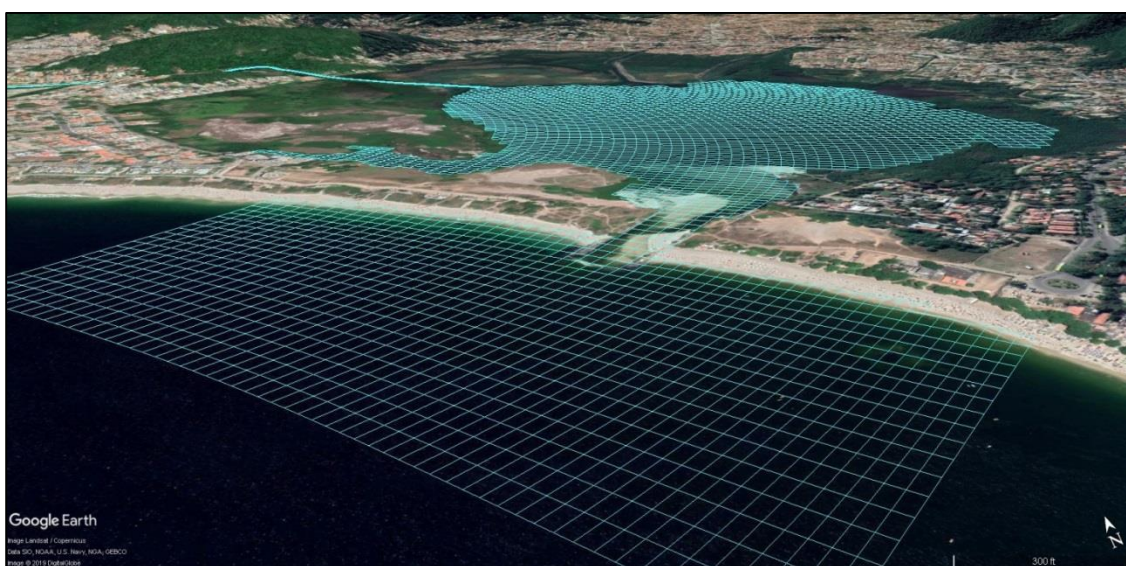


Figura 11: Vista em perspectiva da grade de cálculo do modelo Delft3D-FLOW na Lagoa de Itaipu.

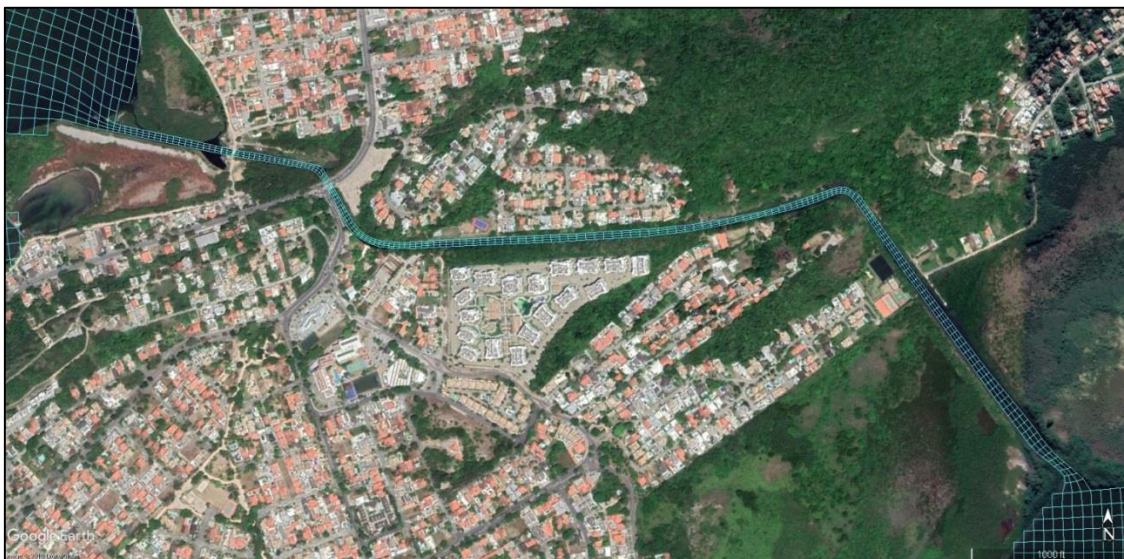


Figura 12: Vista em planta da grade de cálculo do modelo Delft3D-FLOW no Canal de Camboatá.

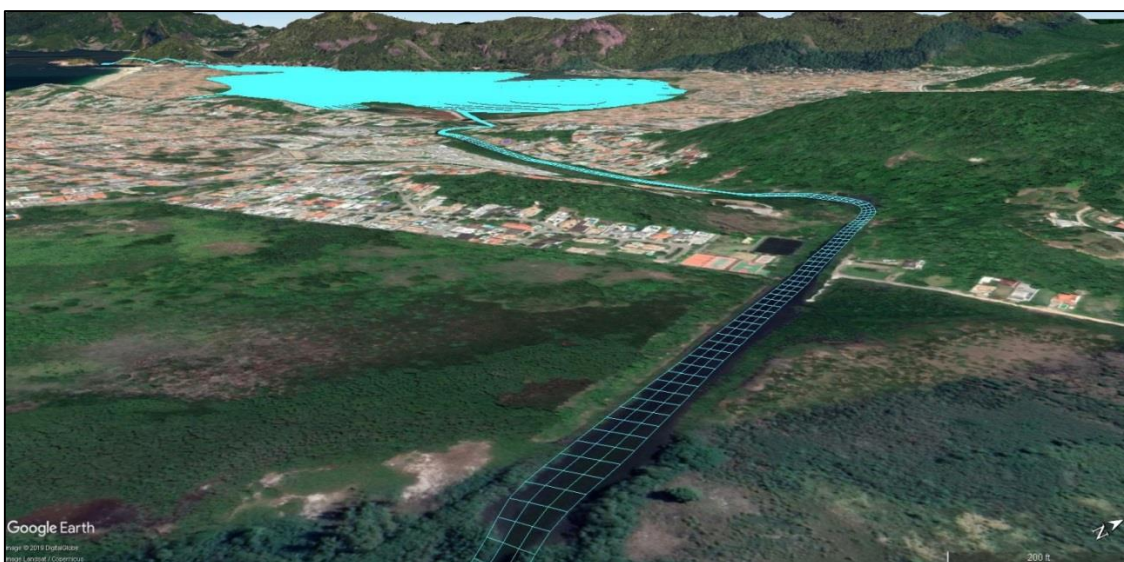


Figura 13: Vista em perspectiva da grade de cálculo do modelo Delft3D-FLOW no Canal de Camboatá.

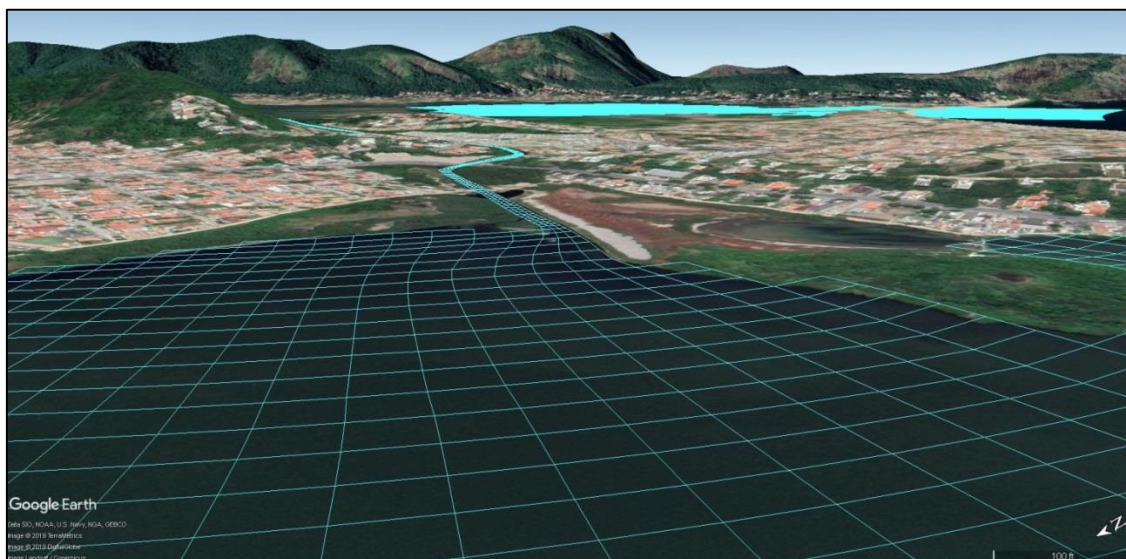


Figura 14: Vista em perspectiva da grade de cálculo do modelo Delft3D-FLOW na desembocadura do Canal de Camboatá com a Lagoa de Piratininga.

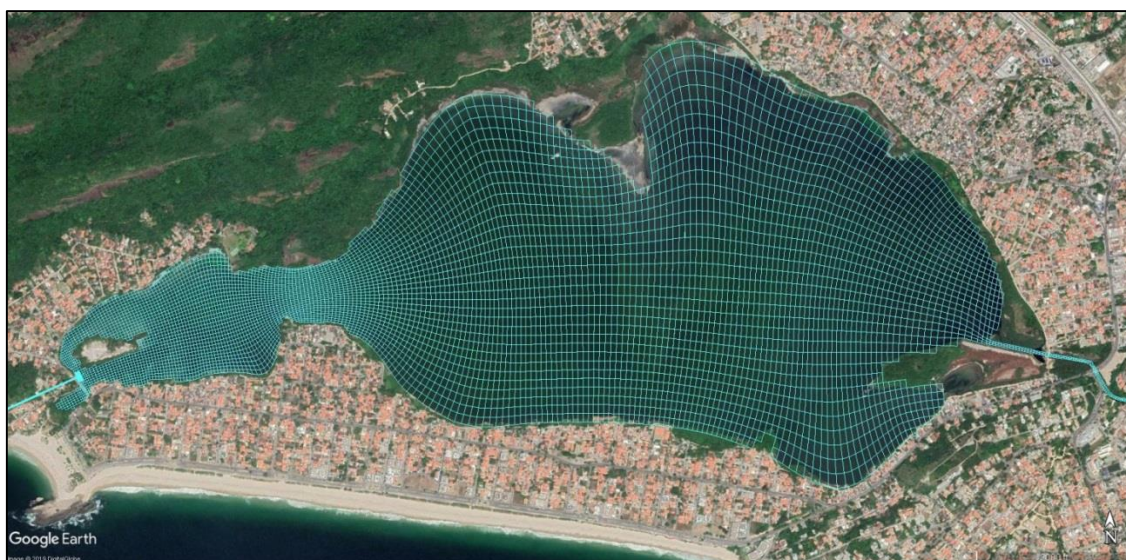


Figura 15: Vista em planta da grade de cálculo do modelo Delft3D-FLOW na Lagoa de Piratininga.

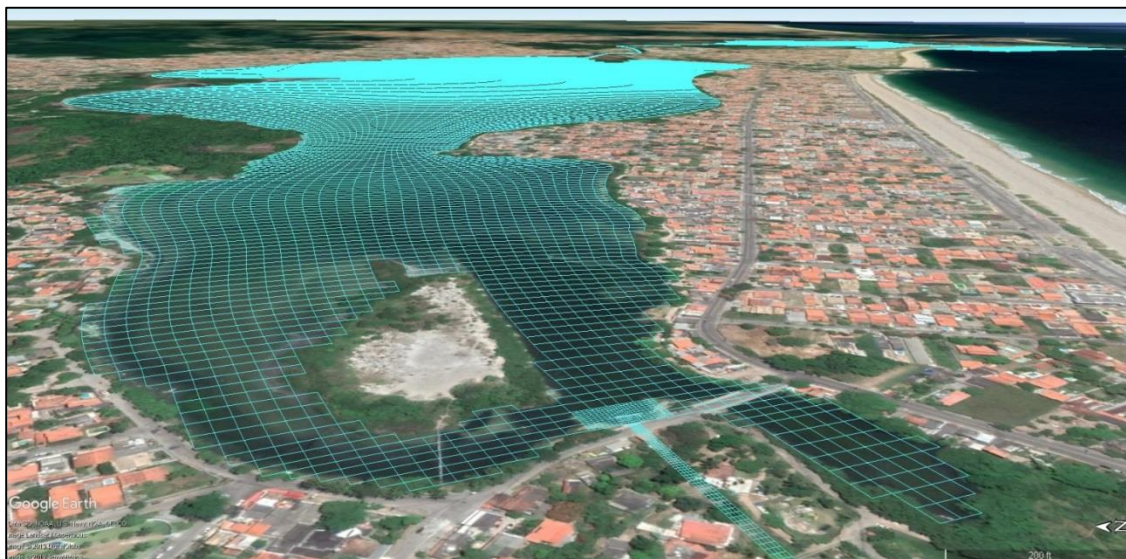


Figura 16: Vista em perspectiva da grade de cálculo do modelo Delft3D-FLOW na Lagoa de Piratininga.



Figura 17: Vista em planta da grade de cálculo do modelo Delft3D-FLOW na conexão do Túnel do Tibau com a Lagoa de Piratininga.

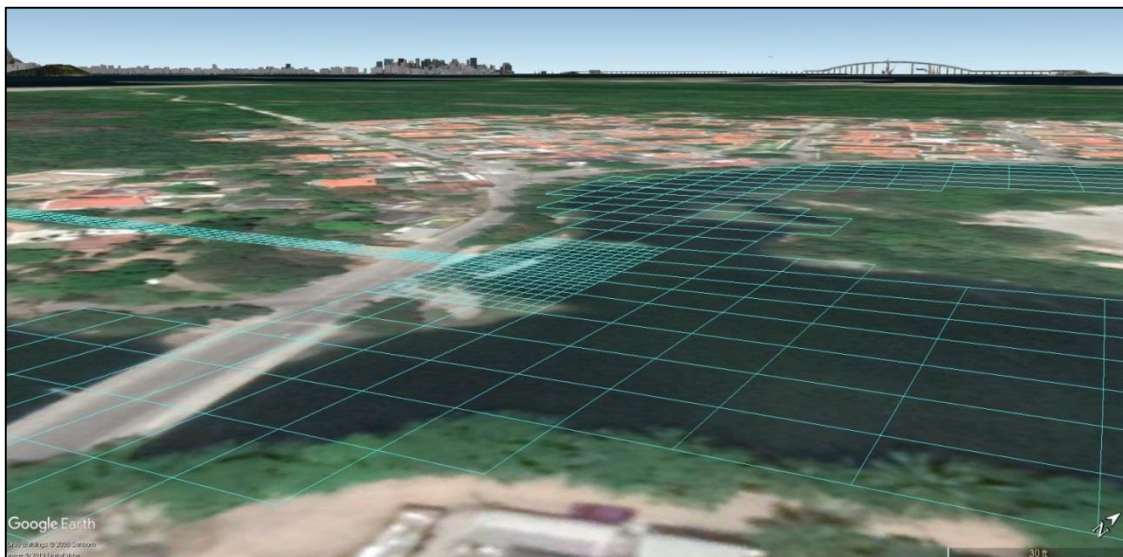


Figura 18: Vista em perspectiva da grade de cálculo do modelo Delft3D-FLOW na conexão do Túnel do Tibau com a Lagoa de Piratininga.

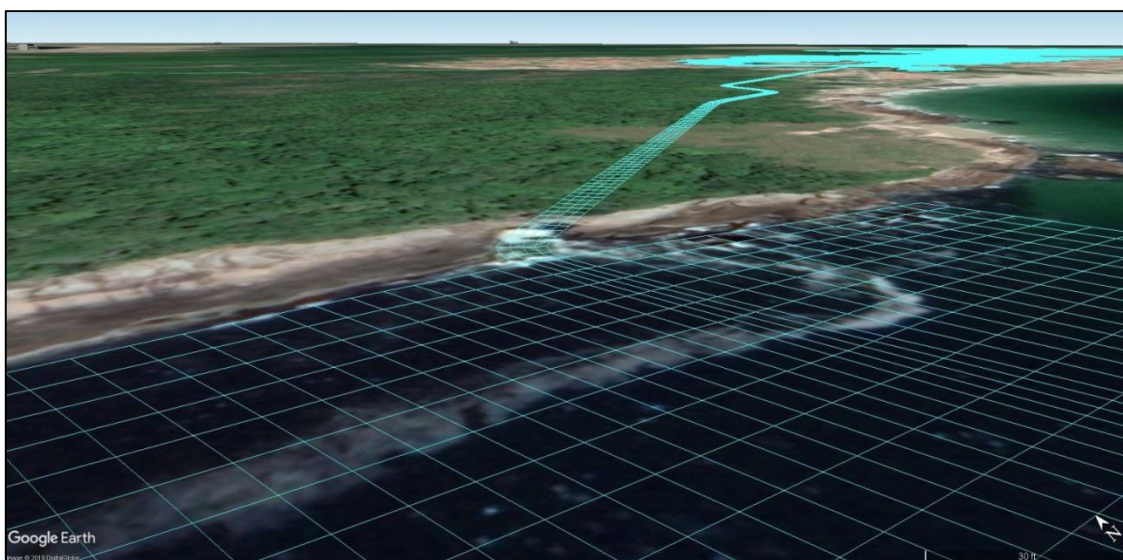


Figura 19: Vista em perspectiva da grade de cálculo do modelo Delft3D-FLOW na conexão do Túnel do Tibau com o mar.

4.2.2. Batimetria

Os dados de profundidade das lagoas de Itaipu e Piratininga foram obtidos através de levantamentos topográficos e batimétricos realizados pela Hydrosience no ano de 2018. Na região oceânica adjacente, foram obtidas informações provenientes

da carta náutica 1511 (Barra do Rio de Janeiro, escala: 1:20.000), disponibilizada pela DHN¹ (Figura 20).

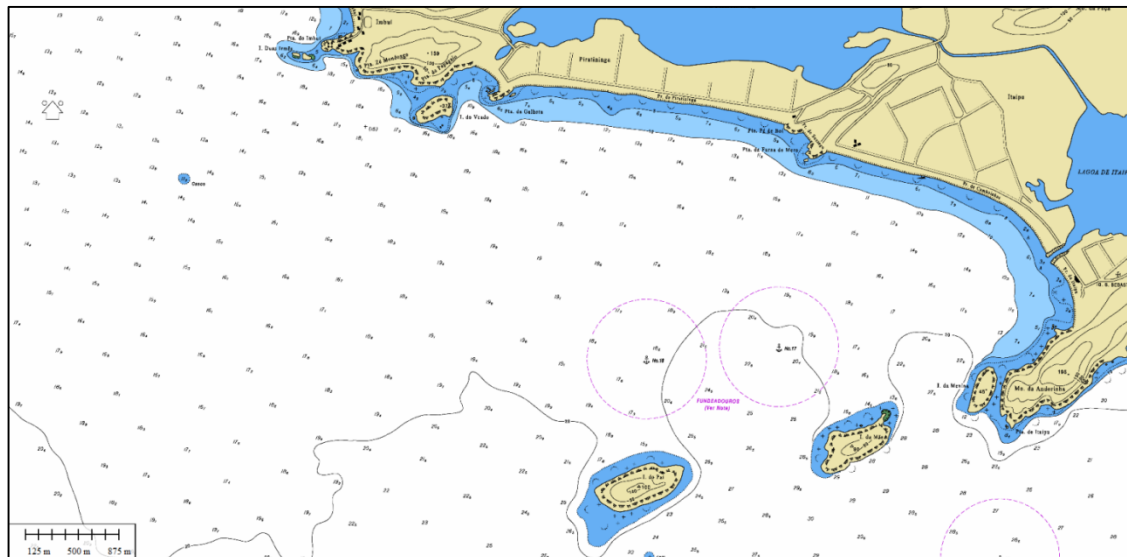
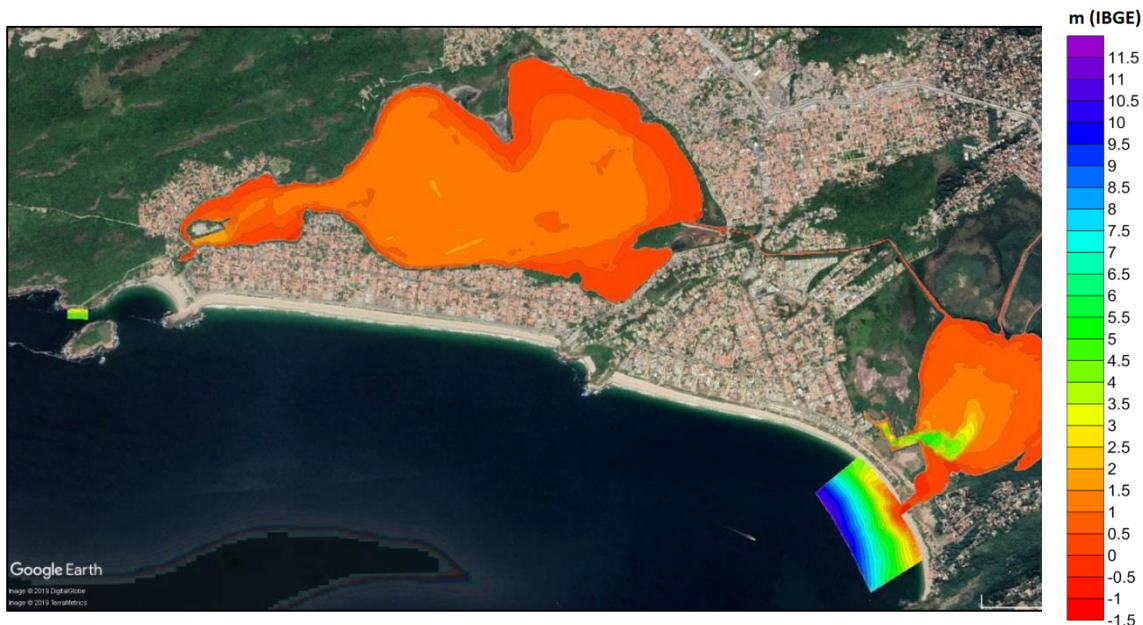


Figura 20: Detalhe da carta náutica 1511, fornecida pela DHN, na região da plataforma continental interna adjacente às lagoas de Itaipu e Piratininga.

O conjunto de dados foi projetado nas grades de cálculo do modelo usando triangulação linear. Os resultados deste procedimento são apresentados na Figura 21, Figura 22 e Figura 23.



¹ Diretoria de Hidrografia e Navegação.

Figura 21: Vista geral em planta das batimetrias projetadas nas grades computacionais do modelo Delft3D-FLOW criadas para o Complexo Lagunar Itaipu-Piratinga, em Niterói.

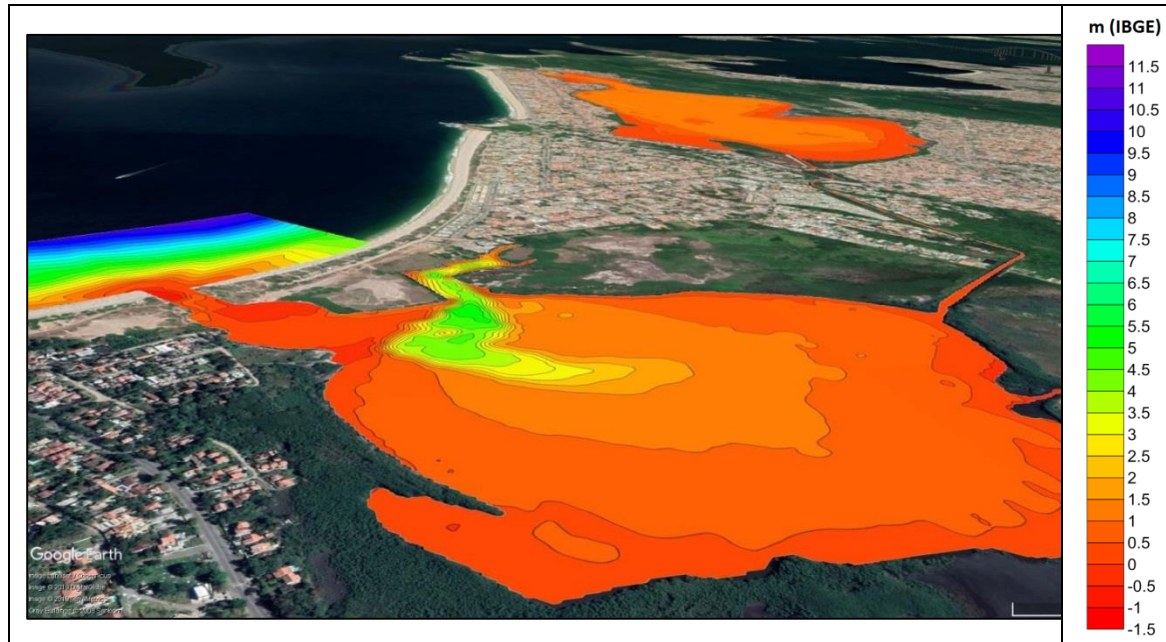


Figura 22: Vista em perspectiva das batimetrias projetadas nas grades computacionais do modelo Delft3D-FLOW, com detalhe na Lagoa de Itaipu.

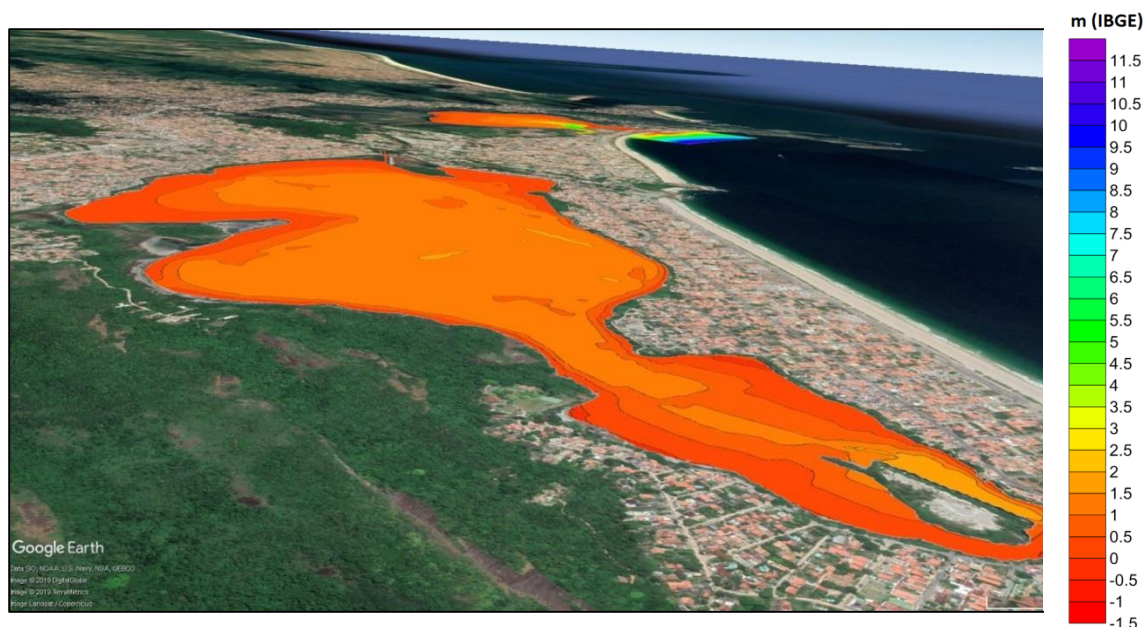


Figura 23: Vista em perspectiva das batimetrias projetadas nas grades computacionais do modelo Delft3D-FLOW, com detalhe na Lagoa de Piratinga.

4.2.3. Parâmetros Físicos da Modelagem Hidrodinâmica

A adoção de parâmetros físicos mais adequados para utilização na modelagem hidrodinâmica é de extrema importância para a representação dos processos de escoamento dos fluidos. O Quadro 1 apresenta os principais parâmetros físicos utilizados na modelagem.

Quadro 1: Parâmetros físicos da simulação hidrodinâmica.

Parâmetro	Valor
Aceleração da gravidade	9,81 m/s
Densidade da água	1024 Kg/m ³
Densidade do ar	1 kg/m ³
Fricção com o fundo Chezy	Variável
Fricção lateral	Condição de escorregamento livre
Coefficiente de viscosidade turbulenta horizontal	1 m/s ²
Arraste pelo vento	0,002 m/s

4.3. 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.

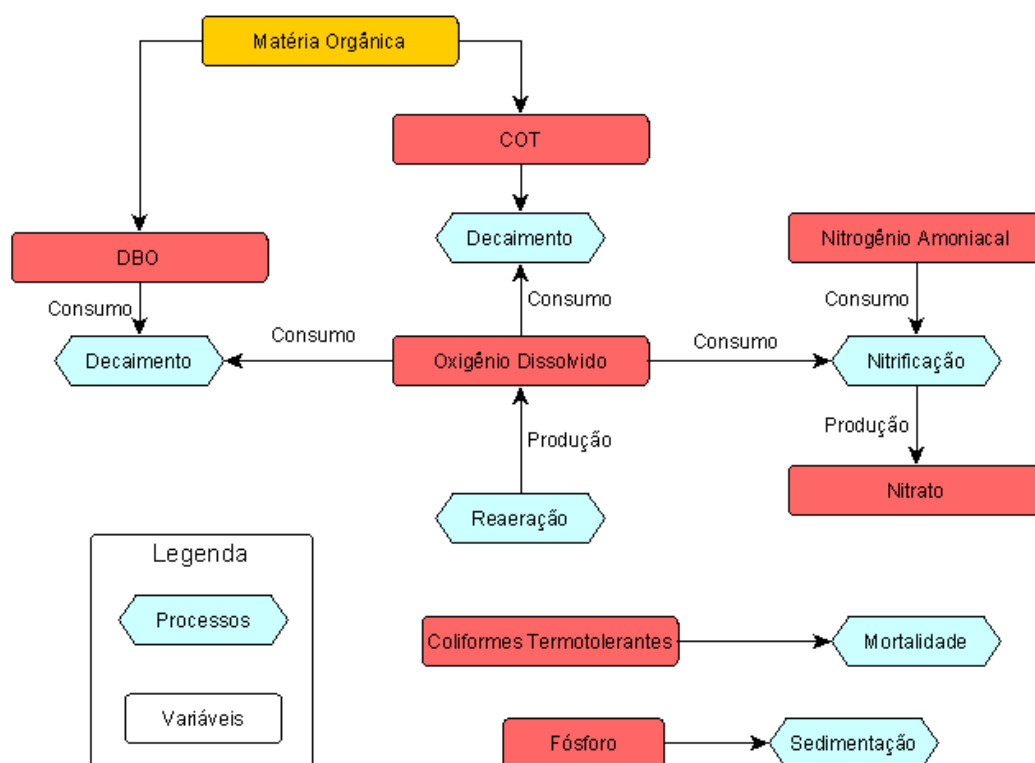
O Delft3D-WAQ permite especificar uma gama de processos físicos e biogeoquímicos correlacionados. Esses processos ficam armazenados em uma biblioteca de processos do Delft3D (PLCT - *Process Library Configuration Tool*) e podem ser selecionados e modificados de acordo com o interesse do usuário. Dentre 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 da dinâmica de uma série de variáveis físico-químicas representativas dos aspectos qualitativos em ecossistemas aquáticos (Quadro 2).

Quadro 2: 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

Os principais processos simulados no modelo são o consumo de oxigênio dissolvido pela depuração da matéria orgânica (DBO) e da nitrificação da amônia. A recuperação do teor de oxigênio da água é simulada através da reaeração da água. O modelo simula também o decaimento dos coliformes termotolerantes através da mortalidade. Os processos simulados no Delft3D-WAQ são apresentados de maneira simplificada na Figura 24.


Figura 24: Fluxograma simplificado identificando alguns processos simulados no WAQ.

4.3.1. Condição Inicial

O modelo de qualidade de água foi iniciado com valores próximos às concentrações médias medidas nas lagoas em agosto de 2018 (Quadro 3). Esta foi a primeira campanha realizada ao longo do projeto e representa o período seco, compatível ao início do modelo de qualidade de água.

Quadro 3: Condições iniciais do modelo de qualidade de água.

Variáveis	Condição inicial
Salinidade	24 ‰
Oxigênio Dissolvido (OD)	6,0 mg/L
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO ₅)	1,5 mg/L
Carbono Orgânico Total (COT)	10 mg/L
Amônia (NH ₄)	0,60 mg/L
Nitrato (NO ₃)	0,20 mg/L
Fósforo Total (PT)	0,20 mg/L
Coliformes Termotolerantes	1000 NMP/100mL

4.3.2. Condições de Contorno

Em cada célula do modelo hidrodinâmico onde foram inseridas entradas de vazão, implementou-se também uma condição de contorno no modelo de qualidade de água. Esses pontos correspondem aos rios, mar e lançamento de efluentes tratados (Figura 25).

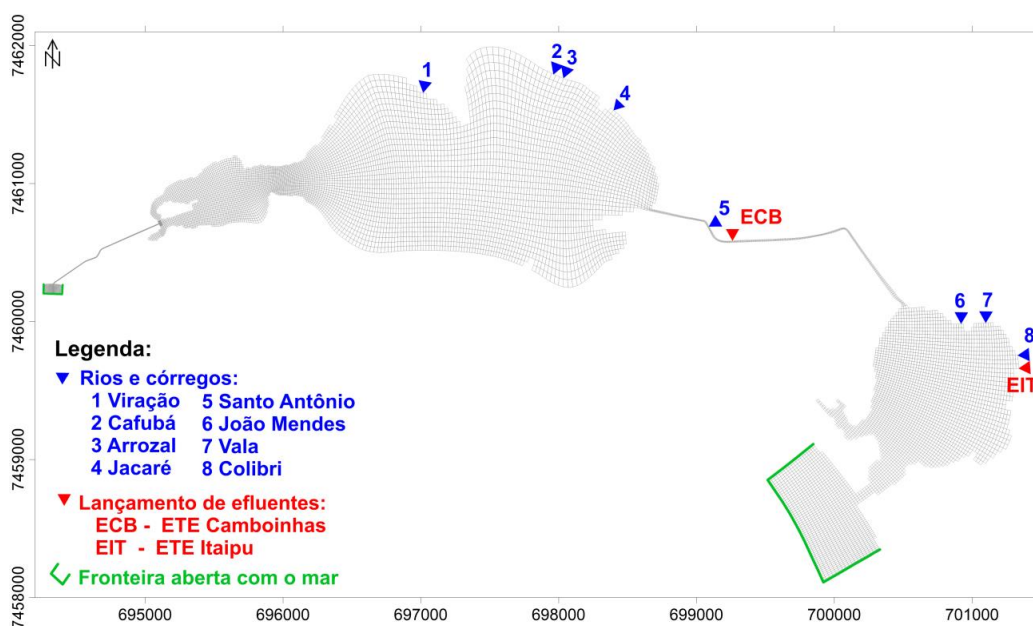


Figura 25: Identificação e localização das condições de contorno do modelo.

As concentrações impostas na fronteira aberta com o mar e nas estações de tratamento foram constantes ao longo do tempo e definidas a partir de dados primários (Quadro 4 e Quadro 5). Os dados das ETEs foram definidos a partir de medições e análises laboratoriais realizadas durante este estudo, uma vez que os dados secundários disponibilizados não contemplavam todas as informações necessárias para a modelagem e, em geral, se mostraram menos conservadores em relação aos valores medidos. Maiores detalhes sobre as análises de qualidade dos efluentes podem ser encontrados no **Relatório de Caracterização do Efluente da Estação de Tratamento de Esgoto de Itaipu** e **2º Relatório de Caracterização do Efluente da Estação de Tratamento de Esgoto de Cambinhas**.

Quadro 4: Condições de contorno impostas nos lançamentos das ETEs.

Variáveis	ETE Itaipu	ETE Cambinhas
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

Quadro 5: Condições de contorno impostas no mar.

Variável	Condição
Salinidade	35 g/kg
Oxigênio Dissolvido (OD)	7 mg/L
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO ₅)	1,5 mg/L
Carbono Orgânico Total (COT)	1,5 mg/L
Amônia (NH ₄)	0,1 mg/L
Nitrato (NO ₃)	0 mg/L
Fósforo Total (PT)	0,01 mg/L
Coliformes Termotolerantes	0,0 NMP/100mL

As vazões dos rios impostas no modelo foram variáveis ao longo do tempo, com discretização temporal de 5 minutos, e obtidas a partir de um modelo chuva-vazão, detalhado no Relatório: **Modelagem De Qualidade De Água Das Lagoas De Itaipu E**

Piratininga - Fase I: Calibração Do Modelo De Qualidade De Água. As concentrações impostas nos rios variaram com a mesma frequência da vazão e foram definidas com base nas campanhas realizadas ao longo do período de simulação, já apresentadas em relatórios anteriores. Essas campanhas foram realizadas em condições distintas de precipitação, vazão e maré. Na campanha do dia 13/02/2019 foi realizada uma análise de *first flushing*, com coleta em diferentes momentos, durante e após a chuva. Esses resultados permitiram estimar a relação da concentração com a vazão, isto é, a diluição das concentrações com o aumento da vazão durante os eventos de chuva.

4.3.3. Calibração do Modelo de Qualidade da Água

O processo de calibração consiste no ajuste dos principais parâmetros de cálculo com o intuito de atingir a melhor representação possível dos processos. A calibração do modelo de qualidade da água consistiu na modificação dos parâmetros relacionados aos processos de depuração de matéria orgânica, nitrificação, mortalidade de coliformes e reaeração.

O período de calibração e validação do modelo de qualidade de água foi o mesmo da simulação hidrodinâmica disponível (01/06/2018 a 31/05/2019). Os resultados foram avaliados através da análise comparativa entre as séries temporais simuladas com os dados medidos disponíveis.

Após a realização de simulações com os valores *default* do modelo, os parâmetros foram alterados contrapondo as respostas do modelo e os valores esperados. Os seguintes valores foram alcançados na simulação que alcançou o melhor ajuste entre dados medidos e simulados (Quadro 6).

Quadro 6: Valores dos parâmetros utilizados no modelo de qualidade da água, definidos após calibração.

Parâmetro	Valor
Taxa de nitrificação	0,005 d ⁻¹
Coefficiente de reaeração	0,50 m/d
Taxa de decaimento da DBO	0,07 d ⁻¹
Taxa de decaimento do COT	0,01 d ⁻¹
Taxa de mortalidade para Coliformes Termotolerantes	0,80 d ⁻¹

5. CENÁRIOS SIMULADOS

Conforme descrito no item 3, os cenários futuros de qualidade de água levaram em consideração as intervenções físicas propostas e os cenários de abatimento de carga, avaliados de forma isolada e combinada, resultando em três grupos de cenários descritos abaixo:

- I. As intervenções estruturais e suas alterações hidrodinâmicas, tendo como base os modelos hidrodinâmicos futuros HIDRO 1 a HIDRO 6. Primeiramente, as simulações de qualidade de água foram realizadas para cada um desses **cenários hidrodinâmicos futuros isoladamente**. Para esses cenários se considerou o aporte de poluentes atual. O objetivo desses cenários foi avaliar o efeito de cada obra sobre as concentrações das variáveis de qualidade de água estudadas e verificar se estas intervenções seriam suficientes para recuperação do sistema e reenquadramento da qualidade de água em Classe I;
- II. **Cenários futuros de abatimento de cargas** geradas nas bacias contribuintes, considerando a hidrodinâmica atual, com o objetivo de avaliar se a redução nos aportes de cargas seria suficiente para recuperar a qualidade de água do sistema, sem que fosse necessária qualquer intervenção na hidrodinâmica do sistema;
- III. **Cenários futuros combinando alterações hidrodinâmicas e abatimentos de carga**. Foram simulados cinco cenários combinando as intervenções hidrodinâmicas com diferentes reduções nos aportes de carga poluente.

A seguir são descritos detalhadamente os cenários de qualidade de água simulados.

5.1. CENÁRIOS FUTUROS CONSIDERANDO APENAS AS ALTERAÇÕES HIDRODINÂMICAS

As alterações hidrodinâmicas resultantes das obras hidráulicas consideradas nos cenários HIDRO 1 a HIDRO 6 foram baseadas nas simulações hidrodinâmicas futuras e com o atual aporte de cargas. O Quadro 7 sumariza as modificações consideradas.

Quadro 7: Cenários futuros, considerando alterações hidrodinâmicas.

HIDRO 01	HIDRO 02	HIDRO 03	HIDRO 04	HIDRO 05	HIDRO 06
Dragagem Canal de Itaipu	Dragagem Canal de Itaipu	Dragagem Canal de Itaipu	Dragagem Canal de Itaipu	x	x
x	Prolongamento Molhe Itaipu*	Prolongamento Molhe Itaipu*	Prolongamento Molhe Itaipu*	x	x
x	x	Dragagem Canal de Camboatá**	Dragagem Canal de Camboatá**	x	Dragagem Canal de Camboatá**
x	x	x	Desobstrução Túnel do Tibau	Desobstrução Túnel do Tibau	Desobstrução Túnel do Tibau

* Comprimento ideal determinado nas simulações morfodinâmicas realizadas previamente (140 m).

** Profundidade do canal após dragagem=-1,50 m

5.2. CENÁRIOS FUTUROS CONSIDERANDO ABATIMENTO DE CARGAS ISOLADAMENTE

O abatimento de carga dos cenários **Abatimento 1** e **Abatimento 2** prevê a redução de **20%** e **40%**, respectivamente, da carga poluente oriunda das bacias contribuintes ao sistema lagunar. O abatimento considera redução igual em todas as variáveis simuladas: coliformes, COT, DBO, amônia, nitrato, fósforo total. A concentração de OD foi elevada de maneira proporcional, isto é, aumento de 20% e 40% nos respectivos cenários. Esses cenários podem ser alcançados com aumento da cobertura do sistema de coleta de esgoto e combate às ligações clandestinas do sistema pluvial. Além disso, parte da carga orgânica proveniente das bacias é decorrente do não funcionamento das elevatórias de esgoto. Algumas elevatórias não possuem gerador, e param de funcionar em períodos de queda de energia, resultando no lançamento de esgoto bruto nas lagoas. Os abatimentos consideram também a

melhoria do controle operacional das elevatórias de esgoto bruto do sistema de esgotamento sanitário.

O **Abatimento 3** corresponde ao abatimento de carga esperado com a implantação dos Jardins Filtrantes na Lagoa de Piratininga. Reitera-se que o projeto dos Jardins Filtrantes irá atuar na redução das cargas poluidoras recebidas pela Lagoa de Piratininga por seus contribuintes, não afetando diretamente a Lagoa de Itaipu. A eficiência considerada para o abatimento de cargas provido pelos jardins filtrantes 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 8.

Quadro 8: Eficiência de remoção dos Jardins Filtrantes.

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

5.3. CENÁRIOS FUTUROS CONSIDERANDO ALTERAÇÕES HIDRODINÂMICAS EM CONJUNTO COM ABATIMENTO DE CARGAS

A partir dos resultados observados nas simulações de qualidade da água das alterações hidrodinâmicas e dos abatimentos de cargas propostos foram estabelecidos cinco cenários de combinações de alterações hidrodinâmicas com abatimentos de cargas. A Figura 26 ilustra os cenários de qualidade da água simulados.

- **Combinação A:** Hidro 04 + Abatimento 1 (20%);
- **Combinação B:** Hidro 04 + Abatimento 1 (20%) + Abatimento 3 (Jardins);
- **Combinação C:** Hidro 05 + Abatimento 1 (20%);
- **Combinação D:** Hidro 06 + Abatimento 3 (Jardins);
- **Combinação E:** Hidro 05 + Abatimento 3 (Jardins);

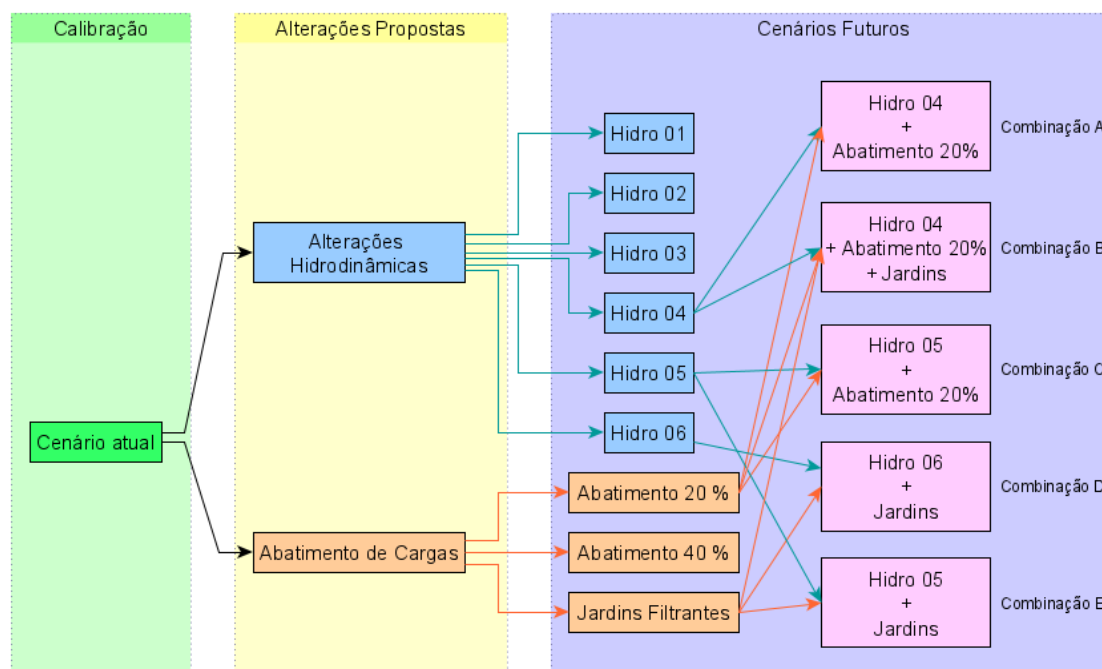


Figura 26: Cenários simulados de qualidade da água no modelo Delft-3D.

6. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Os resultados das simulações hidrodinâmica e de qualidade da água do cenário atual foram apresentados detalhadamente nos relatórios “**Modelagem Hidrodinâmica das Lagoas de Itaipu e Piratininga - Fase II: Calibração e validação com os dados de maré e corrente medidos em Campo**” e “**Modelagem de Qualidade de Água das Lagoas de Itaipu e Piratininga - Fase I: Calibração do Modelo de Qualidade de Água**”, respectivamente. A calibração dos modelos é apresentada com detalhes nesses relatórios. Os estudos morfodinâmicos do Canal de Itaipu foram apresentados no relatório “**Modelagem Computacional de Morfodinâmica Costeira: Estudo de Alternativas de Intervenção nos Molhes de Fixação da Desembocadura da Laguna de Itaipu**”.

A calibração e validação do cenário atual de qualidade de água considerou diferentes variáveis, sendo elas: salinidade, DBO, COT, OD, amônia, nitrato, fósforo e

coliformes termotolerantes. Tanto o monitoramento da qualidade de água das lagoas como as simulações computacionais de qualidade de água do cenário atual apontam que as variáveis mais problemáticas, e com concentrações acima do limite da Classe I para águas salobras, são COT, amônia e fósforo total. Por isso, nesse relatório as respostas dos modelos de qualidade de água dos cenários futuros serão apresentadas somente para os três parâmetros mais preocupantes atualmente: COT, amônia e fósforo total.

A seguir, são apresentados detalhadamente os resultados dos cenários futuros de qualidade da água considerando: (i) apenas as alterações hidrodinâmicas (item 6.1); (ii) apenas os abatimentos de carga (item 6.2); e (iii) a combinação de alterações hidrodinâmicas com abatimento de carga (item 6.3). A descrição dos cenários está detalhada no item 5.

6.1. CENÁRIOS FUTUROS - ALTERAÇÕES HIDRODINÂMICAS

O efeito das alterações hidrodinâmicas resultantes das obras hidráulicas propostas sobre a qualidade da água das lagoas foi avaliado em diferentes cenários, e os resultados são apresentados na sequência. Os seguintes cenários foram simulados e avaliados:

- **HIDRO 1:** Dragagem Canal de Itaipu na cota -2m;
- **HIDRO 2:** Dragagem Canal de Itaipu na cota -2m + Prolongamento do Molhe de Itaipu em 140m;
- **HIDRO 3:** Dragagem Canal de Itaipu na cota -2m + Prolongamento do Molhe de Itaipu em 140m + Dragagem do Canal de Camboatá na cota -1,5m;
- **HIDRO 4:** Dragagem Canal de Itaipu na cota -2m + Prolongamento do Molhe de Itaipu em 140m + Dragagem do Canal de Camboatá na cota -1,5m + Desobstrução do Túnel do Tibau;
- **HIDRO 5:** Desobstrução do Túnel do Tibau;
- **HIDRO 6:** Dragagem do Canal de Camboatá na cota -1,5m + Desobstrução do Túnel do Tibau;

Para os cenários com alteração hidrodinâmica são apresentados os resultados de salinidade, nível e tempo de residência, além das variáveis de qualidade de água. A seguir são apresentados os resultados de cada variável isoladamente.

6.1.1. Nível d'água

6.1.1.1. Lagoa de Itaipu

O nível d'água nessa lagoa 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, porém com amplitudes menores e com atraso de fase de aproximadamente 2 horas. Isto é, os níveis mínimos e máximos no interior da lagoa de Itaipu acontecem 2 horas depois de terem acontecido no mar e com menor diferença entre os valores máximo e mínimo. Na série de nível simulada ao longo de um ano, os valores de nível no mar variaram de 1,0m a -0,5m. Na Lagoa de Itaipu o valor máximo foi 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 e sua profundidade média está apresentada na Figura 29.

Nos instantes de nível mínimo as profundidades na lagoa são bastante reduzidas e se observa algumas células secas na grade do modelo. Ressalta-se que a grade de simulação é fixa, ou seja, não aumenta e nem diminui de tamanho, e foi delimitada para contemplar a área molhada correspondente ao nível médio atual. Por isso, nos instantes de nível mínimo se observa algumas células secas na grade de simulação, que no cenário atual ocorrem somente nas proximidades do Canal de Itaipu e correspondem a 0,9 ha, o que representa menos de 0,82% da área simulada nesta lagoa (Figura 31). A grade de modelagem computacional estabelecida para a Lagoa de Itaipu possui uma área total de 109,35 hectares (aproximadamente 1% maior que a área real da lagoa em condições de nível médio). As áreas correspondentes a essas células secas foram avaliadas para cada cenário e serão discutidas a seguir.

As alterações hidrodinâmicas estudadas, como a desobstrução do Túnel do Tibau e as dragagens do Canal de Itaipu e Camboatá, têm a capacidade de alterar os padrões hidrodinâmicos, impactando nas oscilações de nível e seus valores mínimos, máximos e médios. A Figura 27 apresenta a oscilação do nível em Itaipu na condição atual e a Figura 28 nos demais cenários hidrodinâmicos estudados, em um ponto central da lagoa (16).

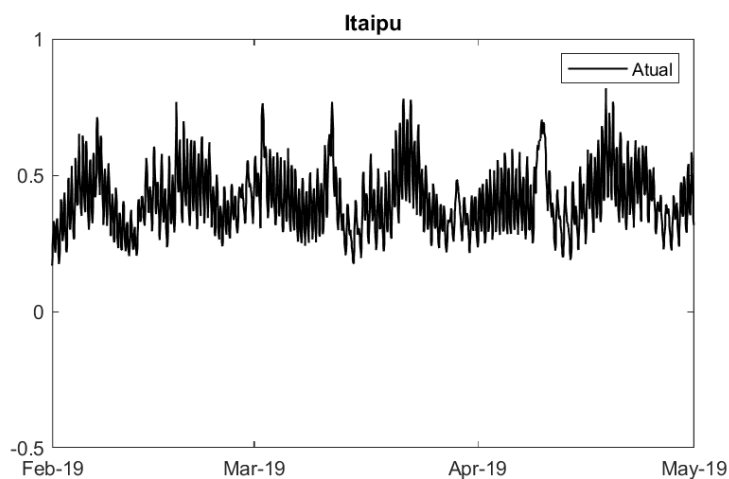


Figura 27: Nível da Lagoa de Itaipu simulado no cenário atual, durante os meses de fevereiro, março e abril de 2019.

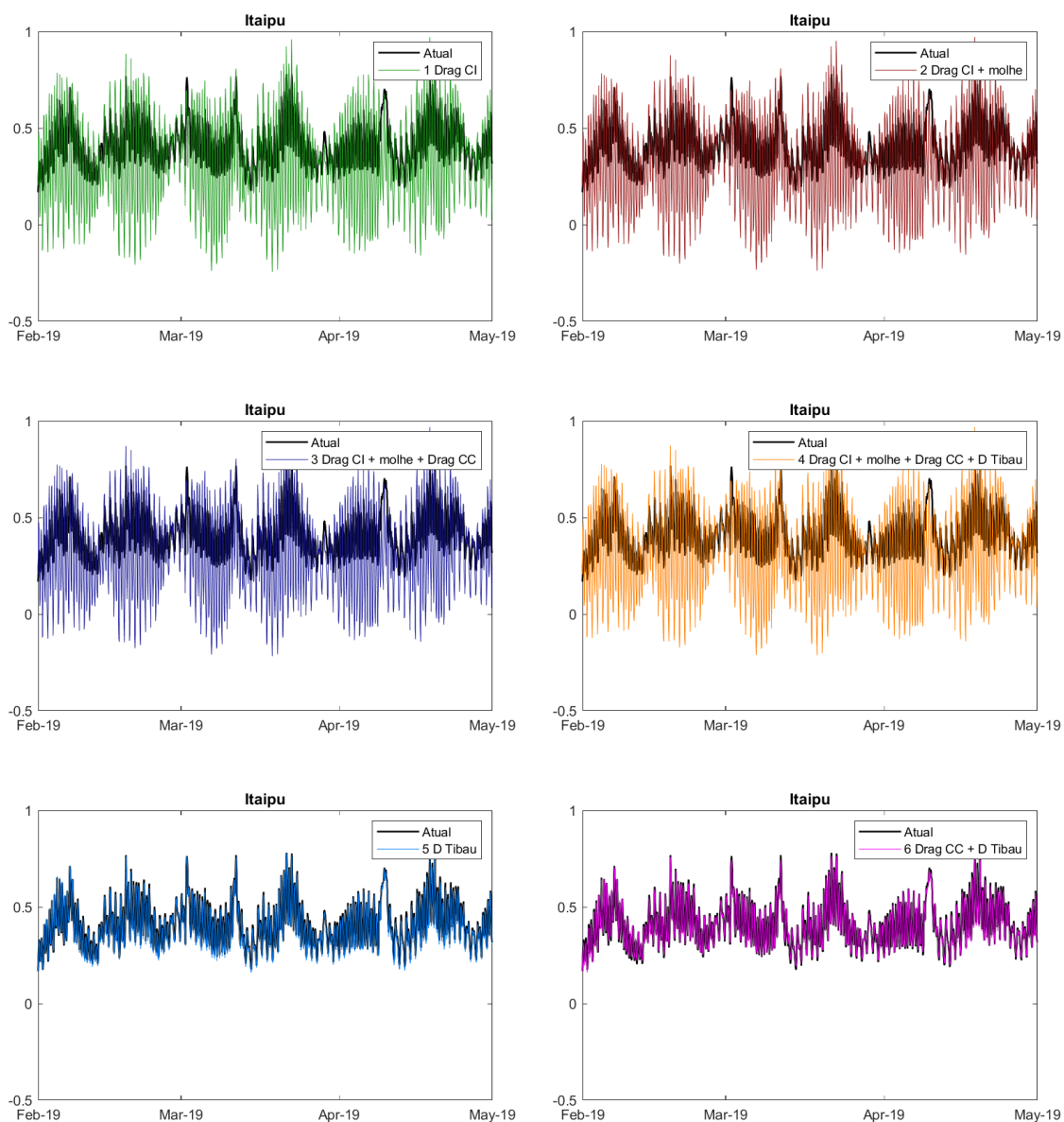


Figura 28: Nível da Lagoa de Itaipu simulado nos cenários futuros de alterações hidrodinâmicas, durante os meses de fevereiro, março e abril de 2019.

Com a dragagem do Canal de Itaipu (**HIDRO 1** e **HIDRO 2**), observa-se aumento expressivo na amplitude dos níveis da Lagoa de Itaipu e redução do atraso de fase para uma hora. Além disso, a dragagem no Canal de Itaipu também reduz um pouco o nível médio da lagoa, baixando de 0,36m na condição atual para 0,27m, Figura 29 e Figura 30, respectivamente. No entanto, essa redução não acarretou em áreas secas na condição de nível médio. Não há células secas na grade de modelagem em condições de nível médio da Lagoa de Itaipu no cenário atual e nem para os cenários futuros avaliados, Figura 29 e Figura 30, respectivamente.

Nos cenários **HIDRO 1** e **HIDRO 2**, o nível máximo observado em Itaipu foi de 0,99m e o mínimo de -0,32m (Quadro 9), deixando expostas por algumas horas as margens da lagoa até que o nível do mar entre na lagoa novamente (Figura 32). Ao longo da série de um ano, no instante de nível mínimo observado a área seca total das margens na área de modelagem foi de 9,4 ha para o cenário **HIDRO 1**, e de 9,2 ha para o **HIDRO 2** (Figura 31).

A dragagem do Canal de Camboatá juntamente com a dragagem de Itaipu, **HIDRO 3**, provoca um pequeno aumento do nível mínimo de Itaipu em relação aos cenários **HIDRO 1** e **HIDRO 2**, chegando a -0,29m, porém, não há alteração nos níveis máximos e médios (Quadro 9). Esse mesmo comportamento pode ser observado no cenário **HIDRO 4**, que considera a desobstrução do Túnel do Tibau, além das dragagens no Canal de Itaipu e Camboatá. Nesses cenários a área seca total é de 8,8 ha.

A desobstrução do Túnel do Tibau de forma isolada, avaliada no cenário **HIDRO 5**, não traz alterações expressivas para o nível da Lagoa de Itaipu quando comparado ao cenário atual, permanecendo com o mesmo padrão de oscilação e igual valor de nível mínimo (Quadro 9) e de área secas na margem da área simulada. Os níveis médio e máximo são acrescidos em até 0,02m em relação ao cenário atual (Quadro 9).

A dragagem do Canal de Camboatá e a desobstrução do Túnel do Tibau juntos, **HIDRO 6**, sem considerar a dragagem do Canal de Itaipu, pode elevar em até 5 cm o nível mínimo da água em Itaipu em relação ao cenário atual, reduzindo para 0,7 ha a área seca na grade do modelo (Figura 32). Também não se observam variações

expressivas dos níveis médio e máximo desse cenário em relação ao atual (Quadro 9 e Figura 30).

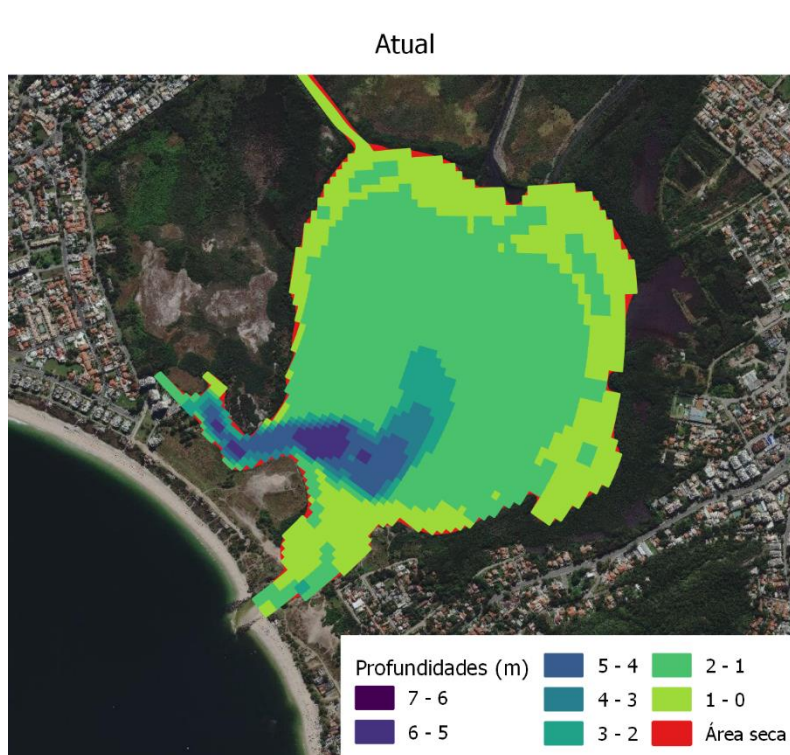


Figura 29: Profundidade na Lagoa de Itaipu num instante equivalente ao nível médio na condição atual.

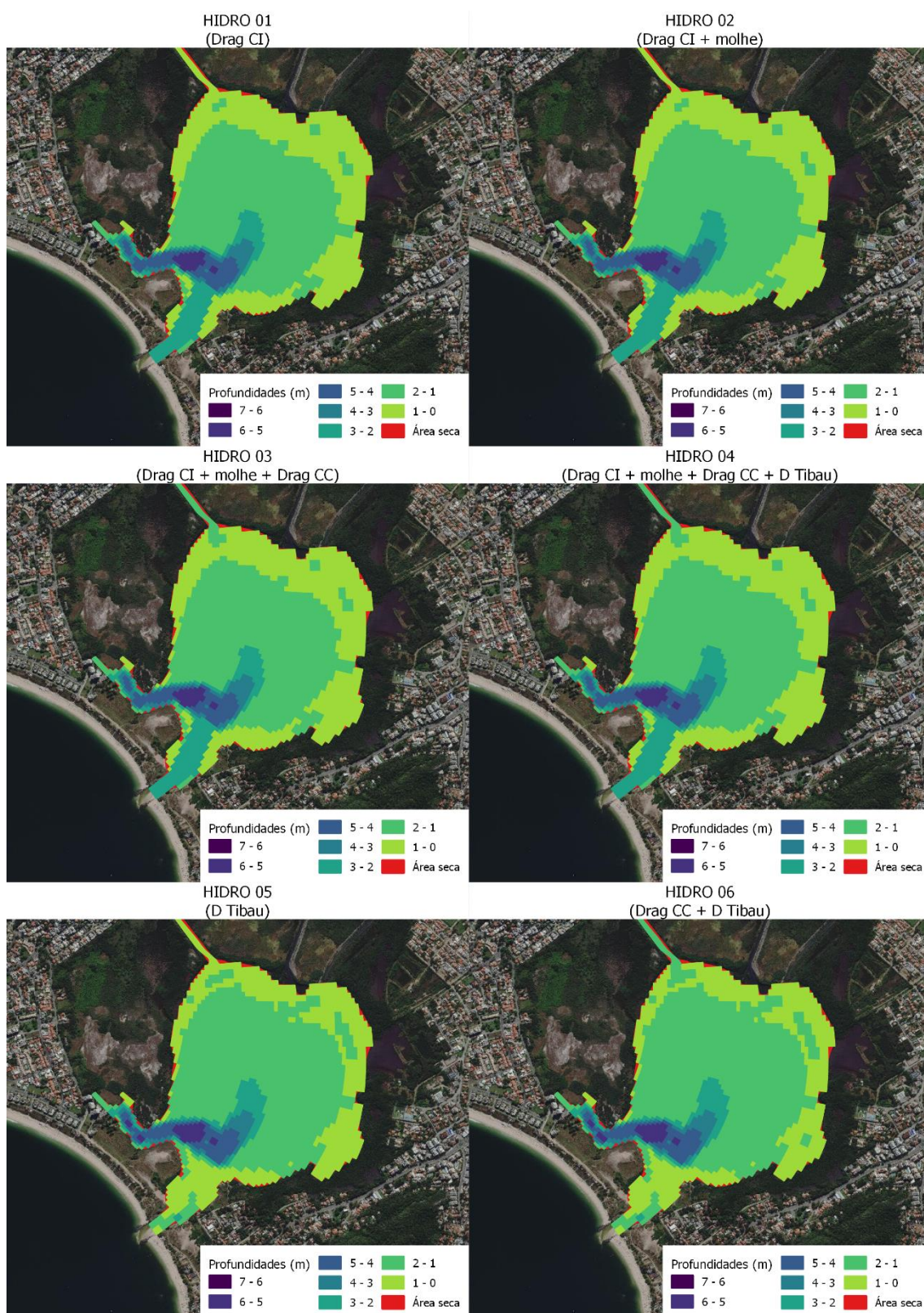


Figura 30: Profundidade na Lagoa de Itaipu durante um instante de nível médio, para os diferentes cenários futuros de modificações hidrodinâmicas.

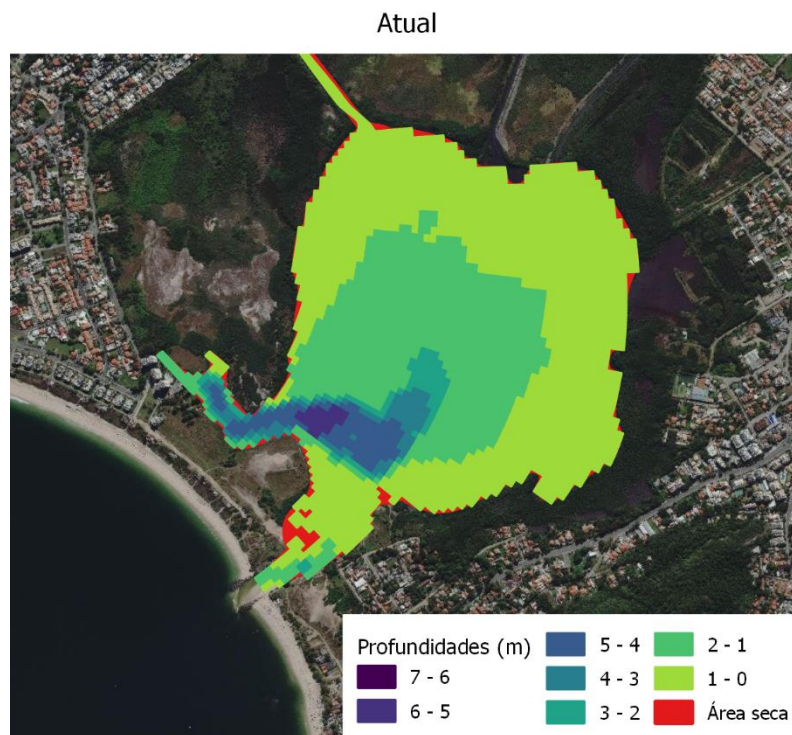


Figura 31: Profundidade na Lagoa de Itaipu, com destaque para as regiões secas em vermelho, durante um instante de nível mínimo na condição atual.

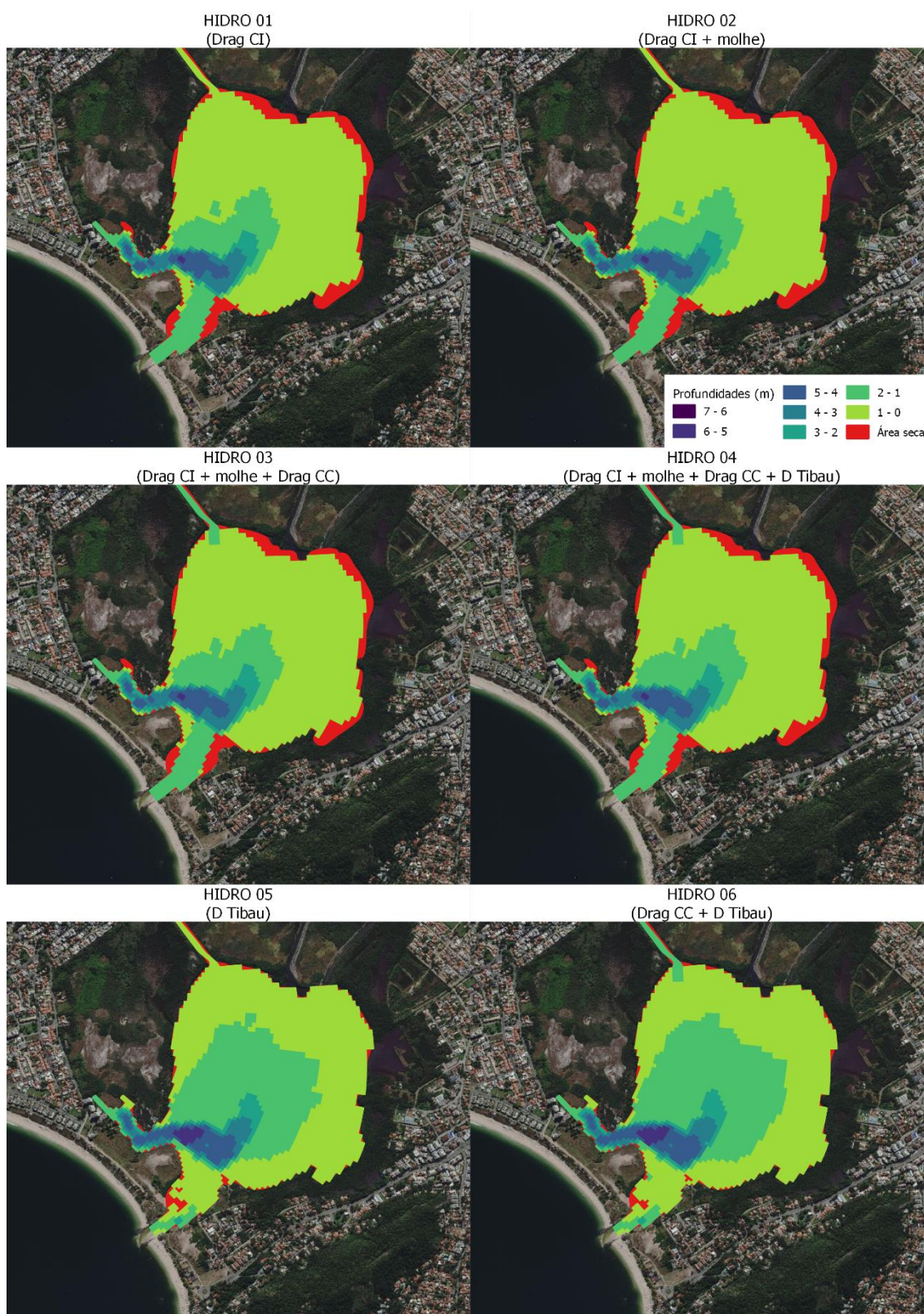


Figura 32: Profundidade na Lagoa de Itaipu, com destaque para as regiões secas em vermelho, durante um instante de nível mínimo, para os diferentes cenários futuros de modificações hidrodinâmicas.

Diante dos resultados expostos, a dragagem do Canal de Itaipu tem a capacidade de alterar significativamente as oscilações de nível no interior na Lagoa de Itaipu, aumentando as áreas secas nas bordas, atingindo 9,4 ha durante instantes de nível mínimo, que tem duração de 6 horas. Já a dragagem do Canal de Camboatá tem uma capacidade reduzida no impacto do nível de Itaipu, com poucas alterações de nível máximo, médio e mínimo. O Quadro a seguir e a Figura 33 apresentam de forma resumida e comparativa os níveis máximos, mínimos e médios, bem como as áreas secas identificadas na grade de modelagem, observados em Itaipu nos diversos cenários estudados.

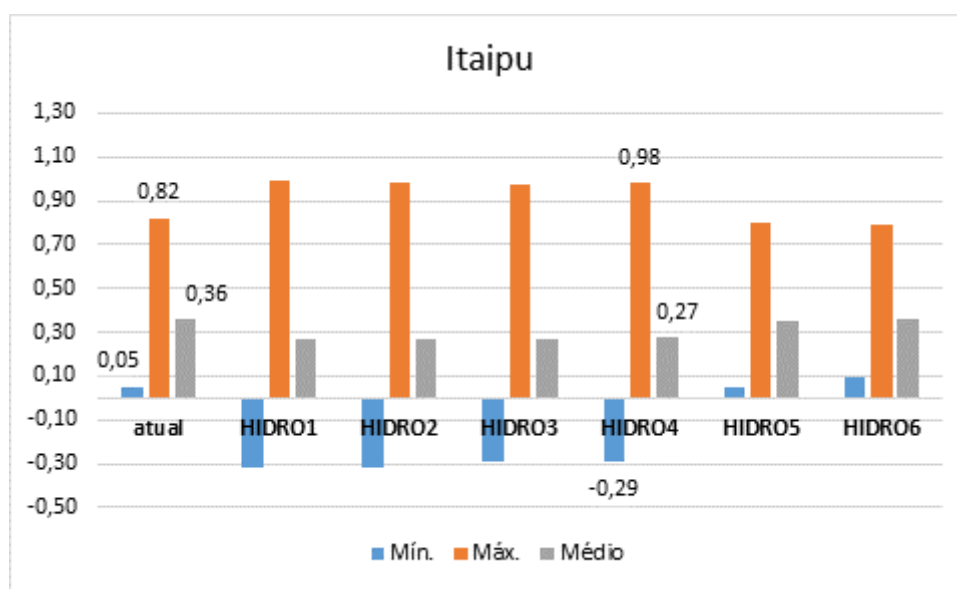


Figura 33: Níveis máximos, mínimos e médios observados na Lagoa de Itaipu em cada um dos cenários de alterações hidrodinâmicas simulados, em comparação com o atual.

Quadro 9: Nível d'água máximo, mínimo e médio observado na Lagoa de Itaipu em cada um dos cenários simulados, e área seca nos instantes de nível mínimo em cada cenário.

Cenário	Nível d'água em Itaipu (m)			Áreas secas na grade de modelagem em condições de nível mínimo	
	Mínimo	Máximo	Média	hectares	% da área total de simulação (grid)
Atual	0,05	0,82	0,36	0,9	0,86
HIDRO1	-0,32	0,99	0,27	9,4	8,56
HIDRO2	-0,32	0,99	0,27	9,2	8,45
HIDRO3	-0,29	0,98	0,27	8,8	8,01
HIDRO4	-0,29	0,98	0,27	8,8	8,01
HIDRO5	0,05	0,80	0,35	0,9	0,86
HIDRO6	0,10	0,79	0,36	0,7	0,64

Apesar da redução no nível mínimo da lagoa do cenário atual (0,05 m) para o cenário com execução de todas as obras hidráulicas (-0,29 m) o nível da lagoa permanece acima de 0,05 m em cerca de 80 % do tempo (Figura 36). Ou seja, nesse cenário **HIDRO 4**, serão observados níveis entre o 0,05 m (mínimo atual) e -0,29 m durante 20 % do tempo. O maior impacto no nível mínimo é observado nos cenários **HIDRO 01** e **HIDRO 02**, cujo nível mínimo chega a atingir -0,32 m em alguns instantes, mas ainda é possível observar níveis superiores a 0,05 m em 80 % do intervalo simulado (Figura 35).

Ressalta-se ainda que apesar da dragagem do Canal de Itaipu causar redução do espelho d'água da Lagoa de Itaipu nos instantes de nível mínimo, não há permanência de regiões secas por longos períodos de forma contínua. No cenário **HIDRO 4** são observados níveis inferiores ao mínimo atual em 20% do tempo durante um ano, representado pelo somatório de diferentes intervalos. Porém, estas áreas serão mantidas secas por um intervalo máximo próximo de 6hs, período em que o nível do mar leva para atingir novamente a preamar. Com a dragagem do canal também será aumentada a capacidade de entrada da maré para o interior da lagoa, fazendo com que o nível d'água na Lagoa de Itaipu se eleve rapidamente cada vez que o nível do mar aumenta. Isto é, com a dragagem do Canal de Itaipu o nível d'água na Lagoa de Itaipu responderá mais diretamente à variação maregráfica, com dois períodos de maré alta e dois períodos de maré baixa ao longo de um dia.

Com relação ao nível médio, os níveis nos cenários **HIDRO 01** e **HIDRO 02** superam 0,36 m (nível médio atual) em cerca de 40% do período simulado (Figura 35), sendo que no cenário atual este nível é superado em aproximadamente 50% do tempo simulado (Figura 34). O nível médio da Lagoa de Itaipu no cenário **HIDRO 04** é 0,27 m, nove centímetros menor do que o nível médio do cenário atual. Porém, o nível da lagoa neste cenário ultrapassa o nível médio do cenário atual (0,36m) em cerca de 40% do tempo (Figura 36).

Como mencionado acima, a dragagem do Canal de Itaipu causará ainda um aumento do nível máximo. No entanto, a permanência de níveis superiores ao nível máximo atual (0,82 m) é pequena, ocorrendo em menos de 10% do tempo simulado (Figura 36 e Figura 35).

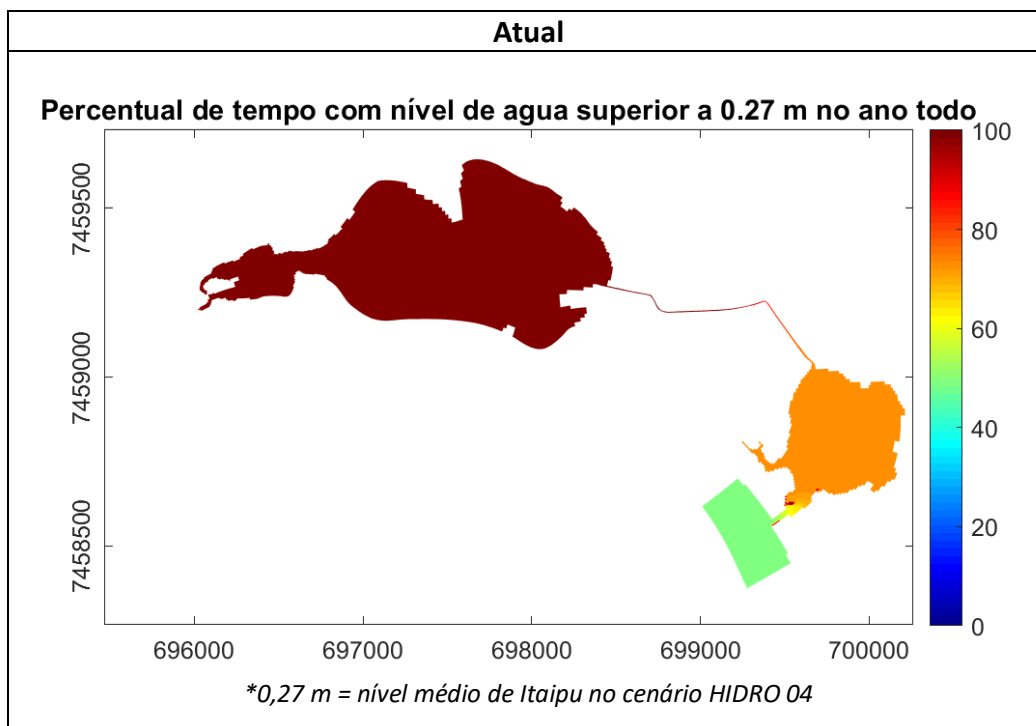


Figura 34: Permanência de nível no cenário atual durante todo o ano simulado.

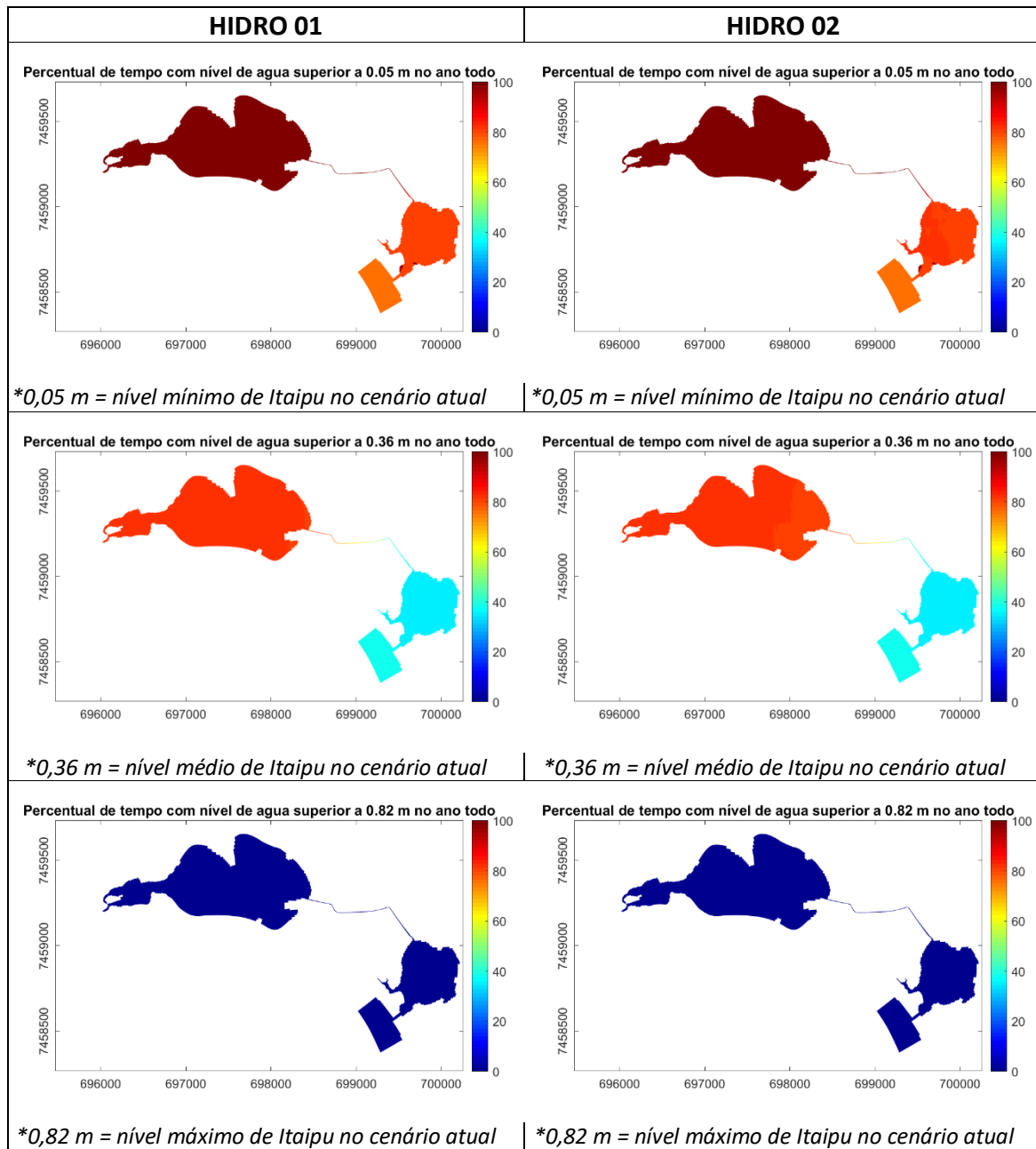


Figura 35: Permanência de nível nos cenários HIDRO 01 e HIDRO 02 durante todo o ano simulado.

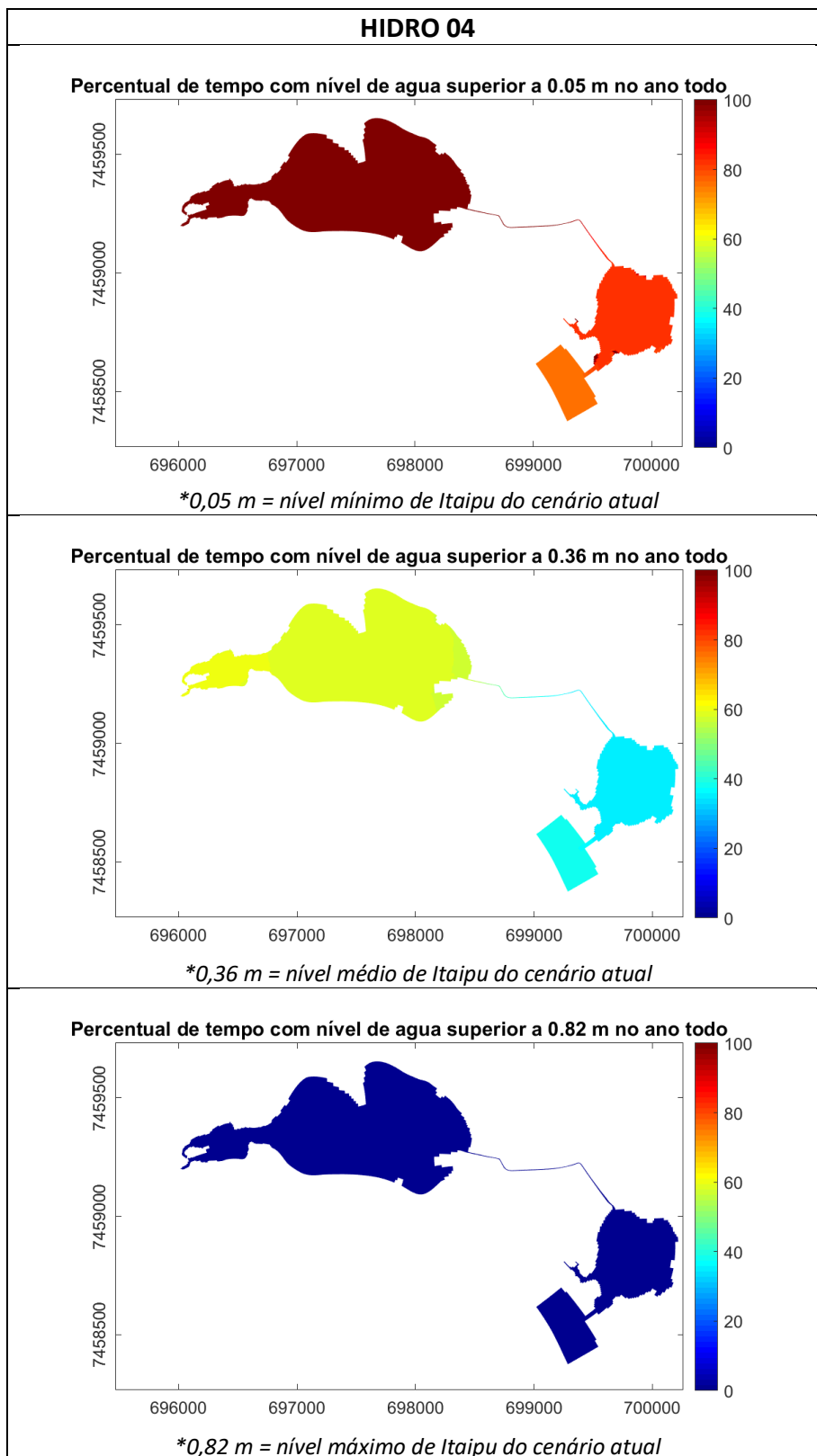


Figura 36: Permanência de nível no cenário HIDRO 04 durante todo o ano simulado.

A Figura 37 apresenta a variação de nível na Lagoa de Itaipu nos diferentes cenários ao longo de dois dias com o objetivo de ilustrar a oscilação do nível durante curtos períodos. Observa-se que os cenários com dragagem do Canal de Itaipu, cenários 1, 2, 3 e 4, possuem oscilações bastante superiores ao cenário atual e aos cenários 5 e 6. A linha tracejada indica o nível que mantém molhada 100% da grade. Isto é, a medida que o nível vai baixando em relação a linha tracejada vai aumentando também as áreas secas nas bordas da lagoa. E a área seca máxima é observada no instante de nível mínimo, já apresentada na Figura 32. O intervalo máximo observado entre o início de secamento das bordas até atingir o nível mínimo é de 3 horas e o intervalo para encher novamente as bordas é também de 3 horas. Por isso, essas células secas serão molhadas sempre a cada 6 horas, conforme já mencionado anteriormente.

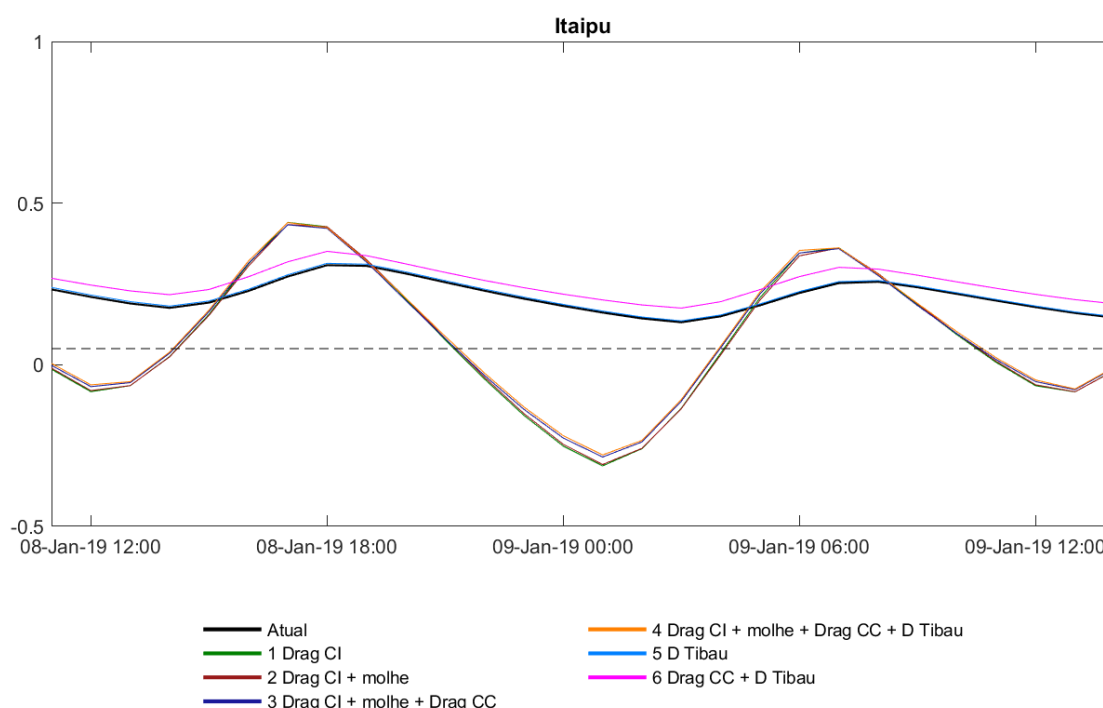


Figura 37: Nível da Lagoa de Itaipu durante um ciclo diário de maré. A linha tracejada indica o nível d'água abaixo do qual células da grade começam a secar.

6.1.1.2. Lagoa de Piratininga

Atualmente, as variações do nível d'água em Piratininga são influenciadas, principalmente, pela componente hidrológica, ou seja, pelas vazões das bacias contribuintes. A influência da maré nos níveis d'água da Lagoa de Piratininga se dá de forma reduzida em comparação a Itaipu. Na presente condição, a influência maregráfica na Lagoa de Piratininga é bastante dissipada devido à restrição do seu fluxo direto 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 de maré relevantes, 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 observado em Piratininga foi de 0,29 m, ocorrido em um momento de longa estiagem. O nível máximo observado em Piratininga foi 0,85 m e esteve associado a um evento de chuva expressivo, ocorrido de abril.

Para o cenário atual, o nível médio na Lagoa de Piratininga é 0,46 m. A profundidade média está apresentada na Figura 39, onde é possível identificar que não há áreas secas na grade do modelo para a condição de nível médio. A grade de modelagem computacional estabelecida para a Lagoa de Piratininga possui uma área total de 324,89 hectares (aproximadamente 2% maior que a área real da Lagoa em condições de nível médio). Nos cenários futuros também não se observou áreas secas na grade de modelagem em instantes de nível médio da Lagoa de Piratininga (Figura 40).

Nos instantes de nível mínimo, as profundidades na lagoa são bastante reduzidas, porém, não se observam áreas secas nas margens da grade do modelo para o cenário atual (Figura 41).

As alterações hidrodinâmicas estudadas, como a desobstrução do Túnel do Tibau e a dragagem do Canal de Camboatá, afetam os padrões hidrodinâmicos da Lagoa de Piratininga, impactando nas oscilações de nível e em seus valores mínimos, máximos e

médios. A Figura 38 apresenta a oscilação do nível de Piratininga na condição atual e nos demais cenários hidrodinâmicos estudados, em um ponto central da lagoa (P6).

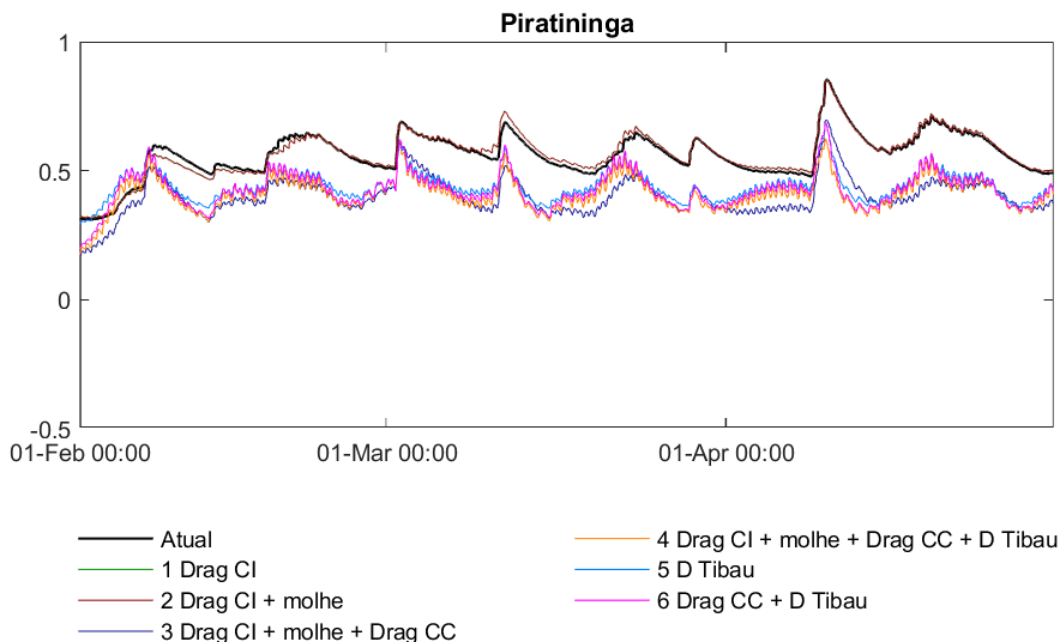


Figura 38: Nível da Lagoa de Piratininga simulado nos cenários atual e futuros de alterações hidrodinâmicas, durante os meses de fevereiro, março e abril de 2019.

Todas as intervenções propostas irão alterar os níveis d'água na Lagoa de Piratininga, com exceção da dragagem do Canal de Itaipu isoladamente, que pouco influencia no nível da Lagoa de Piratininga. As obras de dragagem do Canal de Camboatá e desobstrução do Túnel do Tibau irão aumentar a influência da maré no nível d'água da Lagoa de Piratininga, mas ainda assim a oscilação horária do nível será pouco expressiva e muito menor daquela que ocorre em Itaipu (Figura 38).

A Figura 40 apresenta a profundidade média na Lagoa de Piratininga para os cenários **HIDRO 1** e **2**, que consideram apenas as obras no Canal de Itaipu. A profundidade média da Lagoa de Piratininga nesses cenários é muito próxima à condição atual (Figura 39), sem variações significativas. O mesmo ocorre com o nível mínimo, apresentado na Figura 41 e na Figura 42. Nesses cenários, o nível máximo observado em Piratininga se manteve igual ao atual.

A dragagem do Canal de Camboatá associada às obras no Canal de Itaipu, cenário **HIDRO 3**, traz impactos relevantes no nível d'água da Lagoa de Piratininga, reduzindo

em 13 cm o nível mínimo e médio da lagoa em relação ao cenário atual, e em 15 cm o nível máximo. Esta redução ocorre porque a dragagem do Canal de Camboatá facilita a saída de água da Lagoa de Piratininga em direção à Lagoa de Itaipu. A dragagem do Canal de Camboatá, sem a desobstrução do Túnel do Tibau, reduz o nível mínimo, médio e máximo da Lagoa de Piratininga para 0,16 m, 0,33 m e 0,70 m, respectivamente, reduzindo de forma expressiva a área do espelho d'água da lagoa de Piratininga, principalmente nos instantes de nível mínimo (Figura 42). Nesse cenário, a área seca das margens da lagoa de Piratininga é de 11,4 ha em instantes de nível mínimo. Ou seja, neste cenário **HIDRO 3**, a área seca nos instantes de nível mínimo é 3,5% da área de modelagem dessa lagoa, sendo que atualmente não se observou área seca na grade de modelagem mesmo nos instantes de nível mínimo.

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 reduzirá os níveis mínimos, médios e máximos da Lagoa de Piratininga, porém de forma menos expressiva em comparação ao cenário **HIDRO 3**. Isso ocorre porque a desobstrução do Túnel de Tibau facilita a entrada de água do mar para o interior da lagoa, compensando parcialmente a saída de água facilitada pela dragagem do Canal de Camboatá, e indicando a necessidade de desobstrução do Túnel 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 chegam a 0,17 m, 0,37 m e 0,62 m, respectivamente. Com isso, a Lagoa de Piratininga no cenário **HIDRO 4** sofre redução de seu espelho d'água apenas nos rápidos instantes de nível mínimo (Figura 39, Figura 40, Figura 41 e Figura 42), com decréscimo de 12 cm de nível mínimo e 11 cm de nível médio em relação ao cenário atual.

Apesar da redução no nível médio neste cenário **HIDRO 4**, essa não é suficiente para causar áreas secas na condição de nível médio, apenas nos instantes de nível mínimo. A área seca nesse cenário é de 7,9 ha no instante de nível mínimo. Espera-se que nos instantes de nível mínimo a área seca represente 2,4% da área de modelagem desta lagoa, sendo que atualmente não foi observada área seca nos instantes de nível mínimo na grade simulada.

O cenário de desobstrução do Túnel do Tibau de forma isolada, **HIDRO 5**, também provoca alterações nos níveis da Lagoa de Piratininga, porém, menos expressiva, com nível mínimo, médio e máximo chegando a 0,29 m, 0,41 m e 0,68 m. Em relação ao cenário atual, a redução no nível médio foi de 5 cm e não se observou redução expressiva do nível mínimo. Já o nível máximo foi bastante reduzido, chegando a 0,68 cm, ou seja, 17 cm menor que o atual. Isso ocorre porque quando o nível d'água na Lagoa de Piratininga está acima da cota da comporta do túnel, há saída de água da lagoa pelo Túnel do Tibau desobstruído.

A Figura 40 e a Figura 42 apresentam as profundidades e o espelho d'água para os níveis médios e mínimos na Lagoa de Piratininga considerando a desobstrução do túnel do Tibau, **HIDRO 5**, com pouca diferença em relação ao cenário atual e sem áreas secas nem mesmo nos instantes de nível mínimo.

O cenário **HIDRO 6**, que considerou a desobstrução do Túnel do Tibau juntamente com a dragagem do Canal de Camboatá indica maior redução nos níveis médios e mínimos em relação ao **HIDRO 5**, devido a dragagem do Canal de Camboatá. O nível médio nesse cenário é de 0,39 m, 7 cm a menos do que na condição atual (Quadro 10). O nível mínimo chegará a 0,19 m, ou seja, 10 cm a menos que o cenário atual, com 4,4 ha de área seca (Figura 42). O nível máximo esperado nesse cenário é o mesmo do cenário anterior, 0,68 m, decorrente da desobstrução do Túnel do Tibau.

Atual

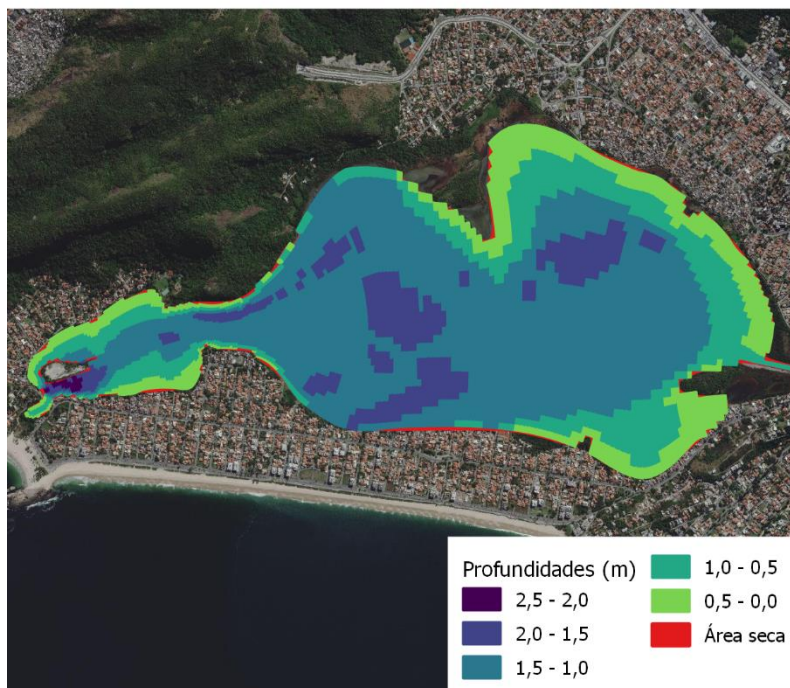


Figura 39: Profundidade na Lagoa de Piratininga num instante equivalente ao nível médio na condição atual.

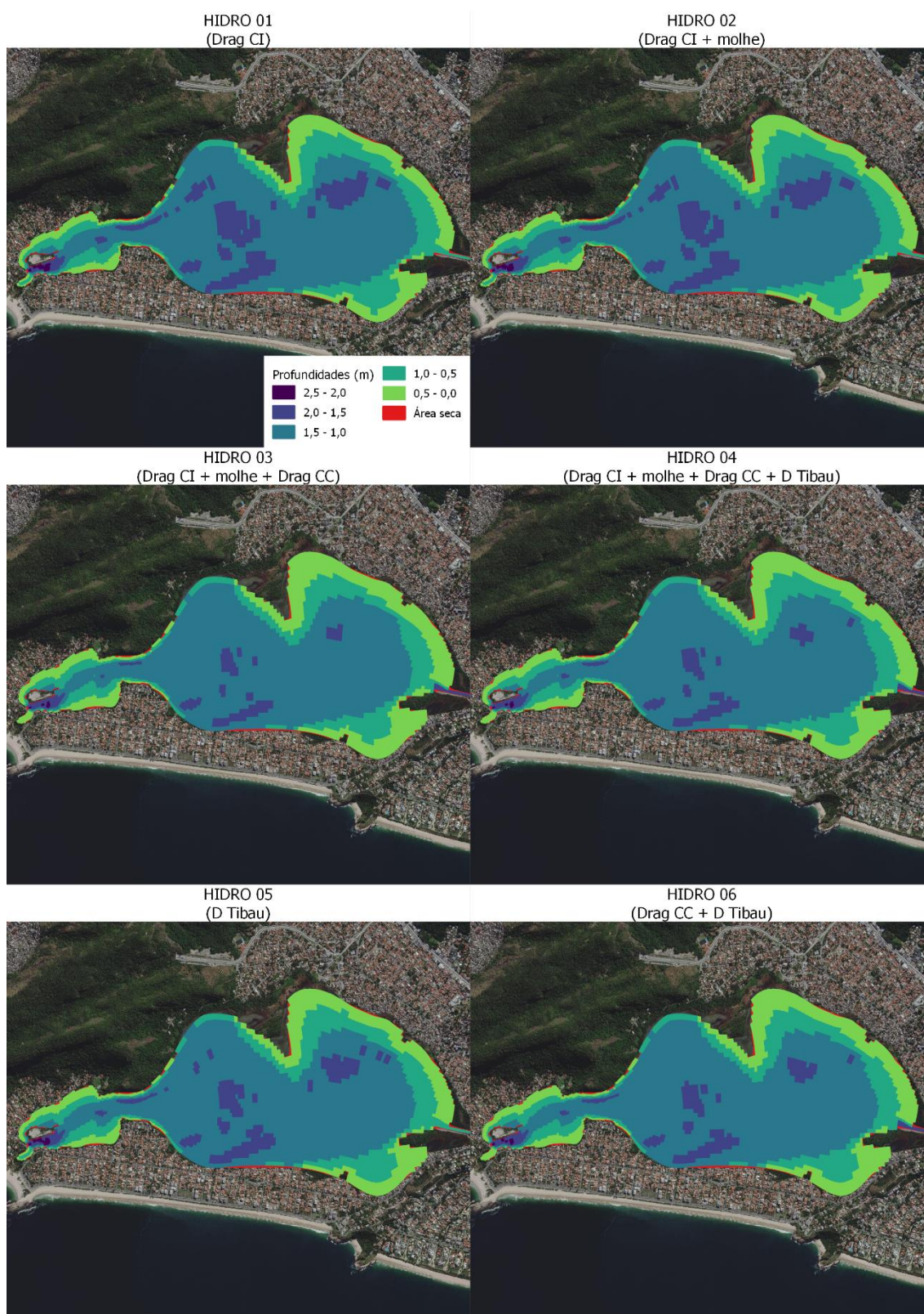


Figura 40: Profundidade na Lagoa de Piratininga, durante um instante de nível médio, para os diferentes cenários futuros de modificações hidrodinâmicas.

Atual

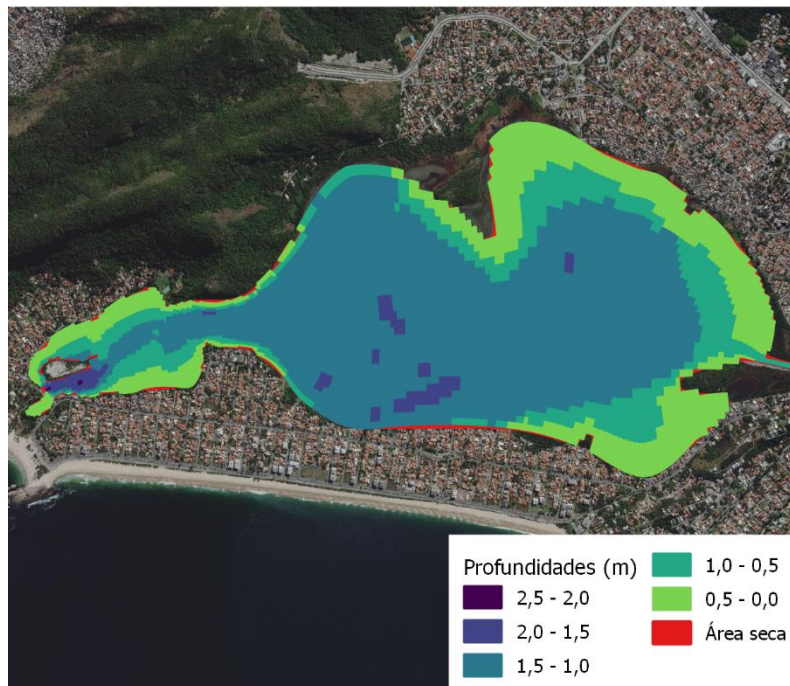


Figura 41: Profundidade na Lagoa de Piratininga num instante equivalente ao nível mínimo na condição atual.

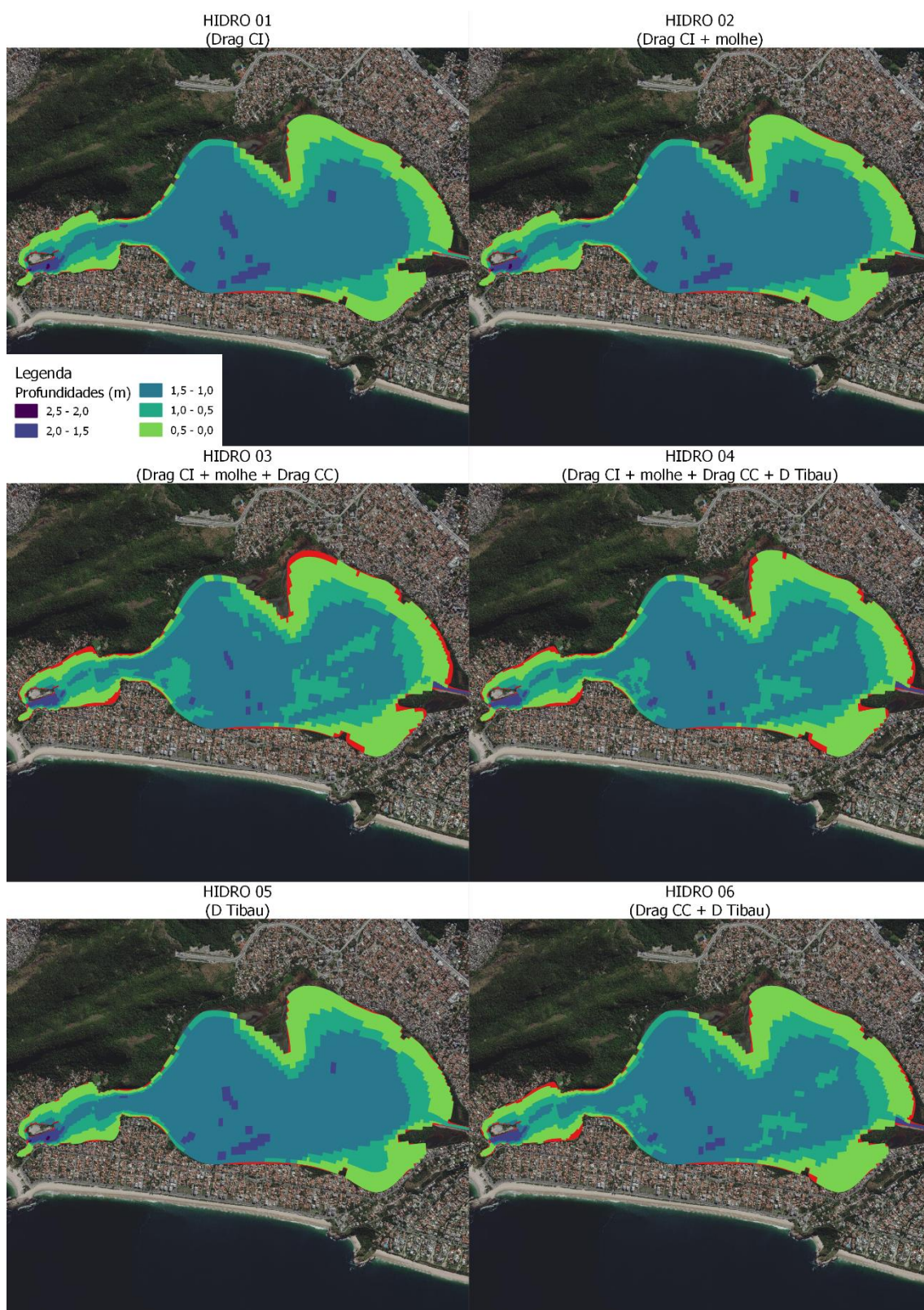


Figura 42: Profundidade na Lagoa de Piratininga, com destaque para as regiões secas em vermelho, durante um instante de nível mínimo, para os diferentes cenários futuros de modificações hidrodinâmicas.

O Quadro a seguir e a Figura 43 apresentam a comparação resumida dos níveis máximos, mínimos e médios e as áreas secas observados na Lagoa de Piratininga nos diversos cenários estudados.

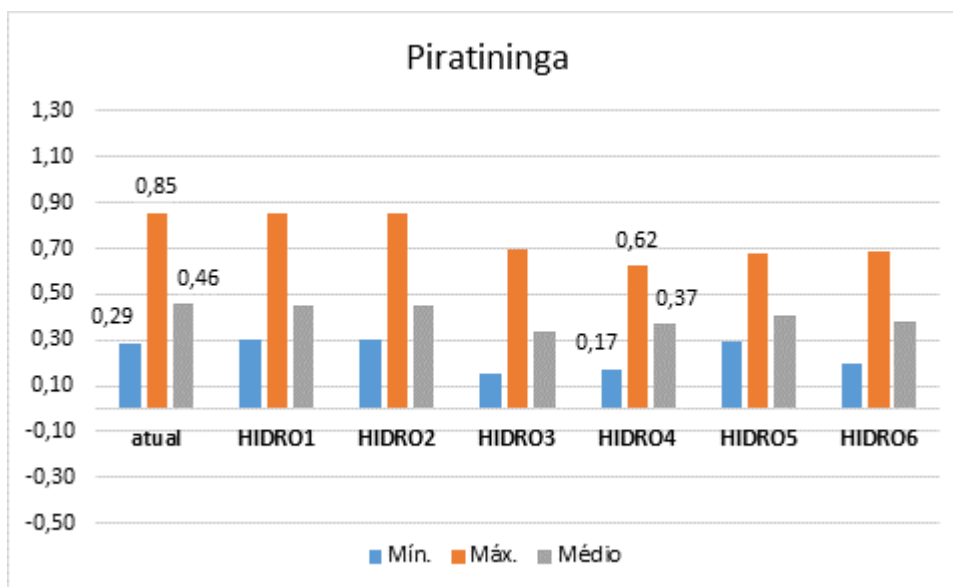


Figura 43: Níveis máximos, mínimos e médios observados na Lagoa de Piratininga em cada um dos cenários de alterações hidrodinâmicas simulados, em comparação com o atual.

Quadro 10: Nível d'água máximo, mínimo e médio observado na Lagoa de Piratininga em cada um dos cenários simulados, e área seca em instantes de nível mínimo em cada cenário.

Cenário	Nível d'água em Piratininga			Áreas secas na grade de modelagem em condições de nível mínimo	
	Mínimo	Máximo	Média	hectares	% da área total de simulação (grid)
Atual	0,29	0,85	0,46	0	0
HIDRO1	0,30	0,85	0,45	0	0
HIDRO2	0,30	0,85	0,45	0	0
HIDRO3	0,16	0,70	0,33	11,4	3,5
HIDRO4	0,17	0,62	0,37	7,9	2,4
HIDRO5	0,29	0,68	0,41	0	0
HIDRO6	0,19	0,68	0,39	4,4	1,4

Apesar da redução no nível mínimo da lagoa do cenário atual (0,29m) para o cenário de execução de todas as obras hidráulicas (0,17 m), o nível da lagoa no **HIDRO 4** permanece acima de 0,29m em cerca de 80% do tempo (Figura 46). Isto é, nesse cenário **HIDRO 4**, serão observados níveis entre o 0,29m (mínimo atual) e 0,17 m durante 20% do tempo, com células permanecendo secas por até duas semanas de

forma contínua em períodos de estiagem. No **HIDRO 6** o nível d'água se mantém acima do nível mínimo atual (0,29m) em cerca de 90 % do tempo (Figura 47), mas com células permanecendo secas também por duas semanas de forma contínua nos intervalos de nível mínimo. O maior impacto no nível mínimo é observado no cenário **HIDRO 3**, cujo nível mínimo é 0,16m, e a permanência de nível superior a 0,29m é cerca de 70% do tempo (Figura 45). Isto é, no cenário **HIDRO 3** haverá células secas durante 30% do ano, sendo que algumas regiões das margens poderão permanecer secas por mais de um mês ininterrupto durante períodos de estiagem.

Com relação ao nível médio, nos cenários **HIDRO 3** e **HIDRO 4** há redução para 0,33 e 0,37 m, respectivamente, e o nível de Piratininga só ultrapassa o nível médio do cenário atual (0,46m) em poucos momentos, menos de 20% do tempo (Figura 46 e Figura 45), sendo que no cenário atual o nível médio é ultrapassado em aproximadamente 50% do tempo. No cenário **HIDRO 6**, o nível médio atual será ultrapassado em 10 % do tempo (Figura 47).

A dragagem do Canal de Camboatá reduzirá também o nível máximo da Lagoa de Piratininga. O nível máximo do cenário **HIDRO 4** (0,62 m) é superado em poucos instantes no cenário atual (Figura 44), sugerindo que essa mudança não é representativa.

Atual

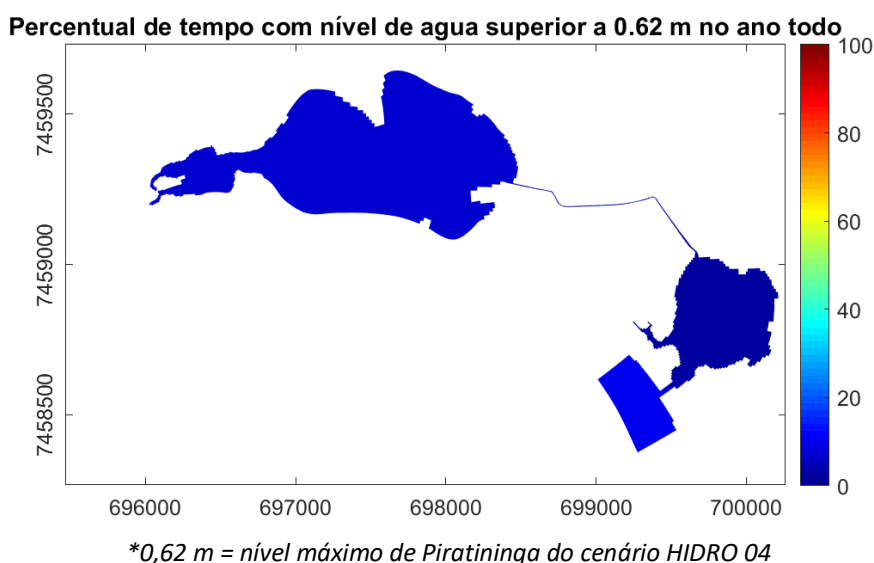
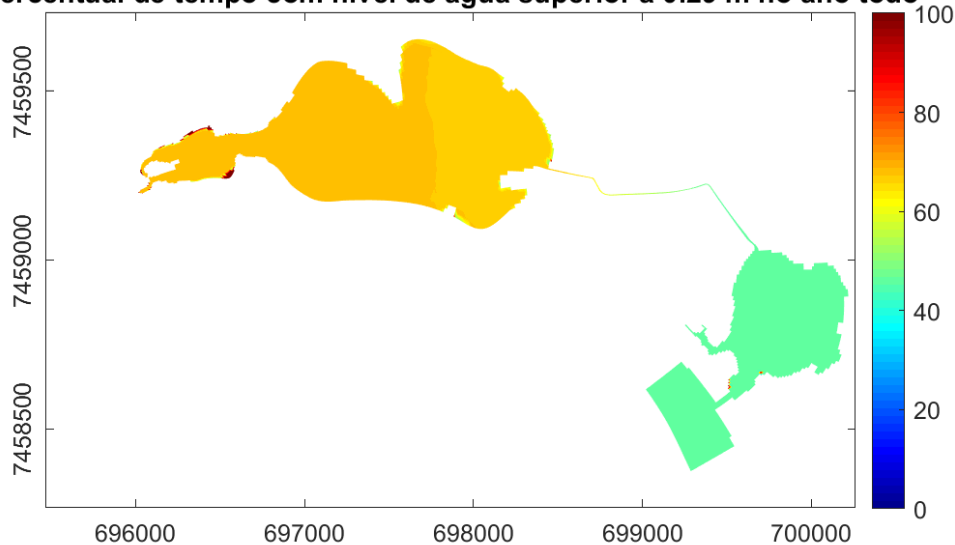


Figura 44: Permanência de nível no cenário atual durante todo o ano simulado.

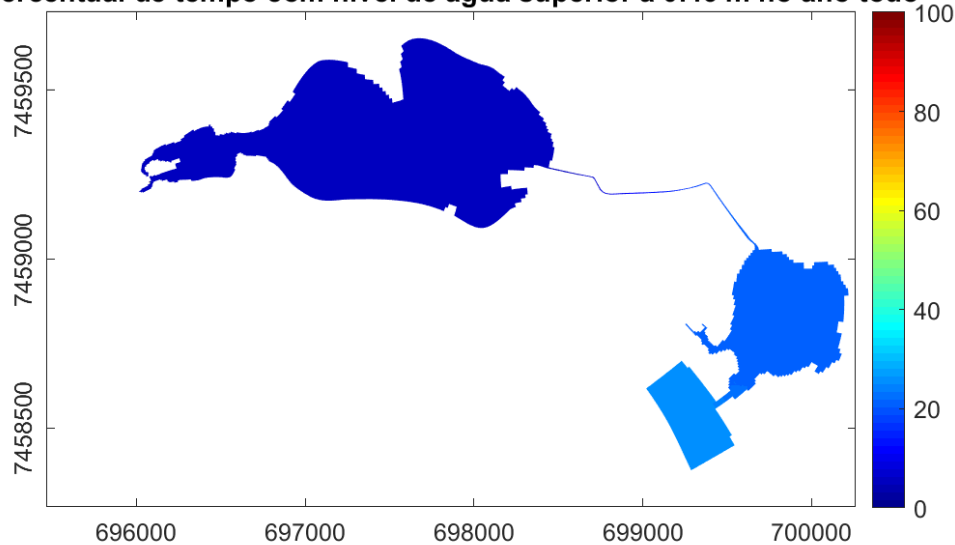
HIDRO 03

Percentual de tempo com nível de água superior a 0.29 m no ano todo



**0,29 m = nível mínimo de Piratininga do cenário atual*

Percentual de tempo com nível de água superior a 0.46 m no ano todo

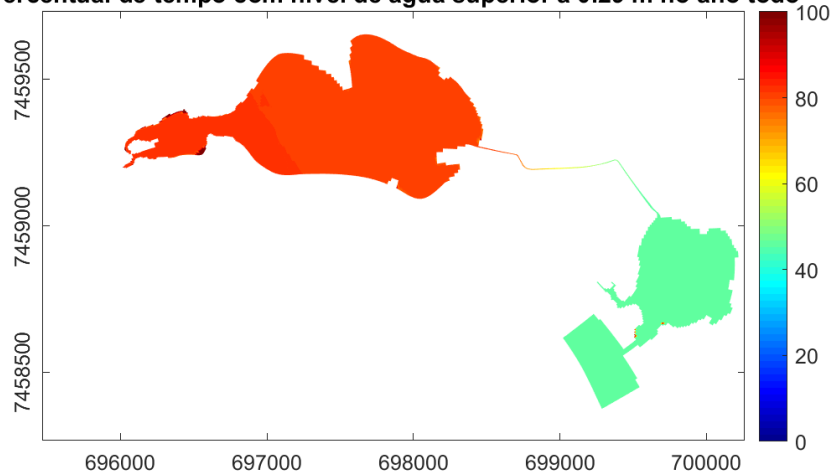


**0,46 m = nível médio de Piratininga do cenário atual*

Figura 45: Permanência de nível no cenário HIDRO 03 durante todo o ano simulado.

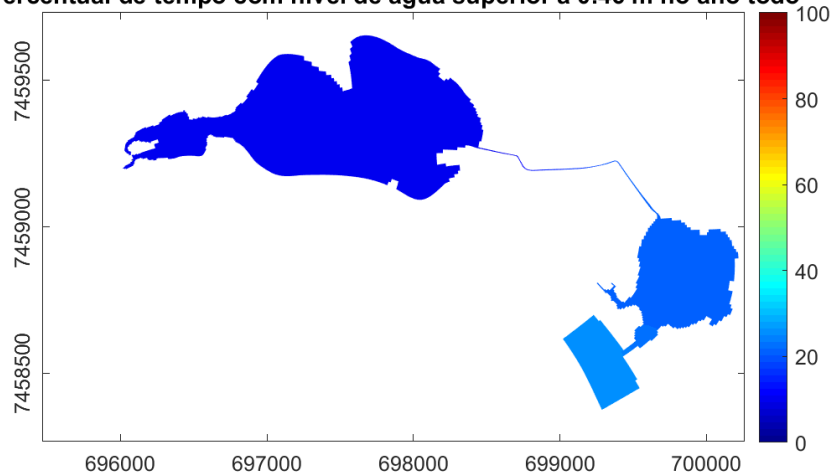
HIDRO 04

Percentual de tempo com nível de água superior a 0.29 m no ano todo



**0,29 m = nível mínimo de Piratininga do cenário atual*

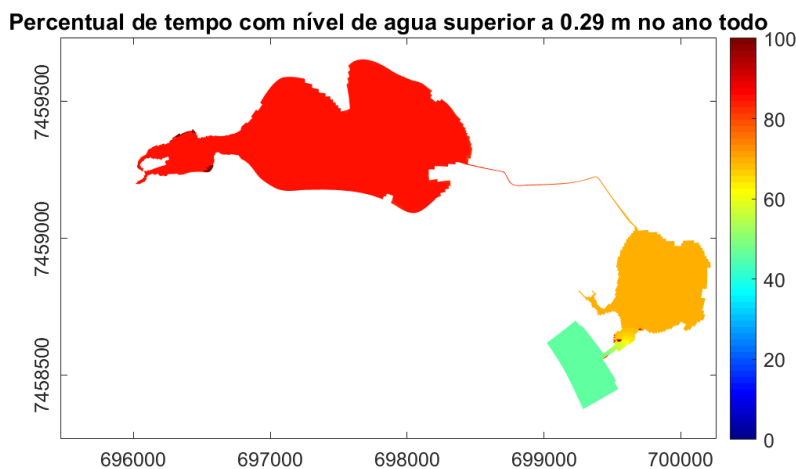
Percentual de tempo com nível de água superior a 0.46 m no ano todo



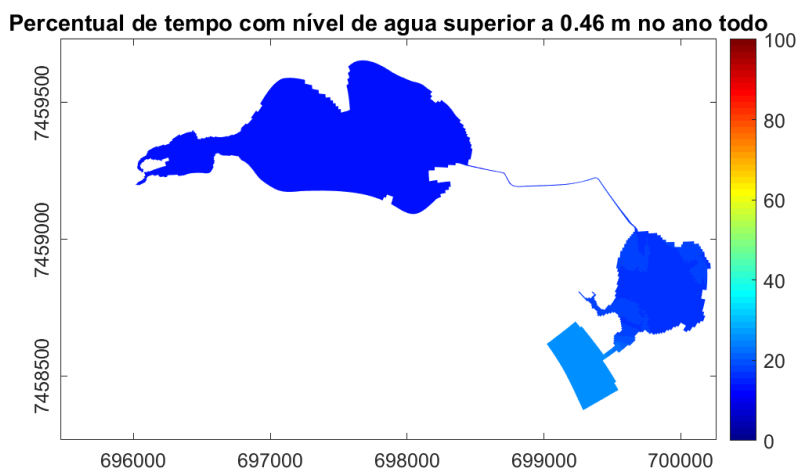
**0,46 m = nível médio de Piratininga do cenário atual*

Figura 46: Permanência de nível no cenário HIDRO 04 durante todo o ano simulado.

HIDRO 06



**0,29 m = nível mínimo de Piratininga do cenário atual*



**0,46 m = nível médio de Piratininga do cenário atual*

Figura 47: Permanência de nível no cenário HIDRO 06 durante todo o ano simulado.

6.1.1.3. Canal de Camboatá

O Canal De Camboatá é responsável pela ligação entre as lagoas Itaipu e Piratininga, além disso, 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 (Figura 48). 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.

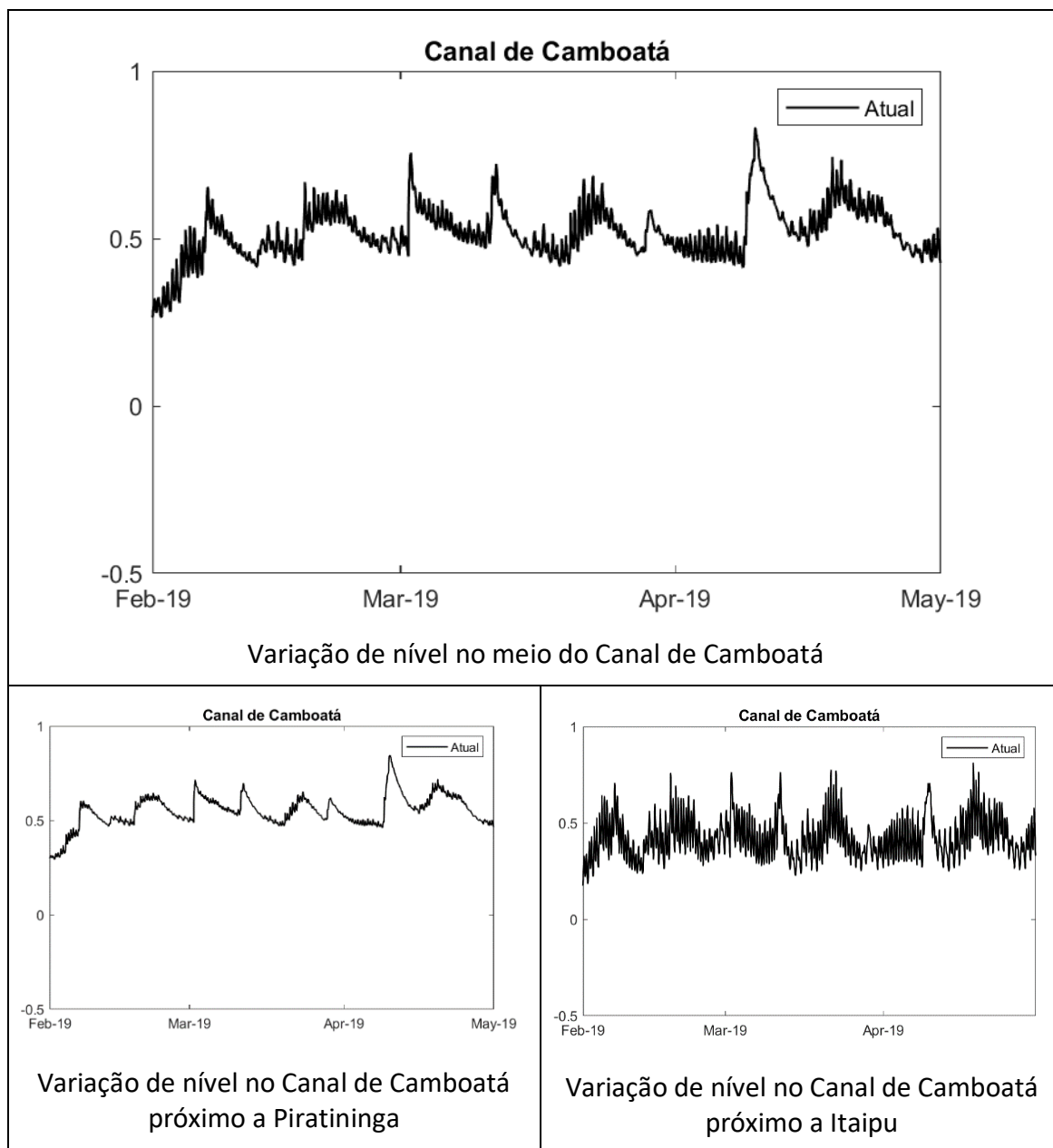


Figura 48: Nível do Canal de Camboatá simulado no cenário atual, durante os meses de fevereiro, março e abril de 2019.

No cenário atual, o leito do canal de camboatá se encontra no nível -0,30 m, de modo que as profundidades mínima, média e máxima da coluna d'água no canal são de 0,54 m, 0,73 m e 1,13 m. A dragagem proposta para o Canal de Camboatá altera o nível 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 provoca aumento da profundidade d'água no canal. No cenário que contempla a execução de todas as obras hidráulicas propostas, **HIDRO**

4, o nível mínimo da água em um ponto no meio do canal de camboatá é 0,08 m, resultando em uma profundidade de 158 cm, bastante superior a profundidade mínima do canal no cenário atual (Quadro 11).

Todos os cenários de alterações hidrodinâmicas apresentam maior variação no nível d'água do canal, mas os cenários de alterações hidrodinâmicas que contemplam a dragagem do canal de Itaipu acarretam variação mais expressiva desses níveis e aumento na amplitude dos valores (Figura 49). Nenhum dos cenários avaliados resultou em valor expressivo de áreas secas no Canal de Camboatá. Com exceção dos cenários **HIDRO 1** e **HIDRO 2**, as demais alterações acarretam também leve diminuição nos níveis médios do canal.

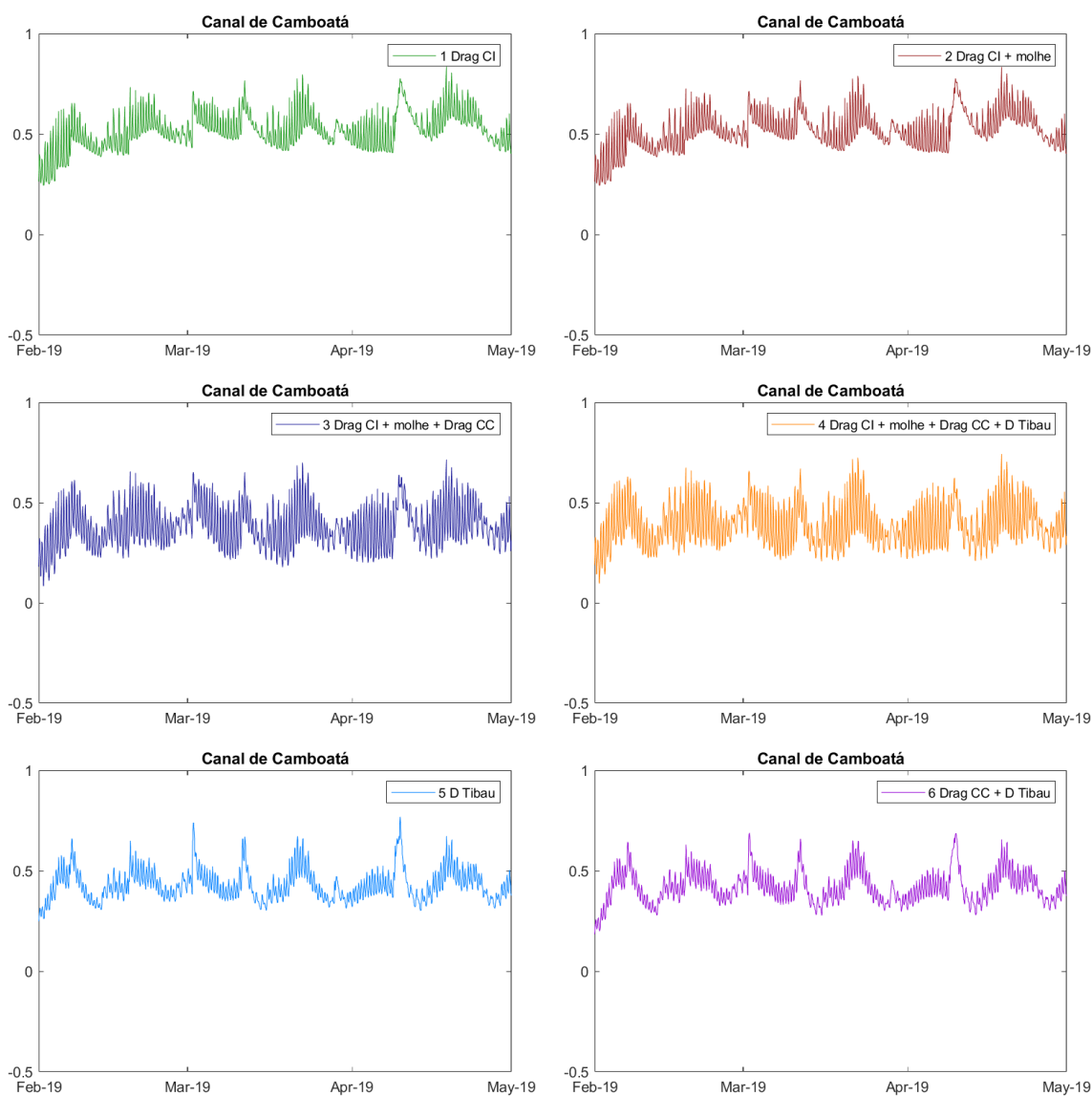


Figura 49: Nível do Canal de Camboatá simulado nos cenários futuros de alterações hidrodinâmicas, durante os meses de fevereiro, março e abril de 2019, em um ponto no meio do canal.

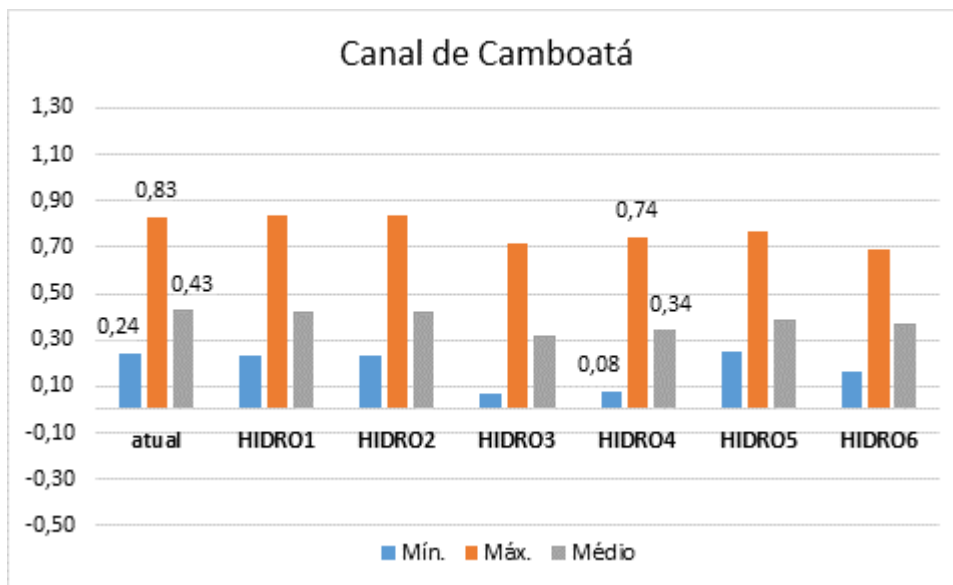


Figura 50: Níveis máximos, mínimos e médios observados no Canal de Camboatá em cada um dos cenários de alterações hidrodinâmicas simulados, em comparação com o atual.

Quadro 11: Nível d'água máximo, mínimo e médio observado no Canal de Camboatá em cada um dos cenários simulados.

Cenário	Nível d'água no Canal de Camboatá			Áreas secas na grade de modelagem em condições de nível mínimo (m ²)
	Mínimo	Máximo	Média	
Atual	0,24	0,83	0,43	0,54
HIDRO1	0,24	0,84	0,42	0,54
HIDRO2	0,24	0,83	0,42	0,54
HIDRO3	0,07	0,71	0,32	1,57*
HIDRO4	0,08	0,74	0,34	1,58*
HIDRO5	0,25	0,77	0,39	0,55
HIDRO6	0,17	0,69	0,37	1,67*

* Cenários que contemplam a dragagem do Canal de Camboatá.

6.1.2. Tempo de residência

O tempo de residência dos cenários de alterações hidrodinâmicas foi avaliado através do estudo de descarga (Flushing), que permite identificar a capacidade de renovação hidráulica de um sistema a partir da concentração de um constituinte conservativo. A Figura 51 e a Figura 52 apresentam as séries temporais da concentração percentual ao longo do período simulado para as Lagoas de Piratininga e

Itaipu, respectivamente, para o cenário atual e os cenários de alterações hidrodinâmicas (**HIDRO 1 a HIDRO 6**).

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. Com a dragagem do Canal de Itaipu é possível observar uma renovação hidráulica ainda maior, com troca de 90% das águas em cerca de 15 dias nos cenários **HIDRO 1, 2, 3 e 4** (Figura 51).

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 52). 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 por objetivo principal encontrar soluções para melhorar a taxa de renovação das águas da Lagoa de Piratininga.

A desobstrução do Túnel do Tibau, isoladamente (**HIDRO 5**), é capaz de reduzir o tempo de residência da Lagoa de Piratininga, com renovação de 90% em 6 meses. O melhor cenário de renovação das águas desta lagoa é observado na simulação da execução de todas as obras hidráulicas propostas (**HIDRO 4**), cuja renovação de 90% das águas ocorre em 3 meses.

Em 15 dias ocorre renovação significativa das águas na Lagoa de Piratininga somente nos cenários **HIDRO 4, 5 e 6**, na região mais próxima ao Túnel do Tibau, enquanto o corpo da lagoa continua a apresentar renovação de apenas 30% (Figura 53). Renovação próxima de 40-50% pode ser observada no **HIDRO 4** já no 30º dia (Figura 54). A partir de 60 dias a diferença dos cenários atual, **HIDRO 1, 2 e 3** com os demais cenários torna-se mais evidente, com renovação de 30% no cenário atual e no **HIDRO 1 e 2**, e de 70% no **HIDRO 4** (Figura 55). Após 120 dias a renovação no cenário atual, **HIDRO 1, 2 e 3** é de 50% (Figura 57); enquanto que nos cenários **HIDRO 3, 4, 5 e 6** a renovação se aproxima de 75% já no 90º dia (Figura 56).

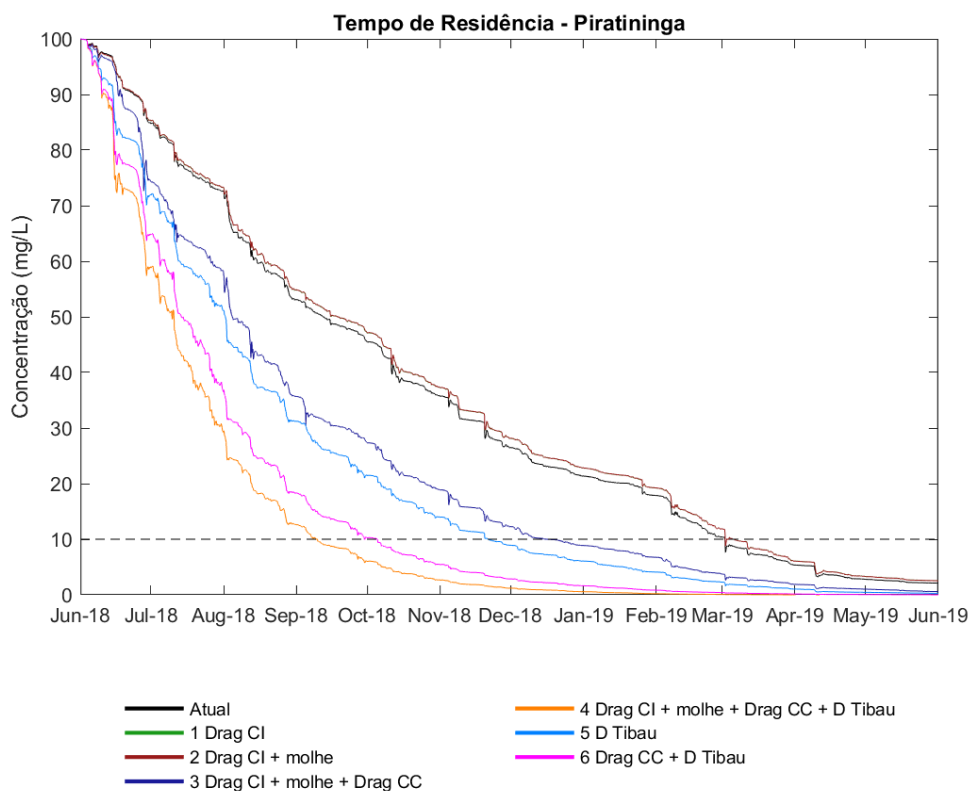


Figura 51: Tempo de Residência dos diferentes cenários de alterações hidrodinâmicas avaliados na Lagoa de Piratininga.

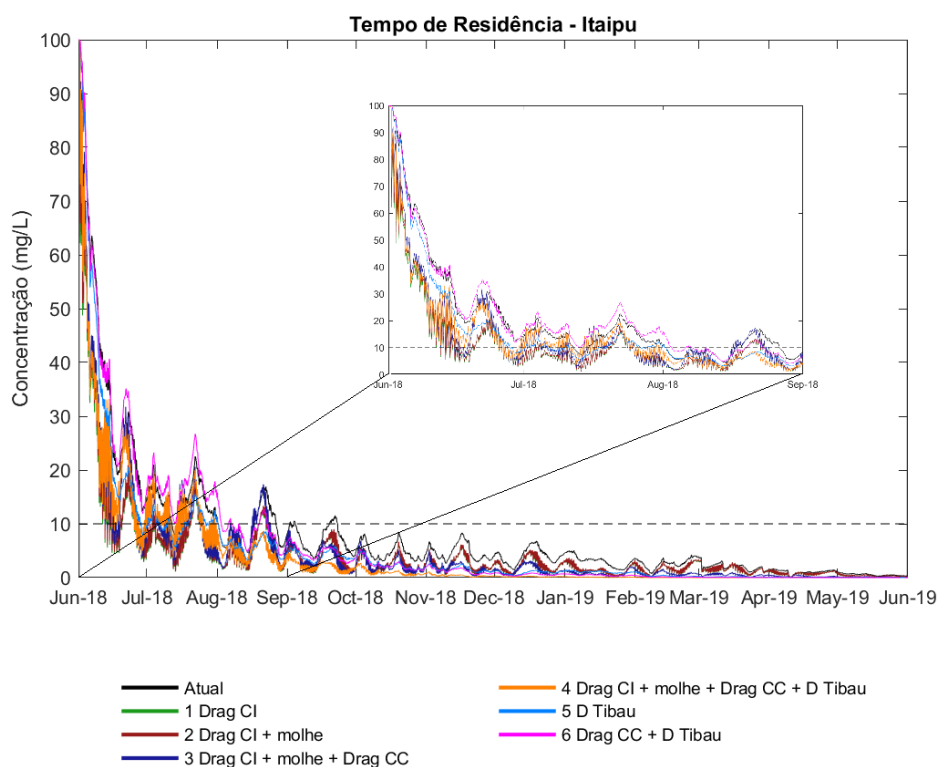


Figura 52: Tempo de Residência dos diferentes cenários de alterações hidrodinâmicas avaliados na Lagoa de Itaipu.

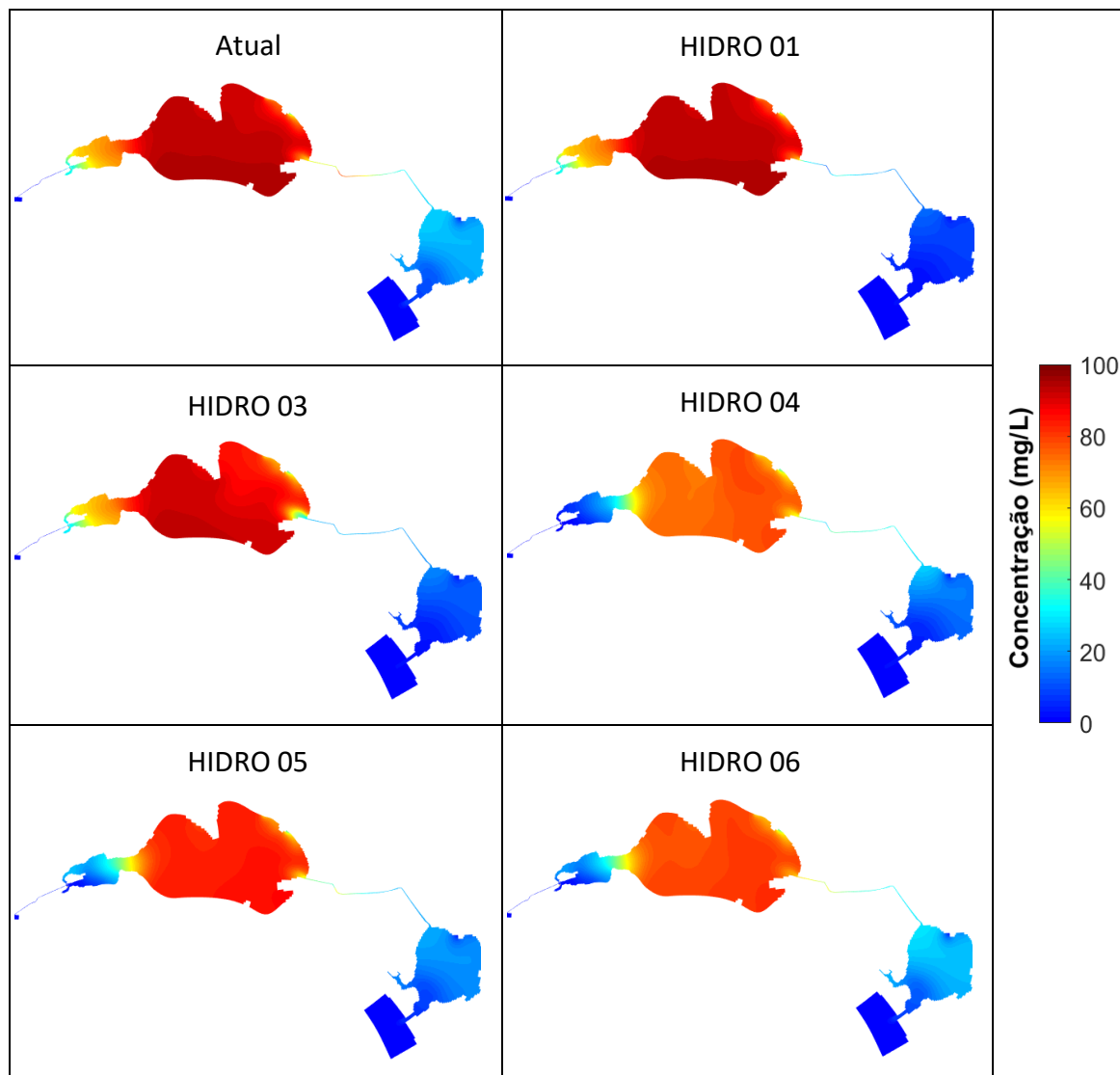


Figura 53: Análise de descarga (flushing) do 15º dia, para o cenário atual e cenários futuros (cenário HIDRO 02 foi suprimido para facilitar a visualização, visto que os resultados do mesmo são bastante similares ao HIDRO 01).

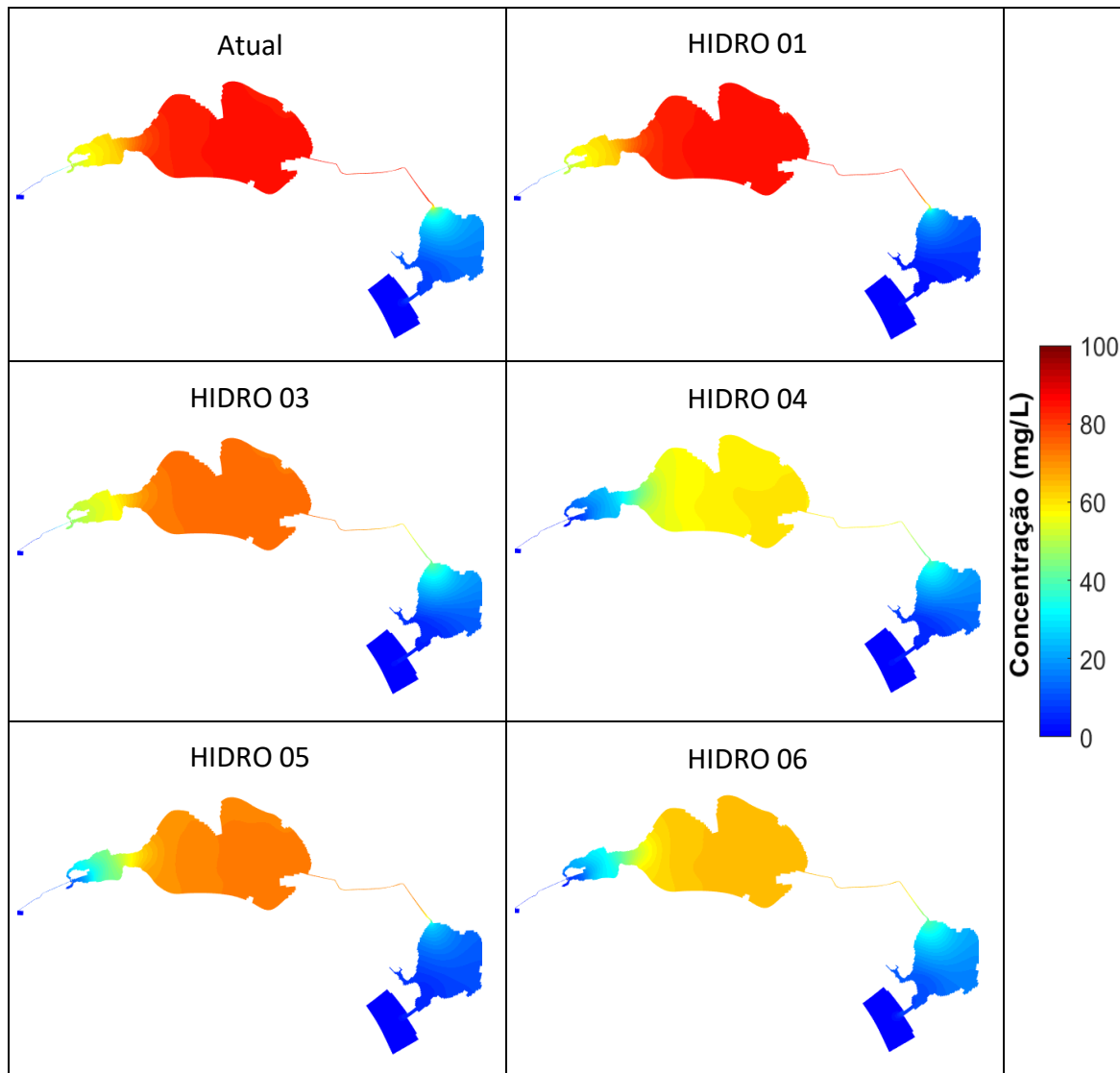


Figura 54: Análise de descarga (flushing) do 30º dia, para o cenário atual e cenários futuros (cenário HIDRO 02 foi suprimido para facilitar a visualização, visto que os resultados do mesmo são bastante similares ao HIDRO 01).

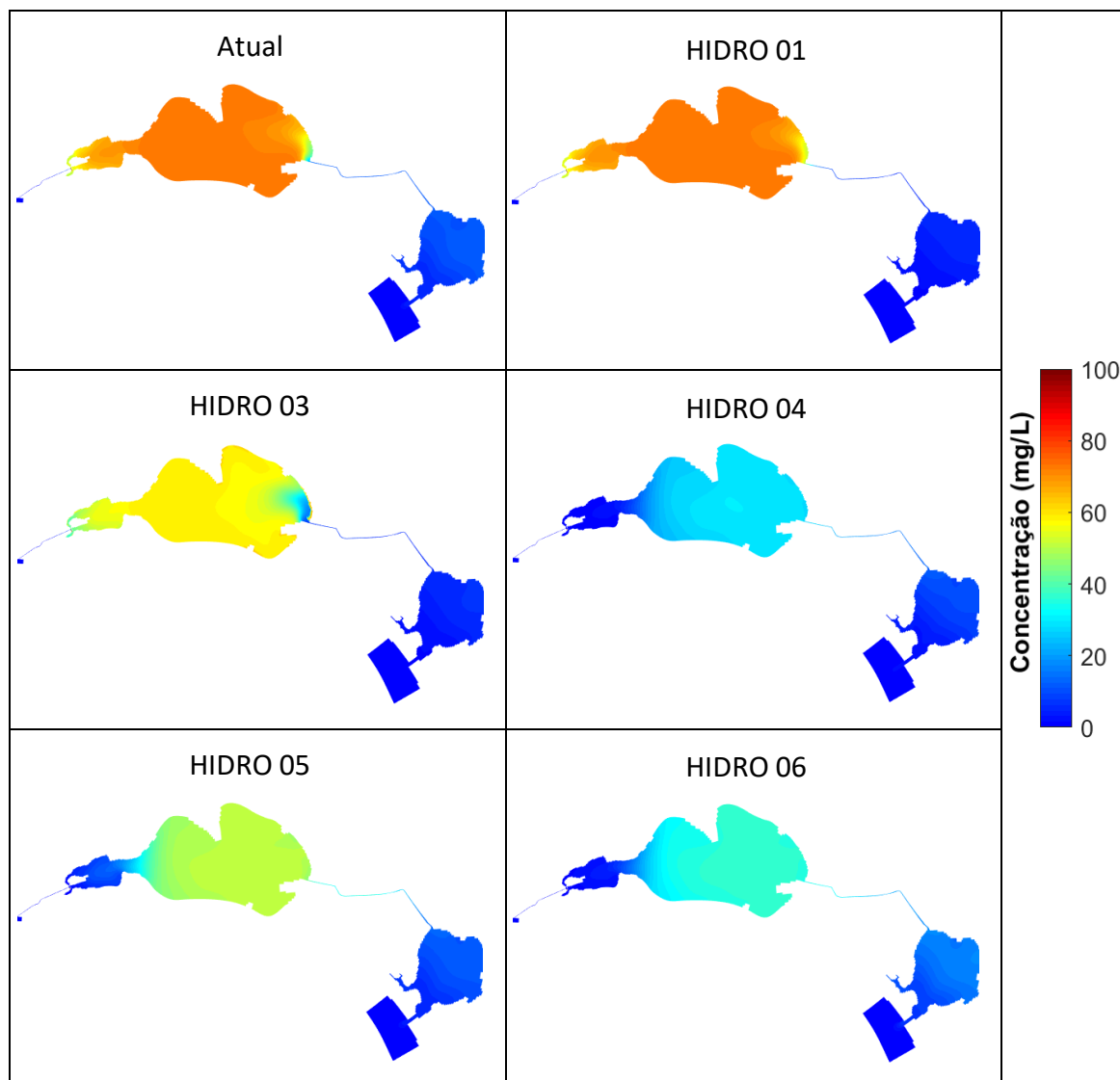


Figura 55: Análise de descarga (flushing) do 60º dia, para o cenário atual e cenários futuros (cenário HIDRO 02 foi suprimido para facilitar a visualização, visto que os resultados do mesmo são bastante similares ao HIDRO 01).

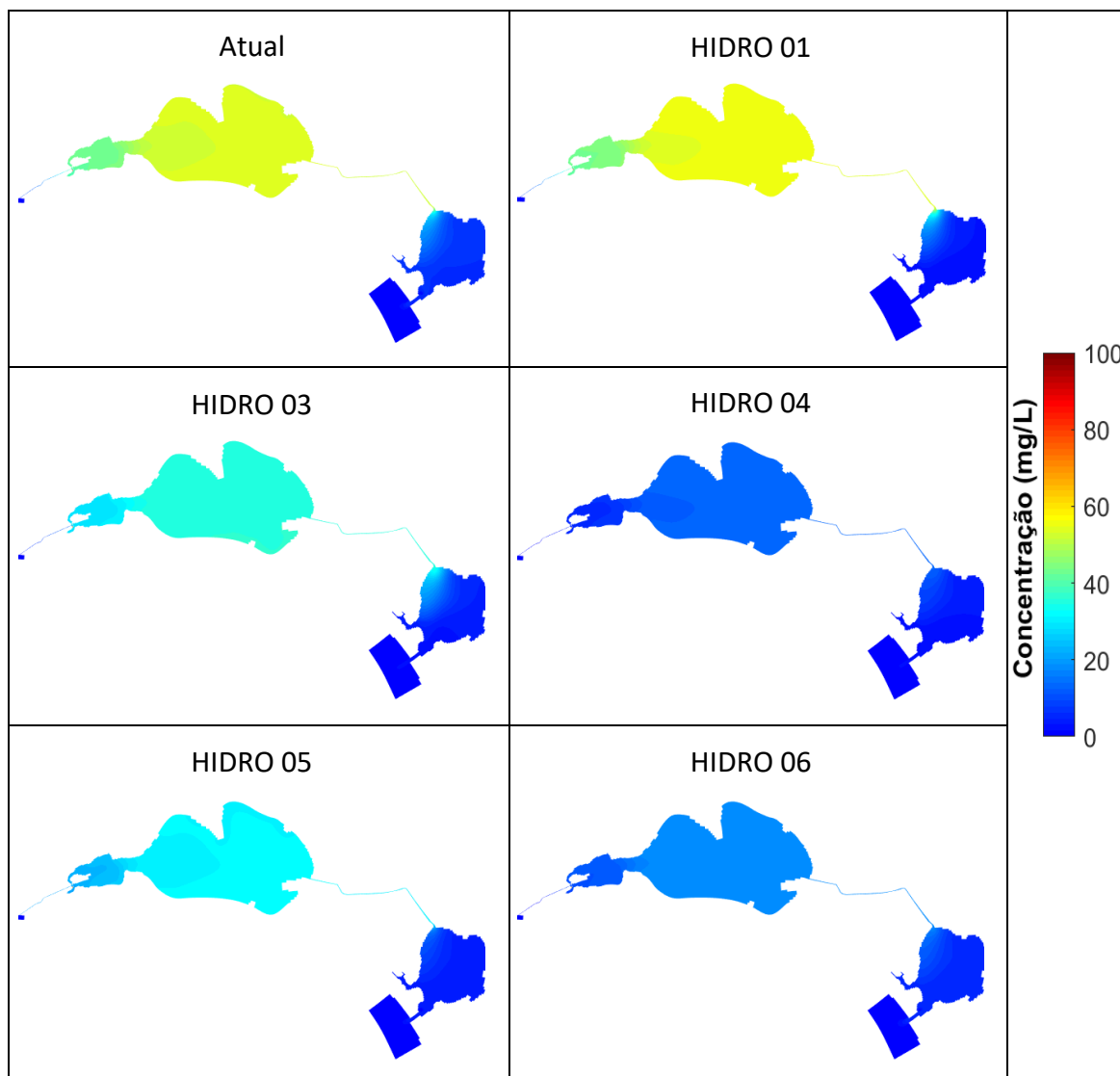


Figura 56: Análise de descarga (flushing) do 90º dia, para o cenário atual e cenários futuros (cenário HIDRO 02 foi suprimido para facilitar a visualização, visto que os resultados do mesmo são bastante similares ao HIDRO 01).

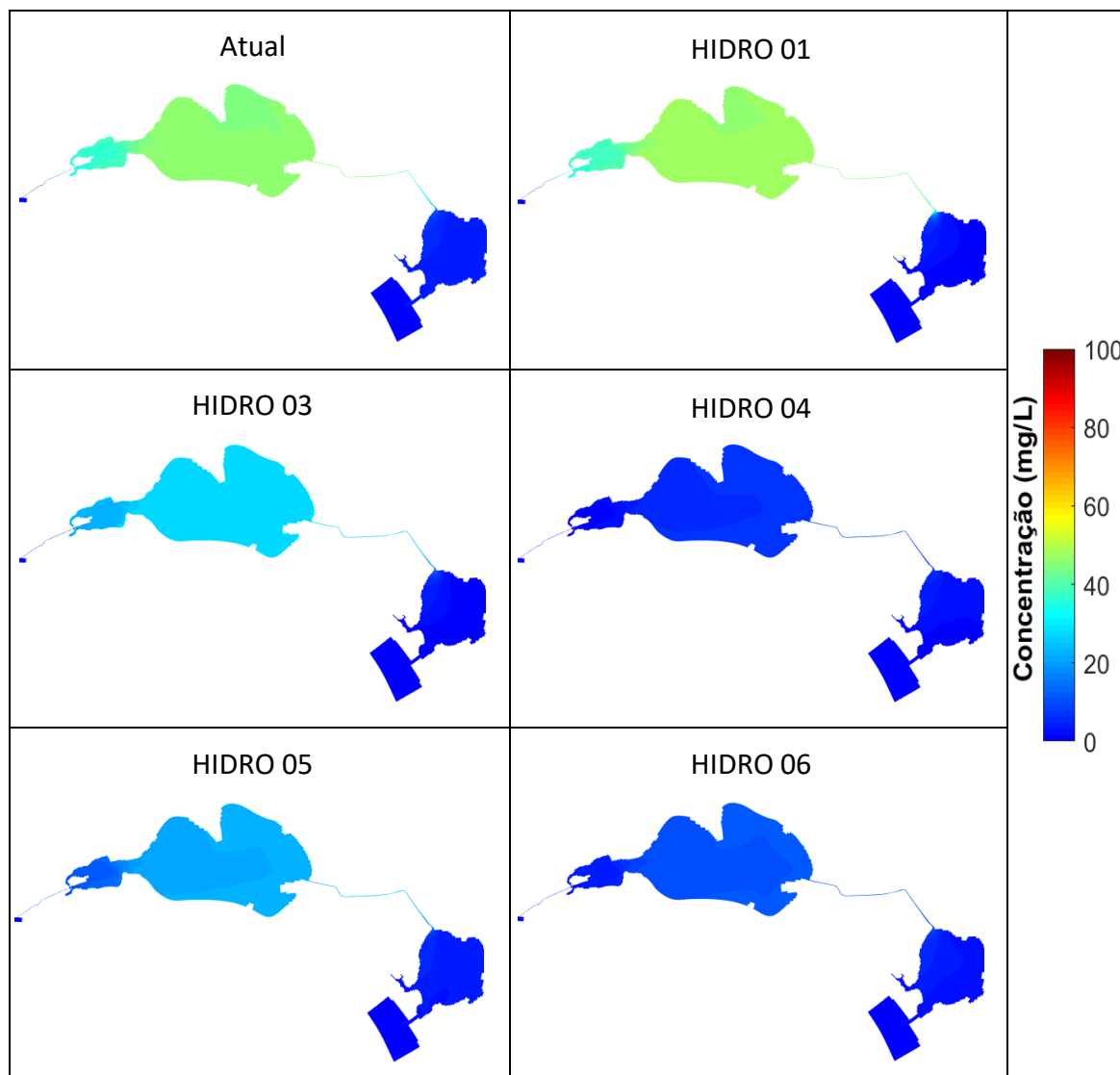


Figura 57: Análise de descarga (flushing) do 120º dia, para o cenário atual e cenários futuros (cenário HIDRO 02 foi suprimido para facilitar a visualização, visto que os resultados do mesmo são bastante similares ao HIDRO 01).

6.1.3. Salinidade

No cenário atual a salinidade na Lagoa de Itaipu se mantém elevada, acima de 30 ‰, quando não há eventos de chuva. No entanto, durante eventos expressivos de chuva a salinidade na Lagoa de Itaipu chega a valores menores que 10 ‰. Na Lagoa de Piratininga a salinidade é inferior àquela observada em Itaipu, devido a sua limitada ligação com o mar, e também com menor variabilidade, sendo aproximadamente 20 ‰ em período de estiagem e 12 ‰ em período chuvoso.

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 intensa também é mais expressivo na Lagoa de Itaipu devido à maior diferença de salinidade entre a lagoa, cuja média se aproxima de 30 ‰, e a contribuição da precipitação, cuja salinidade é zero.

O evento chuvoso de abril de 2019 provoca queda bastante expressiva nas concentrações de salinidade da Lagoa de Itaipu, chegando próximo de 5 ‰, independente das obras (Figura 59). O impacto desse evento chuvoso na salinidade da Lagoa de Piratininga varia entre os cenários, exibindo quedas de 5 a 7 ‰ na salinidade (Figura 58). 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 é reestabelecida após cerca de um mês.

As obras propostas melhoram 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 acarreta em expressivo aumento da salinidade, em comparação ao cenário atual. As obras de desobstrução do Túnel do Tibau e Dragagem do Canal de Camboatá aumentam consideravelmente a salinidade da Lagoa de Piratininga, devido à maior comunicação com o mar (Figura 58).

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 atinge valores superiores a 30 ‰ 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 da Lagoa de Itaipu tende a aumentar cerca de 5 ‰ com a dragagem do Canal de Itaipu, porém, com valores mínimos bastante similares aos do cenário atual (Figura 59).

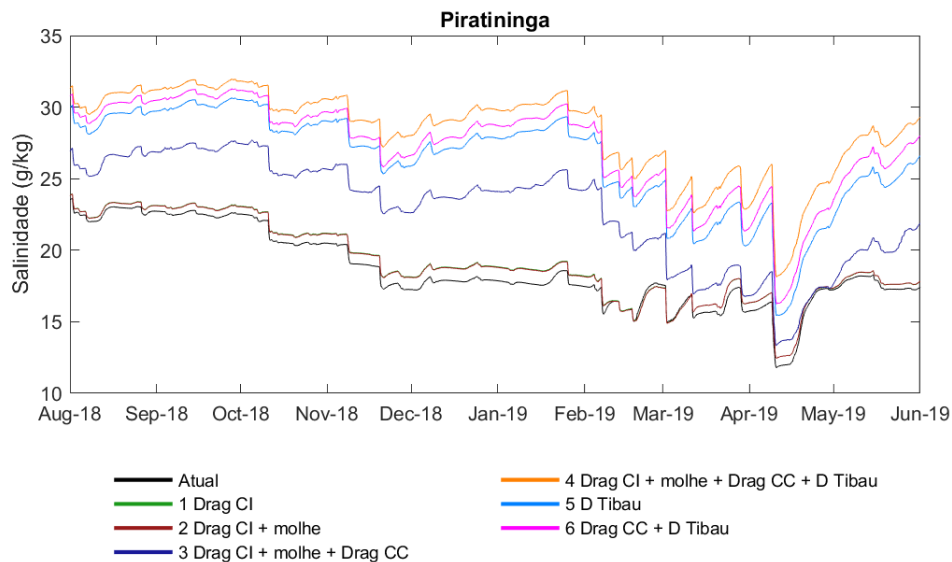


Figura 58: Salinidade da Lagoa de Piratininga simulada nos cenários atual e futuros de alterações hidrodinâmicas.

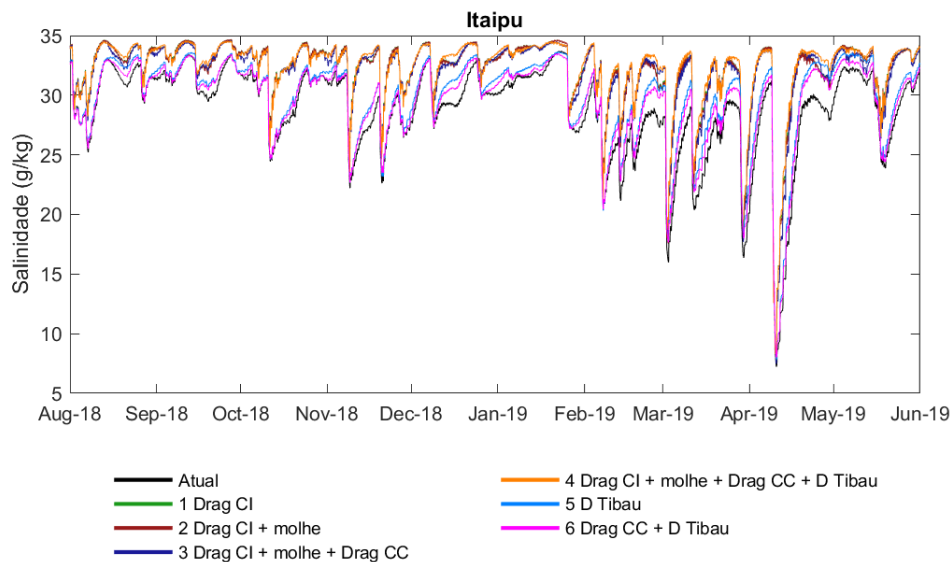


Figura 59: Salinidade da Lagoa de Itaipu simulada nos cenários atual e futuros de alterações hidrodinâmicas.

Salinidades abaixo de 20 mg/L são observadas na Lagoa de Piratininga em quase todo o período chuvoso no cenário atual e nos cenários **HIDRO 1** e **HIDRO 2**, e cerca de 70% do tempo no cenário **HIDRO 3** (Figura 60). Os demais cenários apresentam concentrações superiores a 20 mg/L em ambas as lagoas durante cerca de 90% do

período chuvoso. No período seco, ambas as lagoas apresentam salinidade superior a 20mg/L durante todo o período, com exceção da Lagoa de Piratininga nos cenários atual e **HIDRO 1 e 2**, nos quais a salinidade supera 20 mg/L somente 60% do tempo (Figura 61). Para o período total simulado, salinidades superiores a 20 mg/L são observadas em ambas as lagoas em 100% do tempo nos cenários **HIDRO 4, 5 e 6**. Na Lagoa de Piratininga a salinidade supera 20 mg/L nos cenários atual, **HIDRO 1 e 2** durante 50% do tempo e em 80% do tempo no cenário **HIDRO 3** (Figura 62).

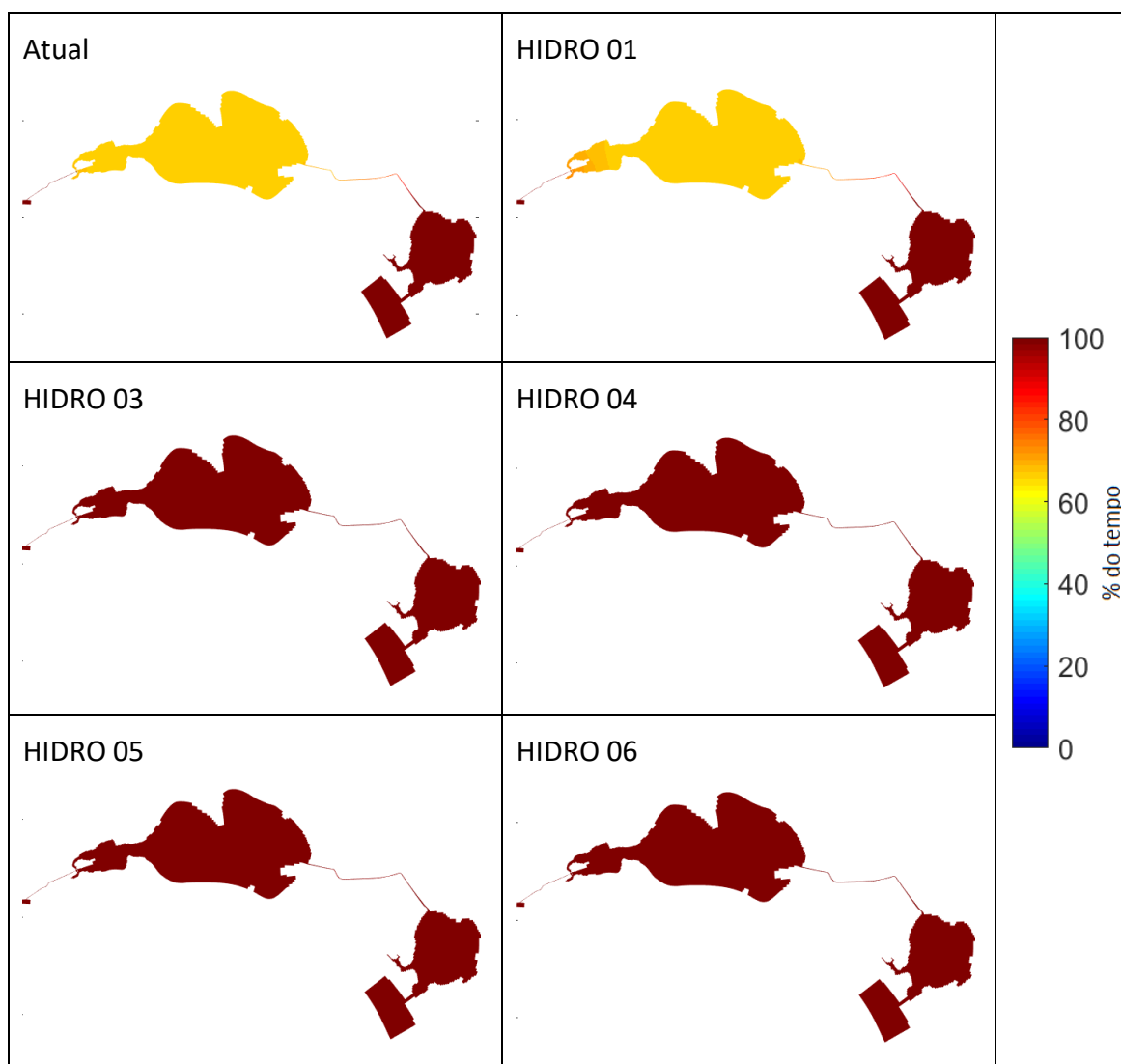


Figura 60: Tempo da permanência de salinidade superiora 20 mg/L no período seco para o cenário atual e cenários futuros (cenário HIDRO 02 foi suprimido para facilitar a visualização, visto que os resultados do mesmo são bastante similares ao HIDRO 01).

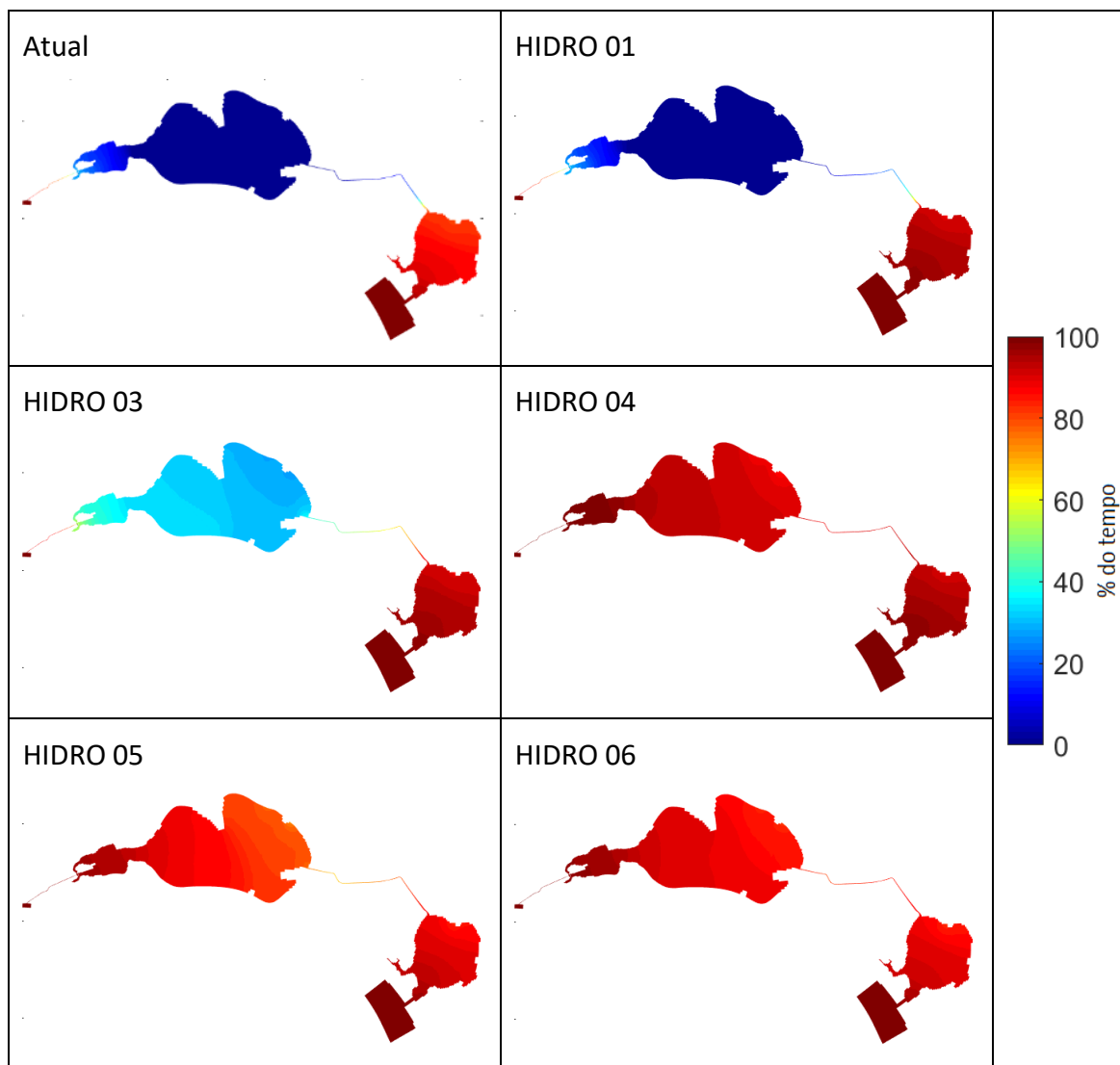


Figura 61: Tempo da permanência de salinidade superiora 20 mg/L no período chuvoso para o cenário atual e cenários futuros (cenário HIDRO 02 foi suprimido para facilitar a visualização, visto que os resultados do mesmo são bastante similares ao HIDRO 01).

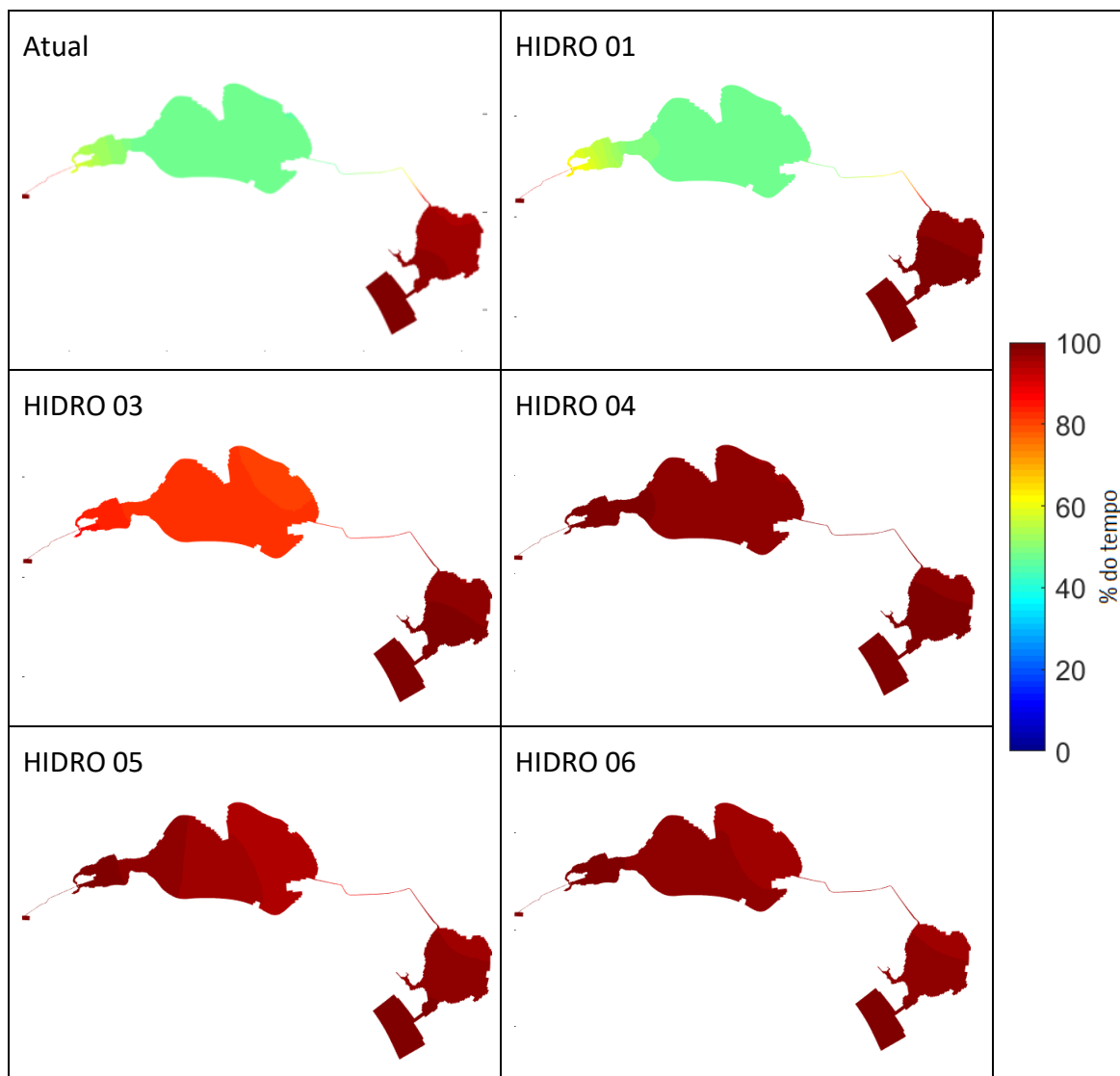


Figura 62: Tempo da permanência de salinidade superiora 20 mg/L no ano todo para o cenário atual e cenários futuros (cenário HIDRO 02 foi suprimido para facilitar a visualização, visto que os resultados do mesmo são bastante similares ao HIDRO 01)

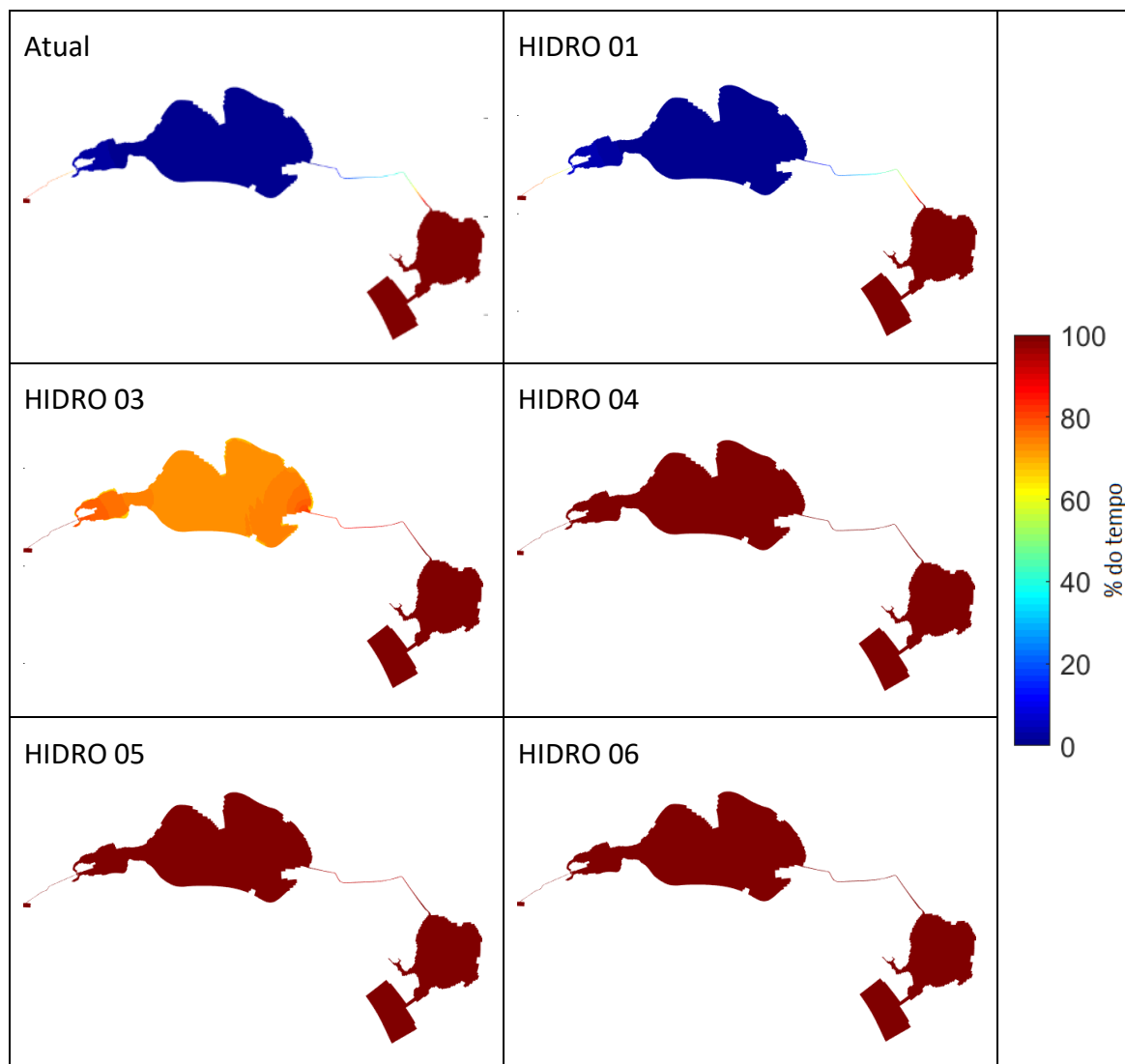


Figura 63: Tempo da permanência de salinidade superiora 25 mg/L no período seco para o cenário atual e cenários futuros (cenário HIDRO 02 foi suprimido para facilitar a visualização, visto que os resultados do mesmo são bastante similares ao HIDRO 01).

Salinidade superior a 25 mg/L não é observada na Lagoa de Piratininga no cenário atual e nem nos cenários **HIDRO 1** e **2** (Figura 65). No cenário **HIDRO 3** a salinidade da Lagoa de Piratininga ultrapassa 25 mg/L em cerca de 70% do período seco e nunca no período chuvoso (Figura 63 e Figura 64). Os cenários **HIDRO 4, 5** e **6** apresentam salinidade superior a 25 mg/L em todo o período seco para ambas as lagoas (Figura 63). No período chuvoso, o cenário que contempla todas as obras hidráulicas, **HIDRO 4**, exibe salinidade superior a 25 mg/L 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 64). Nos cenários que contemplam a desobstrução do Túnel do Tibau isoladamente (**HIDRO 5**) e em conjunto com a dragagem do canal de camboatá (**HIDRO 6**), a salinidade supera 25 mg/L na Lagoa de Itaipu e na região próxima ao Túnel do Tibau em cerca de 70% do tempo no período chuvoso (Figura 64).

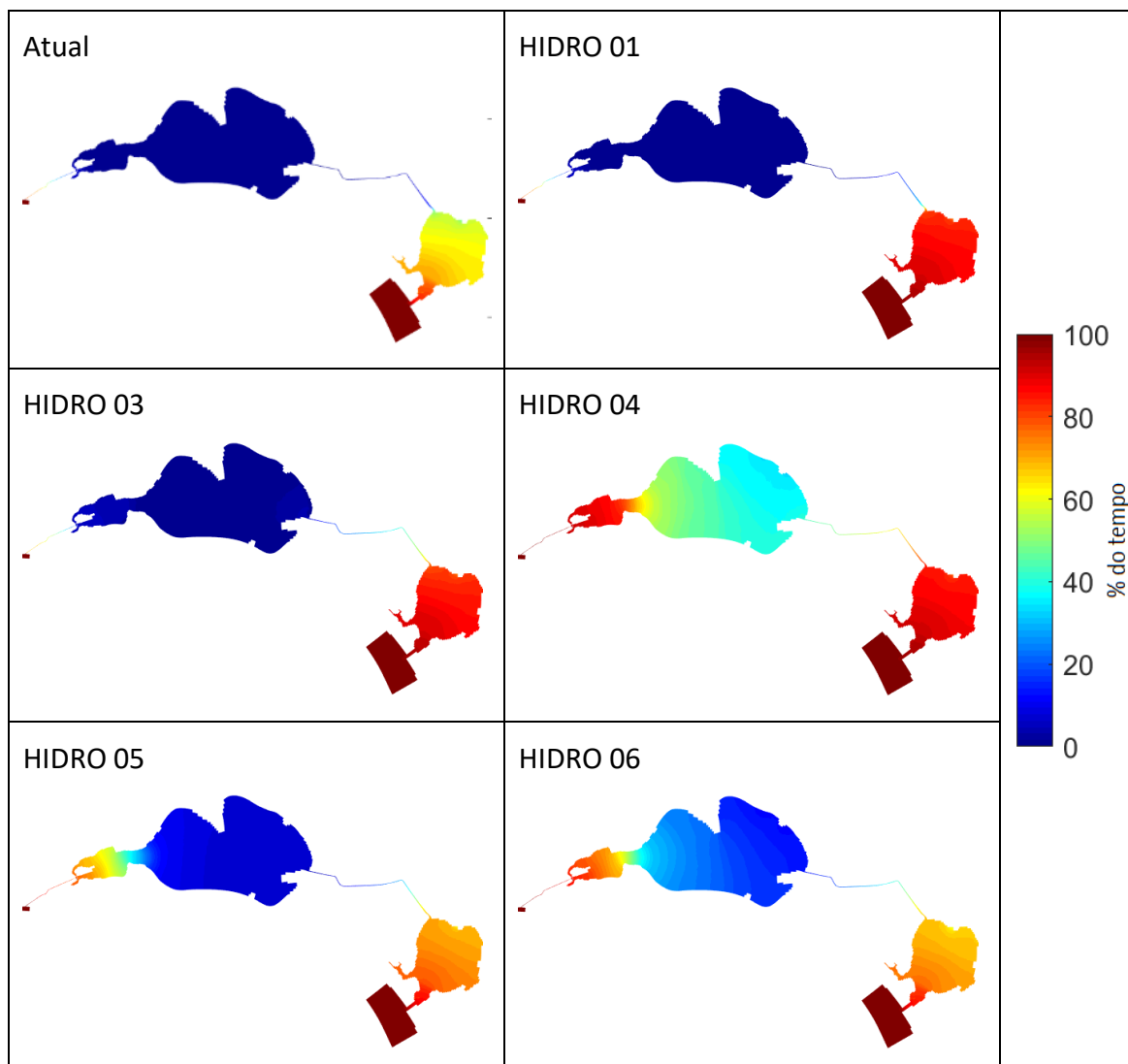


Figura 64: Tempo da permanência de salinidade superiora 25 mg/L no período chuvoso para o cenário atual e cenários futuros (cenário HIDRO 02 foi suprimido para facilitar a visualização, visto que os resultados do mesmo são bastante similares ao HIDRO 01).

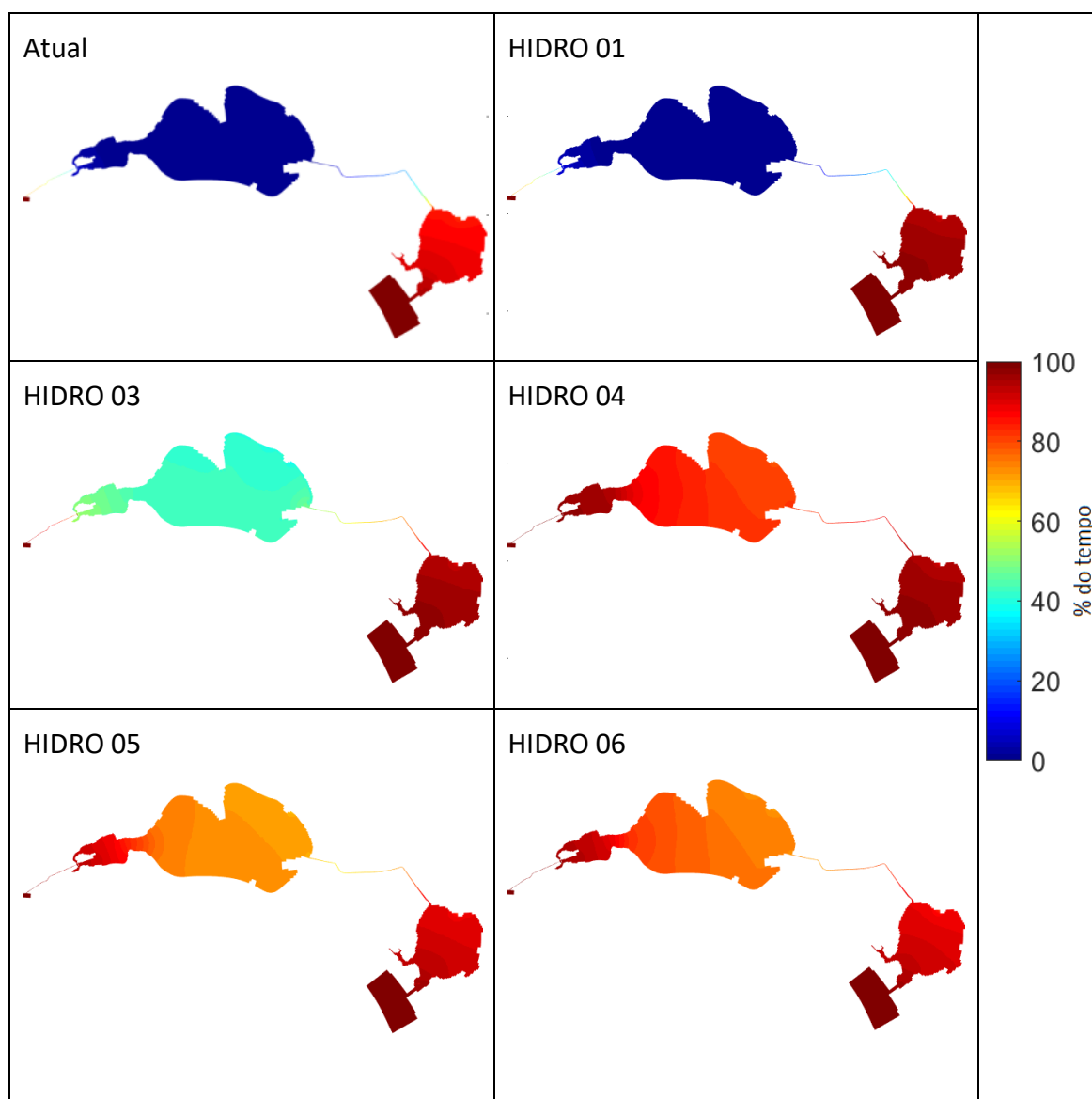


Figura 65: Tempo da permanência de salinidade superior 25 mg/L no ano todo para o cenário atual e cenários futuros (cenário HIDRO 02 foi suprimido para facilitar a visualização, visto que os resultados do mesmo são bastante similares ao HIDRO 01).

No período seco, a Lagoa de Piratininga só apresenta salinidade superior a 30 mg/L nos cenários futuros que contemplam a desobstrução do Túnel do Tibau, **HIDRO 4, 5 e 6**, durante 20 a 70% do tempo (Figura 66). A Lagoa de Itaipu exibe salinidade superior a 30 mg/L em quase todo o período seco, em todos os cenários (Figura 66), mas durante o período chuvoso a salinidade dessa lagoa ultrapassa 30 mg/L somente nos cenários de alterações hidrodinâmicas (Figura 67). Os cenários que contemplam a dragagem do canal de Itaipu (**HIDRO 1 a 4**) exibem salinidade superior a 30 mg/L em cerca de 90 % de todo o período simulado (Figura 68).

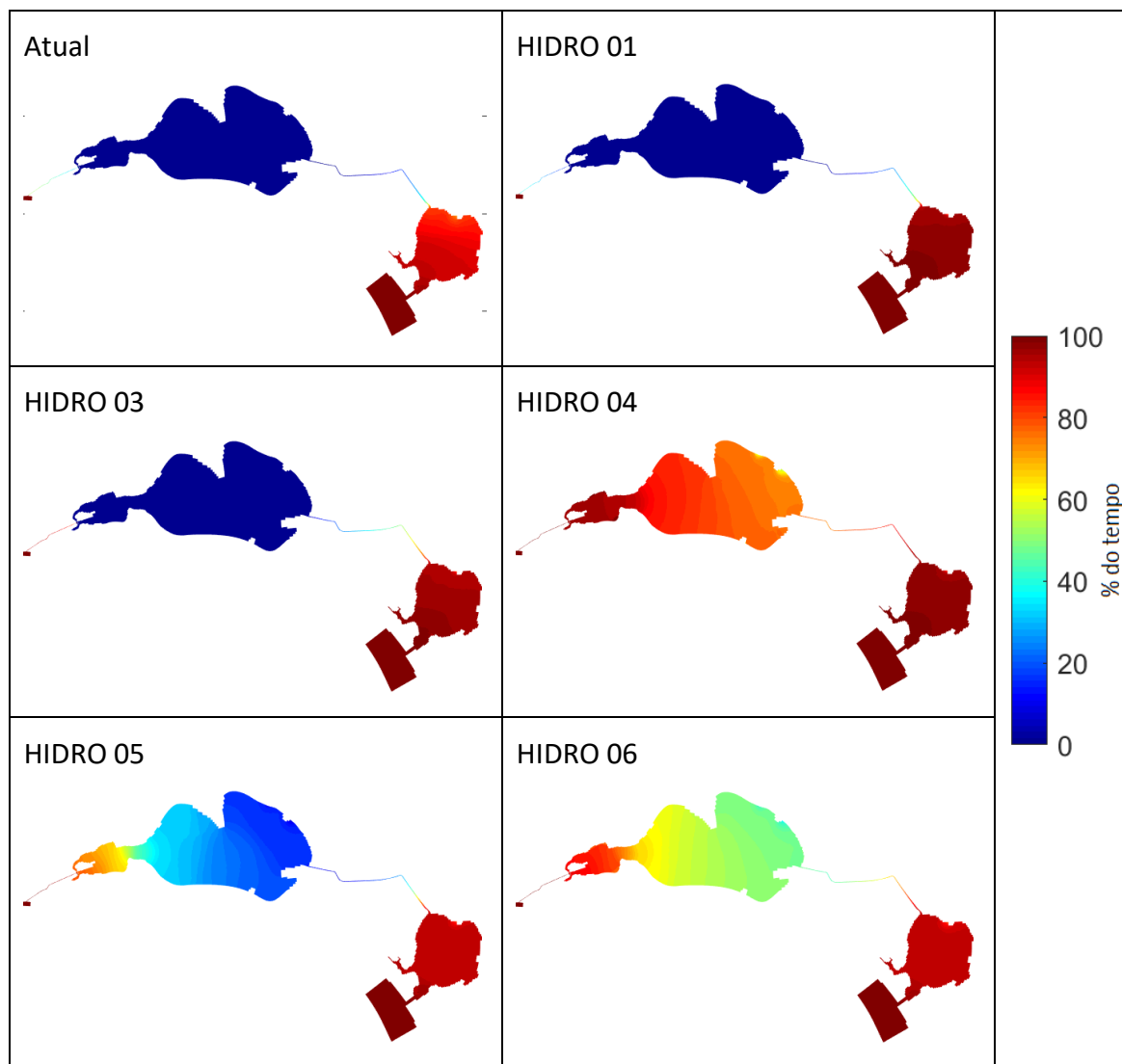


Figura 66: Tempo da permanência de salinidade superiora 30 mg/L no período seco para o cenário atual e cenários futuros (cenário HIDRO 02 foi suprimido para facilitar a visualização, visto que os resultados do mesmo são bastante similares ao HIDRO 01).

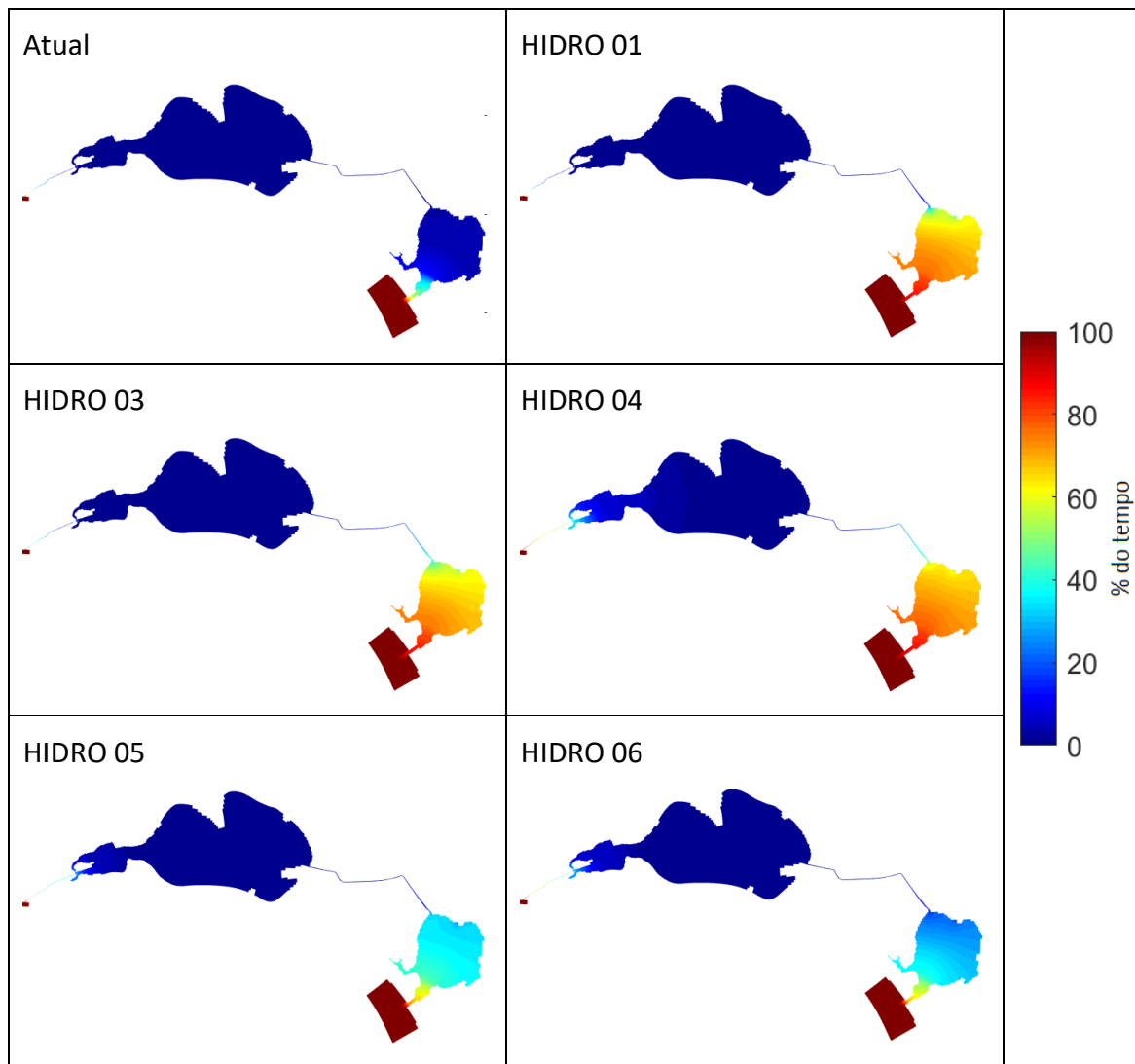


Figura 67: Tempo da permanência de salinidade superiora 30 mg/L no período chuvoso para o cenário atual e cenários futuros (cenário HIDRO 02 foi suprimido para facilitar a visualização, visto que os resultados do mesmo são bastante similares ao HIDRO 01).

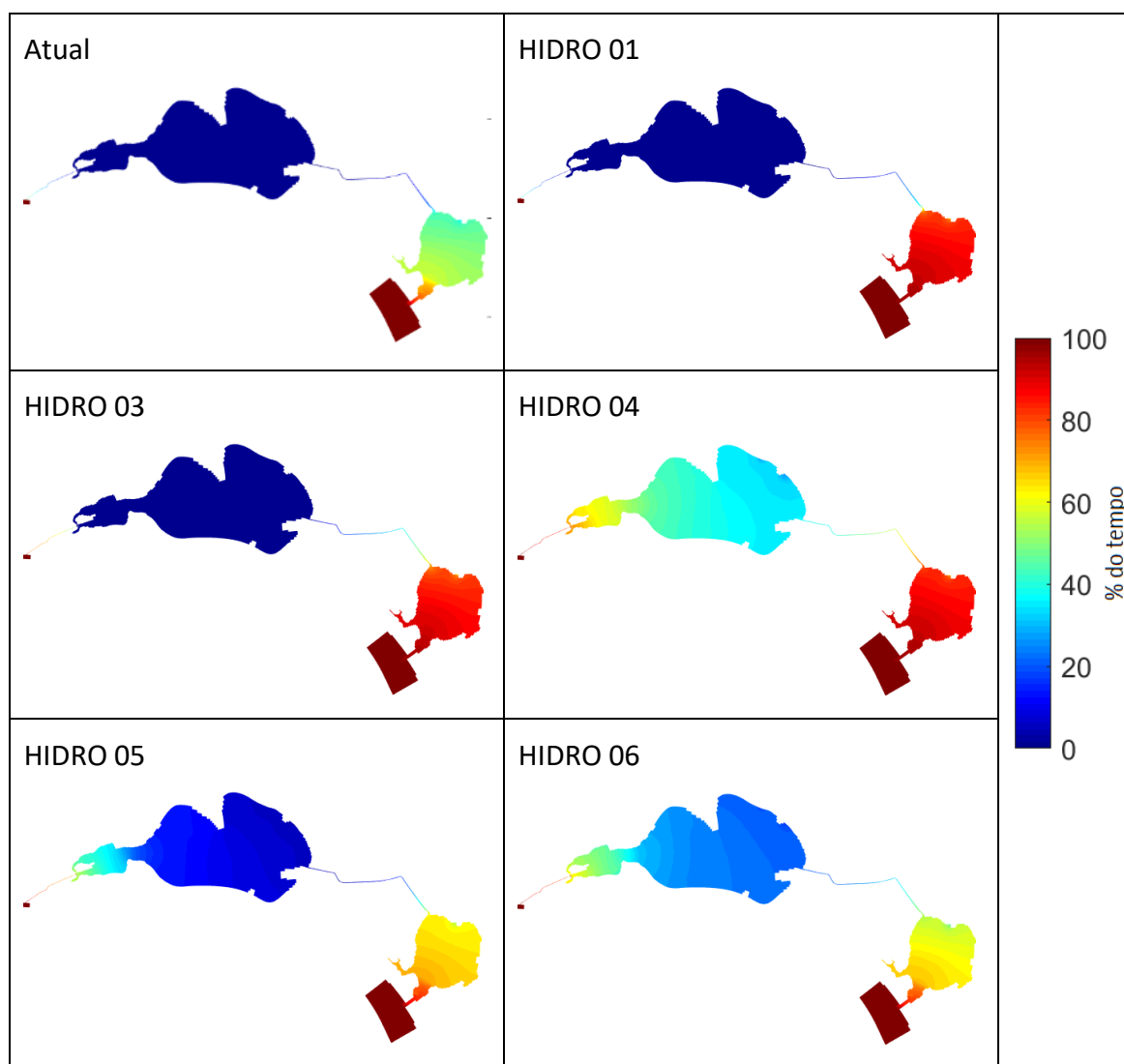


Figura 68: Tempo da permanência de salinidade superiora 30 mg/L no ano todo para o cenário atual e cenários futuros (cenário HIDRO 02 foi suprimido para facilitar a visualização, visto que os resultados do mesmo são bastante similares ao HIDRO 01).

6.1.4. COT

O limite máximo de COT para águas salinas e salobras de classe 1 é 3,0 mg/L, e para classe 2 é de 5,0 mg/L. Na simulação do cenário atual, as concentrações de COT da Lagoa de Piratininga ultrapassam o limite de classe 1 em todo o período simulado, e se apresentam inferiores ao limite de classe 2 nos meses de março a maio. Na Lagoa de Itaipu a oscilação das concentrações é bastante expressiva, com máximas superiores a 4,0 mg/L no cenário atual.

O cenário de execução da dragagem do Canal de Camboatá em conjunto com a desobstrução do Túnel do Tibau (**HIDRO6**) é suficiente para redução das concentrações

de COT da Lagoa de Piratininga a valores próximos de 3,0 mg/L, mas oscilando cerca de 0,5 mg/L em torno desse valor. Na Lagoa de Itaipu, todos os cenários que compreendem a Dragagem do Canal de Itaipu apresentam redução suficiente para enquadramento do COT em classe 1. A implantação de todas as obras hidráulicas propostas (**HIDRO4**) reduz para valores de COT sempre inferiores a 3,0 na Lagoa de Itaipu, que oscilam entre 2,0 e 2,5 na maior parte do tempo. Para o enquadramento de COT em ambas as lagoas é, conseqüentemente, necessária a execução de todas as obras hidráulicas propostas (**HIDRO4**) (Figura 69 e Figura 70), mesmo assim, com possibilidade de valores de COT muito próximos ao limite máximo admissível na Lagoa de Piratininga.

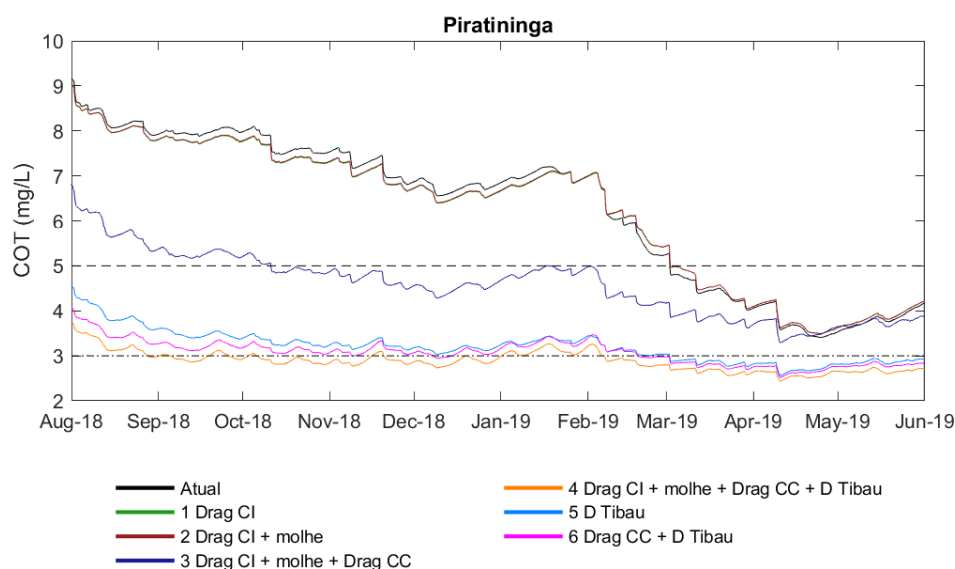


Figura 69: COT da Lagoa de Piratininga simulado nos cenários atual e futuros de alterações hidrodinâmicas.

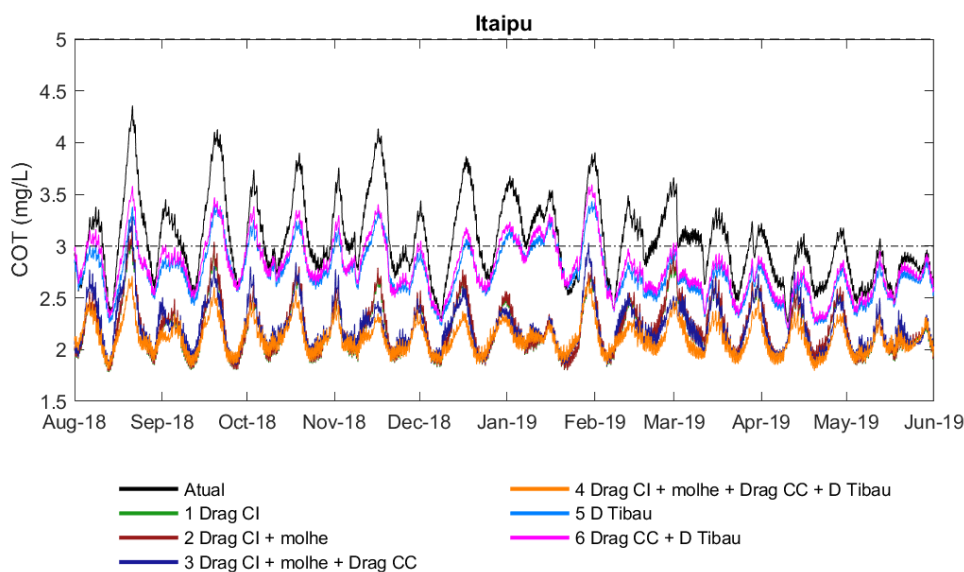


Figura 70: COT da Lagoa de Itaipu simulado nos cenários atual e futuros de alterações hidrodinâmicas.

Durante o período seco, no cenário atual as concentrações de COT da Lagoa de Itaipu ultrapassam 3,0 mg/L em cerca de 70% do tempo e 100% do tempo na Lagoa de Piratininga (Figura 71). Os cenários que contemplam a dragagem do Canal de Itaipu (**HIDRO 1**, **HIDRO 2** e **HIDRO 3**) acarretam em queda nas concentrações de COT somente para a Lagoa de Itaipu, reduzindo para concentrações inferiores a 3,0 mg/L durante todo o período (Figura 73). O cenário que abrange a realização de todas as obras hidráulicas, **HIDRO 4**, leva a concentrações abaixo de 3,0 mg/L na Lagoa de Itaipu durante quase todo o intervalo simulado, e durante cerca de 50% do tempo para a Lagoa de Piratininga (Figura 73). Não é possível identificar diferenças entre a permanência de COT superior a 3,0 mg/L nos cenários que consideram a desobstrução do Túnel do Tibau isoladamente (**HIDRO 5**) e em conjunto com a dragagem do canal de Camboatá (**HIDRO 6**) para nenhuma das lagoas (Figura 71, Figura 72 e Figura 73).

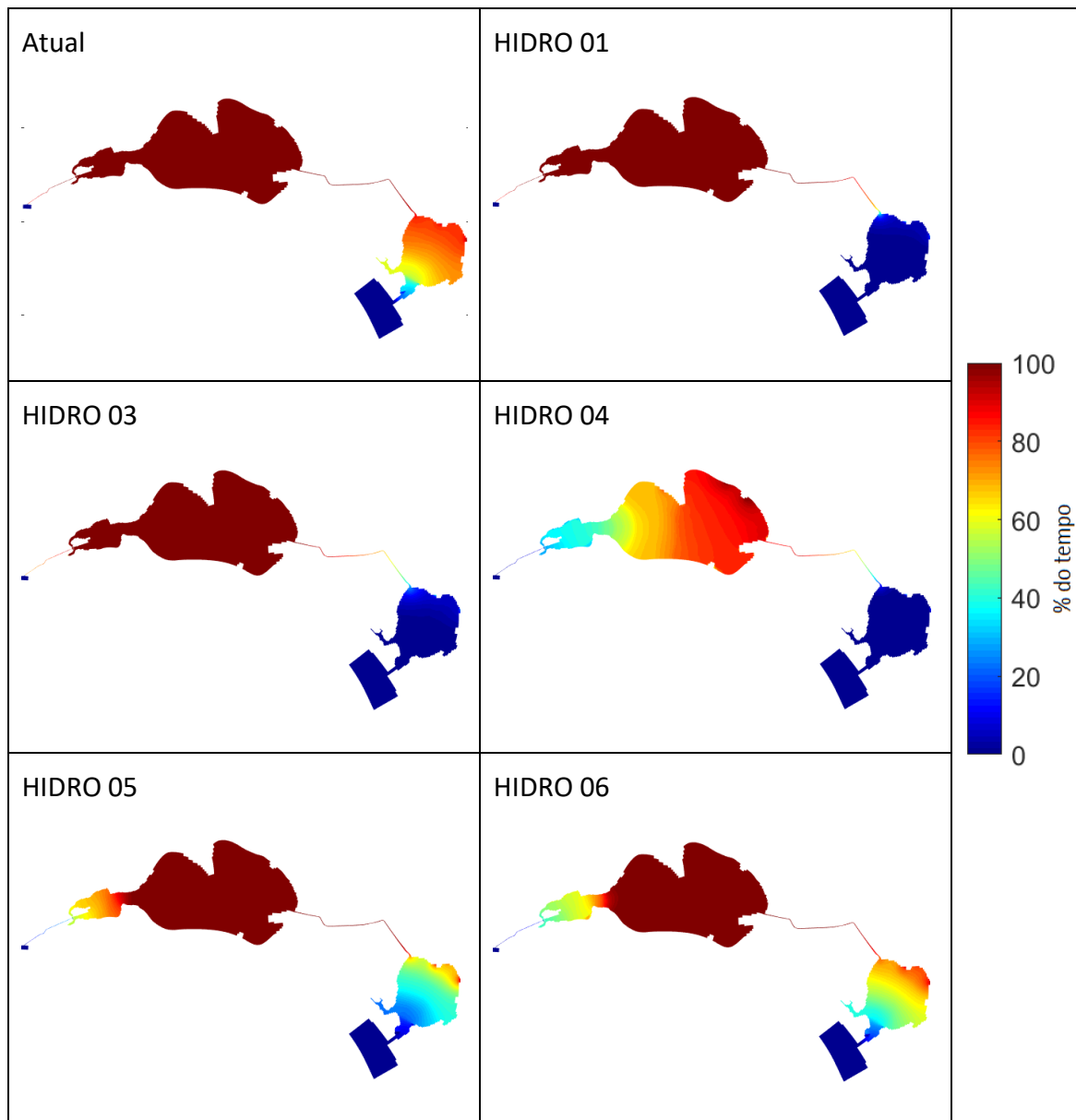


Figura 71: Tempo da permanência de concentrações de COT superiores a 3,0 mg/L no período seco para o cenário atual e cenários futuros (cenário HIDRO 02 foi suprimido para facilitar a visualização, visto que os resultados do mesmo são bastante similares ao HIDRO 01).

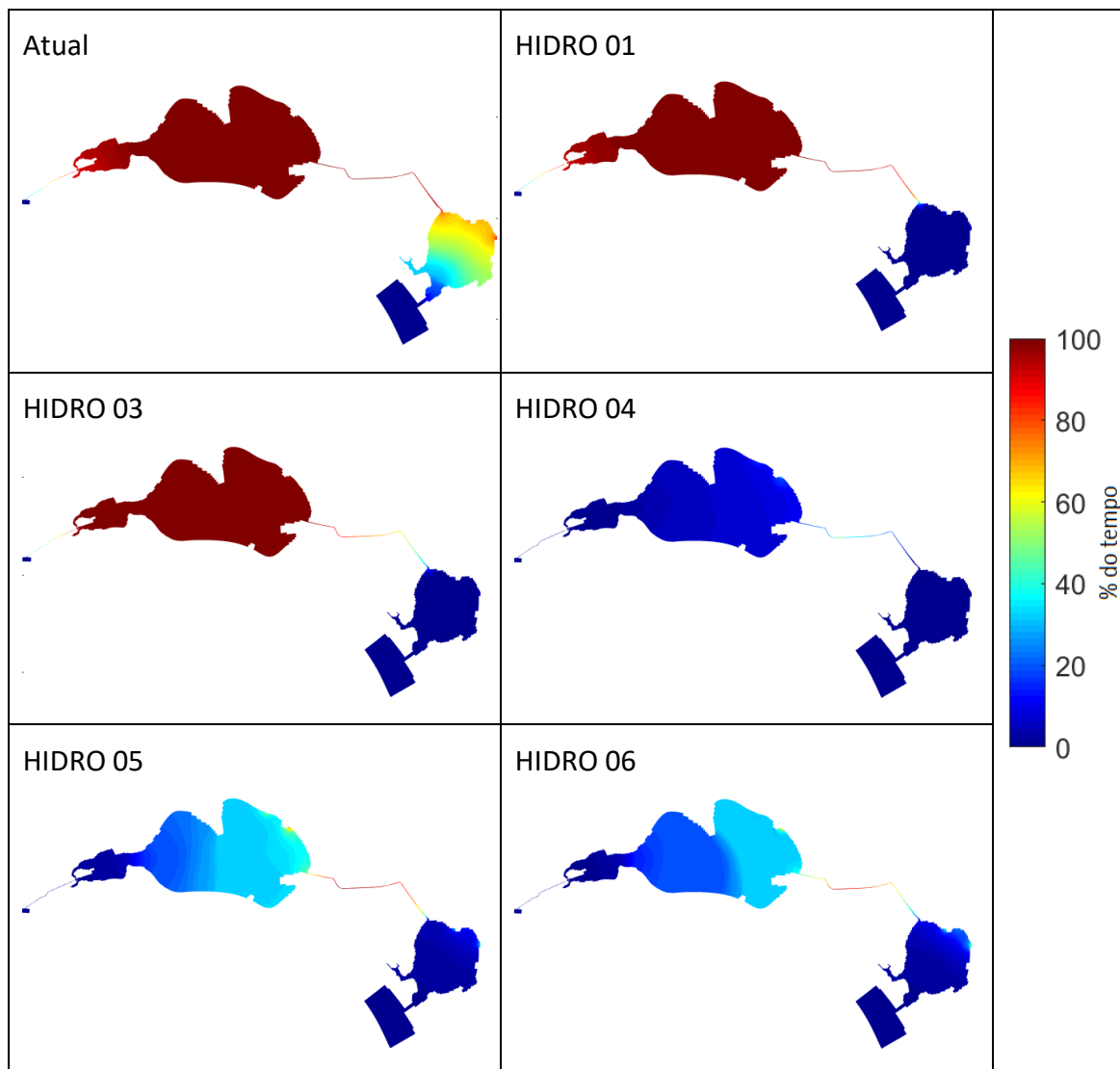


Figura 72: Tempo da permanência de concentrações de COT superiores a 3,0 mg/L no período chuvoso para o cenário atual e cenários futuros (cenário HIDRO 02 foi suprimido para facilitar a visualização, visto que os resultados do mesmo são bastante similares ao HIDRO 01).

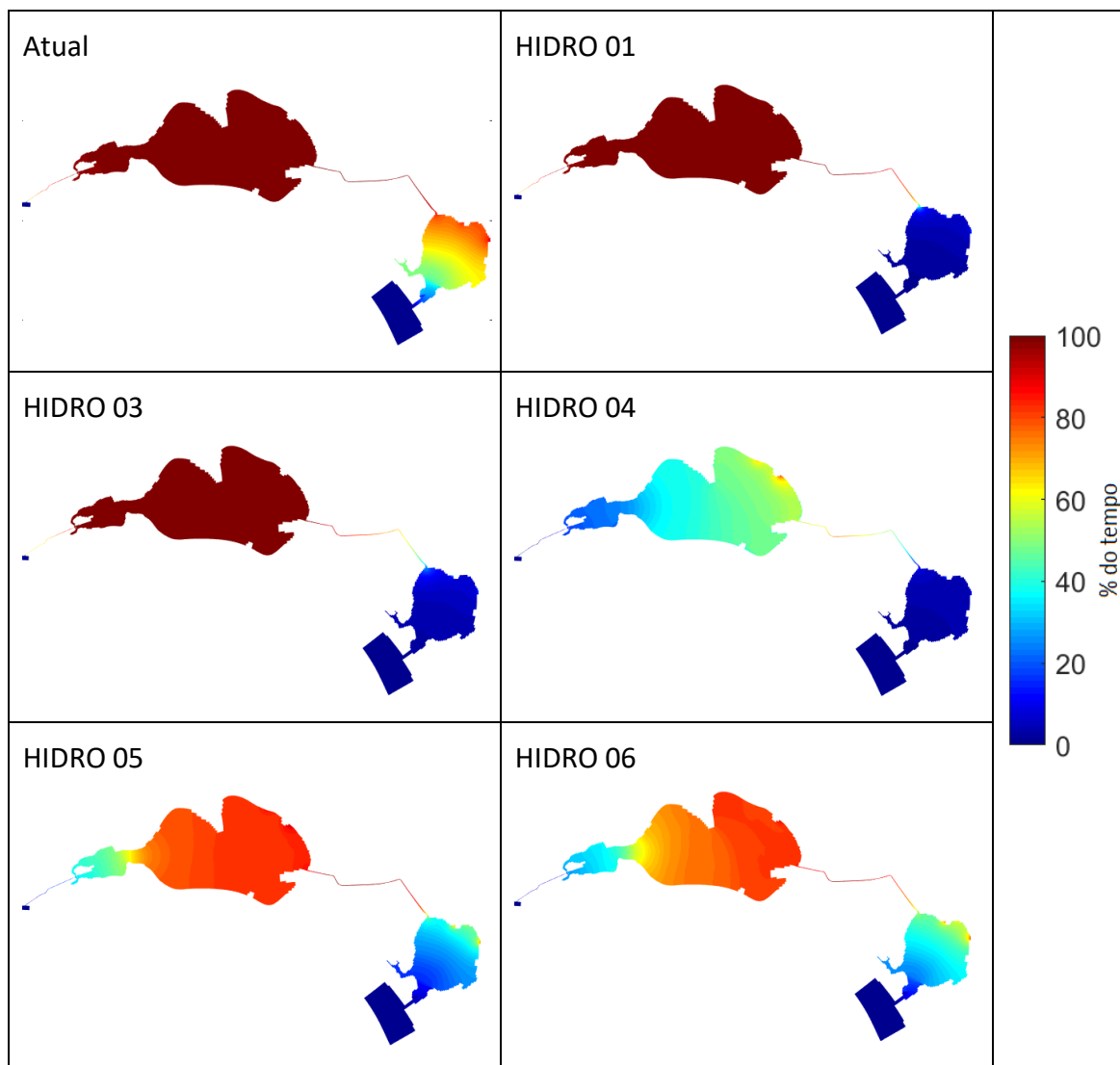


Figura 73: Tempo da permanência de concentrações de COT superiores a 3,0 mg/L no ano todo para o cenário atual e cenários futuros (cenário HIDRO 02 foi suprimido para facilitar a visualização, visto que os resultados do mesmo são bastante similares ao HIDRO 01).

6.1.5. Fósforo total

Os limites máximos de fósforo total para águas salinas de classe 1 e 2 são 0,062 mg/L e 0,093 mg/L, respectivamente, e de 0,124 mg/L e 0,186 mg/L para águas salobras de classe 1 e 2. Na simulação do cenário atual, as concentrações de fósforo total da Lagoa de Piratininga ultrapassam o limite de águas salobras classe 2 em todo o período simulado. Na Lagoa de Itaipu as concentrações de fósforo do cenário atual também são superiores ao limite de águas salinas de classe 2 em todo o período simulado.

No cenário simulado com a execução de todas as obras hidráulicas, **HIDRO 4**, as concentrações de fósforo total das lagoas se reduzem para valores inferiores à 0,124 mg/L em quase todo o período (Figura 74, Figura 75 e Figura 76).

Na Lagoa de Itaipu os cenários que contemplam a dragagem do Canal de Itaipu (**HIDRO 1, 2, 3 e 4**) apresentam concentrações variando entre cerca de 0,04 e 0,10 mg/L, com picos ainda mais elevados em eventos chuvosos. A execução das obras estudadas, sem considerar qualquer abatimento de cargas poluentes nas bacias, não é suficiente para o enquadramento do fósforo total na Lagoa de Itaipu, pois a concentração máxima admissível para água salina é significativamente inferior àquela estabelecida para águas salobras (Figura 77 e Figura 78).

A dragagem do Canal de Camboatá em conjunto com a desobstrução do Túnel do Tibau (**HIDRO 6**) reduz as concentrações de fósforo na Lagoa de Piratininga, principalmente em período seco, mas não é suficiente para atingir o seu enquadramento em classe I (Figura 76), pois ainda ocorrem concentrações superiores a 0,124 mg/L em cerca de 70% do período simulado. Valores acima de 0,093 mg/L são observado em mais de 80% (Figura 77) e valores acima de 0,062 mg/L (Figura 78) são observados em quase 100% do tempo na Lagoa de Piratininga mesmo considerando todas as obras hidráulicas propostas. Tais resultados apontam que apenas as obras propostas hidráulicas não são suficientes para atingir níveis de fósforo desejáveis, principalmente na Lagoa de Piratininga.

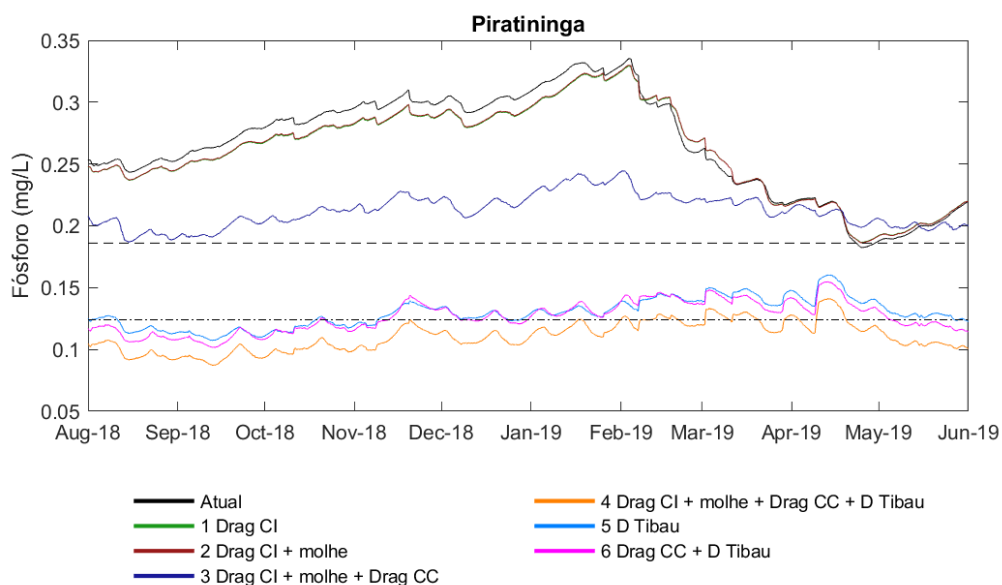


Figura 74: Fósforo total da Lagoa de Piratininga simulado nos cenários atual e futuros de alterações hidrodinâmicas.

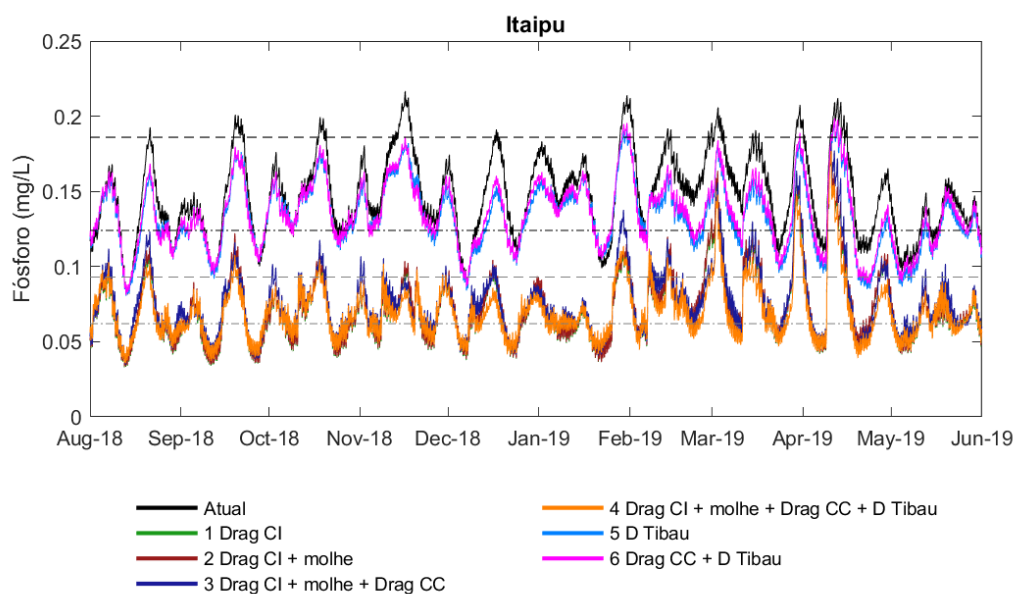


Figura 75: Fósforo total da Lagoa de Itaipu simulado nos cenários atual e futuros de alterações hidrodinâmicas.

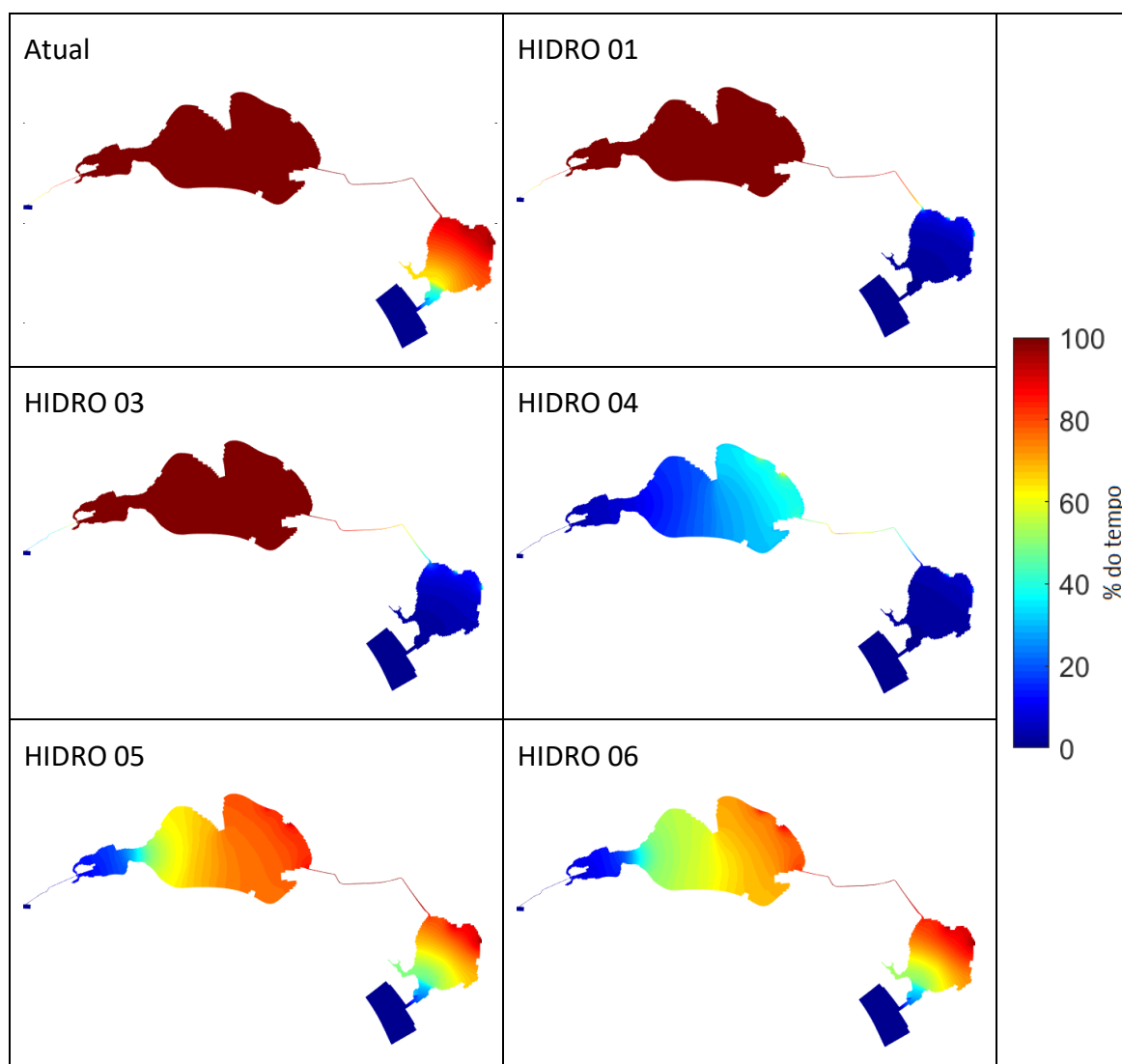


Figura 76: Tempo da permanência de concentrações de fósforo total superiores a 0,124 mg/L no ano todo para o cenário atual e cenários futuros (cenário HIDRO 02 foi suprimido para facilitar a visualização, visto que os resultados do mesmo são bastante similares ao HIDRO 01).

O enquadramento da Lagoa de Itaipu em água salgada de classe II é possível nos cenários que abrangem a dragagem do Canal de Itaipu (**HIDRO 1, 2, 3 e 4**), que exibem concentrações de fósforo total abaixo de 0,093 mg/L durante praticamente todo o período simulado (Figura 77). Entretanto, em todos os cenários as concentrações de fósforo total da Lagoa de Itaipu são superiores a 0,062 mg/L durante todo o período simulado, na porção mais afastada do Canal de Itaipu (Figura 78).

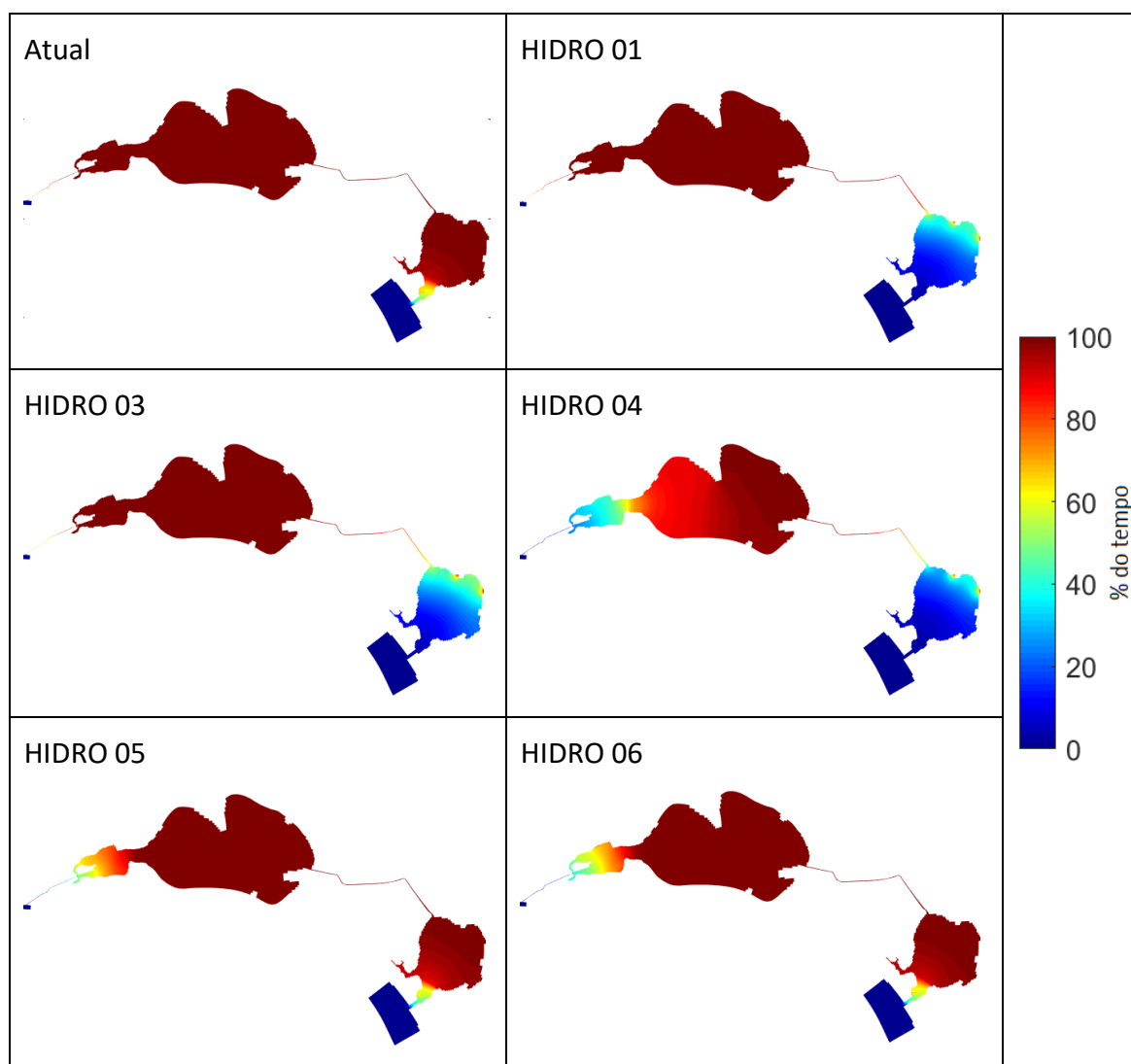


Figura 77: Tempo da permanência de concentrações de fósforo total superiores a 0,093 mg/L no ano todo para o cenário atual e cenários futuros (cenário HIDRO 02 foi suprimido para facilitar a visualização, visto que os resultados do mesmo são bastante similares ao HIDRO 01).

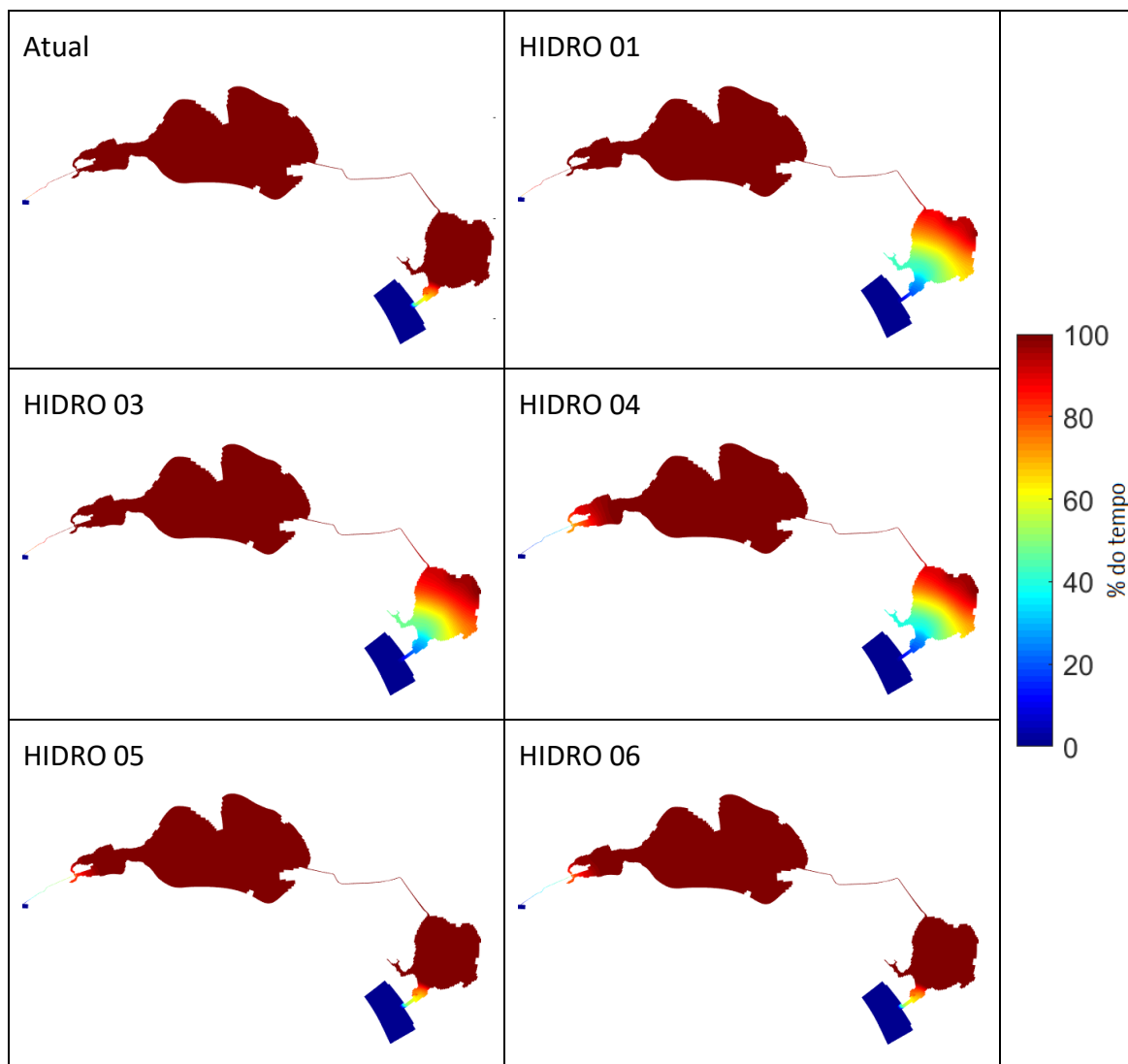


Figura 78: Tempo da permanência de concentrações de fósforo total superiores a 0,062 mg/L no ano todo para o cenário atual e cenários futuros (cenário HIDRO 02 foi suprimido para facilitar a visualização, visto que os resultados do mesmo são bastante similares ao HIDRO 01).

6.1.6. 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. Na simulação do cenário atual, as concentrações de amônia da Lagoa de Piratininga ultrapassam o limite de classe 1 em todo o período simulado, mas não ultrapassam o limite de classe 2 (Figura 79). No cenário atual a Lagoa de Itaipu apresenta concentrações de amônia acima do limite de classe 1 no período simulado, com diversos picos de concentração também acima do limite máximo para águas de classe 2 (Figura 80).

A desobstrução do Túnel do Tibau é suficiente para redução das concentrações de amônia da Lagoa de Piratininga para valores próximos de 0,3 mg/L na estiagem. Porém, no período chuvoso nem mesmo a execução de todas as obras hidráulicas é capaz de manter as concentrações de amônia abaixo do limite de 0,3 mg/L na Lagoa de Piratininga. Na Lagoa de Itaipu, os cenários que compreendem a Dragagem do Canal de Itaipu apresentam redução considerável nas concentrações de amônia, mas com concentração superior a 0,4 mg/L em diversos períodos. Desta forma, a execução das obras hidráulicas propostas não é suficiente para o enquadramento da amônia em ambas as lagoas.

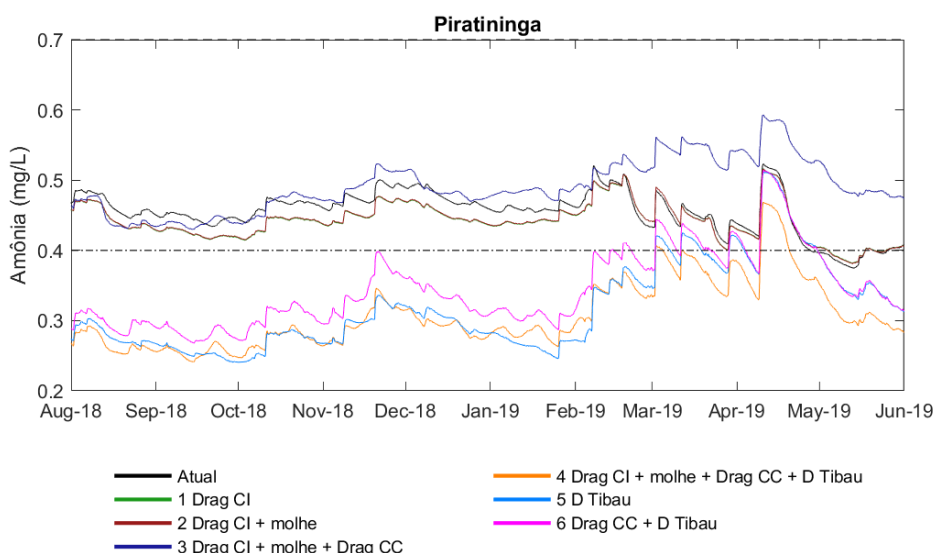


Figura 79: Amônia da Lagoa de Piratininga simulada nos cenários atual e futuros de alterações hidrodinâmicas.

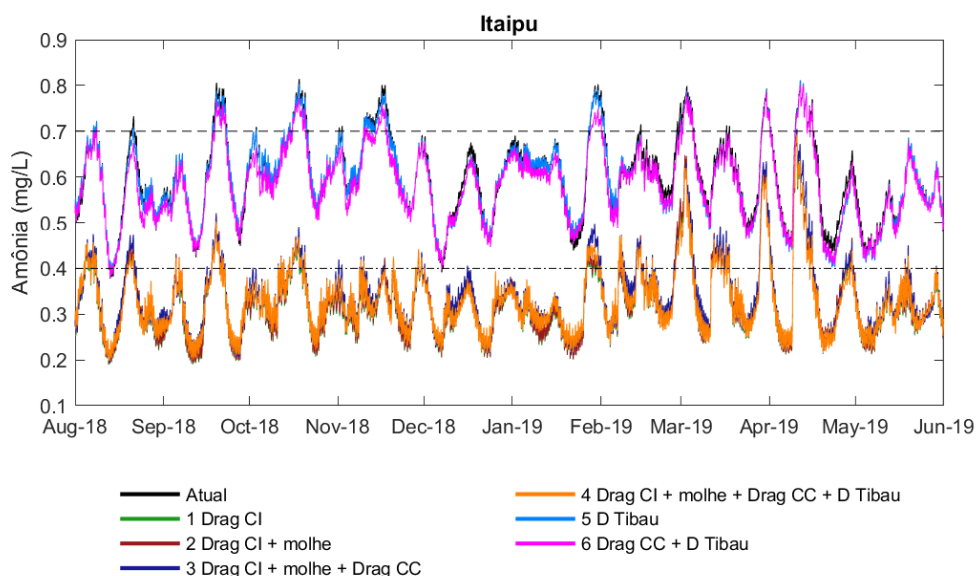


Figura 80: Amônia da Lagoa de Itaipu simulada nos cenários atual e futuros de alterações hidrodinâmicas.

Os cenários que contemplam a desobstrução do Túnel do Tibau (**HIDRO 4, 5 e 6**) levam a concentrações de amônia na Lagoa de Piratininga abaixo de 0,40 mg/L em quase todo o período simulado (Figura 83). Entretanto, é possível observar importante diferença entre as concentrações nessa lagoa para o período seco e chuvoso. No período seco, a Lagoa de Piratininga não exibe concentrações acima de 0,40 mg/L nos cenários **HIDRO 4, 5 e 6** (Figura 81). Entretanto, em período chuvoso somente o **HIDRO 4** não ultrapassa esse limite (Figura 82).

As concentrações da Lagoa de Itaipu não exibem comportamento distinto dos cenários entre o período seco e chuvoso (Figura 81, Figura 82 e Figura 83), cujas concentrações diminuem consideravelmente nos cenários com a execução da dragagem do Canal de Itaipu (**HIDRO 1, 2, 3 e 4**).

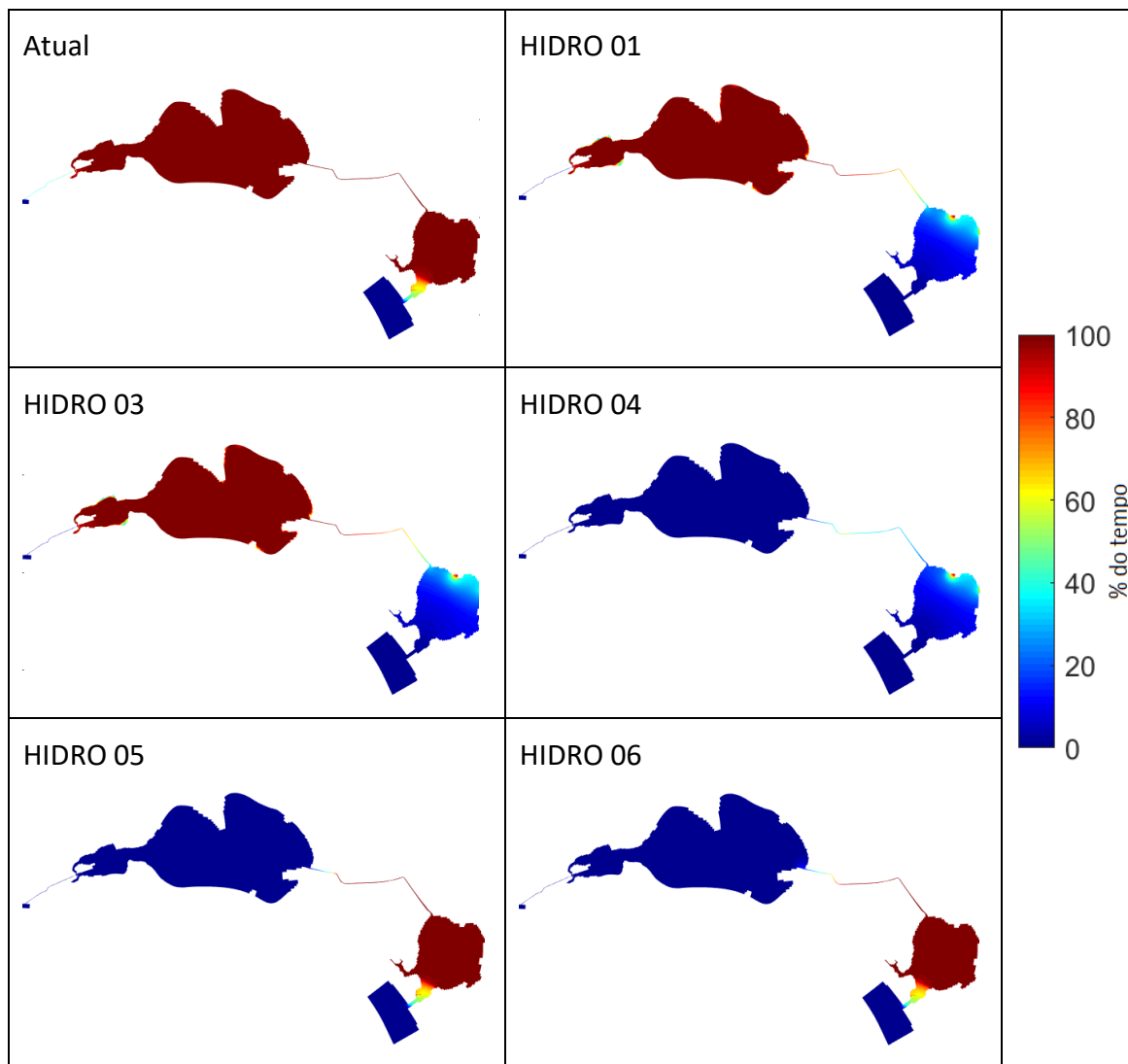


Figura 81: Tempo da permanência de concentrações de amônia superiores a 0,40 mg/L no período seco para o cenário atual e cenários futuros (cenário HIDRO 02 foi suprimido para facilitar a visualização, visto que os resultados do mesmo são bastante similares ao HIDRO 01).

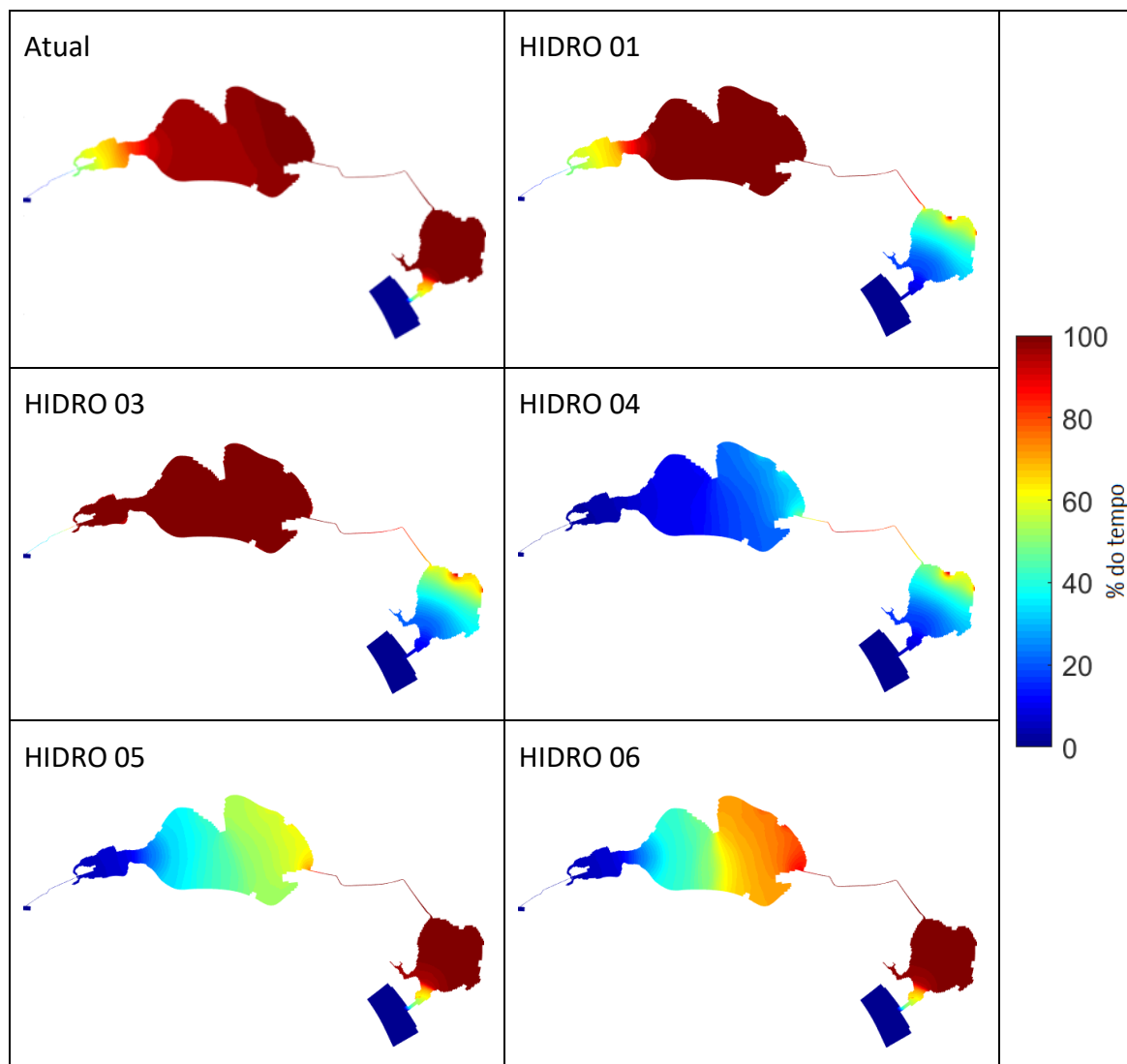


Figura 82: Tempo da permanência de concentrações de amônia superiores a 0,40 mg/L no período chuvoso para o cenário atual e cenários futuros (cenário HIDRO 02 foi suprimido para facilitar a visualização, visto que os resultados do mesmo são bastante similares ao HIDRO 01).

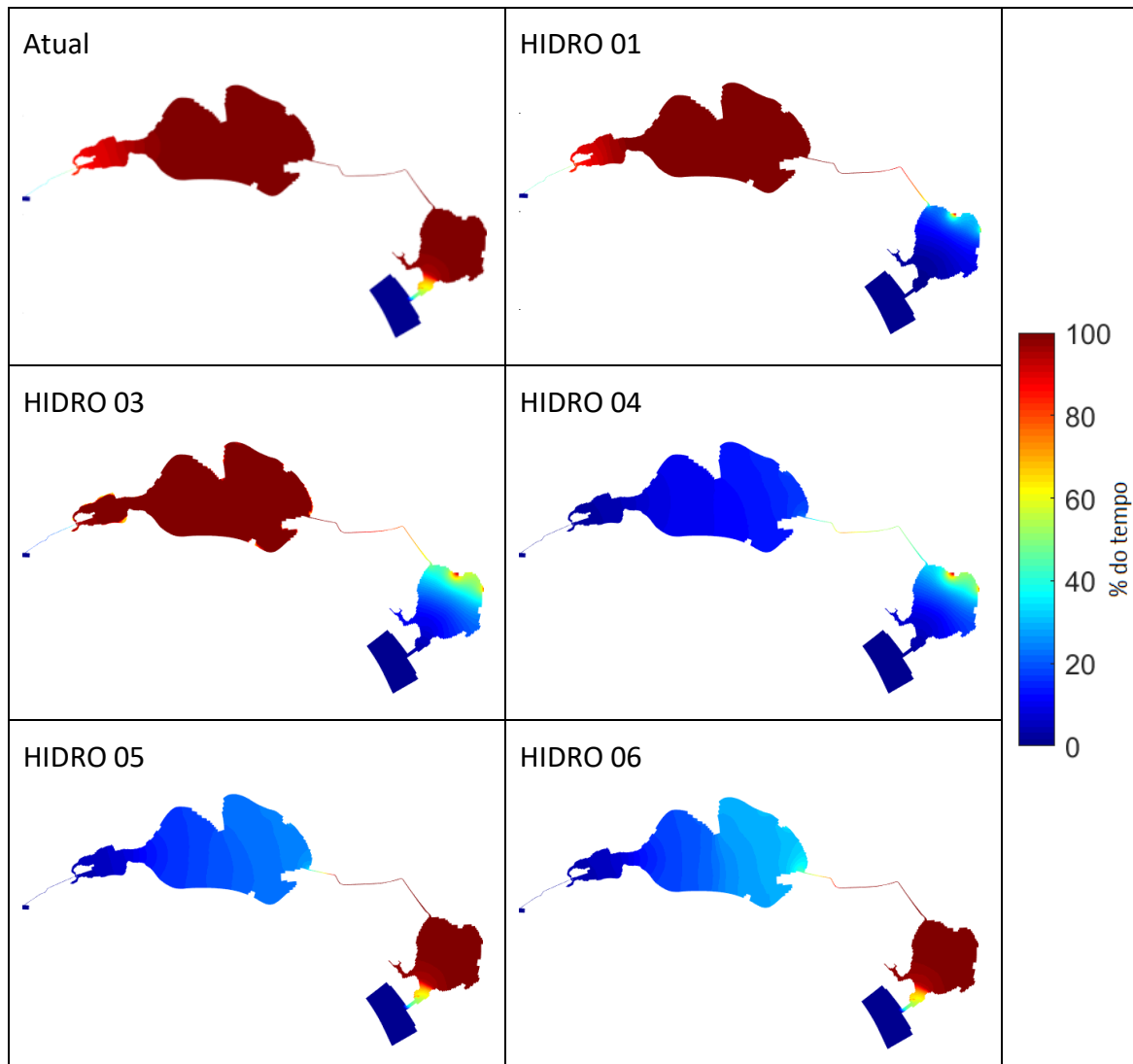


Figura 83: Tempo da permanência de concentrações de amônia superiores a 0,40 mg/L no ano todo para o cenário atual e cenários futuros (cenário HIDRO 02 foi suprimido para facilitar a visualização, visto que os resultados do mesmo são bastante similares ao HIDRO 01).

6.1.7. Considerações das alterações hidrodinâmicas sobre a qualidade de água do sistema lagunar Piratininga-Itaipu

Os resultados indicam que as alterações hidrodinâmicas trazem melhorias para a qualidade de água das lagoas. No caso da Lagoa de Itaipu, o COT alcança o limite da legislação apenas com a dragagem do Canal de Itaipu. No entanto, os demais parâmetros, apesar de apresentarem melhorias, não alcançam a classe 1 nem mesmo com implantação de todas as obras hidráulicas. Na lagoa de Itaipu a obra que mais tem efeito positivo sobre a qualidade de água da lagoa é a dragagem do Canal de Itaipu.

A qualidade de água da Lagoa de Piratininga também apresentou melhorias, principalmente com a desobstrução do Túnel do Tibau, e ainda mais potencializada pela implantação das demais obras de dragagem em Camboatá e Itaipu. No entanto, nem mesmo o cenário HIDRO 4, que considera a implantação de todas as obras hidráulicas, foi capaz de manter as concentrações de amônia e fósforo abaixo do limite da legislação no período chuvoso. Portanto, os resultados dessas simulações indicam que nem mesmo a implantação de todas as intervenções físicas propostas é suficiente para recuperar e manter a qualidade de água desejada para o sistema lagunar, sendo necessário também estudar o efeito de cenários de abatimento de cargas sobre o sistema lagunar.

6.2. CENÁRIOS FUTUROS - ABATIMENTO DE CARGAS

O efeito do abatimento de cargas poluidoras na qualidade da água das lagoas foi avaliado primeiramente em cenários isolados, isto é, sem qualquer intervenção física no sistema, cujos resultados são apresentados a seguir. Os seguintes cenários foram simulados e avaliados:

- **Abatimento 1:** Abatimento de 20% da carga poluente das bacias contribuintes ao sistema lagunar;
- **Abatimento 2:** Abatimento de 40% da carga poluente das bacias contribuintes ao sistema lagunar;
- **Abatimento 3:** Abatimento da carga poluente das bacias contribuintes à Lagoa de Piratininga, através da implantação dos Jardins Filtrantes.

6.2.1. COT

O limite máximo de COT para águas salinas e salobras de classe 1 é 3,0 mg/L e para águas de classe 2 o limite é 5,0 mg/L (Conama 357/2005). Para a Lagoa de Piratininga, é possível identificar uma tendência de queda nas concentrações de COT durante o período chuvoso (Figura 84). O comportamento das concentrações de COT na Lagoa de Itaipu é bastante distinto, com oscilação nas concentrações em função da variação de maré, e queda sutil no período chuvoso (Figura 85).

Mesmo com os abatimentos de 20% e 40% de carga, as concentrações de COT da Lagoa de Piratininga ultrapassam o limite de classe 1 em quase todo o período simulado, sendo reduzida a valores próximos de 2,5 mg/L somente em abril e maio de 2019. Na Lagoa de Itaipu, a oscilação das concentrações é bastante expressiva, porém, com picos constantes próximos de 4,0 mg/L no cenário atual, e 3,5 mg/L com o abatimento de 40% de carga. Os jardins filtrantes influenciam pouco a qualidade da água da Lagoa de Itaipu, pois abatem somente as cargas contribuintes à Lagoa de Piratininga, tendo impacto indireto sobre a Lagoa de Itaipu. Mesmo com abatimento de 40% as lagoas apresentam concentrações superiores à 3,0 mg/L em boa parte do tempo. Desta forma, os resultados apontam que estes abatimentos de carga de forma isolada não são suficientes para atingir a qualidade de classe 1 (Figura 84 e Figura 85).

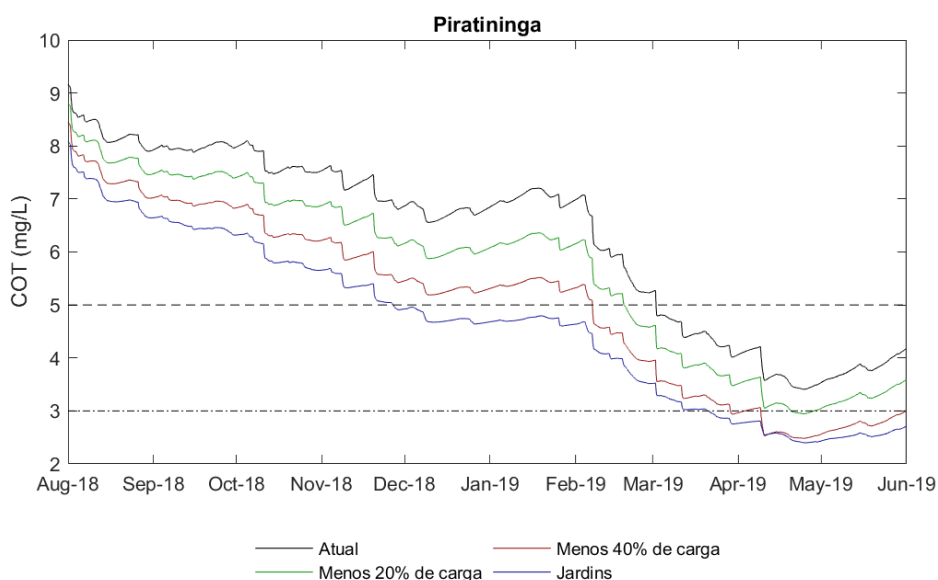


Figura 84: Concentração de COT simulado no cenário atual e nos cenários de abatimento de cargas na Lagoa de Piratininga.

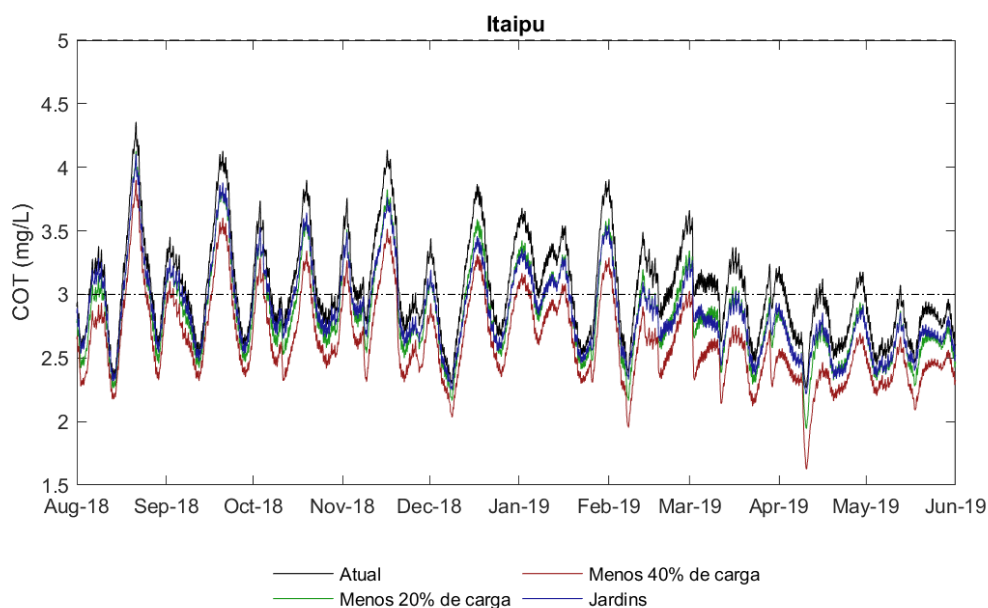


Figura 85: Concentração de COT simulado no cenário atual e nos cenários de abatimento de cargas na Lagoa de Itaipu.

Em todos os cenários de abatimento de cargas isoladamente, as concentrações de COT da Lagoa de Piratininga se apresentam acima de 3,0 mg/L ao longo de todo o período seco (Figura 86). Durante o período chuvoso, o abatimento de 20 % exerce pouco impacto nas concentrações da Lagoa de Piratininga. Com o abatimento de 40% das cargas, as concentrações de COT ultrapassam 3,0 mg/L em 70% do tempo; e os jardins promovem os melhores resultados, com concentrações acima de 3,0 mg/L em 50% do tempo (Figura 87).

Na Lagoa de Itaipu as concentrações de COT ultrapassam 3,0 mg/L em 70% do período seco para os cenários do abatimento de 20% e dos Jardins Filtrantes, e cerca de 40% do tempo para o cenário que considera abatimento de 40% das cargas (Figura 86). No período chuvoso, qualquer um dos três cenários de abatimento de cargas isoladamente é capaz de resultar em concentrações inferiores a 3,0 mg/L na Lagoa de Itaipu (Figura 87). Porém, quando se analisa o ano todo, ainda se observam valores de COT acima de 3,0 mg/L durante 30% do tempo na Lagoa de Itaipu (Figura 88), indicando que tais cenário de abatimento de carga, de forma isolada, não são suficientes para enquadrar o COT em todo o sistema.

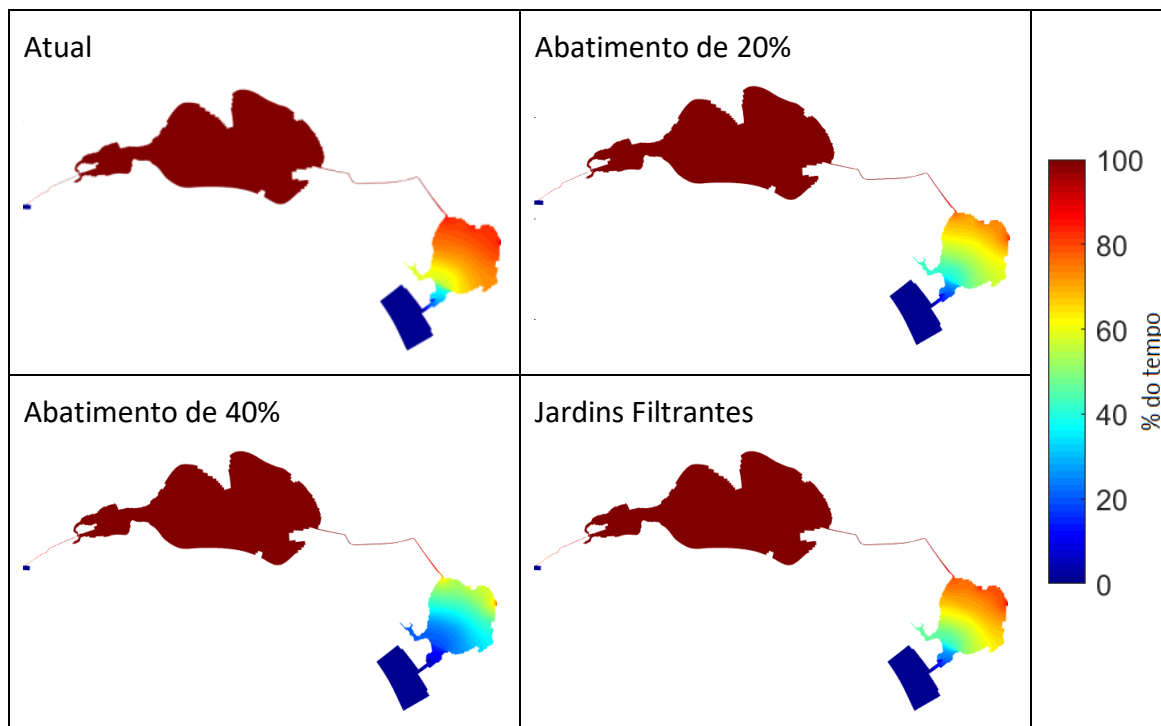


Figura 86: Tempo da permanência de concentrações de COT superiores a 3,0 mg/L no período seco para o cenário atual e cenários futuros de abatimento de cargas isoladamente.

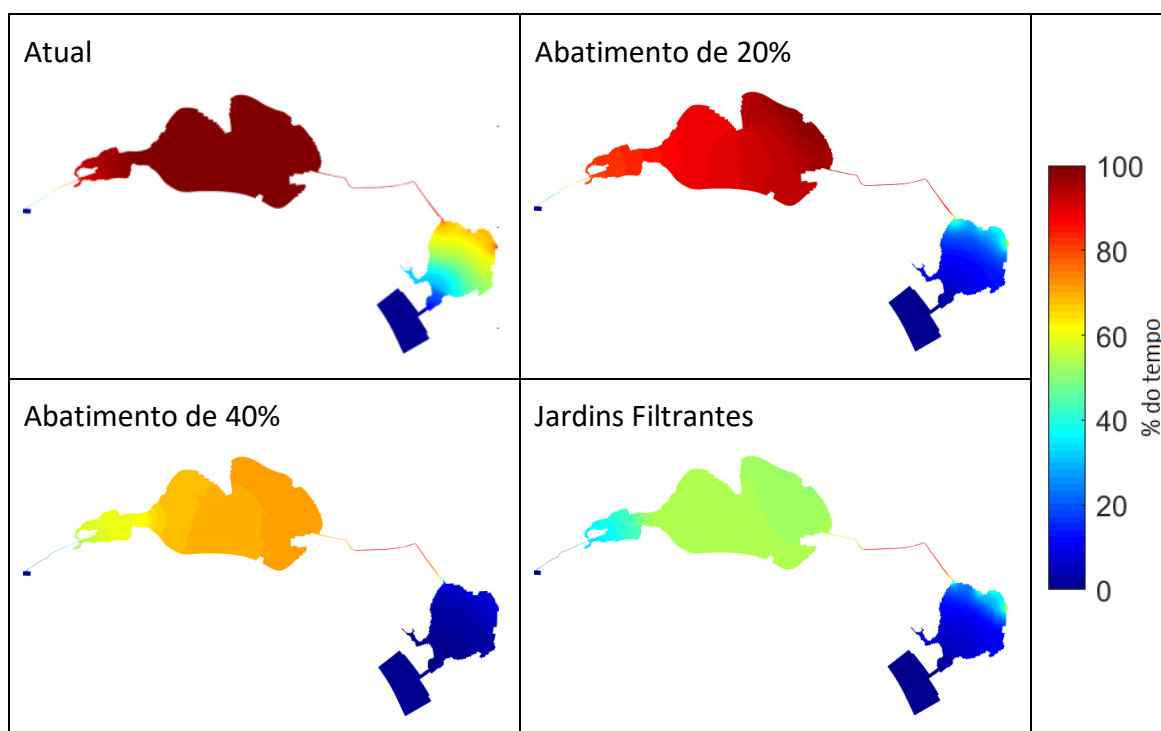


Figura 87: Tempo da permanência de concentrações de COT superiores a 3,0 mg/L no período chuvoso para o cenário atual e cenários futuros de abatimento de cargas isoladamente.

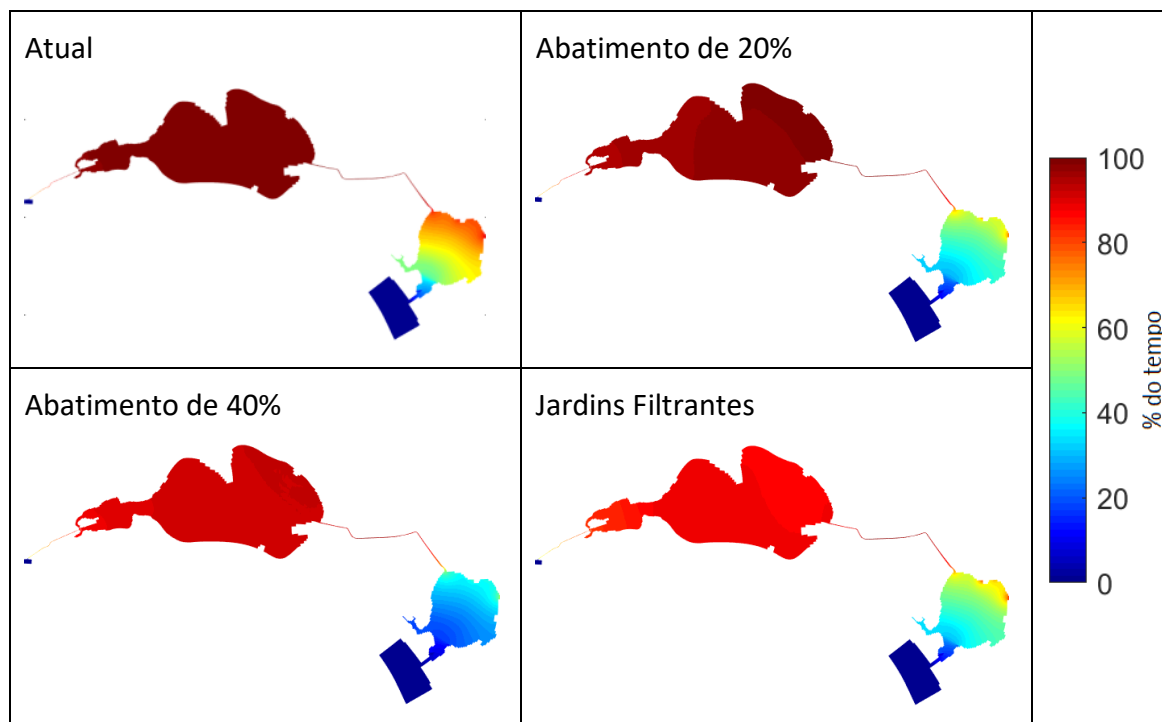


Figura 88: Tempo da permanência de concentrações de COT superiores a 3,0 mg/L no ano todo para o cenário atual e cenários futuros de abatimento de cargas isoladamente.

6.2.2. Fósforo total

Os limites máximos de fósforo total para águas salinas de classe 1 e 2 são 0,062 mg/L e 0,093 mg/L, respectivamente, e 0,124 mg/L e 0,186 mg/L para águas salobras de classe 1 e 2.

No cenário atual as concentrações da Lagoa de Itaipu permanecem acima de 0,093 mg/L em 90% do tempo (Figura 92) e 80% do tempo acima de 0,124 mg/L (Figura 91), considerando o ano todo. Na Lagoa de Itaipu a oscilação das concentrações é bastante expressiva, com máximas próximas de 0,20 mg/L no cenário atual. Para o cenário de abatimento de 40%, as concentrações de fósforo total na Lagoa de Itaipu oscilam entre 0,06 e 0,16 mg/L, sendo essa dinâmica influenciada nitidamente pelo efeito de diluição da maré (Figura 90).

Na Lagoa de Piratininga as concentrações de fósforo total caem durante o período chuvoso, similar ao comportamento observado para o COT (Figura 89). No cenário atual a concentração de fósforo nessa lagoa está 100% do tempo acima de 0,124 mg/L.

Mesmo com o abatimento de 40% da carga as concentrações de fósforo nas Lagoas de Piratininga e Itaipu permanecem muito tempo acima dos limites de classe 1.

Os abatimentos de cargas isoladamente não são suficientes para reduzir as concentrações de fósforo total a valores inferiores a 0,124 mg/L na Lagoa de Piratininga, tampouco a valores inferiores a 0,093 mg/L na Lagoa de Itaipu (Figura 89 e Figura 90).

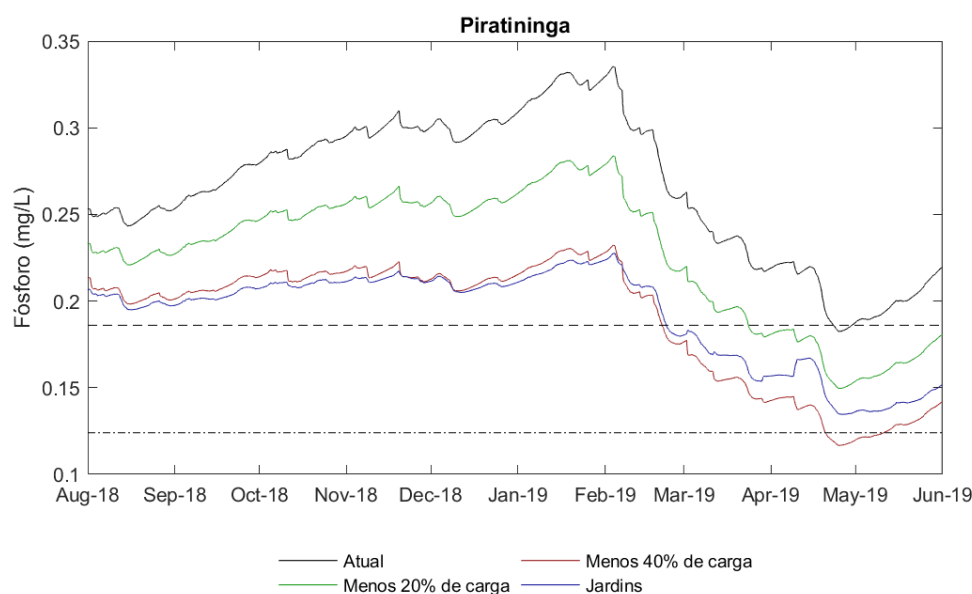


Figura 89: Concentração de fósforo total simulado no cenário atual e nos cenários de abatimento de cargas na Lagoa de Piratininga.

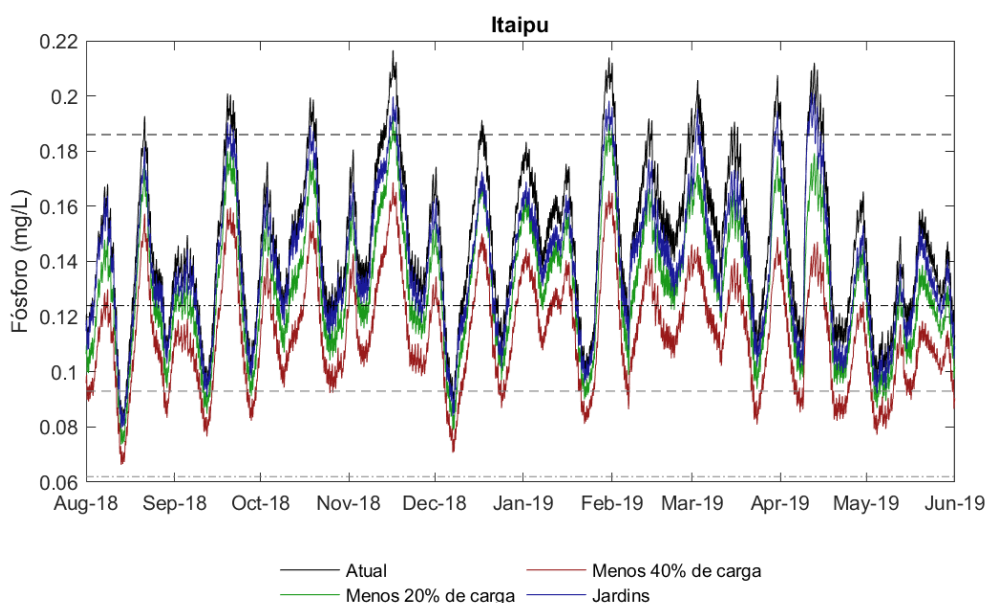


Figura 90: Concentração de fósforo total simulado no cenário atual e nos cenários de abatimento de cargas na Lagoa de Itaipu.

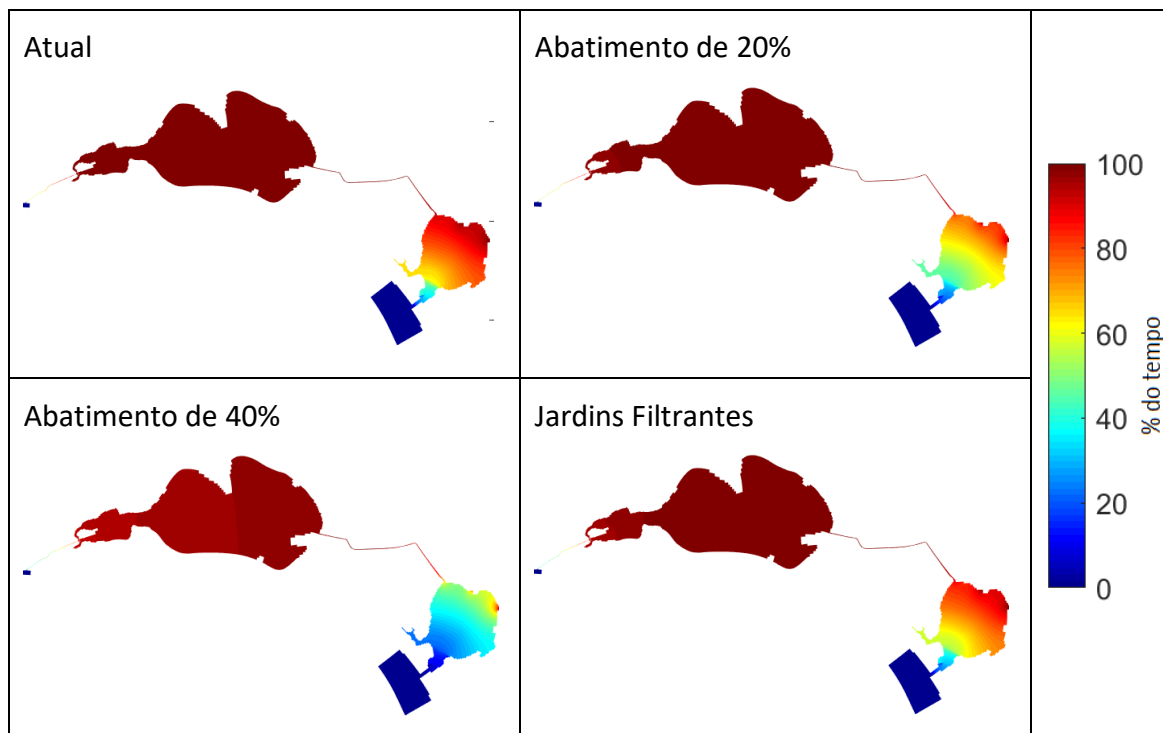


Figura 91: Tempo da permanência de concentrações de fósforo total superiores a 0,124 mg/L no ano todo para o cenário atual e cenários futuros de abatimento de cargas isoladamente.

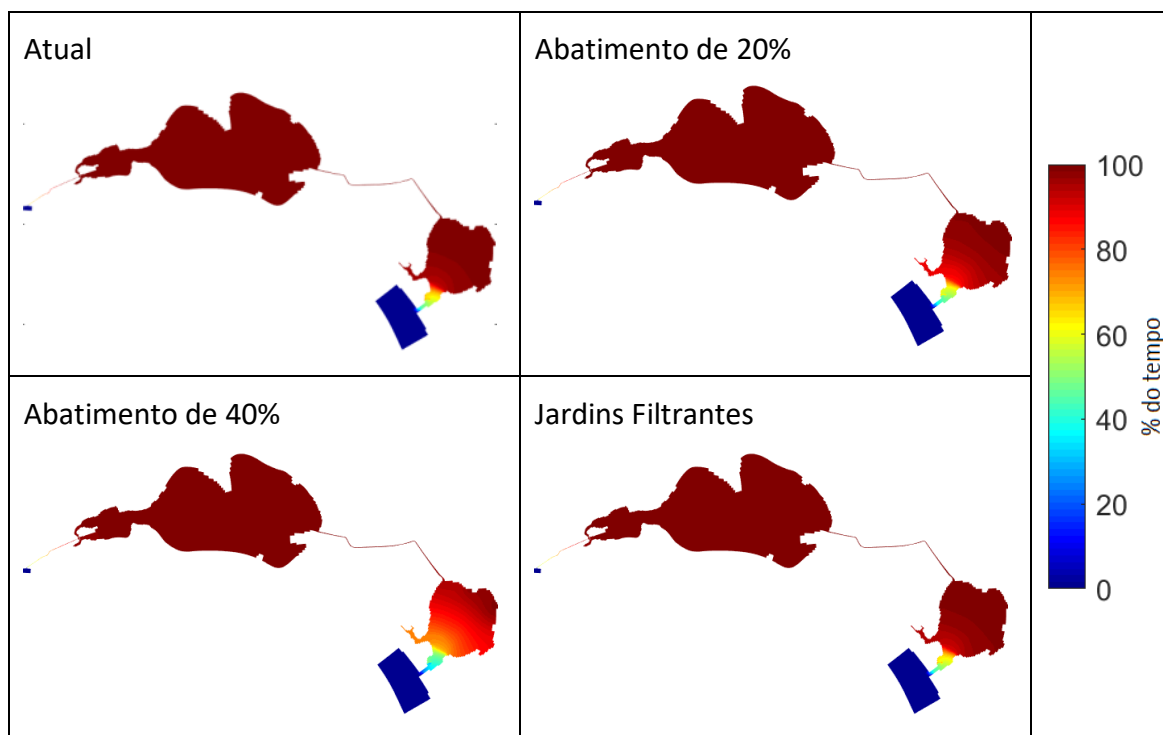


Figura 92: Tempo da permanência de concentrações de fósforo total superiores a 0,093 mg/L no ano todo para o cenário atual e cenários futuros de abatimento de cargas isoladamente.

6.2.3. 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, a Lagoa de Piratininga se mantém acima de 0,4 mg/L em grande parte do tempo, com concentrações acima de 0,5 mg/L no período chuvoso. Na Lagoa de Itaipu se observa grandes oscilações, com concentrações de amônia variando entre 0,4 mg/L a 0,8 mg/L no cenário atual.

O abatimento de 40% da carga, de forma isolada, é capaz de enquadrar as concentrações de amônia em Classe 1 na Lagoa de Piratininga (Figura 93), mas não na Lagoa de Itaipu (Figura 94). Por outro lado, a implantação dos Jardins Filtrantes não é suficiente para enquadramento da amônia na Lagoa de Piratininga, pois em períodos chuvosos boa parte das cargas afluentes não é tratada. Mesmo com o abatimento de 40% de carga, as concentrações de amônia da Lagoa de Itaipu oscilam entre 0,3 e 0,6 mg/L, apresentando concentrações superiores aos limites de classe 1 em boa parte do tempo. O abatimento de 40% das cargas, isoladamente, reduz as concentrações de amônia na Lagoa de Piratininga a valores inferiores a 0,40 mg/L durante cerca de 80% do período simulado, enquanto o abatimento de somente 20% das cargas ou a implantação dos Jardins Filtrantes resulta em concentrações acima de 0,40 mg/L em 40% do tempo (Figura 95). Na lagoa de Itaipu, mesmo com o abatimento de 40% das cargas, as concentrações ultrapassam 0,40 mg/L em 80% do tempo (Figura 95). Com base nesses cenários, conclui-se que os abatimentos de carga simulados de forma isolada não são suficientes para garantir o enquadramento em Classe 1 de todo o sistema lagunar.

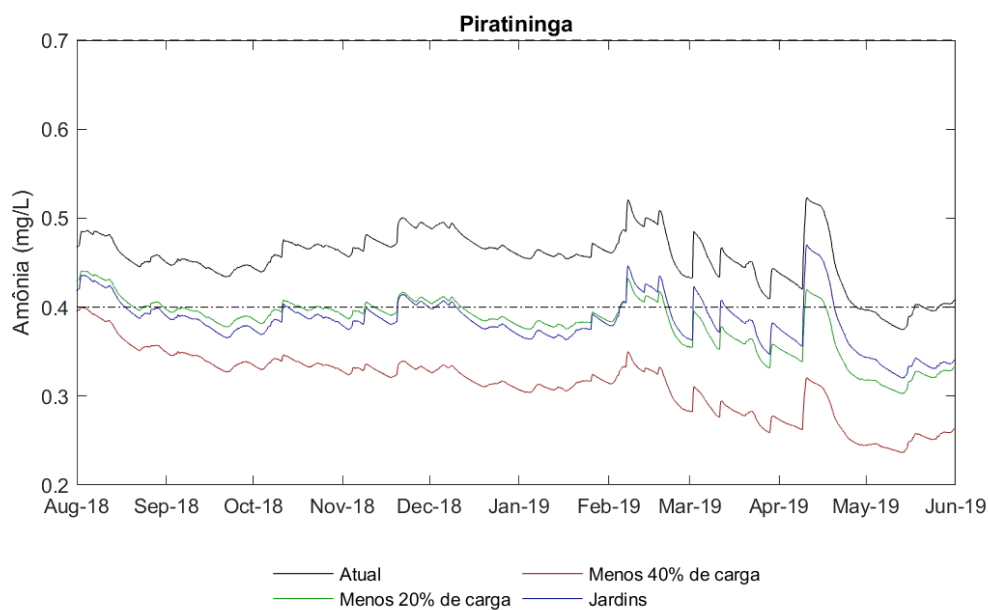


Figura 93: Concentração de amônia simulada no cenário atual e nos cenários de abatimento de cargas na Lagoa de Piratininga.

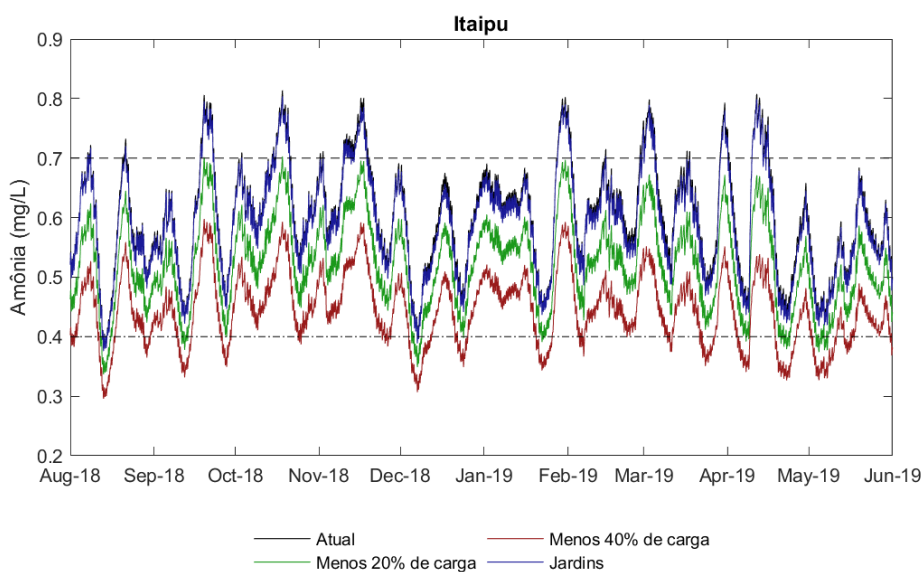


Figura 94: Concentração de amônia simulada no cenário atual e nos cenários de abatimento de cargas na Lagoa de Itaipu.

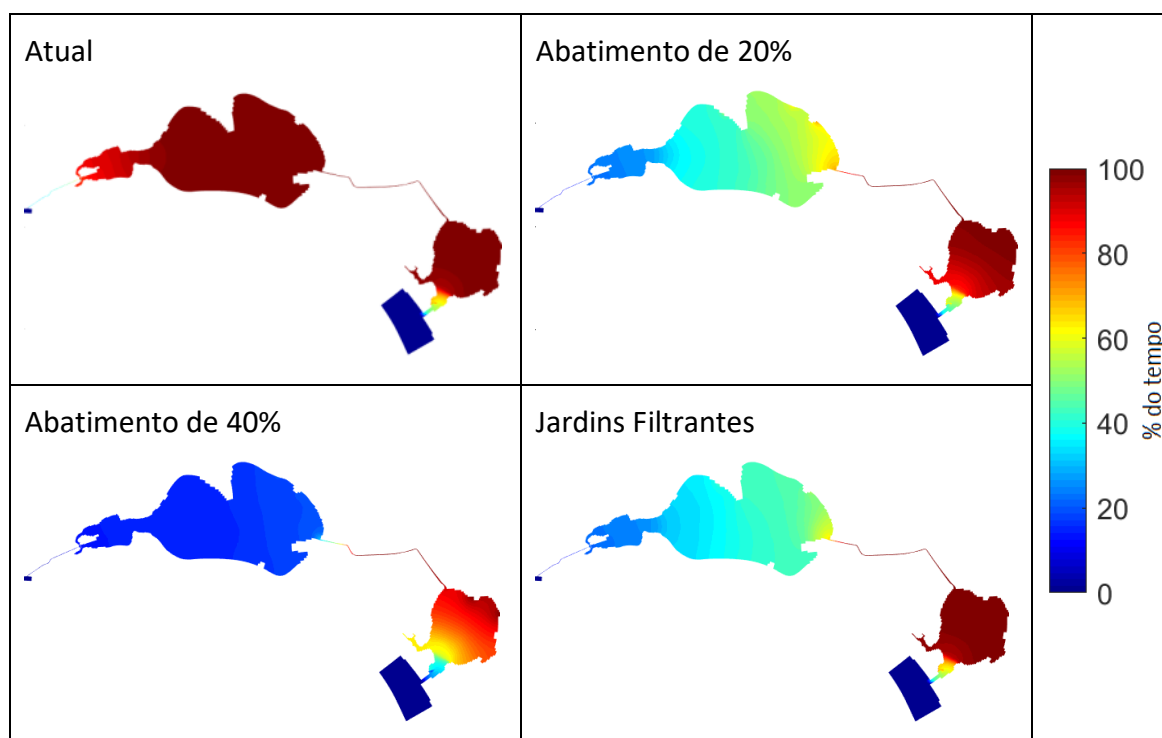


Figura 95: Tempo da permanência de concentrações de amônia superiores a 0,40 mg/L no ano todo para o cenário atual e cenários futuros de abatimento de cargas isoladamente.

6.2.4. Considerações dos cenários de abatimento de cargas nas bacias e seus efeitos sobre a qualidade de água do sistema lagunar Piratininga-Itaipu

Os cenários de abatimentos de cargas nas bacias contribuintes mostraram efeitos positivos sobre a qualidade de água das lagoas, principalmente na Lagoa de Piratininga, resultando em concentrações de amônia condizentes com a Classe 1 no cenário de abatimento de 40% da carga. No entanto, as concentrações de COT e fósforo ainda não atenderiam aos limites da classe 1, considerando os percentuais de abatimentos estudados em ambas as lagoas. O abatimento das cargas promovido pelos Jardins Filtrantes na Lagoa de Piratininga é diferente para cada uma das variáveis de qualidade da água simuladas. O resultado desse abatimento seria similar aquele promovido pelo abatimento de 20% das cargas para amônia, mas mais efetivo para COT do que o abatimento de 40%, por exemplo. Com relação ao fósforo, o resultado do abatimento promovido pelos Jardins Filtrantes se aproximaria daquele promovido pelo abatimento de 40% da carga na Lagoa de Piratininga. Apesar da melhoria promovida pelo abatimento de cargas, os percentuais avaliados não foram suficientes para alcançar características de classe 1. Desta forma, julgou-se necessário simular e

avaliar cenários de abatimentos de cargas em combinação com as alterações hidrodinâmicas.

6.3. CENÁRIOS FUTUROS - ALTERAÇÕES HIDRODINÂMICAS EM CONJUNTO COM ABATIMENTO DE CARGAS

O efeito das alterações hidrodinâmicas em conjunto com os cenários de abatimento de cargas na qualidade da água das lagoas foi avaliado para cinco diferentes combinações de obras e abatimentos. Os resultados as simulações são apresentados na sequência para os seguintes cenários:

- **Combinação A:** Hidro 04 + Abatimento 1 (20%);
- **Combinação B:** Hidro 04 + Abatimento 1 (20%) + Abatimento 3 (Jardins);
- **Combinação C:** Hidro 05 + Abatimento 1 (20%);
- **Combinação D:** Hidro 06 + Abatimento 3 (Jardins);
- **Combinação E:** Hidro 05 + Abatimento 3 (Jardins);

6.3.1. COT

O limite máximo de COT para águas salinas e salobras de classe 1 é 3,0 mg/L (CONAMA 357/2005), e 5,0 mg/L para águas de classe 2. No cenário atual, a concentração de COT na 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 96, Figura 98 e Figura 100). No cenário atual, na Lagoa de Itaipu as concentrações de COT acima de 3,0 mg/L ocorrem por 60% do tempo ao longo de todo o ano (Figura 97 e Figura 100).

A implantação dos jardins filtrantes e a desobstrução do Túnel do Tibau reduz de forma expressiva a concentração de COT na Lagoa de Piratininga. Porém, com permanência de valores acima de 3,0 mg/L durante 30% de todo o ano em ambas as lagoas.

Comparado ao cenário de **combinação E** (Jardins Filtrantes em conjunto com a desobstrução do Túnel do Tibau), o resultado do cenário de **combinação C** (abatimento de 20% da carga em conjunto com a obra de desobstrução do túnel) não foi tão eficiente para a Lagoa de Piratininga, mas apresentou melhores resultados para a Lagoa de Itaipu (Figura 96 e Figura 97), uma vez que estas duas obras tem efeito

direto somente sobre a Lagoa de Piratininga, enquanto o abatimento de 20% seria nas duas bacias.

O cenário de **combinação A** (abatimento de 20 % em conjunto com todas as obras hidráulicas propostas) resulta 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 praticamente todo o período simulado, com exceção dos primeiros dias de agosto de 2018 (Figura 96 e Figura 97). Comparado ao cenário de **combinação A**, o cenário de **combinação B** apresenta melhora nos resultados de Piratininga, porém, praticamente não afeta os resultados da Lagoa de Itaipu (Figura 96, Figura 97, Figura 98, Figura 99 e Figura 100). Isso porque a **combinação B** é similar a **combinação A** somada com a implantação dos Jardins Filtrantes, que serão implantados somente na Lagoa de Piratininga. No cenário de **combinação B**, a concentração média de COT na lagoa de Piratininga é cerca de 2,0 mg/L.

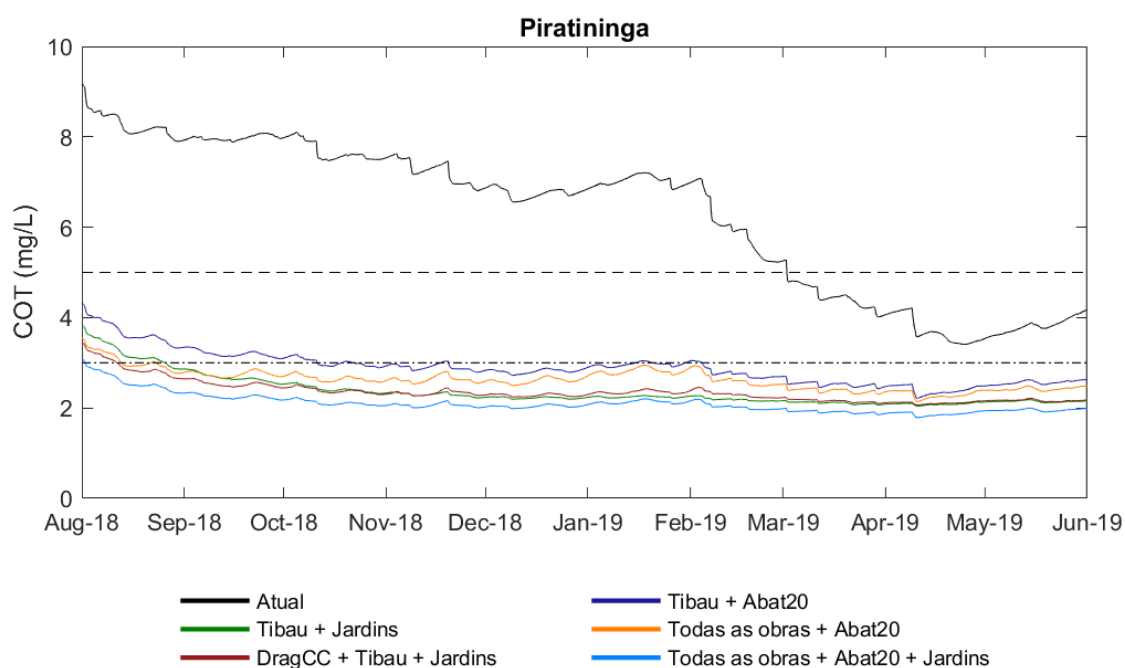


Figura 96: Concentração de COT simulado no cenário atual e nos cenários de alterações hidrodinâmicas na Lagoa de Piratininga.

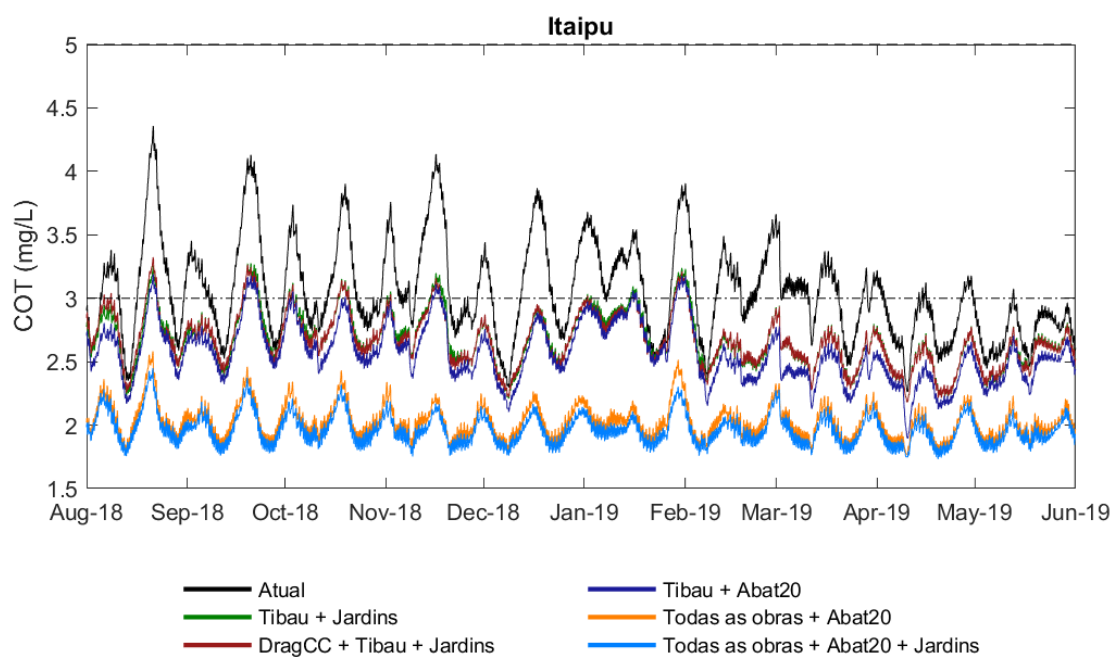


Figura 97: Concentração de COT simulado no cenário atual e nos cenários de alterações hidrodinâmicas na Lagoa de Itaipu.

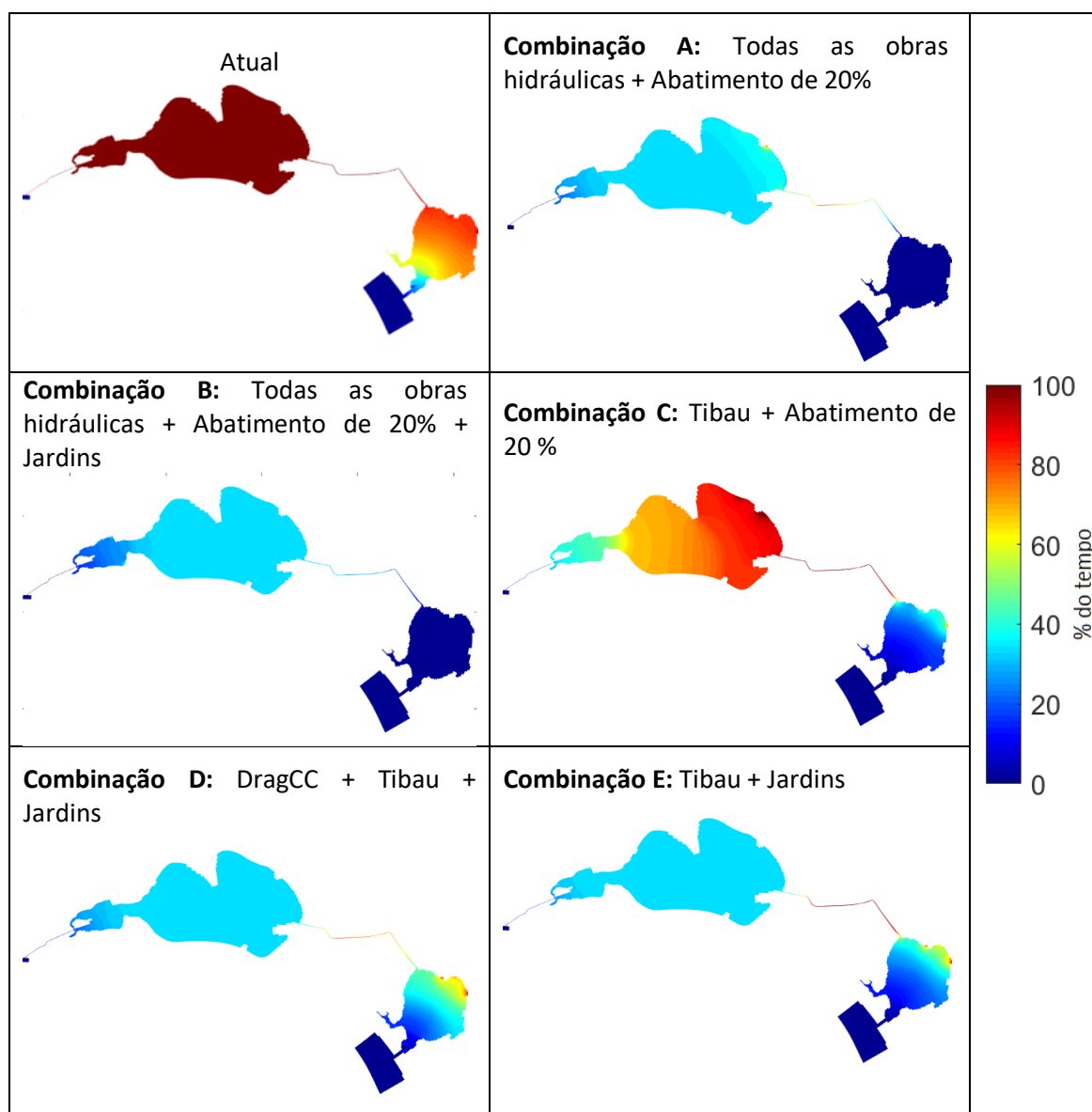


Figura 98: Tempo da permanência de concentrações de COT superiores a 3,0 mg/L no período seco para o cenário atual e cenários futuros de alterações hidrodinâmicas em conjunto com o abatimento de cargas.

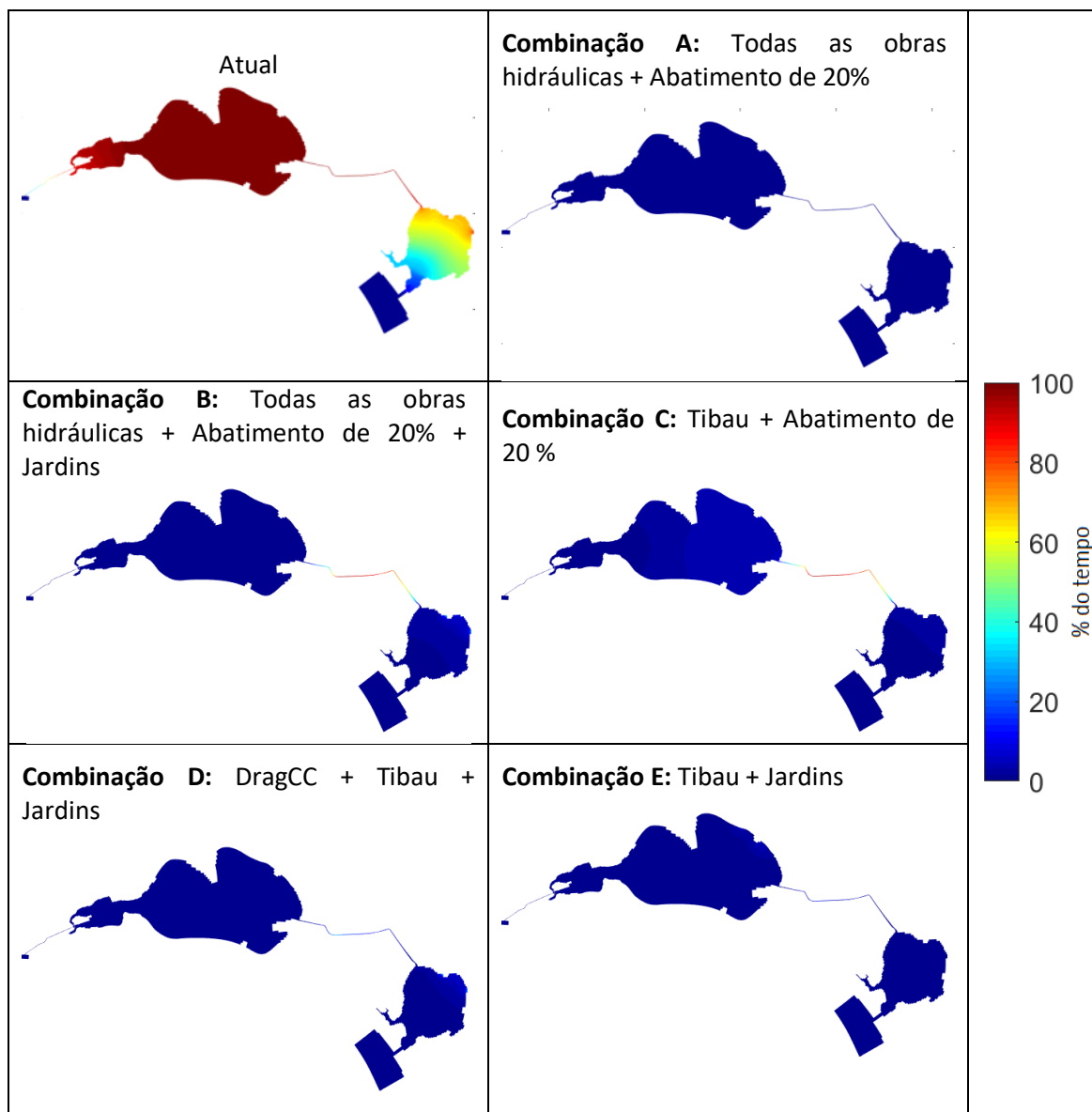


Figura 99: Tempo da permanência de concentrações de COT superiores a 3,0 mg/L no período chuvoso para o cenário atual e futuros de alterações hidrodinâmicas em conjunto com o abatimento de cargas.

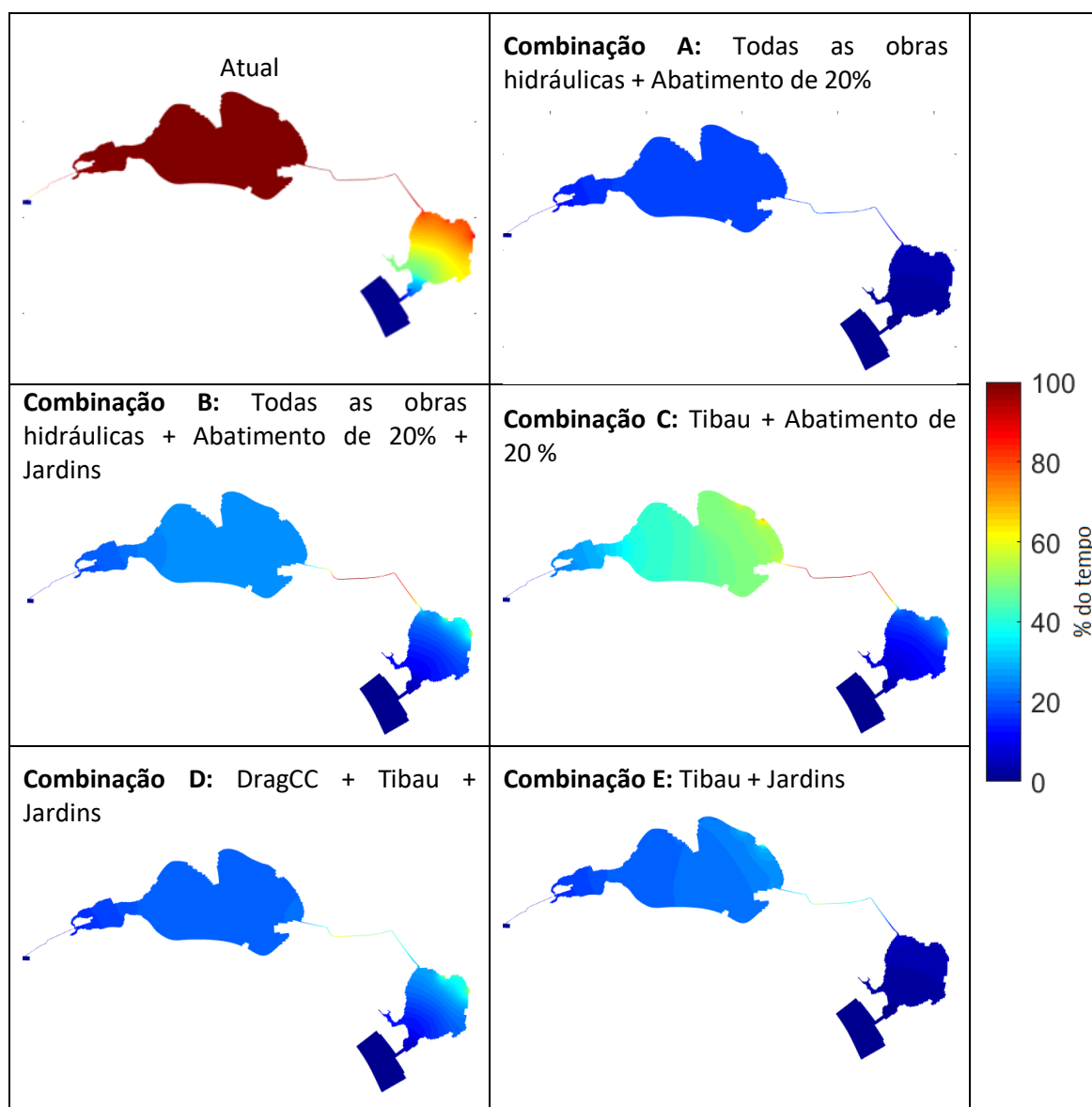


Figura 100: Tempo da permanência de concentrações de COT superiores a 3,0 mg/L no ano todo para o cenário atual e cenários futuros de alterações hidrodinâmicas em conjunto com o abatimento de cargas.

6.3.2. Fósforo total

Os limites máximos de fósforo total para águas salinas de classe 1 e 2 são 0,062 mg/L e 0,093 mg/L, respectivamente, e 0,124 mg/L e 0,186 mg/L para águas salobras de classe 1 e 2. Na Lagoa de Piratininga a concentração de fósforo se mantém acima de 0,186 mg/L em praticamente todo o período simulado. Em Itaipu, a concentração de fósforo permanece acima de 0,124 mg/L em 80% do tempo ao longo de todo o ano simulado.

No cenário de abatimento de 20% da carga em conjunto com todas as obras hidráulicas, as concentrações em Itaipu oscilam entre cerca de 0,05 e 0,12 mg/L (Figura 102). Nesse cenário, na Lagoa de Piratininga, as concentrações se mantêm condizentes com enquadramento em Classe 1 para águas salobras (Figura 101 e Figura 103), mas a Lagoa de Itaipu não é capaz de alcançar condições suficientes para seu enquadramento em água salina de classe 1 (Figura 102). Entretanto, com o abatimento de 20% das cargas e a realização de todas as obras hidráulicas propostas, as concentrações de fósforo total da Lagoa de Itaipu se apresentam dentro do limite máximo de águas salinas classe 2 na maior parte do tempo, ultrapassando esse limite em regiões específicas, próximas ao deságue das águas pluviais e lançamento de efluentes da ETE Itaipu (Figura 104).

O abatimento de 20% das cargas em conjunto com todas as obras hidráulicas propostas é suficiente para o enquadramento do fósforo total para as águas salobras na Lagoa de Piratininga, mas não para a Lagoa de Itaipu, que é salina (Figura 101 e Figura 102). Ainda que as concentrações de fósforo se mantenham dentro do limite de águas salobras de classe 1 na Lagoa de Piratininga, os valores são considerados elevados em virtude do seu tempo de residência. Ainda, os resultados das simulações apontam expressivo aumento da salinidade da Lagoa de Piratininga após execução de todas as obras hidráulicas propostas, transformando a Lagoa de Piratininga em ambiente salino em períodos secos.

O cenário de todas as obras hidráulicas propostas em conjunto com o abatimento de 20% da carga poluidora e a implantação dos Jardins Filtrantes reduz as concentrações de fósforo da Lagoa de Piratininga a valores inferiores a 0,10 mg/L durante todo o período simulado (Figura 101 e Figura 104). Com essas alterações, também é possível atender ao limite máximo de fósforo para águas salinas de classe 2 (0,093 mg/L) em boa parte do tempo e em ambas as lagoas (Figura 101 e Figura 102). Porém, concentrações de Classe 1 para águas salinas (i.e., > 0,062 mg/L) não são atendidas em nenhuma das lagoas. Concentrações inferiores a 0,062 ocorrem somente nas áreas mais próximas ao mar onde há maior troca de água (Figura 105). Desta forma, ainda que sejam implantadas todas as obras hidráulicas propostas em conjunto com o abatimento de 20% da carga poluidora e a implantação dos Jardins Filtrantes,

ou seja, **combinação B**, o nível trófico permanecerá elevado no sistema, com possibilidade de desenvolvimento de processos de eutrofização, principalmente na Lagoa de Piratininga.

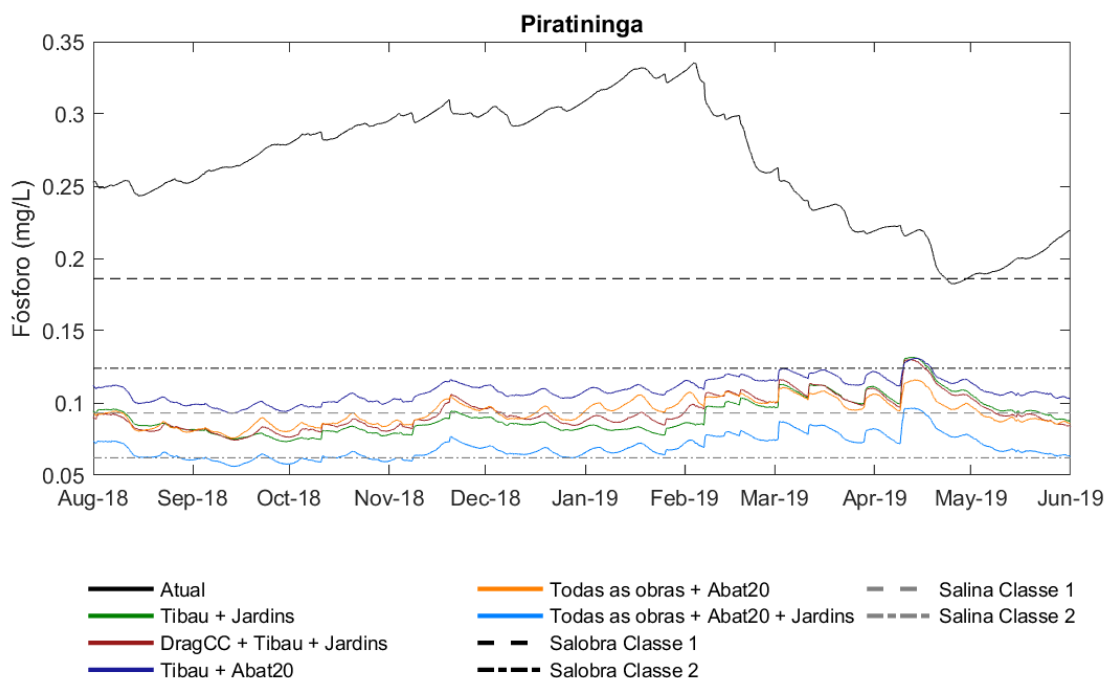


Figura 101: Concentração de fósforo total simulado no cenário atual e nos cenários de alterações hidrodinâmicas na Lagoa de Piratininga.

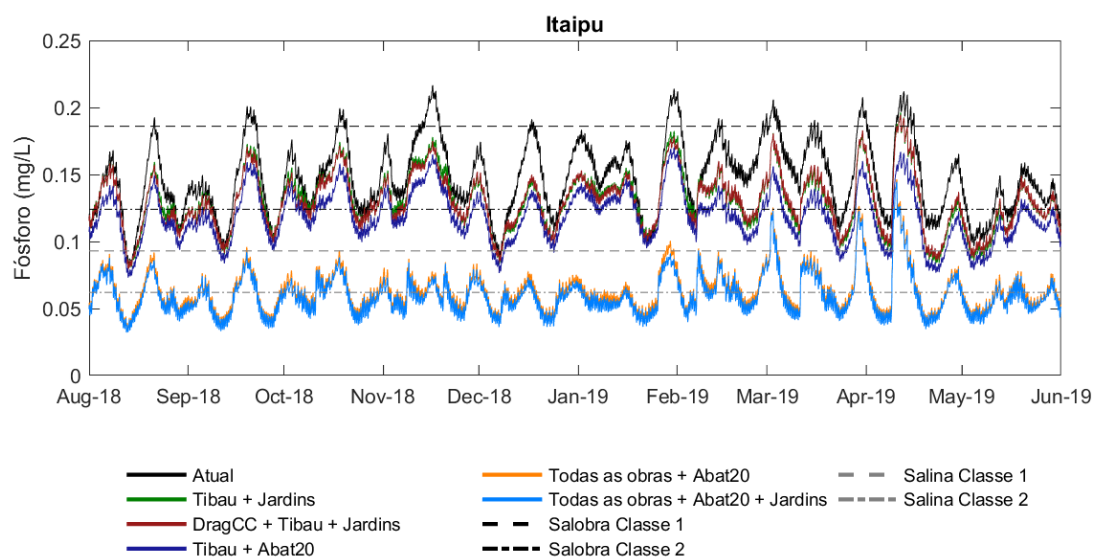


Figura 102: Concentração de fósforo total simulado no cenário atual e nos cenários de alterações hidrodinâmicas na Lagoa de Itaipu.

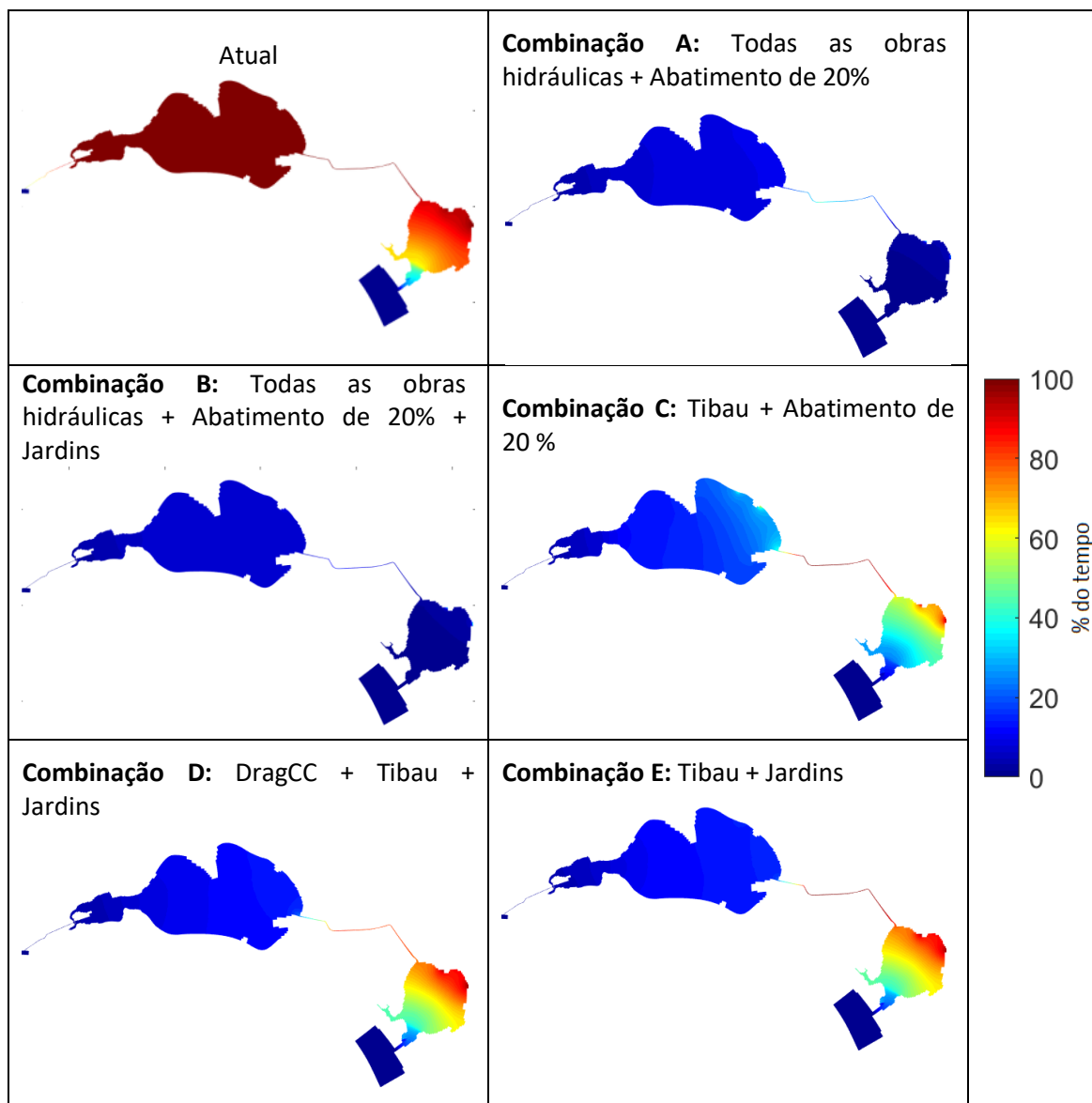


Figura 103: Tempo da permanência de concentrações de fósforo total superiores a 0,124 mg/L no ano todo para o cenário atual e cenários futuros de alterações hidrodinâmicas em conjunto com o abatimento de cargas.

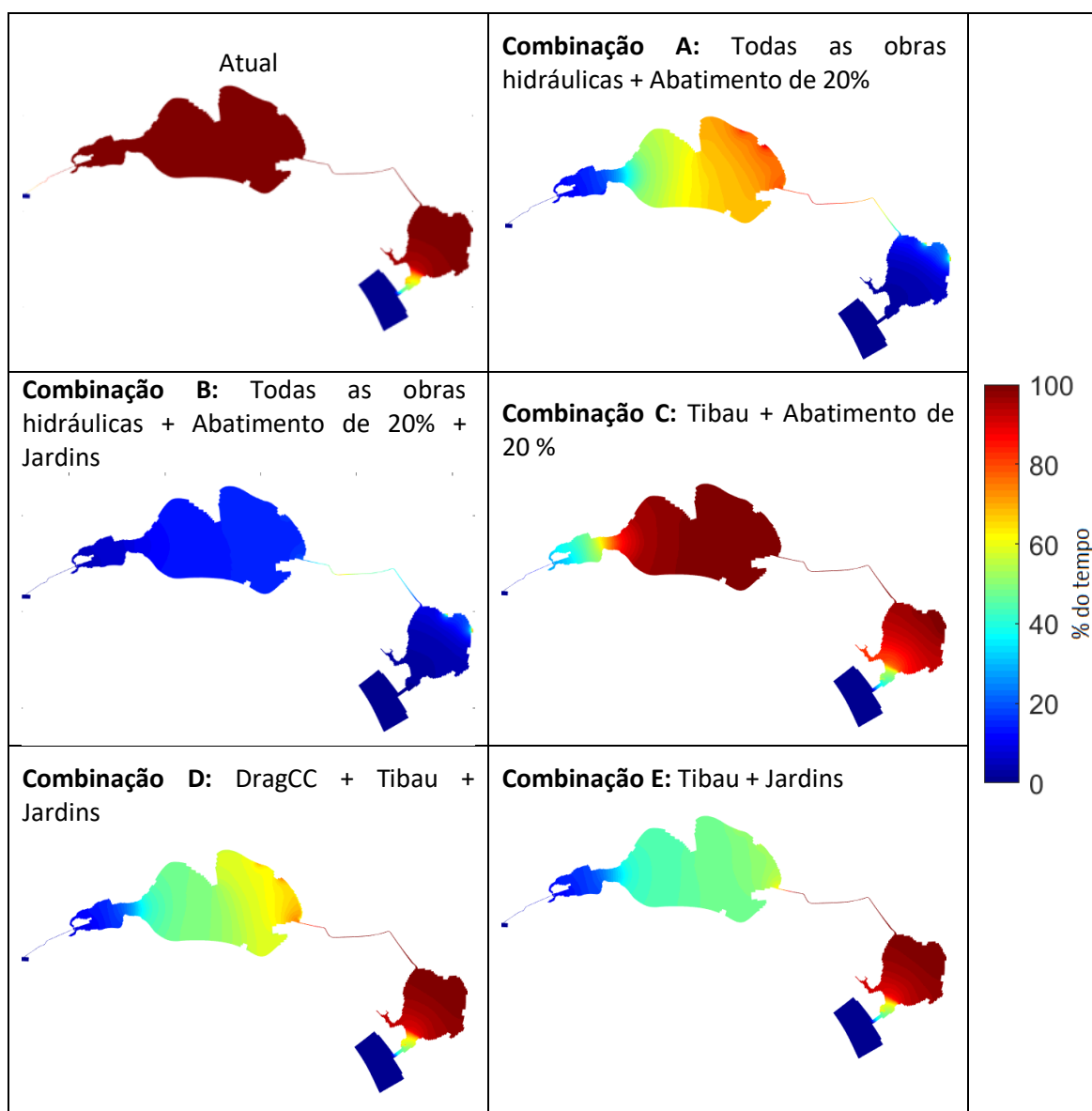


Figura 104: Tempo da permanência de concentrações de fósforo total superiores a 0,093 mg/L no ano todo para o cenário atual e cenários futuros de alterações hidrodinâmicas em conjunto com o abatimento de cargas.

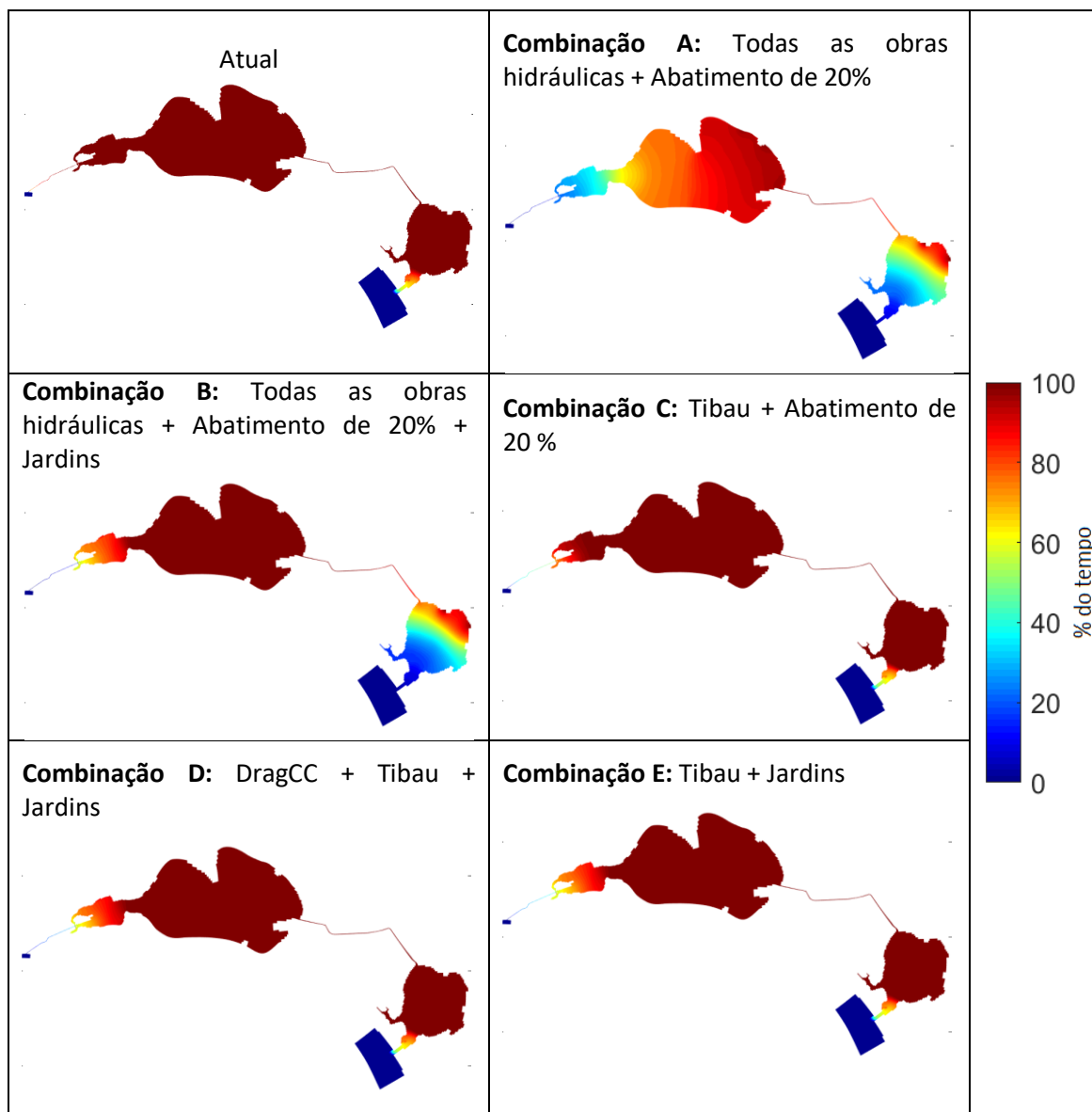


Figura 105: Tempo da permanência de concentrações de fósforo total superiores a 0,062 mg/L no ano todo para o cenário atual e cenários futuros de alterações hidrodinâmicas em conjunto com o abatimento de cargas.

6.3.3. 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, as concentrações de amônia da Lagoa de Piratininga se mantêm acima de 0,4 mg/L em boa parte do tempo, e variam entre 0,4 mg/L a 0,8 mg/L na Lagoa de Itaipu.

O cenário de **combinação A** (abatimento de 20% da carga em conjunto com todas as obras hidráulicas propostas) é 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 106 e Figura 107). Para a Lagoa de Piratininga, o cenário de **combinação A** (abatimento de 20 % das cargas em conjunto com todas as obras hidráulicas) é capaz de reduzir as concentrações a valores inferiores ao limite máximo de classe 1, mesmo durante o evento de chuva intensa de abril (Figura 106).

O cenário de **combinação B** (implantação dos Jardins Filtrantes em conjunto com o abatimento de 20% das cargas e a execução de todas as obras hidráulicas) não promove melhorias na Lagoa de Itaipu comparado ao cenário similar sem Jardins Filtrantes, **combinação A**. Porém, na Lagoa de Piratininga, a inclusão dos Jardins Filtrantes ao cenário de execução de todas as obras hidráulicas e abatimento de 20% das cargas promove um decaimento adicional de 0,03 mg/L de amônia.

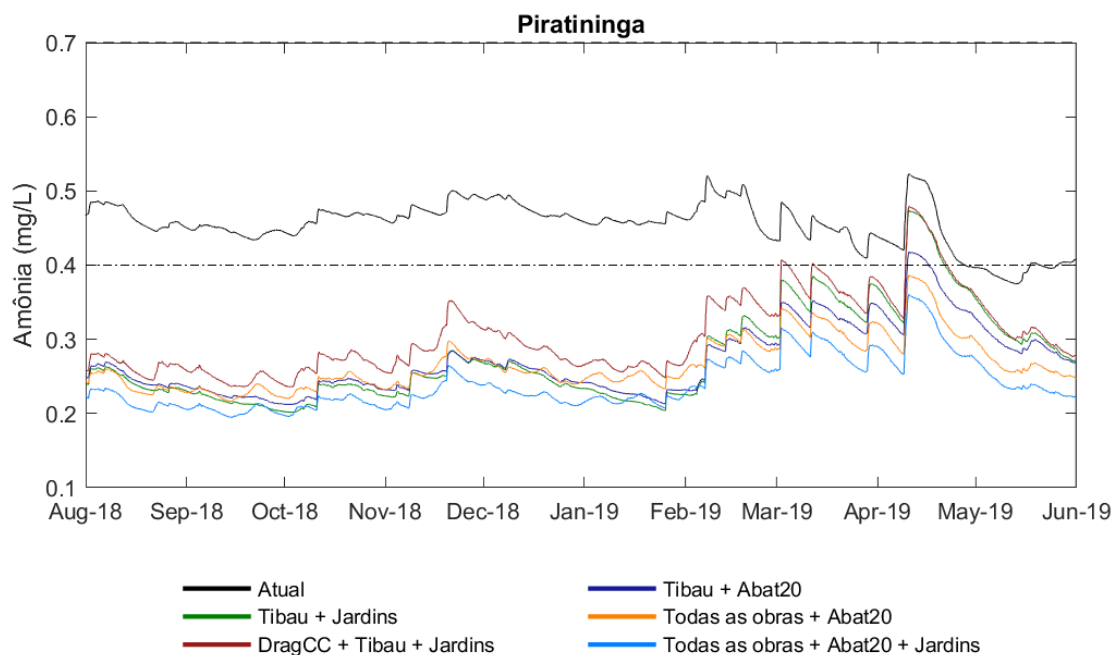


Figura 106: Concentração de amônia simulada no cenário atual e nos cenários de alterações hidrodinâmicas na Lagoa de Piratininga.

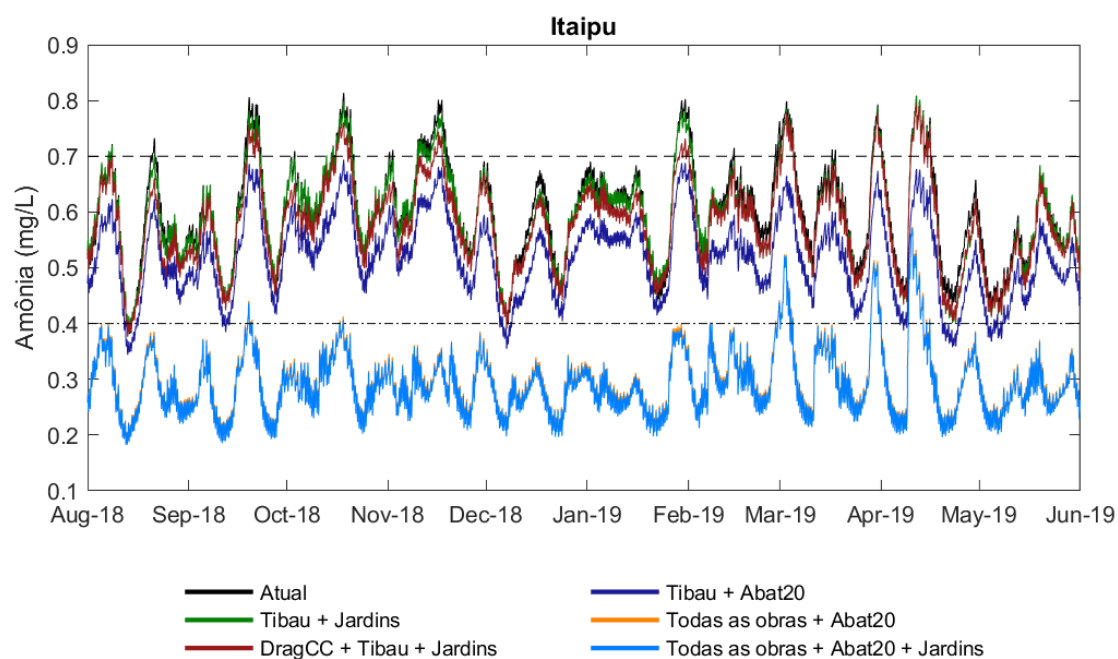


Figura 107: Concentração de amônia simulada no cenário atual e nos cenários de alterações hidrodinâmicas na Lagoa de Itaipu.

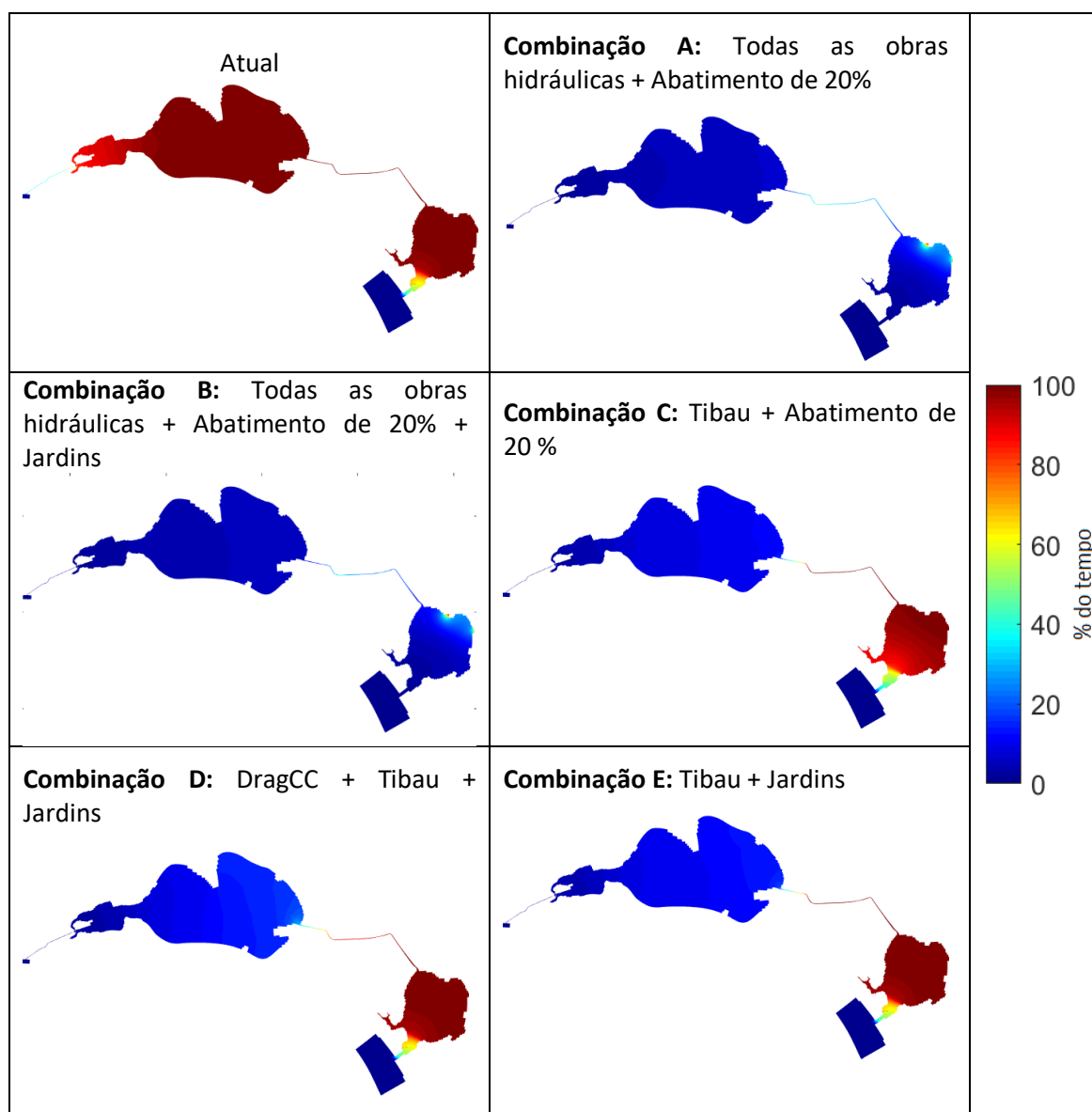


Figura 108: Tempo da permanência de concentrações de amônia superiores a 0,40 mg/L no ano todo para o cenário atual e cenários futuros de alterações hidrodinâmicas em conjunto com o abatimento de cargas.

6.3.4. Considerações dos cenários de alterações hidrodinâmica em conjunto com os abatimentos de cargas nas bacias e seus efeitos sobre a qualidade de água do sistema lagunar Piratininga-Itaipu

Os cenários combinados de abatimentos de cargas com as alterações hidrodinâmicas das obras hidráulicas trazem resultados bastante positivos para a melhoria da qualidade da água do sistema. O enquadramento de cada uma das variáveis depende de medidas diferentes para cada lagoa. No Quadro 12 constam as

obras que seriam suficientes para o enquadramento de cada variável de qualidade da água em cada uma das lagoas.

Quadro 12: Obras suficientes para o enquadramento de cada variável de qualidade da água em cada uma das lagoas.

Condição	Itaipu	Piratininga
COT < 3,0 mg/L	Dragagem do Canal de Itaipu	Desobstrução do Túnel do Tibau + abatimento de 20% da carga das bacias
Amônia < 0,40 mg/L	Dragagem do Canal de Itaipu + abatimento de 20% de carga das bacias	Desobstrução do Túnel do Tibau + abatimento de 20% da carga das bacias
PT < 0,124 mg/L	Dragagem do Canal de Itaipu	Todas as obras hidráulicas + abatimento de 20% da carga das bacias (ou jardins)
PT < 0,093 mg/L *	Atende com todas as obras hidráulicas + abatimento de 20% da carga das bacias	Todas as obras hidráulicas + abatimento de 20% da carga das bacias + Jardins Filtrantes
PT < 0,062 mg/L *	<i>Não é possível alcançar somente com as medidas de alterações hidrodinâmicas e abatimento de cargas propostas.</i>	<i>Não é possível alcançar somente com as medidas de alterações hidrodinâmicas e abatimento de cargas propostas.</i>

* Limites aplicáveis a águas salinas.

Conforme os resultados apresentados, o abatimento de 20% das cargas das bacias em conjunto com todas as obras hidráulicas propostas (**Combinação A**) é suficiente para atingir o enquadramento em do COT e amônia das lagoas em classe 1. Nesse caso, o abatimento de 20% de carga na Lagoa de Piratininga poderia ser alcançado com a implantação dos Jardins, que se mostrou capaz de atender minimamente o abatimento de 20%. Porém, nesse cenário (**Combinação A**) o fósforo permanece alto em ambas as lagoas, com concentrações acima dos limites máximos de classe 1. Nesse cenário, o fósforo na Lagoa de Itaipu permanece acima do limite de Classe 1 para água salina (0,062 mg/L) em mais de 50% do tempo ao longo de um ano. Porém, abaixo do limite de Classe 2 (0,093 mg/L) em praticamente todo o ano. Na Lagoa de Piratininga, a implantação de todas as obras hidráulicas juntamente com o abatimento de 20% da carga da bacia (**Combinação A**) seria suficiente para enquadrar o fósforo em Classe I de água salobra, com valores abaixo de 0,124 mg/L em grande parte do tempo.

Ao considerar o abatimento de 20% em conjunto com a implantação dos Jardins Filtrantes, além da execução de todas as obras hidráulicas, cenário de **Combinação B**, é

previsto um abatimento de carga ainda maior na Lagoa de Piratininga. Esse cenário é importante principalmente para o fósforo, pois no cenário de **Combinação A** esse parâmetro se manteve acima do limite da classe 1, o que seria adequado para esse sistema devido ao seu elevado tempo de residência. O cenário de execução de todas as obras hidráulicas, abatimento de 20% das cargas e implantação dos Jardins Filtrantes (**Combinação B**) reduz ainda mais as concentrações de fósforo total da Lagoa de Piratininga, para valores em torno de 0,10 mg/L na maior parte do tempo.

Desse modo, **o cenário mais favorável à recuperação da qualidade da água é a Combinação B**, que considera a execução de todas as obras hidráulicas em conjunto com o abatimento de 20% de cargas da bacia e implantação dos Jardins Filtrantes. Porém, mesmo com essas intervenções, as concentrações de fósforo permaneceriam ainda muito altas, tipicamente eutróficas, para um ambiente com tempo de residência elevado.

7. SELEÇÃO DAS AÇÕES E MEDIDAS PARA RECUPERAÇÃO DO SISTEMA

As ações propostas visam alcançar a recuperação das lagoas e dos habitats perilagunares, de modo que a lagoa de Piratininga se mantenha com água salobra e a lagoa de Itaipu com água salgada; e que ambas sejam classificadas, em médio prazo, em águas de Classe I segundo a Resolução CONAMA Nº 357/2005, visando aos usos múltiplos sustentáveis, conforme definidos pelo CLIP - Subcomitê da Bacia Hidrográfica das Lagoas de Piratininga e Itaipu:

- 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).

A partir da análise dos resultados das simulações computacionais, apresentadas para diversos cenários de intervenções, apresenta-se o grau de importância de cada obra na recuperação do Sistema Lagunar Piratininga-Itaipu:

1º Desobstrução do Túnel do Tibau;

2º Abatimento de pelo menos 20% da carga poluidora que as lagoas recebem das sub-bacias contribuintes. No caso de Piratininga, haverá a **implantação dos Jardins Filtrantes**, que correspondem a um abatimento de pelo menos 20% das cargas recebidas por essa lagoa.

4º Dragagem do Canal de Itaipu e recuperação dos molhes existentes;

5º Dragagem do Canal de Camboatá.

Recomenda-se ainda:

- ✓ **A dragagem do Canal de Camboatá deve ser realizada somente após a desobstrução do Túnel do Tibau**, pois a dragagem do Canal de Camboatá sem a desobstrução do Túnel do Tibau ocasiona rebaixamento do nível da Lagoa de Piratininga e aumenta a comunicação entre as Lagoas. O cenário de dragagem do Canal de Camboatá sem a desobstrução do Túnel do Tibau resulta em risco de piora da qualidade da água da Lagoa de Piratininga em

função da redução de volume da água e consequente aumento da concentração de poluentes.

- ✓ A dragagem do canal de Itaipu requer manutenção periódica da batimetria para garantir o efeito hidrodinâmico e sobre a qualidade de água. A frequência das **dragagens de manutenção** no Canal de Itaipu pode ser reduzida com o **prolongamento dos molhes** em até 140m, tal como apresentado no relatório “MODELAGEM COMPUTACIONAL DE MORFODINÂMICA COSTEIRA: ESTUDO DE ALTERNATIVAS DE INTERVENÇÃO NOS MOLHES DE FIXAÇÃO DA DESEMBOCADURA DA LAGUNA DE ITAIPU”.
- ✓ Sugere-se **manter a altura da comporta do Túnel do Tibau** conforme o projeto. Caso haja um aumento das cotas das comportas, incluindo a comporta do Canal de Camboatá, haverá aumento dos níveis d'água, resultando em aumento do tempo de residência e maiores riscos de enchentes.
- ✓ Implantação de um programa intensificado no combate às ligações clandestinas de esgoto – “**Programa Se Liga**”, visto que o município de Niterói possui mais de 95% de sua área urbana atendida por rede de esgoto e grande parte da poluição das lagoas vem sendo causada por aporte de esgoto clandestino. Dessa forma, o abatimento de cargas considerado nas simulações, pode ser alcançado por meio de maior controle das ligações clandestinas de esgoto na drenagem urbana, além da implantação dos **Jardins Filtrantes**. Os **Jardins Filtrantes** possuem capacidade de abater pelo menos 20% das cargas poluidoras da Lagoa de Piratininga, mas não abatem as cargas poluidoras da Lagoa de Itaipu;
- ✓ Implantação e manutenção de **projetos de educação e conscientização ambiental**, pois são instrumentos importantes no controle social da qualidade ambiental.

Além do efeito positivo na qualidade da água das lagoas, como diminuição do tempo de residência e redução das concentrações dos poluentes, a execução das obras propostas traz duas grandes alterações para o sistema. A primeira e mais importante é o aumento da salinidade em função da desobstrução do Túnel do Tibau e da dragagem

do Canal de Itaipu, que poderia promover mudanças na icitiofauna e a biodiversidade local.

Outra importante modificação causada pelas obras seria a diminuição no nível d'água das lagoas, e conseqüente redução da área do espelho d'água, principalmente nos instantes de nível mínimo. Na Lagoa de Piratininga, a execução de todas as obras aumentaria as áreas secas em 7,9 ha 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 com permanência de 20% ao longo de todo o ano, as quais permaneceriam secas de forma ininterruptas por duas semanas.

Em Itaipu a execução de todas as obras aumentaria a região de áreas secas nas margens para 8,8 ha, o que representa 8% da área da grade de cálculo. No cenário atual, as áreas secas na grade de modelagem computacional de Itaipu foram de 0,9 ha (0,86% da área modelada). Com a implantação de todas as obras, as áreas secas nas margens da Lagoa de Itaipu permaneceriam secas por até 20% do tempo ao longo de um ano. No entanto, estão células secas seriam molhadas a cada 6 horas, ou seja, a cada ciclo de maré, pois nessa lagoa o nível d'água varia diretamente em função da oscilação do nível do mar. Acredita-se que essa redução do nível da água não afetaria significativamente a biota aquática e a biodiversidade, somente a cota de vegetação ripária.

Os resultados indicam que a maioria das variáveis de qualidade de água se enquadraria em Classe I com a adoção do abatimento de pelo menos 20% das cargas em conjunto com a implantação dos Jardins Filtrantes e a execução de todas as obras hidráulicas propostas, com exceção das concentrações de fósforo que continuariam elevadas. Considera-se, assim, importante o abatimento de 20% de carga nas bacias de Piratininga, em conjunto com a implantação Jardins Filtrantes, para que haja maior redução da carga de fósforo nessa lagoa. Nesse cenário a concentração de fósforo se manteria mais próxima ao valor desejável, ainda que também não alcance o enquadramento do fósforo em Classe 1. A sobreposição de ações que visam reduzir a carga de fósforo na Lagoa de Piratininga é importante para diminuir a sobrecarga nos Jardins Filtrantes e ter maior garantia de abatimento, caso haja falha em algum dos sistemas. Sabe-se que os Jardins Filtrantes não são projetados para tratar as cargas em

eventos de chuva, mas essas cargas podem ser reduzidas por meio de maior controle e ampliação do sistema de esgotamento sanitário das bacias. É de extrema importância que se garanta expressiva e constante redução dos aportes de fósforo na Lagoa de Piratininga devido ao seu elevado tempo de residência, que mesmo com a implantação de todas as obras hidráulicas propostas seria ainda superior a 3 meses. Sendo assim, recomenda-se uma análise conservadora sobre os limites de fósforo, especialmente em Piratininga. Os limites máximos de fósforo 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 apenas um único limite de fósforo para cada classe, independentemente do tempo de residência, tal como mostra o Quadro 13. Esta é uma limitação da referida resolução e que deve ser ponderada, já que em ambientes estuarinos estrangulados ou com alta heterogeneidade espacial, como 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 (Quadro 13).

Quadro 13: 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

Com a implantação de todas as obras hidráulicas propostas prevê-se que, na média, a Lagoa de Piratininga se caracterizará como ambiente de água salobra, com limite de 0,124 mg/L para Classe I. Porém, em períodos de estiagem e maré elevada, a salinidade na Lagoa de Piratininga poderá atingir valores superiores a 30 ‰. Dessa forma, não se recomenda considerar o limite de fósforo total para água salobra na

Lagoa de Piratininga, pois além de ser mais permissivo, é previsto que a salinidade dessa lagoa também alcance níveis salinos, cujos limites são mais restritivos. Mesmo considerando a implantação de todas as obras hidráulicas propostas com o abatimento de 20% das cargas e também a implantação dos Jardins Filtrantes, estima-se que o valor de fósforo se aproxime de 0,08 mg/L na maior parte do tempo, o que ainda estaria acima do limite máximo para águas salinas de Classe I (0,062 mg/L).

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 considerados ambientes eutróficos (Figura 109). E, portanto, propensos à ocorrência de florações de cianobactérias potencialmente tóxicas, conforme observa-se 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 109: 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 aplicabilidade do limite máximo de concentração de fósforo total de 0,04 mg/L para efeitos de controle de eutrofização na Lagoa de Piratininga. Desta forma, recomenda-se que, além das ações já discutidas acima, seja realizado o **monitoramento das condições tróficas**, e ainda ações para **redução ou**

abatimento do fósforo através de dragagem do lodo, rico em matéria orgânica, ou ações de remediação in situ.

8. 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.
- 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.
- 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; CORREA, 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.
- HÅKANSON, L., 2006: Suspended particulate matter in lakes, rivers and marine systems. – The Blackburn Press, New Jersey, 319 pp.
- HÅKANSON, L., JANSSON, M. 1983. Principles of Lake Sedimentology. The Blackburn Press, New Jersey, 316 pp.
- HÅKANSON, L., BOULION V. 2002. The lake foodweb—modelling predation and abiotic/biotic interactions. Backhuys, Leiden, 344 p.
- 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.
- 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.
- OECD: Eutrophication of Waters. Monitoring, Assessment and Control. — 154 pp. Paris: Organisation for Economic Co-Operation and Development 1982.
- 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>>.

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.

9. ANEXOS

- **Figura 110: Nível d'água na Lagoa de Piratininga durante o período simulado (365 dias), de acordo com os cenários de alterações hidrodinâmicas.**
- **Figura 111: Nível d'água na Lagoa de Piratininga durante o período simulado (365 dias) para o cenário HIDRO 01.**
- **Figura 112: Nível d'água na Lagoa de Piratininga durante o período simulado (365 dias) para o cenário HIDRO 02.**
- **Figura 113: Nível d'água na Lagoa de Piratininga durante o período simulado (365 dias) para o cenário HIDRO 03.**
- **Figura 114: Nível d'água na Lagoa de Piratininga durante o período simulado (365 dias) para o cenário HIDRO 04.**
- **Figura 115: Nível d'água na Lagoa de Piratininga durante o período simulado (365 dias) para o cenário HIDRO 05.**
- **Figura 116: Nível d'água na Lagoa de Piratininga durante o período simulado (365 dias) para o cenário HIDRO 06.**
- **Figura 117: Nível d'água na Lagoa de Itaipu durante o período simulado (365 dias) para o cenário HIDRO 01.**
- **Figura 118: Nível d'água na Lagoa de Itaipu durante o período simulado (365 dias) para o cenário HIDRO 02.**
- **Figura 119: Nível d'água na Lagoa de Itaipu durante o período simulado (365 dias) para o cenário HIDRO 03.**
- **Figura 120: Nível d'água na Lagoa de Itaipu durante o período simulado (365 dias) para o cenário HIDRO 04.**
- **Figura 121: Nível d'água na Lagoa de Itaipu durante o período simulado (365 dias) para o cenário HIDRO 05.**
- **Figura 122: Nível d'água na Lagoa de Itaipu durante o período simulado (365 dias) para o cenário HIDRO 06.**

Piratininga

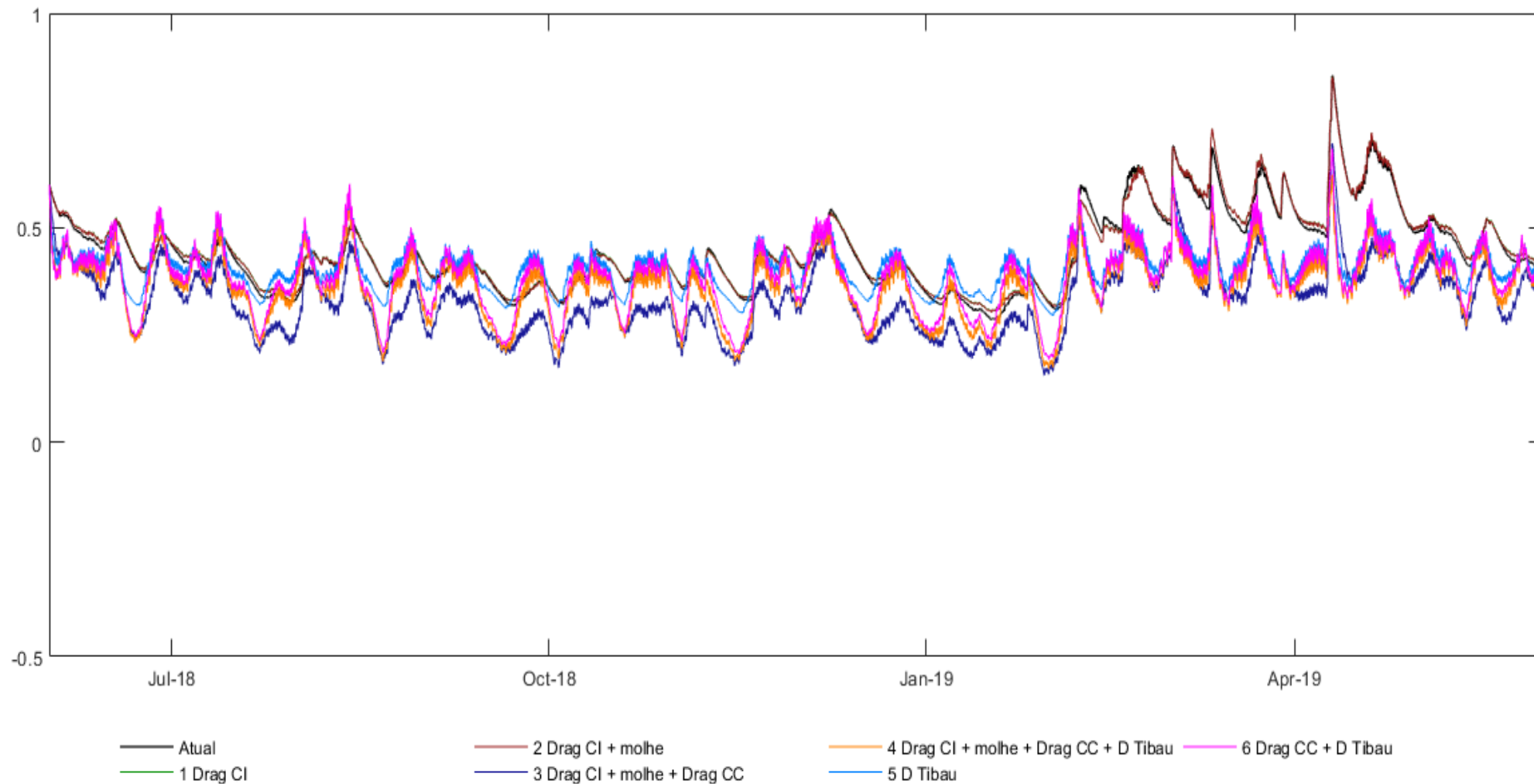


Figura 110: Nível d'água na Lagoa de Piratininga durante o período simulado (365 dias), de acordo com os cenários de alterações hidrodinâmicas.

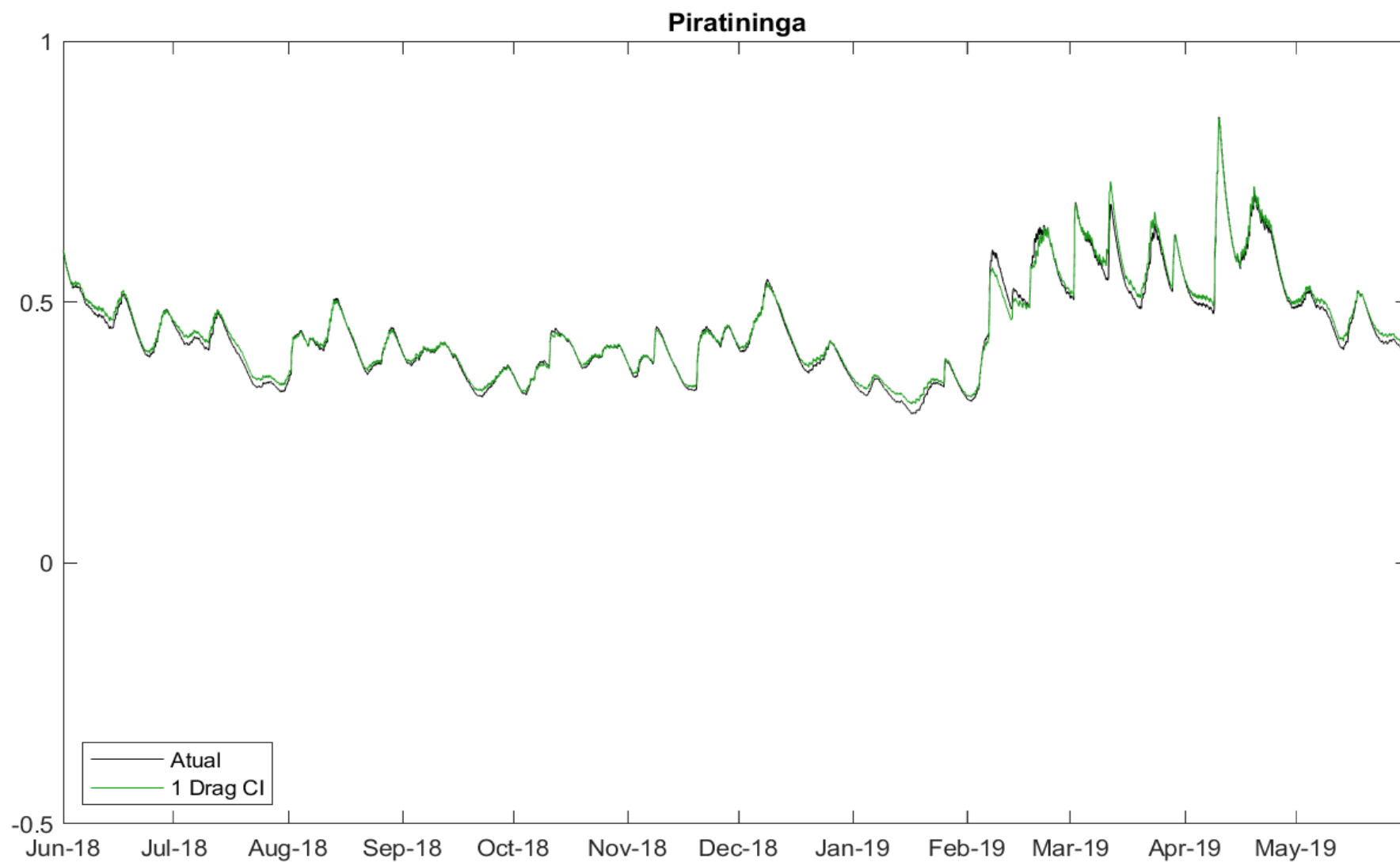


Figura 111: Nível d'água na Lagoa de Piratininga durante o período simulado (365 dias) para o cenário HIDRO 01.

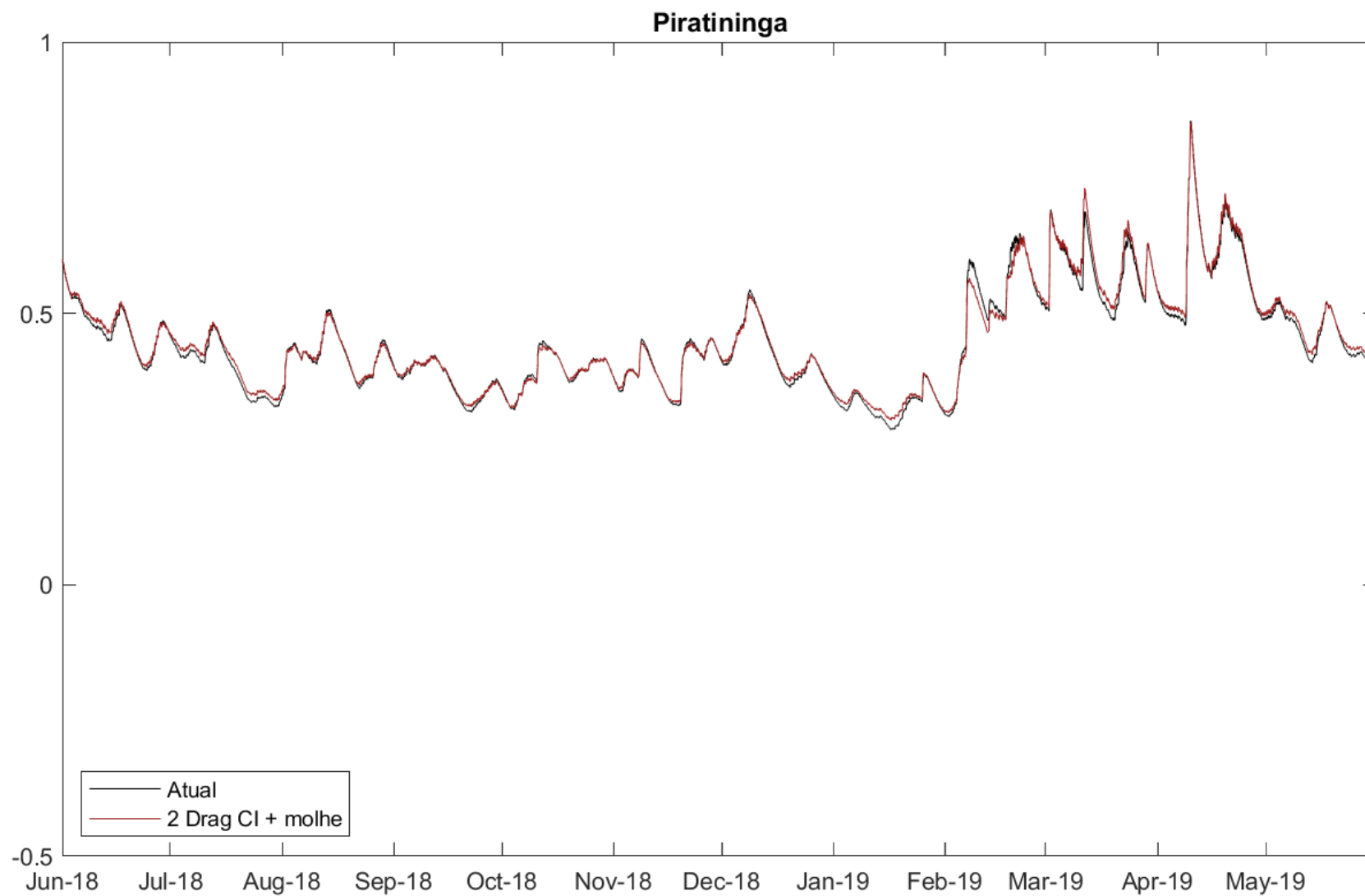


Figura 112: Nível d'água na Lagoa de Piratininga durante o período simulado (365 dias) para o cenário HIDRO 02.

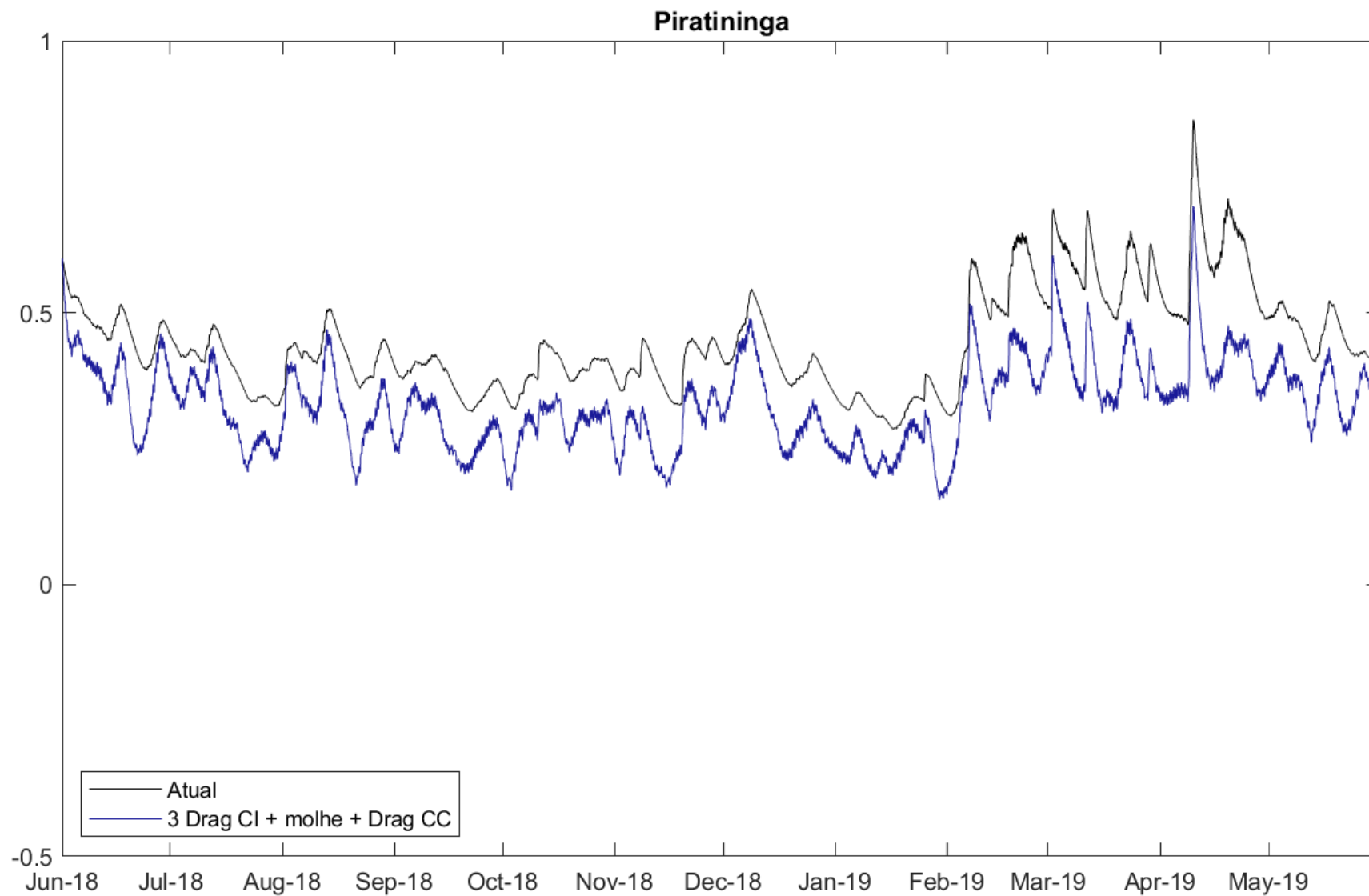


Figura 113: Nível d'água na Lagoa de Piratininga durante o período simulado (365 dias) para o cenário HIDRO 03.

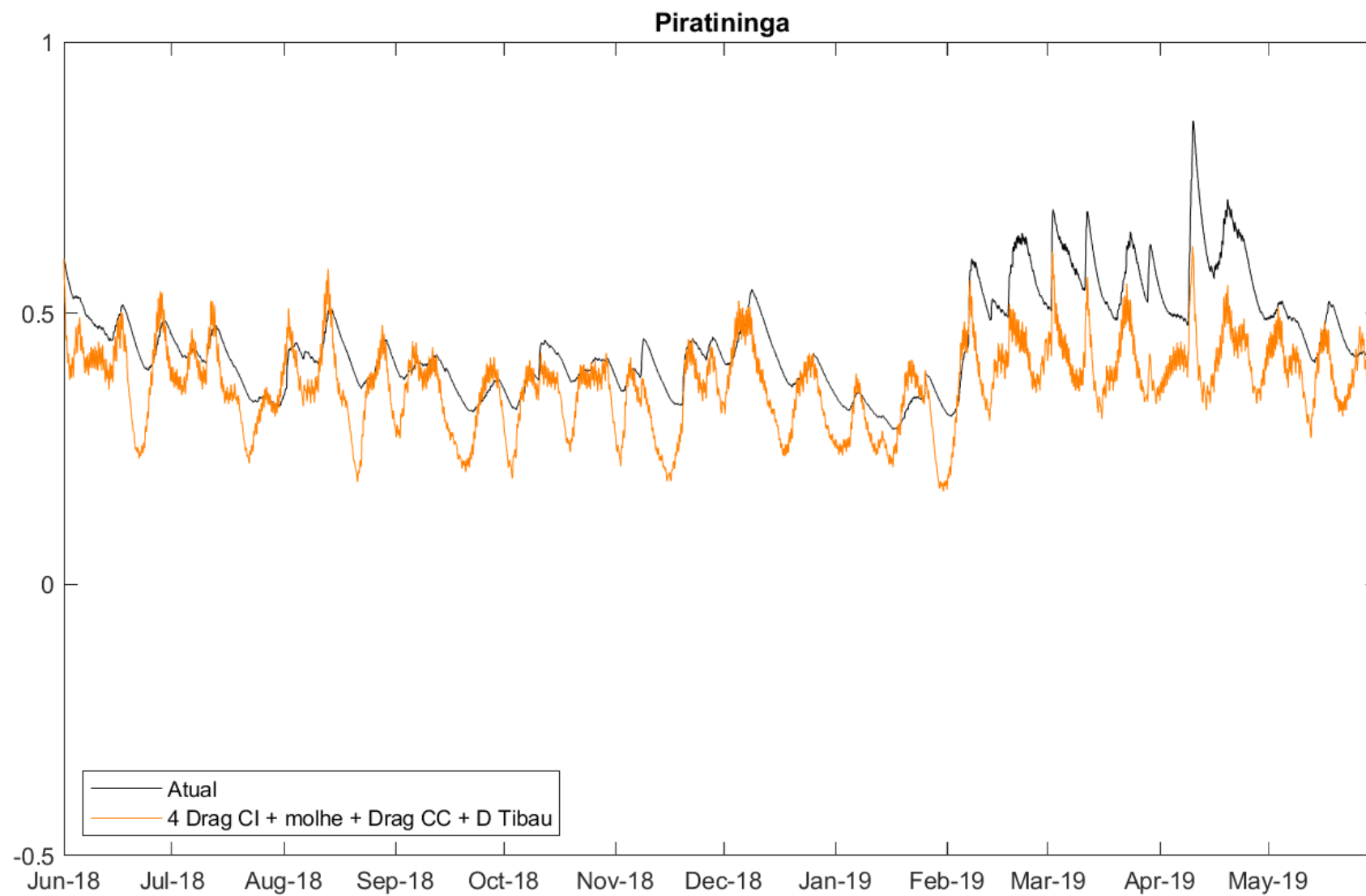


Figura 114: Nível d'água na Lagoa de Piratininga durante o período simulado (365 dias) para o cenário HIDRO 04.

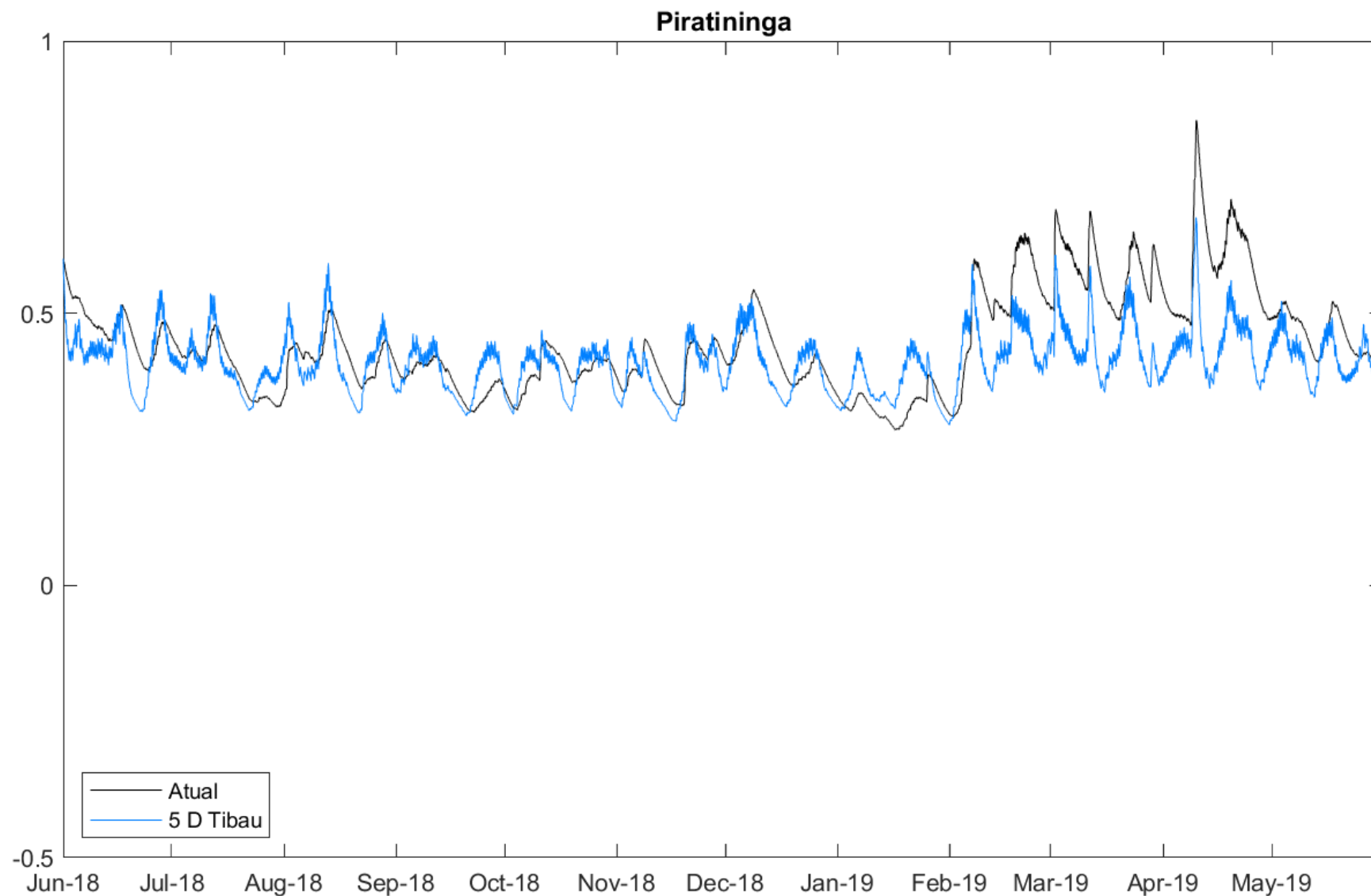


Figura 115: Nível d'água na Lagoa de Piratinga durante o período simulado (365 dias) para o cenário HIDRO 05.

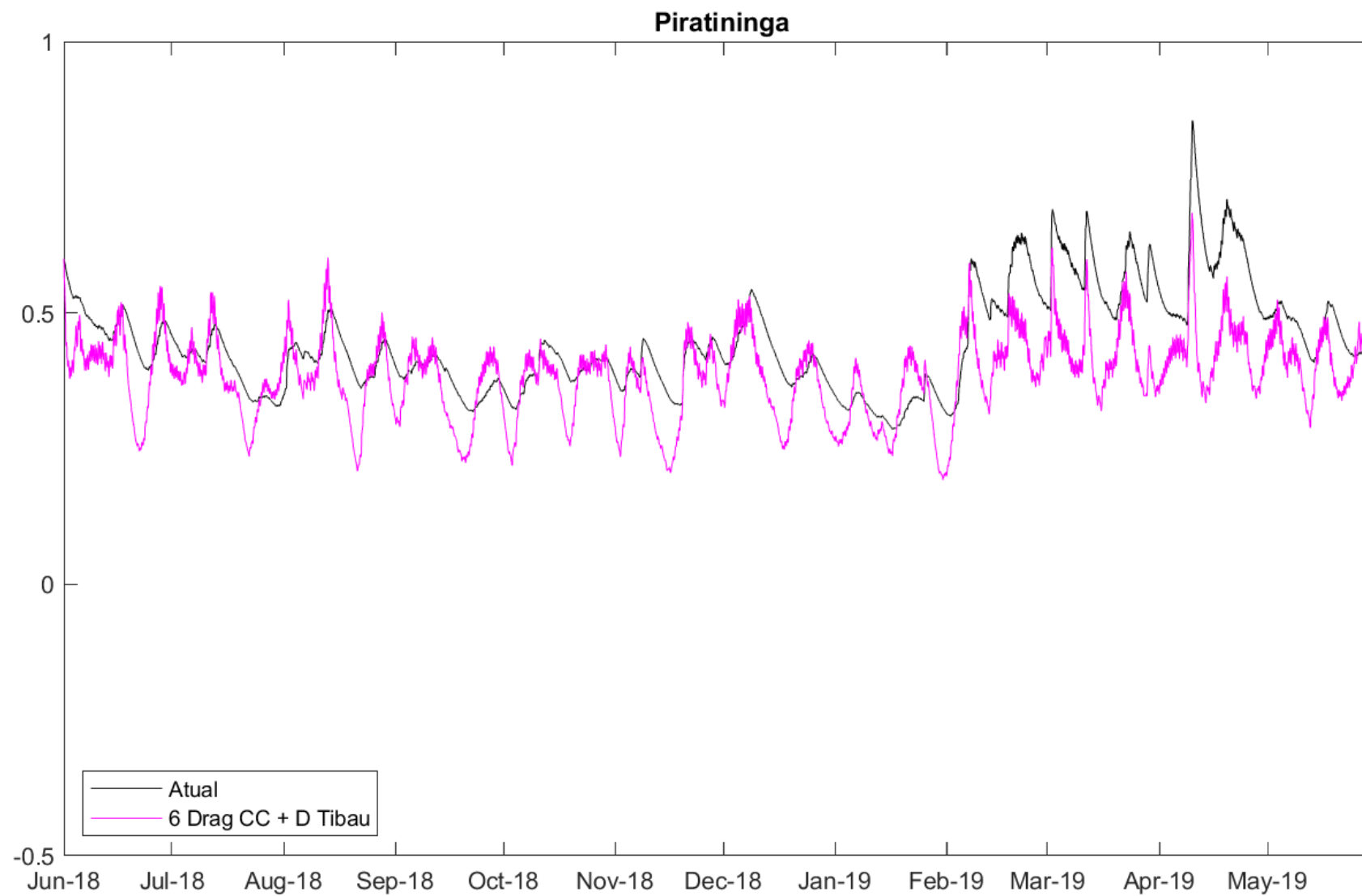


Figura 116: Nível d'água na Lagoa de Piratininga durante o período simulado (365 dias) para o cenário HIDRO 06.

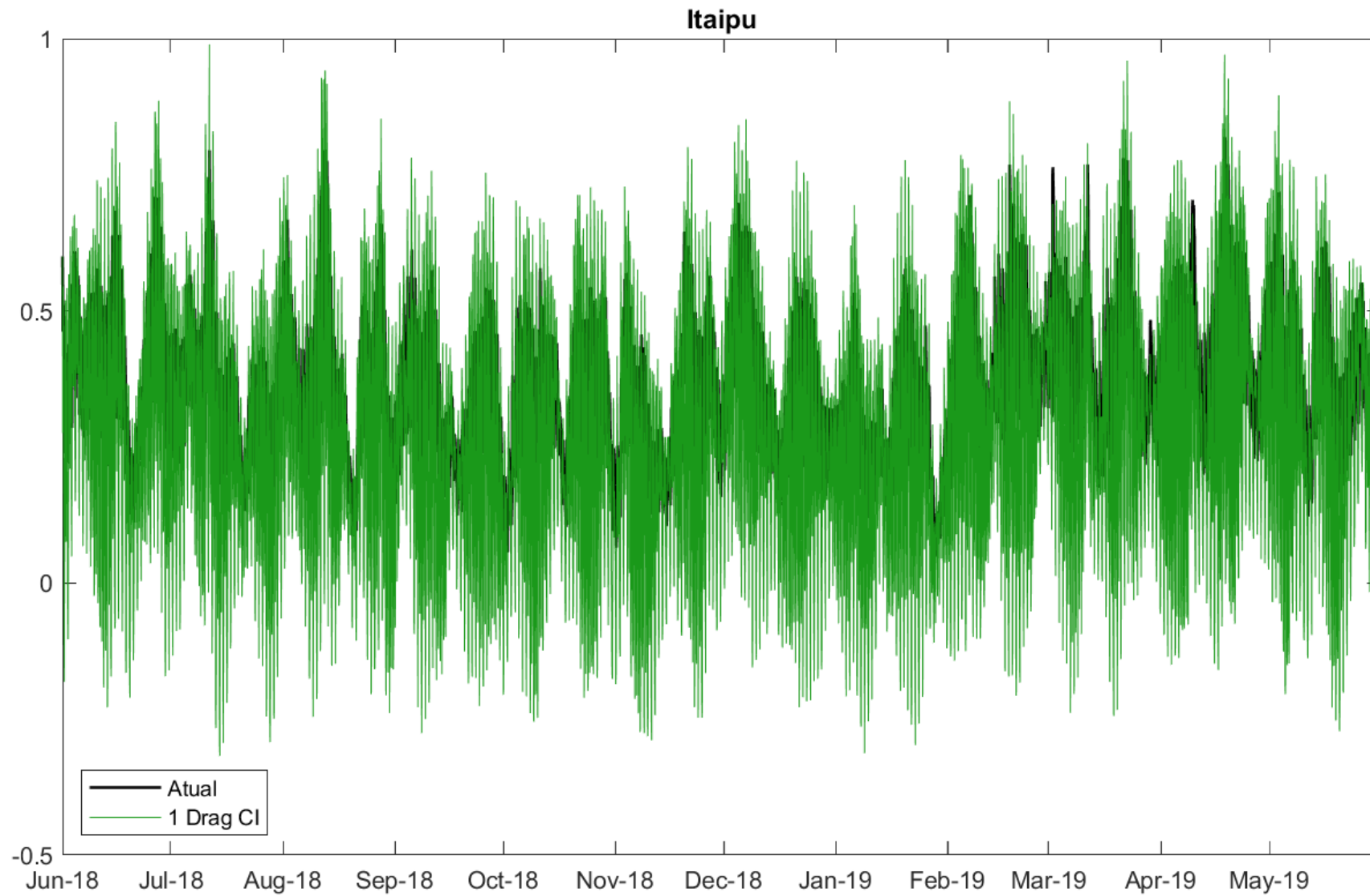


Figura 117: Nível d'água na Lagoa de Itaipu durante o período simulado (365 dias) para o cenário HIDRO 01.

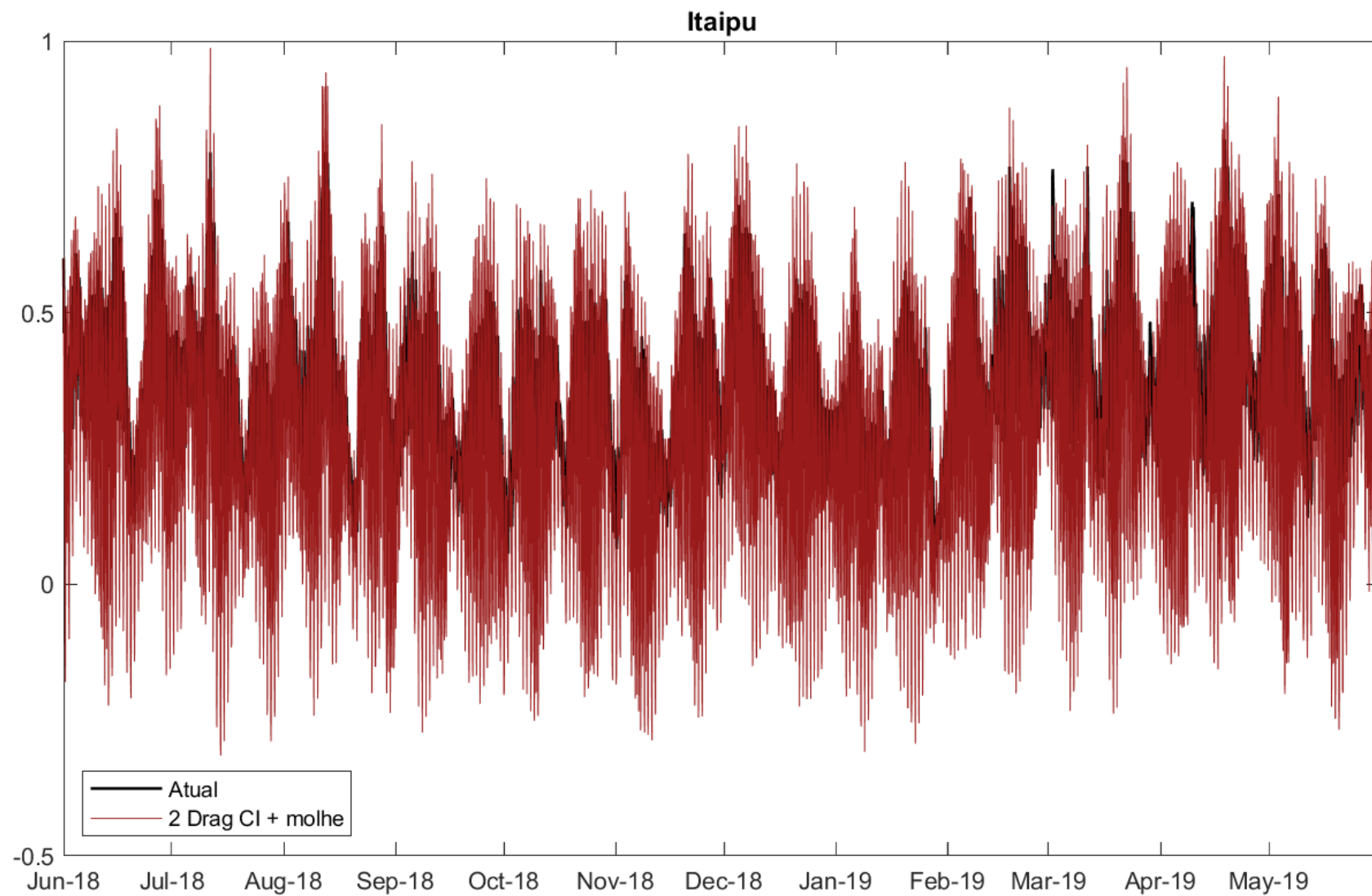


Figura 118: Nível d'água na Lagoa de Itaipu durante o período simulado (365 dias) para o cenário HIDRO 02.

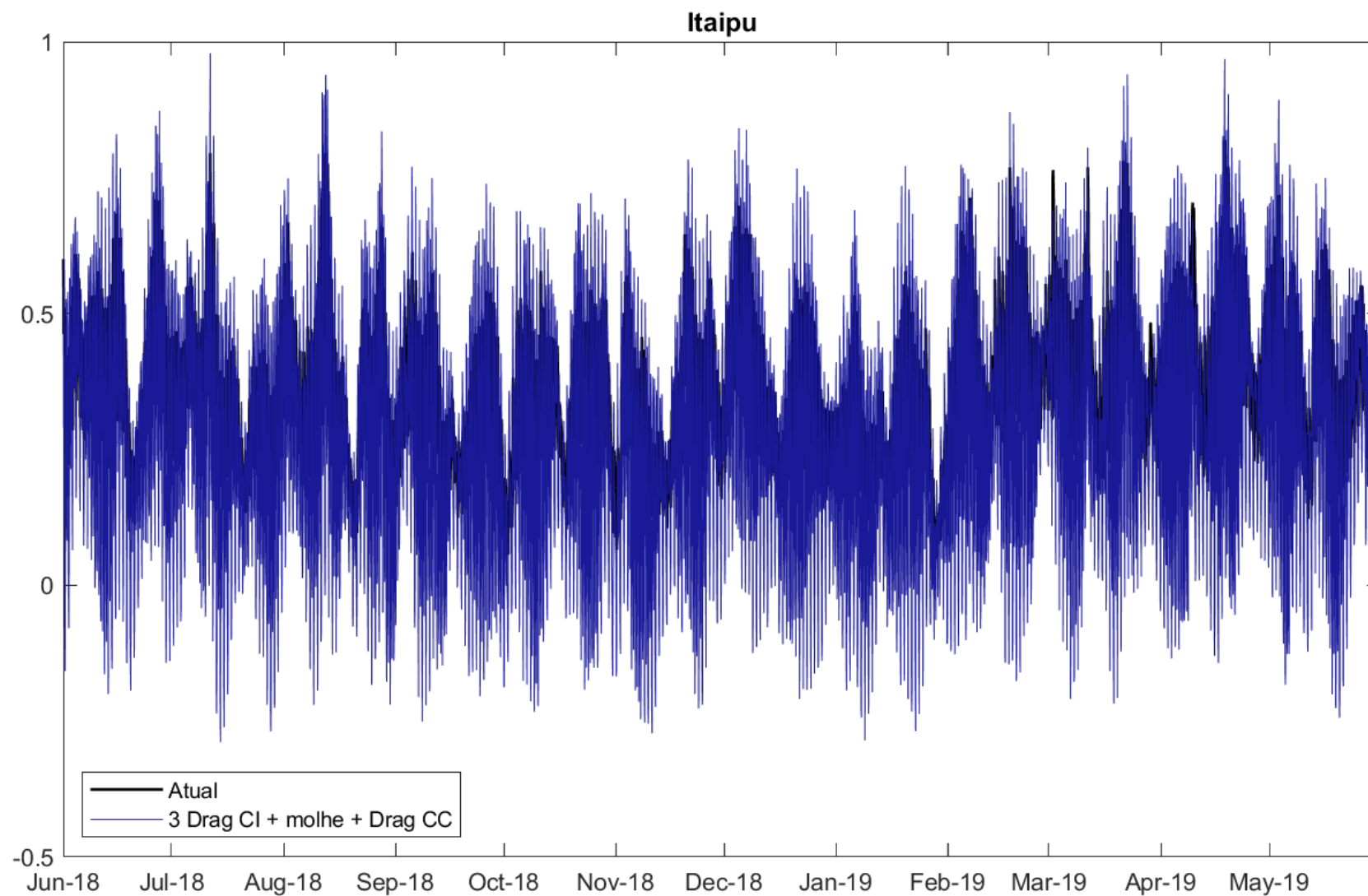


Figura 119: Nível d'água na Lagoa de Itaipu durante o período simulado (365 dias) para o cenário HIDRO 03.

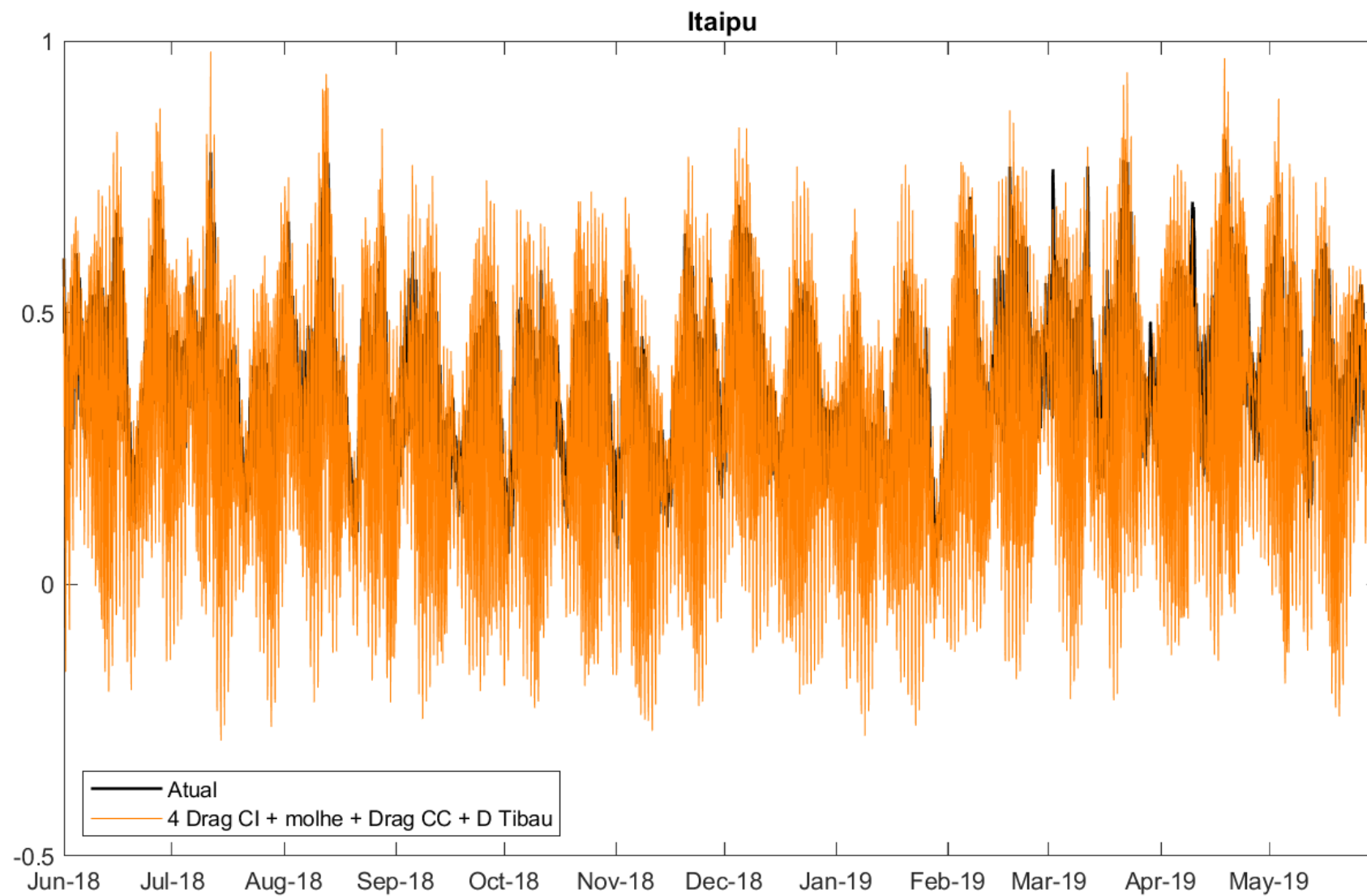


Figura 120: Nível d'água na Lagoa de Itaipu durante o período simulado (365 dias) para o cenário HIDRO 04.

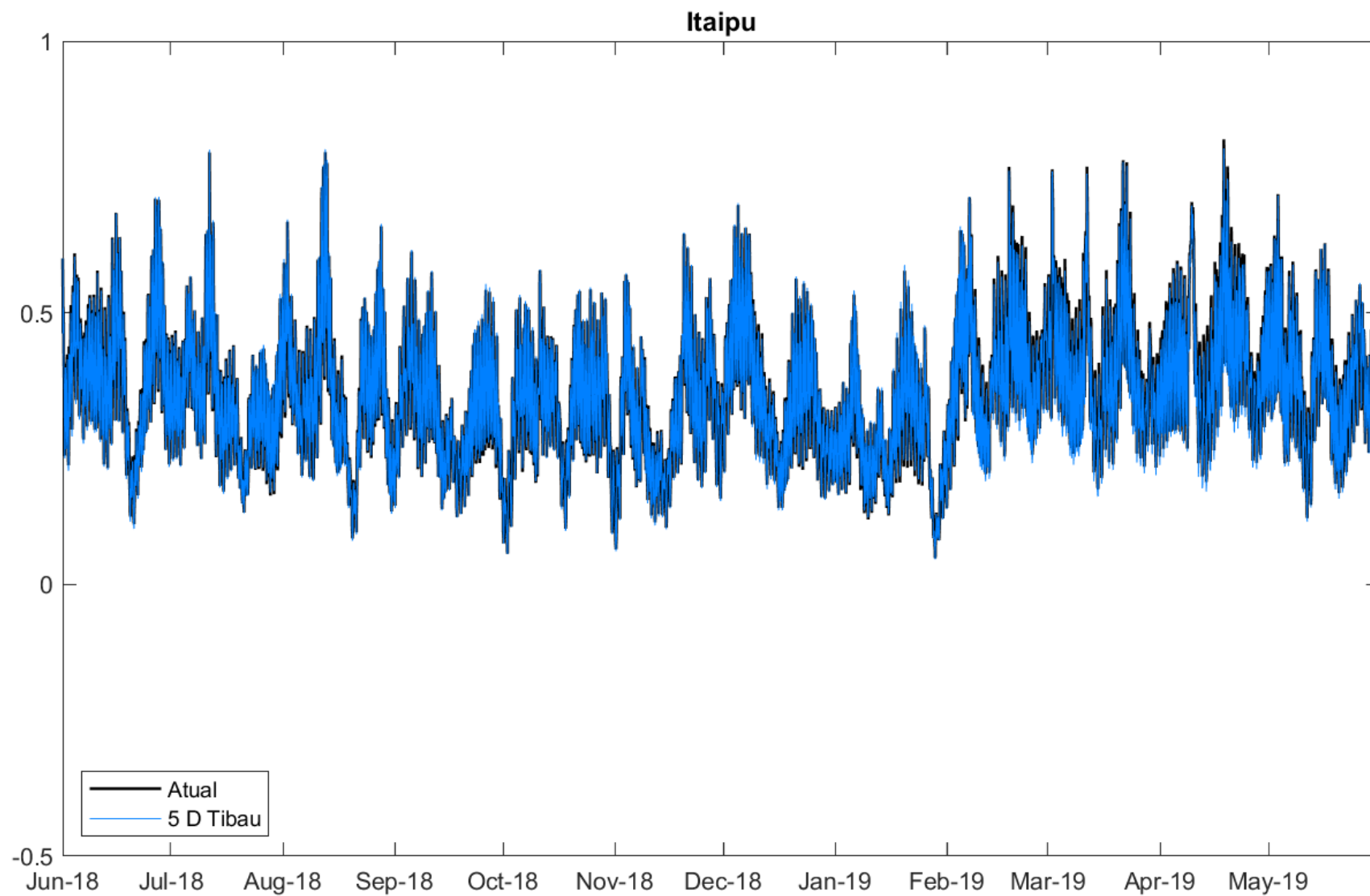


Figura 121: Nível d'água na Lagoa de Itaipu durante o período simulado (365 dias) para o cenário HIDRO 05.

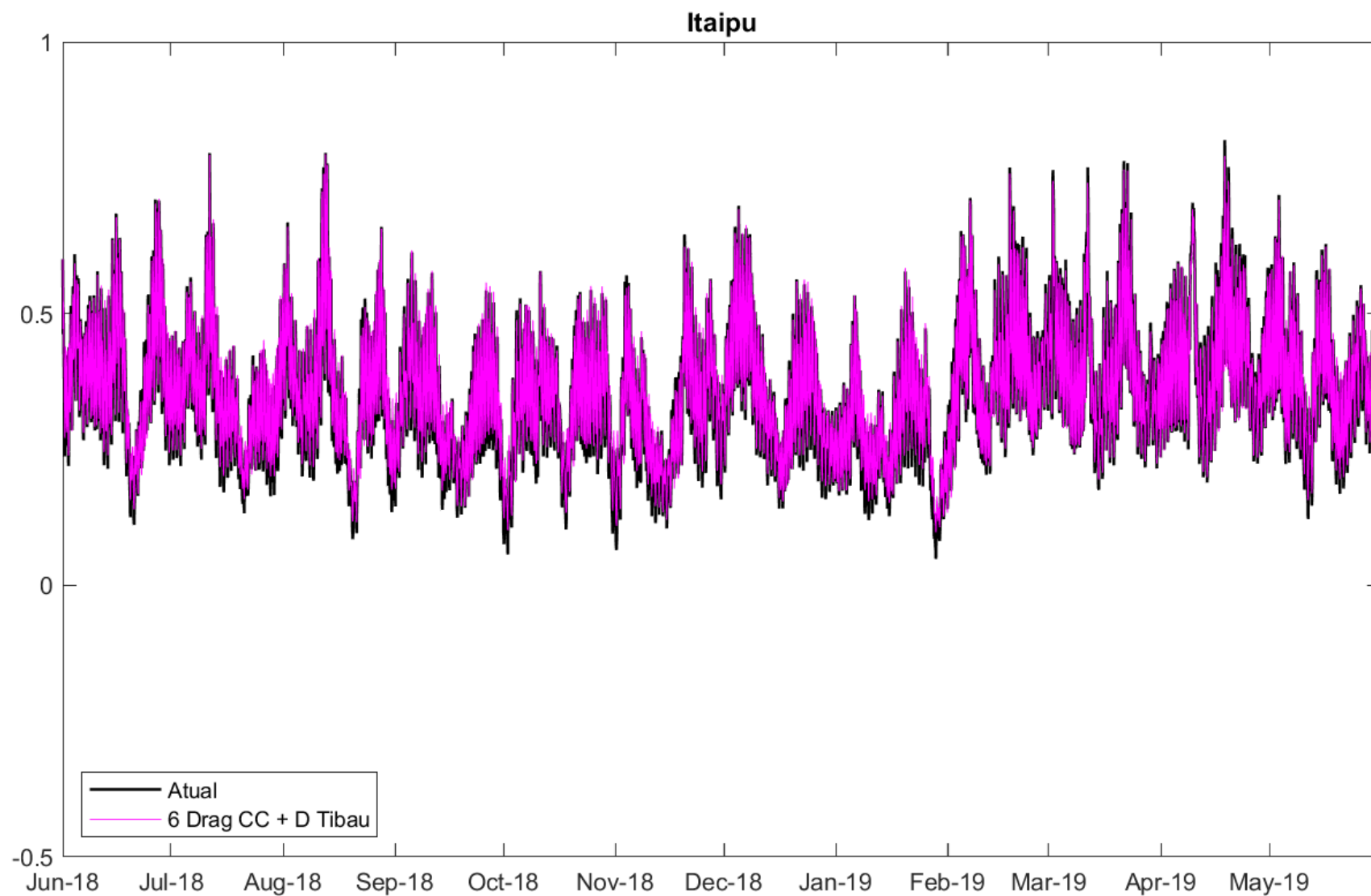


Figura 122: Nível d'água na Lagoa de Itaipu durante o período simulado (365 dias) para o cenário HIDRO 06.