

IV-1131 - AVALIAÇÃO HIDRODINÂMICA E DE QUALIDADE DA ÁGUA DAS LAGOAS NOVA E JUPARRANÃ E SUA CONEXÃO COM O RIO DOCE

Verônica Silveira de Andrade ⁽¹⁾

Engenheira Ambiental e Sanitarista pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Mestre e Doutoranda em Eng. Civil – Recursos Hídricos e Meio Ambiente pelo Programa de Eng. Civil do COPPE/UFRJ. Pesquisadora no Laboratório SisBaHiA do Programa de Eng. Oceânica do COPPE/UFRJ. Engenheira Consultora na ABdoB-Associados Baías do Brasil (www.abdob.com.br).

Melina Marsaro Alencar ⁽²⁾

Bacharel em Ciências Biológicas e Pós-graduada em Perícia, Auditoria e Gestão Ambiental. Coordenadora do Programa de Manejo de Rejeitos da Fundação Renova.

Vilma M. Cavinatto Rivero ⁽³⁾

Licenciada e Bacharel em Ciências Biológicas e Mestre em Ecologia/Ecossistemas Aquáticos pelo Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo (1991). Diretora da empresa Econsult Estudos Ambientais, Guarujá/SP (www.econsultt.com.br).

Guilherme de Lima ⁽⁴⁾

Engenheiro Civil, FECA, 1994 – 1999. Mestrado em Engenharia Civil (Hidráulica e Saneamento), Universidade de São Paulo – EESC/USP, 2000-2002. Doutorado em Engenharia Civil (Hidráulica e Saneamento), Universidade de São Paulo - EESC/USP, 2003-2007. Pós-Doutorado em Engenharia Civil (Recursos Hídricos) – UFU, 2015-2016. Diretor da NHC Brasil Consultores.

Paulo Cesar Colonna Rosman ⁽⁵⁾

Engenheiro Civil/Recursos Hídricos - Poli/UFRJ. Ph.D. em Engenharia Costeira - Civil Eng. pelo. MIT - Massachusetts Institute of Technology. Professor Titular do Departamento de Recursos Hídricos e Meio Ambiente da Escola Politécnica/UFRJ e da Área de Engenharia Costeira & Oceanográfica da COPPE/UFRJ.

Endereço⁽¹⁾: Av. Athos da Silveira Ramos, 149 - Bloco C, 2 andar – Sl 209. Cidade Universitária da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, 21941-909 - Brasil - Tel:+55 (21) 3938-8755 - e-mail: veronicaandrade@coc.ufrj.br

RESUMO

Após o rompimento da barragem de rejeitos de Fundão, foi instituída uma medida emergencial em dezembro de 2015 para impedir o contato das águas do rio Doce com as lagoas Nova e Juparanã, no Estado do Espírito Santo. Para tanto, foram construídas ensecadeiras nos rios Bananal e Pequeno, conexões dessas lagoas com o rio Doce respectivamente, cujas estruturas são alteadas em épocas de cheias mais intensas.

Em função da recuperação que o rio Doce vem demonstrando ao longo do tempo, este estudo apresenta uma avaliação da hidrodinâmica e da qualidade da água das lagoas e de suas conexões para investigar se o contato entre esses ambientes e o rio Doce ainda deve ser evitado. A abordagem do estudo inclui: (i) investigação de um grande conjunto de dados obtidos a partir de programas existentes de monitoramento de água e sedimentos e (ii) simulações utilizando técnicas de modelagem numérica bidimensional (2DH) de condições hidrodinâmicas para eventos extremos de inundação no rio Doce (períodos de retorno de 10, 50 e 100 anos) e condições de qualidade da água, incluindo a avaliação dos seguintes parâmetros: sólidos suspensos totais (SST), alumínio dissolvido, arsênio total, cádmio total, chumbo total, cromo total, ferro dissolvido e manganês total, bem como oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), nitrogênio total e fósforo total.

As simulações indicam que apenas os metais alumínio dissolvido, ferro dissolvido e manganês total apresentariam concentrações acima dos valores máximos permitidos (V.M.P.) determinados pela Resolução CONAMA357/2005 para águas doces Classe 2, durante picos de inundação, com a área impactada restrita à região sul das lagoas, nas imediações das respectivas conexões. Os resultados deste estudo demonstram que não há mais necessidade de evitar o contato entre as águas do rio Doce e das lagoas Nova e Juparanã. Recomenda-se a remoção definitiva das ensecadeiras existentes nos rios Bananal e Pequeno e o acompanhamento da qualidade da água através dos programas de monitoramento atualmente desenvolvidos abrangendo os ambientes fluvial e lacustre.

PALAVRAS-CHAVE: Qualidade da água; Modelagem numérica; Lagoa Juparanã; Lagoa Nova; rio Doce.

INTRODUÇÃO

A barragem de Fundão no município de Mariana (MG) se rompeu em 05/11/2015, liberando cerca de 43,7 Mm³ (milhões de metros cúbicos) de rejeitos de mineração, dos quais cerca de 39,2 Mm³ alcançaram o sistema fluvial do rio Doce. Parte desse material foi retido nos reservatórios das barragens das usinas hidrelétricas existentes no seu curso, enquanto a pluma de sólidos que ultrapassou as barragens alcançou o município de Linhares (ES) e chegou ao oceano aproximadamente 16 dias após o evento (FERNANDES et al., 2016 e GOLDER, 2017).

No baixo curso do rio Doce, em Linhares, ocorre um notável complexo lagunar, com destaque para as lagoas Nova e Juparanã, as quais são interligadas ao rio Doce pelos canais dos rios Bananal e Pequeno, respectivamente (Figura 1). Normalmente, o escoamento é das lagoas para o rio Doce, mas, em situações específicas nas cheias, quando o nível de água nas lagoas é mais baixo que o nível de água no rio Doce, o fluxo se inverte e ocorre a intrusão das águas deste rio nos ambientes lacustres. Um fator importante é que tanto o rio Pequeno como a lagoa Nova possui pontos de captação de água a cargo do Sistema de Abastecimento de Água e Esgoto de Linhares (SAAE).

Para evitar o contato dos rejeitos transportados pelo rio Doce com as águas desses sistemas lagunares, em dezembro de 2015, por decisão judicial, foram construídos barramentos emergenciais nos rios Pequeno e Bananal. Ao impedir o escoamento natural das águas dessas lagoas, as estruturas emergenciais ocasionaram alagamentos e uma queda nos padrões de qualidade da água a montante, sendo substituídas por ensecadeiras que são alteadas quando há risco de o fluxo do rio Doce alcançar esses ambientes.

Decorridos mais de sete anos após o rompimento da barragem de Fundão, é importante avaliar se há ainda a necessidade de evitar o contato das águas do rio Doce com as lagoas Juparanã e Nova, considerando a atual qualidade das águas e dos sedimentos deste rio. Nessa perspectiva, este artigo apresenta uma avaliação hidrodinâmica e de qualidade da água realizada para as lagoas Nova e Juparanã, suas conexões a jusante (rio Pequeno e rio Bananal) e em trecho do rio Doce passível de intrusão nas lagoas, levando em consideração a remoção definitiva das ensecadeiras existentes.

OBJETIVOS

Os objetivos do estudo são:

- i. Analisar os dados de qualidade da água e dos sedimentos do rio Doce, das lagoas Juparanã e Nova e respectivas conexões obtidos pelo monitoramento do PMQQS - Programa de Monitoramento Quali-Quantitativo Sistemático de Água e Sedimentos, desde agosto de 2017 até outubro de 2021;
- ii. Simular cenários utilizando modelagem numérica bidimensional para eventos extremos de cheia do rio Doce, em períodos de retorno de 10, 50 e 100 anos, e avaliar os impactos que a entrada das águas do rio Doce causaria na qualidade de águas das lagoas Nova e Juparanã em com base nos seguintes parâmetros: Sólidos Suspensos Totais (SST), Oxigênio Dissolvido (OD), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Nitrogênio Total, Fósforo Total, Arsênio Total e os metais Alumínio e Ferro Dissolvidos, Cádmio, Chumbo, Cromo e Manganês totais. Os resultados são analisados à luz da Resolução CONAMA 357/2005 e Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH/MG N° 8/2022;
- iii. Avaliar, do ponto de vista ambiental, a necessidade de continuar a evitar o contato das águas do rio Doce com as águas das lagoas Nova e Juparanã, considerando a atual qualidade da água e dos sedimentos do rio Doce.

METODOLOGIA

Nesta seção descreve-se a área de estudo e a metodologia empregada para análises de dados e aplicação de modelagem hidrodinâmica ambiental.

• Área de Estudo

A área de estudo está localizada na região dos municípios de Linhares, Sooterama e Rio Bananal, no Espírito Santo, Brasil (Figura 1). A lagoa Juparanã possui profundidade até 20 m, superfície de 61,14 km² e volume

aproximado de 450 Mm³, sendo considerada a maior lagoa natural do Espírito Santo em extensão e a segunda maior do Brasil em área, apresentando predomínio de perfil térmico e químico desestratificado (GONÇALVES, 2005). A lagoa Nova é a segunda maior da região do Baixo Rio Doce (GONÇALVES, 2016), possui profundidade máxima de 33,9 m, apresenta cerca de 12 km de extensão e superfície de 15,5 km², com tendência à estratificação térmica.

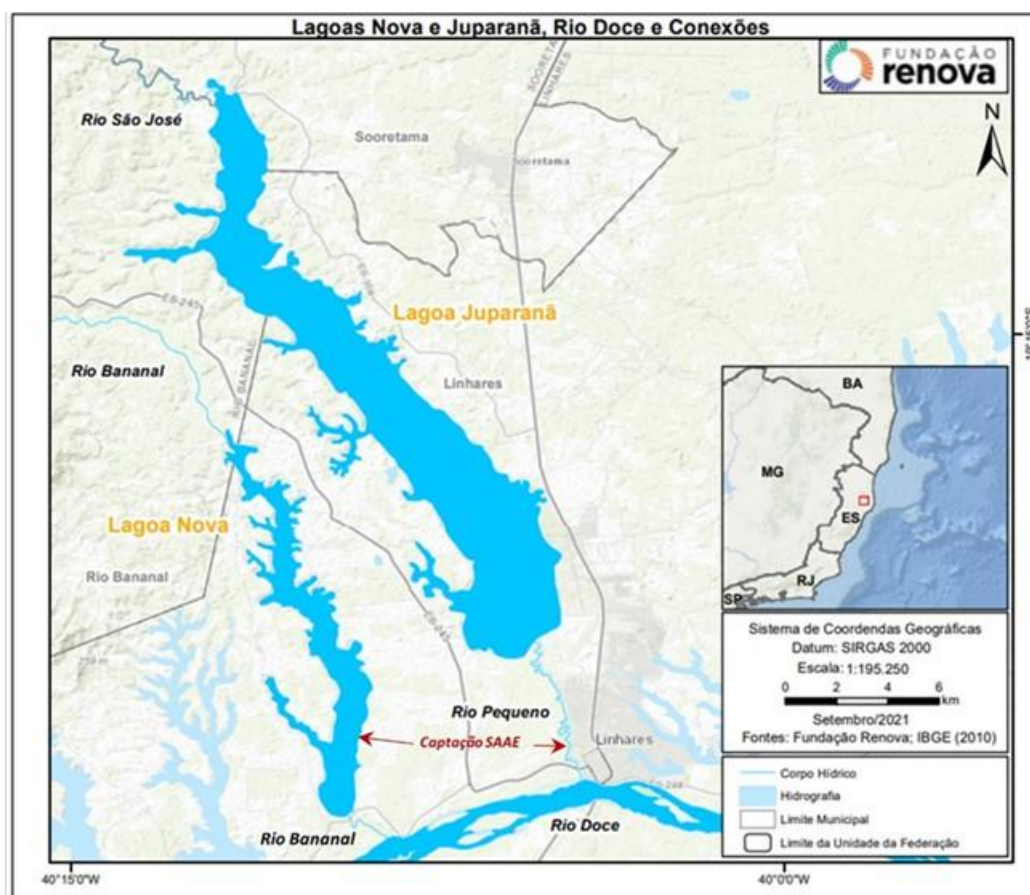


Figura 1. Localização da área de estudo (Fonte: Fundação Renova, 2021)

• Análise de dados

Os dados de qualidade da água e dos sedimentos do rio Doce, das lagoas Juparanã e Nova e respectivas conexões são provenientes do monitoramento do PMQQS - Programa de Monitoramento Quali-Quantitativo Sistemático de Água e Sedimentos. A Figura 2 mostra as estações de amostragem analisadas, sendo um ponto localizado no rio Doce (RDO15), em Linhares, três pontos na lagoa Juparanã (LJP01, LJP02, LJP03) e três pontos na lagoa Nova (LNV01, LNV01, LNV03). A partir de fevereiro de 2020, os pontos LJP02, LNV02 e LNV03 foram substituídos pelos pontos LJP02R, LNV02R e LNV03R, respectivamente.

A análise dos dados de monitoramento do PMQQS consolidou os resultados obtidos deste agosto de 2017 até outubro de 2021, que representam um período de seis anos após o rompimento da barragem de Fundão. Para tanto, selecionou-se um ponto de amostragem no rio Doce próximo às conexões (RDO15), além de locais monitorados nos rios Pequeno e Bananal e nas lagoas Nova e Juparanã, totalizando nesse período um total de 47 coletas mensais de qualidade da água e 21 coletas trimestrais de sedimentos.

Os resultados disponíveis de qualidade das águas nos pontos de amostragem foram comparados aos valores máximos permitidos (VMP) pela Resolução CONAMA 357/2005 para águas doces classe 2. Em relação aos Sólidos Suspensos Totais (SST), parâmetro não regulamentado pela referida Resolução, os dados foram confrontados com a Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH/MG N° 8/2022.



Figura 2. Estações de Monitoramento PMQQS.

• Modelagem Hidrodinâmica Ambiental

A interação entre as lagoas e o rio Doce foi analisada utilizando modelos computacionais que conseguem representar as condições de escoamento e de qualidade da água. Este conjunto de modelos compõe as análises de hidrodinâmica ambiental.

No presente estudo, as modelagens foram feitas com suporte de hidroinformática através do SisBaHiA - Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental (www.sisbahia.coppe.ufrj.br), utilizado os modelos hidrodinâmico, transporte de sedimentos em suspensão e parâmetros de qualidade de água. As simulações incluem para cada cenário:

- Modelagens de Qualidade de Água envolvendo Sedimentos Suspensos Totais, que são indicadores de turbidez. A modelagem inclui efeitos de transporte, deposição e ressuspensão em ciclos que caracterizam os processos sedimentológicos. Este item foi simulado junto com os modelos hidrodinâmicos em forma hidrossedimentológica morfodinâmica. Para mais detalhes e explicações a respeito da metodologia pertinente à modelagem de transporte de sedimentos finos, veja seção 5 Modelo Euleriano de transporte advectivo difusivo para análises gerais e para sedimentos coesivos de Rosman (2021).
- Cenários de Modelagens de Qualidade de Água - Metais, MQA-M, envolvendo os constituintes metálicos: Alumínio Dissolvido, Arsênio Total, Cádmio Total, Chumbo Total, Cromo Total, Ferro Dissolvido e Manganês Total.
- Cenários de Modelagens de Qualidade de Água – OD-DBO e Eutrofização, MQA-Geral, com análises de Oxigênio Dissolvido (OD), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Nitrogênio Total e Fósforo Total.

Descreve-se a seguir as etapas de modelagem digital do terreno, cenários adotados, modelagens hidrodinâmicas e de transporte, bem como os dados utilizados em cada modelo.

– *Domínio de modelagem e malha de discretização*

O domínio de modelagem engloba um trecho do rio Doce, as lagoas Nova e Juparanã e respectivas conexões. Para delimitação dessa geometria e localização de estruturas nos corpos de água, em especial nos rios e canais, como por exemplo, os pilares das pontes de Linhares e a soleira no canal entre a lagoa Nova e o rio Doce, utilizaram-se imagens orbitais. Os contornos atualizados obtidos são mostrados no mapa da Figura 3, onde também se ilustra a malha de discretização do domínio em elementos finitos quadráticos, sendo 2766 quadrangulares biquadráticos e 244 triangulares quadráticos, e cota de fundo referida ao Datum Imbituba do IBGE.

A batimetria atualizada do domínio de interesse provém de dados de altitudes ortométricas no Datum Altimétrico de Imbituba com e datum horizontal SIRGAS_2000_UTM_Zone_24S. O modelo digital de terreno utilizado foi desenvolvido pela empresa NHC a partir da combinação de dados de levantamentos batimétricos disponíveis na área.

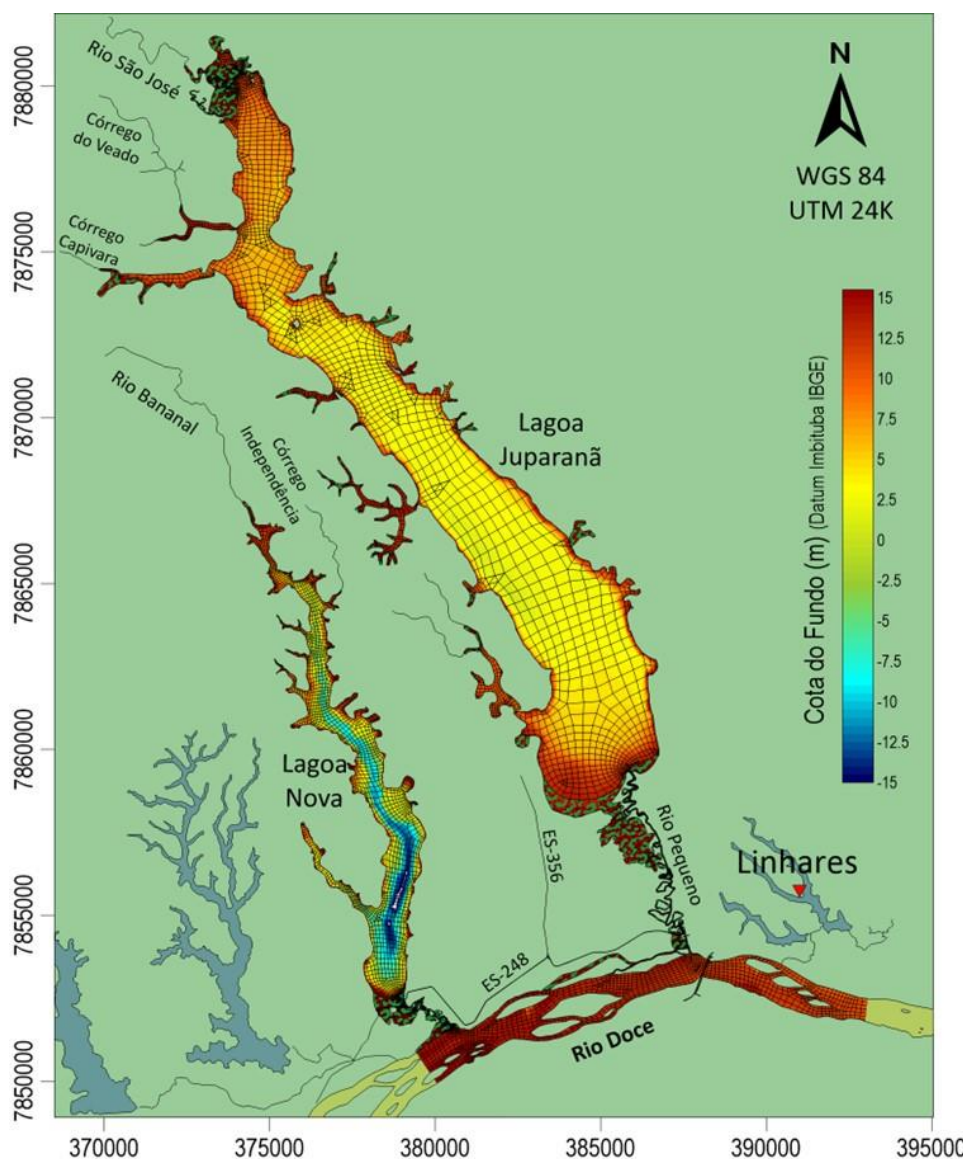


Figura 3. Mapa base com contornos atualizados de imagens do *Google Earth* e do modelo digital do terreno.

– *Cenários de modelagem*

As análises de hidrodinâmica ambiental incluem simulações da mistura de águas do rio Doce com águas das lagoas. Com as simulações computacionais avaliou-se qual a qualidade da água nas lagoas sem considerar os barramentos existentes nas respectivas conexões com o rio Doce. As análises de circulação hidrodinâmica determinando fluxos e mistura de águas entre lagoas e rios conexos consideraram hidrogramas de 2 meses, gerados a partir de dados de uma cheia em janeiro de 2016. Tais hidrogramas são hipotéticos, potencializados para os Tempos de Retorno (TR) de 10, 50 e 100 anos. As vazões de pico obtidas foram de $7.603,2 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, $10.326,9 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ e $11.478,4 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, respectivamente para os TRs de 10, 50 e 100 anos.

Como referência para obtenção de dados meteorológicos adotou-se o período de 08/01/2016 00:00 até 08/03/2016 00:00.

– *Modelagem hidrodinâmica*

Representando os cenários descritos, foram gerados três modelos hidrodinâmicos, condicionados aos hidrogramas de vazão de TR de 10, 50 e 100 anos na fronteira de montante do rio Doce. Na seção de jusante do rio Doce, além da imposição de hidrogramas de vazão, houve imposição de níveis de água, sendo a mesma condicionada à curva-chave nível $\times$ vazão. Os níveis de água foram obtidos por transposição da curva-chave da estação fluviométrica no rio Doce em Linhares (código ANA 5699800). A Figura 4 mostra as séries de vazões fluviais impostas a montante e a jusante no trecho avaliado do rio Doce e a Figura 5 apresenta as séries de nível de água impostas na fronteira de jusante deste rio.

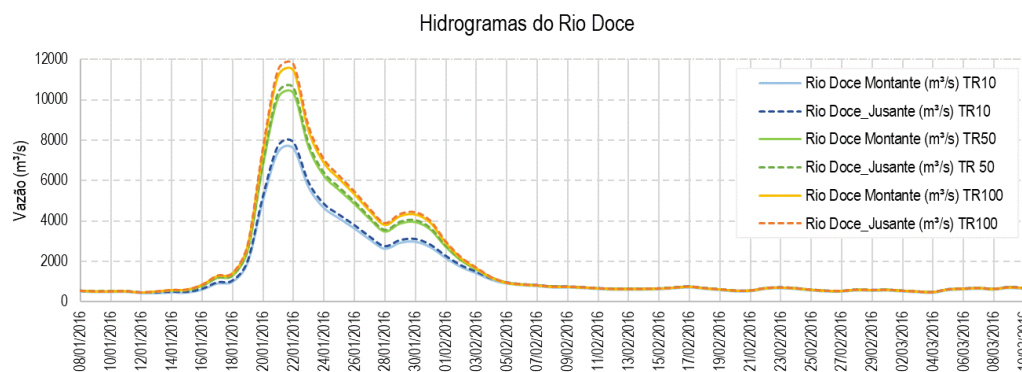


Figura 4. Hidrogramas de vazões fluviais no rio Doce para os Tempos de Retorno de 10, 50 e 100 anos, considerando para cada TR uma série na seções de montante e de jusante.

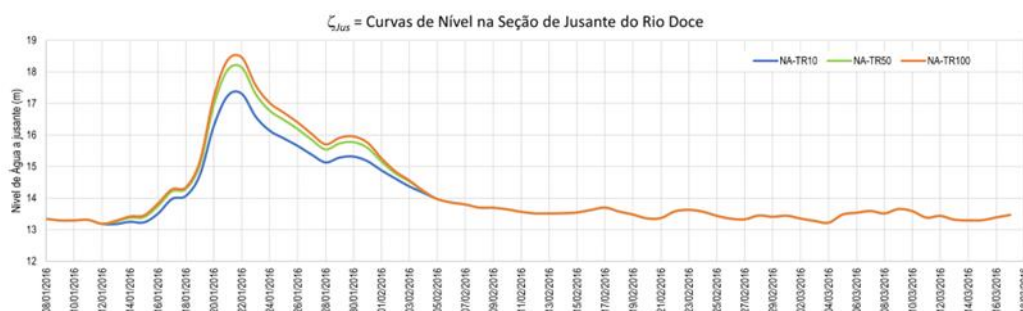


Figura 5. Séries Temporais de Nível de Água para os cenários de TR de 10, 50 e 100 anos considerados na seção de jusante do rio Doce.

Para os rios Bananal e São José, principais contribuintes a montante das lagoas Nova e Juparanã, respectivamente, adotaram-se hidrogramas similares aos do rio Doce com TR de 10 anos ponderados por área da bacia hidrográfica contribuinte (Figura 6). Para evidenciar os efeitos da cheia no rio Doce nas lagoas, esses hidrogramas foram mantidos em todos os cenários para os rios Bananal e São José. Vale notar que a denominação rio Bananal é a mesma adotada para o curso d'água a montante como a jusante da lagoa Nova, a partir da qual se conecta com o rio Doce.

Hidrogramas dos rios São José & Bananal - TR de 10 anos

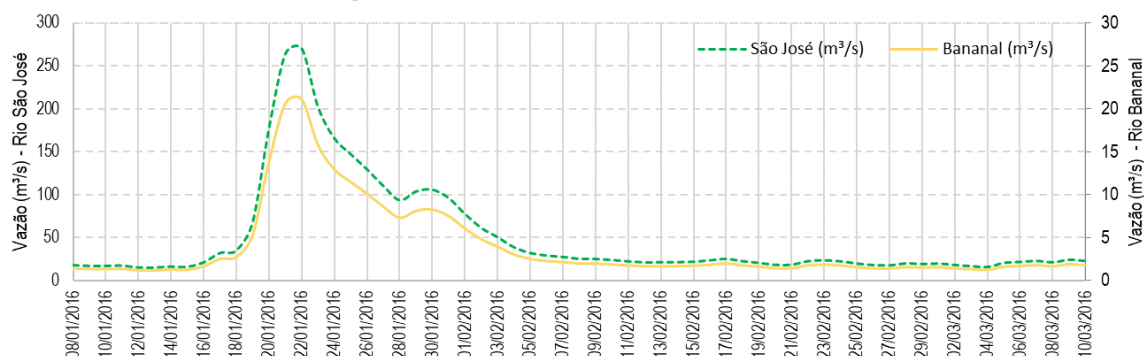


Figura 6. Hidrogramas de vazões fluviais adotadas nos rios Bananal, valores no eixo da direita, e São José, valores no eixo da esquerda, referentes ao Tempo de Retorno de 10 anos.

Também foram considerados nos modelos as séries temporais de ventos em diferentes pontos na área de estudo. Esses dados provêm de reanálise através do ERA5 do ECMWF – *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present* (copernicus.eu), com valores horários de velocidade e direção do vento para todo o período de simulação.

– Modelo de Sólidos Suspensos Totais (SST)

Sólidos Suspensos Totais (SST) foram simulados de forma acoplada à modelagem de circulação hidrodinâmica em modo hidrossedimentológico morfodinâmico. As concentrações de SST para os hidrogramas dos diferentes cenários foram inferidas através de curva-chave de SST versus vazão líquida do rio Doce, desenvolvida por Nogare (2014) na estação de Colatina/ES (Figura 7). Para os rios Bananal e São José, a montante das lagoas Nova e Juparanã, respectivamente, adotou-se valor permanente de 5 mg/L, que corresponde a águas transparentes. Os resultados de SST foram comparados com os limites da Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH/MG N° 8/2022.



Figura 7. Séries temporais de SST impostas na seção de montante do rio Doce no domínio de modelagem.

– Modelos de Qualidade da Água

Foram modelados seis constituintes metálicos e semimetálicos: arsênio total, alumínio dissolvido, arsênio total, cádmio total, chumbo total, cromo total, ferro dissolvido e manganês total, todos em modo conservativo. Para estas análises utilizou-se o Módulo de Modelagem Euleriano do SisBaHiA. Por sua vez, a modelagem de parâmetros associados às condições ecológicas dos corpos hídricos inclui os parâmetros listados na Tabela 1, sendo no presente estudo apresentados os resultados de OD, DBO, nitrogênio total (soma das frações de nitrogênio amoniacal, nitrato e nitrogênio orgânico) e fósforo total (soma das frações de fósforo orgânico e inorgânico), obtidos por meio do Módulo de Qualidade da Água (MQA).

Tabela 1. Lista de 11 constituintes presentes nos MQA.

CONSTITUINTE	UNIDADE
Salinidade	ups
Temperatura	°C
Oxigênio Dissolvido (OD)	mgO/L
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)	mgO/L
Nitrogênio amoniacal	mgNH/L
Nitrato	mgNI/L
Nitrogênio Orgânico	mgNO/L
Fósforo Inorgânico	mgP/L
Fósforo Orgânico	mgPO/L
Clorofila-a	µgChla/L
Zooplâncton	µgZ/L

Com objetivo de analisar os efeitos das entradas e cheias do rio Doce nas lagoas Nova e Juparanã com os tempos de retorno de 10, 50 e 100 anos, adotou-se que os tempos de retorno de interesse também são relacionados às cargas de parâmetros de qualidade da água. Dessa forma, as condições de contorno dos modelos são séries temporais de concentração no rio Doce no período de modelagem, que foram obtidas por análises de regressão para os constituintes. As análises foram realizadas a partir dos dados do Programa de Monitoramento Qualiquantitativo Sistemático de Água e Sedimento - PMQQS, conduzido pela Fundação Renova, validados até março de 2021.

Quando houve correlação entre a concentração do constituinte com a vazão do rio Doce, as séries de concentrações deste constituinte foram geradas a partir da equação de regressão obtida pela correlação e dos hidrogramas de vazão de cada TR. Para o parâmetro alumínio dissolvido, foi obtida função de potência. Para ferro dissolvido os dados foram ajustados por uma função logarítmica, e para manganês total o melhor ajuste dos dados foi por função linear. Para os demais metais (cádmio, chumbo, cromo) e semimetal (arsênio) e para os parâmetros do MQA de OD, DBO, e compostos de nitrogênio e fósforo não se observou correlação entre os dados de concentração e vazão no rio Doce, portanto, adotou-se a média de todos os dados medidos no PMQQS como condição de contorno. Para os dados cuja concentração medida foi menor que o limite de quantificação da medição, a concentração adotada foi a deste limite.

Para o condicionamento dos rios São José e Bananal, a montante das lagoas Juparanã e Nova, respectivamente, adotou-se a média de todos os dados medidos nas lagoas como condição de contorno. Adotou-se tal condicionamento neutro dos rios afluentes às lagoas de modo a enfatizar a influência do rio Doce nas lagoas, sem influências de outras fontes contribuintes.

A Figura 8 mostra as séries temporais de cargas impostas na fronteira de montante do rio Doce para os metais e semimetal analisados e a Figura 9 mostra as séries do Modelo de Qualidade da Água (OD e DBO), além dos nutrientes nitrogênio e fósforo totais, indicadores de eutrofização. A Tabela 2 lista os valores médios para todos os rios.

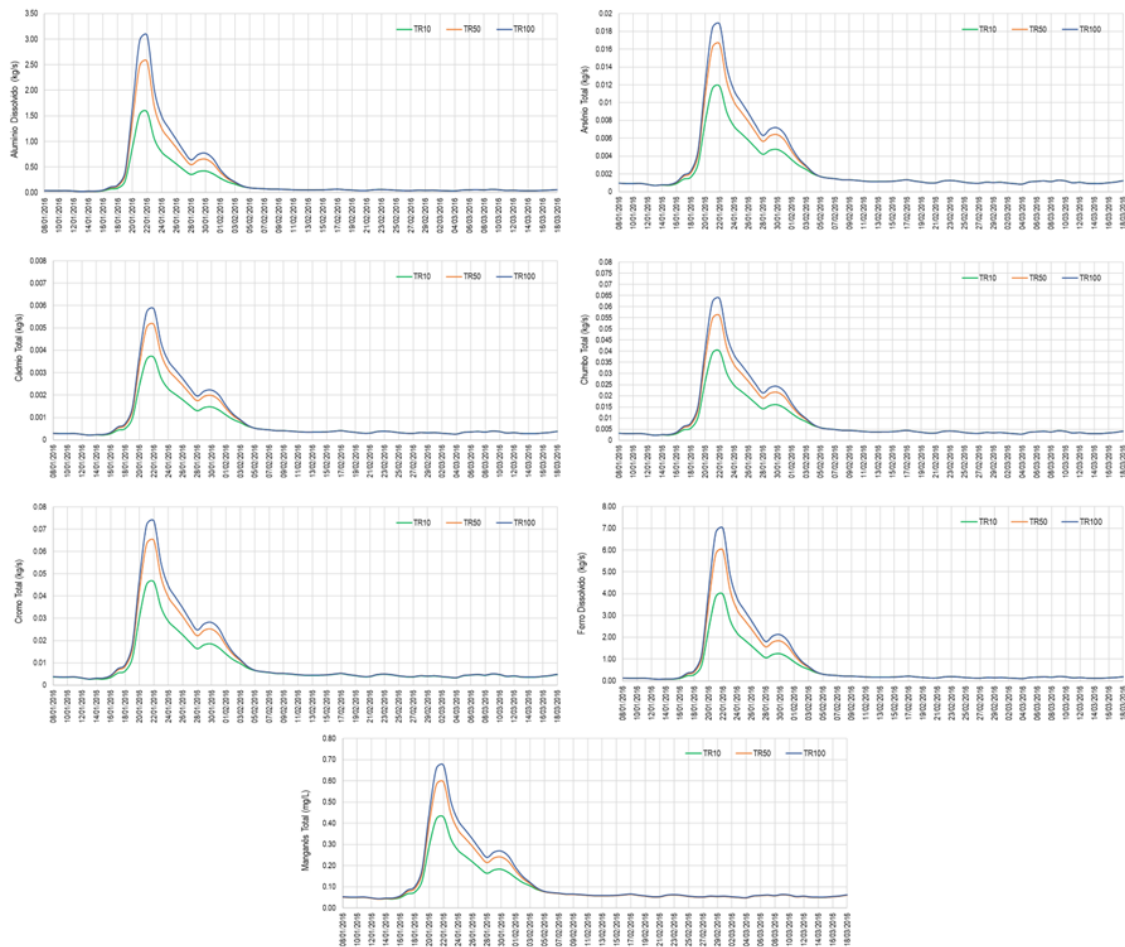


Figura 8. Séries temporais de cargas dos metais e semimetal utilizadas como condição de contorno. As séries foram geradas pelo produto das concentrações pertinentes com a vazão a cada instante dos hidrogramas de vazão de TR de 10, 50 e 100 anos na seção de montante do rio Doce.

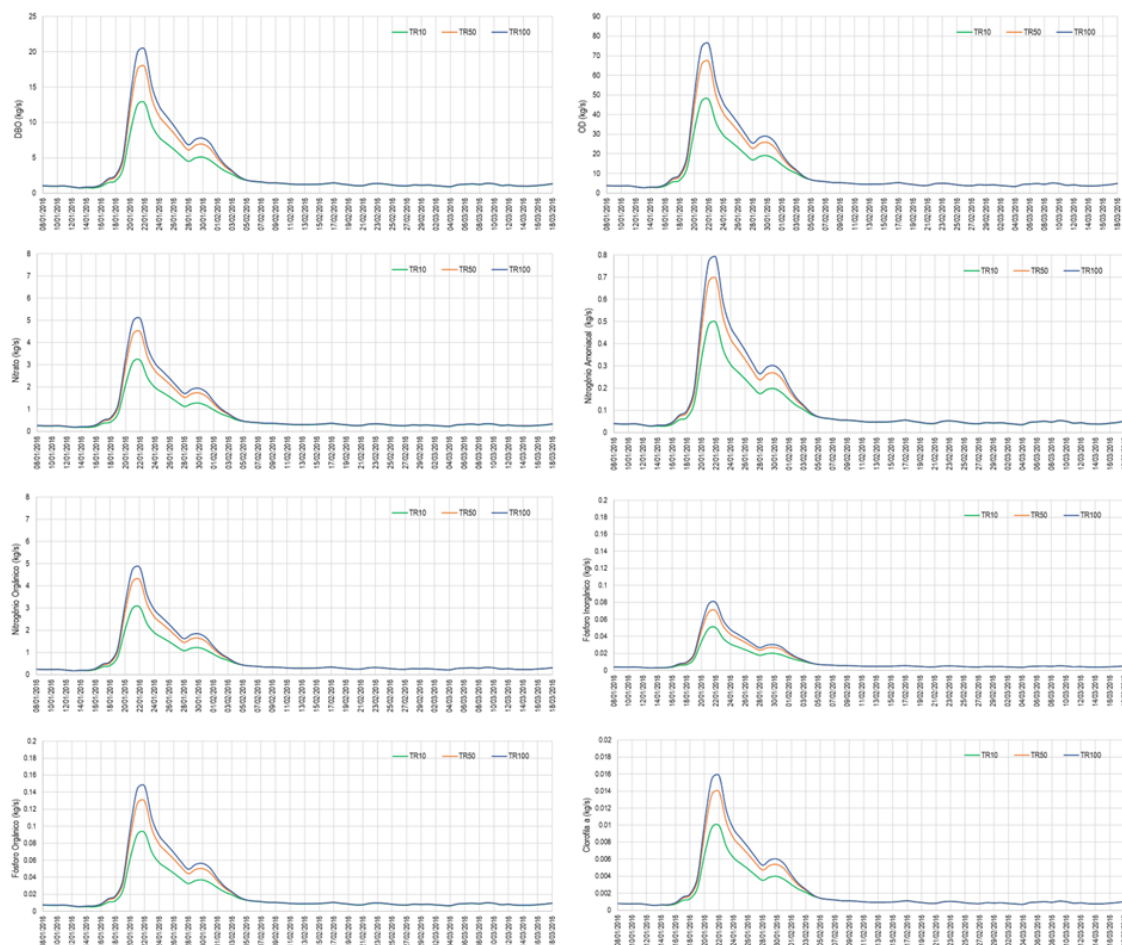


Figura 9. Série de cargas dos parâmetros de entrada do Modelo de Qualidade da Água de OD e DBO e de Eutrofização (nitrogênio total e fósforo total). As cargas foram geradas a partir do valor médio e dos hidrogramas de vazão de TR de 10, 50 e 100 anos no rio Doce.

Tabela 2. Valores médios de concentração em cada fronteira de montante nos rios Doce, São José e Bananal.

VARIÁVEL	RIO DOCE	RIO SÃO JOSÉ	RIO BANANAL
Alumínio Dissolvido (mg/L)	0.1227	0.0733	0.0289
Arsênio total (mg/L)	0.0019	0.0012	0.0016
Cádmio total (mg/L)	0.0006	0.0006	0.0006
Chumbo total (mg/L)	0.0063	0.0056	0.0059
Cromo total (mg/L)	0.0073	0.0056	0.0059
Ferro Dissolvido (mg/L)	0.2278	0.0886	0.0593
Manganês total (mg/L)	0.0630	0.0126	0.0173
DBO (mgO ₂ /L)	2.0000	2.005	< 2.0
OD "in situ" (mg/L)	7.4703	6.8847	6.616
Nitrato (mg/L)	0.4990	0.1564	0.161
Nitrogênio amoniacal (mg/L)	0.0775	0.0871	0.068
Nitrogênio orgânico (mg/L)	0.4763	0.5035	0.499
Fósforo inorgânico (mg/L)	0.0078	0.0060	0.007
Fósforo orgânico (mg/L)	0.0145	0.0003	0.001

Nos modelos de qualidade da água são considerados dados ambientais como de radiação solar, temperatura do ar e umidade no período da simulação. Os dados são da estação automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) em Linhares, localizada nas coordenadas -19,357° de latitude e -40,069° de longitude.

RESULTADOS OBTIDOS

• Análise de dados

Os dados do PMQQS entre 08/2017 e 10/2021 mostram que a qualidade da água no ponto do rio Doce em Linhares atendeu aos padrões legais para os contaminantes potencialmente tóxicos (arsênio, cromo, cádmio, mercúrio e zinco totais e cobre dissolvido), sendo observadas apenas duas extrapolações pontuais de chumbo total (12/2017 e 03/2018) acima do limite da Resolução CONAMA 357/2005. Nos sedimentos do rio Doce, houve apenas uma ultrapassagem de arsênio em 10/2021 em relação à Resolução CONAMA 454/12.

• Modelagem Hidrodinâmica Ambiental

Para todos exposição dos resultados dos modelos são apresentadas séries temporais considerando as estações de geração de resultados indicadas na Figura 10, na qual o rio Doce é representado pelas seções de montante e de jusante, bem como na ponte de Linhares que se situa imediatamente a jusante da foz do rio Pequeno, canal de conexão com a lagoa Juparanã, conforme citado. Também são apresentados nos resultados os mapas de isolinhas no instante de pico da cheia nas lagoas, que corresponde ao dia 22/01/2016 12:00 do período de simulação, e um instante 45 dias após a passagem da cheia, no dia 07/03/2015 12:00.

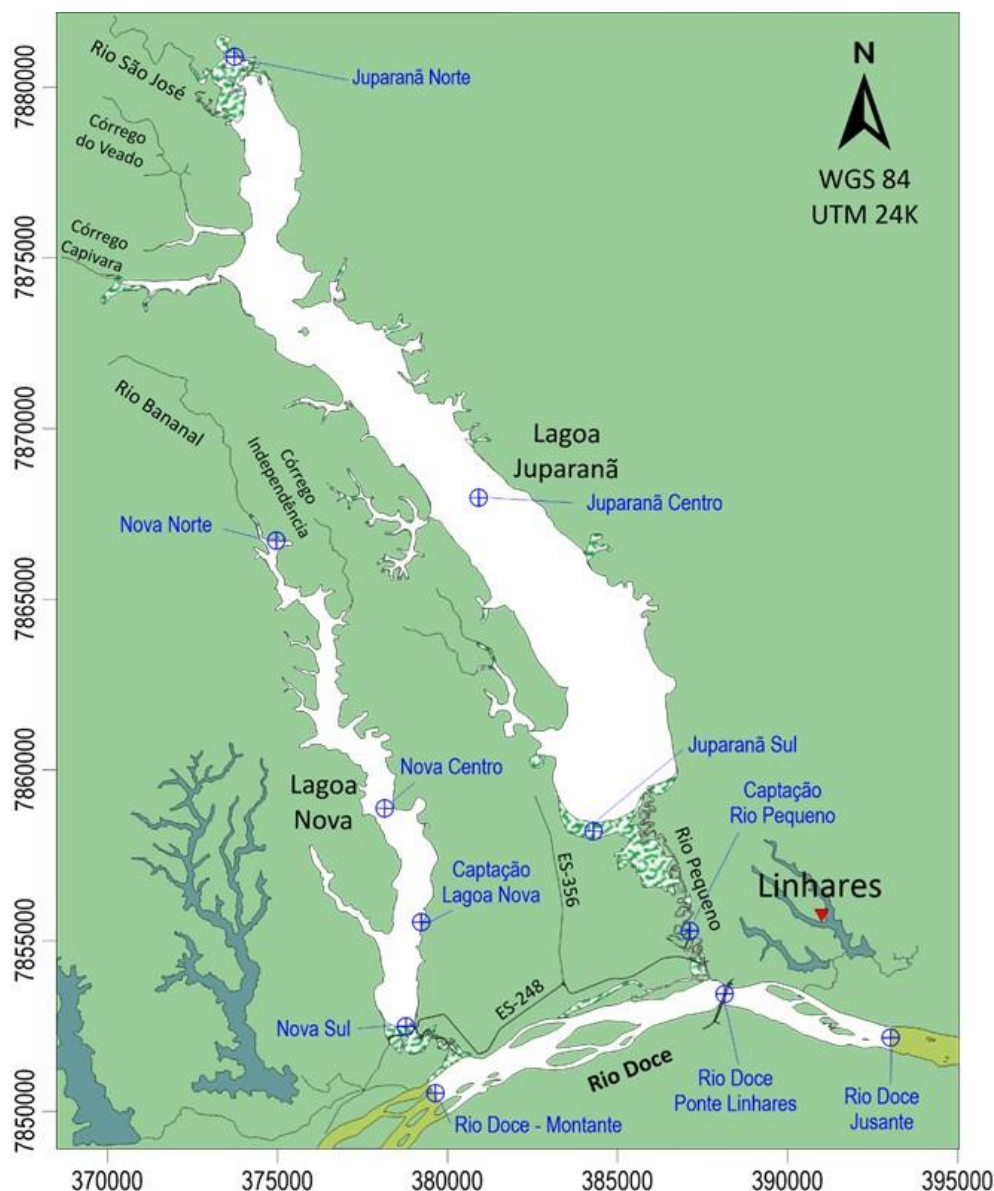


Figura 10. Posicionamento das estações consideradas em gráficos de resultados das séries temporais.

– *Modelagem Hidrodinâmica*

As simulações realizadas com o SisBaHiA para cheias no rio Doce, representando períodos de retorno de 10, 50 e 100 anos, mostrou que os picos de cheia no rio Doce precedem os picos de cheia na lagoa Nova por cerca de 30 horas e na lagoa de Juparanã por cerca de 60 horas. O tempo de enchimento das lagoas é muito mais rápido que o tempo de esvaziamento. Na lagoa Nova, o tempo de enchimento entre o TR10 e o TR100 foi de 4 a 5 dias e, na lagoa de Juparanã, de 7 a 8 dias. Os resultados mostraram que, mesmo cerca de 45 dias após a ocorrência dos picos de níveis altimétricos nas lagoas, ou seja, de níveis de água (NA) referidos ao datum do IBGE, não houve retorno à situação de início considerada na modelagem. A Figura 11 mostra as séries temporais de elevação do nível de água para os TRs de 10, 50 e 100 anos.

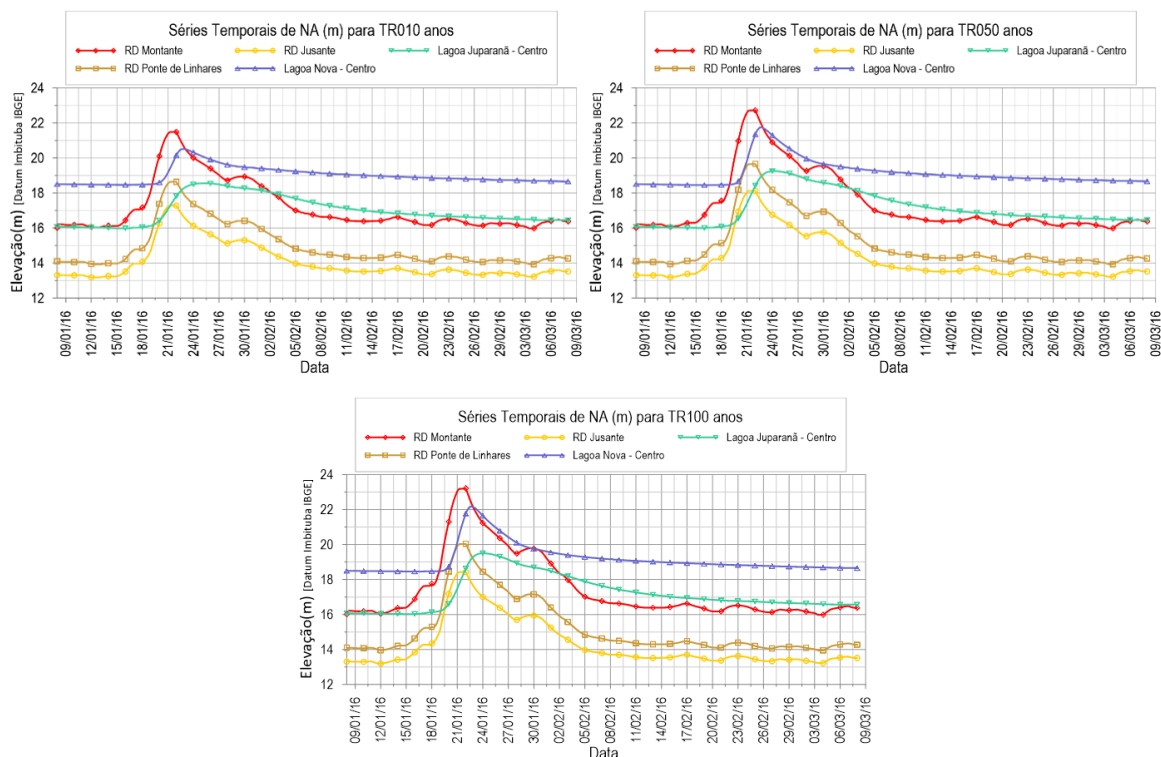


Figura 11. Gráficos de níveis de água nas seções consideradas no rio Doce e no centro das lagoas Nova e Juparanã nos cenários de TRs de 10, 50 e 100 anos.

Durante os eventos de cheias do rio Doce com TR de 10, 50 e 100 anos simulados, as enseadeiras não conseguiriam evitar o contato da água do rio Doce com as águas das lagoas já que a água do rio Doce entra pela planície de inundação e não somente pelos canais do rio Bananal e rio Pequeno. A Figura 12 ilustra essa circulação de águas durante a entrada de água do rio Doce nas lagoas para o TR de 100 anos.

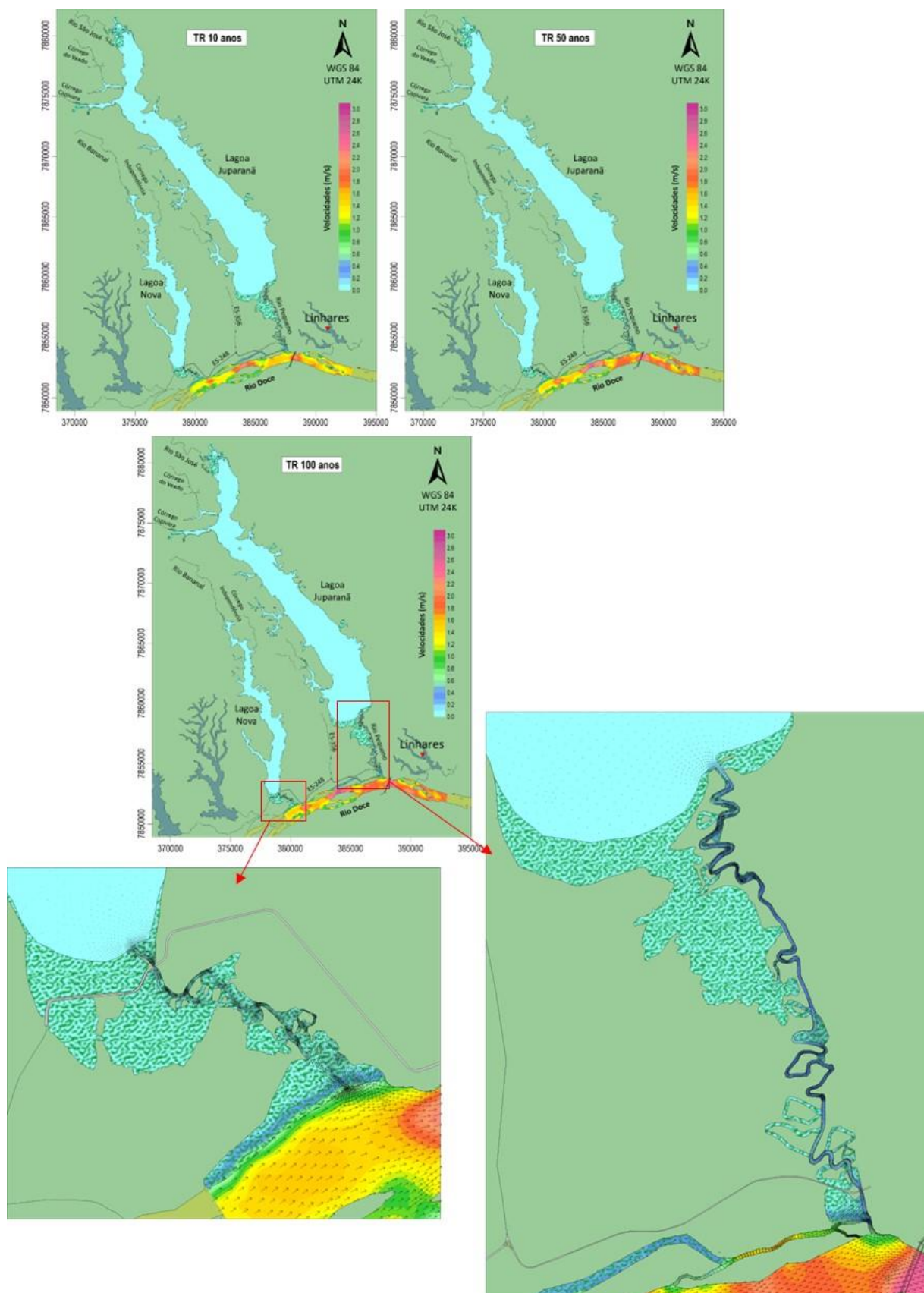


Figura 12. Mapas de Isolinhas de velocidade das correntes no instante de pico da cheia nas lagoas, nos cenários de TRs de 10, 50 e 100 anos.

– *Modelo de Sedimentos Suspensos Totais*

Os resultados das simulações mostram que a persistência de SST acima do padrão legal ($> 100 \text{ mg/L}$) nas lagoas Nova e Juparanã é inferior a 5 dias no entorno do pico de cheia e se restringe também às porções sul das respectivas lagoas. Nas simulações, não há valores de SST relevantes na captação da SAAE na lagoa Nova. Na captação da SAAE no rio Pequeno os valores de SST $> 100 \text{ mg/L}$ ocorrem por 8 dias no cenário de TR 10 anos, 12 dias no cenário de TR 50 anos e 16 dias no cenário de TR 100 anos. Porém, na captação da SAAE no rio Pequeno, os valores de SST persistem próximos de 100 mg/L por mais de 40 dias depois do pico da cheia nos cenários de TR 50 e 100 anos. A Figura 13 apresenta séries temporais de concentração de SST nos pontos de interesse discutidos, cuja localização é mostrada na Figura 10.

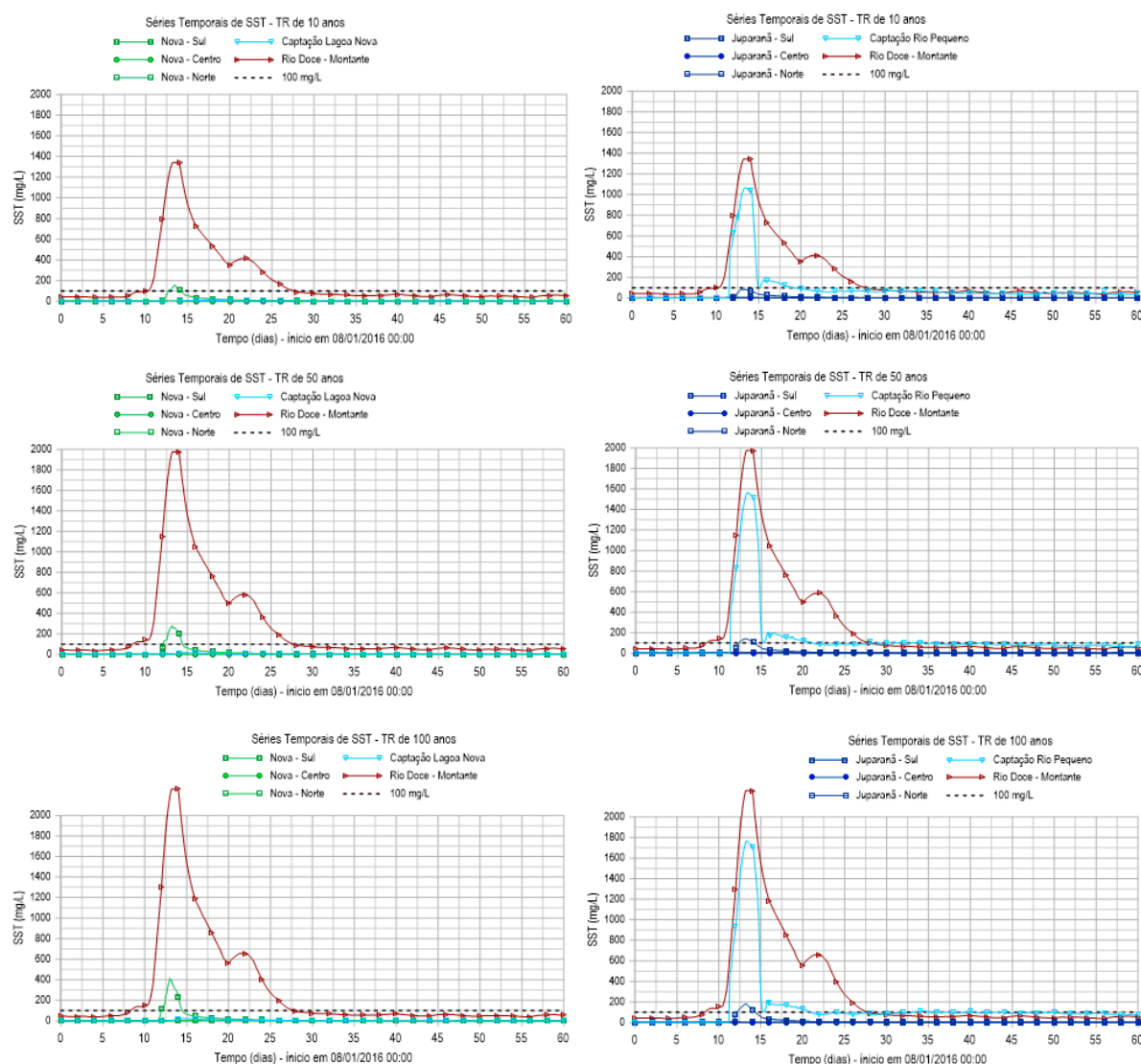


Figura 13. Séries temporais de concentrações de Sólidos Suspensos Totais – SST nas estações - Montante Rio Doce, Norte, Centro e Sul das lagoas de Juparanã e Nova, e nos pontos de Captação de Água.

A Figura 14 mostra isolinhas de concentração de SST no instante de pico da cheia nas lagoas e 45 dias após a passagem da cheia nos cenários de TRs de 10, 50 e 100 anos. Nos mapas a linha tracejada marca a concentração de 100 mg/L .

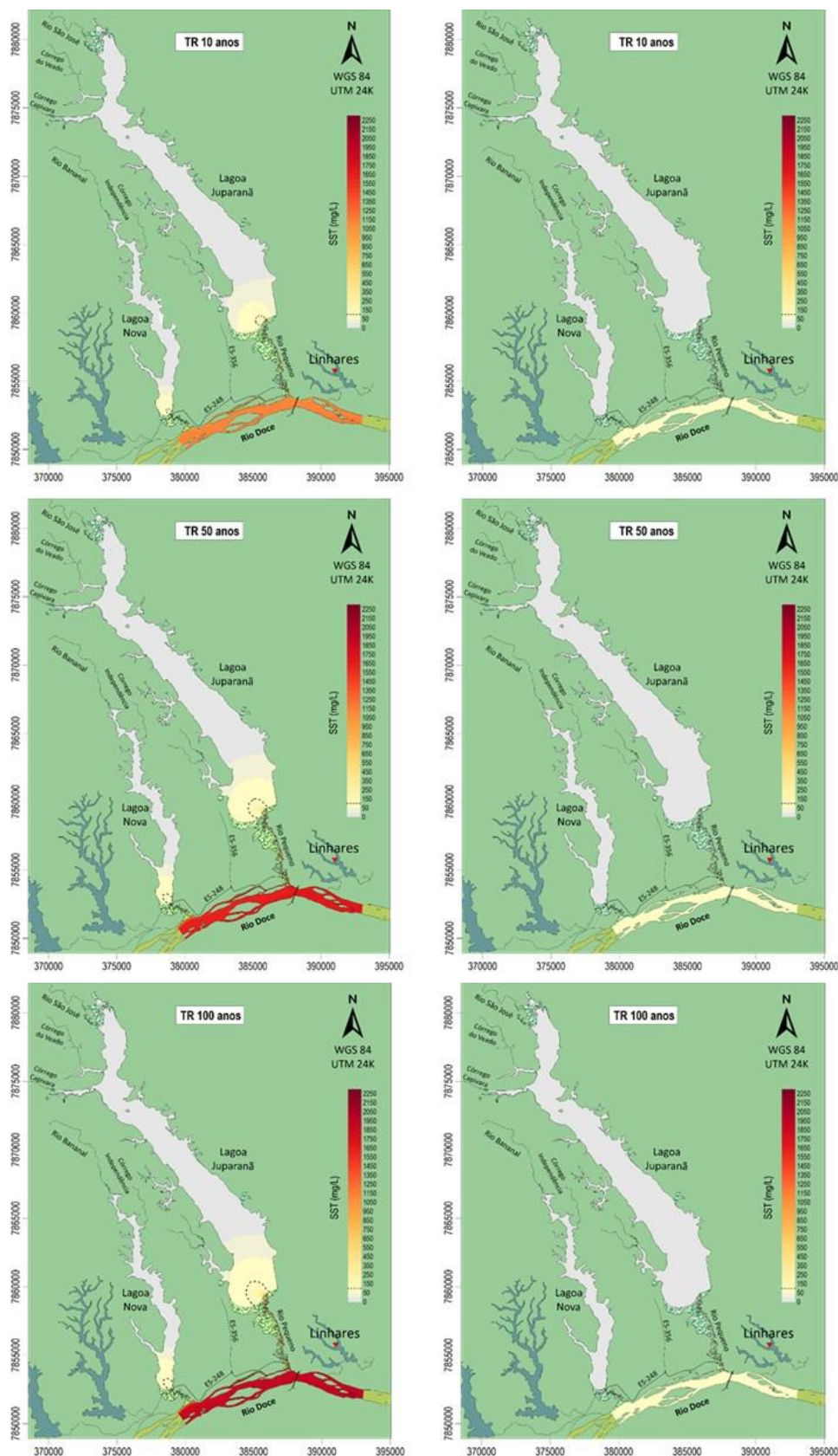


Figura 14. Isolinhas de concentração de SST no instante de pico da cheia nas lagoas (esquerda) e 45 dias após a passagem da cheia (direita) nos cenários de TRs de 10, 50 e 100 anos. A linha tracejada na entrada da cheia nas lagoas é de 100 mg/L.

– Modelos de Qualidade da Água

As simulações para os parâmetros da qualidade da água mostram que o alumínio dissolvido, o ferro dissolvido e o manganês total apresentaram concentrações acima dos valores máximos permitidos (V.M.P.) para águas doces classe 2, respectivamente 0,1 mg/L (alumínio dissolvido e manganês total) e 0,3 mg/L (ferro dissolvido). Os demais parâmetros metálicos apresentaram concentrações de até uma ordem de grandeza inferiores aos seus respectivos V.M.P., como pode ser observado nos gráficos apresentados a seguir. Destaca-se que tais extrapolações permaneceram restritas à porção sul das lagoas Nova e Juparanã, próxima às conexões com o rio Bananal e com o rio Pequeno, a jusante. Quanto aos pontos de captação da SAAE de Linhares, só no rio Pequeno ocorreram concentrações acima dos valores máximos permitidos (V.M.P.) para estes três metais.

Da Figura 15 até a Figura 24 são apresentados resultados de concentração dos metais e semimetal analisados nos pontos indicados no mapa da Figura 10. Da Figura 25 até a Figura 32 são mostrados os resultados de OD, DBO, nitrogênio total e fósforo total. Nos resultados ilustram-se mapas de isolinhas de concentração apenas para os constituintes que tiveram concentrações acima do V.M.P durante a passagem da cheia. Nos mapas destaca-se este V.M.P. da Resolução CONAMA 357/2005 com uma linha tracejada. Analisando os resultados temporais e espaciais apresentados, observa-se que os efeitos da cheia do rio Doce se limitam à região sul das lagoas.

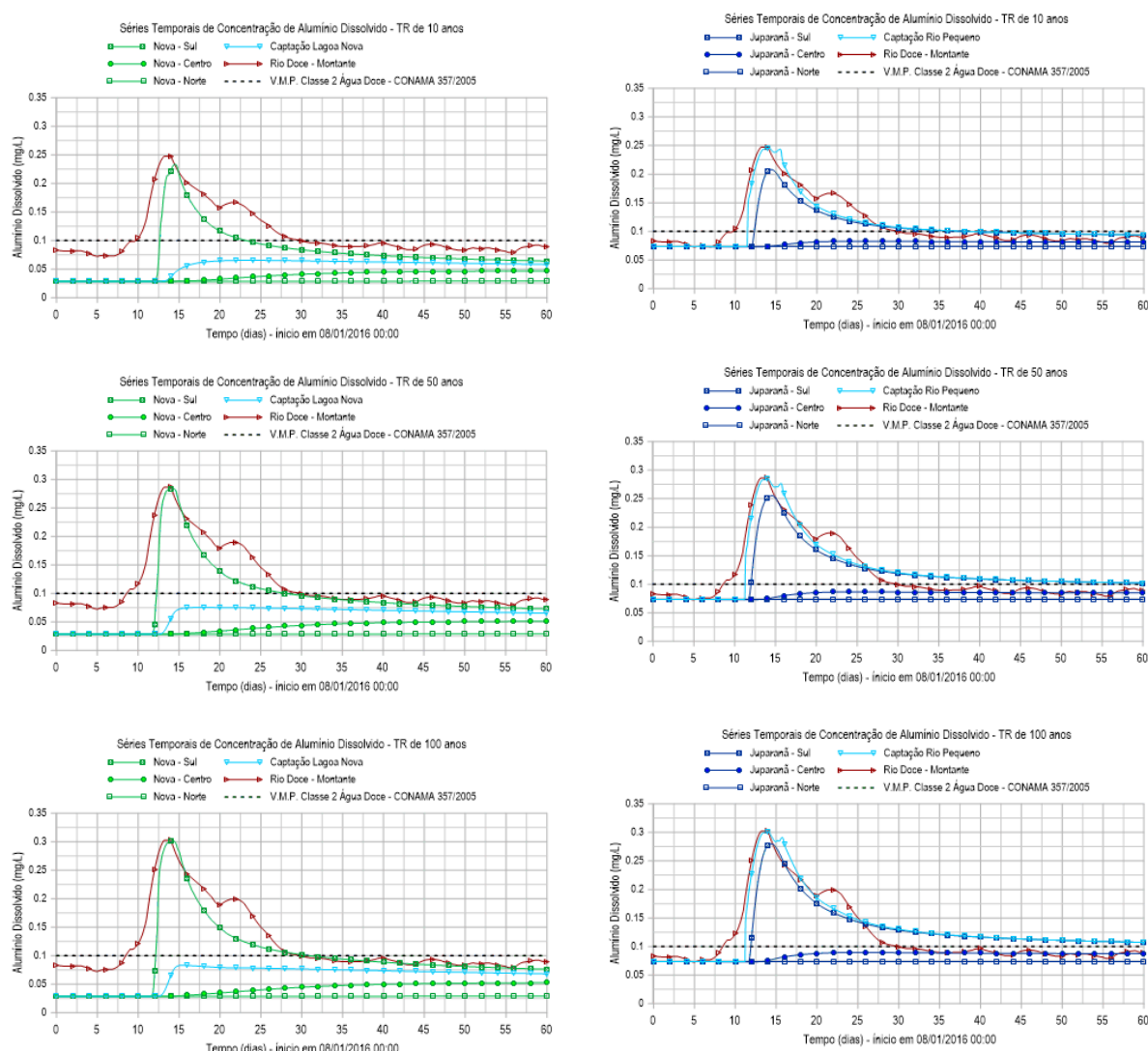


Figura 15. Séries temporais de concentrações de Alumínio Dissolvido nas estações Montante Rio Doce, Norte, Centro e Sul das lagoas Juparanã e Nova, e nos pontos de captação de água.

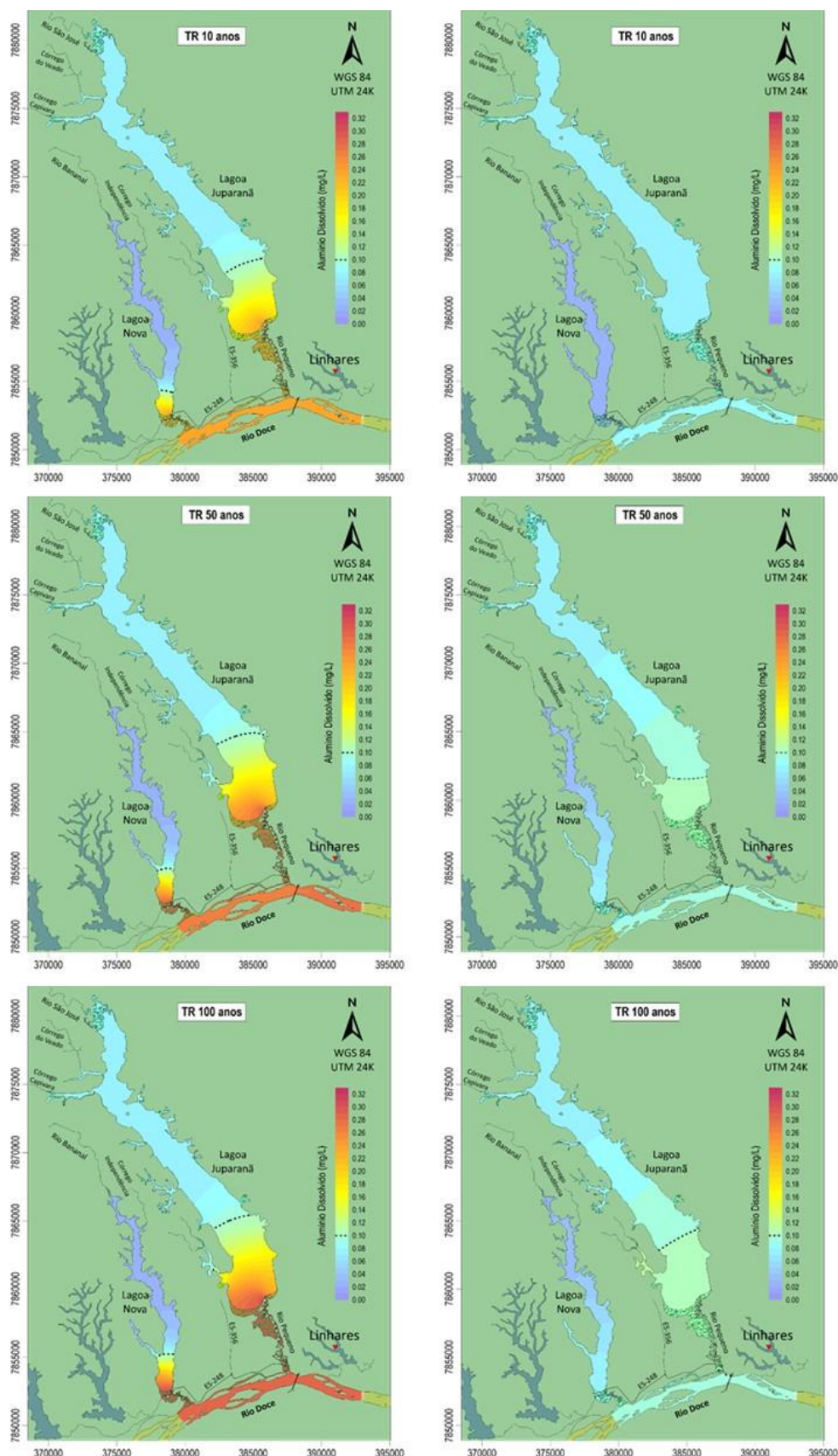


Figura 16. Isolinhas de concentração de Alumínio Dissolvido no instante de pico da cheia nas lagoas (esquerda) e 45 dias após a passagem da cheia (direita) nos cenários de TRs de 10, 50 e 100 anos.

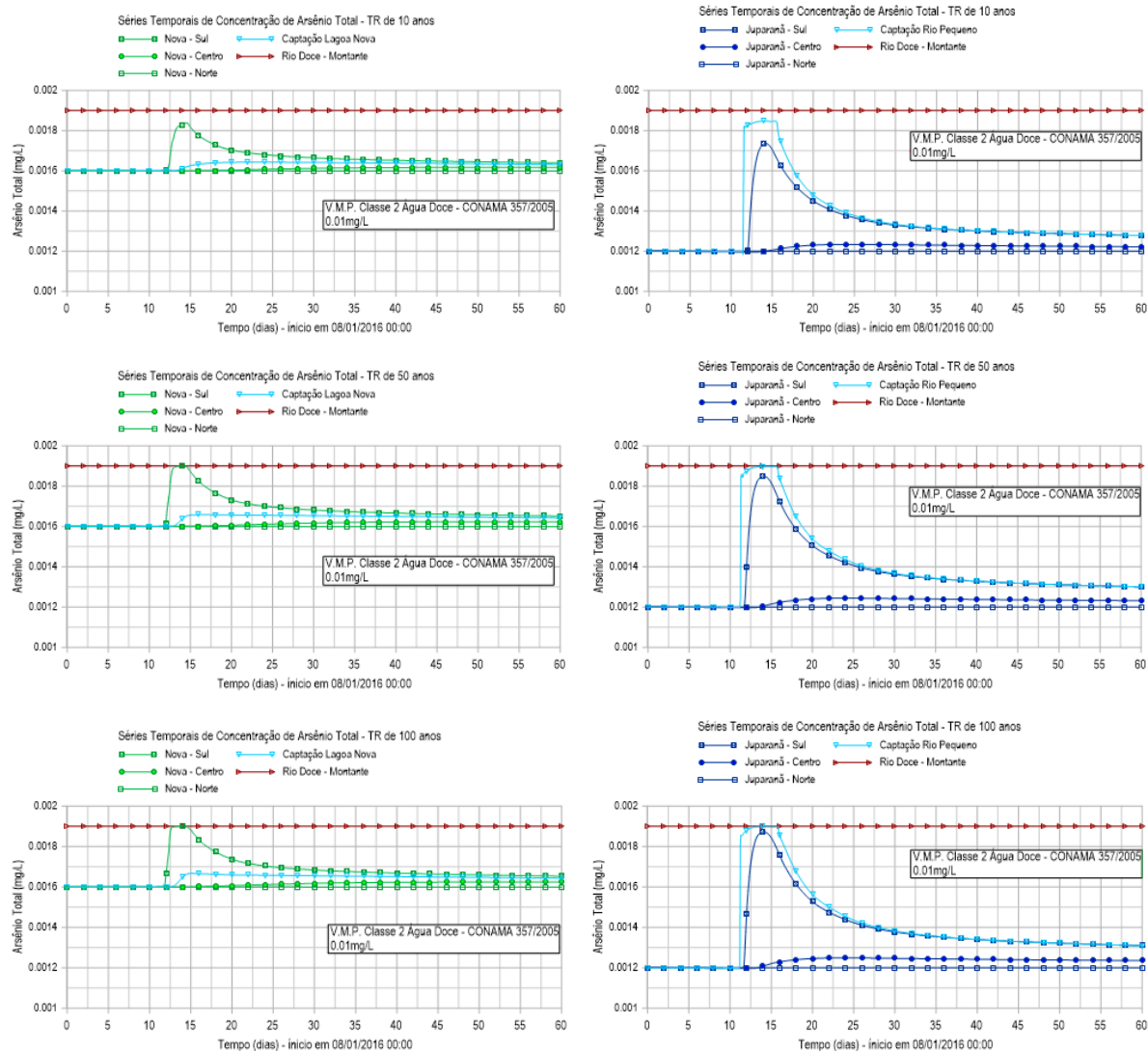


Figura 17. Séries temporais de concentrações de Arsênio Total nas estações Montante Rio Doce, Norte, Centro e Sul das lagoas Juparanã e Nova, e nos pontos de captação de água.

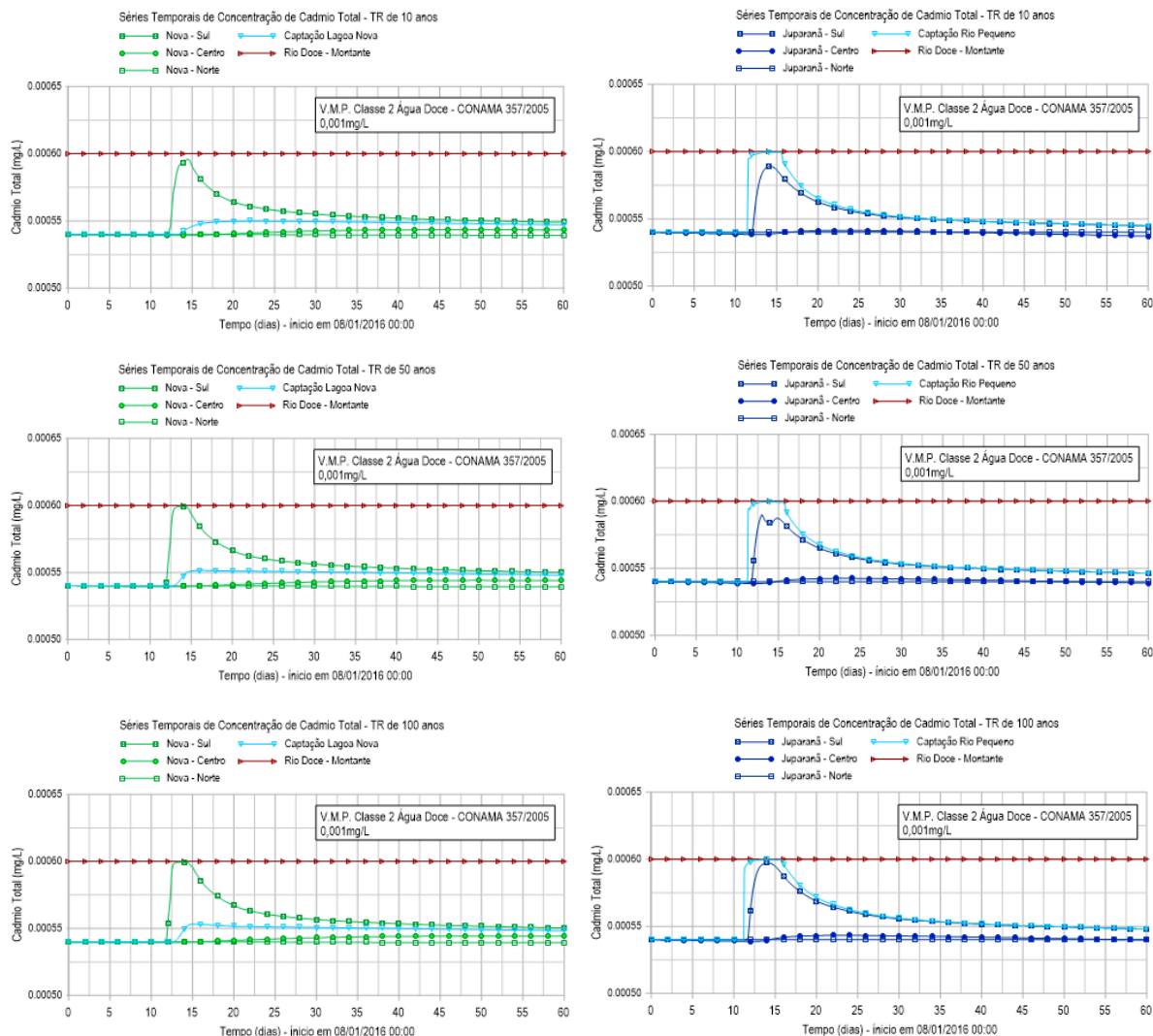


Figura 18. Séries temporais de concentrações de Cádmio Total nas estações Montante rio Doce, Norte, Centro e Sul das lagoas Juparanã e Nova, e nos pontos de captação de água.

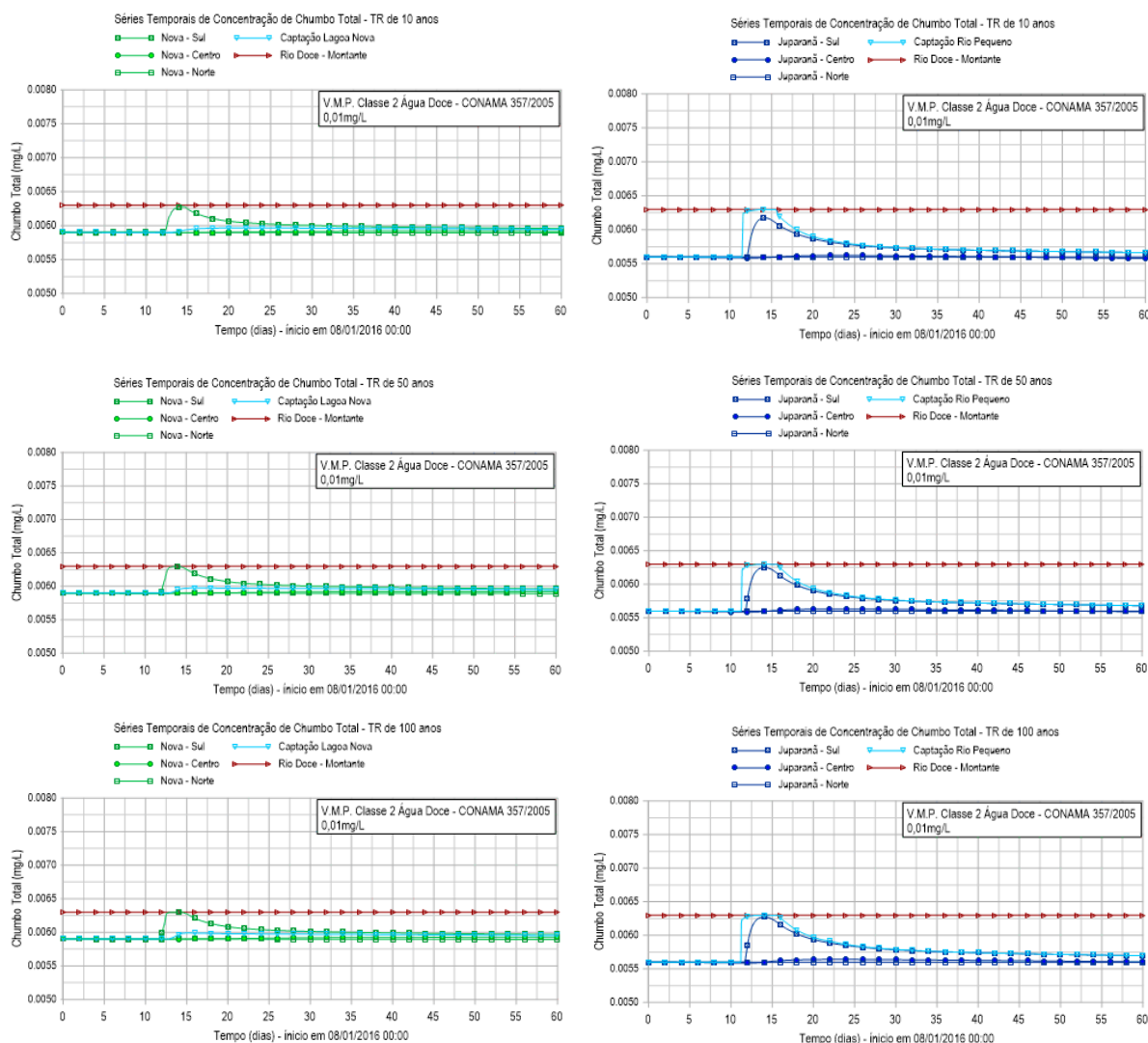


Figura 19. Séries temporais de concentrações de Chumbo Total nas estações Montante Rio Doce, Norte, Centro e Sul das lagoas Juparanã e Nova, e nos pontos de captação de água.

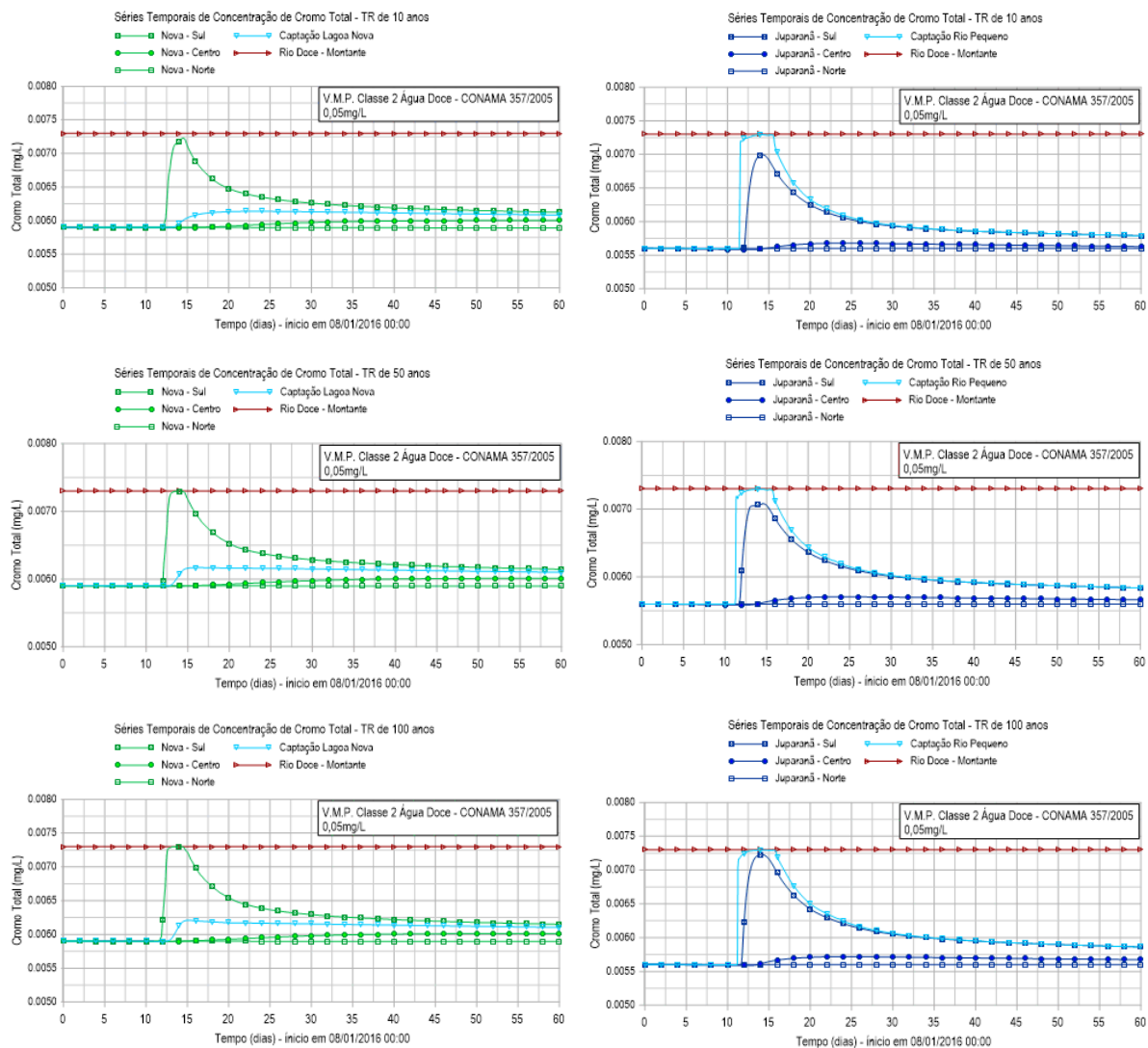


Figura 20. Séries temporais de concentrações de Cromo Total nas estações Montante Rio Doce, Norte, Centro e Sul das lagoas Juparanã e Nova, e nos pontos de captação de água.

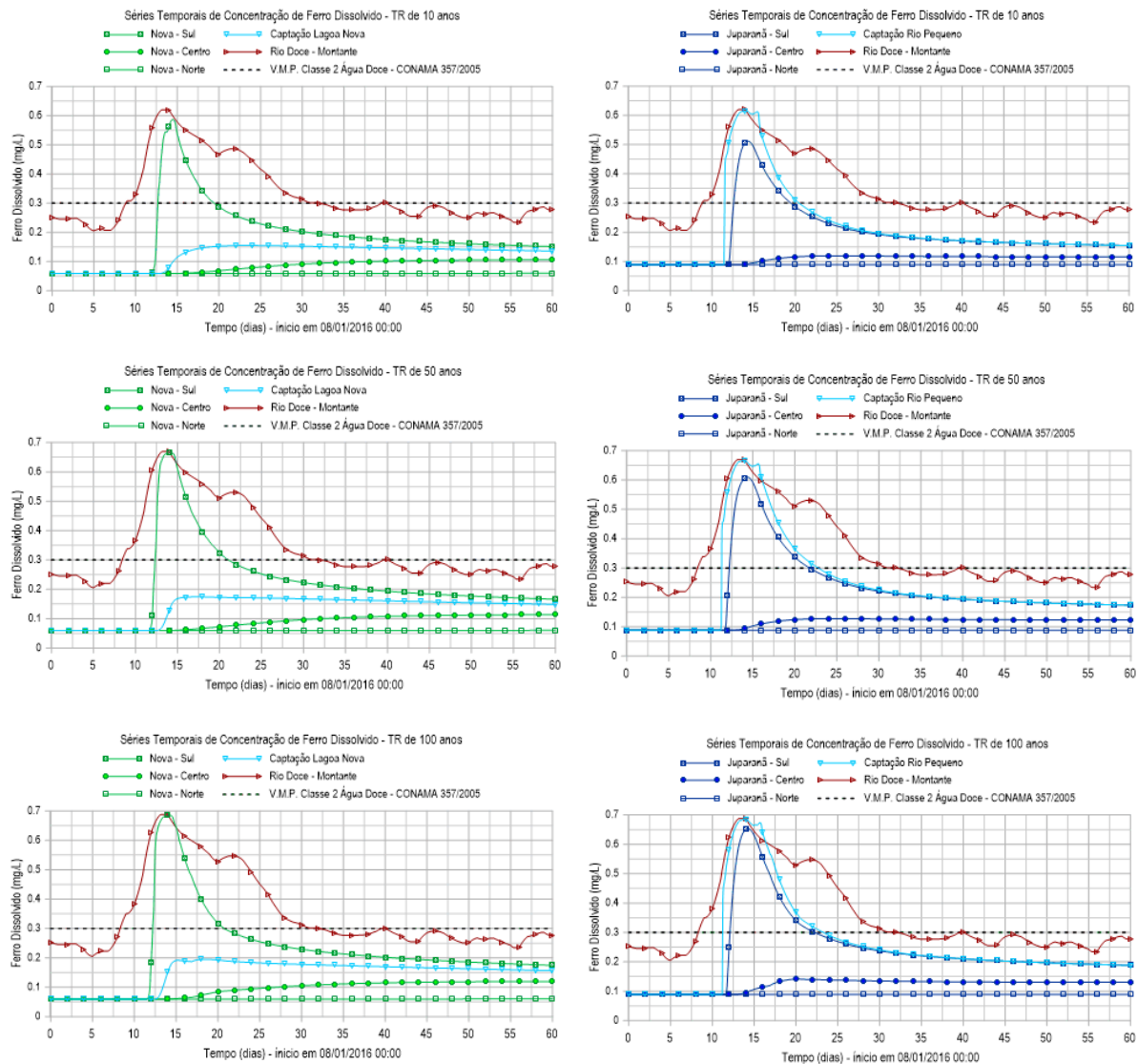


Figura 21. Séries temporais de concentrações de Ferro Dissolvido nas estações Montante Rio Doce, Norte, Centro e Sul das lagoas Juparanã e Nova, e nos pontos de Captação de água.

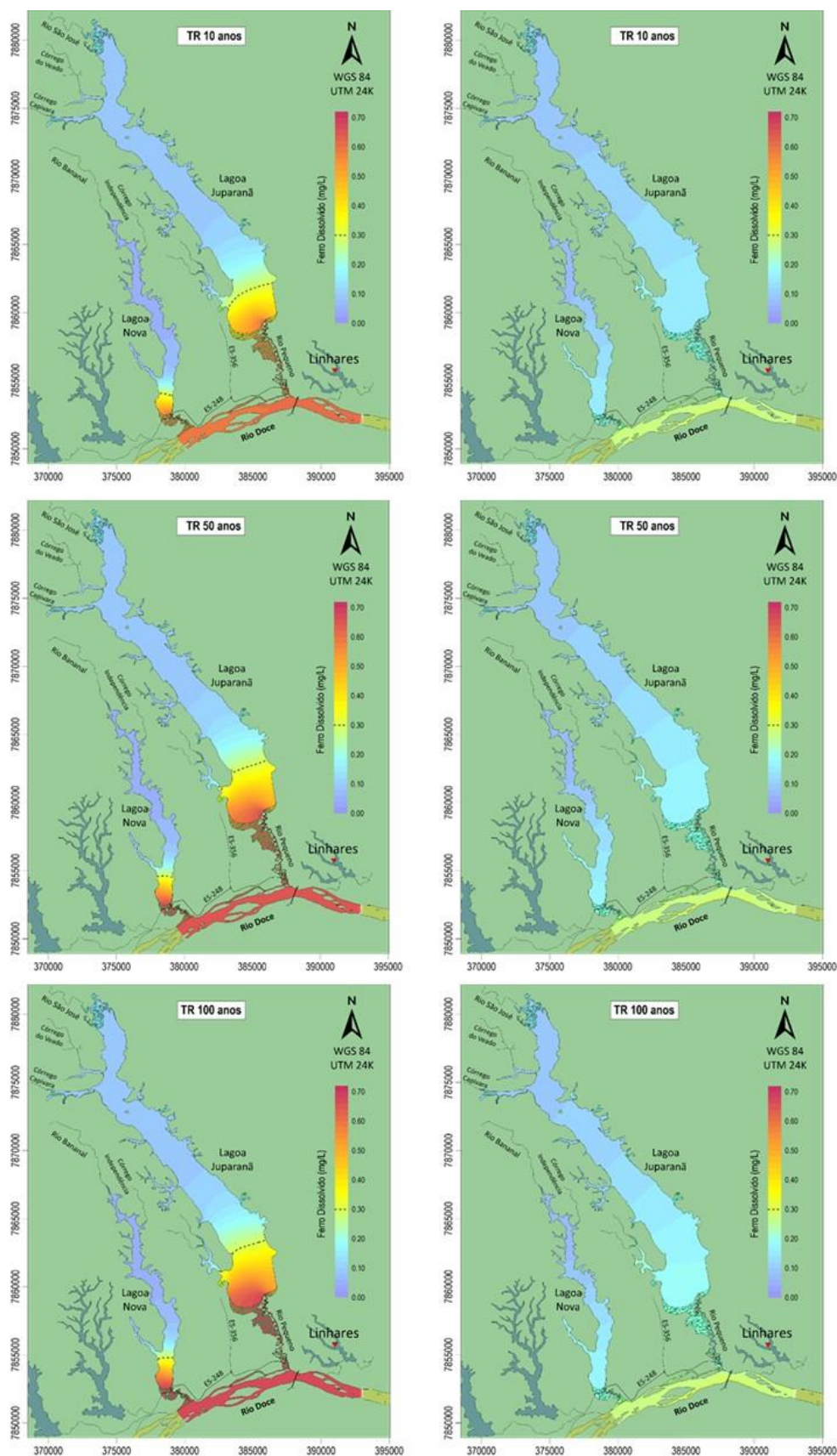


Figura 22. Isolinhas de concentração de Ferro Dissolvido no instante de pico da cheia nas lagoas (esquerda) e 45 dias após a passagem da cheia (direita) nos cenários de TRs de 10, 50 e 100 anos.

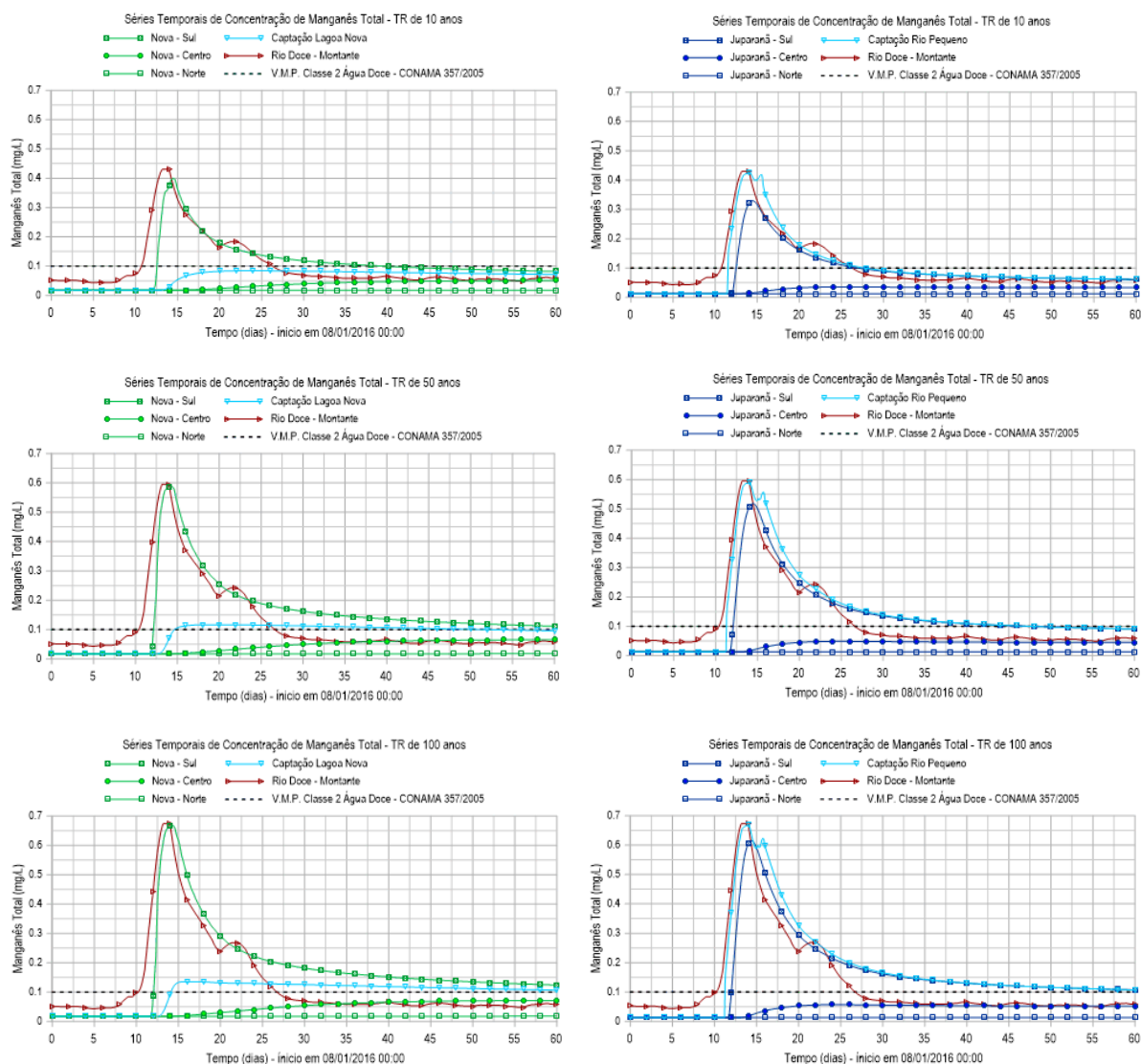


Figura 23. Séries temporais de concentrações de Manganês Total nas estações Montante Rio Doce, Norte, Centro e Sul das lagoas Juparanã e Nova, e nos pontos de captação de água.

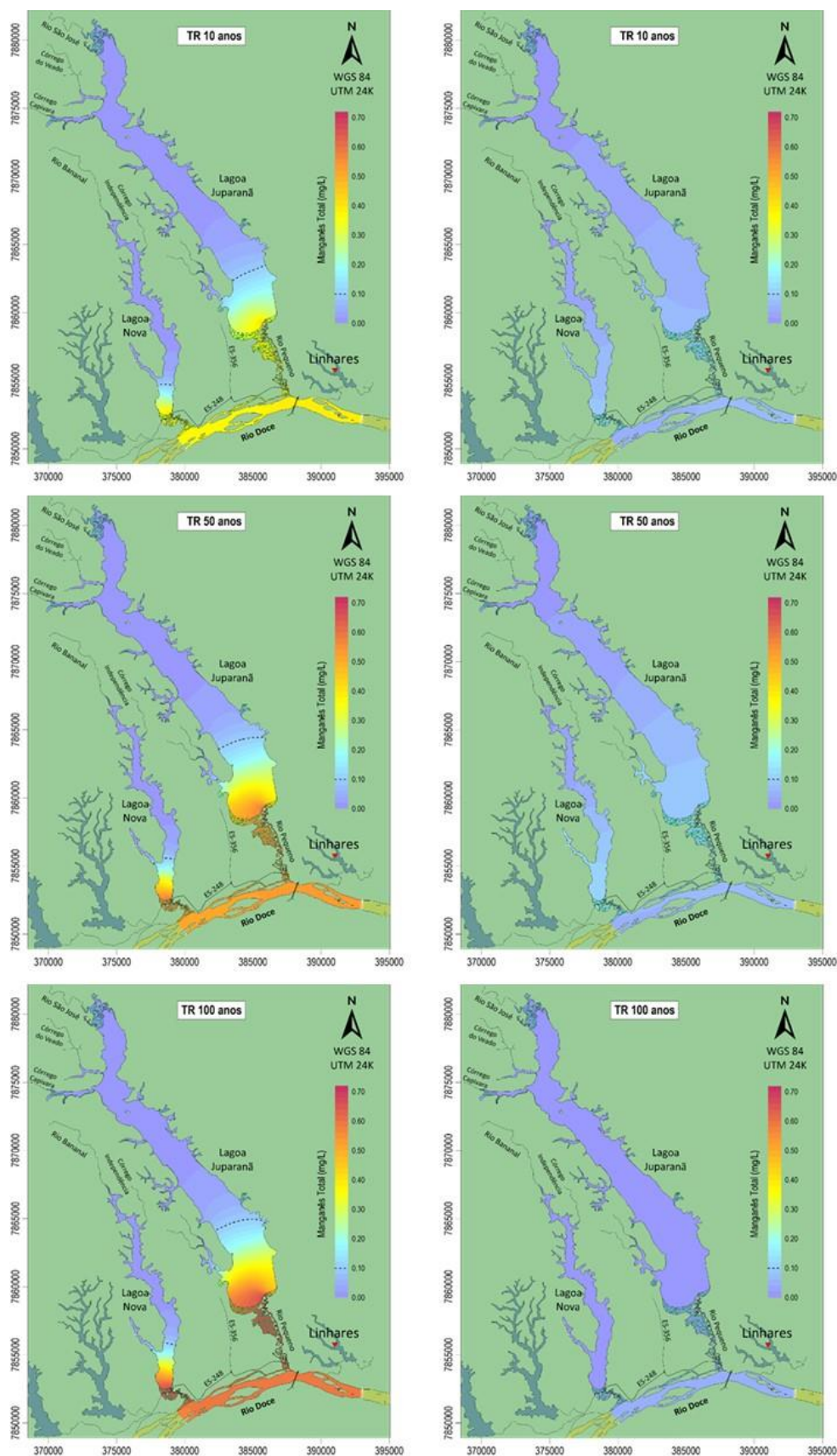


Figura 24. Isolinhas de concentração de Manganês Total no instante de pico da cheia nas lagoas (esquerda) e 45 dias após a passagem da cheia (direita) nos cenários de TRs de 10, 50 e 100 anos.

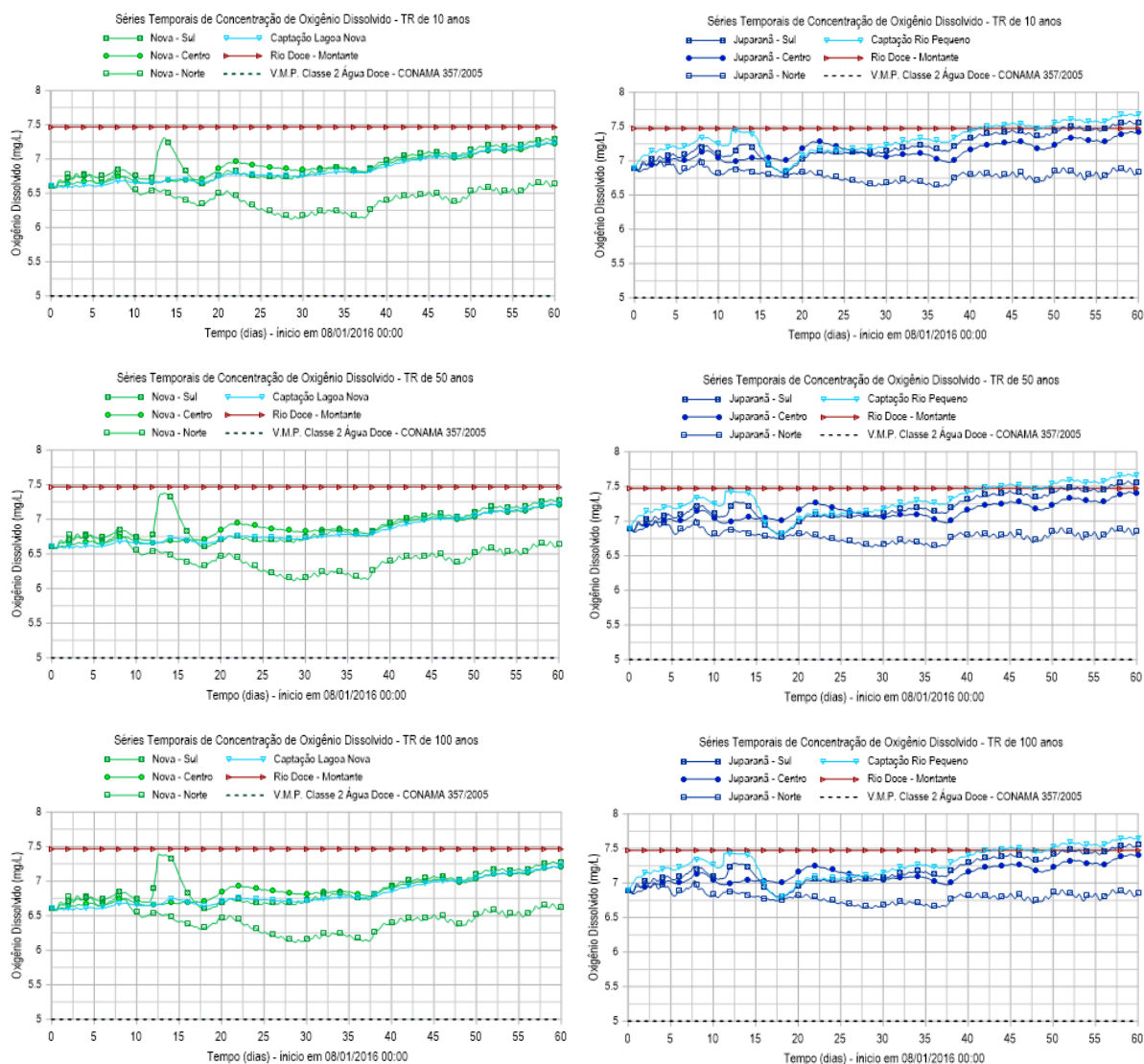


Figura 25. Séries temporais de concentrações de OD nas estações Montante Rio Doce, Norte, Centro e Sul das lagoas Juparanã e Nova, e nos pontos de captação de água.

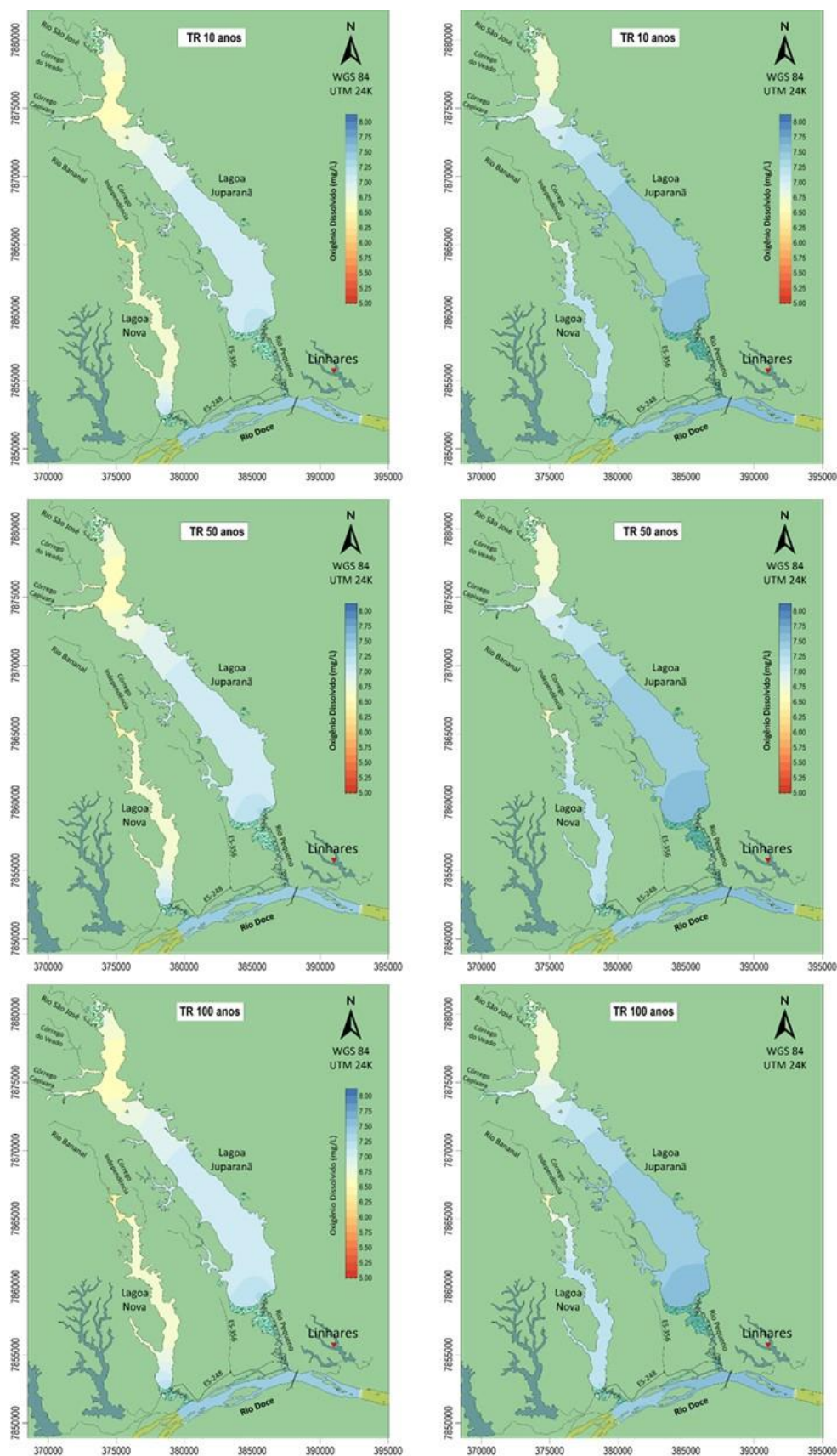


Figura 26. Isolinhas de concentração de OD no instante de pico da cheia nas lagoas (esquerda) e 45 dias após a passagem da cheia (direita) nos cenários de TRs de 10, 50 e 100 anos.

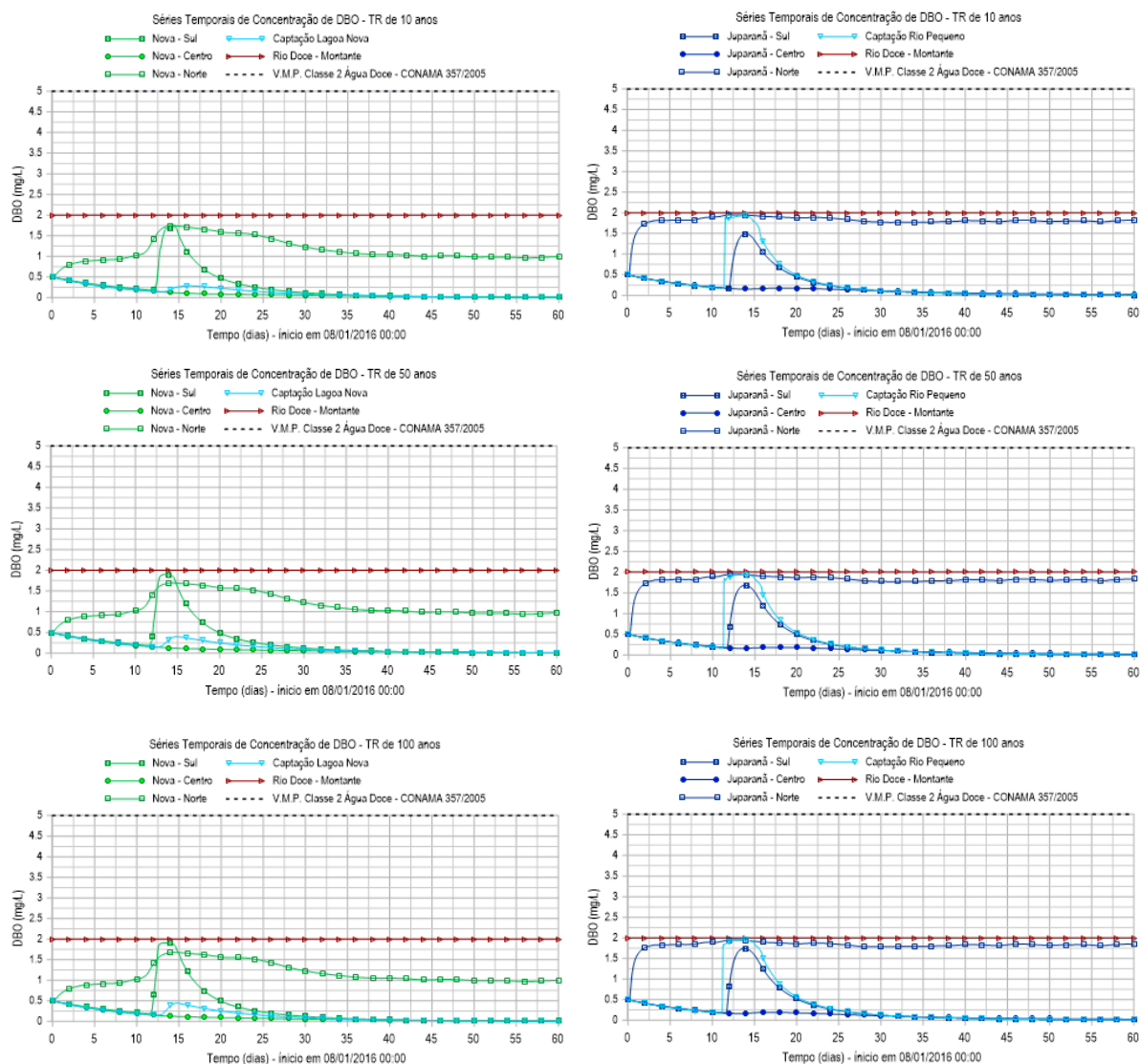
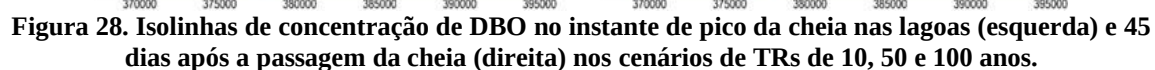


Figura 27. Séries temporais de concentrações de DBO nas estações Montante Rio Doce, Norte, Centro e Sul das lagoas de Juparanã e Nova, e nos pontos de captação de água.



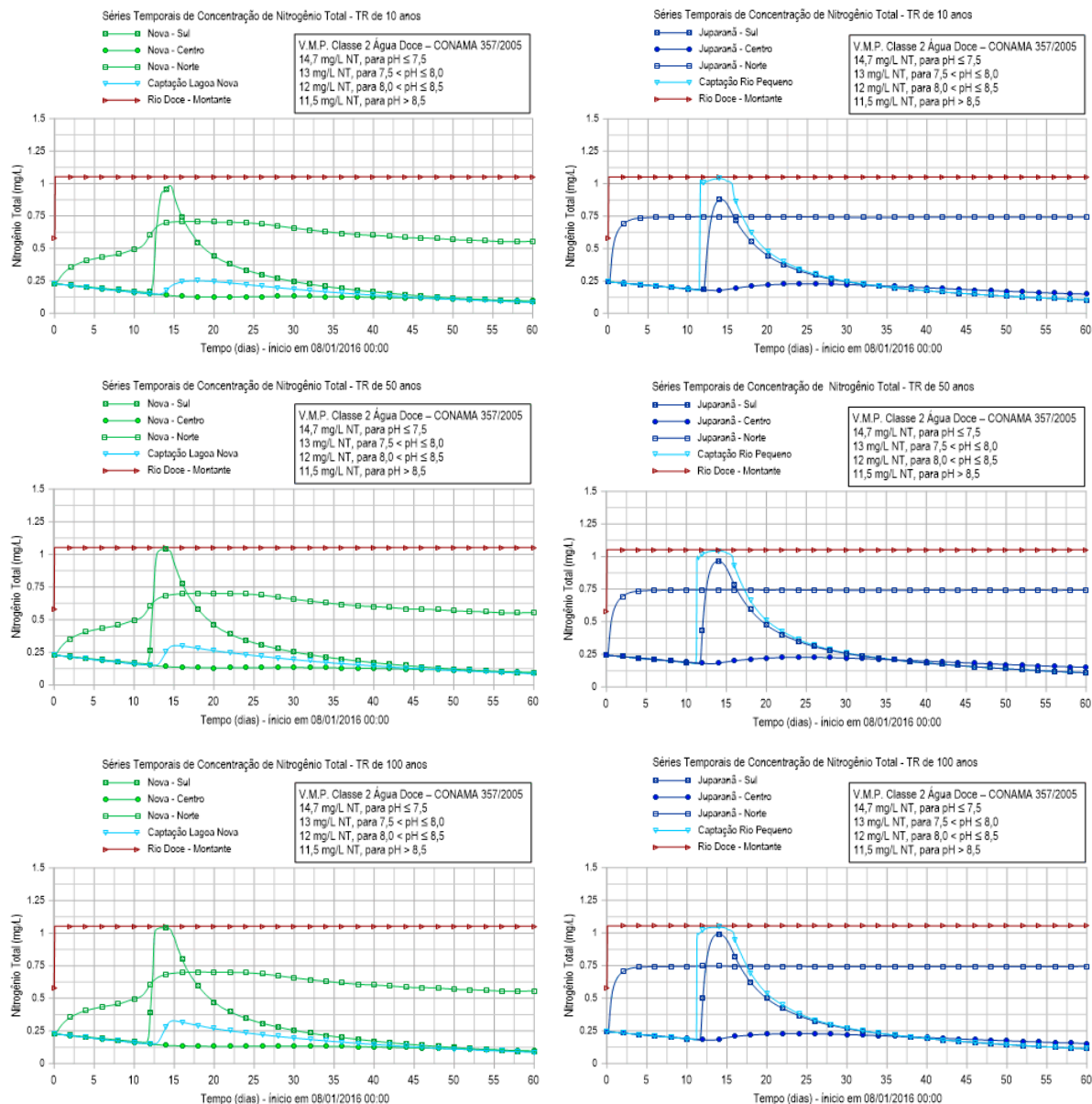


Figura 29. Séries temporais de concentrações de Nitrogênio Total nas estações Montante Rio Doce, Norte, Centro e Sul das lagoas de Juparanã e Nova, e nos pontos de captação de água.

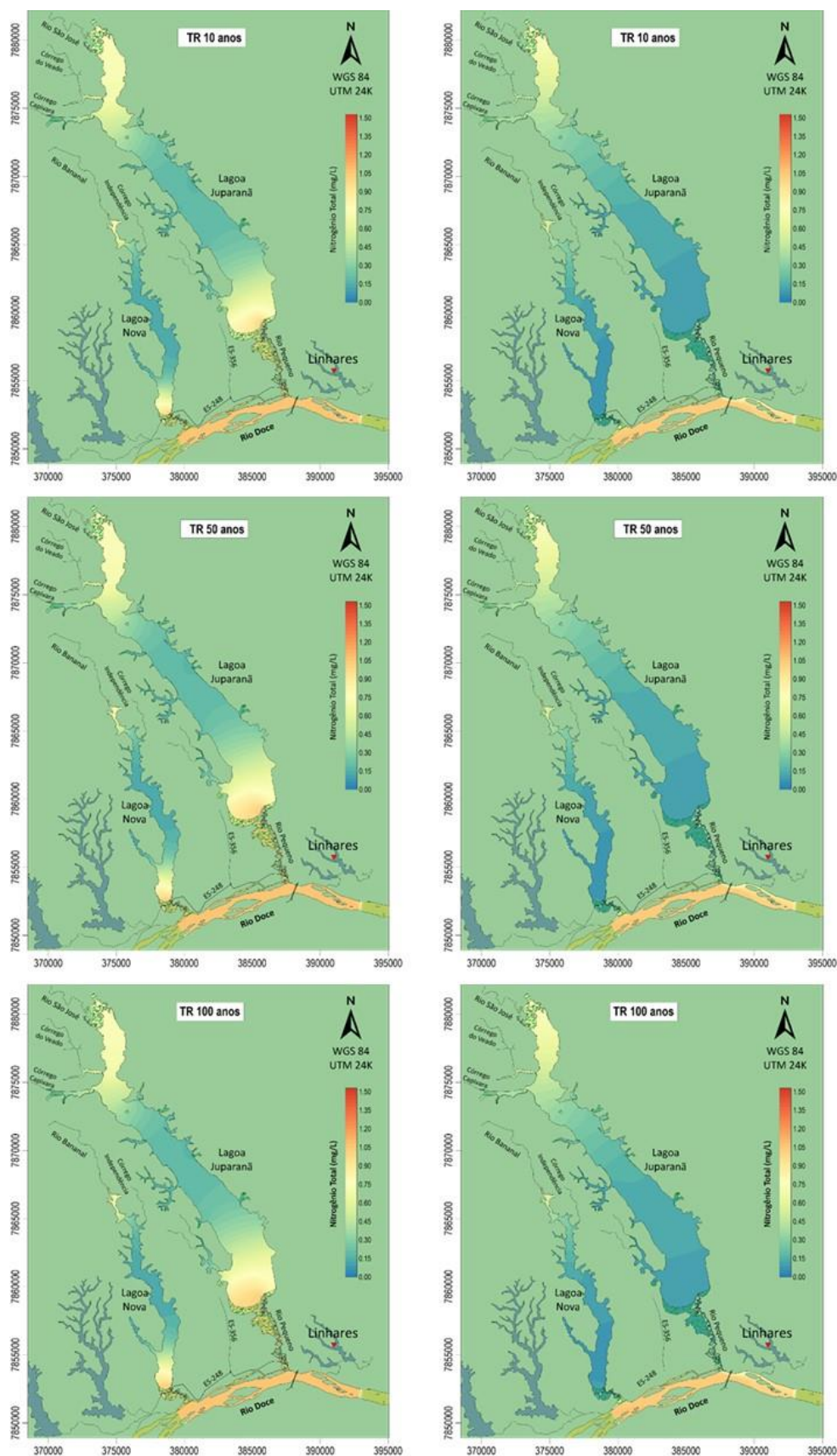


Figura 30. Isolinhas de concentração de Nitrogênio Total no instante de Pico da cheia nas lagoas (esquerda) e 45 dias após a passagem da cheia (direita) nos cenários de TRs de 10, 50 e 100 anos.

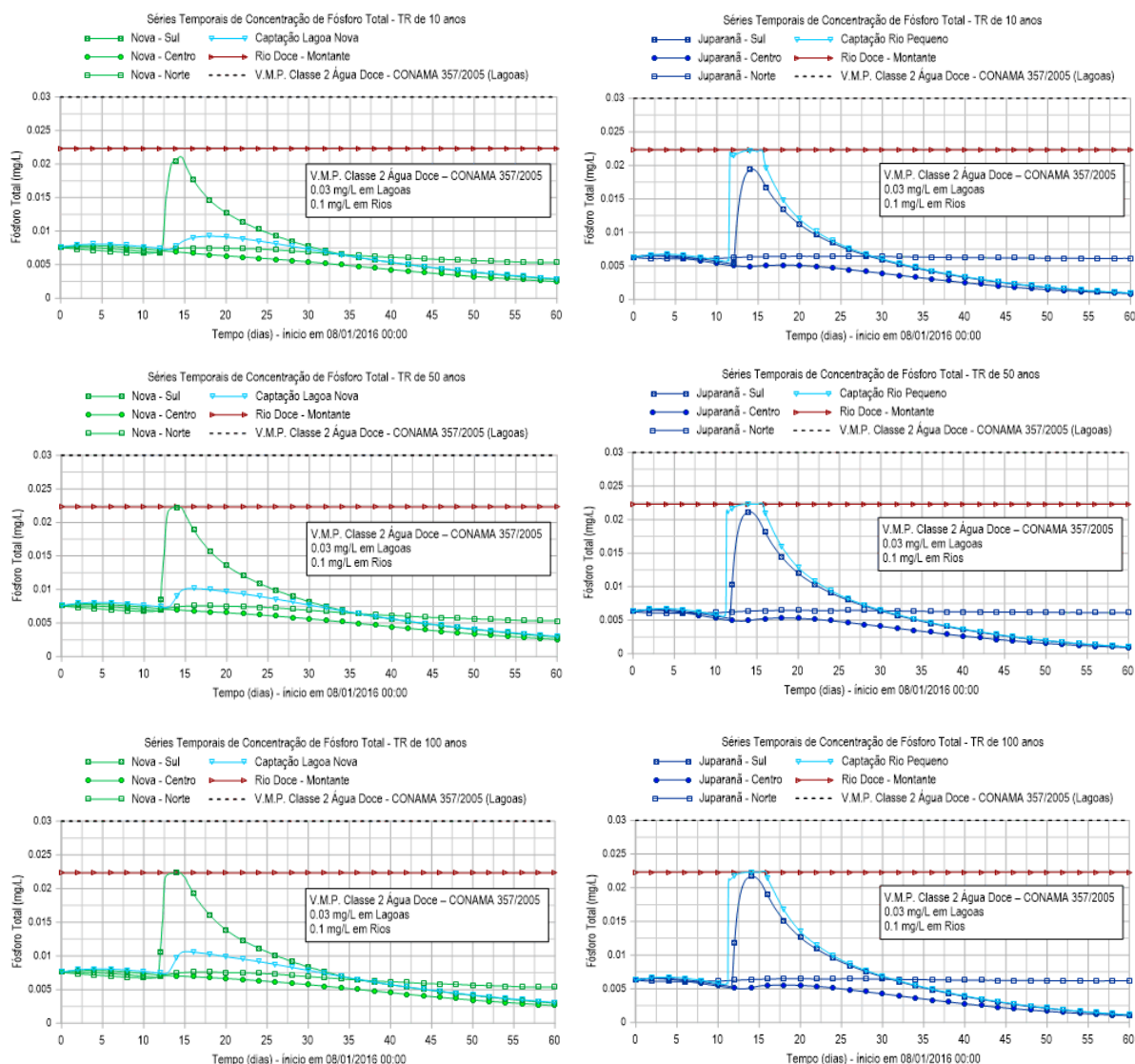


Figura 31. Séries temporais de concentrações de Fósforo Total nas estações Montante Rio Doce, Norte, Centro e Sul das lagoas Juparanã e Nova, e nos pontos de captação de água.

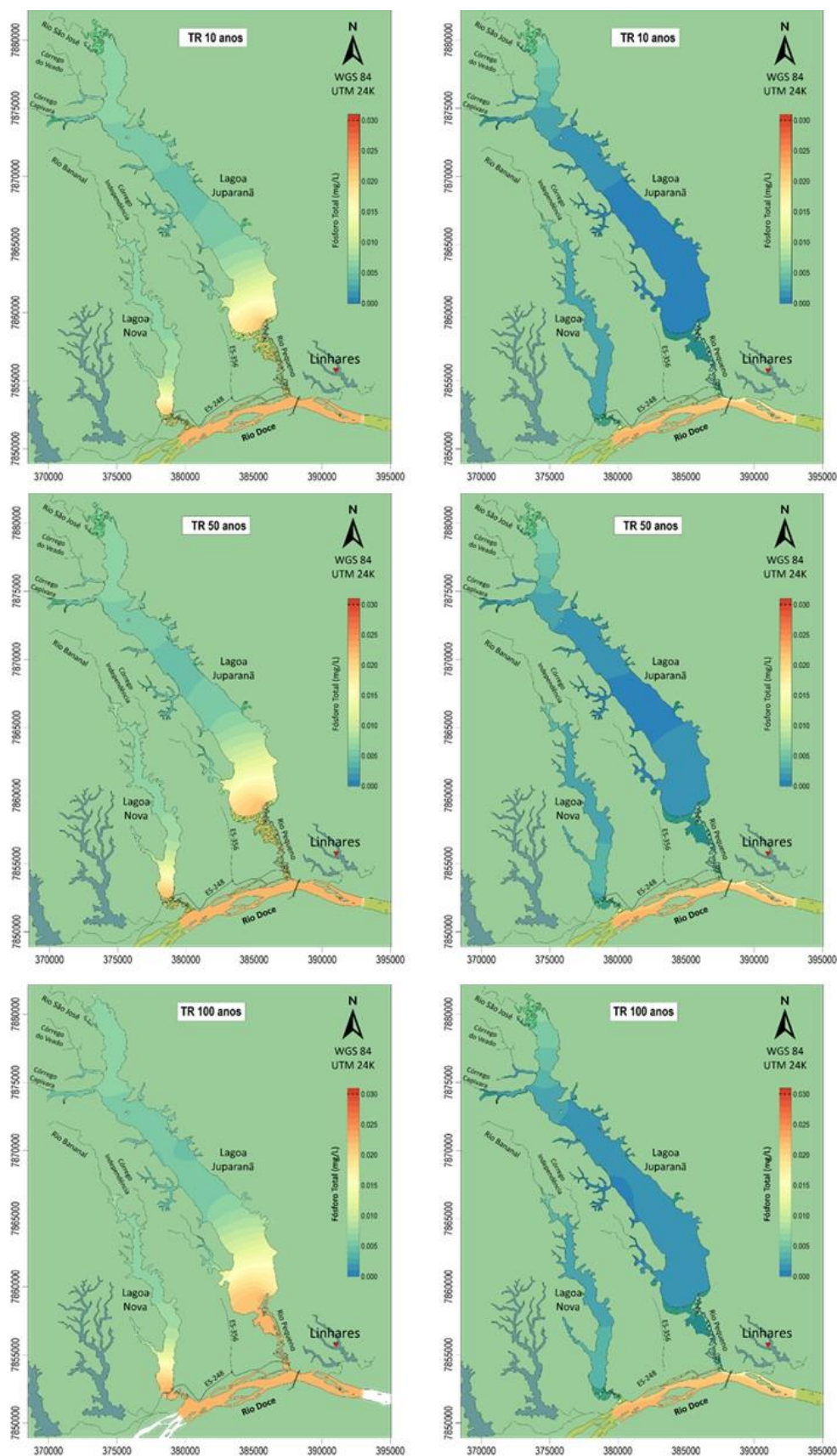


Figura 32. Isolinhas de concentração de Fósforo Total no instante de pico da cheia nas lagoas (esquerda) e 45 dias após a passagem da cheia (direita) nos cenários de TRs de 10, 50 e 100 anos.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

A avaliação hidrodinâmica e de qualidade da água com base nas simulações de vazões de pico representando períodos de retorno de 10, 50 e 100 anos reproduziu adequadamente a entrada de água do rio Doce durante as cheias nos canais de conexão (rios Bananal e Pequeno) e nas lagoas Nova e Juparanã. O pico de cheia no rio Doce precede o pico de cheia na lagoa Nova por cerca de 30 horas e na lagoa de Juparanã por cerca de 60 horas. O tempo de enchimento das lagoas é muito mais rápido que o tempo de esvaziamento. Na lagoa Nova o tempo de enchimento entre os períodos de retorno de 10 e 100 anos foi de 4 a 5 dias e na lagoa de Juparanã de 7 a 8 dias. Os resultados mostraram que, mesmo cerca de 45 dias após os picos de nível de água nas lagoas, os níveis não retornaram aos patamares observados no início da simulação.

As simulações mostraram que, em cheias do rio Doce com TRs de 10, 50 e 100 anos, as ensecadeiras não conseguiriam evitar o contato da água do rio Doce com as águas das lagoas, já que as vazões do rio Doce entram pela planície de inundação e não somente pelos canais do rio Bananal e do rio Pequeno.

As simulações mostram que a persistência de SST acima do padrão legal (Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH/MG Nº 8/2022) nas lagoas Nova e Juparanã dura menos de 5 dias e se restringe à região sul das lagoas, próxima da conexão com os rios Bananal e com o rio Pequeno a jusante, e que na captação da SAAE no rio Pequeno os valores de SST > 100 mg/L ocorrem por no máximo 16 dias em todos os cenários.

Em relação aos parâmetros da qualidade da água avaliados, as simulações indicam que o alumínio dissolvido, o ferro dissolvido e o manganês total apresentam concentrações acima do V.M.P da Resolução CONAMA357/05 (águas doces classe 2) e que as áreas atingidas por essas plumas permanecem restritas à região sul das lagoas, ocorrendo uma redução significativa nas concentrações dos constituintes após a passagem dos eventos de cheia.

CONCLUSÕES

O estudo apresentou evidências técnicas robustas de que as ensecadeiras usadas para impedir a entrada de águas do rio Doce nas lagoas Nova e Juparanã não são mais necessárias e devem ser descomissionadas. Recomenda-se a continuidade do monitoramento desses ambientes, permitindo acompanhar eventuais ocorrências de não conformidades nas águas e nos sedimentos nos pontos monitorados.

O retorno das condições naturais (sem ensecadeiras) é de grande relevância para a manutenção dos sistemas aquáticos, pois representa o retorno do regime hidrológico natural permitindo a circulação natural de organismos, inclusive de peixes, e a manutenção do fluxo gênico entre os ecossistemas lagunar e fluvial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. [CONAMA] Conselho Nacional de Meio Ambiente. (2012). Resolução no 454. Estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o gerenciamento do material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional.
2. [CONAMA] (2005). Resolução nº 357. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências
3. Conselho de Política Ambiental de Minas Gerais (COPAM), Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CERH-MG). (2022). Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH/MG Nº 8/2022 Minas Gerais, Brasil. Fernandes GW, Goulart FF, Ranieri BD, Coelho MS, Dales K, Boesche N, Bustamante M, Carvalho FA, Carvalho DC, Dirzo R et al. (2016). Deep into the mud: Ecological and socio-economic impacts of the dam breach in Mariana, Brazil. *Brazilian J Nat Conserv* 14:35–45.
4. Fernandes GW, Goulart FF, Ranieri BD, Coelho MS, Dales K, Boesche N, Bustamante M, Carvalho FA, Carvalho DC, Dirzo R et al. (2016). Deep into the mud: Ecological and socio-economic impacts of the dam breach in Mariana, Brazil. *Brazilian J Nat Conserv* 14:35–45.
5. Golder (2017). Rompimento da barragem de Fundão: Programa de caracterização geoquímica de rejeitos, solos e sedimentos. Technical Report prepared by Golder Associates Ltd. for Samarco Mineração S/A. Belo Horizonte (BR).

6. Gonçalves, MA. (2005). Algas fitoplanctônicas na lagoa Juparanã (Linhares-ES): Variação espacial, temporal e bioindicadores do estado trófico. [Dissertação (Mestrado em Biologia Vegetal)]. Universidade Federal do Espírito Santo.
7. Gonçalves, MA., Garcia FC., & Barroso, GF. (2016). Morphometry and mixing regime of a tropical lake: lake Nova (Southeastern Brazil). Annals of the Brazilian Academy of Sciences.
8. Nogare, M. N. (2014). Modificações nos padrões de comportamento de curvas-chave de sedimentos em suspensão a jusante de barramentos. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 116p.
9. Portaria GM/MS no 888, 2021. Altera o anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS no 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, (2021).
10. Rosman, Paulo Cesar Colona. 2021. Referência Técnica do SisBaHiA - Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro. URL: www.sisbahia.coppe.ufrj.br.