

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Valquíria Flávia Lima Viana

**APLICAÇÃO DE REDES CAUSAIS COMO FERRAMENTA NO ESTUDO DA
EUTROFIZAÇÃO EM RESERVATÓRIOS**

Belo Horizonte
2022

Valquíria Flávia Lima Viana

**APLICAÇÃO DE REDES CAUSAIS COMO FERRAMENTA NO ESTUDO DA
EUTROFIZAÇÃO EM RESERVATÓRIOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Área de concentração: Meio Ambiente
Linha de pesquisa: Caracterização, prevenção e controle da poluição

Orientadora: Profa. Dra. Camila Costa de Amorim Amaral

Coorientadora: Profa. Dra. Lenora Nunes Ludolf Gomes

Belo Horizonte
2022

V614a Viana, Valquíria Flávia Lima.
Aplicação de redes causais como ferramenta no estudo da eutrofização em reservatórios [recurso eletrônico] / Valquíria Flávia Lima Viana. – 2022.
1 recurso online (166 f. : il., color.) : pdf.
Orientadora: Camila Costa de Amorim Amaral.
Coorientadora: Lenora Nunes Ludolf Gomes.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.
Apêndices: f. 154-166.
Bibliografia: f. 142-153.
Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.
1. Engenharia sanitária - Teses. 2. Meio ambiente - Teses.
3. Reservatórios - Teses. 4. Água - Qualidade - Teses. 5. Eutrofização - Teses. I. Amaral, Camila Costa de Amorim. II. Gomes, Lenora Nunes Ludolf. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 628(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
COLEGIADO DO CURSO DE GRADUAÇÃO / PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO, MEIO AMBIENTE E RECURSOS
HÍDRICOS

FOLHA DE APROVAÇÃO

"Aplicação de Redes Causais Como Ferramenta No Estudo da Eutrofização Em Reservatórios"

VALQUÍRIA FLÁVIA LIMA VIANA

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

Profa Camila Costa de Amorim (orientadora)

Profa Lenora Nunes Ludolf Gomes (co-orientadora)

Profa Talita Fernanda das Graças Silva

Prof. Ricardo Tezini Minoti

Aprovada pelo Colegiado do PG SMARH

Versão Final aprovada por

Profa. Priscilla Macedo Moura

Profª. Camila Costa de Amorim Amaral

Coordenadora

Orientadora

Belo Horizonte, 16 de setembro de 2022.



Documento assinado eletronicamente por **Camila Costa de Amorim Amaral, Professora do Magistério Superior**, em 16/09/2022, às 15:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Talita Fernanda das Gracas Silva, Professora do Magistério Superior**, em 16/09/2022, às 15:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Lenora Nunes Ludolf Gomes, Usuário Externo**, em 16/09/2022, às 15:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Tezini Minoti, Usuário Externo**, em 16/09/2022, às 15:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Priscilla Macedo Moura, Coordenador(a) de curso de pós-graduação**, em 13/02/2023, às 13:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1761954** e o código CRC **EE34890E**.

Ao meu querido e eterno vovô Lu!

*Aos meus pais, meu irmão e ao meu
namorado pelo amor e apoio em todos os
momentos. Amo vocês!*

AGRADECIMENTOS

Uma etapa da minha vida se encerra e com ela vários sentimentos afloram. Mas em meio a esse turbilhão de sentimentos, os que mais se sobressaem são a alegria e a gratidão de ter conseguido concluir o mestrado, mesmo com tantos obstáculos, (até pandemia no meio desse caminho eu encontrei!). E depois disso tudo, a única certeza que eu tenho nessa vida e que apenas se confirmou durante todo esse processo, é de que sem apoio e amor, não conseguimos ir muito longe... Portanto, eu agradeço do fundo do meu coração a todos aqueles que caminharam comigo e me apoiaram das mais diversas formas, vocês foram fundamentais para eu ter chegado até aqui:

Agraço primeiramente à Deus, pelas bênçãos da saúde, da força e principalmente da coragem em todos os momentos, e de maneira muito especial a minha Nossa Senhora Aparecida, minha Cidinha tão querida, que tanto me vale em todos os momentos de angústia e de medo.

Agradeço a minha família, principalmente aos meus pais, Valtinho e Bernadete, por incentivarem meus estudos, por cada puxão de orelha que recebi durante toda a minha vida, e principalmente por me oferecer colo, abraços, uma canção tocada na viola, ou até mesmo um cafezinho recém coado, naqueles dias em que tudo é frio e cinza. Ao meu irmão Flavim, pela companhia, pelos momentos de partilha e cumplicidade, pelas piadas da 5ª série e o compartilhamento de memes que tanto me alegraram, mesmo nos dias mais pesados.

Aos meus avós, principalmente ao meu vô Lu (*in memorian*), que sempre acreditou em mim, e sempre foi o maior entusiasta do meu desejo de seguir a carreira acadêmica e mesmo lá do céu, olha por mim e está comigo em todos os momentos. À vovó Zinha (*in memorian*), que cuida de mim com um amor que transcende esse plano. À vovó Alice, pelo amor que se materializa num colo, no cuidado e no afeto de todos os dias, pelas orações (tão presentes na minha vida), pelo café e pela fé! Por falar em fé, não posso deixar de agradecer de maneira especial à Deus pelo milagre da recuperação da COVID da minha vovó! A minha maior alegria é poder compartilhar esse momento com você aqui, vovó! Agradeço ao meu vovô Lalado, pelas alegrias e as piadas que fazem doer a barriga de tanto rir. À Tia Aninha minha tia e madrinha querida, pelo carinho e doçura em todos os sentidos: Como pessoa, por sempre ter

uma palavra doce quando a gente precisa e por sempre fazer sobremesas maravilhosas, bolos e broas, e por manter a tradição iniciada pelo meu vovô Lu, de deixar sempre uma barra de chocolate no armário da cozinha!

Ao Pedrinho, meu amor, melhor amigo, colega de faculdade e parceiro de vida, agradeço por sempre me apoiar, mesmo naqueles finais de semana em que a minha única ocupação era concluir a dissertação. Por sua compreensão com meus momentos de ansiedade e de medo, por aceitar estar do meu lado para juntos vivermos essa vida e construir a nossa história. Te amo!

Aos meus amigos queridos: Thaís, Leandro, Lelê, Cíntia, Érica, Sarah e Mari, pelos momentos de alegria, pelas muitas gargalhadas, e por serem tão presentes na minha vida, mesmo que a distância. Vocês são muito queridos e obrigada por tanto!

Aos meus amigos do Magis: Lu Maron, Pe. Mauricio Alvarado SJ, Pe Francys Silvestrino SJ, Pe Cyrill Suresh SJ, Daniel, Jobson e Hiléia, pelos momentos de reflexão, alegria e oração e consolo que me mostraram que a espiritualidade nada mais é do que chegar mais pertinho de Deus, como quem chega perto do melhor amigo para conversar sobre a vida, e ouvir a história que Ele tem para nos contar. e ao meu eterno amigo Pe. João Batista Libânio SJ (*in memoniam*), que me ensinou tanto sobre o ato de “olhar”, como ele mesmo sempre dizia: “para enxergarmos melhor o mundo, pingamos colírio nos nossos olhos, e não no mundo”. E isso me ajuda diariamente a compreender melhor os propósitos de Deus na minha vida.

Ao Newton (Deva), meu amigo, professor de Yoga e psicólogo, que tanto me auxilia nessa incrível jornada que é o processo do autoconhecimento. Com certeza sou uma pessoa muito melhor e muito mais feliz hoje, depois do combo Yoga + Terapia. Obrigada meu amigo, você escancarou janelas na minha frente, que permitiram que eu enxergasse as coisas como elas são, e que sim, por mais difícil que possa parecer e independente de tudo aquilo que aconteceu e nos feriu um dia, podemos sim construir novas histórias e “re-significar” as nossas experiências para sermos pessoas melhores!

Aos meus primos irmãos: Titim, Cris e Rapha, Samu e Denise, pelo carinho e apoio em todos os momentos, pelas conversas e por ouvir meus desabafos. Aos meus

cunhados Debora e Lucas, pelo carinho, amizade e momentos de descontração, de maneira especial à Débora que me ajudou com os mapas e pelas conversas e o apoio para não deixar a peteca cair. Aos meus sogros Rosângela e Pedro, pelo carinho e pelo apoio. A Manchinha, minha gatinha, fiel escudeira e parceira durante todo tempo.

As minhas orientadoras, Professoras Camila e Lenora, pelos desafios que me tornaram com certeza uma profissional mais preparada, por confiarem em mim e me apoiarem na construção desse projeto; a Professora Maria Clara (Cacá), pelos conselhos, por compartilhar seus poemas e por me motivar sempre; aos colegas da salinha do GruPOA e ao PetPOA, pelo companheirismo e pela partilha dos nossos “perrengues” de todo dia, sempre regadas a muito café e que deixam a convivência do dia a dia mais leve.

Ao Dudu pelo grande auxílio com o R e as análises estatísticas; à Milena pelo auxílio com as tabelas de dados, à Clara e Arthur, pelo auxílio com a elaboração dos mapas e das análises das imagens de satélite. A equipe do Projeto SIMOA P&D GT0607 Cemig/Aneel, pela partilha de conhecimento e oportunidade de amadurecimento e por viabilizarem para que este trabalho pudesse ser realizado

À Natália da Cemig, à Profa. Talita e à COPASA por disponibilizarem os dados de monitoramento da qualidade da água dos reservatórios, que foram imprescindíveis para o desenvolvimento deste trabalho.

Às agências de fomento CNPq e FAPEMIG e à UFMG pelo apoio e por viabilizarem a execução desta dissertação

Aos membros da banca, pela disponibilidade em aceitar o convite e por todas as contribuições tão importantes para este trabalho e para mim como pessoa.

Ao ProUni que me permitiu ter um curso superior, e poder me aperfeiçoar nessa área tão linda que é a ciência. Muito obrigada!

“Não fiquem maravilhados diante do novo, nem assustados pelo que ontem vos era desconhecido. Não recuem diante do mistério, mas procurem enfrentá-lo e desvendá-lo... Não se considerem os únicos donos da verdade e do conhecimento, pois um diploma não faz o cientista. Somente assim poderão cumprir sua missão, ser úteis ao próximo... E façam tudo com amor, pois será um dia esplêndido aquele em que dos progressos da ciência, participará também o coração.”

(Louis Pasteur)

RESUMO

A construção dos reservatórios impacta em um conjunto de aspectos, que devem ser analisados, como: a interrupção parcial do transporte natural de sedimentos e nutrientes para jusante, perda de água devido ao aumento do volume evaporado pelo espelho d'água do reservatório. Além dos prejuízos sociais relacionados a desapropriação, existem também aqueles ocasionados à fauna e flora do rio e suas margens. As florações de cianobactérias é considerado um grande problema cuja frequência tem aumentado significativamente no mundo, como resultado do processo de eutrofização dos corpos d'água, devido ao aporte de nutrientes nitrogenados e fosfatados originários de lançamento de efluentes clandestinos e da utilização de fertilizantes. Uma pequena parte das espécies planctônicas que possui a capacidade de produzir toxinas, muitas vezes tóxicas para animais mamíferos e seres humanos, pode causar as florações de cianobactérias tóxicas, configurando como um grande problema. Além da disponibilidade quantitativa dos dados de monitoramento de qualidade de água de ambientes aquáticos, torna-se, cada vez mais importante, a definição das características qualitativas das informações que se deseja obter em função dos usos pretendidos. Sendo assim, a utilização de indicadores ambientais pode ser considerada uma ferramenta de síntese e agregação de dados com a importância de se estabelecer a sequência de causas e efeitos das ações antrópicas, além de representar a condição inicial de um sistema, servindo também para acompanhamento de sua evolução, para adoção de medidas de promoção da qualidade ambiental. Neste trabalho foram realizadas análises estatísticas e o estudo de uso e ocupação do entorno de três reservatórios: Emborcação e Nova Ponte (UHEs) e Rio Manso (abastecimento), para aplicação das redes causais com a estrutura pressão-estado-resposta, (PSR), como ferramenta para verificar os principais fatores que contribuem para a eutrofização e auxiliar no diagnóstico destes ambientes, visando antever a ocorrências de florações de cianobactérias. Os resultados mostraram que o uso e ocupação do entorno podem contribuir significativamente para o aumento dos níveis de trofia nos reservatórios, que com o passar dos anos registrou períodos eutróficos a supereutróficos. O teste ANOVA, mostrou que o IET variou significativamente ($\alpha=5\%$) entre estações do reservatório da UHE de Nova Ponte, que pode estar correlacionado com o aumento das atividades agrossilvipastoris no entorno, sobretudo o aumento dos pivôs centrais que

praticamente dobrou em 20 anos. A utilização de redes causais é uma abordagem multidisciplinar, com poucos estudos na literatura sobre a sua aplicação em reservatórios no que diz respeito a sua utilização para avaliar processos de eutrofização, o que a torna uma ferramenta promissora em estudos de qualidade da água em reservatórios. Contudo, é de suma importância que quanto mais robusto o banco de dados, melhor será a seleção dos indicadores para elucidar com maior grau de detalhamento, as complexas relações de causalidade. Por fim, constatou-se que a aplicação das redes causais, é uma metodologia bastante promissora que engloba diversos agentes sociais, bem como o conhecimento técnico e científico em prol do desenvolvimento sustentável e de melhorias de gestão de recursos hídricos, podendo até mesmo ser utilizada por comitês de gestão de bacias hidrográficas.

Palavras-chave: PSR (pressão-estado-resposta). Reservatórios. Qualidade da água. Eutrofização.

ABSTRACT

The construction of the reservoirs impacts on several aspects that must be analyzed, such as: the partial interruption of the natural transport of sediments and nutrients downstream, loss of water due to the increase in the volume evaporated by the water surface of the reservoir. In addition to the social losses related to expropriation, there are also those caused to the fauna and flora of the river and its banks. Cyanobacteria blooms are considered a major problem whose frequency has increased significantly in the world, as a result of the eutrophication process of water bodies, due to the input of nitrogenous and phosphate nutrients originating from the release of clandestine effluents and the use of fertilizers. A small part of planktonic species that can produce toxins, often toxic to mammalian animals and humans, can cause toxic cyanobacteria blooms (HABs), configuring a major problem. In addition to the quantitative availability of water quality monitoring data from aquatic environments, it is becoming increasingly important to define the qualitative characteristics of the information to be obtained based on the intended uses. Therefore, the use of environmental indicators can be considered a tool for synthesizing and aggregating data with the importance of establishing the sequence of causes and effects of anthropic actions, in addition to representing the initial condition of a system, also serving to monitor its evolution, for the adoption of measures to promote environmental quality. In this work, statistical analyzes and a study of the use and occupation of the surroundings of three reservoirs were carried out: Emborcação and Nova Ponte (Hydropower plants) and Rio Manso (water supply), for the application of causal networks with the structure pressure-state-response (PSR), as a tool to verify the main factors that contribute to eutrophication and to aid in the diagnosis of these environments, order to anticipate the occurrence of cyanobacterial blooms. The results showed that the use and occupation of the surroundings can contribute significantly to the increase in trophic levels in the reservoirs, which over the years have registered eutrophic to hypereutrophic periods. The ANOVA test showed the trophic state index varied significantly ($\alpha=5\%$) between stations at Nova Ponte reservoir's monitoring stations, which may be correlated with the increase in agrosilvopastoral activities in the surroundings, especially the increase in central pivots, which practically doubled in 20 years. The use of causal networks is a multidisciplinary approach, with few studies in the literature on its application in reservoirs for evaluate eutrophication processes, which makes it a promising tool in

studies of water quality in reservoirs. However, it is of paramount importance that the more robust the database, the better the selection of indicators, and it will elucidate, in greater detail, the complex causal relationships. Finally, it was found that the application of causal networks is a very promising methodology that encompasses several social agents, as well as technical and scientific knowledge in favor of sustainable development and improvements in the management of water resources, and even can be used by river basin management committees.

Keywords: PSR (pressure-state-response). Reservoirs. Water quality. Eutrophication process.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Diagramas das estruturas conceituais mais comuns e utilizadas em estudos baseados em indicadores. (a) PSR, (b) DSR e (c) DPSIR.....	35
Figura 2 - Mapa de localização das áreas de estudo. UHE de Nova Ponte (a), UHE de Emborcação (b) e Represa de Rio Manso (c)	53
Figura 3 (a) e (b) - Mapas de uso e ocupação do solo do entorno do reservatório da UHE de Emborcação.....	66
Figura 4 (a) e (b) - Mapas de uso e ocupação do solo do entorno do reservatório da UHE de Nova Ponte	69
Figura 5 (a) e (b) - Mapas de uso e ocupação do solo da Represa Rio Manso	73
Figura 6 - Rede causal	76
Figura 7 - Gráficos <i>box whisker</i> série temporal - Represa Rio Manso	79
Figura 8 - Gráficos <i>Box whisker</i> por estação - Represa Rio Manso	83
Figura 9 - Gráficos <i>box whisker</i> série temporal - Reservatório da UHE Nova Ponte.	90
Figura 10 - Gráficos <i>Box whisker</i> por estação – Reservatório da UHE Nova Ponte .	93
Figura 11 - Gráficos <i>box whisker</i> Série temporal – Reservatório da UHE Emborcação	99
Figura 12 - Gráficos <i>box whisker</i> – Reservatório da UHE Emborcação	101
Figura 13 - Classificação do uso do solo – Reservatório UHE Nova Ponte 1995 ...	108
Figura 14 - Classificação do uso do solo – Reservatório UHE Nova Ponte 2005 ...	109
Figura 15 - Classificação do uso do solo – Reservatório UHE Nova Ponte 2015 ...	110
Figura 16 - Classificação do uso do solo – Reservatório UHE Nova Ponte 2020 ...	111
Figura 17 - Classificação do uso do solo – Represa Rio Manso 1995	112
Figura 18 - Classificação do uso do solo – Represa Rio Manso 2005	113
Figura 19 - Classificação do uso do solo – Represa Rio Manso 2015	114
Figura 20 - Classificação do uso do solo – Represa Rio Manso 2020	115
Figura 21 - Classificação do uso do solo – Reservatório UHE Emborcação 1995..	116
Figura 22 - Classificação do uso do solo – Reservatório UHE Emborcação 2005..	117
Figura 23 - Classificação do uso do solo – Reservatório UHE Emborcação 2015..	118
Figura 24 - Classificação do uso do solo – Reservatório UHE Emborcação 2020 ..	119
Figura 25 - Gráficos dos empreendimentos por área, tipologia e município – Reservatório UHE Nova Ponte.....	120

Figura 26 - Gráficos dos empreendimentos por área, tipologia e município – Reservatório UHE Nova Ponte.....	121
Figura 27 - Gráficos dos empreendimentos por área, tipologia e município – Reservatório UHE Nova Ponte.....	122
Figura 28 - Gráficos dos empreendimentos por área por município – Represa Rio Manso	123
Figura 29 - Gráficos dos empreendimentos por área por município – Represa Rio Manso	124
Figura 30 - Gráficos dos empreendimentos por área por município – Represa Rio Manso	125
Figura 31 - Gráficos dos empreendimentos por área por município – Reservatório UHE Emborcação	126
Figura 32 - Gráficos dos empreendimentos por área por município – Reservatório UHE Emborcação	127
Figura 33 - Gráficos do avanço das áreas em porcentagem (%), do uso e ocupação do solo no entorno de (a) UHE Nova Ponte, (b) Represa Rio Manso e (c) Emborcação	129
Figura 34 - Cálculo do IET Ponderado para séries temporais.....	133
Figura 35 - IET ponderado por estação.....	134
Figura 36 - Correlação Reservatório UHE Emborcação Superfície.....	159
Figura 37 - Correlação Reservatório UHE Emborcação Zona Fótica.....	162
Figura 38 - Correlação Reservatório UHE Nova Ponte Superfície	164
Figura 39 - Correlação Reservatório UHE Nova Ponte Zona Fótica	165
Figura 40 - Correlação Represa Rio Manso Zona Fótica	166

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Critérios para seleção de indicadores de acordo com a OECD (2003)....	32
Quadro 2- Questões norteadoras para seleção de indicadores de acordo com US EPA (2000).....	33
Quadro 3 - Trabalhos que utilizaram as estruturas conceituais PSR (Pressão Estado e Resposta) e DPSIR (Força motriz, Pressão, Estado, Impacto e Resposta).....	37
Quadro 4 - Valores do IET classificados segundo classes de estado trófico	48
Quadro 5 - Resumo do detalhamento da Seleção de Indicadores	60
Quadro 6 - Indicadores selecionados para construção da rede causal.....	77
Quadro 7 - Áreas em km ² , das classes de uso e ocupação do solo nos anos de 1995, 2005, 2015 e 2020 no entorno da UHE Nova Ponte (a) e Rio Manso (b)	128
Quadro 8 - Estações amostrais do reservatório da UHE de Nova Ponte e dos seus principais tributários-ANEXO.....	155
Quadro 9 - Estações amostrais do reservatório da UHE de Emborcação e dos seus principais tributários	156
Quadro 10 - Estações amostrais do reservatório de Rio Manso e dos seus principais tributários.....	157

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Correlação da clorofila (variável resposta) com os parâmetros N amoniacal, N total, Nitrato e Fósforo total no reservatório de Emborcação, na profundidade de superfície (modelos completo e mínimo).....	158
Tabela 2 - Correlação da clorofila (variável resposta) com os parâmetros N amoniacal e Fósforo total no reservatório de Emborcação na profundidade de zona fótica (modelos completo e mínimo)	161
Tabela 3 - Correlação da clorofila (variável resposta) com os parâmetros N amoniacal, N total, Nitrato e Fósforo total. Nova Ponte Superfície (modelos completo e mínimos)	163
Tabela 4 - Correlação da clorofila (variável resposta) com os parâmetros N amoniacal, N total, Nitrato e Fósforo total no reservatório de Nova Ponte na profundidade de zona fótica (modelos completo e mínimo).....	165
Tabela 5 - Correlação da clorofila (variável resposta) com os parâmetros N amoniacal, N total, Nitrato e Fósforo total. – Rio Manso Zona Fótica (modelos completo e mínimo)	166

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA - Agência Nacional de Águas

CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

COPASA - Companhia de Saneamento de Minas Gerais

DPSIR - Força motriz-pressão-estado-impacto-resposta

DSR - Força motriz-estado-resposta

GW - Gigawatt

HABs - *Harmful Algal Blooms*

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos

IET - Índice de Estado Trófico

MW - Megawatt

OECD - Organization for Economic Co-operation and Development

PNLA - Portal Nacional do Licenciamento Ambiental

PNUMA - Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

PSR - Pressão-estado-resposta

SIMBIO - Sistema de Monitoramento da Biodiversidade

TWh - Terawatt-hora

UHE - Usina Hidrelétrica

USGS - Serviço Geológico dos Estados Unidos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	22
2	JUSTIFICATIVA	25
3	OBJETIVOS	27
3.1	OBJETIVO GERAL	27
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	27
4	REVISÃO DA LITERATURA	28
4.1	RESERVATÓRIOS NO BRASIL	28
4.2	INDICADORES AMBIENTAIS	30
4.3	ESTRUTURA DAS REDES CAUSAIS	33
4.4	EUTROFIZAÇÃO.....	43
4.4.1	<i>Parâmetros Físicos e Químicos para Ocorrência da Eutrofização</i>	45
4.5	CIA NOBACTÉRIAS	48
4.6	CIA NOTOXINAS.....	50
5	METODOLOGIA	52
5.1	ÁREAS DE ESTUDO.....	52
5.2	ANÁLISES ESTATÍSTICAS DOS BANCOS DE DADOS DISPONÍVEIS	55
5.3	PRINCIPAIS ETAPAS PARA CRIAÇÃO DA REDE CAUSAL	58
5.4	SELEÇÃO DOS INDICADORES PARA A REDE CAUSAL.....	59
5.4.1	<i>Identificação das Pressões</i>	61
5.4.1.1	Levantamento de atividades no entorno que podem impactar na qualidade de água	61
5.4.1.2	Levantamento de empreendimentos nos municípios de entorno dos reservatórios.....	61
5.4.1.3	Elaboração dos mapas de uso e ocupação do solo	62
5.4.2	<i>Identificação do Estado</i>	63
5.4.3	<i>Identificação da Resposta</i>	64
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
6.1	CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO.....	65
6.1.1	<i>Reservatório da UHE de Emborcação</i>	65

6.1.2	<i>Reservatório da UHE de Nova Ponte</i>	68
6.1.3	<i>Represa Rio Manso</i>	71
6.2	REDE CAUSAL	75
6.2.1	<i>Seleção dos indicadores</i>	75
6.2.2	<i>Análise estatística do monitoramento da qualidade da água</i>	78
6.2.2.1	Qualidade da água da Represa Rio Manso	82
6.2.2.2	Qualidade da água do Reservatório UHE Nova Ponte.....	89
6.2.2.3	Qualidade da água do Reservatório UHE Emborcação	98
6.2.3	<i>Indicadores de pressão</i>	106
6.2.4	<i>Indicadores de Estado</i>	130
6.2.4.1	Cálculo do Índice de Estado Trófico	131
6.2.4.2	Correlação da clorofila com os outros parâmetros nas áreas de estudo	135
6.2.5	<i>Indicadores de Respostas</i>	135
6.2.6	<i>Avaliação da aplicação da rede causal para a ocorrência dos processos de eutrofização em reservatórios</i>	136
7	CONCLUSÕES	139
8	RECOMENDAÇÕES	142
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	143
	APÊNDICE A – LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES	155
	APÊNDICE B – CORRELAÇÕES DE PEARSON	158

1 INTRODUÇÃO

Os reservatórios são construídos para diversos fins, dentre eles: abastecimento da população, irrigação, navegação, controle de cheias, geração de energia hidrelétrica. A construção destes empreendimentos, impacta em um conjunto de aspectos, que devem ser mensurados, analisados e discutidos, que envolve prejuízos ocasionados à fauna e flora do rio e suas margens (modificação do regime de vazões); prejuízo social relacionado à desapropriação e remoção de habitantes dentro da zona de inundação do reservatório; interrupção parcial do transporte natural de sedimentos e nutrientes para jusante; perda de água devido ao aumento do volume evaporado pelo espelho d'água do reservatório (MEES, 2020).

O represamento das águas determina alterações nas suas características físicas, químicas e biológicas e, conseqüentemente, há necessidade de implementação de ações para avaliá-las e monitorá-las com a finalidade de promover o uso sustentável dos recursos ambientais para minimizar os efeitos de possível degradação ambiental. Nesse sentido, tendo em vista o usos múltiplos dos reservatórios e a evolução dos poluentes sintéticos e dos seus efeitos sinérgicos, é de suma importância, a proposição de estratégias complementares àquelas usualmente adotadas pela legislação ambiental e de recursos hídricos para a gestão das águas como, a utilização de metodologias inovadoras que considerem os múltiplos fatores que condicionam a estrutura e o funcionamento dos ambientes aquáticos e que interferem na dinâmica de sua integridade ecológica (FERREIRA *et al.*, 2017).

Um dos possíveis efeitos referentes ao represamento pode ser a frequência das florações de cianobactérias em água doce que tem aumentado significativamente no mundo todo, como resultado do processo de eutrofização artificial dos corpos d'água. Um dos maiores problemas dessas florações, está associado à ocorrência das florações de cianobactérias tóxicas, ou *Harmful Algal Blooms* (HABs), que são causadas por uma pequena parte das espécies planctônicas que possui a capacidade de produzir toxinas potentes, muitas vezes tóxicas para animais mamíferos e seres humanos.

O diagnóstico rápido na detecção do teor de toxinas e/ou do potencial tóxico dessas florações é de extrema importância (BRIENT *et al.*, 2017; CARACCILO *et al.*, 2019),

no intuito de evitar, por exemplo, episódios como o primeiro caso de intoxicação por cianotoxinas que foi registrado no Brasil em Caruaru no estado do Pernambuco, em 1996, onde água contaminada de um reservatório era utilizada em um hospital para hemodiálise o que provocou a morte de mais de 60 pacientes (JOCHIMSEN *et al.*, 1998).

Além da disponibilidade quantitativa dos dados de monitoramento de qualidade de água de ambientes aquáticos, torna-se cada vez mais importante, a definição das características qualitativas das informações que se deseja obter em função dos usos pretendidos. Sendo assim, a aplicação de métodos para aprimorar o diagnóstico e entendimento das problemáticas associadas à qualidade da água de reservatórios, assim como a utilização de indicadores ambientais podem ser considerados uma ferramenta de síntese e agregação de dados com a importância de se estabelecer a sequência de causas e efeitos das ações antrópicas, bem como, indicadores que representem a condição inicial de um sistema e que sirvam também ao acompanhamento de sua evolução, para que sejam adotadas medidas de promoção da qualidade ambiental, como forma de garantir o suprimento dos recursos numa dada unidade da paisagem (MORAES *et al.*, 2010).

A metodologia de redes causais pode ser uma importante aliada no intuito de possibilitar uma análise multidisciplinar para seleção de indicadores que consigam retratar a real situação do ambiente, com objetivo de propor medidas mitigadoras e medidas preventivas. Isso se deve ao fato de as redes causais englobarem fatores diretos e indiretos e uma análise que considera diversos panoramas e perspectivas, como o diagnóstico do corpo d'água em si, bem como análises do entorno, que poderão contribuir para avaliação de diversos fenômenos.

De acordo com Niemeijer & De Groot (2008), nas redes causais, ou cadeias causais como também são conhecidas, os desenvolvimentos social e econômico são considerados as forças motrizes que exercem pressão sobre o meio ambiente, levando a mudanças no seu estado. Por sua vez, essas mudanças geram impactos sobre a saúde humana, os sistemas ecológicos e os materiais que podem demandar uma resposta social que retroalimenta as forças motrizes, pressões, no estado do

ambiente ou diretamente nos impactos sobre a população e o meio ambiente (SMEETS & WETERINGS, 1999).

A abordagem de redes causais, possibilita a análise individual ou em conjunto, dos fatores diretos (ex.: variação dos parâmetros físicos, químicos e biológicos) e indiretos no ambiente, como as atividades antrópicas que podem refletir na qualidade da água (ex.: uso e ocupação do solo como a presença de industrialização, mineradoras, agricultura, irrigação por meio da utilização de pivôs centrais, lançamento de efluentes e etc.), que tem como objetivo contribuir para obtenção de um diagnóstico a curto, médio e principalmente a longo prazo dos ambientes estudados, bem como estabelecer índices que permitem a classificação do ambiente (ex.: quanto ao nível de trofia), para auxiliar no processo de escolha de alternativas de prevenção e remediação quando houver necessidade.

Salles e colaboradores (2004), classificam a pressão, para a eutrofização em águas continentais, associada ao suprimento excedente de nitrogênio e fósforo provenientes da adubação via fertilizantes naturais (esterco) e comerciais. Para o estado do ambiente, a distribuição das concentrações de fósforo em rios e a carga dos nutrientes de lagos e cursos d'água. Por fim, como resposta a estes impactos, a porcentagem da área agrícola total.

No presente trabalho será avaliada a aplicação de redes causais como ferramenta, sobretudo preditiva, para estudos do fenômeno de eutrofização. Serão investigados três reservatórios brasileiros distintos, sendo dois de usos múltiplos com foco na geração de energia hidrelétrica e um de abastecimento humano. Esse estudo almeja aplicar a metodologia de redes causais, que é uma abordagem multidisciplinar, com muitos estudos na literatura, mas poucos no que diz respeito a sua aplicação como ferramenta nos estudos dos processos de eutrofização, e tem como objetivo compreender as relações das pressões que alteram o estado do ambiente, para sugerir respostas no intuito de promover um melhor gerenciamento dessas áreas bem como o uso sustentável dos recursos.

2 JUSTIFICATIVA

Os *blooms* ou florações de cianobactérias, ou seja, o aumento da proliferação desses organismos nos ambientes aquáticos é considerado como uma das principais consequências do fenômeno da eutrofização antrópica, que pode ser definido como enriquecimento de ambientes aquáticos principalmente por nutrientes como fósforo e nitrogênio em suas diversas formas, que são resultantes de atividades antrópicas, como o uso de fertilizantes na agricultura e lançamento de efluentes sem tratamento ou sem tratamento adequado em corpos d'água (CETESB, 2013).

A importância de se monitorar as cianobactérias em ambientes aquáticos se justifica principalmente, no intuito de evitar episódios como o caso ocorrido em Caruaru no estado do Pernambuco, Brasil, em 1996, onde a água utilizada para hemodiálise estava contaminada com a cianotoxina microcistina LR, sendo o primeiro caso de intoxicação por cianotoxinas registrado no Brasil, que resultou na morte de mais de 60 pacientes. Esta intoxicação alertou estudiosos e agentes de saúde para o problema das cianotoxinas no Brasil e no mundo (AZEVEDO *et al.*, 2002; CARMICHAEL *et al.*, 2001; JOCHIMSEN *et al.*, 1998). Nesse sentido, um diagnóstico precoce da presença destas cianobactérias potencialmente tóxicas no ambiente, pode evitar casos como este.

As áreas de estudo definidas para a execução deste trabalho, para aplicação dos conceitos das redes causais, são os reservatórios das Usinas Hidrelétricas de Emborcação e Nova Ponte e o reservatório de abastecimento de Rio Manso. A escolha destes reservatórios justifica-se pelas características das atividades de entorno, que podem, por sua vez, impactar na qualidade da água do reservatório. Considerou-se também dados históricos coletados na literatura de episódios de florações cianobactérias que foram registradas nesses ambientes. O banco de dados de monitoramento de diversos parâmetros, sobretudo daqueles de interesse para estudos de florações, foram gentilmente disponibilizados pela Cemig Geração e Transmissão e pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA), para realização das análises estatísticas para elaboração deste trabalho.

A utilização de indicadores tem como principal objetivo transformar as métricas (parâmetros e variáveis) monitoradas no ambiente *in situ* e *ex situ* ao longo de um

determinado recorte temporal, em informações que podem ser utilizadas pela comunidade científica na classificação de ambientes assim como analisar as situações que podem gerar impactos, objetivando na criação de medidas de prevenção e remediação. Não obstante, a utilização de indicadores também pode ser considerada uma importante ferramenta de acessibilidade à informação e ao conhecimento para a comunidade de uma forma geral, pois podem traduzir complexas informações de forma mais simplificada, com linguagem de fácil acesso e compreensão, possibilitando assim que a comunidade compreenda as alterações e o estado do meio ambiente, o que por consequência promove o diálogo e maior interação com a comunidade científica. Lembrando que o conhecimento deve ser acessível a todos, para que o ambiente possa ser preservado e cuidado de maneira adequada.

Embora tenha-se o conhecimento dos principais fatores que podem contribuir com os processos de eutrofização antrópica nos corpos d'água, é importante ressaltar que essas contribuições podem ser oriundas de diversas fontes (como por exemplo, diferentes fontes de poluição difusas). A aplicação das redes causais é importante tanto para ambientes eutróficos ou hipereutróficos, pois por meio dela podemos propor medidas de recuperação e mitigação desses impactos, bem como para ambientes oligotróficos ou mesotróficos, pois pode apontar as principais fontes de contribuição, em potencial, que podem tornar esses ambientes eutróficos ou hipereutróficos, atuando assim na mitigação e prevenção dos impactos nesses ambientes.

Vale ressaltar que, por se tratar de uma abordagem multidisciplinar, com poucos estudos relatados na literatura no que diz respeito a sua aplicação como ferramenta nos estudos dos processos de eutrofização, a utilização das redes causais se torna uma ferramenta promissora em estudos de qualidade da água em reservatórios, sobretudo para monitoramento e prevenção de episódios de florações, que é o foco principal desse trabalho.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

O objetivo dessa pesquisa é aplicar a metodologia das redes causais como ferramenta para identificar os principais fatores que podem vir a contribuir para a eutrofização em reservatórios, no intuito de antever a ocorrências de estados eutróficos que possam levar a florações de cianobactérias.

3.2 Objetivos Específicos

- Avaliar os bancos de dados de monitoramento de qualidade de água existentes para as áreas de estudo a saber: reservatórios das UHEs de Emborcação e Nova Ponte e da represa de abastecimento Rio Manso, para verificar se os dados disponíveis comportam a análise do processo de eutrofização dos reservatórios;
- Avaliar o impacto das alterações no uso e na ocupação do solo no entorno e na qualidade da água dos reservatórios, para identificar as pressões correlacionando com o desenvolvimento das atividades de entorno dentro do mesmo recorte temporal;
- Identificar os principais indicadores que podem ser considerados como pressões, estado e resposta, que contribuem, por sua vez, para a eutrofização, na construção da rede causal para reservatórios;
- Avaliar a construção da rede causal para a ocorrência dos processos de eutrofização em reservatórios.

4 REVISÃO DA LITERATURA

4.1 Reservatórios no Brasil

Os reservatórios possuem a função de armazenar água que recebe de um curso d'água, com diferentes objetivos para beneficiar a sociedade, dentre eles podemos citar o abastecimento da população, irrigação, navegação, controle de cheias e geração de energia hidrelétrica. Os reservatórios para amortecimento e controle de cheias tem o intuito de evitar ou reduzir prejuízos das inundações, uma alternativa que dificilmente tem aplicação em grandes bacias, maiores que 10.000km² (MEES, 2020).

Segundo Mees (2020), apesar dos benefícios que a construção dos reservatórios traz para uma parcela de cidadãos, podendo ser até mesmo para toda uma nação como, por exemplo, a geração de energia elétrica que alimenta todo um sistema de transmissão que interliga todas as suas regiões, esse tipo de empreendimento também gera aspectos que devem ser considerados, mensurados e discutidos.

O Brasil possui um potencial hidrelétrico de 176 GW, segundo o Plano Nacional de Energia Elétrica de 2020-PNE 2050 da Eletrobrás, sendo 108 GW em operação e construção até 2019, ou seja, 62% e 68 GW de potencial hidrelétrico inventariado (38%). Neste montante, estão incluídas as UHEs e os projetos hidrelétricos menores de 30 MW que se encontravam com estudos de inventário concluídos e aprovados pela Aneel. Os aproveitamentos estão distribuídos por praticamente todas as regiões hidrográficas do Brasil. Contudo, vale ressaltar que a maior parte dos grandes projetos inventariados se concentram nas regiões hidrográficas Amazônica e do Tocantins-Araguaia (BRASIL, 2020; MEES, 2020).

No Brasil, conforme dados do Balanço Energético Nacional (EPE, 202), a energia elétrica apresentou aumento de consumo e o aumento da sua oferta interna disponibilizada à população. Houve um aumento de 3,9% da Energia Elétrica disponibilizada e aumento de 4,2% no consumo final de eletricidade, comparando os anos de 2020 e 2021. Contudo, é importante salientar que a escassez de chuvas em 2021 provocou uma redução do nível dos reservatórios das principais hidrelétricas do país e a consequente redução da oferta de hidreletricidade. Esta queda foi

compensada pelo aumento da oferta de outras fontes, como o carvão vapor (+47,2%), gás natural (+46,2%), eólica (+26,7%) e solar fotovoltaica (+55,9%) (EPE, 2022).

As projeções apresentadas no Plano Nacional de Energia Elétrica 2050 do ano de 2020, indicam que, no cenário desafio expansão, haverá um crescimento do consumo potencial de energia elétrica (que engloba o consumo atendido pela rede, a partir da autoprodução, a geração micro e macro distribuída – MMGD – e estimado antes da retirada dos ganhos de eficiência energética) da economia da economia brasileira de 3,5% ao ano em média entre 2015 e 2050, atingindo-se um valor próximo de 240 mil MW médios (ou pouco mais de 2.100 TWh) ao fim do período. Deste total, estima-se que cerca de 5% do consumo potencial serão atendidos por Geração Distribuída, representando quase 11 mil MW médios, enquanto 7% (ou 16 mil MW médios) por Autoprodução.

Ainda de acordo com o documento, a eficiência energética se expande de forma significativa no período, devendo atingir 17% do total requisitado em 2050, o que equivaleria a pouco mais de 40 GW médios ou aproximadamente 360 TWh. Desta forma, a análise da expansão da geração centralizada de eletricidade é determinada a partir do consumo estimado na rede, que corresponde ao resultado obtido a partir do consumo potencial de energia elétrica, deduzidas as parcelas estimadas de contribuição de eficiência energética, autoprodução e geração distribuída.

Vale destacar que o consumo de energia elétrica em 2050 poderá acarretar na instalação de uma potência hidrelétrica adicional expressiva. Mesmo que se dê prioridade absoluta para a expansão da oferta por meio de hidrelétricas, ainda assim poderia não ser suficiente para atender à demanda por energia nesse horizonte. Esse quadro sinaliza, de certa forma, uma perspectiva de esgotamento a longo prazo do potencial hidrelétrico nacional (BRASIL, 2020).

Ainda de acordo com este documento, mais de 80% da potência instalada em hidrelétricas no país estão nas regiões Nordeste, Sudeste e Sul, que constituem o Sistema Interligado Nacional. Cabe ressaltar que também é nessas três regiões que se concentra a maior parte do consumo de energia, representando 88% (BRASIL, 2020).

Os usos múltiplos das águas dos reservatórios de grandes hidrelétricas podem trazer possibilidades efetivas para o desenvolvimento socioeconômico local ou regional, com a geração de empregos e melhoria da qualidade de vida. Entretanto, além dos impactos já causados com a construção dos reservatórios, em muitas situações os usos múltiplos também podem criar possibilidades de conflitos gerando uma série de impactos que, por sua vez, podem comprometer a qualidade ambiental no ambiente construído que conseqüentemente irá sofrer uma readaptação das suas próprias características naturais, criando assim um novo ecossistema que pode incluir a ocupação humana em maior ou menor grau (MESS, 2020).

4.2 Indicadores Ambientais

A *Organization for Economic Co-operation and Development* - OECD (2003) define “indicadores” como um parâmetro ou um valor derivado de parâmetros que tem como objetivo fornecer informações, descrever o estado de um fenômeno/ambiente/área, com uma significância que se estende além daquela diretamente associada ao valor do parâmetro. O termo “parâmetro” é definido, como uma propriedade que é medida ou observada. Já o termo “índice” é o conjunto de parâmetros ou indicadores agregados ou ponderados. Os indicadores refletem tendências no estado do meio ambiente e monitoram o progresso feito na realização dos objetivos da política ambiental. Assim sendo, os indicadores ambientais tornaram-se indispensáveis para os formuladores de políticas (SMEETS & WETERINGS, 1999).

Smeets & Weterings (1999) explicam o funcionamento de um indicador ao apresentar o conceito de aplicação da temperatura corporal, pois esta fornece informações críticas que permitem inferir sobre a condição de saúde de um indivíduo, uma vez que, altas temperaturas podem indicar uma infecção bacteriana. Baseando nessa explicação, os indicadores ambientais fornecem informações sobre fenômenos que são considerados típicos e/ou críticos e permitem inferir sobre a qualidade ambiental de um corpo d’água.

Smeets & Weterings (1999) também ressaltam que a comunicação é a principal função dos indicadores, pois estes devem habilitar ou promover a troca de informações sobre o assunto que abordam. De acordo com a OECD (2003), as duas principais funções dos indicadores ambientais são:

- Reduzir o número de medições e parâmetros que normalmente seria necessário para uma apresentação exata de uma situação. Como consequência, o tamanho de um conjunto de indicadores e o nível de detalhamento contido nesse conjunto precisa por sua vez, ser limitado. Um conjunto com um grande número de indicadores tende a deturpar a visão geral que pretende fornecer.
- Simplificar o processo de comunicação pelo qual os resultados de medição são fornecidos ao usuário. Devido a esta simplificação e adaptação às necessidades do usuário, os indicadores nem sempre atendem às demandas científicas estritas para demonstrar uma corrente causal. Os indicadores devem, portanto, ser considerados como uma expressão de “melhor conhecimento disponível”.

No Quadro 1 estão descritos os principais critérios para seleção de indicadores ambientais de acordo com a OECD (2003). Os indicadores podem ser utilizados para vários propósitos, mas é necessário definir os critérios gerais para assim selecionar os indicadores e validar a escolha. Sendo assim, três critérios básicos são utilizados pela OECD: Relevância política e utilidade para os usuários; solidez analítica e mensurabilidade. Contudo, vale destacar que esses critérios descrevem o indicador “ideal” e na prática, nem todos serão atendidos.

Nos resultados de um indicador, compreender os componentes da variabilidade, é essencial para distinguir entre fatores externos e um sinal ambiental. A variabilidade total inclui erros de medida introduzidos durante atividades de campo e laboratório e a variação natural de agentes causadores de stress no ambiente, podendo incluir componentes temporais (relacionados à época do ano ou entre os anos) e espacial (entre os locais). A habilidade discriminatória de um indicador pode ser comprometida por erros advindos do processo de coletar, transportar e analisar dados ecológicos. A variabilidade introduzida pelos seres humanos ou pelo desempenho dos instrumentos deve ser estimada e relacionada para todas as medidas dos indicadores. (US EPA, 2000; MORAES, 2011).

Quadro 1- Critérios para seleção de indicadores de acordo com a OECD (2003)

Critério	Descrição
<p>Relevância política e utilidade para os usuários</p>	<p>Um indicador ambiental deverá:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Fornece uma imagem representativa das condições ambientais, pressões sobre o meio ambiente ou da sociedade; ✓ Ser simples, fácil de interpretar e capaz de mostrar tendências ao longo do tempo; ✓ Responder às mudanças no meio ambiente e nas atividades humanas relacionadas; ✓ Ser de escopo nacional ou aplicável a questões ambientais regionais de importância nacional; ✓ Ter um limite ou valor de referência para compará-lo, para que os usuários possam avaliar a significância dos valores associados a ele
<p>Solidez (robustez) analítica</p>	<p>Um indicador ambiental deverá:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Ser teoricamente bem fundamentado em termos técnicos e científicos; ✓ Basear-se em padrões internacionais e consenso internacional sobre sua validade ✓ Se prestam a estar vinculados a modelos econômicos, previsões e sistemas de informação
<p>Mensurabilidade</p>	<p>Os dados necessários para apoiar o indicador devem ser:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Prontamente disponíveis ou disponibilizados a uma relação custo/benefício razoável; ✓ Adequadamente documentado e de qualidade conhecida ✓ Atualizado em intervalos regulares de acordo com procedimentos confiáveis

De acordo com o documento: “Diretrizes para Avaliação de Indicadores Ecológicos” (US EPA, 2000; MORAES, 2011), são atribuídas, para cada etapa de avaliação dos indicadores, questões norteadoras que devem ser consideradas, conforme segue no Quadro 2.

Dessa forma, para a construção das redes causais, os indicadores ambientais podem ser utilizados como principais avaliadores das pressões sobre o meio ambiente, do seu estado evolutivo e da apropriação das medidas políticas, o que contribui significativamente, nos diagnósticos ambientais (NIEMEIJER & DE GROOT, 2008).

Quadro 2- Questões norteadoras para seleção de indicadores de acordo com US EPA (2000)

Avaliação	Questão Norteadora
Relevância conceitual	O indicador é relevante para responder à utilização proposta?
Facilidade de implementação	Os métodos de coleta e medição das variáveis são, tecnicamente acessíveis, apropriados e eficientes para uso num programa de monitoramento?
Variabilidade das respostas	Os erros de medição e a variabilidade natural, no tempo e no espaço, são entendidos e documentados suficientemente?
Interpretação e utilidade	O indicador carrega informação, de forma significativa, para os tomadores de decisão?

Fonte: Adaptado de US EPA (2000); MORAES (2011)

4.3 Estrutura das Redes Causais

A concepção metodológica proposta para o estabelecimento de uma rede causal e indicadores ambientais se configura como uma primeira aproximação para o delineamento da complexa rede de relações existentes entre a intensificação das atividades humanas e as consequências aos serviços ambientais. Portanto, a seleção de indicadores ambientais, assim como das variáveis relacionadas devem ser definidas possibilitando a aplicação da metodologia em contextos regionais variados, inclusive em reservatórios (MORAES *et al.*, 2010).

O delineamento de redes causais possibilita uma forma de contextualização da origem dos conflitos ambientais, suas causas e seus impactos, através do desenvolvimento e uso dos indicadores ambientais, permitem avaliar padrões temporais no status e em

tendências dos ecossistemas, habitats e espécies, assim como as pressões e as ameaças que enfrentam e quais as respostas produzidas (MORAES *et al.*, 2010).

Uma série de estruturas conceituais são usadas dentro desse contexto (por exemplo, EPA (1998) quadro de avaliação de risco ecológico), no entanto, as estruturas mais comuns e utilizadas em estudos baseados em indicadores são: i. *driving force-pressure-state-impact-response* (DPSIR): força motriz-pressão-estado-impacto-resposta; ii. *pressure-state-response* (PSR): pressão-estado-resposta; ou iii. *driving force-state-response* (DSR): força motriz-estado-resposta (DSR). Essas estruturas conceituais organizam e estruturam os indicadores no contexto de uma cadeia causal ou rede causal (NIEMEIJER & DE GROOT, 2008; BRIDGES *et al.*, 2001; EEA, 2000; WASCHER, 2000; SMEETS & WATERINGS, 1999; OECD, 1998, 1999, 2001; HAMMOND *et al.*, 1995).

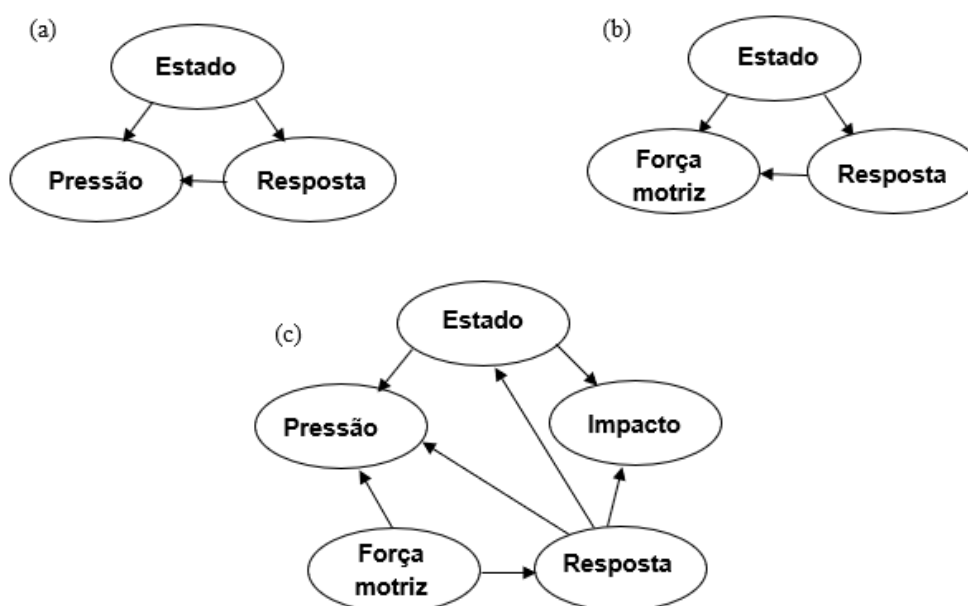
Pressure-state-response – PSR (Figura 1a) ou Pressão-estado-resposta, foi criado pela OECD em 1993 e é um dos quadros referenciais mais conhecidos e usados na classificação de indicadores ambientais que são divididos em indicadores de pressão, estado e resposta através da seguinte lógica: Pressão sobre o meio ambiente das atividades humanas e econômicas levam a mudanças no estado ou nas condições ambientais que prevalecem como resultado dessa pressão e pode provocar respostas na sociedade para modificar as pressões e o estado do meio ambiente. Vale ressaltar que nesta estrutura as respostas formam uma alça de retroalimentação para a pressão, gerando assim uma ideia cíclica e de causalidade que incluem percepção, formulação, monitoramento e avaliação (NIEMEIJER & DE GROOT, 2008; SALLES *et al.*, 2004).

No Brasil, esse modelo foi utilizado na organização e sistematização de informações ambientais, servindo de base para estruturação do Sistema de Monitoramento da Biodiversidade (SIMBIO), elaborado e gerenciado pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais (IBAMA), e , também para análise, por meio de indicadores, da situação ambiental do território brasileiro, para elaboração do “GEO Brasil 2002: Perspectivas do Meio ambiente no Brasil”, do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente – PNUMA (MORAES *et al.*, 2010; DOLABELA & BENFICA, 2006).

Driving force-state-response – DSR (Figura 1b) ou Força motriz-estado-resposta, nessa estrutura conceitual, o termo “pressão” é substituído pelo conceito de “força motriz”. O conceito de “forças motrizes” abrange uma cobertura mais ampla das influências que afetam o meio ambiente, na agricultura sustentável e na agricultura convencional, incluindo até mesmo o comportamento do agricultor, políticas governamentais, fatores econômicos, sociais e culturais. A OCDE (1999), reconhece, por exemplo, que as atividades agrícolas podem produzir impactos benéficos para melhorar a qualidade ambiental, bem como impactos prejudiciais ao meio ambiente (NIEMEIJER & DE GROOT, 2008).

Driving force-pressure state-impact-response – DPSIR (Figura 1c) ou força motriz-pressão-estado-impacto-resposta, segue essencialmente o mesmo padrão geral que as duas estruturas conceituais citadas acima, mas distingue-se por ter mais etapas ao longo do caminho e faz a distinção entre “forças motrizes indiretas” como o desenvolvimento social e econômico e “pressões” que diretamente influenciam o ambiente. Além disso, também se distingue entre o “estado” do meio ambiente e os impactos das mudanças do seu estado sobre a saúde humana, sistemas ecológicos e materiais (NIEMEIJER & DE GROOT, 2008; SMEETS & WETERINGS, 1999).

Figura 1- Diagramas das estruturas conceituais mais comuns e utilizadas em estudos baseados em indicadores. (a) PSR, (b) DSR e (c) DPSIR



Fonte: Adaptado de: Niemeijer & De Groot (2008)

Segundo Moraes e colaboradores (2010), o emprego do modelo DPSIR no processo de gestão das mais variadas áreas de atuação do Estado e, principalmente, em avaliações ambientais, tem-se tornado promissor e efetivo. Nesse sentido, Fidalgo (2003), acrescenta que o desenvolvimento social e econômico é considerado uma força-motriz que exerce pressão, conduzindo a mudanças no estado do ambiente, que levam, por consequência a impactos na saúde humana e nos sistemas ecológicos, o que pode resultar numa possível resposta, que irá alimentar novamente os componentes do modelo, mediante políticas ambientais, econômicas ou setoriais.

Moraes (2011), por exemplo, utilizou a estrutura de redes causais, baseando-se na abordagem de DPSIR, para caracterizar os serviços ambientais de áreas úmidas e identificar as possíveis alterações decorrentes da intensificação de atividades antrópicas.

A utilização da abordagem DPSIR foi efetiva para caracterização da Área de Proteção Ambiental das Ilhas e Várzeas do Rio Paraná - APA IVAP. Contudo, a autora não verificou relações causais a respeito das áreas úmidas na unidade de conservação devido à indisponibilidade de dados. No entanto, a autora destaca a importância da utilização de indicadores, que sem eles, o trabalho seria mais dispendioso pois o esforço amostral e o tempo empregado seriam maiores. A principal contribuição do estudo, foi sobre o conhecimento da APA IVAP e sobre as relações causais para serviços ambientais de áreas úmidas tropicais. Outros trabalhos que também utilizaram as estruturas de redes causais estão relacionados no Quadro 3.

Quadro 3 - Trabalhos que utilizaram as estruturas conceituais PSR (Pressão Estado e Resposta) e DPSIR (Força motriz, Pressão, Estado, Impacto e Resposta)

O uso de redes causais e indicadores para promoção da qualidade ambiental: enfoque para os serviços ambientais de áreas alagáveis							
Estrutura	Objetivo	Força Motriz	Pressão	Estado	Impacto	Resposta	Ref..
DPSIR (EEA)	O uso de redes causais e indicadores para promoção da qualidade ambiental: enfoque para os serviços ambientais de áreas alagáveis	<ul style="list-style-type: none"> · Modelo de desenvolvimento ambientalmente insustentável; · Financiamento público para preservação dos recursos naturais instável e insuficiente nas 3 esferas do governo; · Deficiência ou ausência de envolvimento com a sociedade; · Mudanças climáticas; Crescimento populacional 	<ul style="list-style-type: none"> · Construção de UHEs e inundação de áreas alagáveis; · Drenagem de áreas alagáveis para expansão das áreas agrícolas; · Ocupação das margens dos rios; · Deficiência na atuação dos órgãos públicos no monitoramento ambiental; · Expansão acelerada das áreas urbanas; · Inexistência do zoneamento ecológico-econômico e dos planos diretores municipais; · Aumento da intensidade de eventos hidrológicos 	<ul style="list-style-type: none"> · Diminuição das áreas alagáveis; · Contaminação das áreas alagáveis; · Assoreamento das áreas alagáveis; · Baixa cobertura de APPs nas margens dos corpos d'água; · Deficiência dos sistemas de informações ambientais em relação às áreas alagáveis. 	<ul style="list-style-type: none"> · Ecossistemas comprometidos; · Perda dos serviços ambientais das áreas alagáveis; · Diminuição do estoque pesqueiro e introdução de espécies exóticas; · Ausência de conhecimento sobre o funcionamento das áreas alagáveis; · Eutrofização de corpos aquáticos. 	<ul style="list-style-type: none"> · Ações governamentais e sociedade civil; · Elaboração ou aprimoramento da legislação; · Aprimoramento das ações de monitoramento e fiscalização ambientais; · Pesquisa científica; · Estabelecimento de indicadores de acompanhamento da qualidade ambiental associada às áreas alagáveis. 	Moraes, A. R.; Minoti, R. T.; Bernardes, R. S. (2010)

Revisando a estruturação do modelo DPSIR como base para um sistema de apoio à decisão para a sustentabilidade de bacias hidrográficas (Artigo de revisão)							
Estrutura	Objetivo	Força Motriz	Pressão	Estado	Impacto	Resposta	Ref..
DPSIR (EEA)	Revisão da estruturação do modelo DPSIR, visando melhorias do processo de tomada de decisão da gestão de comitês de gerenciamento de bacias hidrográficas.	· Condições ambientais: Precipitação, Evaporação, Catástrofes. Desenvolvimento e atividade econômica: Cresc. Populacional, Desperdício, Uso da terra	Suprim. (natural); Suprim. (ação do homem); Demanda de água; Poluição da água	· Quantidade: Balanço hídrico; Rios, mananciais, <i>wetlands</i> , estuários, reservas de água; Qualidade: salobra, eutrofização, substâncias tóxicas, doenças, sedimentação	· Integridade do ecossistema: Rios/mananciais/ <i>wetlands</i> /estuários. Valor: Social (Saúde/Diversão/Estuários); Econômico (Agricultura/Indústria/Mineração)	· Ações públicas e gerenciamento	Soares, A. B <i>et al.</i> , (2011)

An integrated analysis of the eutrophication process in the Exoé Reservoir within the DPSIR Framework							
Estrutura	Objetivo	Força Motriz	Pressão	Estado	Impacto	Resposta	Ref.
DPSIR (EEA)	Este estudo enquadró todas as descobertas parciais dentro do Estrutura (DPSIR) para entender melhor a eutrofização processo no reservatório de Exoé em Portugal	· Política comum agricultura da União Europeia; Agricultura e extensa pecuária	· Práticas de agricultura: Fertilização e operações de lavoura; Cargas da pecuária; Regime de precipitação; <i>Inputs</i> de nitrogênio entre 24 e 60kg/ha. <i>Inputs</i> de fósforo são menores (15kg/ha)	· Estado trófico do reservatório; Razões de erosão do solo; Produção de nutrientes e sedimentos. (Parâmetros: Sedimento, fósforo total; fósforo particulado; fósforo solúvel reativo; Carbono orgânico particulado; Carbono orgânico dissolvido; Condutividade elétrica)	· Processo de eutrofização: Fósforo disponibilizado pelo sedimento; Reciclagem de nutrientes e matéria orgânica	· Aumento da barreira; Redução de carga; Conservação na agricultura. Diferentes cenários dependendo do modelo utilizado. CE-QUAL-W2 Clorofila responde a 40 a 90% de valores 26,9 a 42,6µg/L. de fósforo como fator limitante	Ramos, T. B. <i>et al.</i> , (2018)

Coleção de Estudos Temáticos sobre os objetivos de desenvolvimento do milênio: Sustentabilidade Ambiental, Objetivo 7 - Garantir a sustentabilidade ambiental						
Estrutura	Objetivo	Temas	Pressão	Estado	Resposta	Ref.
PSR (OECD)	Garantir a sustentabilidade ambiental através do cumprimento de metas da ODM7: M9: Integrar os princípios do desenvolvimento sustentável nas políticas e programas nacionais e reverter a perda de rec. naturais, M10: Reduzir pela metade até 2015 a proporção da pop sem acesso permanente e sustentável, a água potável segura e M11 Até 2020 melhor significativa nas vidas de habitantes de bairros degradados.	<ul style="list-style-type: none"> · 1. Mudanças climáticas · 2. Depleção da camada de ozônio · 3. Eutrofização em águas continentais · 4. Acidificação · 5. Qualidade ambiental urbana · 6. Biodiversidade 	<ul style="list-style-type: none"> · 1. Emissão de CO₂ · 2. Consumo de substâncias que destroem o O₃ · 3. Suprimento excedente de N e P no esterco e fertilizantes comerciais · 4. Emissões e deposição de substâncias acidificantes; · 5. Número de carros por km² nas capitais · 6. Comprimento total de estradas por unidade de área terrestre; Mudanças dos fatores de pressão mais importantes. 	<ul style="list-style-type: none"> · 1. Conc atm. de CO₂; T°C global média; · 2. O₃ total; Variação sazonal na espessura da camada de ozônio; Conc de CFC-11 atm · 3. Dist. de frequência. de P em rios; Status dos nutrientes de lagos e cursos d'água; · 4. Carga crítica; Áreas em que a carga crítica de S tem sido superada; · 5. Conc NO₂ nas capitais; nº de pessoas expostas a ruídos excessivos · 6. Espécies ameaçadas e vulneráveis. Áreas protegidas 	<ul style="list-style-type: none"> · 1. Uso de fonte não-fóssil de energia como % do uso total de energia; Acordos internacionais e metas e medidas nacionais. · 2. Metas para a redução de substâncias que destroem o ozônio · 3. Área agrícola de "inverno verde" como % da área agrícola total; · 4. Acordos internacionais e medidas prioritárias nacionais; · 5. Número de veículos - quilômetros de transportes públicos nas capitais; · 6. Áreas protegidas de ecossistemas selecionados como % da área total do ecossistema 	Salles <i>et al.</i> , (2004)

Avaliação da Qualidade ambiental do município de Tubarão (SC) através do uso de indicadores ambientais (Dissertação de mestrado)						
Estrutura	Objetivo	· Temas	· Pressão	· Estado	· Resposta	Ref.
PSR (OECD)	Avaliar a qualidade ambiental do município de Tubarão (SC), construindo para tal, um sistema de indicadores ambientais baseado no marco analítico PSR.	<ul style="list-style-type: none"> 1. Água 2. Uso do solo e cobertura vegetal 3. Ar 4. Resíduos sólidos 	<ul style="list-style-type: none"> · 1. Consumo doméstico de água per capita (m³/ano); Consumo de água pela indústria; Carga de resíduos orgânicos lançados nas águas (m³/ano) · 2. Uso de agrotóxicos em áreas agrícola (t/ano); Taxa de desmatamento anual (ha); Área urbanizada anualmente (ha) · 3. Emissão de SO₂ (t/ano); Emissão de Partículas totais em suspensão-PTS (t/ano); Inventário de fontes fixas e móveis; número e taxa de incremento de veículos · 4. Resíduos sólidos urbanos gerados (t/ano); resíduos gerados per capita 	<ul style="list-style-type: none"> · 1. Oferta hídrica (m³/ano); Índice de qualidade da água (IQA) · 2. Intoxicação por agrotóxico; Superfície remanescente arbórea; Área verde por habitante (m²/hab); Área urbanizada/área total do município · 3. Concentrações médias anuais de SO₂ (µg/m³) e de PTS (µg/m³) · 4. Resíduos gerados x resíduos manejados adequadamente; Área de terra degradada pela disposição de resíduos (ha/ano) 	<ul style="list-style-type: none"> · 1. Taxa da população com acesso a água tratada; Volume de água tratada (m³/ano) · 2. Incremento da produção agroecológica (t/ano); Taxa de reflorestamento anual (ha); Área protegida (ha). · 3. Resolução 03/90 CONAMA; número de carros com conversores catalíticos · 4. Taxa de tratamento controlado; Taxa de resíduos que são reciclados 	Rufino, R. C. (2002)

Temporal and Spatial Distributions of Ecological Vulnerability under the influence of natural and anthropogenic factors in a Eco-Province under construction in China					
Estrutura	Objetivo	Pressão	Estado	Resposta	Ref.
PSR (OECD)	Área de estudo: Eco-província em construção de Jiangsu (China) como área de estudo, avaliou as distribuições espaço-temporais da vulnerabilidade ecológica em 2005, 2010 e 2015 na escala de quilômetros e analisou os efeitos das influências naturais e antropogênicas fatores de vulnerabilidade ecológica. Foram utilizados o modelo de resposta do estado de pressão (PSR), informações geográficas sistemas (GIS), análise de componentes principais espaciais, análise de autocorrelação espacial e correlação métodos de análise.	· Indicadores de 1º nível: Sensibilidade ecológica; Indicadores de 2º nível: Sensibilidade Erosão do solo, Precipitação, topografia, vegetação e fatores do solo como, Erosividade da chuva, relevo, tipos de uso da terra e textura do solo, foram usados para avaliar Erosão do solo, usando Tecnologia GIS. Indicadores de 2º: Sensibilidade desertificação do solo: Avaliado baseado na cobertura vegetal, índice de umidade, matriz do solo e o número de dias com vento.	· Indicador de 1º nível: Padrão da paisagem: Numero de manchas na unidade da paisagem. Indicador de 2º nível: Densidade das manchas na paisagem e uniformidade da paisagem: É igual ao Índice de diversidade de <i>Shannon</i> dividido pela diversidade máxima possível de abundância para uma dada paisagem. Pode refletir diretamente a distribuições desiguais das manchas, ou seja, a heterogeneidade em um sistema de paisagem	· Indicador de primeiro e segundo níveis: Grau de utilização de recursos terrestres: índice de classificação do grau de uso do solo.	Ding, Q. <i>et al.</i> , (2018)

A Pressure-State-Response framework for the sustainability analysis of water national parks in China					
Estrutura	Objetivo	Pressão	Estado	Resposta	Ref.
PSR (OECD)	Análise da sustentabilidade dos Parques aquáticos nacionais. A estrutura inclui caracterizar os parques e avaliação da pressão estado e resposta, seguido da análise e cálculo da pontuação de sustentabilidade. A avaliação da pressão se concentra nos impactos de WNPs nas emissões de carbono, resíduos descarga, consumo de energia, oportunidades de emprego e receitas. avaliação do estado descreve as características do WNPS, em particular seu tamanho, infraestrutura, paisagem cultural, turismo, economia local e transporte. A avaliação da resposta examina a integralidade das propostas de planejamento ambiental e social para o desenvolvimento de WNPs	· Emissão de carbono; Descarga da água; Consumo de energia; Oportunidades de trabalho; Receita	· Tamanho; Infraestrutura; Paisagens culturais; Turismo; Economia local; Transporte	· Completude do planejamento ambiental; Completude do planejamento Social	Li, W. <i>et al.</i> , (2021)

Ecosystem Health Assessment Based on Pressure State Response Framework using Remote Sensing and Geographical Information System					
Estrutura	Objetivo	· Pressão	· Estado	· Resposta	Ref.
PSR (OECD)	Área de estudo: Sete distritos no estado de Samara (Rússia). Utilizou dados do <i>Landsat</i> OLI de 2020. Utilizou PSR para avaliação da saúde do ecossistema, como suporte para todos os requisitos de gestão ambiental, tomada de decisão, relação causal clara, de comum acordo o mais utilizado para avaliação de diferentes ecossistemas. Alta pressão: Indicador de resposta será alto = situação ecológica ruim. Alta resposta: Indicam alta perturbação ou mudança ambiental = ecossistema insalubre. Indicador de resposta baixa: Situação estável ou boa condição natural e humana. A saúde de um ecossistema pode ser avaliada sob a estrutura PSR e com a tecnologia GIS com sistema de pesos	· Indicadores de pressão foram derivados do índice de monitoramento ambiental global (GEMI), razão de evaporação (ER), Temperatura da superfície do solo (LST), Índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI), índice de diferença de umidade normalizado (NDMI), mudança de uso/cobertura do solo, rede ferroviária, índice de luz noturna (LI), Índice de diferença de água normalizado (NDWI), índice de rugosidade do terreno (TRI) e modelo digital de elevação (DEM)	· Indicadores de estado foram derivados do índice de diferença da vegetação normalizado (NDVI), índice de área foliar (LAI), cobertura vegetal fracionada (FVC). Combinação NDVI, LAI E FVC de diferentes dados de bandas do <i>Landsat</i>	· Indicador de resposta: Calculado a partir da diferença entre a pressão e o estado.	Boori, M. S. <i>et al.</i> , (2021)

4.4 Eutrofização

A eutrofização é um fenômeno que pode ser de origem natural ou antrópica. Quando natural, é também conhecida como o “envelhecimento natural” de um lago e caracteriza-se por um processo lento e contínuo que resulta do aporte de nutrientes trazidos pelas chuvas e águas superficiais que erodem e lavam a superfície terrestre. Quando este processo é induzido pelo homem, é denominado de artificial ou antrópico. Neste processo, o aporte de nutrientes pode ter diferentes origens como esgotos domésticos, efluentes industriais e/ou atividade agrícolas, entre outras, podendo culminar, no “envelhecimento precoce” de ecossistemas lacustres. (ESTEVES & MEIRELLES-PEREIRA, 2011).

A eutrofização artificial é um processo dinâmico, o qual resulta em profundas modificações qualitativas e quantitativas nas comunidades aquáticas, bem como nas condições físicas e químicas do meio e no nível de produção do sistema, podendo ser considerada então, como uma consequência da poluição do ambiente relacionada com o aumento da população humana, da industrialização, do uso de fertilizantes químicos na agricultura e produção e utilização de produtos de limpeza contendo compostos polifosfatados. Todos esses fatores resultam na liberação de nutrientes, como fosfato e nitrogênio, que são compostos estimuladores da eutrofização. A importância destes elementos como desencadeadores do processo de eutrofização, resulta da sua atuação como fatores limitantes na produção primária de ecossistemas por estarem relacionados com o processo fotossintético (ESTEVES & MEIRELLES-PEREIRA, 2011).

Ainda de acordo com Esteves e Meirelles-Pereira (2011), a eutrofização artificial também pode ser considerada como uma reação em cadeia de causas e efeitos bem evidentes, cuja característica principal é a quebra relativa da estabilidade do ecossistema (homeostasia), que se caracteriza, em ambientes aquáticos, pela proximidade de um equilíbrio existente entre a produção de matéria orgânica e o seu consumo e decomposição. A eutrofização artificial por sua vez, é o rompimento deste estado de equilíbrio, onde o ecossistema passa a produzir mais matéria orgânica do que é capaz de consumir e decompor, o que provoca um desequilíbrio ecológico acompanhado de profundas mudanças no metabolismo de todo ecossistema.

As cianobactérias são organismos fotossintéticos, sendo assim, as condições gerais que conhecidamente favorecem seu crescimento são, essencialmente a presença de macronutrientes, condições adequadas de temperatura e luz. Além desses, outros fatores também podem contribuir para o seu crescimento e conseqüentemente para a ocorrência de florações são: a alta concentração de fósforo dissolvido ou ortofosfato (REYNOLDS, 2006), alto pH (SHAPIRO, 1997), alta temperatura (PAERL & HUISMAN, 2008 e 2009), longo tempo de retenção da água e estratificação térmica no caso das espécies que possuem aerótopos, que são vacúolos de gás que auxiliam na flutuação permitindo o seu ajuste de posição na coluna d'água, o que também pode favorecer a sua dominância.

Dentre as espécies que possuem como característica a flutuabilidade, a produção de microcistinas está mais frequentemente ligada às espécies de *Microcystis*, *Anabaena* e *Planktothrix*, mas não, por exemplo, de *Aphanizomenon* ou *Cylindrospermopsis*. A presença de cianotoxinas específicas está principalmente ligada à composição da floração (CODD *et al.*, 2005; METCALF & CODD, 2012; DESCY *et al.*, 2016).

Outro fator que pode favorecer a dominância de certas espécies é capacidade de fixação de nitrogênio atmosférico (N₂), por aquelas formadoras de heterocitos, que são células especializadas em fixar nitrogênio atmosférico. A sua formação é observada quando há deficiência de nitrogênio inorgânico no corpo d'água (DESCY *et al.*, 2016).

A mudança climática vem sendo debatida por diversos autores como um fator que pode vir a contribuir com o aumento da incidência de florações de cianobactérias. No entanto, vale ressaltar aqui que devemos considerar as complexas interações existentes entre as características do lago e usos humanos, aumento da temperatura, estrutura da coluna de água, duração dos períodos estratificados e mudanças nas entradas de nutrientes da bacia hidrográfica, relacionadas à prática agrícola e mudança na precipitação e hidrologia (CAREY *et al.*, 2012; ELLIOTT, 2012; REICHWALDT & GHADOUANI, 2012; RIGOSI *et al.*, 2015; DESCY *et al.*, 2016).

4.4.1 Parâmetros Físicos e Químicos para Ocorrência da Eutrofização

Os possíveis nutrientes limitantes nos sistemas aquáticos é uma questão largamente discutida. Em alguns trabalhos, o nitrogênio é considerado o principal fator limitante, em outros, o fósforo ocupa essa posição. Mas vale destacar que uma das conclusões principais é de que é difícil generalizar; nitrogênio e fósforo, ou nitrogênio ou fósforo, podem ser limitantes (ou outro nutriente), e isso vai depender do sistema lacustre considerado e suas inter-relações. A individualidade dos ambientes nesse aspecto, é também muito característica (TUNDISI & TUNDISI, 2008).

Ainda segundo Tundisi & Tundisi (2008), Redfield (1934) e Fleming (1940) avaliaram na água do mar, o conteúdo de matéria orgânica para determinação do conteúdo celular de carbono, nitrogênio e fósforo no fitoplâncton e no zooplâncton e estabeleceram a média da razão atômica desses elementos nas amostras, sendo 106 para 16 para 1, ou seja, 106C:16N:1P, que é vista como referência padrão para avaliar limitação de nutrientes tanto na massa de água marinha quanto de água doce.

O conceito de nutriente limitante é aplicado geralmente à concentração de fósforo e nitrogênio da água e a condições de equilíbrio. Nesse caso, o nutriente que limita o crescimento do fitoplâncton encontra-se próximo ao “mínimo crítico” que o limita. (TUNDISI & TUNDISI, 2008).

O crescimento do fitoplâncton em um determinado ecossistema aquático (represa, lago ou rio) pode ser proporcional à concentração de nutrientes, que por sua vez, depende das cargas internas de nutrientes no sedimento. O fitoplâncton pode assimilar nutrientes da coluna d'água na relação 106C:16N:1P. Ao determinar as concentrações e as relações C:N:P da coluna de água, pode-se comparar com a relação conceitual 16N:1P (índice de Redfield), determinar qual desses nutrientes está em excesso na coluna de água e de que forma se pode limitar essas concentrações. A concentração de nutrientes em excesso à taxa 16N:1P, necessária ao crescimento do fitoplâncton, não deverá ser o fator limitante ao crescimento da biomassa de algas. Portanto, é preciso determinar não só as concentrações de nitrogênio e fósforo totais (dissolvido e particulado) na água e nos tributários, como também as formas de nitrogênio e fósforo biologicamente disponíveis, além do nitrogênio e fósforo totais (TUNDISI & TUNDISI, 2008).

As concentrações de fósforo reativo solúvel e de amônio, nitrato e nitrito (se este estiver presente) também devem ser medidas. A experiência prática de Ryding & Rast (1990), sugere que concentrações de fósforo biologicamente disponível menores que 5 mg P.L^{-1} indicam limitação potencial de fósforo, e concentrações de nitrogênio biologicamente disponível menores que 10 mg N.L^{-1} indicam limitação de nitrogênio. Se ambos apresentarem concentrações menores que as acima mencionadas, os dois nutrientes serão limitantes. Já se as concentrações de nitrogênio e fósforo estiverem acima desses valores, nenhum deles é considerado como o fator limitante. (TUNDISI & TUNDISI, 2008).

No entanto, se as concentrações absolutas de fósforo biologicamente disponível e de nitrogênio não decresceram acentuadamente, as taxas determinadas no ecossistema aquático podem indicar qual nutriente será limitante. Utiliza-se a razão atômica de 16N:1P como um dado comparativo e qualquer desvio dessa razão indica o nutriente potencialmente limitante na massa de água (TUNDISI & TUNDISI, 2008).

Os indicadores clássicos de trofia são, a concentração de fósforo (PT), concentração de clorofila a (Chl-a) e a profundidade de Secchi. O índice de trofia (IET) tem por finalidade classificar corpos de água em diferentes graus de trofia, ou seja, avalia a qualidade de acordo com o aumento de nutrientes e seus efeitos relacionados ao crescimento excessivo das algas ou ao aumento da infestação de macrófitas aquáticas. Nesse índice, os resultados calculados a partir dos valores de fósforo, devem ser entendidos como uma medida do potencial de eutrofização, já que este nutriente atua como o agente causador do processo. (MESS, 2020).

Segundo Mess (2020), o Índice do Estado Trófico (IET) de um lago ou reservatório, não se resume apenas a quantificação da concentração de nutrientes, mas envolve também a determinação de outros parâmetros a partir de uma matriz de vários indicadores, como a biomassa do fitoplâncton, zooplâncton e bacterioplâncton; concentração de oxigênio no hipolímnio; transparência e concentração de fósforo total na água.

A classificação trófica de um ecossistema aquático deve basear-se no maior número possível de variáveis. Os diversos critérios utilizados para definir o estado trófico de uma massa de água referem-se aos seguintes parâmetros:

- **Concentração de nutrientes:** (fósforo total, ortofosfato, nitrogênio total e inorgânico dissolvido – amônia, nitrito, nitrato);
- **Carga alóctone e autóctone de nutrientes inorgânicos:** essa carga é medida por meio da quantificação dos usos da bacia hidrográfica e das interações sedimento-água;
- **Taxa de consumo de oxigênio hipolimnético:** o consumo de oxigênio dissolvido no hipolímnio aumenta com a eutrofização; Vale destacar aqui que em ambientes tropicais, no período de estratificação, será observada também, a anoxia no hipolímnio, mesmo em corpos d'água não eutrofizados. A profundidade, ou porção da coluna d'água ocupada pelo hipolímnio, juntamente com o período de ocorrência da estratificação, se tornam características mais importantes para essa avaliação em ambientes tropicais;
- **Produção primária do fitoplâncton:** lagos hipereutróficos apresentam valores acima de $8.700 \text{ mgC. m}^{-2}.\text{ano}^{-1}$ (TUNDISI & MATSUMURA TUNDISI, 2008);
- **Clorofila-a:** os valores de clorofila-a são classificados em: lagos oligotróficos variam de 0 a 4 μg , lagos mesotróficos entre 4 a 10 μg e lagos eutróficos de 10 a 100 μg . Valores superiores para lagos eutróficos em regiões tropicais podem ocorrer;
- **Transparência ao disco de Secchi:** se a concentração de material em suspensão na água for sempre elevada, o uso do disco de Secchi para avaliar o grau de eutrofização não é recomendado;
- **Outros critérios:** utilizam-se também critérios qualitativos e quantitativos que associam os índices de estado trófico à composição de espécies, entre os quais se destacam as razões Diatomáceas/Cianofíceas e Calanoida/Cyclopoida, bem como a biomassa de invertebrados bentônicos.

O Quadro 4 mostra os valores do Índice de Estado Trófico classificados de acordo com as classes de estado trófico bem como suas características:

Quadro 4 - Valores do IET classificados segundo classes de estado trófico

Valor do IET	Classes de Estado Trófico	Características
= 47	Ultraoligotrófico	Corpos de água limpos, de produtividade muito baixa e concentrações insignificantes de nutrientes que não acarretam em prejuízos aos usos da água.
47 < IET = 52	Oligotrófico	Corpos de água limpos, de baixa produtividade, em que não ocorrem interferências indesejáveis sobre os usos da água, decorrentes da presença de nutrientes
52 < IET = 59	Mesotrófico	Corpos de água com produtividade intermediária, com possíveis implicações sobre a qualidade da água, mas em níveis aceitáveis, na maioria dos casos
59 < IET = 63	Eutrófico	Corpos de água com alta produtividade em relação às condições naturais, com redução da transparência, em geral afetados por atividades antrópicas, nos quais ocorrem alterações indesejáveis na qualidade da água decorrentes do aumento da concentração de nutrientes e interferências nos seus múltiplos usos.
63 < IET = 67	Supereutrófico	Corpos de água com alta produtividade em relação às condições naturais, de baixa transparência, em geral afetados por atividades antrópicas, nos quais ocorrem com frequência alterações indesejáveis na qualidade da água, como a ocorrência de episódios florações de algas, e interferências nos seus múltiplos usos.
> 67	Hipereutrófico	Corpos de água afetados significativamente pelas elevadas concentrações de matéria orgânica e nutrientes, com comprometimento acentuado nos seus usos, associado a episódios florações de algas ou mortandades de peixes, com consequências indesejáveis para seus múltiplos usos, inclusive sobre as atividades pecuárias nas regiões ribeirinhas

4.5 Cianobactérias

As cianobactérias (*Cyanophyta*), também conhecidas como cianofíceas, esquizofíceas, mixofíceas ou algas azuis, cuja origem do nome é devido a um dos seus principais pigmentos, a ficocianina, uma ficobiliproteína., que juntamente com os demais pigmentos, confere uma cor azul-esverdeada a esses organismos. Além da ficocianina, estes organismos também apresentam a clorofila “a” e sua reserva glicídica é semelhante ao glicogênio (ESTEVES, 2011).

As cianobactérias não são consideradas pertencentes aos grupos algais, por particularidades que as diferenciam destes últimos, no que concerne a ausência de organelas (pigmentos dispersos pelo citoplasma e núcleo não individualizado); presença de cromossomos simples e circulares; presença de peptidoglicanos na

parede celular, características de organismos procariotos; e ribossomos de tamanhos e conteúdos distintos daqueles apresentados em eucariotos (ESTEVEES, 2011).

As cianobactérias pertencem a um grupo multifacetado de procariontes fotossintéticos que possuem uma grande diversidade morfológica, incluindo formas unicelulares, filamentosas e coloniais, geralmente protegidas por uma bainha mucilaginosa bem desenvolvida. Por ser um dos organismos mais antigos da Terra, são caracterizados como microrganismos ubíquos, pois podem colonizar diversos ambientes como, o oceano, água doce e solo, sendo consideradas um dos organismos mais interessantes para estudos ecológicos e ficológicos (ESTEVEES, 2011; PINTO *et al.*, 2012; ZELLER *et al.*, 2016; BERTONE *et al.*, 2018).

Grande parte das cianobactérias são encontradas em água doce. As pertencentes a ordem Nostocales, por exemplo, possuem estruturas especializadas de fundamental importância, como os heterocistos, que são responsáveis pela fixação biológica de nitrogênio em lagos. Vale salientar que as cianobactérias são principalmente autotróficas, pois, assimilam o CO₂ e energia solar, utilizando água ou sulfeto de hidrogênio – (como aceptores de elétron, assemelhando-se às bactérias quimiotróficas), mas podem ser também consideradas mixotróficas, por realizarem a assimilação de compostos orgânicos, possibilitando assim, que vivam nas partes profundas de lagos na ausência de luz (ESTEVEES, 2011).

O aparato fotossintético das cianobactérias possui pigmentos (como a clorofila a) e vários carotenóides (como pigmentos da antena coletora de luz) sendo os principais as ficobiliproteínas, que são organizadas em estruturas chamadas ficobilissomas, compostas de ficoeritrina (pigmento vermelho ausente em algumas cianobactérias), ficocianina (PC - pigmento azul), aloficocianina e aloficocianina B. (STANIER & COHEN-BAZIRE, 1977, PIMENTEL, 2009).

A clorofila a e ficocianina, são os principais pigmentos utilizados para o monitoramento das cianobactérias em ambientes aquáticos. A ficocianina é um pigmento exclusivo para cianobactérias em água doce e quando em nível elevado podem indicar a sua proliferação, bem como e diferenciá-las de outros tipos de organismos do fitoplâncton (BRIENT, *et al.*, 2008; AWWA, 2010; KASINAK *et al.*, 2015; U.S. EPA, 2016) Os métodos de medições de clorofila a são baseadas em métodos de extração ou por

meio de sondas ou instrumentos de fluxo, que podem incluir o Método EPA 445.0 para clorofila-a (U.S. EPA, 1997; 2016). Já para ficocianina, os métodos de detecção também podem ser por meio de sondas ou por meio de método de extração (APHA, 2017; CETESB, 2011).

4.6 Cianotoxinas

Além dos pigmentos, as cianobactérias também produzem outros compostos conhecidos como metabólitos secundários, que são os compostos não utilizados pelo organismo primário, ou seja, aqueles que não estão envolvidos diretamente no seu crescimento normal, desenvolvimento ou reprodução. Os metabólitos secundários englobam aqueles compostos que atuam como antibióticos, aleloquímicos, hormônios e toxinas não essenciais ao organismo (CARMICHAEL, 1992; PAIVA, 2015).

Os metabólitos secundários mais conhecidos e estudados são as cianotoxinas, como, por exemplo, as microcistinas, saxitoxinas, anatoxinas, cilindrospermopsinas dentre outras, que são encontradas em ambientes aquáticos costeiros ou continentais do mundo inteiro. As cianotoxinas são extremamente potentes em alguns sistemas biológicos, podendo afetar tanto os animais presentes nos ambientes aquáticos, quanto à saúde humana (CARMICHAEL, 1994; PAIVA, 2015; SAMPAIO, 2012).

As cianotoxinas contém uma enorme variedade de compostos químicos que as diferenciam com base na sua estrutura química. A sua resposta toxicológica pode ser separada de acordo com os efeitos causados pelas cianotoxinas, que podem ser hepatotóxicas, neurotóxicas, dermatóxicas e endotóxicas (BROWN *et al.*, 2018; HAQUE *et al.*, 2017; HONG *et al.*, 2021; MANKIEWICZ *et al.*, 2003).

As microcistinas são heptapeptídeos cíclicos, hepatotóxicos, que podem ser produzidas por gêneros potencialmente tóxicos de *Dolichospermum*, *Anabaenopsis*, *Microcystis* e *Planktothrix*. Sua atividade consiste na inibição de proteína fosfatase tipos 1 e 2A e podem causar danos ao fígado (BLÁHA *et al.*, 2009; RINEHART *et al.*, 1988).

As Nodularinas são pentapeptídeos cíclicos, também hepatotóxicos, inibidores da proteína fosfatase tipo 1 e 2A, e são produzidas pelo gênero *Nodularia*, podendo causar a necrose do fígado (RINEHART *et al.*, 1988).

As saxitoxinas são carbamatos alcalóides, neurotóxicos e bloqueadores de canal de sódio nos axônios. Podem ser produzidos pelos gêneros *Dolichospermum*, *Aphanizomenon*, *Raphidiopsis*, *Lyngbya* e *Planktothrix* e causam dores abdominais, irritação nos olhos, febre e erupções cutâneas (HACKETT *et al.*, 2013; LAGO *et al.*, 2015; TSUCHIYA *et al.*, 2015).

As Lyngbyatoxinas são alcalóides, dermatotóxicos, potencializadores das proteínas kinase C (PKC) agindo como bloqueadores de tumores. Podem ser produzidos pelos gêneros *Lyngbya*, *Oscillatoria*, *Schizothrix* causando dermatites (JIANG *et al.*, 2014). Como exemplo de endotoxinas tem-se os lipopolissacarídeos, que são produzidos por todas as cianobactérias. Atuam como agentes inflamatórios, provocando a irritação do trato gastrointestinal e tem como principais sintomas calafrios, febre, mialgia e náuseas (BLÁHA *et al.*, 2009).

Os gêneros e espécies *Microcystis spp.*, *Raphidiopsis raciborskii* (Woloszynska) (AGUILERA *et al.*, 2018), *Planktothrix agardhii*, *Gloeotrichia spp.*, *Dolichospermum spp.*, (WACKLIN *et al.*, 2009) *Lyngbya spp.*, *Aphanizomenon spp.*, *Nostoc spp.*, *Oscillatoria spp.*, *Schizothrix spp.* e *Synechocystis spp.* são conhecidos como produtores de cianotoxinas em águas doces. Contudo, vale salientar que outras espécies e gêneros de cianobactérias também podem ser considerados potencialmente produtores de toxinas (PIMENTEL, 2009; WHO, 2003).

Nos últimos anos, a frequência, intensidade e distribuição geográfica de florações de cianobactérias em água doce têm crescido em todo o mundo, com as principais causas geralmente ligadas à eutrofização dos corpos d'água e aquecimento global. Estas florações podem ser muitas vezes tóxicas para animais mamíferos e seres humanos, o que ressalta a importância de fazer um diagnóstico rápido do teor de toxinas e/ou do potencial tóxico dessas florações (BRIENT *et al.*, 2017; CARACCILO *et al.*, 2019).

5 METODOLOGIA

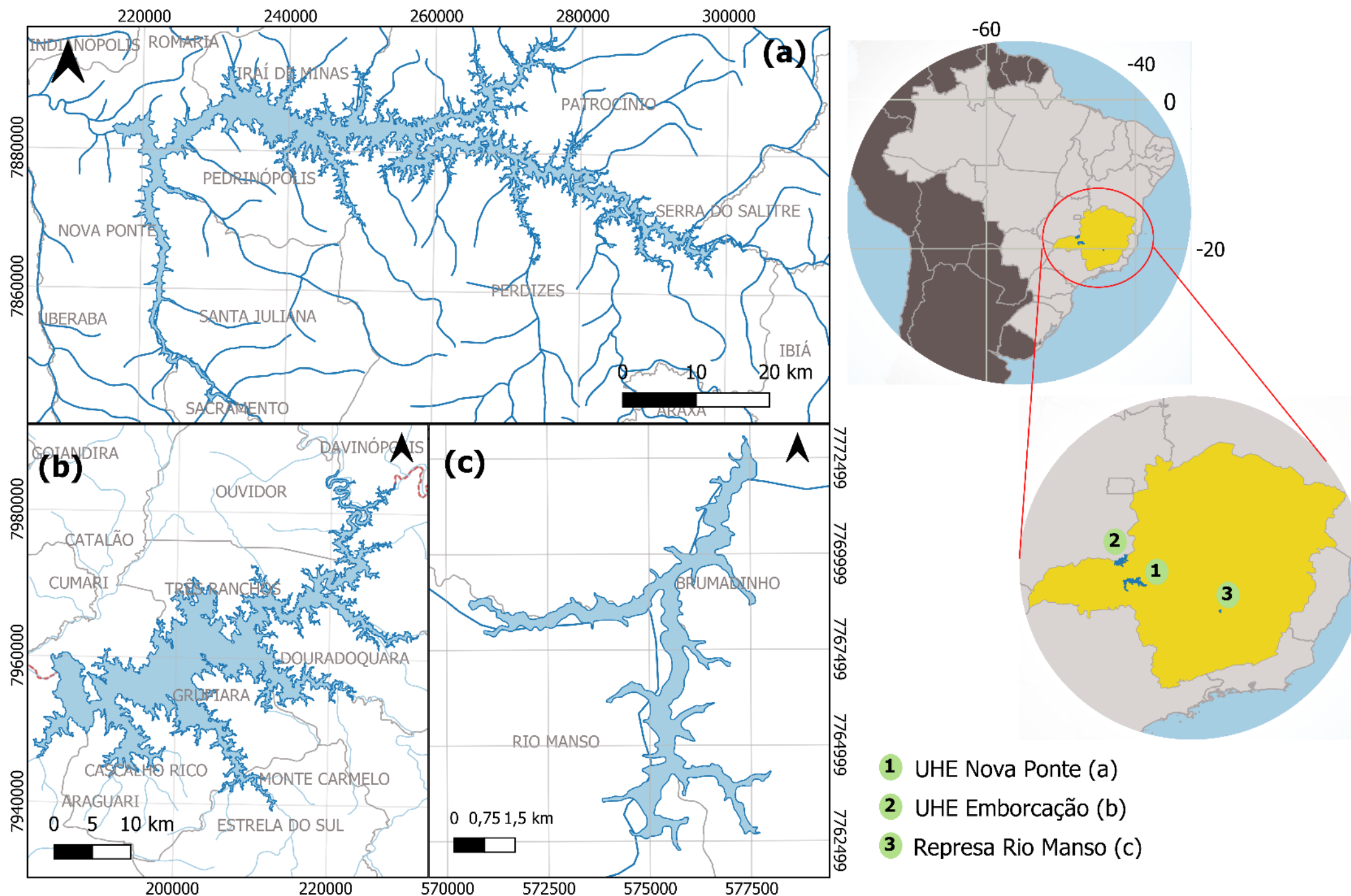
No intuito de simplificar e organizar as ideias norteadoras para a elaboração deste trabalho, optou-se por separar a metodologia de pesquisa nas seguintes etapas:

- i. definição das áreas de estudo: reservatórios das UHEs de Nova Ponte e Emborcação e de abastecimento do Rio Manso.
- ii. levantamento, organização e análise do banco de dados disponível, bem como a definição da série temporal utilizada, que compreende os anos de 1995 a 2020, seguido do levantamento de informações na literatura sobre as três áreas de estudo, e o uso e ocupação das suas áreas de entorno.
- iii. caracterização da qualidade da água dos três ambientes estudados e das áreas de contorno incluindo análise do uso e ocupação do solo
- iv. análise da correlação entre o uso e ocupação do solo e qualidade da água dos ambientes estudados
- v. seleção da estrutura a ser utilizada para construção da rede causal
- vi. identificação e seleção de indicadores de pressão, estado e resposta.
- vii. validação dos indicadores escolhidos com base na literatura.
- viii. construção rede causal para avaliação da eutrofização.

5.1 Áreas de Estudo

As áreas de estudo definidas para a execução deste trabalho são os reservatórios das Usinas Hidrelétrica de Nova Ponte e o reservatório de abastecimento do Rio Manso, localizados em Minas Gerais, e o reservatório da Usina Hidrelétrica de Emborcação que está localizado na divisa dos estados de Minas Gerais/MG e Goiás/GO, conforme Figura 2.

Figura 2 - Mapa de localização das áreas de estudo. UHE de Nova Ponte (a), UHE de Emborcação (b) e Represa de Rio Manso (c)



Sistemas de coordenadas: Métrico
 DATUM: SIRGAS 2000
 Zone: UTM 23S

Produção: Dutra, D. J.
 Elaboração: Maio, 2022

Fonte dos dados:

- 1 - Limites estadual: IBGE, 2017
- 2 - Limites municipal: IBGE, 2017
- 3 - Área de estudo: ANA, 2019
- 4 - Limite do estado de Minas Gerais: IDE, 2022
- 5 - Fronteira do Brasil: IBGE, 2017
- 6 - Fronteira da América do Sul: ESRI, 2017

- 1 UHE Nova Ponte (a)
- 2 UHE Emborcação (b)
- 3 Represa Rio Manso (c)

- Hidrografia
- - - Limite estadual
- Limite municipal
- Área de estudo
- Limite do estado de Minas Gerais
- Fronteira do Brasil
- Países da América do Sul

A escolha destes reservatórios, de diferentes usos, sendo, principalmente, um de abastecimento e dois cuja atividade principal é a de geração de energia elétrica, justifica-se além dos seus usos, pela disponibilidade do banco de dados e das características das atividades de entorno, que podem, por sua vez, impactar na qualidade da água do reservatório.

O banco de dados de monitoramento de diversos parâmetros, sobretudo daqueles de interesse para estudos de florações, foi gentilmente disponibilizado pela Cemig Geração e Transmissão e Companhia de Saneamento de Minas Gerais – COPASA, para realização das análises estatísticas para elaboração deste trabalho.

Vale destacar que como limite do sistema, foram considerados, a princípio, apenas os pontos de amostragem lênticos, que são localizados na porção central dos reservatórios, e que possuem características mais acentuadas de sistemas lacustres, conforme os Quadro 8, Quadro 9 e Quadro 10, do Apêndice A. Os pontos que possuíam características lóticas não foram considerados, a princípio, para a construção da rede causal em si, porém foram avaliados a fim de verificar a influência dos tributários dos reservatórios e identificar as possíveis interferências na qualidade da água dos reservatórios.

A usina hidrelétrica (UHE) de Emborcação, começou a ser construída em 1977. Iniciou sua operação em 1982, com 02 unidades geradoras de 298 MW de potência unitária. A partir de 1983, mais 02 unidades geradoras de mesma potência foram instaladas. Construída em Araguari, MG, no Rio Paranaíba, possui 1.192 MW de potência instalada disponibilizada nas suas 4 unidades geradoras. Composta por barramentos de terra, enrocamento com núcleo de argila e concreto, a barragem da UHE Emborcação se estende por 1.502 m de comprimento de crista e 158 m de altura máxima. Seu reservatório possui cerca de 476,59 km² de área inundada e capacidade máxima de acumulação de 17.724,72 hm³ (CEMIG, 2021).

A Usina Hidrelétrica de Nova Ponte, (19°7'59"S, 47°41'51"W), está situada no rio Araguari, afluente do rio Paranaíba, no município de Nova Ponte, no Triângulo Mineiro. É a segunda maior usina da Cemig - o aproveitamento de Nova Ponte propiciou significativo ganho de energia para o sistema interligado da região Sudeste, devido à localização privilegiada e à grande capacidade de regularização de seu

reservatório (CEMIG, 2020). Com 510 MW de potência instalada distribuída pelas suas 3 unidades geradoras, a usina de grande porte começou a ser construída em 1987 e foi começado a ser operada em 1994. Composta por barramento de terra, enrocamento com núcleo de argila, a barragem da UHE Nova Ponte possui cerca de 1.620 m de comprimento de crista e 142 m de altura máxima. Seu reservatório possui cerca de 443 km² de área inundada e capacidade máxima de acumulação 12.792 hm³ (CEMIG, 2021).

O reservatório de Rio Manso, (20°08'27" S, 44°15'35" W), localiza-se nas sub-bacias do Rio Paraopeba, e quase que integralmente nos limites da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH). Juntamente com os reservatórios de Vargem das Flores e Serra Azul, são classificados como reservatórios peri-urbanos, sendo este último, construído com a finalidade específica de abastecimento (MATOS *et al.*, 2010).

A implantação do Sistema Rio Manso possibilitou flexibilizar o abastecimento de água da Região Metropolitana de Belo Horizonte, criando condições para a realização de reformas no Sistema Rio das Velhas – o que não era possível devido à necessidade de paralisação deste Sistema. Assim como ocorrera na implantação do Sistema Serra Azul, a implantação do Sistema Rio Manso consolidou a visão ambiental da COPASA no que se refere à preservação dos mananciais, objetivando a manutenção da qualidade da água e da vida útil do Sistema, sendo a bacia hidrográfica do rio Manso definida como área de proteção especial estadual – APEE – por meio de decreto estadual em 15 de março de 1988 (CONSAG, 2009). O detalhamento de cada área estudada, será descrito na parte de uso e ocupação de entorno de cada área.

5.2 Análises Estatísticas dos Bancos de Dados Disponíveis

De posse dos dados de monitoramento da qualidade da água nos reservatórios selecionados, cedidos pela Companhia Energética de Minas Gerais, CEMIG Geração e Transmissão e pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais, COPASA, realizou-se a organização dos mesmos, de acordo com as seguintes etapas:

- i. Análise preliminar do banco de dados: Organização dos arquivos (planilhas do software Excel) para padronização das planilhas, separados por área de estudo e por estação amostral;

- ii. Seleção apenas das estações de monitoramento ativas para aplicação das análises estatísticas neste estudo;
- iii. Separação dos dados de acordo com a profundidade e a sazonalidade (período de estiagem: abril a setembro e período chuvoso: de outubro a março);
- iv. Análise de estatística descritiva, dos dados, separados por estação de monitoramento e por profundidade de amostragem para verificação dos dados válidos e análise de outliers, seguido da elaboração de gráficos de séries temporais e gráficos tipo box *whisker*;
- v. Cálculo do Índice de Estado Trófico – IET, para todos os reservatórios ao longo dos anos de monitoramento e separado por estação amostral em cada zona (superfície e zona fótica), seguido de análise de comparação do IET entre as estações, por meio de teste ANOVA (Teste de Tukey);
- vi. Análise dos dados, separados por estação de monitoramento e por profundidade (zona) de amostragem, para análises de correlação, LM (linear model), da clorofila com os nutrientes (nitrogênio total e amoniacal, fósforo total, nitrito, nitrato e ortofosfato).

A análise de *outliers* foi feita por meio do método da amplitude interquartis (AIQ), calculado da seguinte forma: subtraindo o percentil 75%, ou terceiro quartil (Q3), do percentil 25%, ou primeiro quartil (Q1). Em seguida, calculou-se os outliers superiores ($Q3+1,5(AIQ)$) e inferiores ($Q1-1,5(AIQ)$), para todos os parâmetros de cada estação amostral e profundidade de coleta.

Em seguida, foi realizado um levantamento na literatura tais como: Carlson (1977), Descy e colaboradores (2016), Esteves (2011), Lamparelli (2004), Ramos e colaboradores (2018); Toledo e colaboradores (1983), Tundisi (2008), dos principais parâmetros que podem ser considerados importantes para os estudos de eutrofização. O objetivo deste levantamento foi verificar no banco de dados quais destes parâmetros possuíam número de amostragem suficiente para que fosse possível realizar uma pré-seleção dos indicadores de pressão, estado e resposta a serem utilizados neste trabalho. Os resultados das análises de estatística descritiva foram utilizados, para validação destes parâmetros e da seleção dos indicadores para a construção da rede causal.

Vale ressaltar que os resultados destas análises bem como as informações disponíveis no banco de dados, também foram utilizados para a definição das estações amostrais de característica lótica a serem consideradas para verificação da possível influência dos tributários do reservatório nestas estações e nas estações lânticas, a fim de detectar as possíveis alterações de atividades antrópicas que podem comprometer a qualidade da água nos reservatórios, que serão considerados para a construção da rede causal.

As estações amostrais de Nova Ponte, NP100, NP110, NP160 e NP190, possuíam dados apenas para as amostras de superfície. As demais estações amostrais (NP120, NP130, NP140, NP170 e NP180), possuíam dados de superfície, meio zona Fótica e Fundo.

As estações amostrais de Emborcação EM10, EM40, EM70 e EM190, possuíam dados apenas para as amostras de superfície. As demais estações amostrais (EM100, EM110, EM140, EM150 e EM160), possuíam dados de superfície, meio zona eufótica e fundo.

As estações amostrais de Rio Manso E1 a E4 possuíam dados nas profundidades de coleta, Secchi e fundo, já as estações E6, E7, E8, E9, E10 e E11, que são nos córregos tributários, a profundidade de coleta de dados não foi informada. Sendo assim, para este trabalho, foram selecionados os dados das profundidades de superfície e zona eufótica (Secchi para Rio Manso e meio zona eufótica para Emborcação e Nova Ponte).

Vale ressaltar também que não foram considerados os dados da profundidade de coleta (COL para Rio Manso), pois a informação da profundidade em metros, de onde foram coletados os dados, não estava disponível na planilha. Outro ponto importante, é que as estações E1, E2, E3 e E4, não possuíam dados de clorofila medidos à superfície, somente na profundidade Secchi. Já as estações E5, E6, E7, E8, E9, E10 e E11, não possuíam medições de clorofila em nenhuma das profundidades informadas e a estação E5 e E11, também não possuíam dados para este mesmo parâmetro nas profundidades de Secchi portanto, também não foi considerado para este estudo.

Com relação à sazonalidade dos estados, não foi possível separar em períodos de estiagem e chuvoso, devido às frequências de monitoramento (trimestral e semestral), e dos dados faltantes para os principais parâmetros considerados neste estudo (pH, clorofila a, temperatura da amostra, oxigênio dissolvido, turbidez, condutividade elétrica, séries nitrogenada e fosfatada).

5.3 Principais Etapas para Criação da Rede Causal

Para a criação da rede causal, seguindo a estrutura conceitual Pressão Estado Resposta, considerou-se como indicadores, os principais parâmetros de interesse no estudo da eutrofização de águas continentais e a sua interação em cada um dos ambientes estudados no intuito de oferecer um diagnóstico atual da situação desses ambientes, bem como uma avaliação preditiva por meio de possíveis eventos que possam desencadear processos de eutrofização nestes corpos d'água no futuro, a partir da aplicação da metodologia das redes causais.

A elaboração da rede causal, seguindo o modelo PSR, compreendeu cinco etapas:

- i. Definição do domínio de interesse;
- ii. Determinação das condições de contorno (até a condição de qualidade de água e uso e ocupação do solo);
- iii. Estabelecimento dos limites dos sistemas considerados para esta avaliação;
- iv. Identificação dos indicadores para os principais fatores e processos;
- v. Representação dos indicadores em um gráfico direcional (MORAES, 2011).

Para o estabelecimento da rede causal para diagnóstico de ambientes quanto à eutrofização, partiu-se da análise do estado das variáveis no espaço temporal, visando a detecção das pressões que são nele exercidas, com o objetivo de identificar o mecanismo de resposta do sistema.

Os indicadores foram separados e adaptados da seguinte forma:

- i. Os indicadores de pressão ambiental que descrevem as pressões exercidas pelas atividades humanas sobre o meio ambiente, incluindo a qualidade e quantidade de recursos naturais;

- ii. Os indicadores de estado (condições ambientais), que relacionam a qualidade do ambiente e a qualidade e quantidade de recursos naturais; e por fim,
- iii. Os indicadores de resposta da sociedade, medidas que mostram em que extensão a sociedade estão respondendo a mudanças e preocupações ambientais. (SALLES et al., 2004).

Para a criação da Rede causal, utilizou-se a versão gratuita e disponível online do aplicativo *Lucid*. (disponível em: <https://lucid.co/pt>).

5.4 Seleção dos Indicadores Para a Rede Causal

Para seleção dos indicadores utilizados para a rede causal, também se levou em consideração as características para um bom indicador para estudos de eutrofização, juntamente com as características adaptadas da OECD (2003) (conforme Quadro 1) bem como a resposta das questões norteadoras propostas pela US EPA (2000), conforme Quadro 2.

Uma vez que o indicador foi selecionado e classificado como um bom indicador para a determinada estrutura da rede causal para o qual ele foi considerado, foram então, organizados de acordo com a estrutura PSR. O Quadro 5 traz de forma resumida o detalhamento da seleção de cada um dos indicadores.

Quadro 5 - Resumo do detalhamento da Seleção de Indicadores

	Indicadores	Detalhamento
PRESSÃO	Alterações no uso e ocupação do solo Porcentagem de área impactada na área de entorno ao longo do tempo	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Mapas de uso e ocupação do solo, com as classes e empreendimentos de acordo com as bases de dados (IDE SISEMA, Mapbiomas e PNLA); ✓ Gráficos das atividades nas áreas de entorno e por município; ✓ Mapas produzidos a partir de imagens de satélite (Landsat 5 e 8) do período do estudo, ou seja: 1995, 2005, 2015 e 2020), com as bases de dados do IDE SISEMA, Mapbiomas e ANA
	Aumento da irrigação e do número de Pivôs Centrais	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Mapas produzidos a partir de imagens de satélite do período estudo com os pivôs centrais quando houverem ✓ Cálculo de área dos pivôs centrais, de acordo com informações da base de dados da ANA
	Lançamento de esgoto não tratado ou com tratamento insuficiente nos corpos hídricos	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Gráficos com o percentual de atendimento às condições de saneamento dos municípios do entorno das áreas de estudo
	Erosão do solo	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Mapas produzidos a partir de imagens de satélite (Landsat 5 e 8) do período do estudo, ou seja: 1995, 2005, 2015 e 2020), com as bases de dados do IDE SISEMA, Mapbiomas e ANA
	Outros	
ESTADO	Piora da qualidade da água Variação temporal dos parâmetros da qualidade da água	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Análises estatísticas do banco de dados disponível para os três reservatórios no período de 1995 a 2020
	Presença de nutrientes e de matéria orgânica em excesso e assoreamento dos corpos hídricos	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Calculo do IET por estação em cada um dos reservatórios e ao longo da série temporal para enquadramento quanto ao nível de trofia e verificação se houve diferenças significativas entre as estações de cada reservatório
	Correlação da clorofila a com os parâmetros de interesse (N e P totais, N amoniacal, Nitrito, Nitrato); Razão Nitrogênio e Fósforo (N/P)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Feita para todas as estações de cada área de estudo. (Pearson e Regressão linear) ✓ Identificação da correlação entre o impacto do uso e ocupação do solo e a degradação da qualidade de água
	Outros	
RESPOSTA	Monitoramento periódico dos parâmetros de interesse Melhorar o gerenciamento e manejo das fontes de impacto que causam as pressões;	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Políticas públicas de gestão e monitoramento que garantam a sustentabilidade do ambiente e dos recursos hídricos
	Outros	

5.4.1 Identificação das Pressões

Para identificação das pressões, caracterizadas como uso excessivo de recursos naturais, mudanças no uso da terra e emissões de produtos químicos, resíduos que podem afetar a área delimitada do sistema (SALLES *et al.*, 2004; MORAES, 2011), foram consideradas as seguintes etapas:

5.4.1.1 Levantamento de atividades no entorno que podem impactar na qualidade de água

Baseando-se no levantamento na literatura e dos Planos Ambientais de Conservação e Uso do Entorno do Reservatório Artificial – PACUERA, quando disponível. Realizou-se então, uma análise crítica do uso e ocupação do solo do entorno dos reservatórios para detectar as principais atividades que podem, a princípio, impactar na qualidade da água dos corpos hídricos estudados, e que também podem contribuir para construção de uma relação de causa e efeito com os processos de eutrofização, como por exemplo a utilização de fertilizantes e agroquímicos na indústria agropecuária, a presença de estações de efluentes bem como as condições de saneamento dos municípios que margeiam os reservatórios.

5.4.1.2 Levantamento de empreendimentos nos municípios de entorno dos reservatórios

Realizou-se um levantamento dos empreendimentos licenciados em cada um dos municípios que margeiam os reservatórios, no Portal Nacional do Licenciamento Ambiental (PNLA). No intuito de verificar o avanço dessas atividades (ou empreendimentos) ao longo do tempo, o levantamento foi feito para cada intervalo de tempo (de 1995 a 2004; de 2005 a 2014 e de 2015 a 2020), de forma a agrupar todo o recorte temporal selecionado neste estudo (1995 a 2020).

Em seguida, os empreendimentos foram enquadrados nas seguintes tipologias: i. Atividades agrossilvipastoris, ii. Energia, iii. Indústria, iv. Infraestrutura, v. Mineração, vi. Saneamento ambiental, vii. Serviços, viii. Uso de recursos naturais e da Biodiversidade e ix. Outros.

De posse dessas informações, elaborou-se gráficos, para visualização das porcentagens das tipologias em cada um dos intervalos de tempo, seguido da porcentagem de empreendimentos em cada município do entorno, além da porcentagem de tipologias em cada um dos municípios. Esse levantamento permitiu avaliar a evolução da porcentagem de empreendimentos por tipologia em cada um dos municípios que margeiam os reservatórios ao longo do tempo, para assim, avaliar os possíveis impactos na qualidade de água dos reservatórios.

Vale salientar que o PNLA foi utilizado para o levantamento dos empreendimentos, por conter dados mais antigos de licenças, quando comparado com a base de dados do IDE SISEMA. Outro ponto importante é que como o reservatório de Emborcação está localizado na divisa de dois estados (Minas Gerais e Goiás), foi bastante difícil encontrar os dados de licenciamento para a parte localizada em Goiás, não sendo possível utilizar a base de dados do IDE SISEMA para este reservatório. Porém, para a elaboração dos mapas de uso e ocupação do solo no software QGis, utilizou-se a base de dados do IDE-SISEMA, pois somente nesta, havia disponível os arquivos shapefile para a elaboração dos mapas de uso e ocupação do solo para os reservatórios. Portanto, para a elaboração dos mapas, seguiu-se com a classificação disponível no IDE SISEMA.

5.4.1.3 Elaboração dos mapas de uso e ocupação do solo

Para a elaboração dos mapas de uso e ocupação do solo, foi considerada como área de entorno, os municípios que margeiam o reservatório. Os mapas foram elaborados no software QGis, seguindo a base de dados do IDE SISEMA e Mapbiomas. As classificações foram feitas seguindo as classes disponíveis nessas bases de dados, agrupando as atividades similares.

Também foram elaborados mapas de cobertura do solo para cada uma das áreas de estudo, seguindo o recorte temporal selecionado para este estudo. Foram coletadas imagens de acesso gratuito dos satélites *Landsat 5* e *8* (Serviço Geológico dos Estados Unidos - USGS), nos períodos de julho a setembro, onde tem-se pouca ou nenhuma cobertura de nuvens, nos seguintes períodos: 1995, 2005, 2015 e 2020. A metodologia de classificação adotada foi a classificação supervisionada pelo interprete, utilizando *Orfeo ToolBox* (OTB).

As classificações utilizadas foram: (i). área urbana, (ii). Água profunda, (iii). água turva, (iv). área mineral, (v). mineração, (vi). vegetação densa, (vii). vegetação típica, (viii). vegetação rala, (ix). eucalipto jovem, (x). eucalipto maduro, (xi). pasto, (xii). desnudo/erosão e (xiii). pivôs centrais. Para cada uma dessas classificações também foram calculadas as áreas correspondentes para cada ano, a fim de identificar o percentual de área desmatada ao longo dos anos do recorte temporal do estudo.

Os dados de área urbana foram coletados na base de dados do IDE SISEMA (disponível em: <https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/webgis>), e os dados de pivô central da Agência Nacional de Águas - ANA (disponível em: <https://dadosabertos.ana.gov.br/datasets/d3057e34e7794c04b1de47285d81ae18>).

5.4.2 Identificação do Estado

A identificação do estado, compreendeu as seguintes etapas:

- i. Para cada pressão detectada, foram atribuídos os principais parâmetros físico-químicos (principalmente àqueles de interesse no estudo da eutrofização), que estão diretamente e indiretamente à elas associados;
- ii. Verificação na literatura de estudos nas áreas selecionadas, da variação desses parâmetros bem como os parâmetros de interesse para estudo da eutrofização;
- iii. Verificação da existência destes parâmetros pré-selecionados nos bancos de dados disponibilizados, com número de medições suficientes para realização de análises estatísticas;
- iv. Comparação dos valores observados com os limites estabelecidos pela legislação existente (Deliberação Normativa DN COPAM, CERH, 01/2008). Os parâmetros que apresentaram maior desconformidade, e estiverem relacionados com as pressões, foram considerados com maior grau de alerta e portanto, com maior peso a ele atribuído;
- v. Cálculo dos índices de estado trófico (IET) (CARLSON, 1977; TOLETO *et al.*, 1983), que avalia a qualidade da água quanto ao enriquecimento por nutrientes e seu efeito relacionado ao crescimento excessivo do fitoplâncton ou ao aumento de macrófitas aquáticas. Os parâmetros utilizados para calcular este índice são transparência, clorofila-a, fosforo total e transparência do disco de Secchi (COSTA,

2021; ANA, 2020; CETESB, 2018; IGAM, 2020; LAMPARELLI, 2004). Calculou-se o índice de estado trófico ponderado (utilizando dados de Fósforo total e Clorofila a), durante o recorte temporal selecionado, separado por reservatório e por zona (superfície e zona eufótica);

- vi. Análise de correlação da clorofila a com os parâmetros, conforme já mencionado anteriormente.

5.4.3 Identificação da Resposta

A estrutura PSR possui um comportamento cíclico, conforme mencionado anteriormente, ou seja, a Pressão das atividades humanas sobre o meio ambiente e econômicas levam a mudanças no estado ou nas condições ambientais que prevalecem como resultado dessa pressão e pode provocar respostas da sociedade para modificar as pressões e o estado do meio ambiente. (OECD, 1983).

Sendo assim, partimos das possíveis ocorrências de florações como principal consequência das ações antrópicas no ambiente (pressões). Por consequência, a seleção dos indicadores de resposta, se deu com base nas principais medidas que possam mitigar esses impactos percebidos nessa área (estado) no intuito de evitar os processos de eutrofização.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Caracterização das Áreas de Estudo

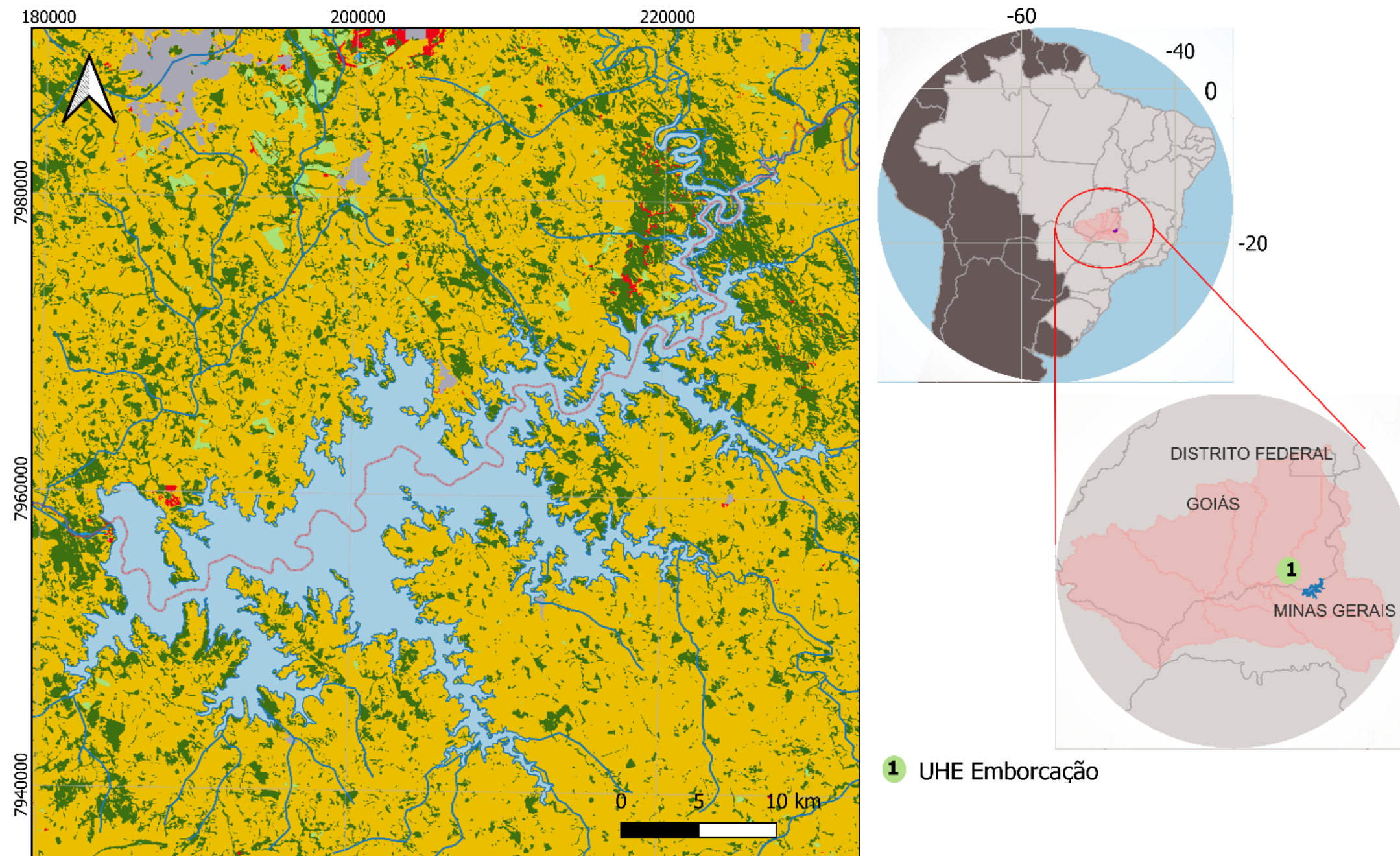
A caracterização das áreas de estudo foi realizada para cada um dos reservatórios selecionados, uma vez que traz informações importantes sobre a possível influência das atividades do entorno, na qualidade da água. Sendo assim, um dos indicadores considerados para construção da rede causal é a análises de entorno dos reservatórios. Dessa forma, avaliou-se a contribuição das atividades que podem, direta e indiretamente, contribuir, a curto e a longo prazo para os processos de eutrofização destes ambientes.

6.1.1 Reservatório da UHE de Emborcação

A usina de Emborcação (18°27'5" S, 47°59'13" W), localiza-se no município de Araguari e seu reservatório é considerado de acumulação e abrange sete municípios no Estado de Minas Gerais e quatro no Estado de Goiás. Os municípios em Minas Gerais, de montante para jusante, são: Abadia dos Dourados, Douradoquara, Monte Carmelo, Grupiara, Estrela do Sul, Cascalho Rico e Araguari. Sendo que, com excetuando-se Araguari e Monte Carmelo, os demais municípios são pequenos, com população menor ou próxima a 5.000 habitantes e com economia baseada quase que exclusivamente em atividades agropecuárias (FERREIRA JÚNIOR, 2005).

Os municípios de Araguari e Monte Carmelo em Minas Gerais, destacam-se, por serem maiores, cerca de 100.000 e 50.000 habitantes, respectivamente. O município de Araguari dispõe de boa infraestrutura de serviços, saúde e educação, com economia sustentada pelas atividades agropecuária e industrial e Monte Carmelo, possui como principais atividades econômicas a agropecuária, extração vegetal e pesca, além de indústrias no setor de transformação mineral. O mapa da Figura 3 mostra o uso e ocupação na área de entorno do reservatório.

Figura 3 (a) e (b) - Mapas de uso e ocupação do solo do entorno do reservatório da UHE de Emborcação

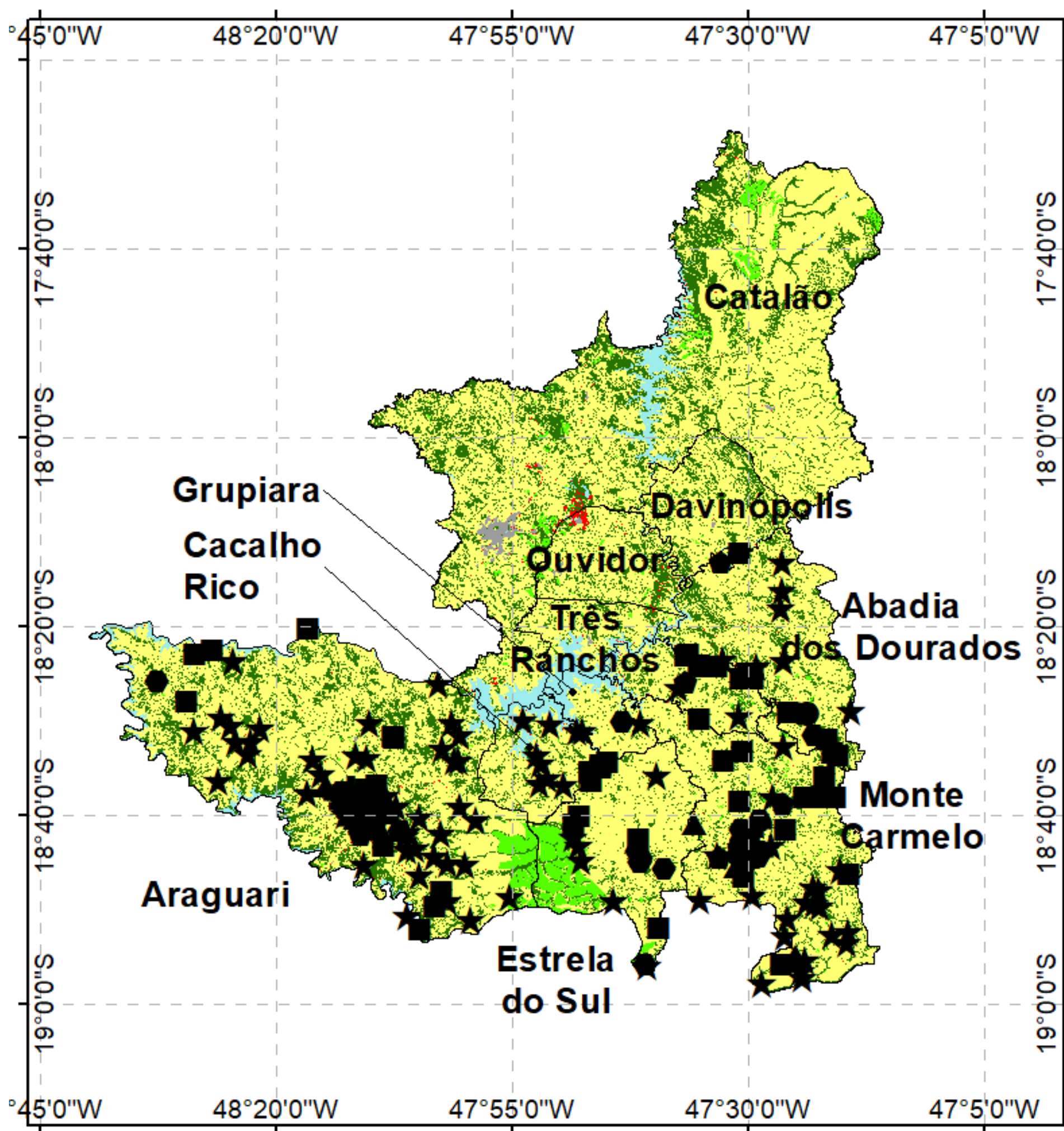


Sistemas de coordenadas: Métrico
DATUM: SIRGAS 2000
Zone: UTM 23S

Produção: Dutra, D. J.
Elaboração: Maio, 2022

Fonte dos dados:

- 1 - Limites estadual: IBGE, 2017
- 2 - Área de estudo: ANA, 2019
- 3 - Fronteira do Brasil: IBGE, 2017
- 4- Fronteira da América do Sul: ESRI, 2017
- 5- Uso do solo: MAPBIOMAS, 2020



LEGENDA

Empreendimentos Licenciados

- A - Atividades Minerárias
- B - Atividades Industriais/ Metalurgia e Outras
- ▲ C - Atividades Industriais/ Indústria Química e Outras
- ◆ D - Atividades Industriais/ Indústria Alimentícia
- ⊕ E - Atividades de Infraestrutura
- ⬢ F - Gerenciamento de Resíduos e Serviços
- ★ G - Atividades Agrossilvipastoris

Uso do solo

- Floresta
- Floresta Plantada
- Área Urbana
- Água
- Agricultura e Pecuária
- Não Floresta



Sistema de Coordenadas
WGS 1984 UTM Zona 23S

0 5 10 20 30 40
Km

Já em Goiás, o município que mais se destaca é Catalão, com cerca de 67.000 habitantes. Possui forte atividade econômica na área industrial, de extração mineral e de agropecuária. Os outros municípios que margeiam o lago de Emborcação são: Davinópolis, Três Ranchos e Ouidor. Todos os municípios com cerca de 5.000 habitantes e uma economia totalmente voltada para atividades agropecuárias (FERREIRA JÚNIOR, 2005).

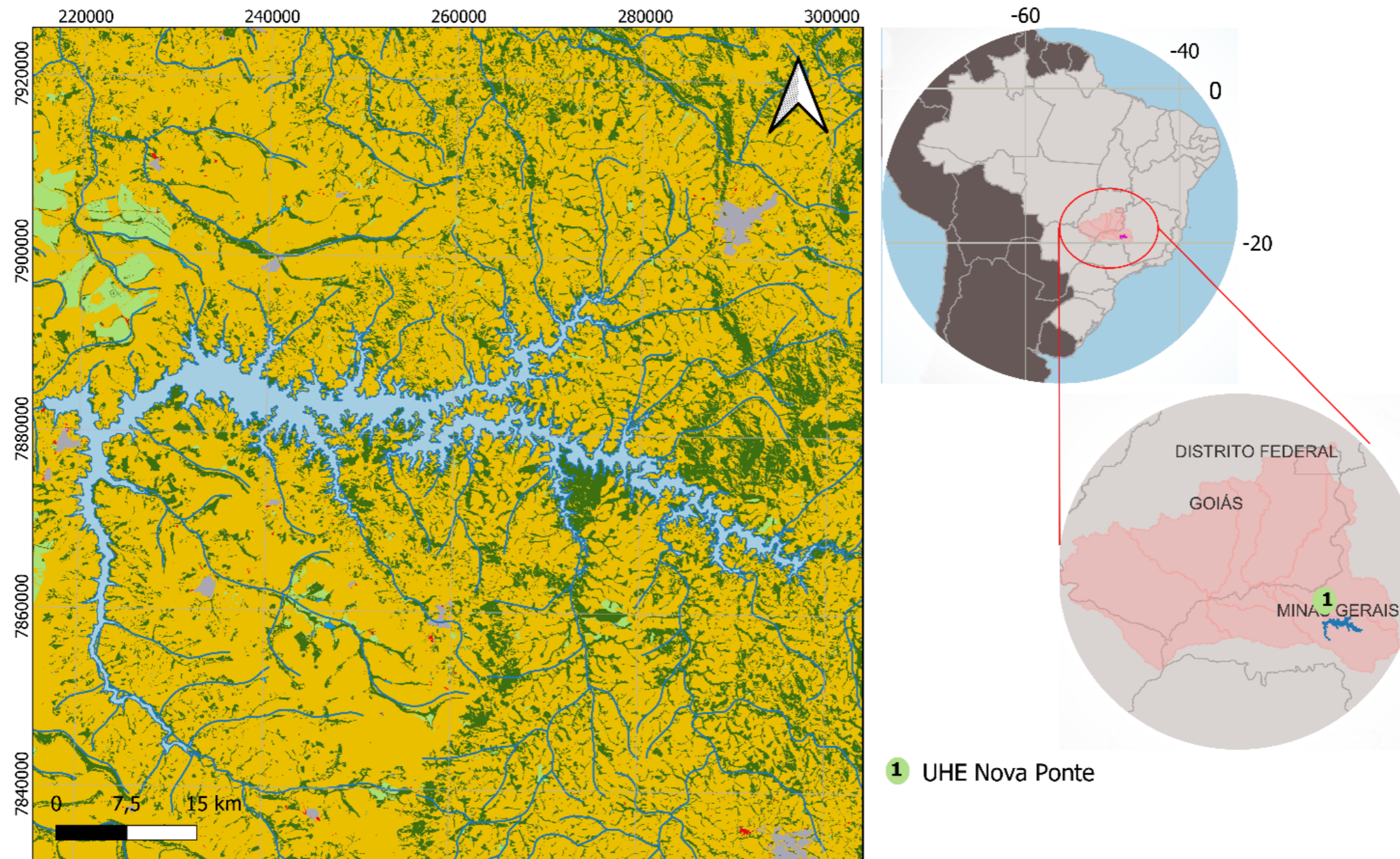
6.1.2 Reservatório da UHE de Nova Ponte

A Usina Hidrelétrica de Nova Ponte (UHE), conforme Figura 4, está situada no rio Araguari, afluente do rio Paranaíba, no município de Nova Ponte, no Triângulo Mineiro (CEMIG, 2020). De acordo com o Plano ambiental de conservação e uso do entorno do reservatório artificial – PACUERA-UHE Nova Ponte, os dados do IBGE (2020), na última leitura realizada, todos os municípios da área de influência do reservatório da UHE Nova Ponte são predominantemente urbanos, ou seja, possuem um maior número de residentes na zona urbana do que na área rural. Patrocínio, município de maior porte da área de influência do reservatório da UHE Nova Ponte, registrou 72.758 residentes na sua zona urbana, o que representa 88,22% da sua população total.

O município menos urbanizado da UHE Nova Ponte é Perdizes que, em 2010, possuía 68,97% (9.935) dos seus habitantes residindo na zona urbana do município. Ainda de acordo com o documento, no que tange o acesso de serviços públicos básicos (água, esgoto, energia e coleta de lixo), também representa um fator de vulnerabilidade dos usos a serem propostos no âmbito da área de influência do reservatório da UHE Nova Ponte, uma vez que a carência de determinados serviços, tanto no entorno quanto no município em sua totalidade, pode pressionar negativamente o reservatório ou aspectos ambientais localizados em seu entorno (BRANDT, 2020).

Ainda de acordo PACUERA-UHE Nova Ponte, aproximadamente 40% da área de estudo apresenta-se conservada com cobertura do solo por cerrado. Por sua vez, cerca de 60% da área apresenta algum tipo de uso sendo a classe de pastagem a mais representativa (27%) seguido por cultivo agrícola (24%). Os núcleos de ocupação humana abrangem menos de 2% da área estudada (BRANDT, 2020). O mapa de uso e ocupação do solo do entorno da UHE de Nova Ponte encontra-se na Figura 4 a e b.

Figura 4 (a) e (b) - Mapas de uso e ocupação do solo do entorno do reservatório da UHE de Nova Ponte



Sistemas de coordenadas: Métrico
DATUM: SIRGAS 2000
Zone: UTM 23S

Produção: Dutra, D. J.
Elaboração: Maio, 2022

Fonte dos dados:

- 1 - Limites estadual: IBGE, 2017
- 2 - Área de estudo: ANA, 2019
- 3 - Fronteira do Brasil: IBGE, 2017
- 4- Fronteira da América do Sul: ESRI, 2017
- 5- Uso do solo: MAPBIOMAS, 2020

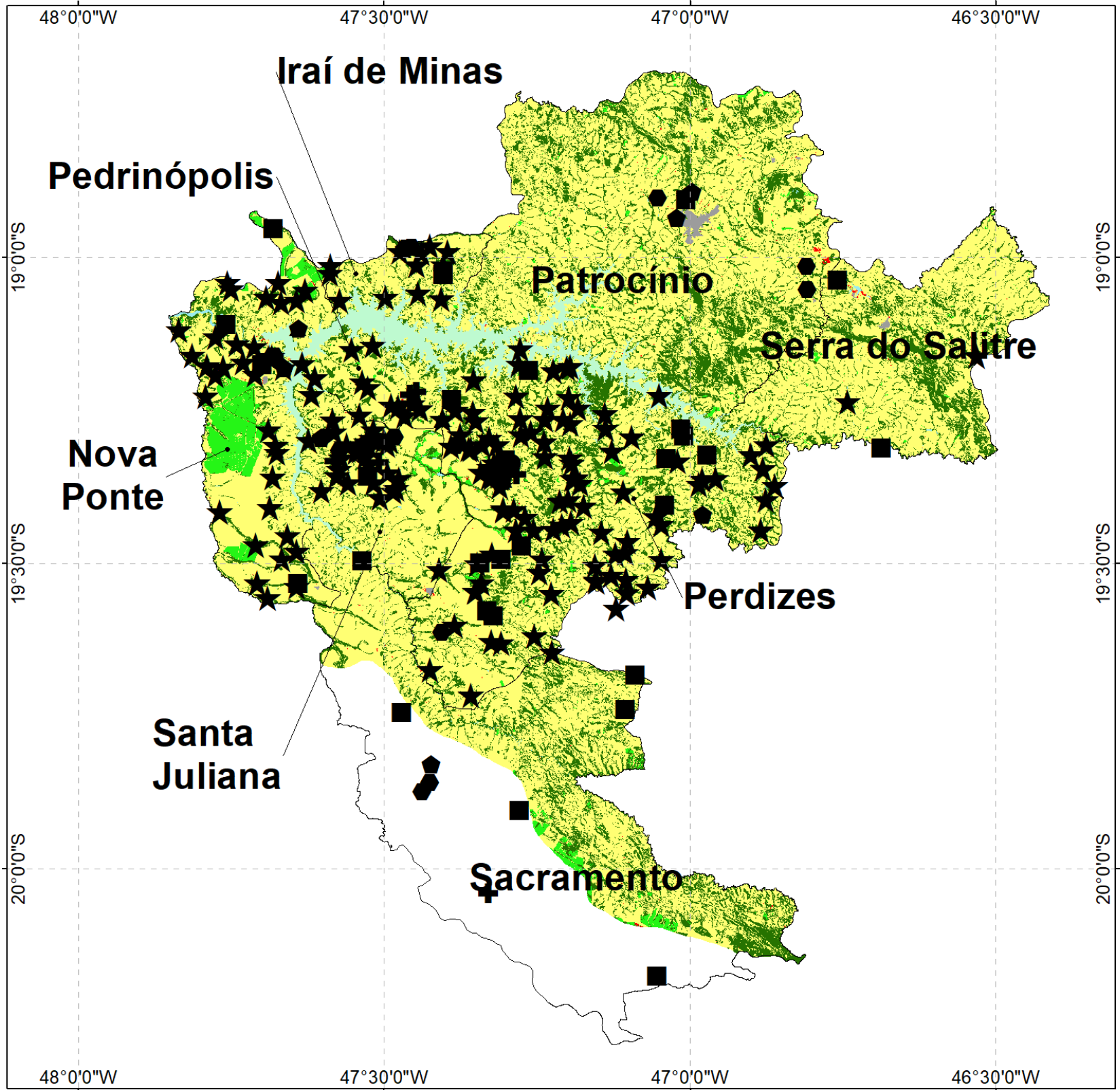
Uso do solo

- Floresta
- Floresta Plantada
- Área Urbana
- Água
- Agricultura e Pecuária
- Mineração
- Não floresta

Hidrografia


- Limite estadual
- Área de estudo
- Bacia do Rio Paranaíba
- Países da América do Sul
- Fronteira do Brasil

1 UHE Nova Ponte

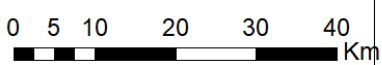


LEGENDA

<p>Empreendimentos Licenciados</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ A - Atividades Minerárias ● B - Atividades Industriais/ Metalurgia e Outras ▲ C - Atividades Industriais/ Indústria Química e Outras ◆ D - Atividades Industriais/ Indústria Alimentícia ✚ E - Atividades de Infraestrutura ⬢ F - Gerenciamento de Resíduos e Serviços ★ G - Atividades Agrossilvipastoris 	<p>Uso do Solo</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Floresta ■ Floresta Plantada ■ Área Urbana ■ Água ■ Agricultura e Pecuária ■ Não Floresta
--	--



Sistema de Coordenadas
WGS 1984 UTM Zona 23S



6.1.3 Represa Rio Manso

Os reservatórios de Rio Manso juntamente com o de Serra Azul, são os reservatórios de maior volume e com as maiores profundidades entre os sistemas de reservatórios para abastecimento urbano de Minas Gerais e têm em suas bacias atividades mistas, constituídas principalmente por pequenas propriedades de hortifrutigranjeiros e pequenos sítios (usos de fim-de-semana). Em seu entorno foram criadas áreas de proteção especial, em suas águas são proibidas quaisquer atividades náuticas esportivas ou de recreação ou o uso para a pesca. O acesso de animais, com vistas a sua dessedentação, também é proibido (VIANA, 2009).

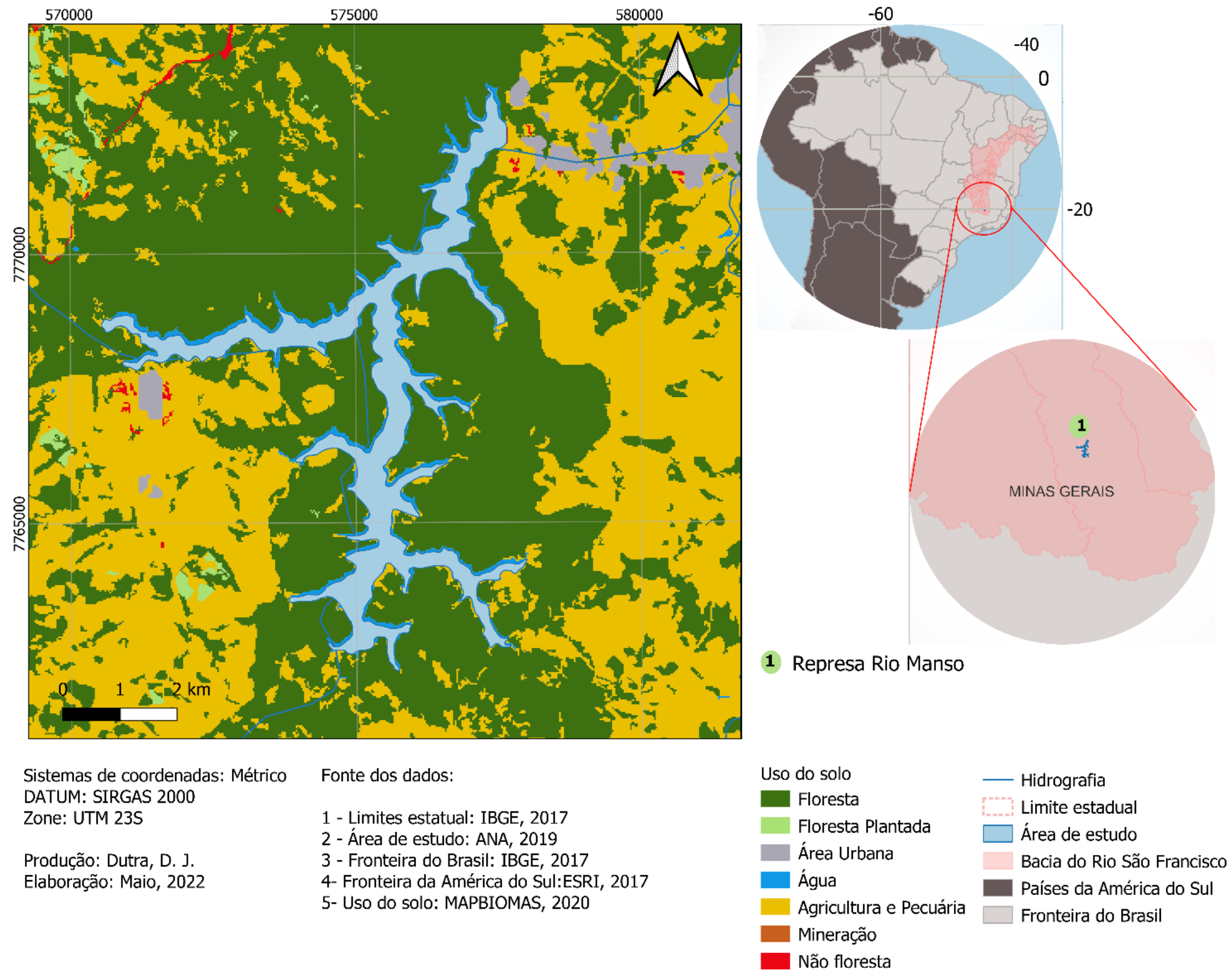
Segundo Viana, 2009, para o reservatório de Rio Manso, existe ainda a influência direta de chuvas orográficas, as quais ocorrem muito próximas do reservatório localizados a poucos quilômetros da nascente principal e tendo águas mais frias de uma forma geral por estar localizado na região do rio que a abastece.

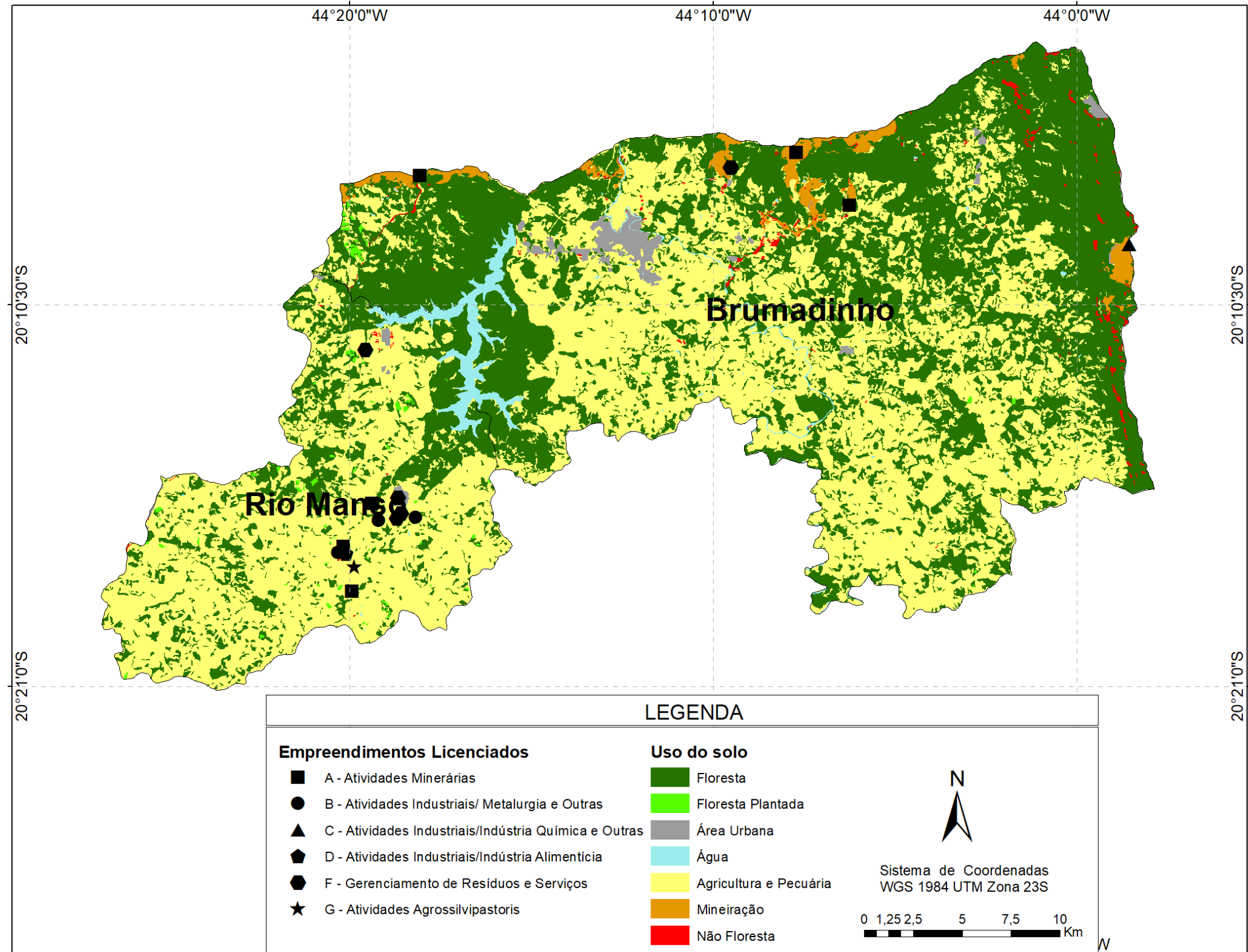
A Bacia do Rio Manso, que abrange os municípios de Rio Manso, Bonfim, Brumadinho, Crucilândia, Itatiaiuçu, conta com 67.000 ha, considerados como Área de Proteção Especial (APE6), instaurados pelo Decreto 27.928, de 15/03/88. Desses, 9.000 ha são de propriedade e responsabilidade da Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA). O represamento ocorreu na segunda metade da década de 1980, tendo sua operação sido regulamentada no início dos anos 1990 (MATOS *et al.*, 2010).

Matos e colaboradores (2017), verificaram que entre 1987 e 2016, na bacia do reservatório Rio Manso, houve uma substituição de 5.000 ha de áreas de vegetação por terrenos destinados à agricultura e à pastagem, o que corresponde a aproximadamente 7,5% da extensão total da bacia. As áreas de vegetação perderam ainda 1,4% de espaço para os usos urbanos, 0,4% para a mineração, 0,6% para o reservatório, que não havia sido construído em 1987, e 1,5% tornou-se solo exposto, totalizando uma perda de cobertura vegetal de quase 11,5%. Mais do que isso, a mineração sofreu crescimento expressivo no período, passando de 0,6% para 2,1% da área da bacia. O espraiamento urbano também merece destaque, ocupando 5% do terreno em 2016, contra os 0,8% em 1987. Apesar disso, houve um aumento percentual da classe vegetação densa (24,2% em 1987 e 36,3% em 2016),

provavelmente decorrente da compra de terrenos para a proteção do manancial, por meio da COPASA. Sobretudo, dentre as bacias analisadas foi a que apresentou maior integridade ambiental. O mapa de uso e ocupação da represa de Rio Manso encontra-se na Figura 5.

Figura 5 (a) e (b) - Mapas de uso e ocupação do solo da Represa Rio Manso





6.2 Rede Causal

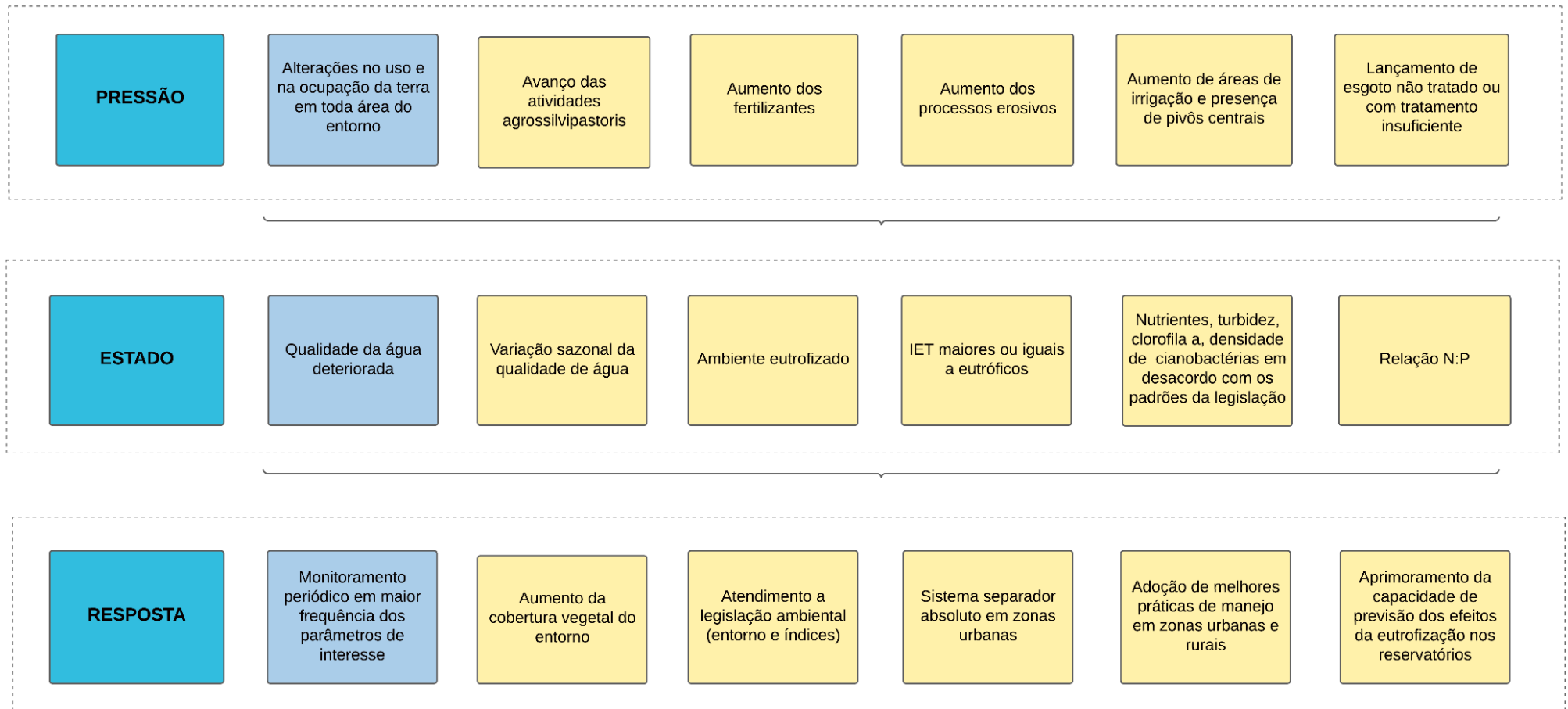
A rede causal foi elaborada considerando os principais agentes causadores e potencializadores do processo de eutrofização e suas relações na área de estudo. A Figura 6 traz o detalhamento da rede causal, elaborada no aplicativo gratuito Lucid. Foram considerados como indicadores de pressão, todos os processos que podem contribuir, ou potencializar a eutrofização; como indicadores de estado, todas as alterações detectadas e que foram causadas ou potencializadas pelas pressões e por fim, como indicadores de resposta, formas de se mitigar e ou prevenir que ocorram processos de eutrofização na área de estudo. A seleção dos indicadores está de forma mais detalhada no item 6.2.1.

6.2.1 Seleção dos indicadores

A definição dos indicadores de pressão, estado e resposta da rede causal foi feita a partir da congruência de informações disponíveis na literatura, sobre estudos de qualidade da água em reservatórios, bem como os principais fatores que contribuem para os processos de eutrofização nesses ambientes e com os dados de monitoramento da qualidade da água, disponíveis nos bancos de dados dos reservatórios selecionados. Os indicadores escolhidos para compor a rede causal estão detalhados no Quadro 6.

Como indicador de pressão, o uso e ocupação do entorno dos reservatórios foi selecionado, considerando o avanço das atividades de entorno, uma vez que podem interferir diretamente na qualidade da água dos reservatórios em geral, devido, principalmente ao aporte de nutrientes (lixiviados para o corpo d'água) e avanço das áreas desmatadas, que contribuem com o aporte de matéria orgânica (resultante dos processos erosivos) nos reservatórios.

Figura 6 - Rede causal



Quadro 6 - Indicadores selecionados para construção da rede causal

Indicadores		Detalhamento
PRESSÃO Uso e ocupação do solo	Porcentagem de área impactada na bacia ao longo do tempo	✓ Avanço das atividades agrossilvipastoris ✓ Avanço da ocupação urbana ✓ Avanço de áreas desmatadas
	Irrigação e Pivôs Centrais	✓ Utilização de fertilizantes e aumento de matéria orgânica ✓ Escoamento superficial e lixiviação
	Lançamento de esgoto não tratado ou com tratamento insuficiente nos corpos hídricos	✓ Escoamento superficial e lixiviação
	Erosão do solo	✓ Escoamento superficial e lixiviação
ESTADO Piora da qualidade da água	Variação temporal dos parâmetros da qualidade da água	✓ clorofila a, N total, N amoniacal, nitrato, nitrito, ortofosfato, pH, OD, temperatura
	Aporte de nutrientes e de matéria orgânica em excesso e assoreamento dos corpos hídricos	✓ Elevadas concentrações de clorofila a; N e P
	Correlação da clorofila a com os outros parâmetros de interesse para estudo da eutrofização	✓ N e P totais, N amoniacal, Nitrito, Nitrato); Razão Nitrogênio e Fósforo (N/P)
RESPOSTA Monitoramento periódico dos parâmetros de interesse	Melhorar o gerenciamento e manejo das fontes de impacto que causam as pressões;	✓ Aumentar da cobertura vegetal do entorno; ✓ Aprimorar ações de monitoramento, gerenciamento e fiscalização ambiental

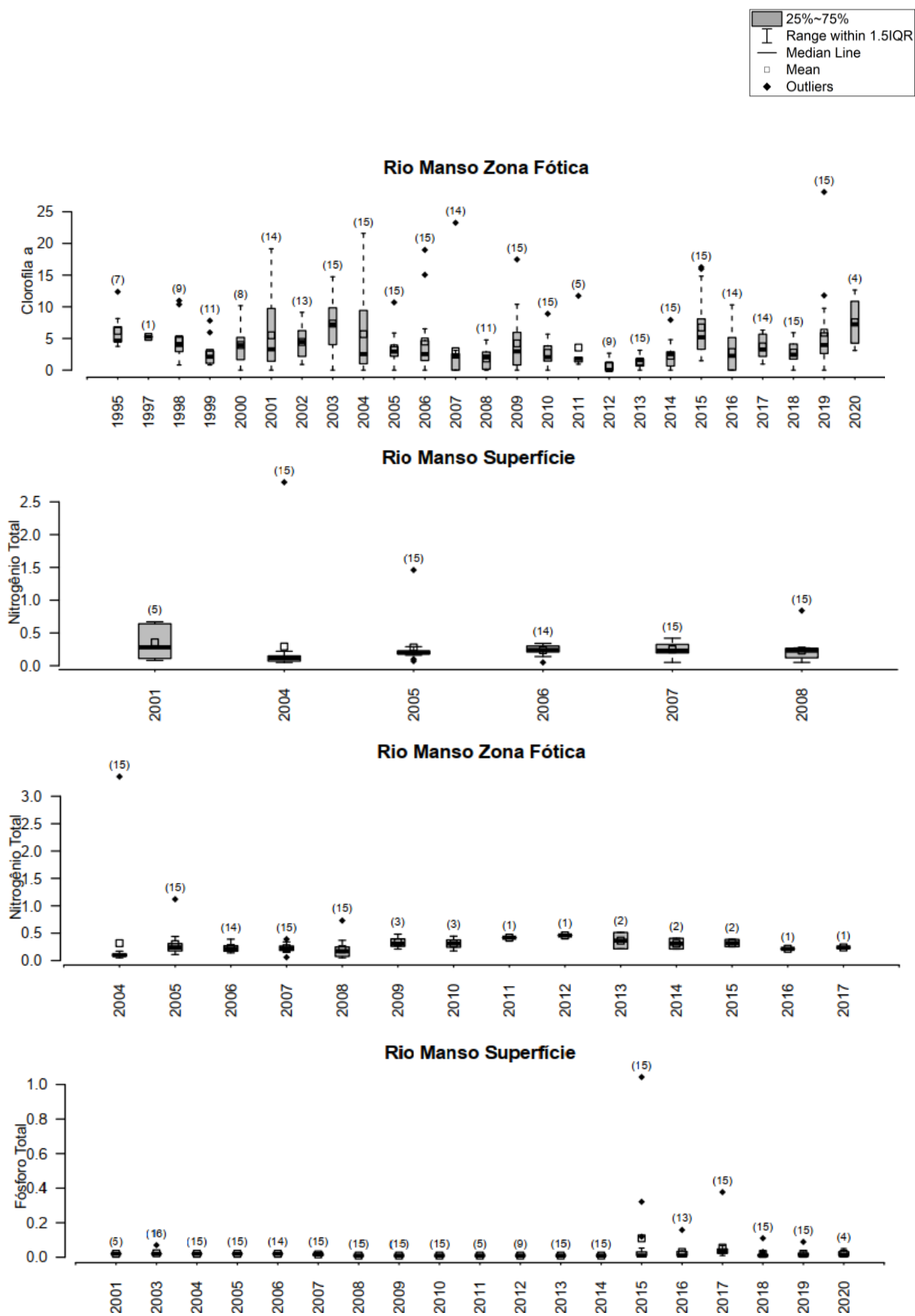
Os indicadores de estado foram selecionados, considerando os principais parâmetros e fatores que possam ser representativos dos impactos causados pelas pressões. Sendo assim para identificar o estado, utilizou-se os dados disponibilizados de monitoramento da qualidade de água dos reservatórios em estudo. As análises da estatística descritiva foram realizadas com os principais parâmetros da qualidade da água, que possuem relação com o uso e ocupação do solo nas áreas estudadas (clorofila a, N total, N amoniacal, nitrato, nitrito, ortofosfato, pH, OD, temperatura), visando identificar àqueles que violaram a legislação ao longo da série temporal.

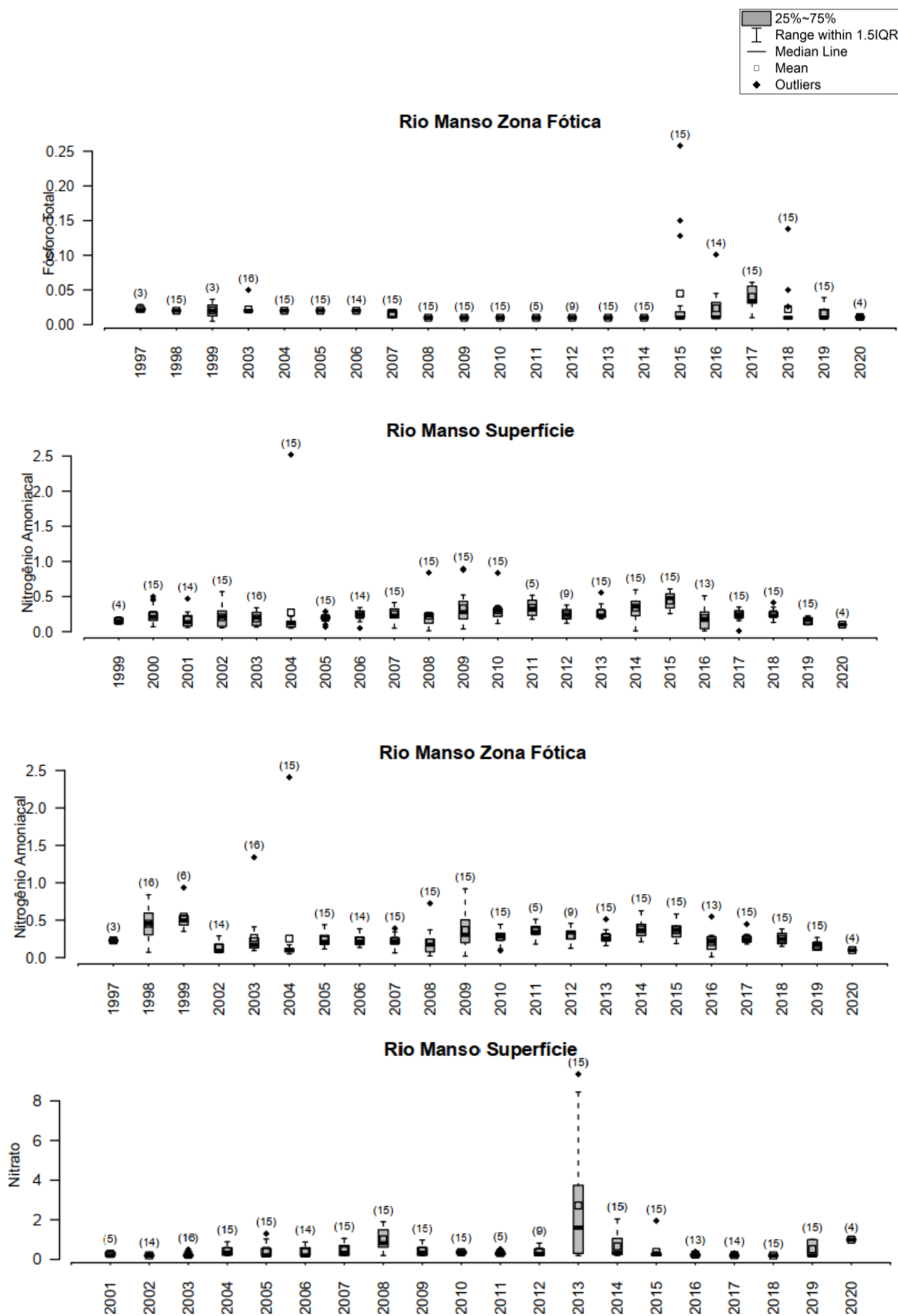
No primeiro momento, os dados foram separados em duas estações distintas: períodos de estiagem (de abril a setembro) e chuvoso (de outubro a março). No entanto, o número de dados reduziu significativamente, uma vez que a frequência de amostragem era trimestral (Nova Ponte e Emborcação) e semestral (Rio Manso), sendo assim, o tratamento dos dados foi avaliado de acordo com o período total de amostragem.

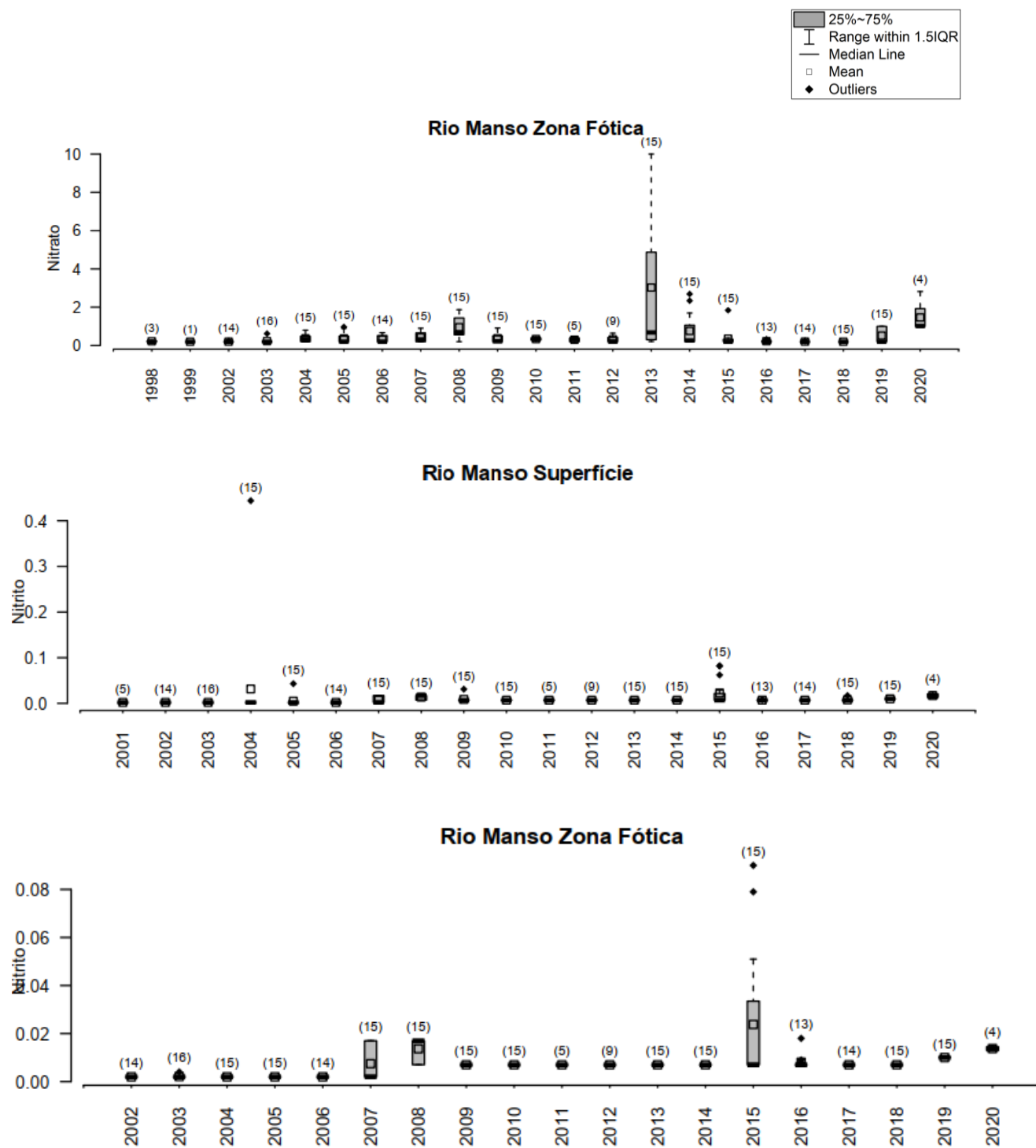
6.2.2 Análise estatística do monitoramento da qualidade da água

A análise estatística dos dados de monitoramento da qualidade da água dos reservatórios estudados compreendeu uma análise prévia dos dados faltantes e dos outliers, de acordo com a metodologia da Amplitude Interquartis (AIQ), seguida de uma análise crítica para avaliar cada caso.

É importante salientar que se tratando de dados ambientais, a exclusão de outliers sem uma análise crítica, pode levar à exclusão de dados verdadeiros e isso ocorre devido a uma das características desse tipo de dados, que podem apresentar valores que podem ser facilmente confundidos com outliers, quando na verdade, são dados reais, se avaliados no contexto daquele ambiente. (CHAPMAN et al., 1996; OLIVEIRA, 2021). Os gráficos de série temporal dos parâmetros separados por zona e por reservatório estão na Figura 7.

Figura 7 - Gráficos *box whisker* série temporal - Represa Rio Manso





6.2.2.1 Qualidade da água da Represa Rio Manso

No reservatório de Rio Manso, o parâmetro clorofila a, foi medido apenas nas estações E1 a E4, na profundidade de Secchi (aqui padronizado como zona fótica). Cabe ressaltar aqui que na estação E8 (Secchi/zona fótica), poucas observações para este parâmetro foram encontradas no banco de dados (n=5), portanto, não foram considerados para este estudo.

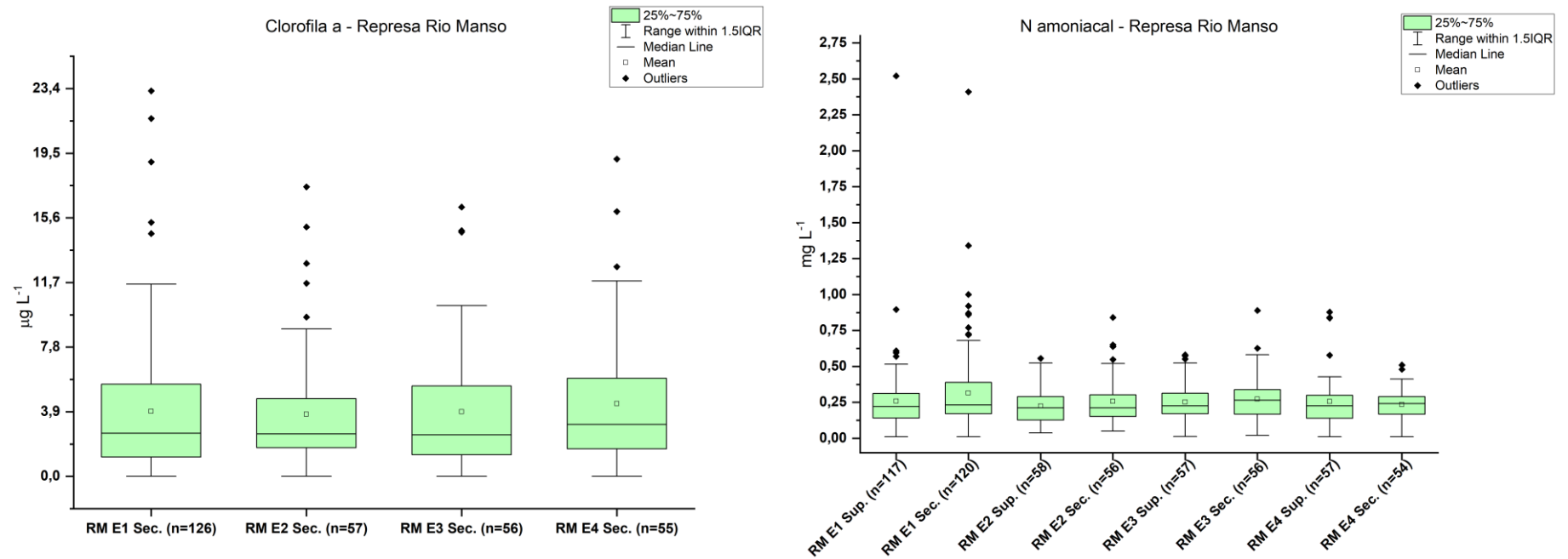
Os demais parâmetros (pH, OD, turbidez, clorofila a, fósforo total, nitrogênio total, nitrogênio amoniacal, nitrato e nitrito) possuíam observações nas estações E1 a E4, tanto nas profundidades de Secchi (Zona Fótica) e quanto na superfície. Com relação às outras estações (E5 a E10), as profundidades não foram informadas, portanto, não foram avaliadas neste estudo.

O parâmetro clorofila a apresentou alguns valores atípicos que possivelmente se tratam de outliers, conforme os gráficos de série temporal e o *box whisker* (Figura 7 e Figura 8). Por exemplo, na estação E2, foi observado apenas uma medição igual a 5.860.802 $\mu\text{g L}^{-1}$, na data de 15/02/2017. Na estação E3, foram observados, respectivamente, nas datas 31/07/2000 e 19/03/2003, os valores de medições iguais a 3175,13 e 3707,5 $\mu\text{g L}^{-1}$ e por fim, na estação E4, foi observado um valor de 3384,51 $\mu\text{g L}^{-1}$, na data de 31/07/2000.

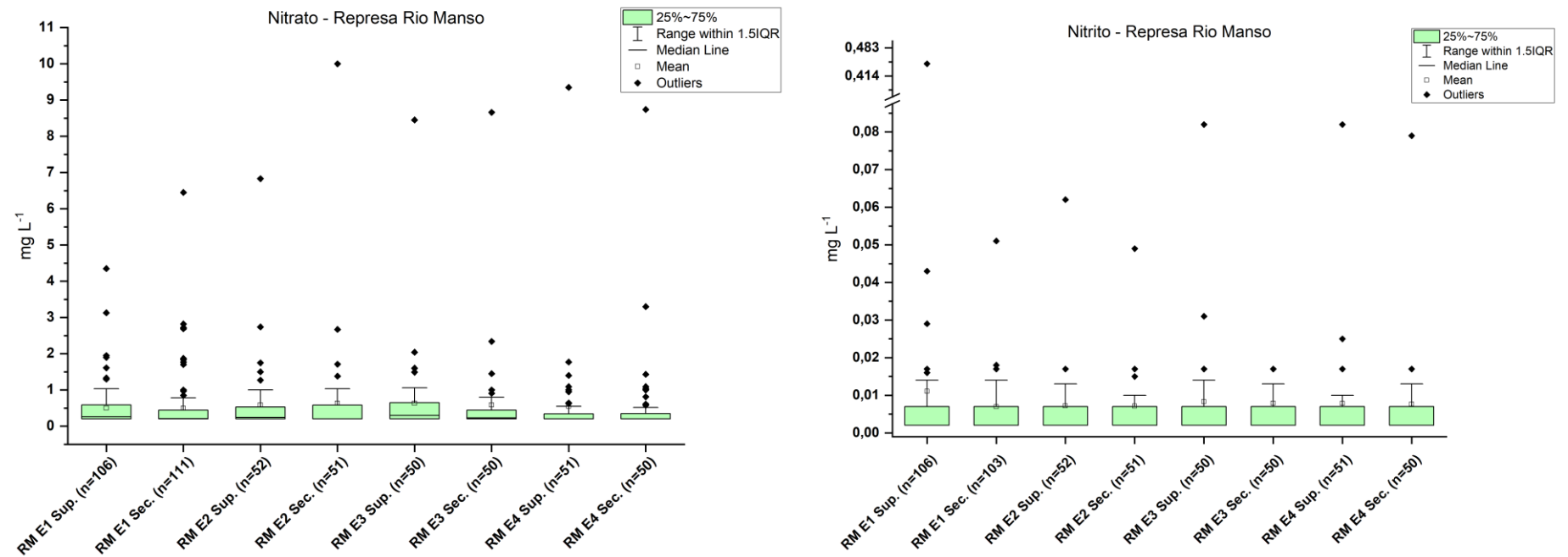
Portanto, para o reservatório de Rio Manso, optou-se por excluir todos as observações para o parâmetro clorofila a, que foram superiores a 1000 $\mu\text{g L}^{-1}$, pois de acordo com a análise crítica de outliers, se tratam de medidas isoladas e além disso, também não foram registrados nenhum outro valor atípico para os outros parâmetros, no mesmo período. Vale ressaltar que a mediana da clorofila a nas estações E1, E2, E3 e E4, foram, respectivamente 2,59; 2,64; 2,62 e 3,27 $\mu\text{g L}^{-1}$.

De acordo com a Deliberação Normativa DN COPAM MG 001/2008, para o parâmetro clorofila a, o limite pré-estabelecido é até 30 $\mu\text{g L}^{-1}$, para classe II, sendo assim, para a represa de Rio Manso, as medianas das estações E1 a E4 na profundidade de zona fótica, estão dentro do padrão estabelecido pela legislação.

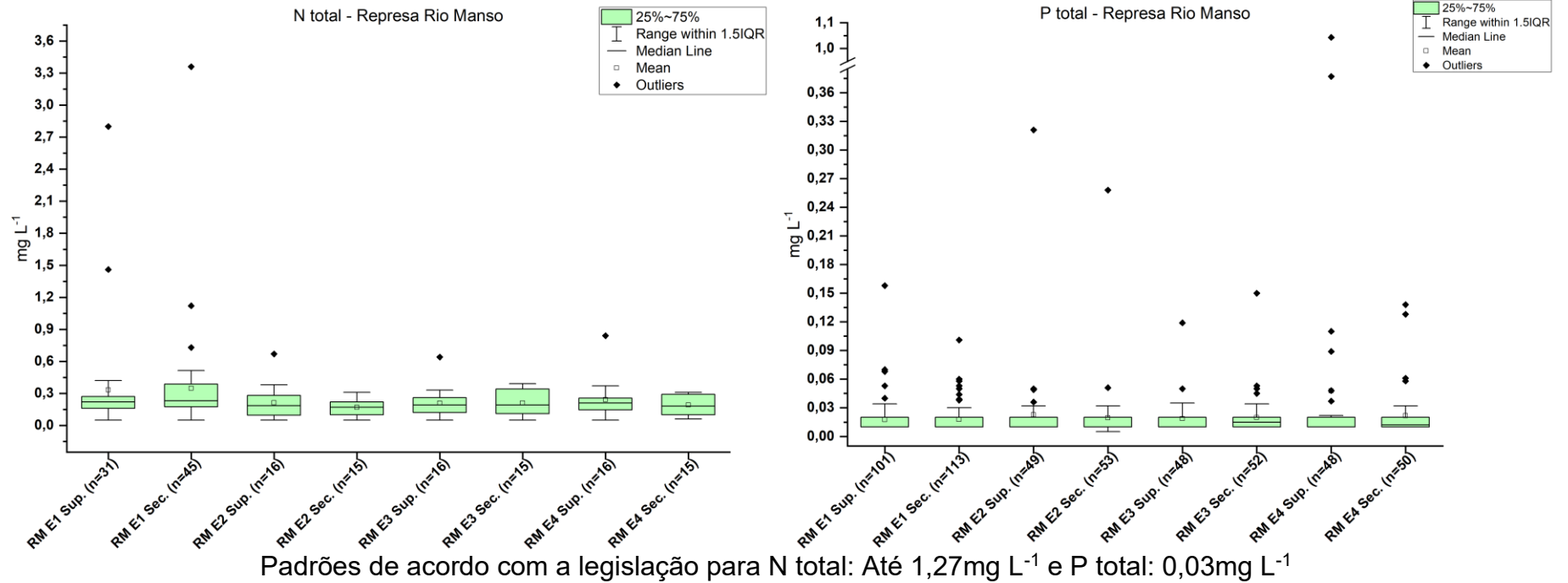
Figura 8 - Gráficos *Box whisker* por estação - Represa Rio Manso

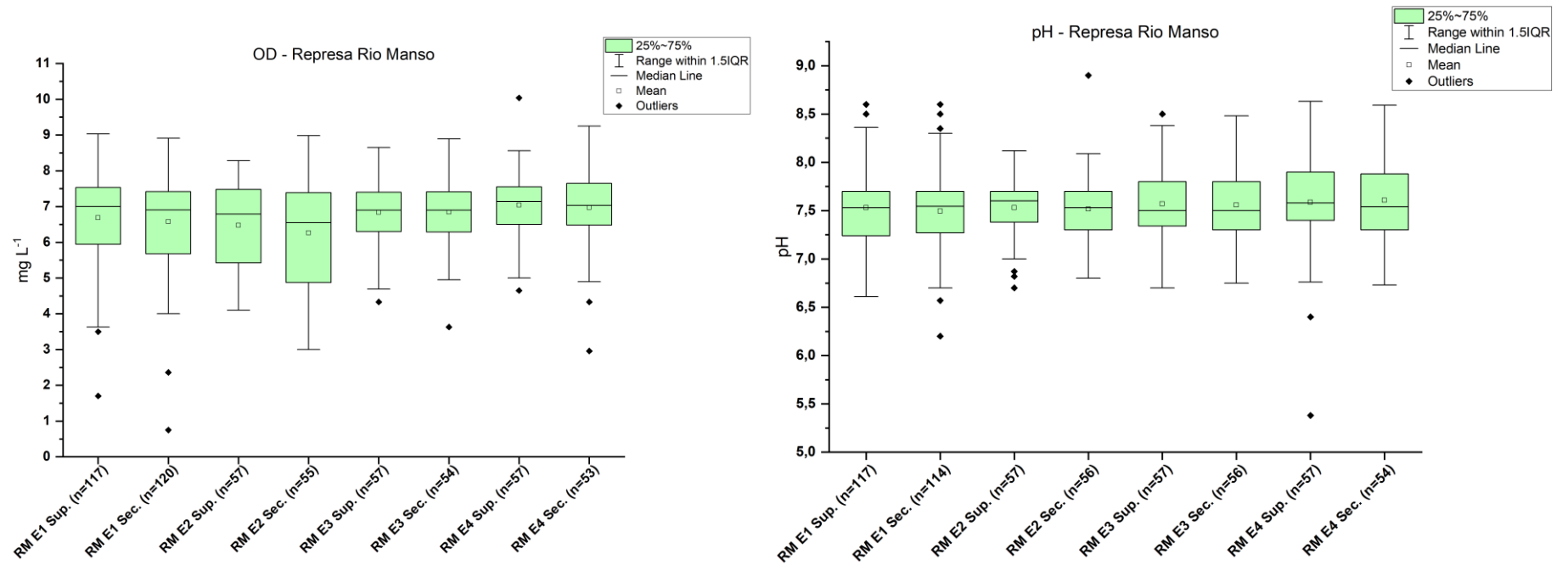


Padrões de acordo com a legislação: Clorofila a: até 30µg L⁻¹, N amoniacal para pH≤7,5: 3,7mg L⁻¹ e para 7,5≤pH≤8,0: 2,0mg L⁻¹

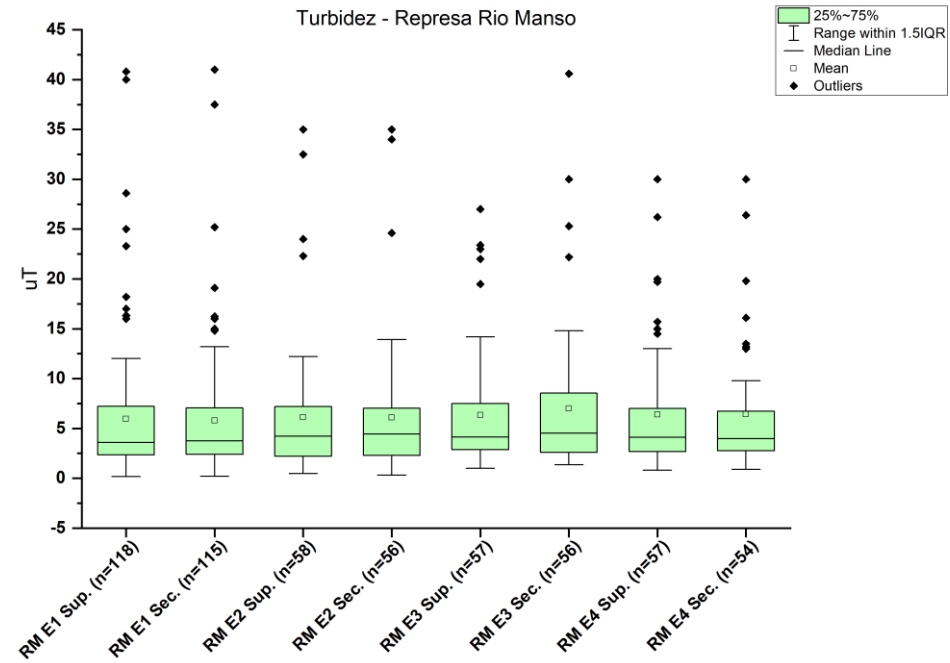


Padrões de acordo com a legislação para Nitrato: Até 10mg L⁻¹ e Nitrito: até 1mg L⁻¹





Padrões de acordo com a legislação para OD: não inferior a 5mg L⁻¹ e pH de 6 a 9



Padrões de acordo com a legislação para Turbidez: até 100NTUs

Os dados de fósforo total não apresentaram variações, para todas as estações, até o ano de 2014. A partir deste ano, foram observados na data de 21/10/2015, os seguintes valores: 1,04 e 0,26 mg L⁻¹, respectivamente, nas estações E4 (Superfície) e E2 (Zona fótica). As medianas para este parâmetro, para todas as estações, nas profundidades de superfície e zona fótica igual a 0,01 mg.L⁻¹. Para ambientes lênticos o limite estabelecido na legislação é até 0,03 mg L⁻¹; e não foram observados valores de mediana que violassem o limite da legislação para este parâmetro.

Vale ressaltar que no mesmo ano de 2015, também se observou um aumento nas concentrações de nitrito na zona fótica em todas as estações, com valores maiores que 0,02 mg L⁻¹. Por exemplo nas estações E1 0,051 mg L⁻¹ em 22/12, E2 0,049 mg L⁻¹, E3 0,09 mg L⁻¹ e E4 0,079 sendo essas três últimas todas na data de 21/10. No entanto, as medianas desse parâmetro foram iguais a 0,007 mg L⁻¹ para todas as estações em ambas profundidades.

Já para o parâmetro nitrato, as maiores observações foram registradas no ano de 2013, também em outubro (21 e 22/10), assim como para os parâmetros P total e nitrito, porém nos anos de 2015 tanto na Zona Fótica quanto na superfície. Por exemplo: no dia 21/10, na superfície foram observados os seguintes valores (em mg L⁻¹), 4,35 (E1), 6,83 (E2) e no dia 22/10 8,45 (E3) e 9,35 (E4), sendo que as medianas para essas estações foram, respectivamente 0,26, 0,24, 0,29, 0,20 mg L⁻¹. Já na zona fótica, para as mesmas datas, as maiores observações foram (em mg L⁻¹): 6,45 (E1), 10,00 (E2) e 8,66 (E3) e 8,74 (E4), com as respectivas medianas: 0,21, 0,20, 0,23 e 0,20 mg L⁻¹. Os gráficos das séries temporais da represa de Rio Manso estão na Figura 7.

Os demais parâmetros (pH, OD, Turbidez) se mantiveram dentro dos padrões estabelecidos pela legislação. Os gráficos *box whisker* para esses parâmetros estão na Figura 8.

Cabe ressaltar aqui que desde 1988 a bacia do Rio Manso, conta com 67.000ha como Áreas de Proteção Especial (APE). As APEs têm como objetivo a preservação de áreas de interesse especial, como as de proteção aos mananciais. De acordo com o decreto 27.928 de 15/03/88, dos 67000ha, 9000ha são de posse e responsabilidade da Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA). (MATOS *et al.*, 2010).

Essa característica possivelmente contribuiu para que os valores dos parâmetros estudados, estivessem dentro dos limites estabelecidos pela legislação. Contudo, vale destacar que embora o reservatório esteja em área protegida, o aumento de valores de P total, N total, podem alertar sobre o uso e ocupação do entorno, onde o avanço da urbanização, atividades agrossilvipastoris podem indicar fontes em potencial de aporte de nutrientes para o corpo d'água. Vale destacar também que a mineração é uma atividade de destaque na área de entorno, contribuindo para o aporte de matéria em suspensão (inorgânica), o que pode contribuir indiretamente, para a piora da qualidade da água.

6.2.2.2 Qualidade da água do Reservatório UHE Nova Ponte

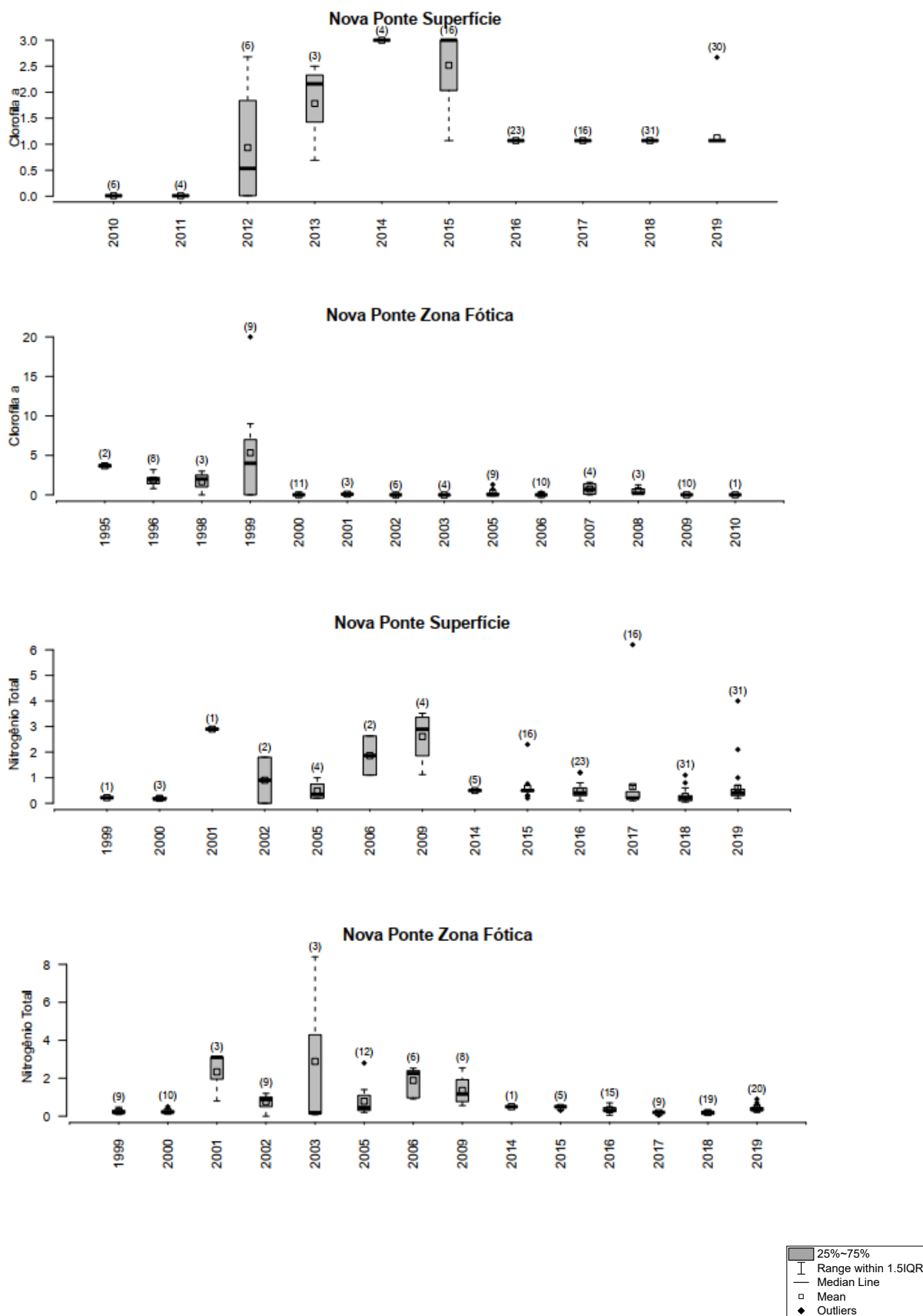
No reservatório da UHE de Nova Ponte, ainda com relação a clorofila a, não houveram registros de observações para este parâmetro nas estações NP120 e NP130 (meio zona fótica, aqui padronizada apenas como zona fótica), e NP190 (Superfície).

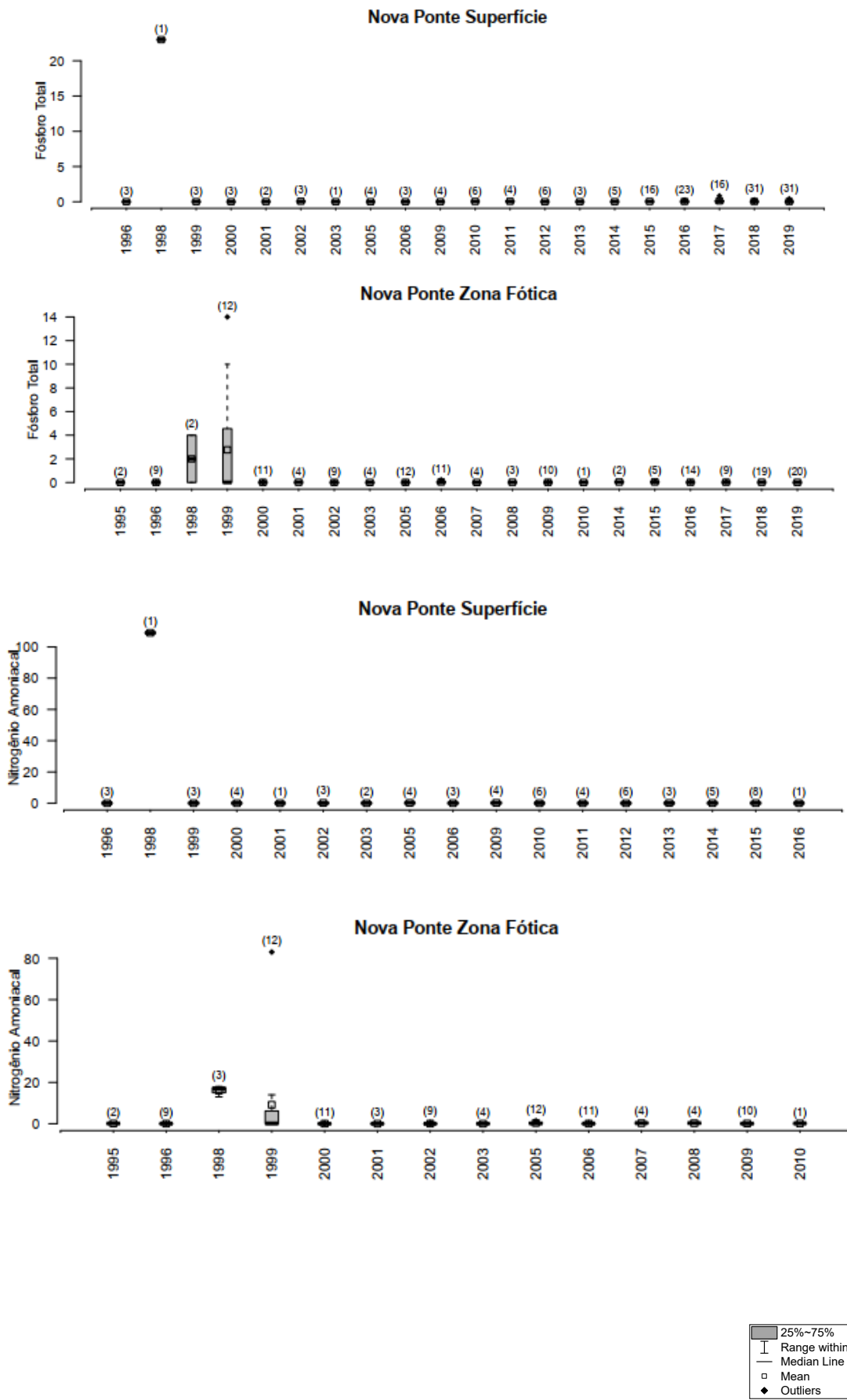
Foram excluídos os dados cuja a profundidade de coleta não foram informadas (dados faltantes). Também foram excluídos dos bancos de dados, todas as observações para o parâmetro pH, que foram maiores ou iguais a 15.

As medianas de clorofila a para todas as estações do reservatório de Nova Ponte, ficaram também dentro do limite previsto na legislação, ou seja, até $30 \mu\text{g L}^{-1}$. Os valores de medianas foram iguais a $3,0 \mu\text{g L}^{-1}$ na estação NP100 (superfície); $1,07 \mu\text{g L}^{-1}$ na superfície das estações NP110, NP120, NP130, NP140, NP160, NP170, NP180 e NP190 e $0,01 \mu\text{g L}^{-1}$ na zona fótica das estações NP140, NP170 e NP180.

Vale ressaltar que houve picos registrados na estação NP170 (UHE Nova Ponte), na profundidade de meio zona fótica, entre os anos de 1999 e 2000, com valores em torno de $20 \mu\text{g L}^{-1}$ de clorofila a (Figura 9 e Figura 10) sendo que para esta mesma estação nos períodos de 1994 a 1998 e 2001 a 2019, os maiores valores registrados foram menores que $5,0 \mu\text{g L}^{-1}$.

Figura 9 - Gráficos *box whisker* série temporal - Reservatório da UHE Nova Ponte





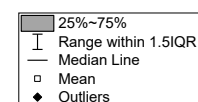
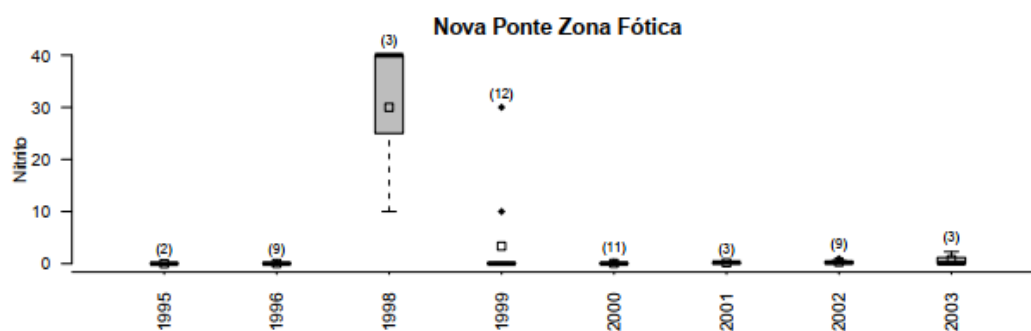
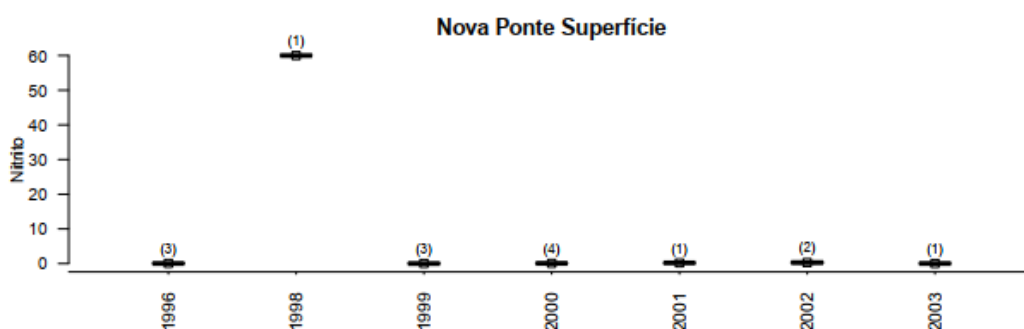
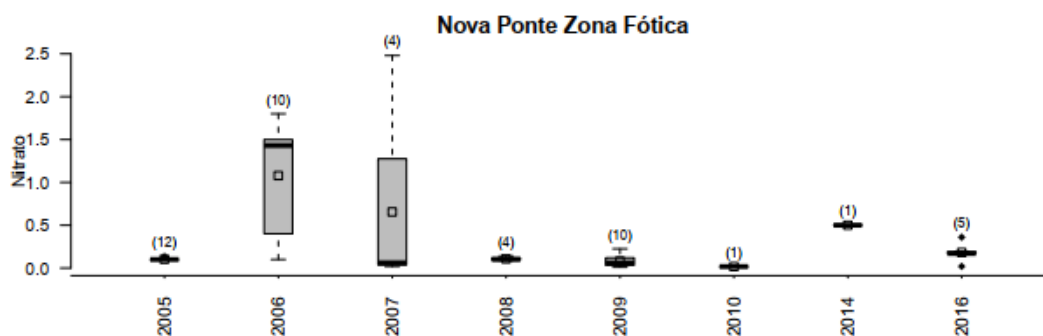
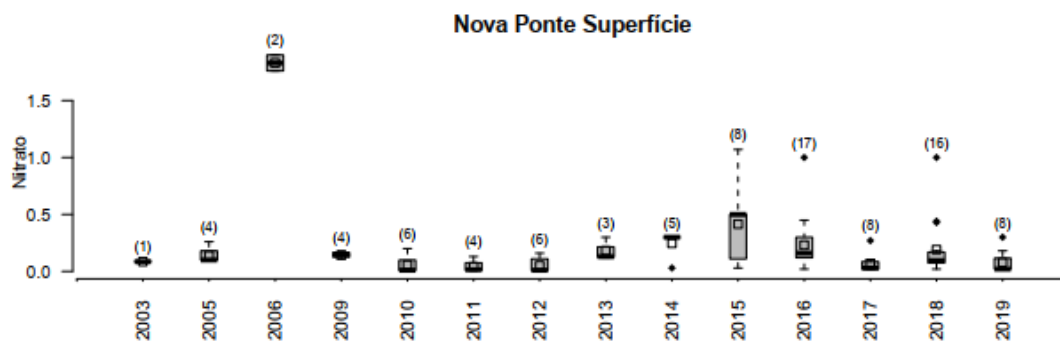
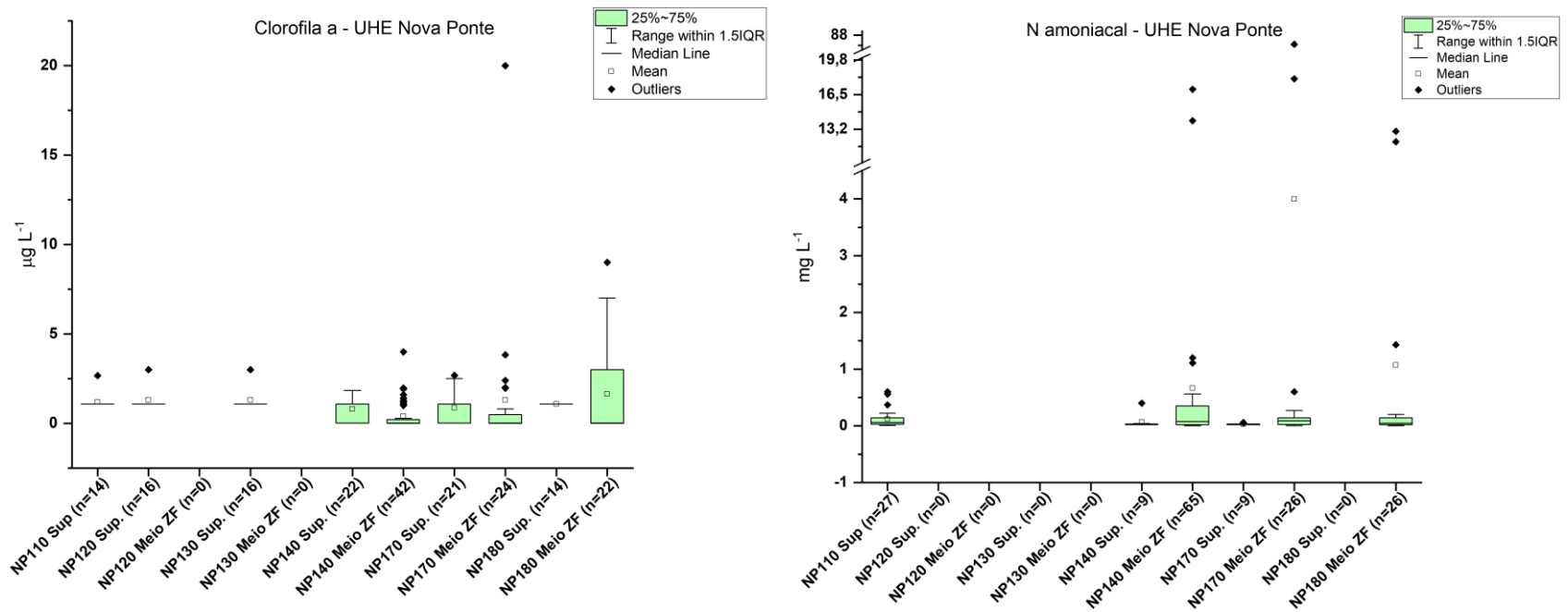
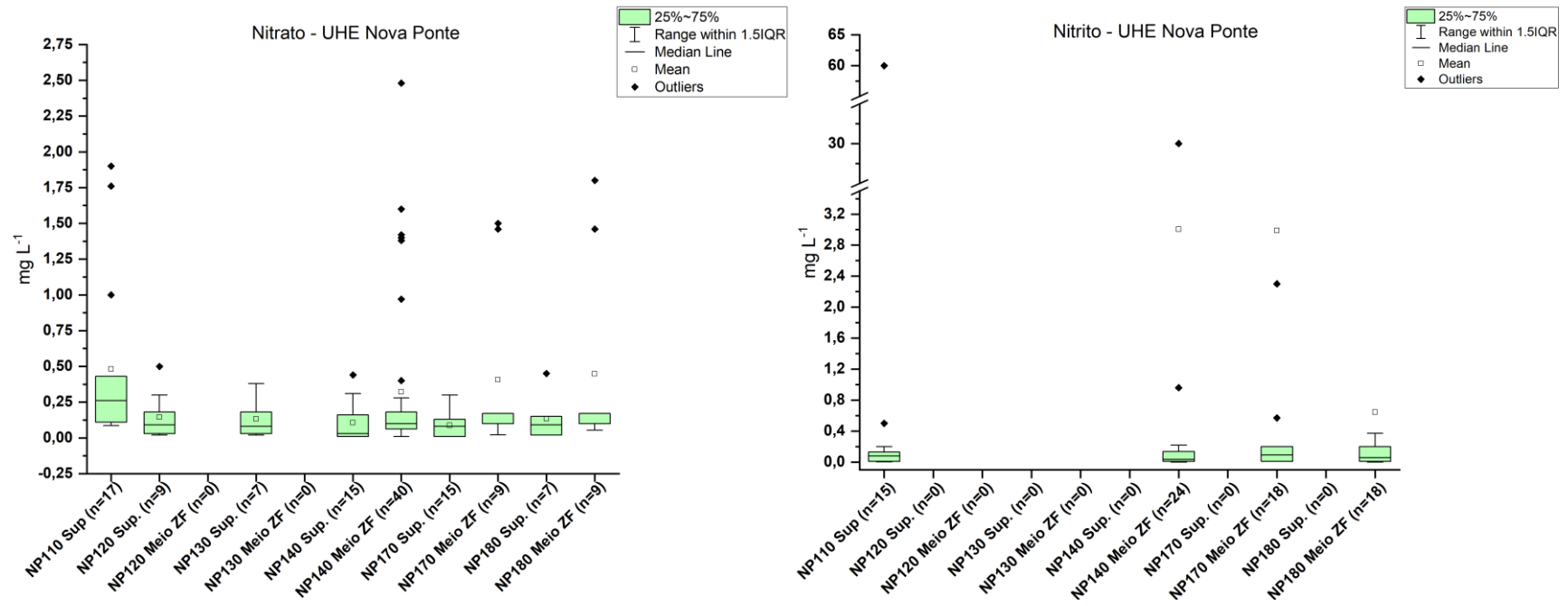


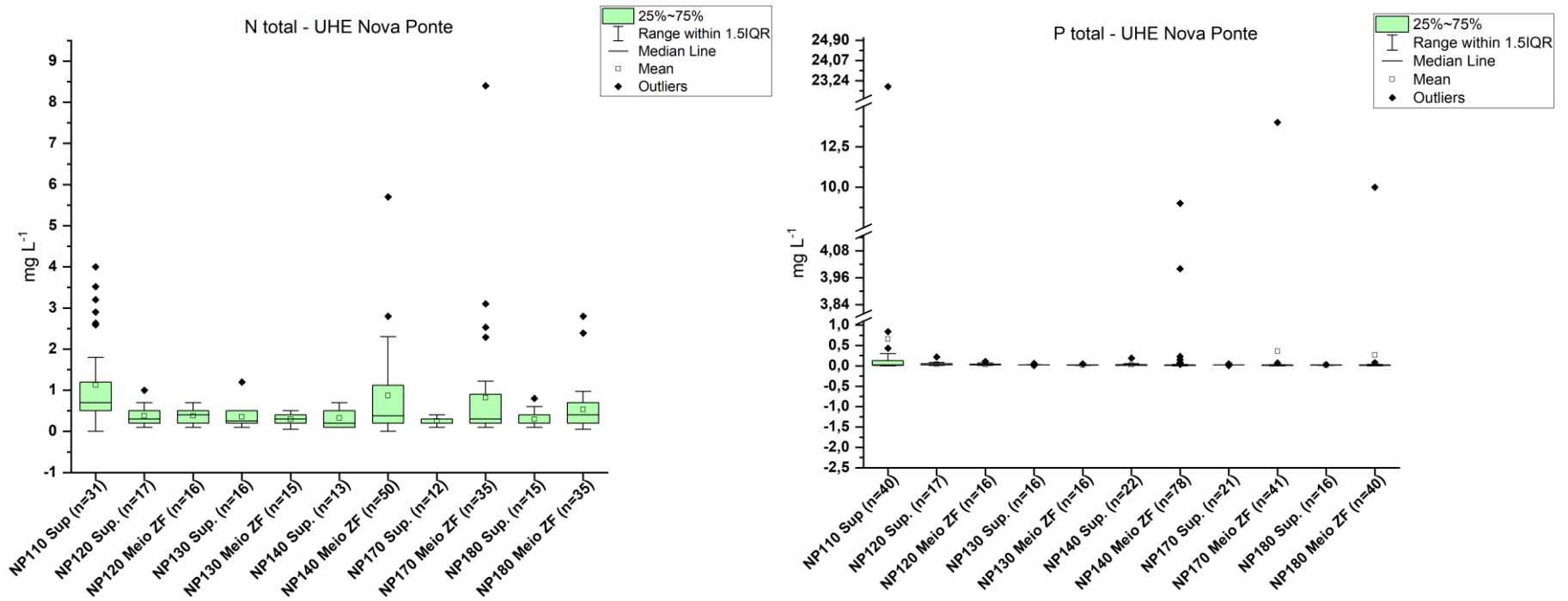
Figura 10 - Gráficos *Box whisker* por estação – Reservatório da UHE Nova Ponte



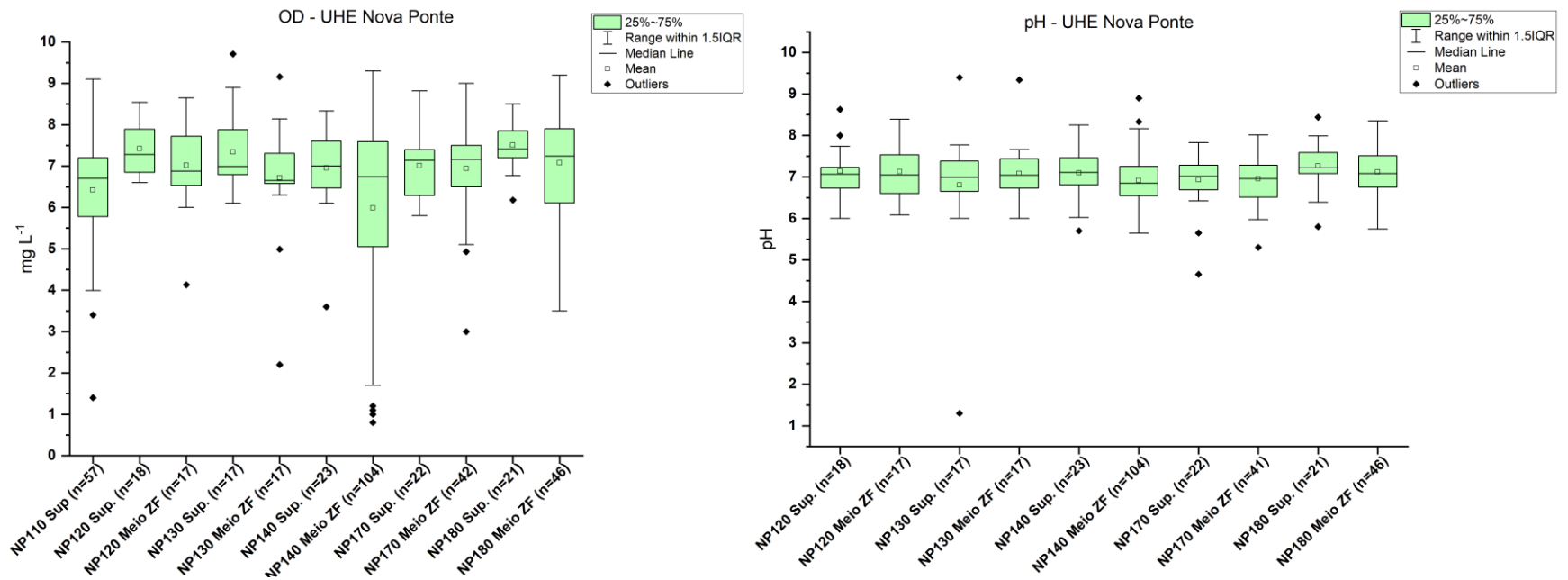
Padrões de acordo com a legislação para Clorofila a: até 30µg L⁻¹ e N amoniacal para pH≤7,5: 3,7mg L⁻¹ e para 7,5≤pH≤8,0: 2,0mg L⁻¹



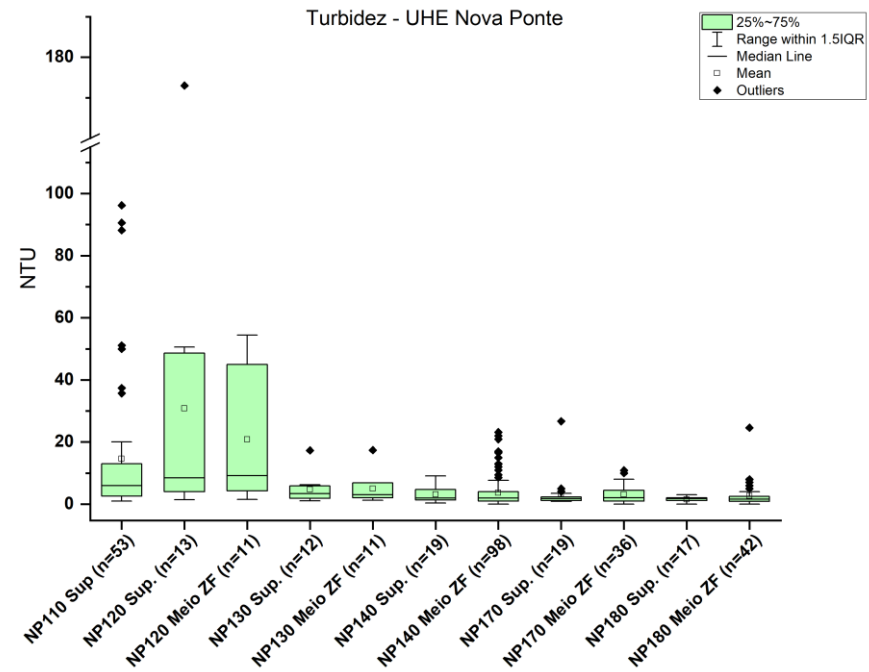
Padrões de acordo com a legislação para Nitrato: Até 10mg L⁻¹ e Nitrito: até 1mg L⁻¹



Padrões de acordo com a legislação para N total: Até 1,27mg L⁻¹ e P total: 0,03mg L⁻¹



Padrões de acordo com a legislação para OD: não inferior a 5mg L⁻¹ e pH de 6 a 9



Padrões de acordo com a legislação para Turbidez: até 100NTUs

Nesta mesma época, para a mesma estação, também foram observados valores maiores que 75 mg L^{-1} de N amoniacal (Figura 9 e Figura 10) e 14 mg L^{-1} , de P total (Figura 9 e Figura 10), quando para os demais anos do período amostrado, os valores foram inferiores a 2 mg L^{-1} .

Vale ressaltar que os fertilizantes são compostos nitrogenados e o aumento desse parâmetro, pode indicar uma possível correlação com o uso e ocupação do solo na área, onde grande parte é destinada a agropecuária e com forte presença de pivôs centrais utilizados na irrigação.

6.2.2.3 Qualidade da água do Reservatório UHE Emborcação

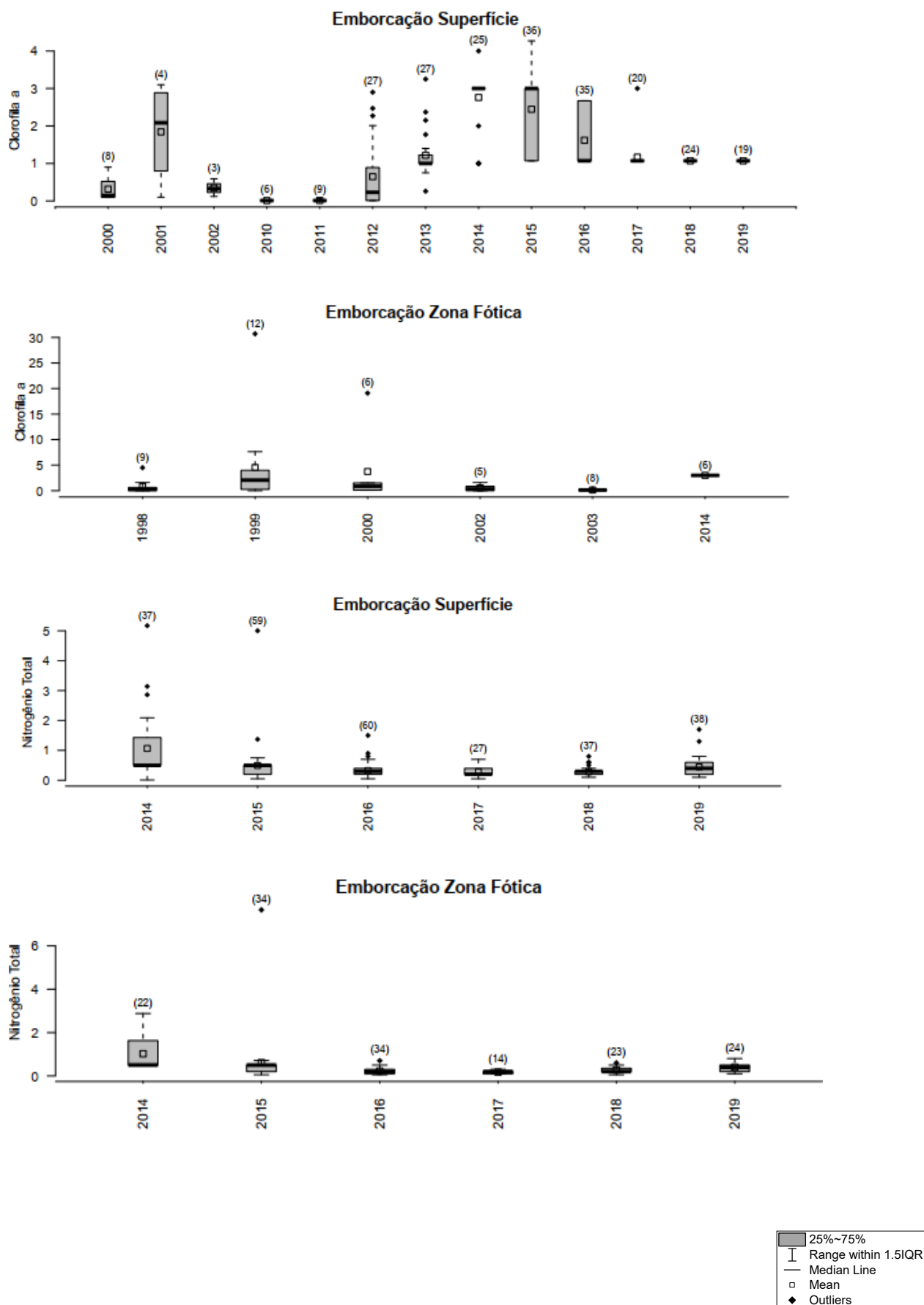
No reservatório de Emborcação também não houve observações para o parâmetro clorofila a, na estação EM140 (meio Zona fótica, aqui também padronizado apenas como Zona Fótica) e poucas observações foram registradas para este parâmetro nas estações EM10 (Superfície) (n=2), EM100 (n=1) e EM160 (Zona fótica) (n=1).

Os valores de medianas para clorofila não foram superiores a $3,0 \mu\text{g L}^{-1}$, logo, também ficaram dentro do que preconiza a legislação. Mas vale ressaltar que na estação EM150 (zona fótica), houve uma observação de $30 \mu\text{g L}^{-1}$ na data de 18/11/99 e $19,1 \mu\text{g L}^{-1}$ na data de 20/11/00. Os gráficos de série temporal e *box whisker* estão nas Figura 11 e Figura 12.

Nesta mesma data também houve uma observação para o parâmetro P total igual a $1,4 \text{ mg L}^{-1}$ para a estação EM170 (zona fótica) e $1,2 \text{ mg L}^{-1}$ para a estação EM150, contudo, nenhuma mediana violou os limites pré estabelecidos para este parâmetro na legislação (até $0,03 \text{ mg L}^{-1}$, para ambientes lênticos).

Os valores de medianas observadas para P total foram: $0,02 \text{ mg L}^{-1}$ para as estações EM100, EM110, EM140, EM150, EM160, EM170 (superfície e zona fótica), EM190 (superfície); $0,03 \text{ mg L}^{-1}$ para EM40, EM70 (superfície) e $0,04 \text{ mg L}^{-1}$ (EM40). Vale destacar que as estações EM10, 40, 70 e 190 são lóticicas e possuem um padrão diferente para limites de P total ($0,1 \text{ mg L}^{-1}$), mas mesmo assim não violaram os padrões estabelecidos pela legislação.

Figura 11 - Gráficos *box whisker* Série temporal – Reservatório da UHE Emborcação



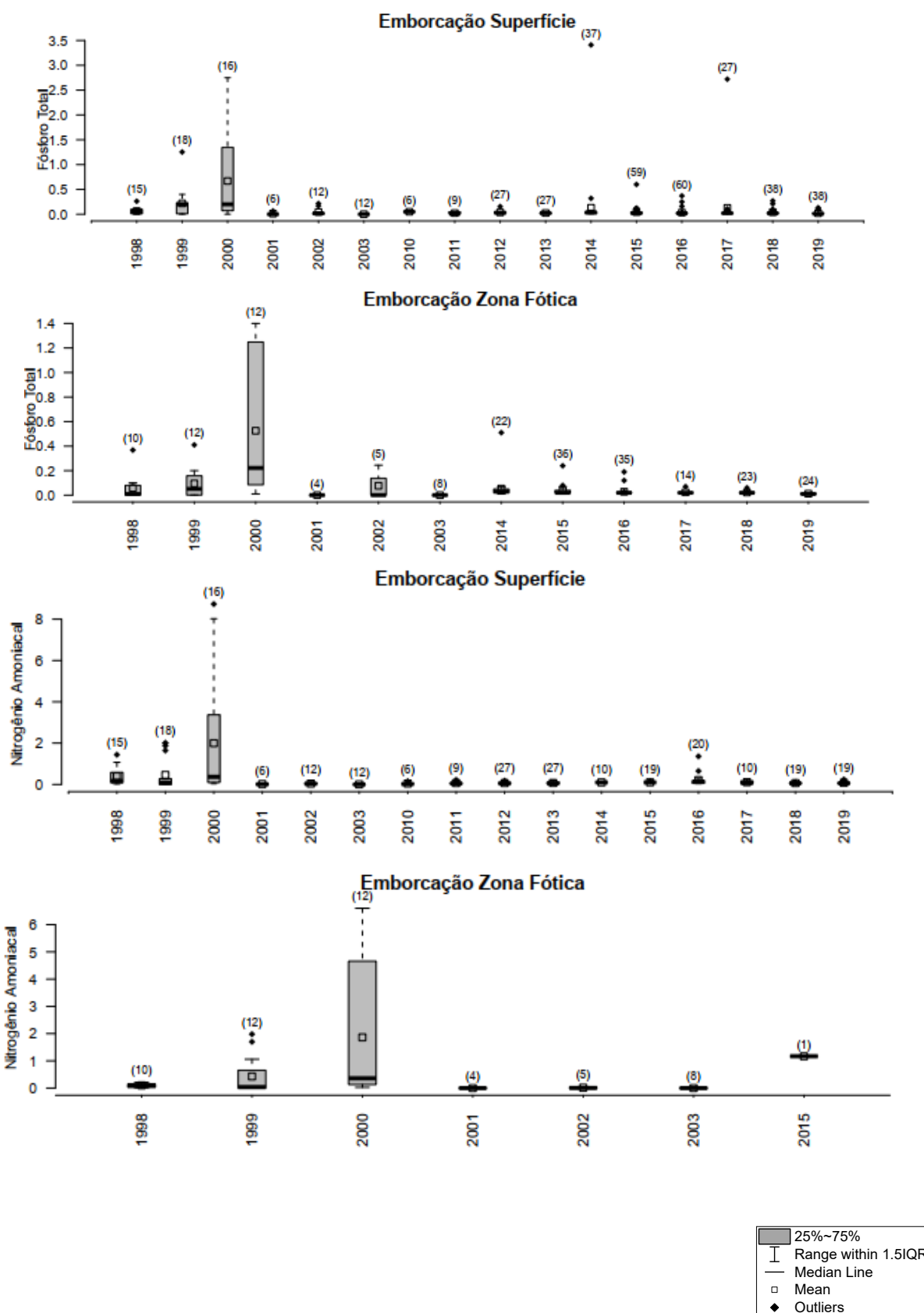
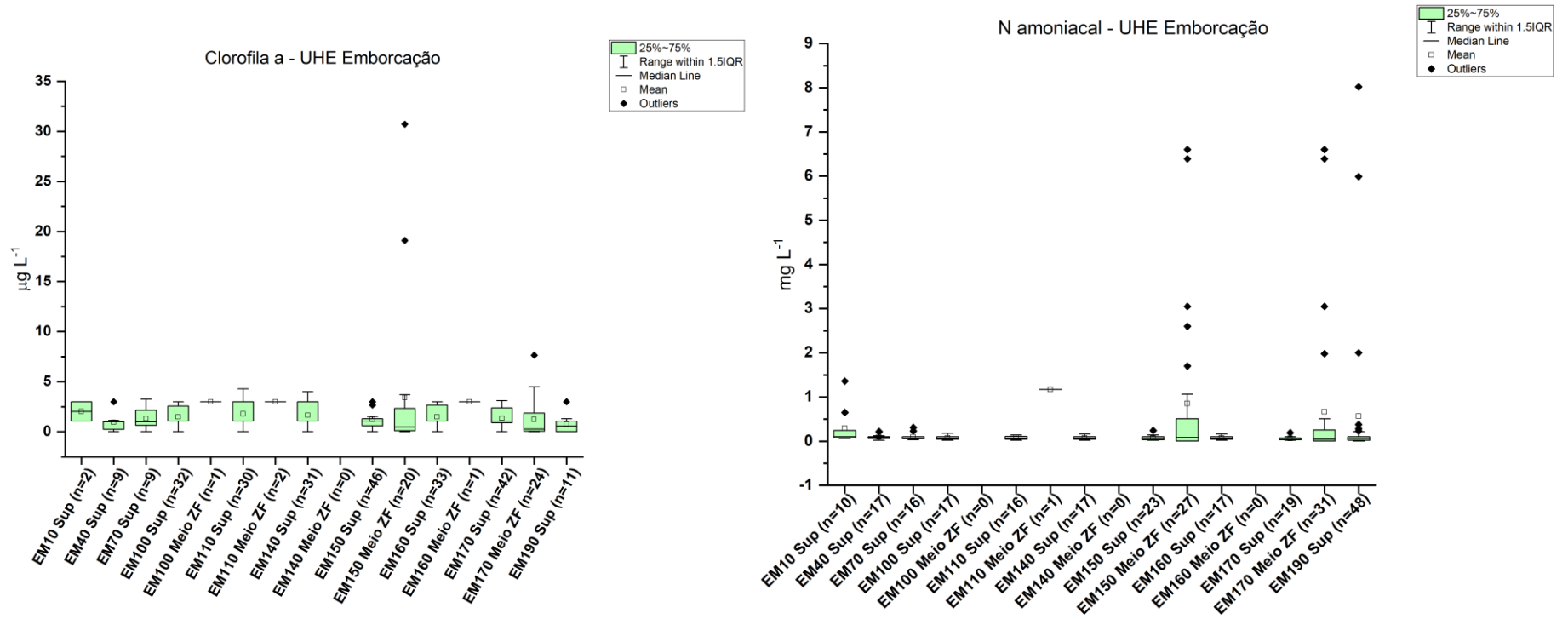
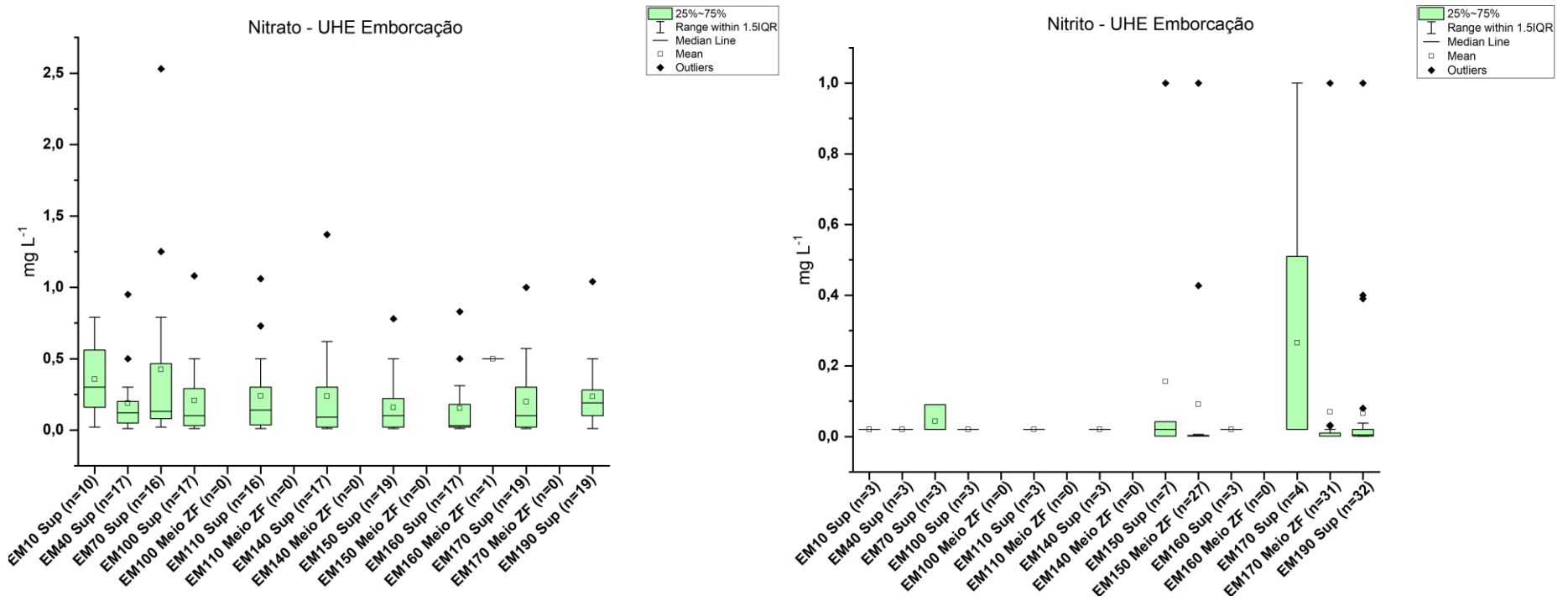


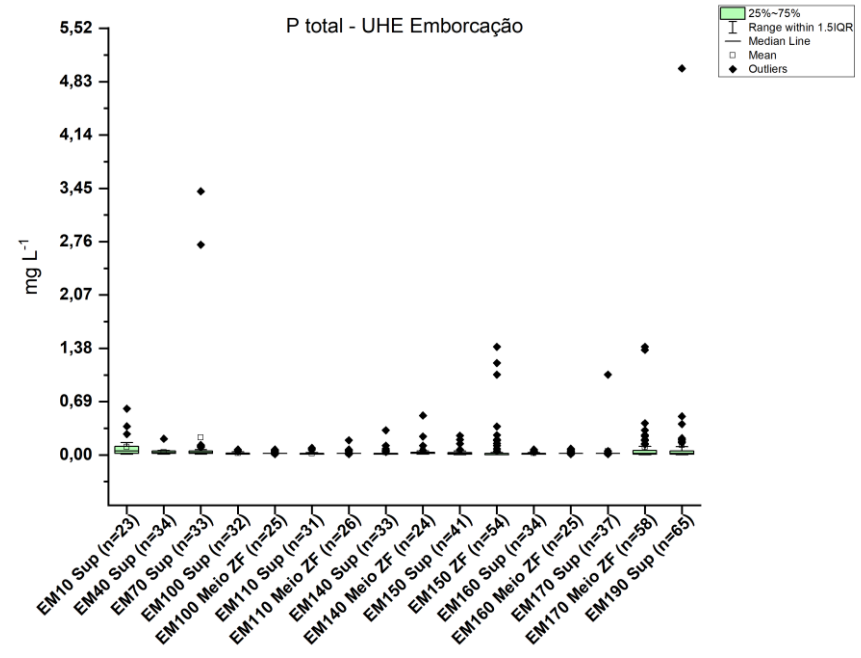
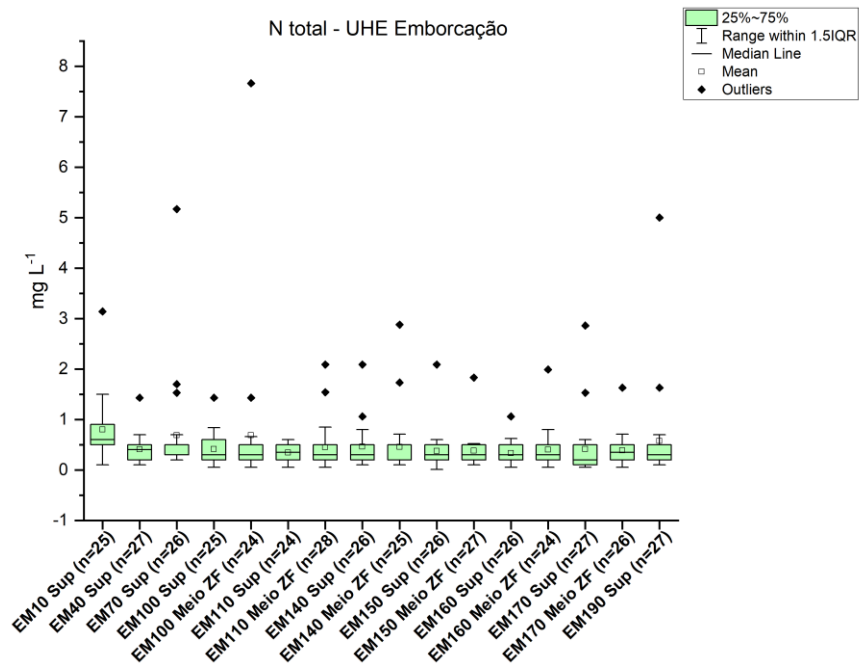
Figura 12 - Gráficos *box whisker* – Reservatório da UHE Emborcação



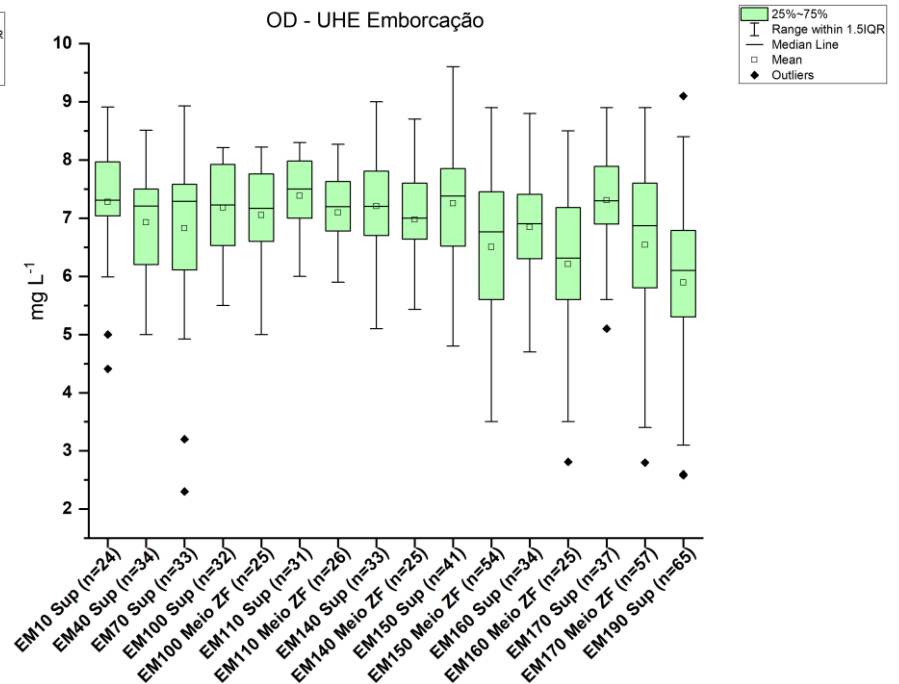
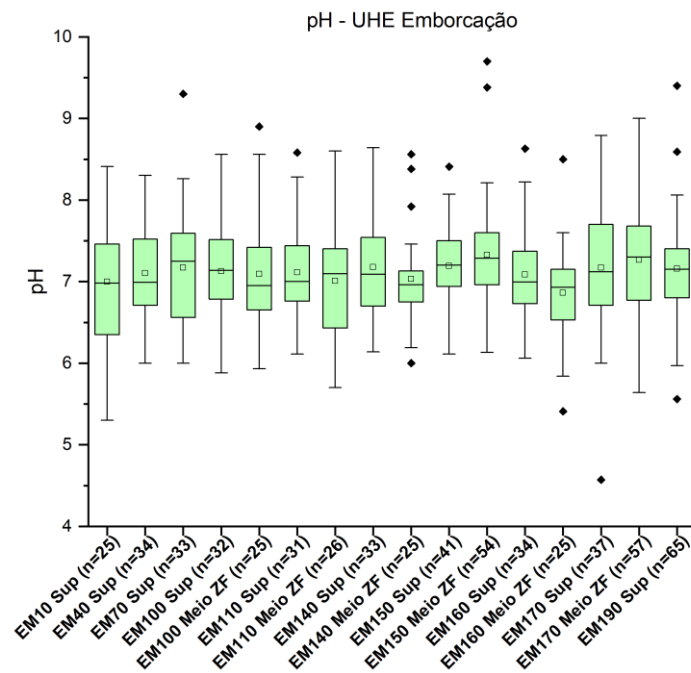
Padrões de acordo com a legislação: Clorofila a: até 30µg L⁻¹ ; N amoniacal para pH≤7,5: 3,7mg L⁻¹ e para 7,5≤pH≤8,0: 2,0mg L⁻¹



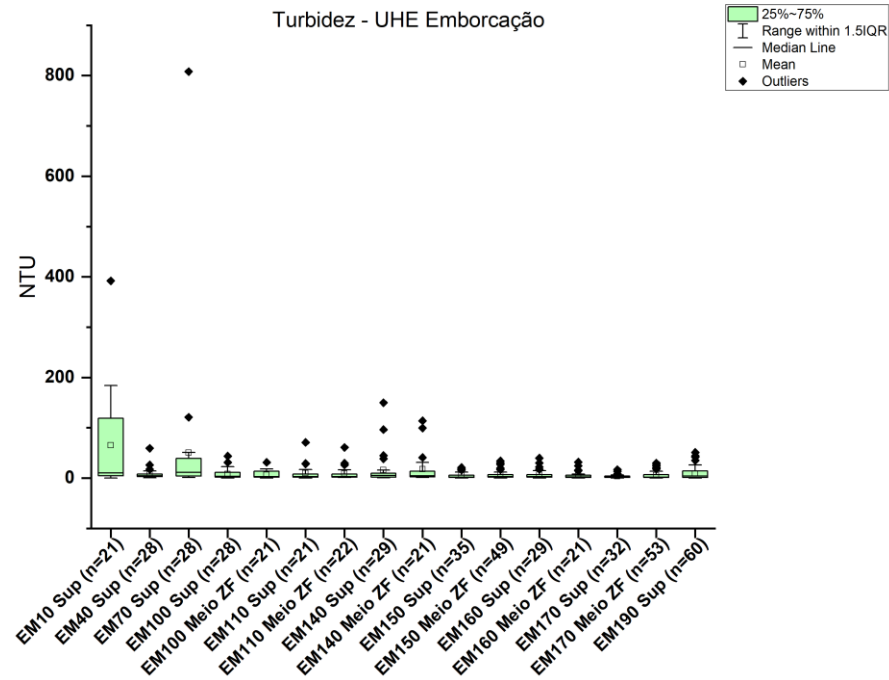
Padrões de acordo com a legislação para Nitrato: Até 10mg L⁻¹ e Nitrito: até 1mg L⁻¹



Padrões de acordo com a legislação para N total: Até 1,27mg L⁻¹ e P total: 0,03mg L⁻¹



Padrões de acordo com a legislação para OD: não inferior a 5mg L⁻¹ e pH de 6 a 9



Padrões de acordo com a legislação para Turbidez: até 100NTUs

Assunção e colaboradores (2016) destacam que o parâmetro P total foi o que apresentou maior número de desconformidades no ano de 2012, juntamente com N amoniacal, o que corrobora o aumento desses parâmetros com as atividades agrícolas da região. O autor ainda destaca que de acordo com o número de outorgas deferidas no período de 2008 e 2014 pelo IGAM, o principal destino das águas da Bacia do Rio Paranaíba é para irrigação, ou seja, há grande probabilidade de o aporte de nutrientes no reservatório serem de origem dessas atividades, ao passo que podem ser lixiviados para o corpo d'água. Vale destacar aqui que o aumento de fósforo total e da clorofila a no mesmo período, indica uma possível correlação.

Costa (2021) observou que a estação EM70, localizada no braço do Rio Dourados, apresentou os maiores valores de mediana para 58,3% dos parâmetros considerados: Turbidez, condutividade elétrica, pH, sólidos totais, alcalinidade, ferro dissolvido, DQO, sólidos dissolvidos totais, nitrato, sulfato, coliformes termotolerantes, sólidos em suspensão totais e nitrogênio total o que podem ser indicativos de influências antropogênicas. Ainda com relação à UHE de Emborcação, Costa (2021) destaca que, segundo a análise de cluster, as estações lóxicas (EM70 e EM40) apresentaram comportamento similar para coliformes termotolerantes, ferro dissolvido, fósforo total e turbidez, com maiores valores observados nestas duas estações. Para os mesmos parâmetros, foi observado menores teores nas estações lênticas (ou seja, na porção central do reservatório), o que indica que a qualidade de água no reservatório é melhor do que nos pontos próximos aos tributários.

6.2.3 Indicadores de pressão

A partir dos resultados obtidos sobre a características do entorno dos reservatórios em estudo (conforme os mapas de uso e ocupação do solo, Figura 13 a Figura 24), foi realizado um levantamento das atividades/empreendimentos de entorno das áreas estudadas (Figura 25 a Figura 32), no recorte temporal de 1995 a 2020. Tal levantamento utilizou como ferramenta a base de dados dos empreendimentos licenciados na área, a variação do uso e ocupação do solo a partir de imagens de satélite e também o levantamento na literatura de trabalhos que foram desenvolvidos nas mesmas áreas de estudo selecionadas para este trabalho, para seleção dos

indicadores de pressão. (CHRISTOFARO et al., 2017; COSTA, 2021; ASSUNÇÃO et al., 2016; VIANA, 2009; MATOS, 2017).

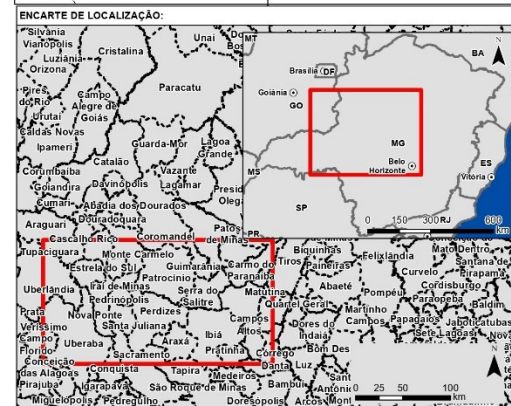
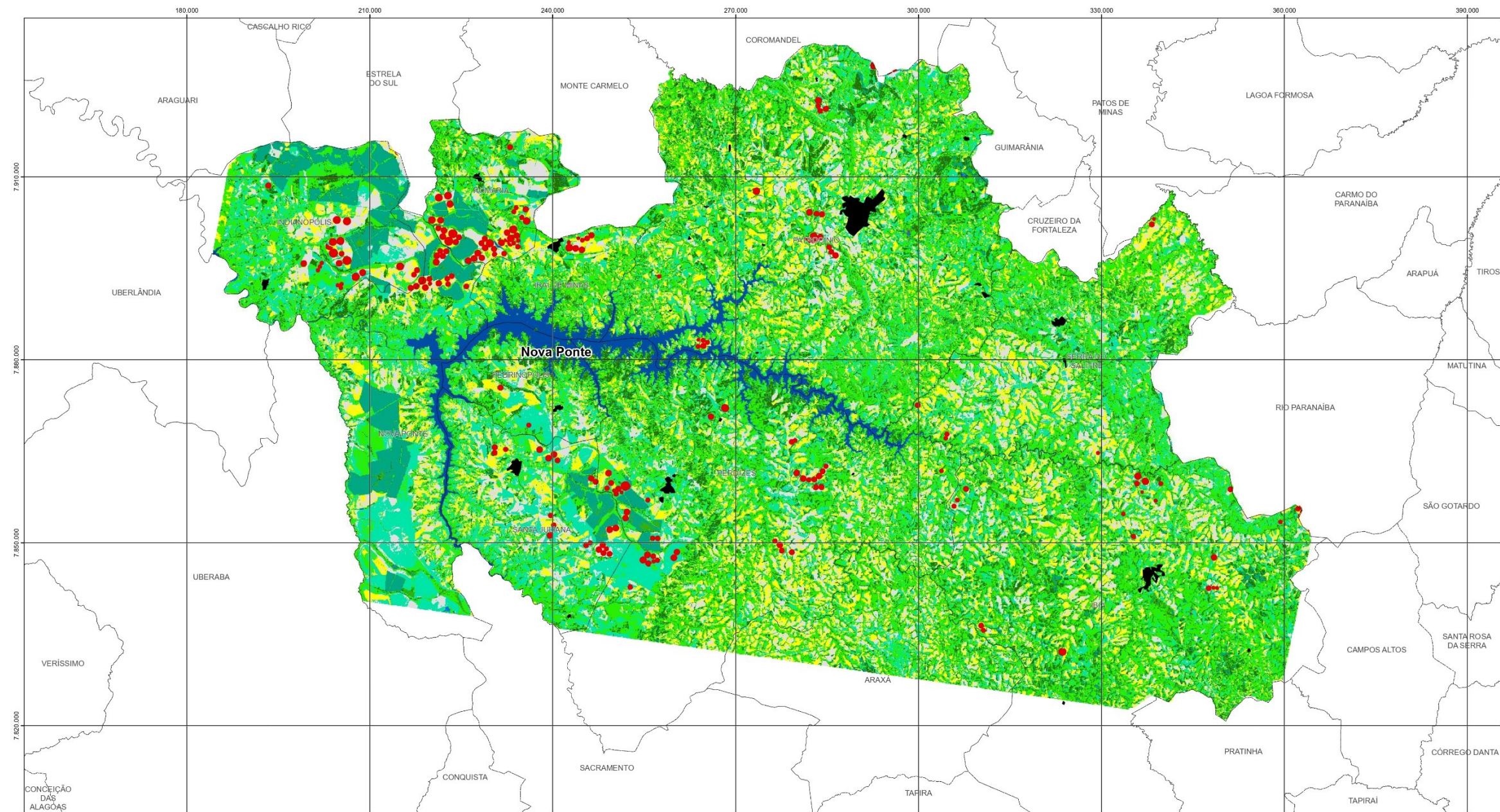
Em Nova Ponte (Figura 13 a Figura 16), houve o aumento considerável das atividades agrossilvipastoris (representando 89% das atividades licenciadas consideradas no levantamento realizado dos anos de 2015 a 2020), seguido de energia (5%) e da indústria (4%). Vale ressaltar que grande parte dessas atividades licenciadas se concentram em Patrocínio, seguido de Perdizes e Sacramento.

O aumento das atividades agrossilvipastoris corrobora os dados do aumento da área de pivôs centrais (Quadro 7 e o gráfico da Figura 33) que passou de 139.6 km² (em 1995), para 530 km² (2020). Os municípios onde os pivôs centrais se concentram são: Santa Juliana, Nova Ponte, Indianópolis e Pedrinópolis.

Em Emborcação (Figura 31 e Figura 32), da mesma forma que em Nova Ponte, as atividades agrossilvipastoris representam a maior parte das atividades, somando 70%, seguido de indústria (9%) e mineração (8%). Vale ressaltar que não existe banco de dados disponíveis com os registros de atividades licenciadas no período anterior a 2010, principalmente para o estado de Goiás, portanto, neste levantamento foram considerados os dados a partir de 2010.

As atividades licenciadas se concentram, em sua maioria, 32% em Araguari (MG) e 28% em Monte Carmelo (MG). Os dados das imagens de satélite (Quadro 7 e o gráfico da Figura 33) mostram que as áreas dos pivôs centrais foram de 41.33km² em 1995 para 97.04km² em 2020. Outra classe que merece destaque é a área mineral que passou de 712.66km² em 1995 para 2326.47km² em 2020, assim como a área de pasto que foi de 801.98km² em 1995 para 3671.96km² em 2020, que corroboram com os dados dos empreendimentos licenciados.

Figura 13 - Classificação do uso do solo – Reservatório UHE Nova Ponte 1995



- LEGENDA**
- Área urbana
 - Água profunda
 - Água turva
 - Área mineral
 - Cerrado denso
 - Cerrado típico
 - Cerrado ralo
 - Eucalipto maduro
 - Eucalipto jovem
 - Pasto
 - Desnudo/erosão
 - Pivô central
 - Limite municipal

ANOTAÇÕES

Os dados de área urbana foram coletados do site do IDE Sisema "https://desisema.meioambiente.mg.gov.br/webgis"

Os dados de pivô central foram coletados do site "https://dadosabertos.ana.gov.br/data/seta:33057e34e7784c4b10e47285d81ae18"

Os dados de limites municipais foram extraídos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

5 2.5 0 5 10 15 20
Projeção UTM FUSO 23S - Datum Horizontal WGS 84
Escala Numérica

Escala: 1:300.000

**MAPA DE USO E CLASSIFICAÇÃO DO SOLO
NOVA PONTE
FOLHA 1/1**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Figura 14 - Classificação do uso do solo – Reservatório UHE Nova Ponte 2005

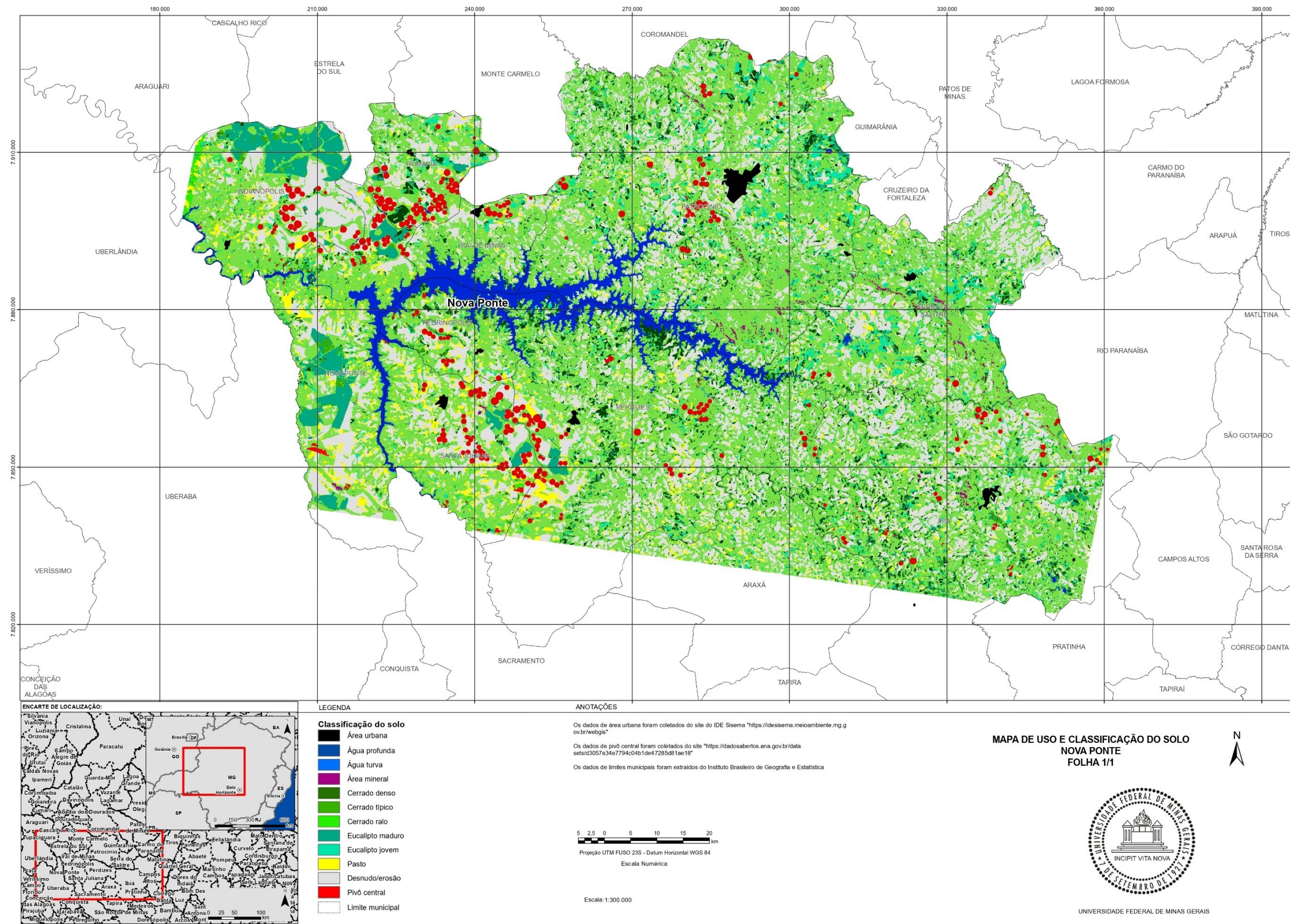


Figura 15 - Classificação do uso do solo – Reservatório UHE Nova Ponte 2015

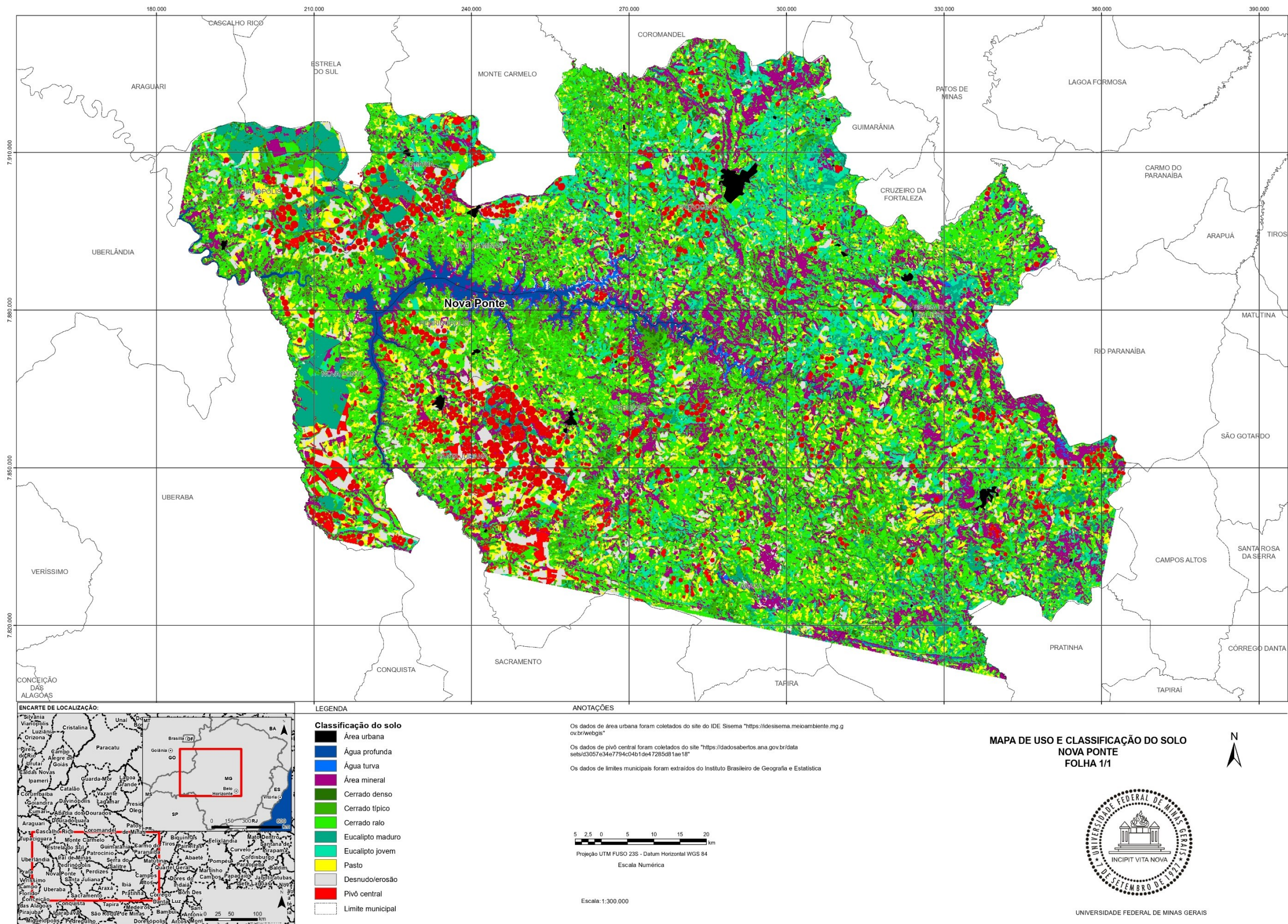


Figura 16 - Classificação do uso do solo – Reservatório UHE Nova Ponte 2020

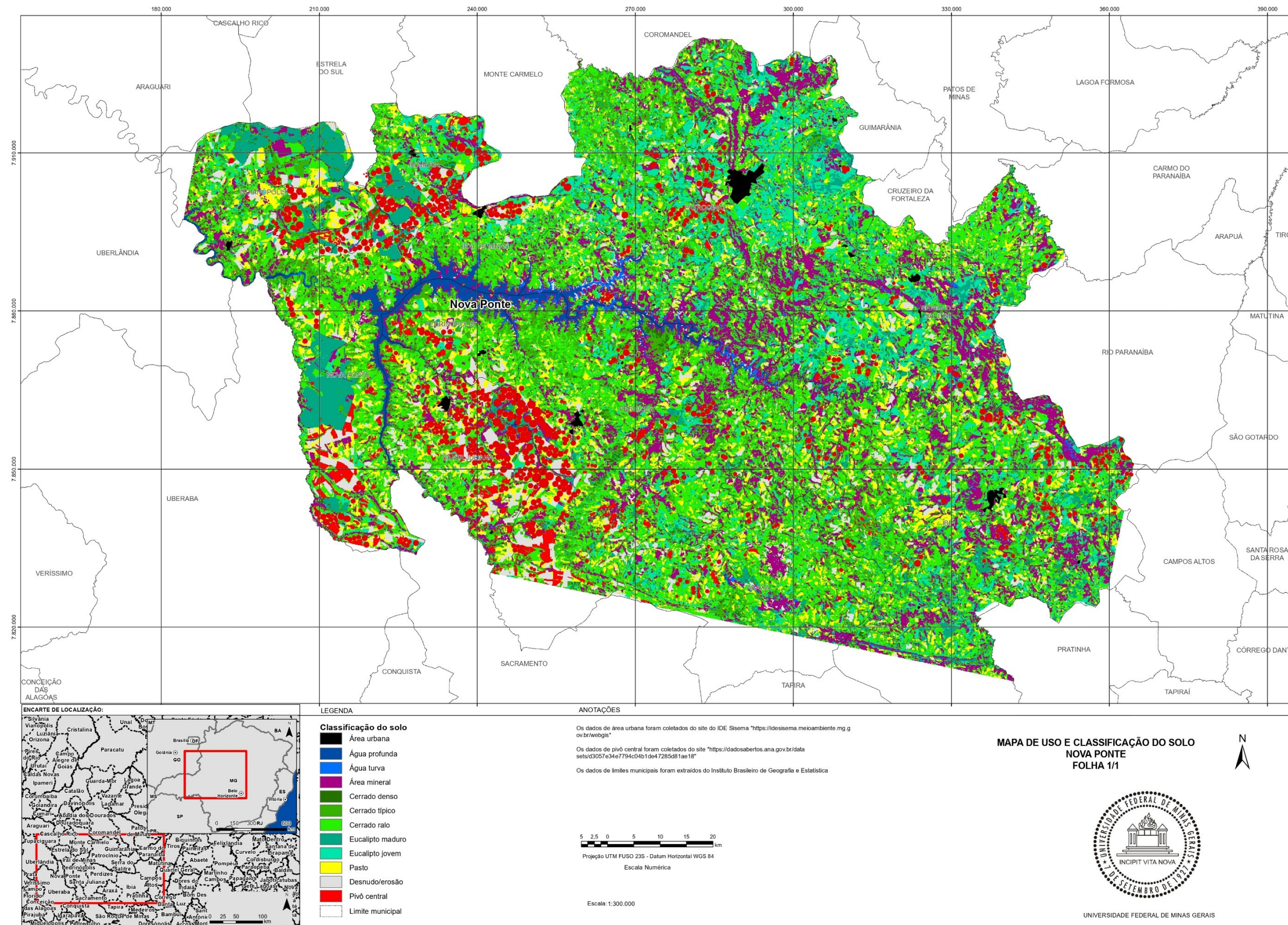


Figura 17 - Classificação do uso do solo – Represa Rio Manso 1995

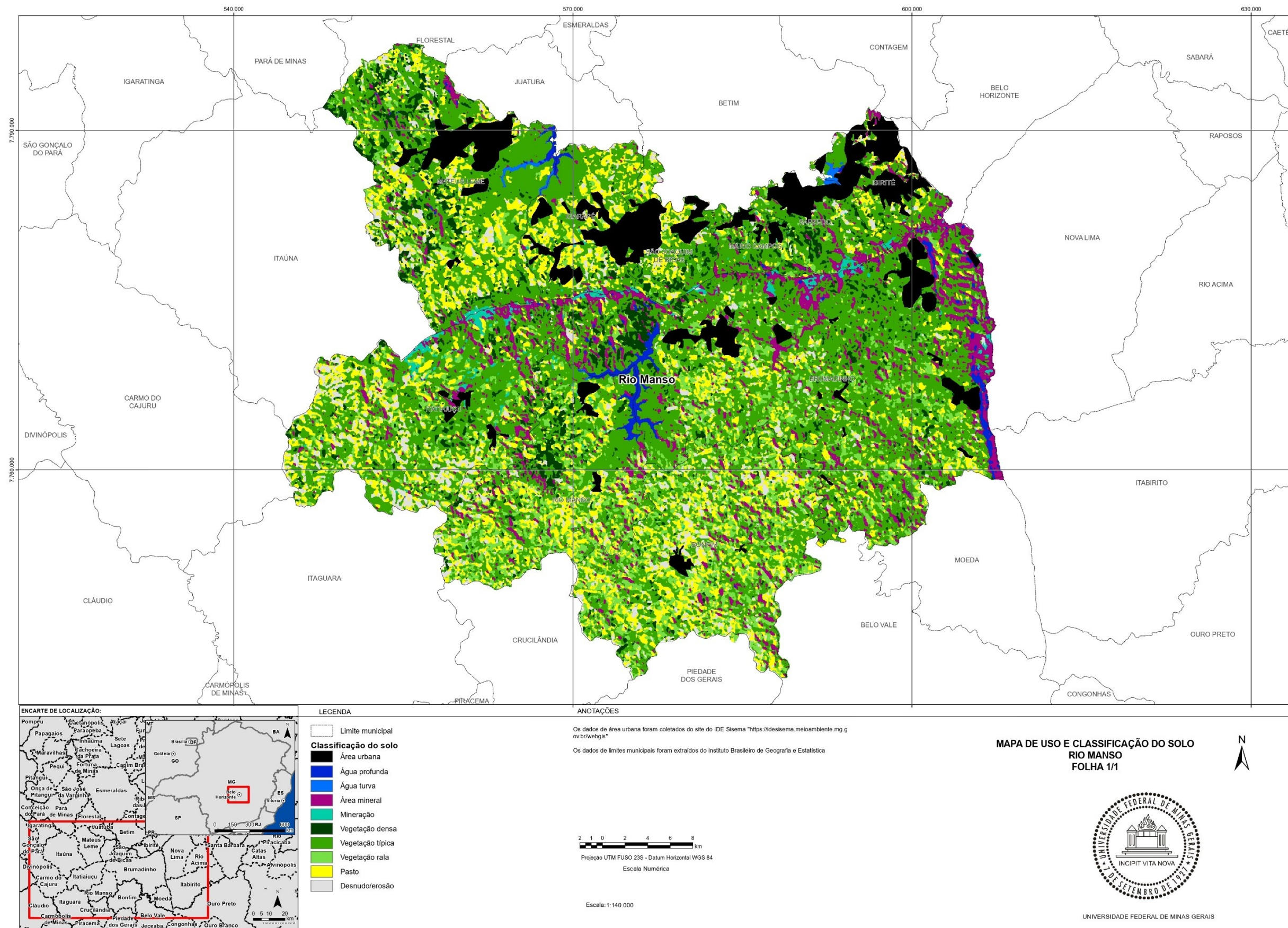


Figura 18 - Classificação do uso do solo – Represa Rio Manso 2005

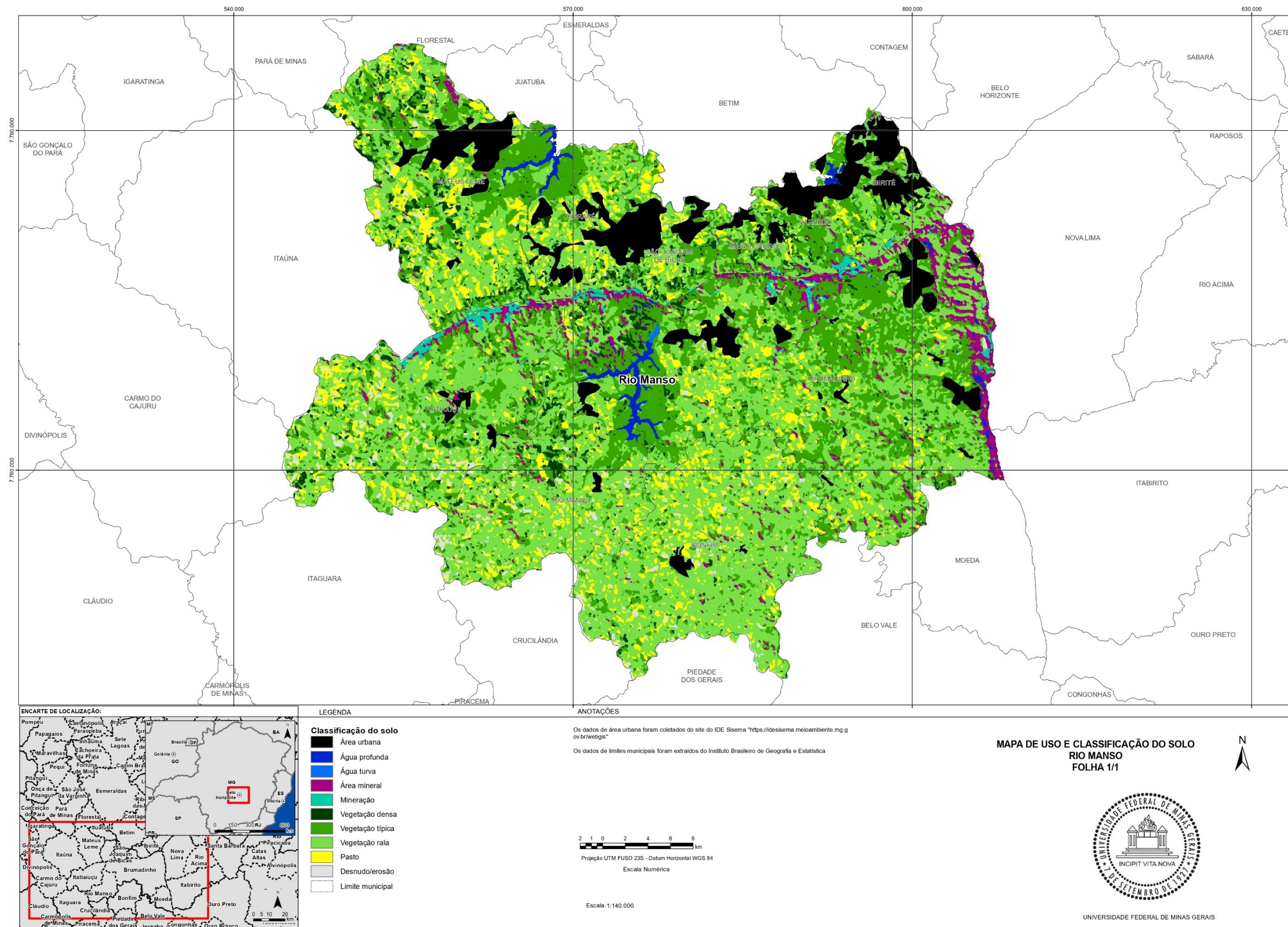


Figura 19 - Classificação do uso do solo – Represa Rio Manso 2015

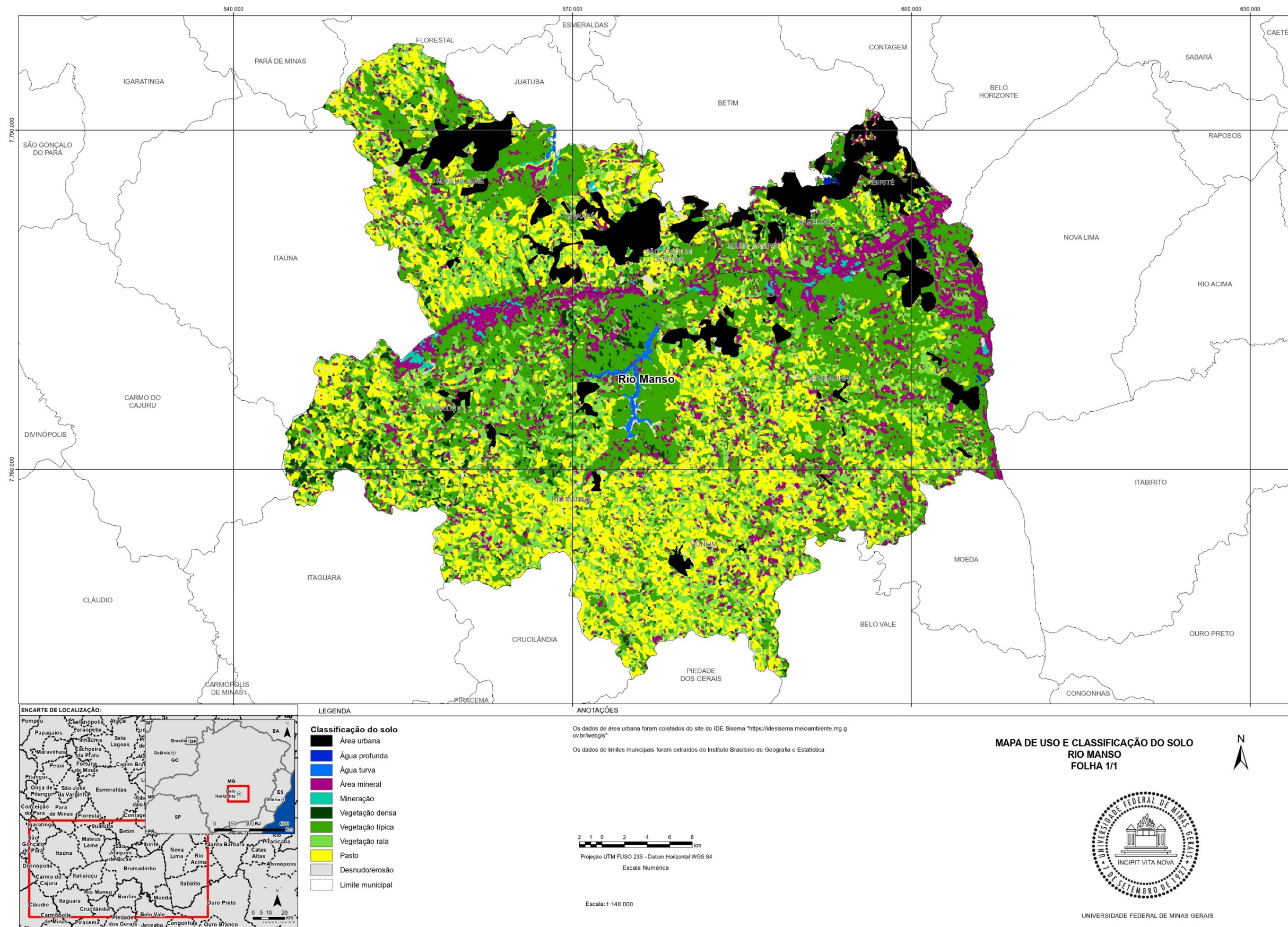


Figura 20 - Classificação do uso do solo – Represa Rio Manso 2020

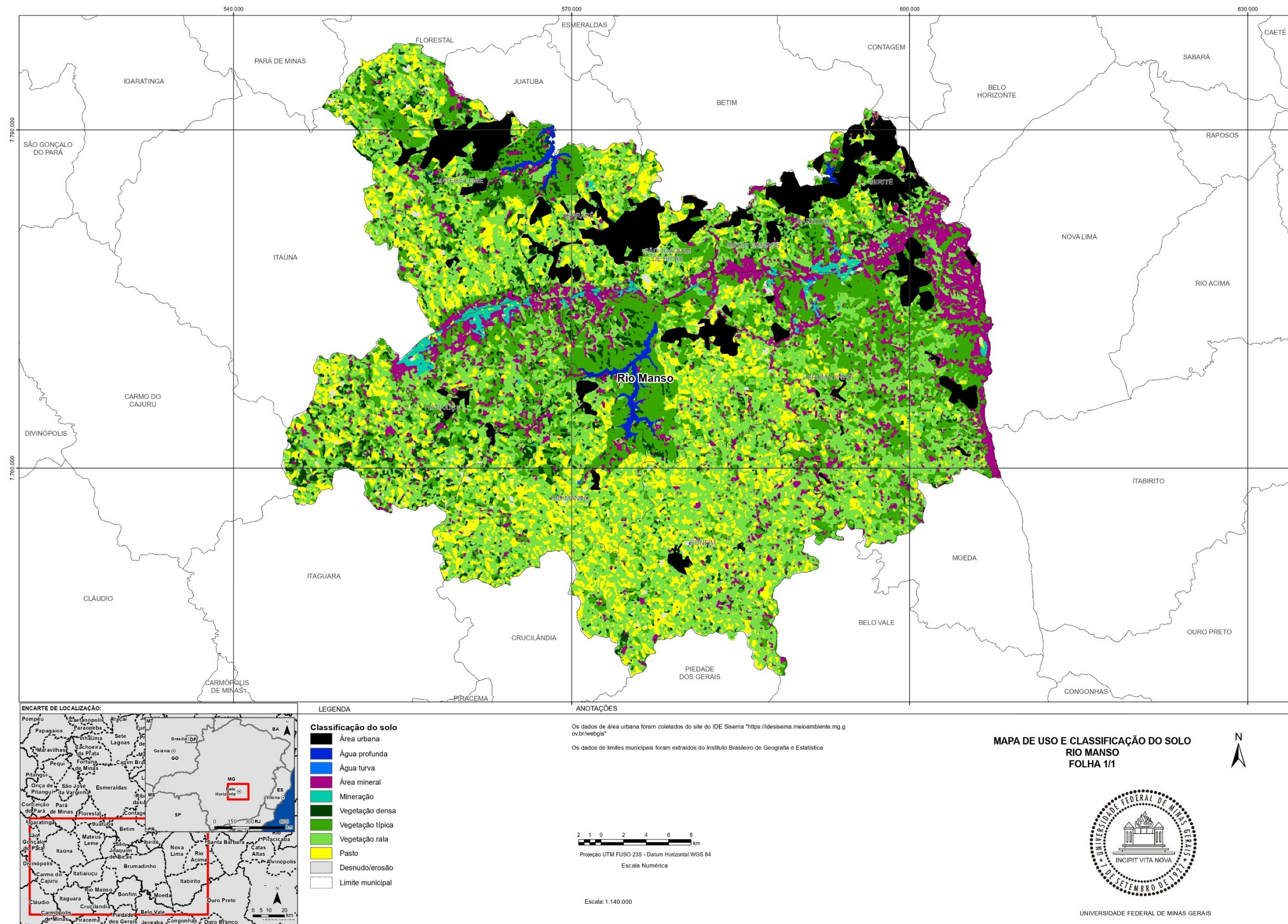


Figura 21 - Classificação do uso do solo – Reservatório UHE Emborcação 1995

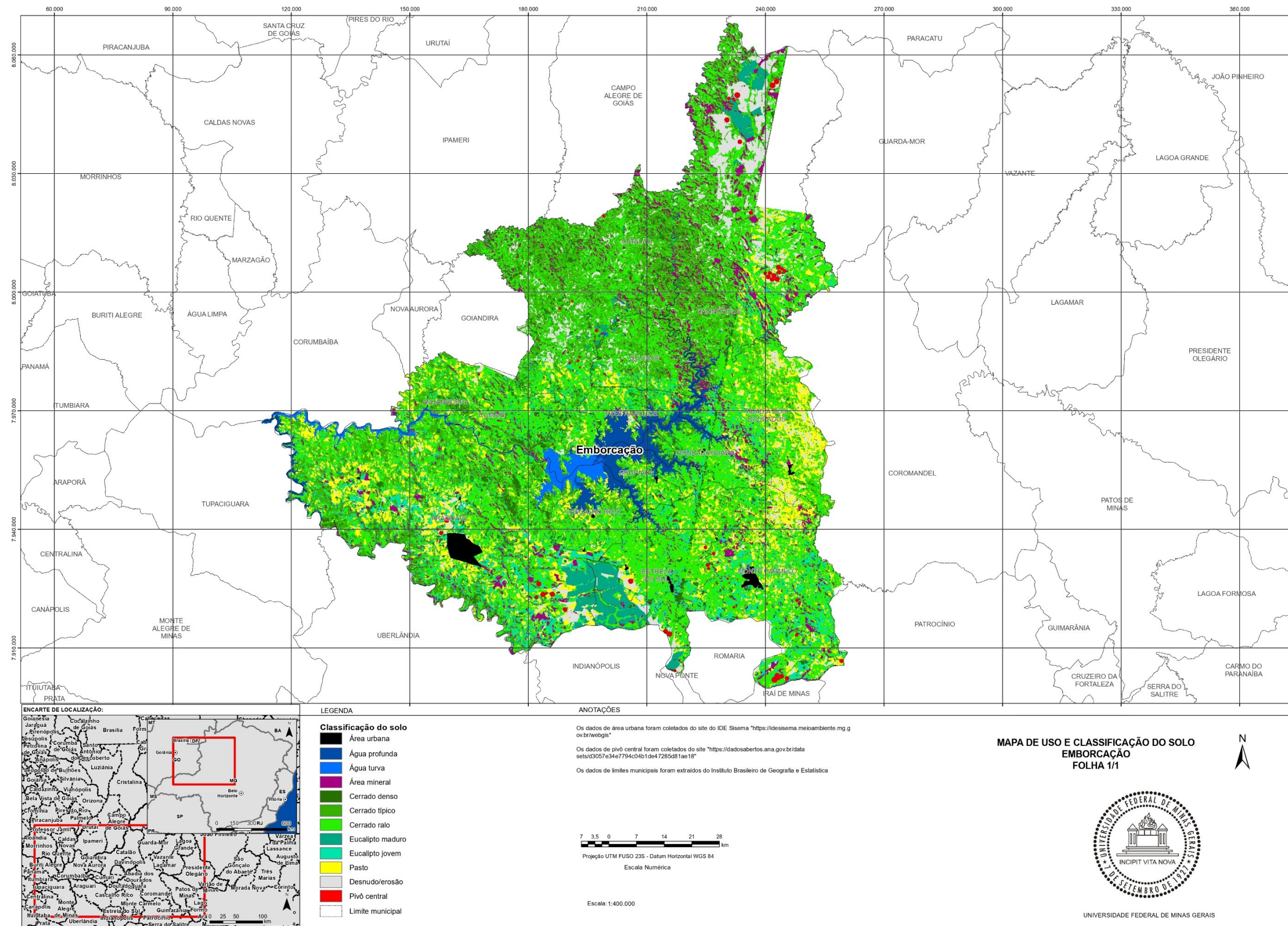


Figura 22 - Classificação do uso do solo – Reservatório UHE Emborcação 2005

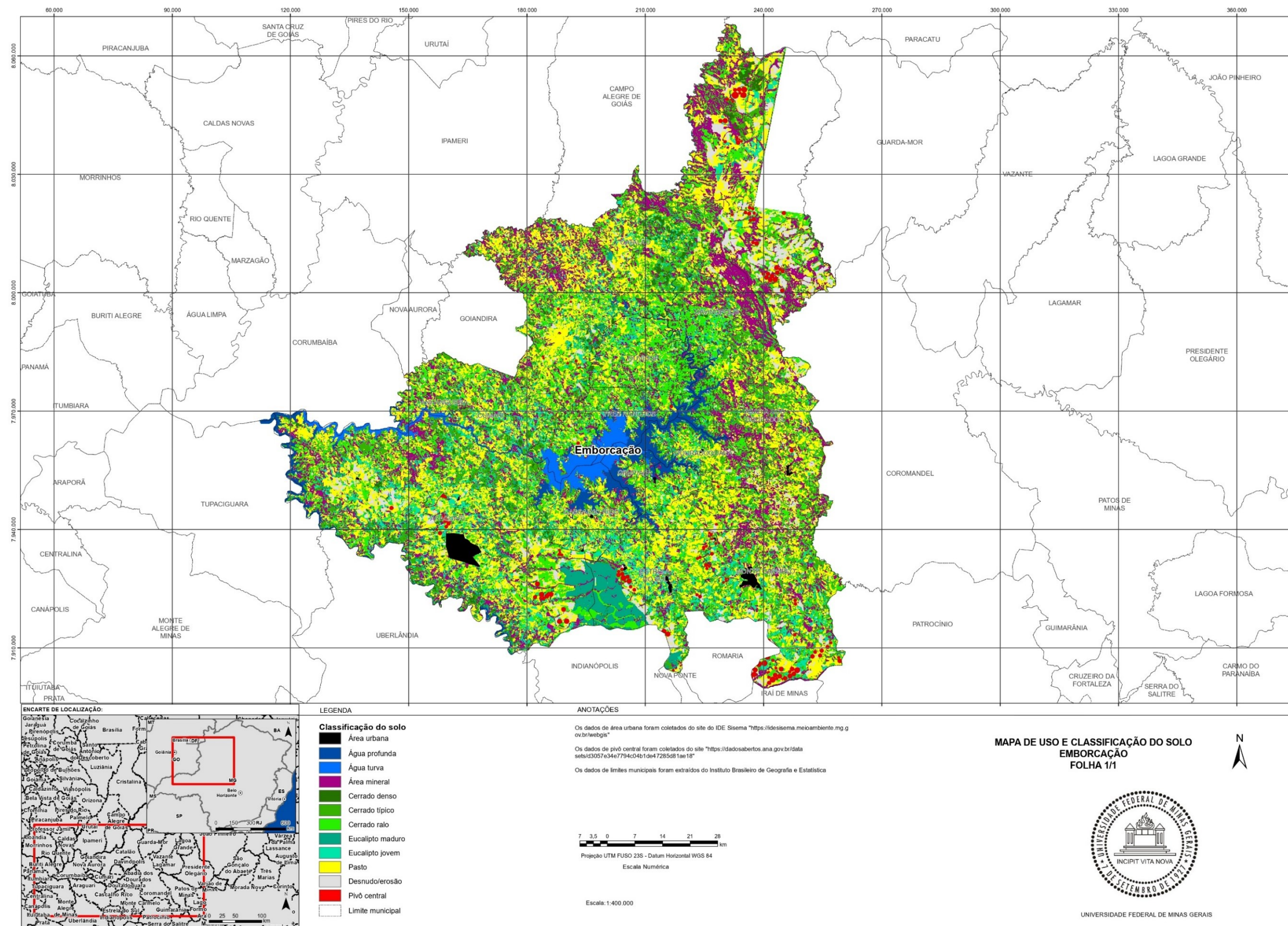


Figura 23 - Classificação do uso do solo – Reservatório UHE Emborcação 2015

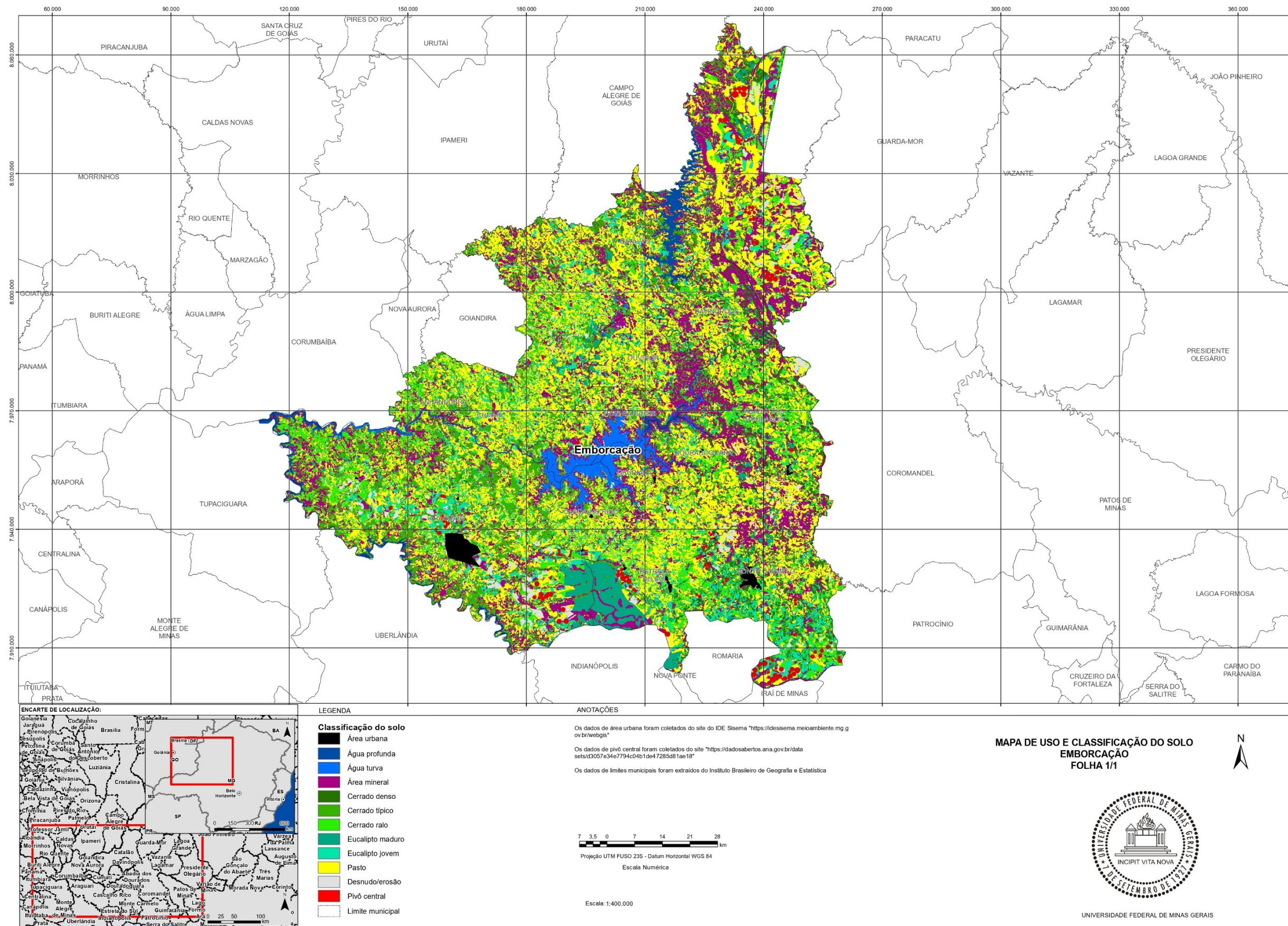


Figura 24 - Classificação do uso do solo – Reservatório UHE Emborcação 2020

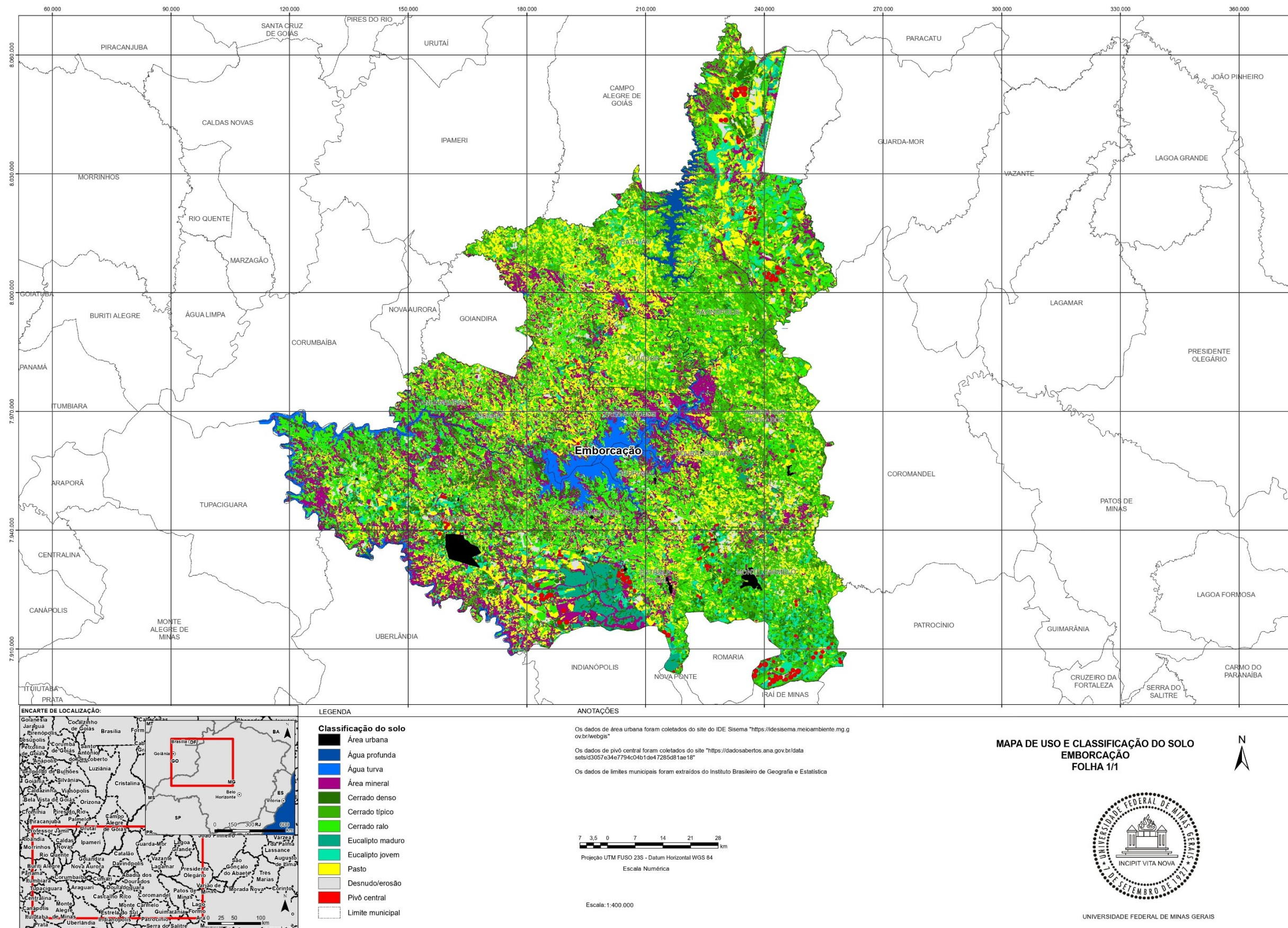
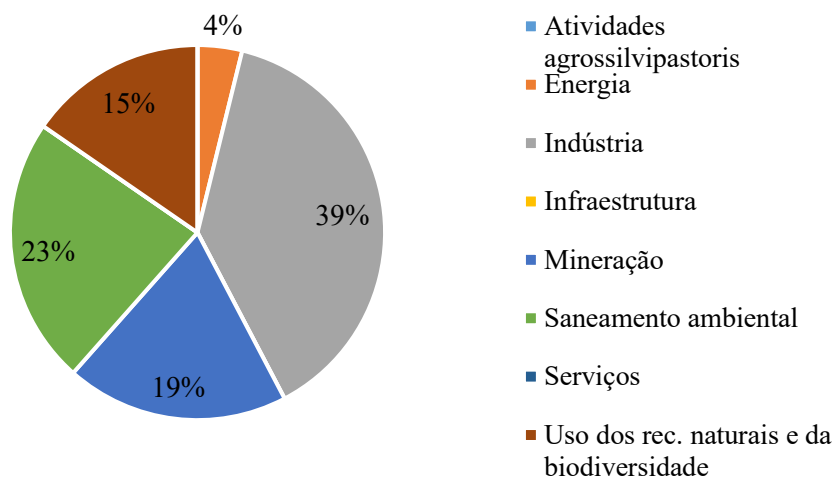


Figura 25 - Gráficos dos empreendimentos por área, tipologia e município – Reservatório UHE Nova Ponte

**Empreendimentos por Tipologia - UHE Nova Ponte
(1995-2004)**



**Empreendimentos por municípios - UHE Nova Ponte
(1995-2004)**

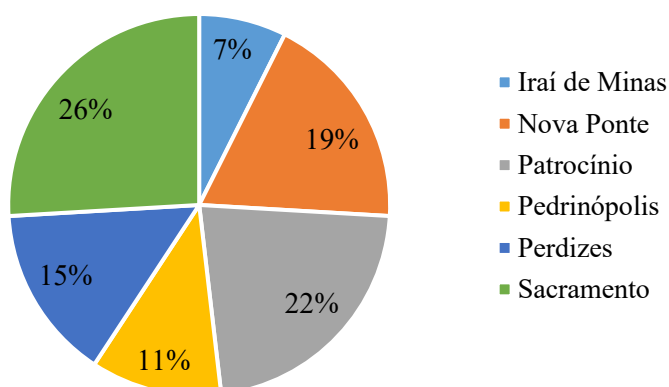
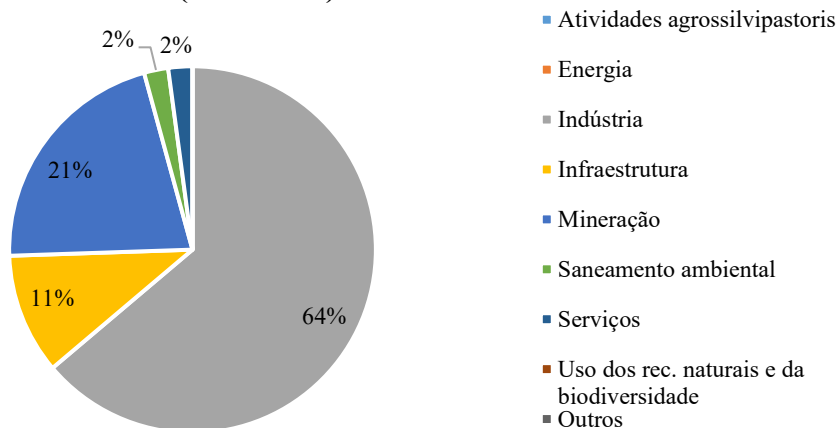


Figura 26 - Gráficos dos empreendimentos por área, tipologia e município – Reservatório UHE Nova Ponte

**Empreendimentos por Tipologia - UHE Nova Ponte
(2005-2014)**



**Empreendimentos por municípios - UHE Nova Ponte
(2005-2014)**

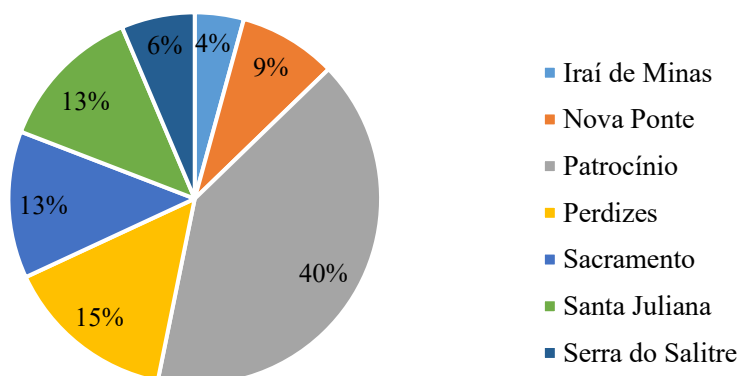
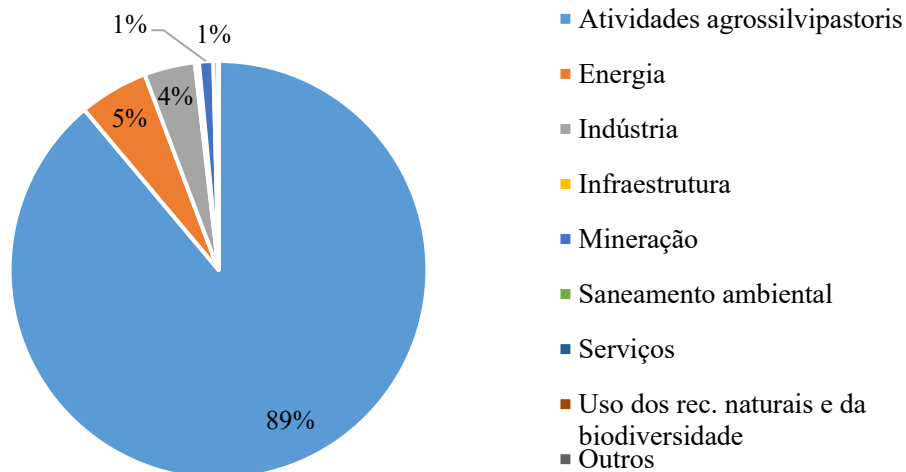


Figura 27 - Gráficos dos empreendimentos por área, tipologia e município – Reservatório UHE Nova Ponte

**Empreendimentos por Tipologia - UHE Nova Ponte
(2015-2020)**



**Empreendimentos por municípios - UHE Nova Ponte
(2015-2020)**

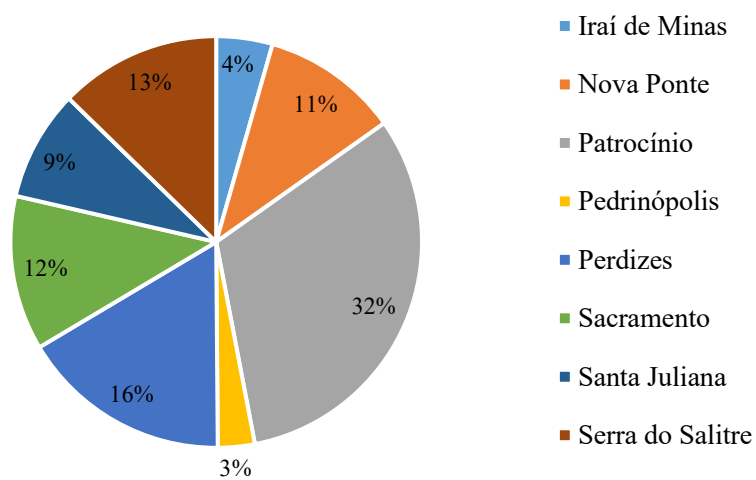
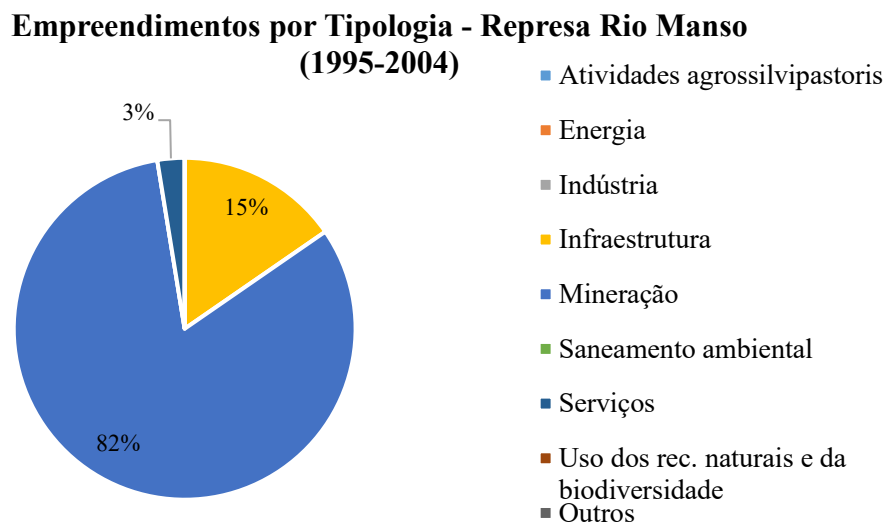


Figura 28 - Gráficos dos empreendimentos por área por município – Represa Rio Manso

Empreendimentos por município - Represa Rio Manso (1995-2004)

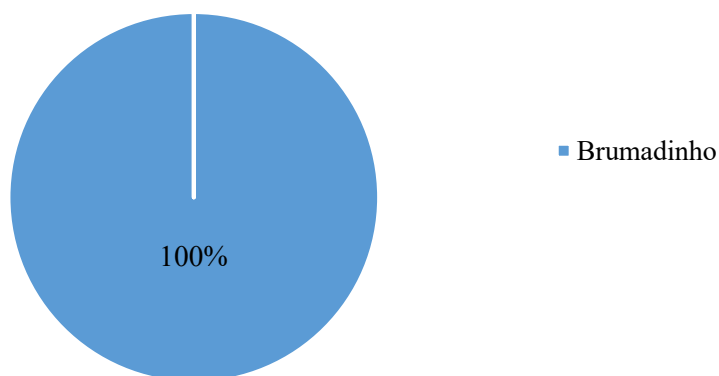


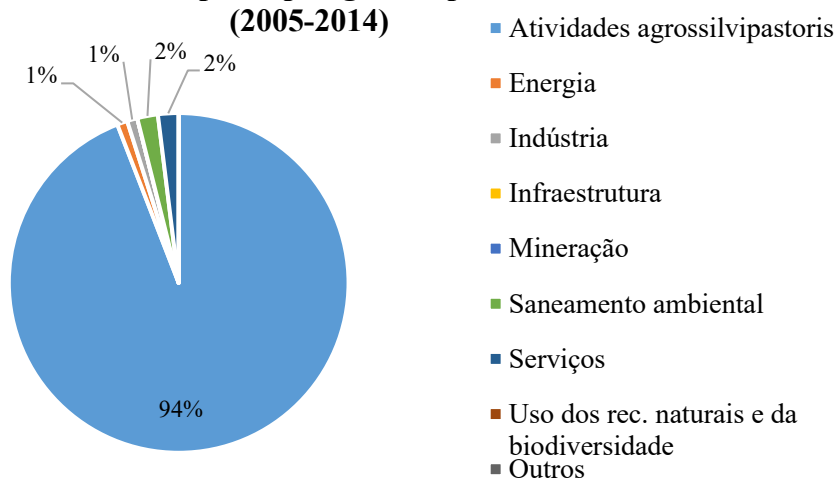
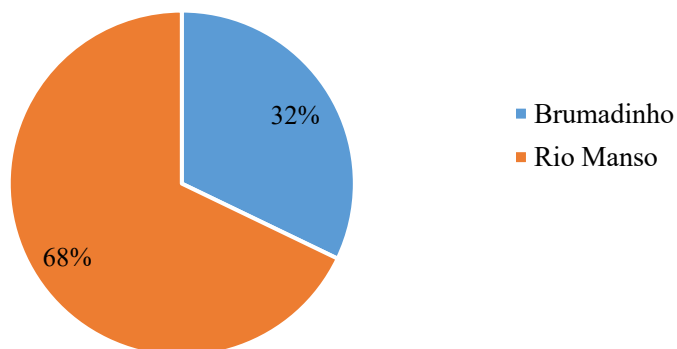
Figura 29 - Gráficos dos empreendimentos por área por município – Represa Rio Manso**Empreendimentos por Tipologia - Represa Rio Manso
(2005-2014)****Empreendimentos por município - Represa Rio Manso
(2005-2014)**

Figura 30 - Gráficos dos empreendimentos por área por município – Represa Rio Manso

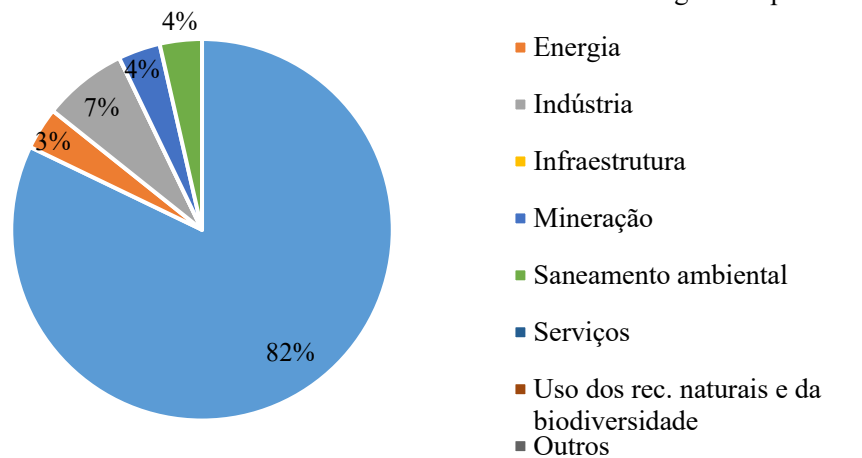
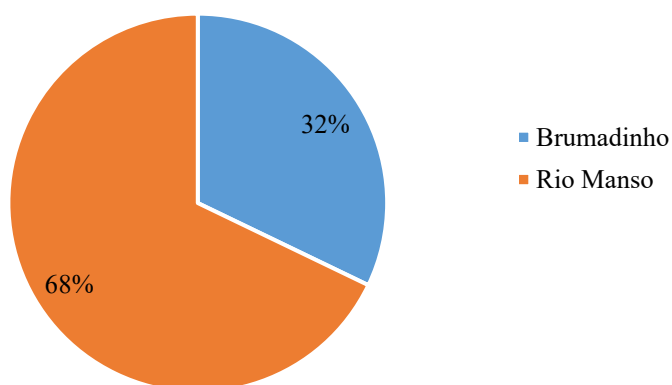
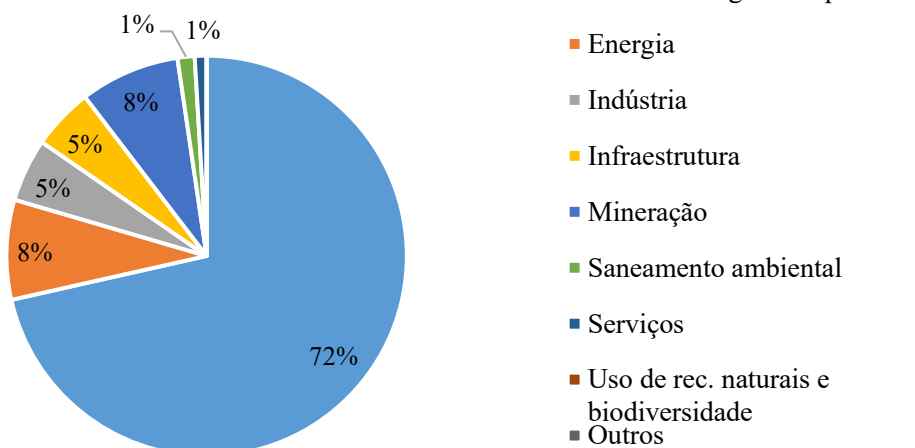
**Empreendimentos por Tipologia - Represa Rio Manso
(2015-2020)****Empreendimentos por município - Represa Rio Manso
(2015-2020)**

Figura 31 - Gráficos dos empreendimentos por área por município – Reservatório UHE Emborcação

**Empreendimentos por Tipologia - UHE Emborcação
(2010-2014)**



**Empreendimentos por município - UHE Emborcação
(2010-2014)**

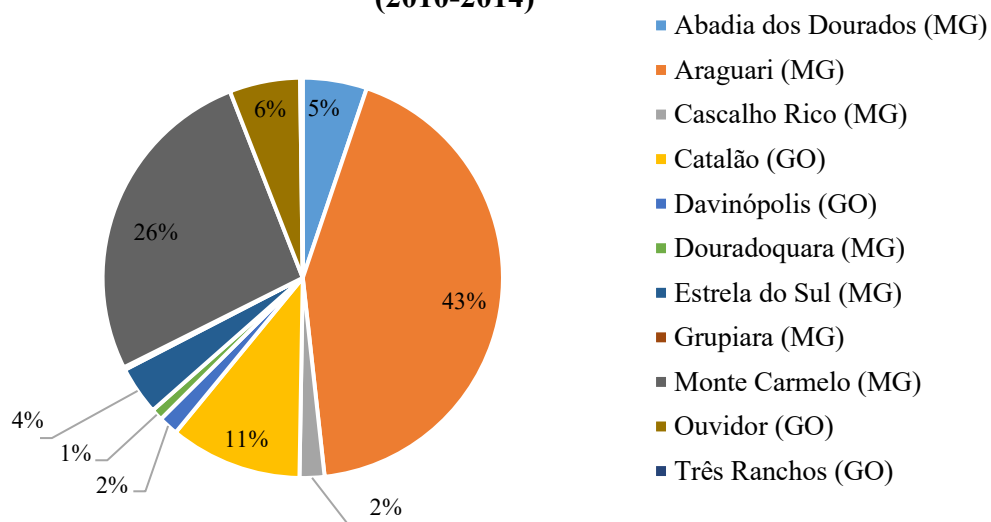
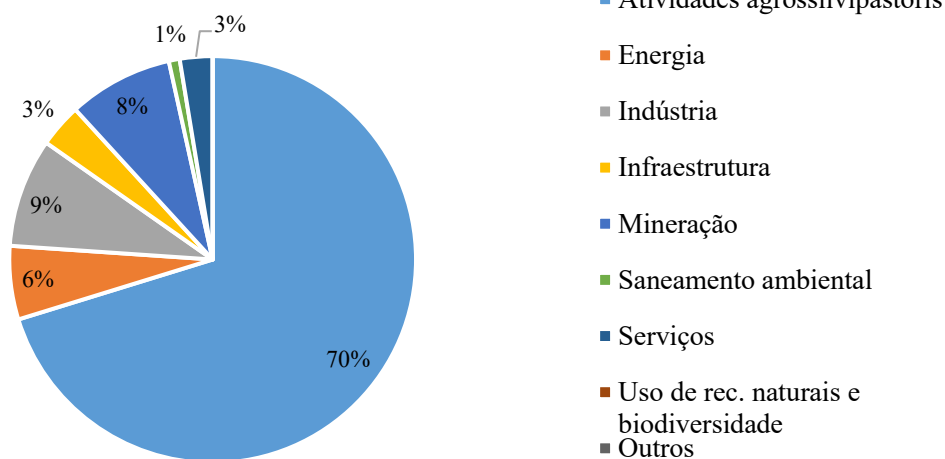
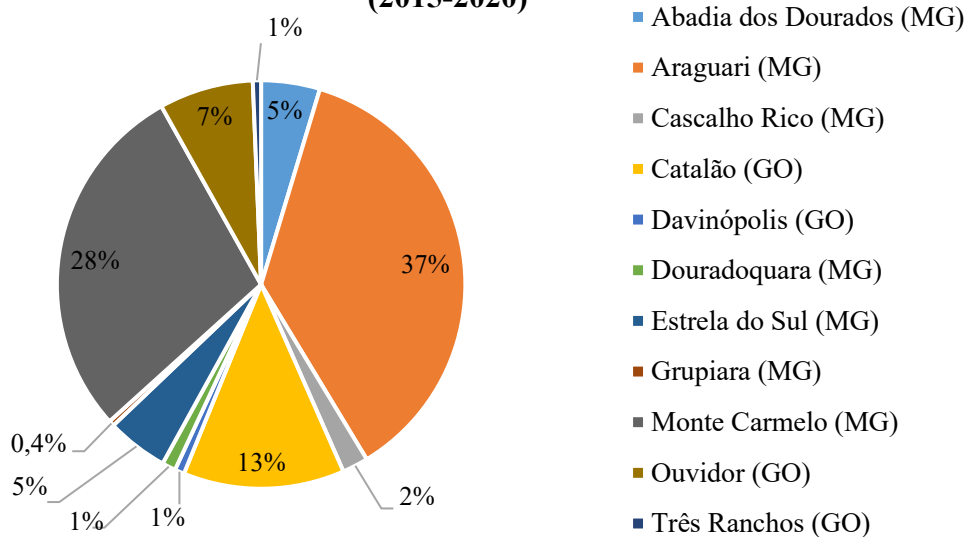


Figura 32 - Gráficos dos empreendimentos por área por município – Reservatório UHE Emborcação

**Empreendimentos por Tipologia - UHE Emborcação
(2015-2020)**



**Empreendimentos por município - UHE Emborcação
(2015-2020)**



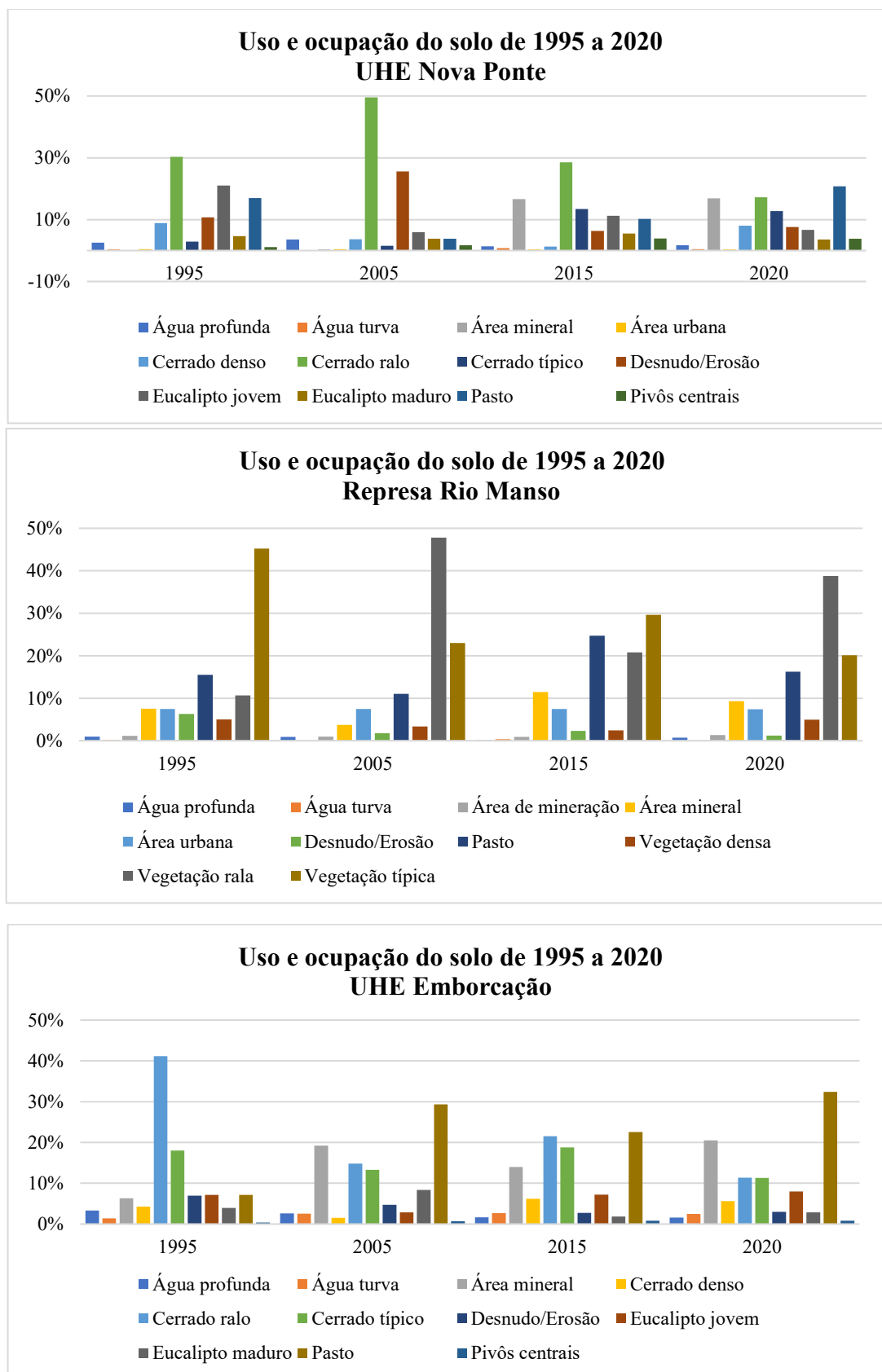
Quadro 7 - Áreas em km², das classes de uso e ocupação do solo nos anos de 1995, 2005, 2015 e 2020 no entorno da UHE Nova Ponte (a) Rio Manso (b) UHE Emborcação (c)

UHE Nova Ponte		Áreas em km ² Anos			
Classe	1995	2005	2015	2020	
Área mineral	4.700	42.893	2274.472	2357.310	
Água turva	42.197	1.771	102.372	65.227	
Água profunda	322.127	442.360	192.634	233.441	
Cerrado típico	370.858	187.294	1835.956	1775.669	
Eucalipto maduro	587.339	472.302	756.356	497.040	
Cerrado denso	1129.086	452.416	181.390	1123.880	
Desnudo/erosão	1364.725	3166.992	871.053	1059.965	
Pasto	2156.296	474.527	1400.968	2899.947	
Eucalipto jovem	2673.062	739.016	1537.362	934.034	
Cerrado ralo	3844.651	6138.262	3894.428	2401.244	
Área urbana	53.82	53.82	53.82	53.82	
Pivôs centrais	139.6	217.24	530.90	530.90	

Represa Rio Manso		Áreas em km ² Anos			
Classe	1995	2005	2015	2020	
Área mineral	172.82524	85.83126	262.27517	214.34580	
Área de mineração	26.04168	21.82004	19.91306	22.90860	
Água turva	4.22704	0.91254	7.78182	0.64890	
Água profunda	21.78584	20.38463	1.75849	15.99840	
Vegetação densa	115.36292	77.44198	55.08647	113.32170	
Vegetação rala	244.77126	1096.00488	476.96041	890.95320	
Vegetação típica	1036.64277	527.32938	678.50827	462.10320	
Desnudo/erosão	143.79575	39.49404	53.37748	27.33030	
Pasto	356.12403	252.35779	565.91537	374.09580	
Área urbana	170.7	170.7	170.7	170.7	

UHE Emborcação		Áreas em km ² Anos			
Classe	1995	2005	2015	2020	
Área mineral	712.665	2283.209	1665.861	2326.474	
Água turva	158.439	301.901	319.433	281.609	
Água profunda	371.342	307.876	197.205	180.979	
Cerrado denso	478.561	179.253	737.443	633.902	
Cerrado ralo	4627.490	1759.950	2559.583	1290.371	
Cerrado típico	2022.416	1573.729	2234.447	1278.681	
Eucalipto jovem	801.983	338.335	859.439	902.652	
Eucalipto maduro	444.518	993.607	222.232	325.464	
Desnudo/erosão	779.096	561.574	324.162	340.137	
Pasto	801.983	3477.970	2681.306	3671.964	
Área urbana					
Pivôs centrais	41.33	83.70	97.04	97.04	

Figura 33 - Gráficos do avanço das áreas em porcentagem (%), do uso e ocupação do solo no entorno de (a) UHE Nova Ponte, (b) Represa Rio Manso e (c) Emborcação



Já na Represa Rio Manso, no período de 1995 a 2004, as atividades licenciadas em sua maioria, eram mineração, com 82%. Todavia, a partir de 2005 a 2014 as atividades agrossilvipastoris passaram a liderar com 94% dos empreendimentos licenciados. Em 2015 a 2020 houve uma pequena queda, passando para 82%, seguido de 7% de indústria e 4% de mineração. Vale destacar que a área de entorno da represa Rio Manso é bem menor quando comparado a dos outros dois reservatórios, e abrange, em sua maioria apenas dois municípios: Brumadinho e Rio Manso.

Os dados de sensoriamento remoto mostram que, corroborando os dados dos empreendimentos licenciados, houve um decréscimo da área de mineração entre os anos de 1995 e 2020, indo 26.04km² para 19.91km² em 2015. Contudo, cabe destacar que em 2020 esse número voltou a subir, compreendendo 22.91km². A área de pasto aumentou de 356.12km² para 374.09 km² no de 1995 a 2020.

Chistofaro e colaboradores (2017), ressaltam que a região de entorno da UHE de Nova Ponte possui solo com baixa fertilização natural e a utilização de fertilizantes é necessária para aumentar o potencial agropecuário da região, que é fortemente percebida, como por exemplo em plantações de cana de açúcar, soja e café. Vale destacar que a utilização de fertilizantes constitui de uma das principais causa para o aumento do aporte de nutrientes uma vez que esses podem ser lixiviados para os corpos d'água, podendo causar as florações que são uma das consequências do processo de eutrofização.

Portanto, foram selecionadas como indicadores de pressão o avanço das atividades industriais, agropecuárias e do tratamento de esgoto, durante o mesmo recorte temporal disponibilizado no banco de dados. No Quadro 7 estão as áreas em km², de cada classe, bem como dos pivôs centrais para Nova Ponte e Emborcação.

6.2.4 Indicadores de Estado

Como indicadores de estado, considerou-se os parâmetros disponibilizados no banco de dados com número de dados suficientes, no intuito de mensurar o grau de impacto das atividade de uso e ocupação ao qual eles estão diretamente relacionados, como por exemplo: os parâmetros da série de nutrientes: Nitrogênio total, Nitrogênio

amoniacal, Nitrato, Nitrito, Fósforo total e Ortofosfato; e outros parâmetros de qualidade da água como: Turbidez, Série de sólidos, DBO, DQO, pH, Temperatura da amostra e Condutividade elétrica.

Os parâmetros que apresentaram maior desconformidade de acordo com a legislação e que estão diretamente relacionados com as pressões, nesse caso as atividades agropecuárias, (que constitui grande parte do uso e ocupação das áreas de entorno) e ao saneamento básico (que está diretamente relacionado à ocupação antrópica nas áreas de entorno), uma vez que o lançamento de efluentes também é uma importante fonte de aporte de nutrientes e de matéria orgânica nos corpos d'água, serão considerados com maior grau de alerta e portanto, com maior peso a eles atribuídos. No entanto, nenhum parâmetro violou a legislação.

Na UHE de Emborcação, Costa (2021) destaca que, segundo a análise de cluster, as estações lóaticas (EM70 e EM40) apresentaram comportamento similar para coliformes termotolerantes, ferro dissolvido, fósforo total e turbidez, com maiores valores observados nestas duas estações. Para os mesmos parâmetros, foram observados menores teores nas estações lânticas (ou seja, na porção central do reservatório), o que indica que a qualidade de água no interior do reservatório é melhor do que nos pontos próximos aos tributários.

Além destes, também foram considerados os parâmetros que inferem diretamente sobre o grau de trofia dos corpos d'água, como a medida de cianobactérias como clorofila a, feofitina e fitoplâncton célula por mL, oxigênio dissolvido. Aqueles parâmetros com o maior número de violações dos parâmetros de acordo com a legislação vigente (Deliberação Normativa COPAM CERH 001/2008), serão considerados como bons indicadores de estado, e com o maior peso atribuído a eles, seguido daqueles que não violaram a legislação, mas foram considerados importantes para o estudo da eutrofização.

6.2.4.1 Cálculo do Índice de Estado Trófico

O cálculo do Índice de Estado Trófico foi feito considerando os valores da série temporal. Para dados coletados mais de uma vez no mesmo mês, os valores das observações de Fósforo total e Clorofila a, foram cada um, acumulados e foi calculada

a média daquele parâmetro naquele mês. Sendo assim os valores foram separados por cada coleta, bem como por estação e zona (superfície e zona fótica).

A análise de variância ANOVA mostrou que apenas para o reservatório de Nova Ponte houve diferenças significativas entre as estações, sendo que esta diferença foi observada apenas na superfície (Valor $p = 0,05$; $\alpha=95\%$). Vale destacar que os dados faltantes dificultaram avaliar o Índice de Estado Trófico quando calculado para série temporal, não permitindo afirmar o que aconteceu entre os anos que não houve coletas ou medições dos parâmetros Clorofila a e Fósforo Total.

Para Nova Ponte, conforme o gráfico das Figura 34, nota-se que na superfície, houve uma piora da qualidade da água entre 2017 e 2019 sendo iniciada em 2017 com o surgimento de níveis eutróficos no reservatório. Já nas amostras de zona fótica, apenas no ano de 1999 observou-se um IET hipereutrófico.

Na estação NP110 na superfície, conforme o gráfico da Figura 35, os valores do índice variaram de oligotrófico para eutrófico. Em contrapartida, também na superfície, os níveis de trofia variaram entre oligotróficos e mesotróficos nas estações NP100, NP120, NP130, NP160, NP180 e NP190 e de ultraoligotróficos e oligotróficos na estação NP140 e ultraoligotróficos e mesotróficos na estação NP170.

Na zona fótica, as estações NP140, NP170 e NP180 os índices de estado trófico variaram entre ultraoligotróficos e mesotrófico, com exceção da estação NP180, onde também foi registrado IET hipereutrófico. A estação NP180 se localiza próximo ao município de Nova Ponte. Já as estações NP140 e 170, estão próximas ao município de Pedrinópolis, que são onde os pivôs centrais se concentram em sua maioria.

Nos outros reservatórios, também houve um aumento do grau de trofia. Em Emborcação essa mudança pode ser observada a partir do ano de 2012 para superfície e em 2000 para zona fótica (Figura 34) com a evolução dos níveis de trofia de mesotrófico para eutrófico.

Para o reservatório de Rio Manso, embora os dados disponíveis só permitiram calcular o IET para Zona fótica, o mesmo comportamento foi observado, a partir do ano de 2015.

Figura 34 - Cálculo do IET Ponderado para séries temporais

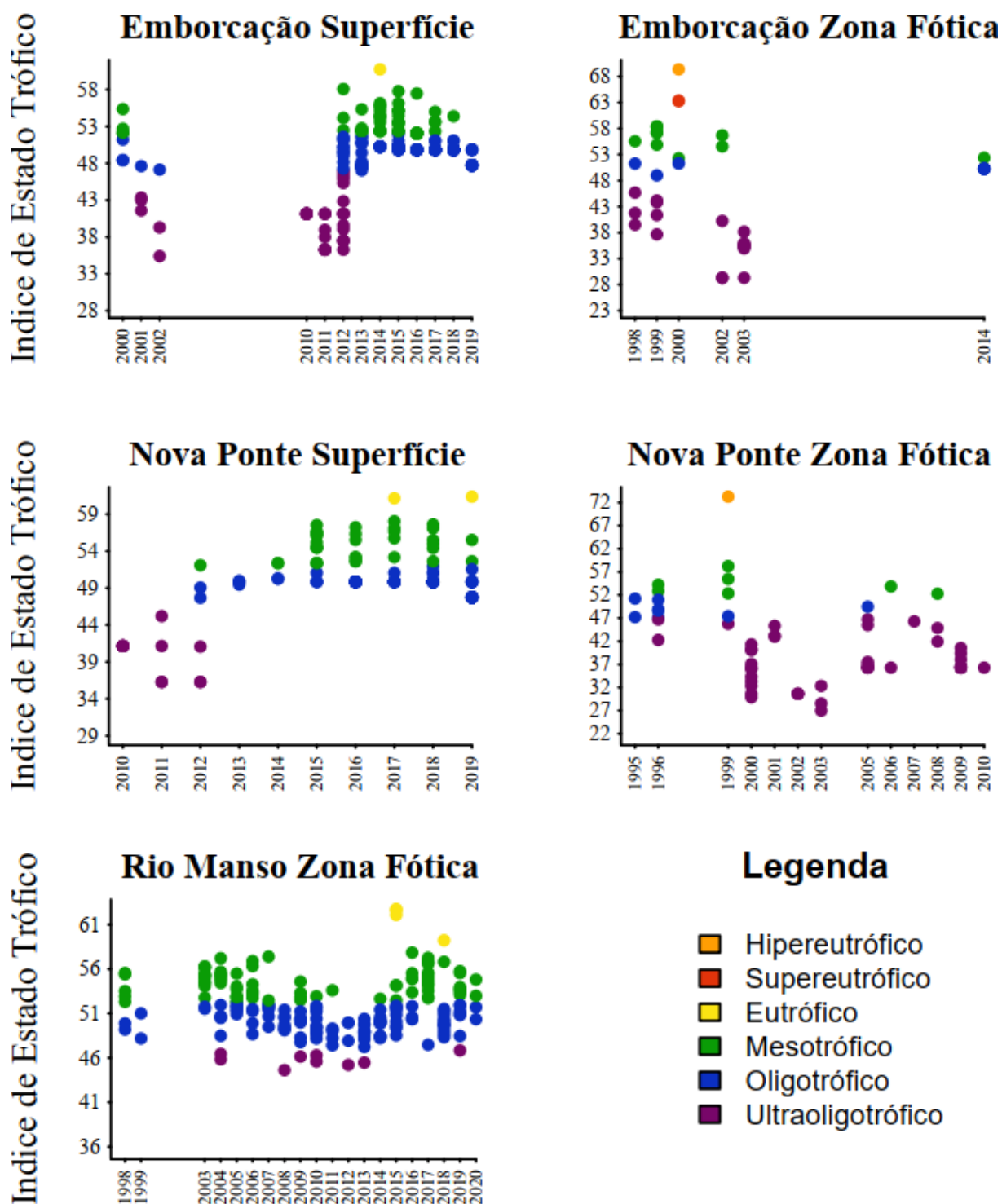
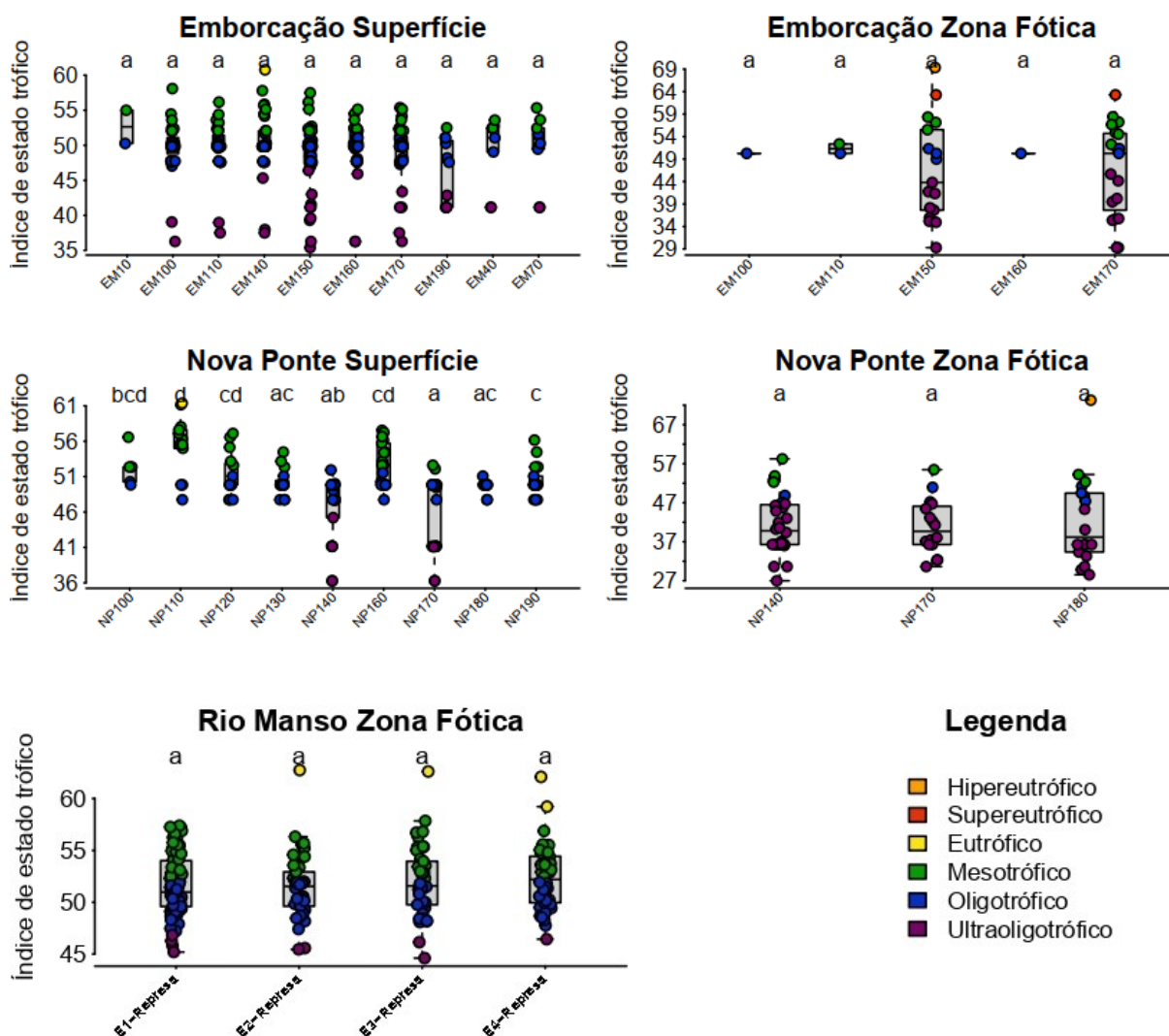


Figura 35 - IET ponderado por estação



Quando avaliado entre estações (Figura 35), para Emborcação os graus de trofia mais elevados foram observados nas estações EM150 e EM170 (zona fótica) e na estação EM140 (superfície). Vale ressaltar que conforme já informado, grande parte dos empreendimentos licenciados se concentram, em sua maioria, 32% em Araguari (MG) e 28% em Monte Carmelo (MG), sendo que esta última é próxima da estação EM140, assim como Estrela do Sul, que juntamente com Cascalho Rico (próximo à estação EM160), são os municípios onde mais se concentram os pivôs centrais.

Na represa de Rio Manso (Figura 33), os índices de estado trófico variaram entre ultraoligotrófico e mesotrófico na estação E1 e ultraoligotrófico e eutrófico nas estações E2, E3 e E4, onde grande parte das atividades licenciadas no entorno, também são classificadas como agrossilvipastoris.

A piora da qualidade da água com relação ao estado de trofia, observada quando o Índice de Estado Trófico foi calculado, pode estar relacionada com o aumento de atividades, sobretudo agrossilvipastoris, no entorno dos reservatórios. Assim como no entorno da UHE de Emborcação e Represa Rio Manso, a maioria dos empreendimentos licenciados no entorno da UHE de Nova Ponte, também são classificados como atividades agrossilvipastoris, sendo que neste último, houve um aumento considerável dessa tipologia que foi de 19% nos anos de 1995 a 2004 para 89% nos anos de 2015 a 2020 das atividades do entorno.

Em Nova Ponte, além do aumento dessas atividades, também se notou aumento de pivôs centrais, cuja as áreas praticamente duplicaram, passando de 139,6km² (1995) para 530,90km² (2020) conforme podemos ver nos mapas das Figura 13 a Figura 16.

Conforme já mencionado, Christofaro e colaboradores (2017), os fertilizantes, são largamente utilizados nesta área. Vale destacar que a presença de pivôs centrais pode estar fortemente associada à probabilidade de lixiviação de fertilizantes para os corpos hídricos, justificando assim, o aporte de nutrientes no entorno neste período, e consequentemente, o aumento do grau de trofia.

6.2.4.2 Correlação da clorofila com os outros parâmetros nas áreas de estudo

As análises de correlação (Pearson) da clorofila a com os outros parâmetros, não mostraram fortes correlações, portanto optou-se em não apresentá-las neste trabalho. Contudo, os gráficos e as tabelas desta análise, estão no APÊNDICE B.

6.2.5 Indicadores de Respostas

A análise do banco de dados permitiu constatar que o monitoramento de série histórica infelizmente mostrou que há muitos dados faltantes, e isso pode interferir no diagnóstico dos ambientes estudados.

Vale destacar que embora o monitoramento periódico dos ambientes estudados já ocorra, é de fundamental importância considerarmos também a frequência na qual eles acontecem, uma vez que para inferir sobre a qualidade da água de um determinado corpo hídrico, é primordial que o monitoramento dos parâmetros de

interesse para os estudos de qualidade da água, bem como para os processos de eutrofização, seja realizado com uma maior frequência.

Com base nisso e nas relações construídas na rede causal, que mostram os impactos causados pelas pressões que vão interferir diretamente no estado desses ambientes, os indicadores de resposta foram selecionados, considerando ações que devem ser feitas, no intuito de mitigar estes impactos causados pelas pressões. Portanto, sugere-se:

- i. O monitoramento periódico com maior frequência, dos parâmetros principalmente nitrogênio total, fosforo total, nitrato, nitrito, nitrogênio amoniacal, ortofosfato, clorofila a, quantificação do fitoplâncton, OD, pH e Turbidez;
- ii. Melhorar o gerenciamento das fontes de impacto que causam as pressões, que nesse caso é o avanço das atividades agrossilvipastoris, que refletem como o principal o uso do solo no entorno do reservatório;
- iii. Aumento da cobertura vegetal de entorno, por meio de implantação de áreas protegidas e de zonas de amortecimento; para conter os processos erosivos e os avanços das atividades que podem ser fonte em potencial do aporte de matéria orgânica e de nutrientes;
- iv. e por fim, o aprimoramento de ações de monitoramento, gerenciamento, conscientização e fiscalização ambiental.

Vale destacar que atuação dos gestores com a comunidade, por meio da implementação e fiscalização de políticas públicas de preservação e uso consciente dos recursos hídricos é de fundamental importância para garantir a sustentabilidade, assegurando que a sociedade interaja e auxilie na preservação dos corpos d'água.

6.2.6 Avaliação da aplicação da rede causal para a ocorrência dos processos de eutrofização em reservatórios

A metodologia das redes causais, utilizando a estrutura PSR, pode ser uma ferramenta promissora para auxiliar na tomada de decisão e no monitoramento dos ambientes aquáticos, a fim de proporcionar melhor manejo dessas áreas, uma vez

que permitem compreender de forma mais clara, as complexas interações de causa e efeito que ocorrem para desencadear processos como o da eutrofização.

Nos três ambientes estudados, o cálculo do índice de estado trófico – IET, mostrou que embora os valores variaram de oligotrófico a mesotrófico na maior parte da série temporal, também houve registros de períodos eutróficos nos três reservatórios estudados, destacando assim a importância da aplicação de metodologias que visam compreender melhor as interações do ambiente e do seu entorno para propor medidas corretivas e preventivas para os processos de eutrofização em reservatórios.

É importante mencionar que para alguns parâmetros dos bancos de dados utilizados, não haviam número de observações suficientes para inferir sobre a quantificação do fitoplâncton por exemplo, que seriam bons indicadores do estado desses ambientes. Alguns parâmetros importantes como ortofosfato, nitrito, também não tiveram dados em todas as datas de coletas para, principalmente o reservatório de Nova Ponte, e isso limitou um pouco a aplicação da rede de forma a trazer informações sobre as correlações desses parâmetros bem como o seu comportamento sazonal no ambiente de estudo.

Vale ressaltar a importância do acesso às informações sobre as atividades de entorno. Por exemplo, no caso da UHE de Emborcação, que está localizado na divisa dos estados de Minas Gerais e Goiás, principalmente para os municípios do estado Goiás, os dados de licenciamento ambiental do Portal Nacional do Licenciamento Ambiental – PNLA, só estavam disponibilizados para os períodos de 2010 a 2014 e 2015 a 2020, não permitindo avaliar as atividades de entorno no mesmo período que foi avaliado para os outros reservatórios, ou seja, de 1995 a 2004; de 2005 a 2014 e de 2015 a 2020 e isso pode ter contribuído para que as relações de entorno não fossem completamente destrinchadas ao passo que os dados não estavam disponíveis.

A construção e avaliação da rede causal permitiu esclarecer quais são os principais fatores que puderam e podem contribuir para desencadear os processos de eutrofização, como por exemplo na UHE de Nova Ponte, podemos apontar como um dos principais fatores, o aumento de áreas destinadas a plantações de monoculturas (pressão) refletido como o aumento dos pivôs centrais que estão diretamente ligados a irrigação. Esse processo pode contribuir para a lixiviação de fertilizantes, que

possuem alta carga de nutrientes, para o reservatório, aumentando a carga alóctone desses nutrientes (estado).

Embora uma grande quantidade de informações e de dados disponíveis, não evitem por si só, os impactos das ações de entorno que vão alterar o estado desses ambientes, a disponibilidade de informações e um monitoramento mais frequente dos parâmetros de interesse para estudo da eutrofização é de fundamental importância para destrinchar as relações de causa e efeito para compreender melhor quais pressões ocorrem nesses ambientes e de que forma elas podem alterar o seu estado e essa compreensão tem vantagens tanto na proposição de medidas corretivas e mitigadoras dos impactos, permitindo que haja uma melhor gestão dos recursos hídricos.

Portanto, recomenda-se a aplicação da metodologia das redes causais para analisar os processos de eutrofização em reservatórios, não somente pela forma clara que as interações são demonstradas, mas também por envolver os principais atores desse processo: desde os gestores dos empreendimentos e gestores de bacia, assim como a comunidade de maneira geral, abrangendo diversos pontos de vista que vão atuar sinergicamente para garantir a sustentabilidade do ambiente.

7 CONCLUSÕES

Os processos de eutrofização antrópica têm se tornado fonte de preocupação por serem um problema crescente, não somente pelos prejuízos que trazem aos gestores de reservatórios de energia elétrica e de abastecimento, mas também para toda a sociedade de maneira geral. Isso pode causar riscos a população (como contaminação por cianotoxinas que muitas vezes podem estar presentes nesses ambientes), se configurando como problema de saúde pública, como também trazem problemas estéticos comprometendo desde a harmonia paisagística do ambiente até mesmo a economia da região.

Os bancos de dados de cada uma das três áreas de estudo foram organizados e avaliados no intuito de compreender o comportamento dos parâmetros, sobretudo daqueles de interesse para o estudo da eutrofização.

No entanto, para alguns parâmetros, não houve observações suficientes para inferir sobre a sazonalidade dos parâmetros nas áreas de estudo como, por exemplo, ortofosfato, nitrito, contagem de fitoplâncton por mL e dados de clorofila a para as amostras de superfície para a represa Rio Manso.

Para aqueles parâmetros com número de observações suficientes, a maioria dos dados não violaram os padrões pré-estabelecidos na legislação no período estudado. A análise crítica dos outliers, por exemplo, permitiu verificar valores maiores que $1000 \mu\text{g L}^{-1}$ de clorofila a, que foram excluídos do banco de dados da represa de Rio Manso.

A avaliação do uso e ocupação do solo, foi feita no mesmo recorte temporal das análises disponíveis nos bancos de dados analisados (de 1995 a 2020), e mostrou que em todos os ambientes houve um aumento das atividades agrossilvipastoris no entorno.

No reservatório da UHE de Nova Ponte, pode-se notar que a medida que houve o aumento, principalmente das atividades agrossilvipastoris, houve também o aumento das áreas de pivôs centrais, e uma queda da qualidade da água em momentos específicos. Embora nenhum dos reservatórios não sejam considerados como

eutrófico, vale destacar que a devida atenção deve ser dada para o avanço dessas atividades para que a qualidade da água não sofra com os impactos das atividades e que o reservatório se mantenha na condição de oligotrófico. O mesmo vale para os demais ambientes, como o reservatório de Emborcação e a represa Rio Manso, onde grande parte das atividades de entorno são atividades agrossilvipastoris.

Vale destacar que a represa de Rio Manso está dentro de uma área de proteção ambiental especial, por ser um manancial destinado a abastecimento de água para consumo humano, e isso contribui para que não haja tantas interferências antrópicas no seu entorno. Mas, ainda assim, a presença de períodos eutróficos no reservatório serve de alerta, uma vez que houve um aumento das atividades agrossilvipastoris, bem como da mineração ao longo dos anos e isso pode contribuir para a queda da qualidade da água desses ambientes.

Os principais indicadores selecionados para construção da rede causal foram: Indicadores de pressão: uso e ocupação do solo (porcentagem de área impactada na bacia ao longo do tempo, a presença de áreas destinadas a irrigação -pivôs centrais, lançamento de esgoto não tratado ou com tratamento insuficiente e a erosão do solo), que por sua vez irão causar impactos, alterando o estado do ambiente.

Os indicadores de estado selecionados foram: a piora qualidade da água (medida pela variação temporal dos parâmetros da qualidade da água; o aporte de nutrientes de matéria orgânica para os corpos hídricos, e a correlação da clorofila a com os outros parâmetros de interesse para o estudo da eutrofização. Sendo que este último não pode ser avaliado por não ter apresentado fortes correlações.

A aplicação das redes causais é uma metodologia multidisciplinar e que visa compreender as causas e efeitos, neste caso, do processo de eutrofização. Essa metodologia mostrou que pode elucidar formas de prevenção dessas ocorrências, bem como alternativas de mitigação do problema.

Estabelecer relações de causalidade nos processos de eutrofização pode ser bem complexo quando avaliamos cada ambiente em separado, pois embora as causas da eutrofização sejam conhecidas, cada ambiente possui características que podem contribuir mais com a evolução desse processo, do que outras. Sendo assim, devido

a essas particularidades, é fundamental que os dados de monitoramento disponíveis sejam robustos e com número de observações suficientes, principalmente dos parâmetros de interesse para o estudo de eutrofização em reservatórios.

Portanto, a aplicação das redes causais, é uma metodologia bastante promissora que engloba diversos agentes sociais, bem como o conhecimento técnico e científico em prol do desenvolvimento sustentável e de melhorias de gestão de recursos hídricos, podendo até mesmo ser utilizada por comitês de gestão de bacias hidrográficas, que é uma das principais contribuições deste trabalho.

8 RECOMENDAÇÕES

No intuito de que futuros trabalhos possam ser desenvolvidos nessa mesma área de pesquisa, recomenda-se:

- Implementação de uma rede de monitoramento mais robusta, com coletas periódicas e mais frequentes, principalmente dos parâmetros de interesse para os estudos da eutrofização (clorofila a, série de nutrientes, fitoplâncton, transparência do disco de Secchi, entre outros) no intuito de permitir uma avaliação mais precisa e robusta do estado desses ambientes; bem como a aplicação de outros métodos de análises estatísticas que possam elucidar melhor a dinâmica em toda coluna d'água, bem como a sazonalidade dos parâmetros nos reservatórios;
- Disponibilidade de informações no que diz respeito ao licenciamento ambiental de empreendimentos em geral, não apenas para o estado de Goiás e em outras unidades da federação que não disponham de dados para aplicação dessa metodologia para melhorar a gestão em outros reservatórios e até mesmo de bacias hidrográficas;
- Promover um diálogo com a comunidade local, gestores públicos das áreas de entorno no intuito de identificar os principais gargalos no monitoramento desses ambientes e juntamente com comunidade científica, promover políticas de conscientização e fiscalização ambiental para garantir a sustentabilidade do ambiente e dos recursos hídricos;
- Para o avanço do conhecimento relacionado à aplicação de redes causais na análise do processo de eutrofização em reservatórios, sugere-se a aplicação do modelo mais completo, como por exemplo o DPSIR (*drive forces, pressure, state, impact, response*), ou seja: forças motrizes, pressão, estado, impacto e resposta, a fim de ampliar a análise para os cinco níveis, incluindo também as forças motrizes e impactos, no intuito de elucidar ainda mais as complexas interações de causalidade para cada ambiente na construção e aplicação da rede causal.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUILERA, A.; BERRENDERO GÓMEZ, E.; KASTOVSKY, J.; ECHENIQUE, R.O.; SALERNO, G.L. The polyphasic analysis of two native Raphidiopsis isolates supports the unification of the genera Raphidiopsis and Cylindrospermopsis (Nostocales, Cyanobacteria). *Phycologia*, v. 57, n. 2, p. 130-146, 2018.

ANA. Agência Nacional de Águas. Indicadores de qualidade índice do estado trófico. 2010. Disponível em: <<http://pnqa.ana.gov.br/indicadores-estado-trofico.aspx>>. Acesso em: 19 jul. 2021.

ANA. Agência Nacional de Águas. Portal eletrônico. Rede Nacional de Monitoramento de Qualidade da Água. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/monitoramento/panorama-dasaguas/qualidade-da-agua/rnqa>>. Acesso em: 19 jul. 2021

APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. Standard methods for the examination of water and wastewater. 23. ed. Washington: APHA/WEF/AWWA., 2017.

ASSUNÇÃO, M.; VIANA, D.; IBRAHIM, E. Análise da qualidade da água no período de 2012 a 2015 do reservatório da UHE Emborcação, Minas Gerais, e-Scientia, v. 9, n. 1, p. 1-13, 2016

AWWA. AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. Algae: Source to Treatment, Manual of Water Supply Practices M57. First Edition. Denver, CO. 2010.

AZEVEDO, S. M. F. O.; CARMICHAEL, W. W.; JOCHIMSEN, E. M.; RINEHART, K. L.; LAU, S.; SHAW, G. R. Human intoxication by microcystins during renal dialysis treatment in Caruaru-Brazil. *Toxicology*, v. 181–182, p. 441–446. 2002.

BERTONE, E; BURFORD, M. A.; HAMILTON, D. P. Fluorescence probes for real-time remote cyanobacteria monitoring: A review of challenges and opportunities. *Water Research*, v. 141, p. 152-162, 2018.

BLÁHA, L., BABICA, P., MARŠÁLEK, B . Toxins produced in cyanobacterial water blooms–toxicity and risks. *Interdisciplinary Toxicology*, v. 2, p. 36-41, 2009.

BOORI, M. S.; CHOUDHARY, K.; PARINGER, R.; KUPRIYANOV, A. Ecosystemhealth assessment based on pressure state response framework using remote sensing and geographical information system. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, v. 767, p. 1-8, 2021

BRANDT. Plano ambiental de conservação e uso do entorno do reservatório artificial – PACUERA-UHE Nova Ponte – Cemig Geração e Transmissão S.A. v. 1, 2 e 3. 2020

BRANDT. Plano ambiental de conservação e uso do entorno do reservatório artificial – PACUERA-UHE Emborcação – Cemig Geração e Transmissão S.A. v. 1, 2 e 3. 2019

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Balanço Energético Nacional 2022/Ministério de Minas e Energia, colaboração Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME: EPE, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022> . Acesso em: 06 de Agosto de 2022

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Plano Nacional de Energia 2050/Ministério de Minas e Energia; colaboração Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME: EPE, 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2050>. Acesso em: 06 de Agosto de 2022

BRIDGES, E. M., HANNAM, I. D., OLDEMAN, L. R., DE VRIES, F.W.T.P., SCHERR, S.J., SOMBATPANIT, S. Response to Land Degradation. Science Publishers, Enfield, NH, v.22, p. 519, 2001.

BRIENT, L., GAMRA, N. B., PERIOD, M., ROUMAGNAC, M., ZELLER, P., BORMANG, M., MEJEAN, A, PLOUX, O., BIEGALA, I.C. Rapid Characterization of Microcystin-Producing Cyanobacteria in Freshwater Lakes by TSA-FISH (Tyramid Signal Amplification-Fluorescent In Situ Hybridization), Front. Environ. Sci., v. 5 p. 1-7, 2017.

BRIENT, L., LENGRONNE, M., BERTRAND, E., ROLLAND, D., SIPEL, A., STEINMANN, D., BAUDIN, I., LEGEAS, M., LE ROUZIC, B., BORMANS, M. A

phycocyanin probe as a tool for monitoring cyanobacteria in freshwater bodies. *Journal of Environmental Monitoring*, v. 10, p. 248-255, 2008. doi:10.1039/b714238b

BROWN, A., FOSS, A., MILLER, M. A., GIBSON, Q. Detection of cyanotoxins (microcystins/ nodularins) in livers from estuarine and coastal bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) from Northeast Florida. *Harmful Algae*, v. 76, p. 22-34, 2018

CARACCILOLO, A. B., DEJANA, L., FAJARDO, C., GRENNI, P., MARTIN, M., MENGES, G., SANCHÉZ-FORTÚN, S., LETTIERI, T., SACCA, M. L., MEDLIN, L.K. A new fluorescent oligonucleotide probe for in-situ identification of *Microcystis aeruginosa* in freshwater. *Microchemical Journal*, v. 148, p. 503-513, 2019.

CAREY, C. C., IBELINGS, B. W., HOFFMANN, E. P., HAMILTON, D. P., BROOKES, J. D., 2012. Ecophysiological adaptations that favour freshwater cyanobacteria in a changing climate. *Water Res.* V. 46, 1394–1407p. 2012

CARLSON, R. E. A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*, v. 22, n. 2, p.261-269, 1977

CARMICHAEL, W. W. Cyanobacteria secondary metabolites – the cyanotoxins. *Journal of Applied Microbiology*, v. 72, p. 445-459, 1992

CARMICHAEL, W. W. The toxins of cyanobacteria. *Scientific American*, v.270, p. 64-72, 1994.

CARMICHAEL, W. W., AZEVEDO, S. M. F. O., AN, J., MOLICA, R. J. R., JOCHIMSEN, E. M., LAU, S., et al. Human fatalities from cyanobacteria: chemical and biological evidence for cyanotoxins. *Environmental Health Perspectives*, v. 109, p. 663–668. 2002

CEMIG Companhia Energética de Minas Gerais. UHE Emborcação. Disponível em: <https://www.cemig.com.br/usina/uhe-emborcacao/> Acesso em: 18 de julho de 2021.

CEMIG Companhia Energética de Minas Gerais. UHE Nova Ponte. Disponível em: <https://www.cemig.com.br/usina/uhe-nova-ponte/>. Acesso em: 18 de julho de 2021.

CHRISTOFARO, C.; LEÃO, M. M. D.; OLIVEIRA, S. C.; VIANA, D. T.; AMORIM, C. C.; CARVALHO, M. D. Spatio-temporal variations of water quality in Nova Ponte Reservoir, Araguari River Basin, Brazil. *Water Science & Technology: Water Supply*, v. 17, nº. 6, p. 1507-1514, 2017.

CODD, G. A., MORRISON, L. F., METCALF, J. S. Cyanobacterial toxins: risk management for health protection. *Toxicol Appl. Pharmacol*, v. 203, 264-272p. 2005

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB Qualidade das Águas Interiores no Estado de São Paulo. Apêndice D – Índices de Qualidade das águas. 32.p. São Paulo: CETESB, 2018.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. Guia nacional de coleta e preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos, CETESB, Organizadores: Carlos Jesus Brandão ... [et al.]. - São Paulo: CETESB; Brasília: ANA, 2011, 326p.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. Manual de cianobactérias planctônicas: legislação, orientações para o monitoramento e aspectos ambientais CETESB, São Paulo, 2013. 47p.

CONSAG, Engenharia LTDA. Ampliação do sistema de produção de água tratada, Relatório de controle ambiental. Vol único, COPASA, 2009.

COSTA, P. Avaliação da qualidade das águas superficiais de reservatórios e seus tributários por meio de abordagens quali-quantitativas: estudo de caso dos reservatórios de Emborcação e Nova Ponte – MG. 2021. 176p. Dissertação (mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, MG, UFMG, 2021

DESCY, J. P., LEPRIEUR, F., PIRLOT, S., LEPORCQ, B., VAN WICHELEN, J., PERETYATKO, A., TEISSER, S., CODD, G. A., TRIEST, L., VYVERMAN, W., WILMOTTE, A. Identifying the factors determining blooms of cyanobacteria in a set of shallow lakes. *Ecological Informatics*, v. 34, p-129-138. 2016.

DÍAZ-MORENO, A. B. Possibilidades metodológicas de aplicación de indicadores ambientales a nível municipal. In.: Revista de estudos ambientais, Blumenau, v. 1, n. 1, p. 77-95, jan/abr, 1999

DING, Q.; SHI, X.; ZHUANG, D.; WANG, Y. Temporal and spatial distributions of ecological vulnerability under the influence of natural and anthropogenic factors in an eco-province under construction in China. Sustainability, v. 10, n. 3087, p.1-23, 2018.

DOLABELA, R. F.; BEMFICA, J. C. A produção de informação sobre o meio ambiente no Brasil. Condicionantes Técnicos, Sociais e Políticos. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM CIÊNCIA DA INFORMAÇÃO, 7, 2006, Marília. Anais... Ed. UNESP, 2006.

EEA. Environmental signals. European Environment Agency, Copenhagen. Report No. 6, 109 p. 2000

ELLIOT, J. A. Is the future blue-green? A review of the current model predictions of how climate change could affect pelagic freshwater cyanobacteria. Water Res., v. 46, 1364-1371p. 2012.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGETICA (EPE). Balanço Energético Nacional - BEN Relatório síntese 2022: Ano base: 2021. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-631/BEN_S%C3%ADntese_2022_PT.pdf. Acesso em: 19 jul. 2022

ESTEVES, F. de A. (coordenador). Fundamentos de Limnologia. 3. Ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011. 826p.

FERREIRA JUNIOR, F. B. Mapeamento da cobertura do solo utilizando imagem áster – Usina hidrelétrica de Emborcação. 2005. Monografia (Departamento de Cartografia, Instituto de Geociências) Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2005.

FERREIRA, H. L. M. N., DE MELO, M. C., FREITAS, M. D. F. P. DE.P.; MEYER, S. T., CAMPOS, M. C. S., FELIPE, G. A. Ambientes aquáticos em Minas Gerais:

qualidade ecológica. 155p. Belo Horizonte: Centro de Inovação e Tecnológica, SENAI, 2017.

FIDALGO, E. C. C. Critérios para a análise de métodos e indicadores ambientais usados na etapa de diagnóstico de planejamentos ambientais. 2003. 276f. Tese (Doutorado em Planejamento e Desenvolvimento Rural Sustentável) – Universidade de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas. 2003

HACKETT, J. D., WISECAVER, J. H., BROSNAHAN, M. L., KULIS, D. M., ANDERSON, D. M., BHATTACHARYA, D., PLUMELY, F. G., ERDNER, D. L. Evolution of saxitoxin synthesis in cyanobacteria and dinoflagellates. *Molecular Biology and Evolution*, v. 30, p. 70–78, 2013.

HAMMOND, A., ADRIAANSE, A., RODENBURG, E., BRYANT, D., WOODWARD, R. Environmental Indicators: A Systematic Approach to Measuring and Reporting on Environmental Policy Performance in the Context of Development. World Resources Institute, Washington, DC, 50p. 1995

HAQUE, F., BANAYAN, S., YEE, J., CHIANG, Y. W. Extraction and applications of cyanotoxins and other cyanobacterial secondary metabolites. *Chemosphere*, v. 183, p.164-175, 2017.

HONG, J. F., OUDDANE, B., HWANG, J. S., DAHMS, H. D. In silico assessment of human health risks caused by cyanotoxins from cyanobacteria. *Biocell*, v.45, p. 65-77, 2021.

IGAM. Instituto Mineiro de Gestão das Águas. Índice de Estado Trófico – IET. 2019. Disponível em: <<http://portalinfohidro.igam.mg.gov.br/sem-categoria/322-indice-de-estadotrofico-iet>>. Acesso em: 19 jul. 2021.

JACKSON, L. E., KURTZ, J. C., FISCHER, W. S. Evaluation guidelines for ecological indicators. Environmental Protection Agency, Washington D.C., Report n. EPA/620/R-99/005, 110p., 2000.

JIANG, W., ZHOU, W., UCHIDA, H., KIKUMORI, M., IRIE, K., WATANABE, R., SUZUKI, T., SAKAMOTO, B., KAMIO, M., NAGAI, H. A new lyngbyatoxin from the hawaiian cyanobacterium *Moorea producens*. *Marine Drugs*, v. 5, p. 2748–2759, 2014.

JOCHIMSEN, E. M., CARMICHAEL, W. W., AN, J. S. Liver failure and death following exposure to microcystin toxins at a hemodialysis center in Brazil. *The New England Journal of Medicine*, v. 36, p. 373–378. 1998.

KASINAK, J. E., HOLT, B. M., CHISLOCK, M. F., WILSON, A. E. Benchtop fluorometry of phycocyanin as a rapid approach for estimating cyanobacterial biovolume. *Journal of Plankton Research*. v. 37(1): p. 248-257, 2015.

LAGO, J., RODRÍGUEZ, P. L., BLANCO, L., VIEITES, J. M., CABADO, A. G. Tetrodotoxin, an extremely potent marine neurotoxin: Distribution, toxicity, origin and therapeutical uses. *Marine Drugs*, v. 13, p. 6384-6406, 2015.

LAMPARELLI, M. C. Grau de trofia em corpos d'água do estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento. 2004. 238 f. Tese (Doutorado em Ciências na Área de Ecossistemas Terrestres e Aquáticos) – Instituto de Biociências, Unidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

LI, W.; QI, J.; HUANG, S.; FU, W.; ZHONG, L.; HE, B. A pressure-state-response framework for the sustainability analysis of water national parks in China. *Ecological indicators*, v. 131, n. 108127, p. 1-12, 2021.

MANKIEWICZ, J., TARCZYNSKA, M., WALTER, Z., ZALEWSKI, M. Natural toxins from cyanobacteria. *Acta Biologica Cracoviensia. Series Botanica* v. 45, p. 9-20, 2003.

MATOS, A. C. S.; LEMOS, R. S.; SILVA, T. F. G.; ELEUTÉRIO, J. C.; NASCIMENTO, N. O. Evolução do uso e ocupação do solo em mananciais de abastecimento metropolitano na região metropolitana de Belo Horizonte, estado de Minas Gerais. *Associação Brasileira de Recurso Hídricos. XXII SBRH*, 2017

MESS, A. Qualidade de água dos reservatórios. Capacitação Agência Nacional de Águas – ANA. Disponível em: <http://dspace.agencia.gov.br:8080/conhecerhana/2205> Acesso em: 18 de julho de 2021.

METCALF, J. S., CODD, G. A. Cyanotoxins. In: Whitton, B. A. (Ed), In ecology of cyanobacteria II. Their Diversity in space and time. Springer. P. 651-675. 2012

MINAS GERAIS. Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 01, de 05 de maio de 2008. 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. Belo Horizonte: Diário Executivo do Estado de Minas Gerais, 2008.

MORAES, A. R. Indicadores para a caracterização de serviços ambientais de áreas úmidas. Estudo de caso: a área de proteção ambiental das ilhas e várzeas do rio Paraná. Brasília, 2011. Tese (doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, 180p. 2011.

MORAES, A. R., MINOTI, R. T., BERNARDES, R. S. O uso de redes causais e indicadores para promoção da qualidade ambiental: enfoque para os serviços ambientais de áreas alagáveis. OLAM – Ciencia e tecnologia. Rio Claro/SP. v. 10 p.118, 2010.

NIEMEIJER, D.; DE GROOT, R. S. A conceptual framework for selecting environmental indicator sets. Ecological Indicators, Amsterdam, v. 8, p. 14-25, 2008.

ODUM, E. P. The strategy of ecosystem development. Science, Washington, v. 164, p. 262-270, 1971

OECD Environmental Indicators for Agriculture: Volume 1 Concepts and Frameworks. Organisation for Economic Cooperation and Development, 45 pp., Paris, 1999.

OECD. Core Set of Indicators for Environment Performance Reviews. Organisation for economic co-operation and development. Group on the State of Environment, Paris, 2001.

OECD. Environmental Indicators: Development, measurement and use. Organisation for Economic Cooperation and Development. Paris, 2003.

OECD. Organization for Economic Cooperation and Development. Core set of indicators for environmental performance reviews. Paris: OECD, 1993.

OECD. Towards Sustainable Development: Environmental Indicators. Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, 129 pp., 1998.

OLIVEIRA, S. M. A. C. Tratamento estatístico de dados ambientais. Apostila. Universidade Federal de Minas Gerais. 2019

PAERL, H. W., HUISMAN, J. Climate change: a catalyst for global expansion of harmful cyanobacterial blooms. *Environ. Microbiol. Rep.* v.1, 27–37p. 2009.

PAERL, H.W., HUISMAN, J. Blooms like it hot. *Science* v. 320, 57–58p. 2008.

PAIVA, F. C. R. Bioprospecção de cianobactérias brasileiras dirigida a obtenção de cianopeptídeos inibidores de proteases. 2015. 107 p. Dissertação. (mestrado em toxicologia e Análises toxicológicas, Universidade de São Paulo). São Paulo, 2015.

PIMENTEL, J. S. M. Quantificação de cianobactérias produtoras de microcistina no reservatório de Furnas (MG), através da PCR em tempo real, e sua relação com fatores ambientais. Belo Horizonte, 2009. Dissertação (mestrado em Biologia Vegetal), Instituto de Ciências Biológicas da Universidade Federal de Minas Gerais, 95gf. 2009.

PINTO, F., PACHECO, C. C., FERREIRA, D., FERREIRA, P. M., TAMAGNINI, P. Selection of Suitable Reference Genes for RT-qPCR Analyses in Cyanobacteria. *Plos One*, v. 7, p.1-10, 2012.

RAMOS, T. B.; DAROUICH, H.; GONÇALVES, M. C.; BRITO, D. BRANCO, M. A. C.; MARTINS, J. C.; FERNANDES, M. L.; PIRES, F. P.; MORAIS, M.; NEVES, R. An integrated analysis of the eutrophication process in the Enxoé reservoir within the DPSIR framework. *Water*, v. 10, n.1576, p.1-20. 2018.

REDFIELD, A. C. The biological control of chemical factors in the environment. *Amer. Sci.*, Research Triangle Park, NC, EUA, v. 46, p. 205-221, 1958.

REICHEALDT, E. S., GHADOUANI, A. Effects of rainfall patterns on toxic cyanobacterial blooms in a changing climate: between simplistic scenarios and complex dynamics. *Water Res.* v. 46, 1372–1393p. 2012.

REYNOLDS, C. S. *Ecology of Phytoplankton*. Cambridge University Press, Cambridge. 2006

RIGOSI, A., HANSON, P., HAMILTON, D.P., HIPSEY, M.J., RUSAK, A., BOIS, J., SPARBER, K., CHORUS, I., WATKINSON, A.J., QIN, B., KIM, B., BROOKES, J.D., 2015. Determining the probability of cyanobacterial blooms: the application of Bayesian networks in multiple lake systems. *Ecol. Appl.*v. 25, 186–199p. 2015.

RINEHART, K. L., HARADA, K., NAMIKOSHI, M., CHEN, C., HARVIS, C. A. Nodularin, microcystin and the configuration of ADDA, *Journal of the American Chemical Society*, v. 11, p. 8557–8558, 1988.

RUFINO, R. C. Avaliação da qualidade ambiental do Município de Tubarão (SC) através do uso de indicadores ambientais. 2002. 123fl. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC: UFSC, 2002

SALLES, P. S. B. A., WALTER, M. I. T., CASTRO, H. C. O. Sustentabilidade Ambiental: objetivo 7: garantir a sustentabilidade Ambiental. Organização UnB, PUC/Minas/IDHS, PNUD, 308p. 2004.

SAMPAIO, J. Cianopeptídeos inibidores de proteases produzidos por cianobactérias brasileiras. 2012. 175p. Dissertação (mestrado em toxicologia e análises toxicológicas Universidade de São Paulo). São Paulo, 2012.

SHAPIRO, J. 1997. The role of carbon dioxide in the initiation and maintenance of blue green dominance in lakes. *Freshw. Biol.* v.37, 307–323p. 1997.

SMEETS, E. & WETERINGS, R. Environmental indicators: typology and overview. European Environment Agency. Report n.25, Copenhagen, 1999.

SOARES, A. B.; FILHO, J. C. L. S.; DE ABREU, M. C. S.; SOARES, F. A. Revisando a estruturação do modelo DPSIR como base para um sistema de apoio à decisão para sustentabilidade de bacias hidrográficas. *Revista em Agronegócios e Meio Ambiente*. V. 4, n.3, p. 521-545, 2011.

STANIER RY & COHEN-BAZIRE G. Phototrophic prokaryotes: the cyanobacteria. *Annu Rev Microbiol*, V. 31, p. 225-274, 1977.

TOLEDO, A. P. J.; TALARICO, M.; CHINEZ, S. J.; AGUDO, E. G. A aplicação de modelos simplificados para a avaliação do processo da eutrofização em lagos e reservatórios tropicais. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Balneário Camboriú, Santa Catarina. ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. p.1-34, 1983

TSUCHIYA, S., CHO, Y., KONOKI, K., NAGASAWA, K., OSHIMA, Y., YOTSU-YAMASHITA, M. Synthesis of a tricyclic bisguanidine compound structurally related to saxitoxin and its identification in paralytic shellfish toxin-producing microorganisms, *Chemistry A. European Journal*, v. 21, p. 7835-7840, 2015.

TUNDISI, J. G.; TUNDISI-MATSUMURA, T. *Limnologia*. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 631p.

U.S. EPA Environmental Protection Agency (U.S. EPA). 1997. Arar, E. J. and G. B. Collins. Method 445.0: In Vitro Determination of Chlorophyll a and Pheophytin a in Marine and Freshwater Algae by Fluorescence (Revision 1.2). National Exposure Research Laboratory, Office of Research and Development. Cincinnati, OH. Available online at: https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?dirEntryId=309417.

US EPA. United States Environmental Protection Agency (2000). In: Jackson, L.E., Kurtz, J.C., Fisher, W.S. (Eds.), *Evaluation Guidelines for Ecological Indicators*. EPA/620/R-99/005, US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Research Triangle Park, NC.

US EPA. United States Environmental Protection Agency. Water Treatment Optimization for Cyanotoxins. Version. 1.0. Office Water (MS-140) EPA 810-B-16-007. 2016.

VIANA, T. H. Estudo do conteúdo de calor e suas influências sobre variáveis limnológicas em reservatórios de abastecimento de água. 2009. Tese de doutorado (Programa de Pós Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) Universidade Federal de Minas Gerais Belo Horizonte 2009.

WACKLIN, P., HOFFMANN, L. & KOMÁREK, J. Nomenclatural validation of the genetically revised cyanobacterial genus *Dolichospermum* (Ralfs ex Bornet et Flahault) comb. nova. *Fottea*. v. 9(1), p. 59-64. 2009.

WASHER, D.M. Agri-Environmental Indicators for Sustainable Agriculture in Europe. European Centre for Nature Conservation, Tilburg, 240 p. 2000.

WHO. Guidelines for safe recreational water environments. Volume 1, Coastal and fresh waters. 2003. Chapter 8, Algae and cyanobacteria in fresh water. Geneva, World Health Organization.

ZELLER, P., MÉJEAN, A., BIEGALA, I., CONTREMOULINS, V., PLOUX, O. Fluorescence in situ hybridization of *Microcystis* strains producing microcystin using specific mRNA probes. *Letters in applied microbiology*. V. 63 p.376-383. 20.

APÊNDICE A – Localização das Estações

Quadro 8 - Estações amostrais do reservatório da UHE de Nova Ponte e dos seus principais tributários-ANEXO

Estação amostral	Município	Bacia hidrográfica	Curso d'água	Tipo de ambiente	Coordenadas Geográficas		Localização
					Latitude	Longitude	
NP110	Perdizes	Rio Araguari PN2	Rio Capivara	Lótico	19° 21' 36" S	47° 02' 49" O	Estrada relocada que conduz a Perdizes
NP120	Patrocínio	Rio Araguari PN2	Reservatório	Lêntico	19° 12' 50" S	47° 02' 11" O	A jusante do braço do Rio Capivara
NP130	Patrocínio	Rio Araguari PN2	Reservatório	Lêntico	19° 12' 50" S	47° 20' 00" O	A jusante do Braço do Ribeirão Santo Antônio
NP140	Pedrinópolis	Rio Araguari PN2	Reservatório	Lêntico	19° 06' 21" S	47° 31' 51" O	Porção central do reservatório
NP160	Santa Juliana	Rio Araguari PN2	Rio Araguari	Lótico	19° 29' 00" S	47° 32' 37" O	A jusante da PCH Pai Joaquim, na rampa de passagem de barcos
NP170	Pedrinópolis	Rio Araguari PN2	Reservatório	Lêntico	19° 10' 28" S	47° 38' 40" O	Porção central do reservatório
NP180	Nova Ponte	Rio Araguari PN2	Reservatório	Lêntico	19° 07' 43" S	47° 41' 32" O	Entre o barramento e o braço do Rio Quebra Anzol, próximo as boias de segurança
NP190	Nova Ponte	Rio Araguari PN2	Rio Araguari	Lótica	19° 07' 54" S	47° 41' 57" O	A jusante da UHE, na rampa que descem os barcos, passando atrás da subestação

Fonte: SISÁGUA, 2022

Quadro 9 - Estações amostrais do reservatório da UHE de Emborcação e dos seus principais tributários

Estação amostral	Município	Bacia hidrográfica	Curso d'água	Tipo de ambiente	Coordenadas Geográficas		Localização
					Latitude	Longitude	
EM 40	Davinópolis	Alto Paranaíba PN1	Rio São Marcos	Lótico	18° 13' 29" S	47° 37' 36" O	Tributário do reservatório, a montante do mesmo.
EM 70	Douradoquara	Alto Paranaíba PN1	Rio Dourados	Lótico	18° 21' 39" S	47° 39' 08" O	Braço do Rio Dourados.
EM 100	Grupiara	Alto Paranaíba PN1	Rio Perdizes	Lêntico	18° 27' 08" S	47° 42' 50" O	Braço do Rio Perdizes, próximo a Grupiara.
EM 110	Três Riachos	Alto Paranaíba PN1	Reservatório	Lêntico	18° 24' 23" S	47° 45' 58" O	Porção central do reservatório.
EM 140	Cascalho Rico	Alto Paranaíba PN1	Rio Barragem	Lêntico	18° 33' 32" S	47° 45' 55" O	Tributário do reservatório, a montante do mesmo.
EM 150	Três Ranchos	Alto Paranaíba PN1	Reservatório	Lêntico	18° 26' 52" S	47° 50' 58" O	Porção central do reservatório.
EM 160	Cascalho Rico	Alto Paranaíba PN1	Rio das Pedras	Lêntico	18° 33' 36" S	47° 53' 50" O	Braço Rio das Pedras, próximo a Cascalho Rico.
EM 170	Araguari	Alto Paranaíba PN1	Reservatório	Lêntico	18° 27' 48" S	47° 58' 48" O	Próximo à barragem, a montante do barramento.
EM 190	Araguari	Alto Paranaíba PN1	Rio Paranaíba	Lótico	18° 27' 03" S	47° 59' 29" O	Próximo à barragem, a jusante do reservatório.

Fonte: SISÁGUA, 2022

Quadro 10 - Estações amostrais do reservatório de Rio Manso e dos seus principais tributários

Estação amostral	Bacia hidrográfica	Curso d'água	Tipo de ambiente	Coordenadas Geográficas		Localização
				Latitude	Longitude	
E1	Rio Paraopeba SF3	Rio Manso	Lêntico	20° 8' 46" S	44° 15' 37" O	200m torre de tomada
E2	Rio Paraopeba SF3	Rio Manso	Lêntico	20° 9' 52" S	44° 16' 9" O	Encontro braço Rio Veloso/Manso
E3	Rio Paraopeba SF3	Rio Manso	Lêntico	20° 10' 44" S	44° 17' 55" O	Encontro braço Rio Veloso
E4	Rio Paraopeba SF3	Rio Manso	Lêntico	20° 13' 30" S	44° 16' 54" O	Encontro Braço Rio Manso
E6	Rio Paraopeba SF3	Rio Manso	Lótico	20° 9' 44" S	44° 20' 40" O	Represa Rio Manso, Rio Veloso, jusante da BR381
E7	Rio Paraopeba SF3	Rio Manso	Lótico	20° 14' 12" S	44° 17' 3" O	Represa Rio Manso a montante do lago
E8	Rio Paraopeba SF3	Rio Manso	Lótico	20° 9' 2" S	44° 14' 36" O	Represa Rio Manso fluxo jusante embaixo da ponte
E9	Rio Paraopeba SF3	Rio Manso	Lótico	20° 9' 33" S	44° 19' 41" O	Represa Rio Manso – córrego Quéias jusante BR 381
E10	Rio Paraopeba SF3	Rio Manso	Lótico	20° 12' 18" S	44° 18' 41" O	Represa Rio Manso – Córrego Lamas montante do lago
E11	Rio Paraopeba SF3	Rio Manso	Lótico	20° 11' 42" S	44° 19' 35" O	Represa Rio Manso – Córrego Grande, montante do lago

Fonte: COPASA, 2022

APÊNDICE B – CORRELAÇÕES DE PEARSON

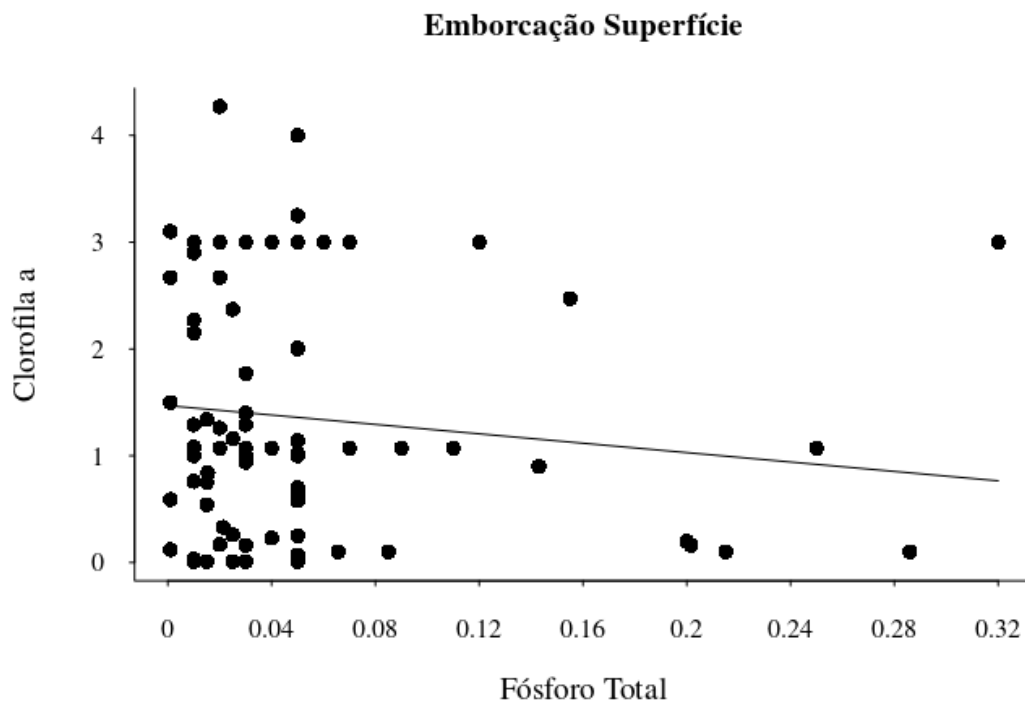
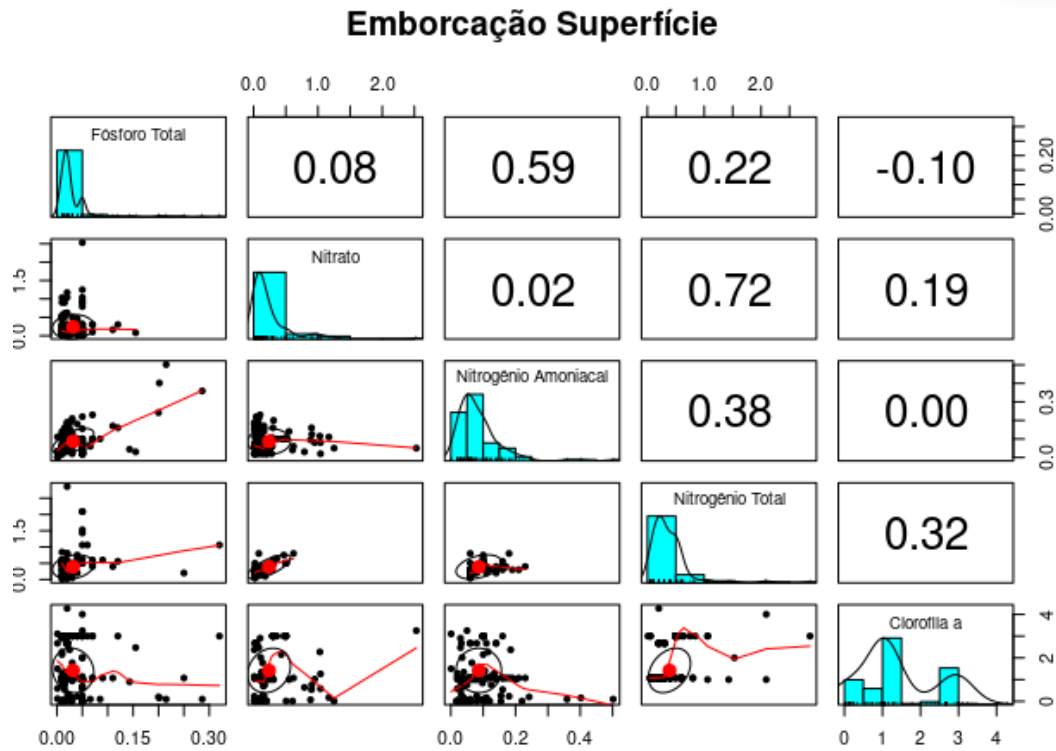
Tabela 1 - Correlação da clorofila (variável resposta) com os parâmetros N amoniacal, N total, Nitrato e Fósforo total no reservatório de Emborcação, na profundidade de superfície (modelos completo e mínimo)

Variável	GL	Soma dos quadrados	Média dos quadrados	Valor F	Valor p
Fósforo total	1	2.4473	2.4473	4.7892	0.0327523*
N amoniacal	1	0.0898	0.0898	0.1757	0.6766955
N total	1	10.9094	10.9094	21.3489	2.234 e ⁻⁰⁵ *
Nitrato	1	7.0995	7.0995	13.8932	0.0004466*
Resíduos	57	29.1274	0.5110	-	-

Variável	GL	Soma dos quadrados	Média dos quadrados	Valor F	Valor p
Fósforo total	1	2.4473	2.4473	4.8523	0.0315962*
Nitrogênio total	1	10.5848	10.5848	20.9868	2.502 e ⁻⁰⁵ *
Nitrato	1	7.3887	7.3887	14.6498	0.0003196*
Resíduos	58	29.2527	0.5044		

*Resultados significativos (p valor < 0,05 para α=95%)

Figura 36 - Correlação Reservatório UHE Emborcação Superfície



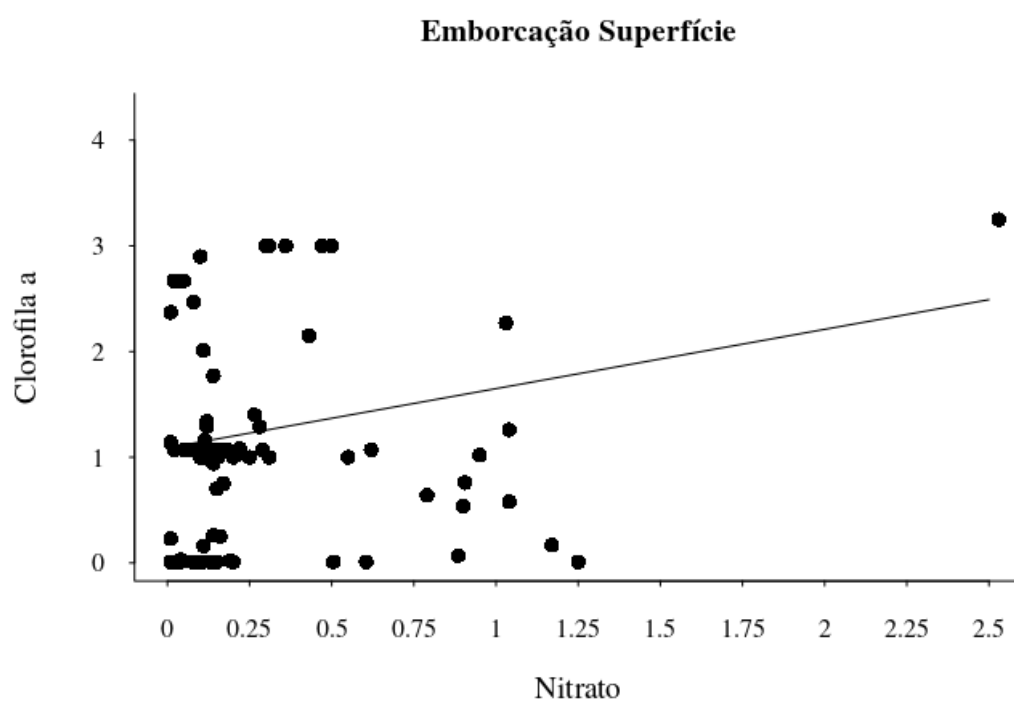
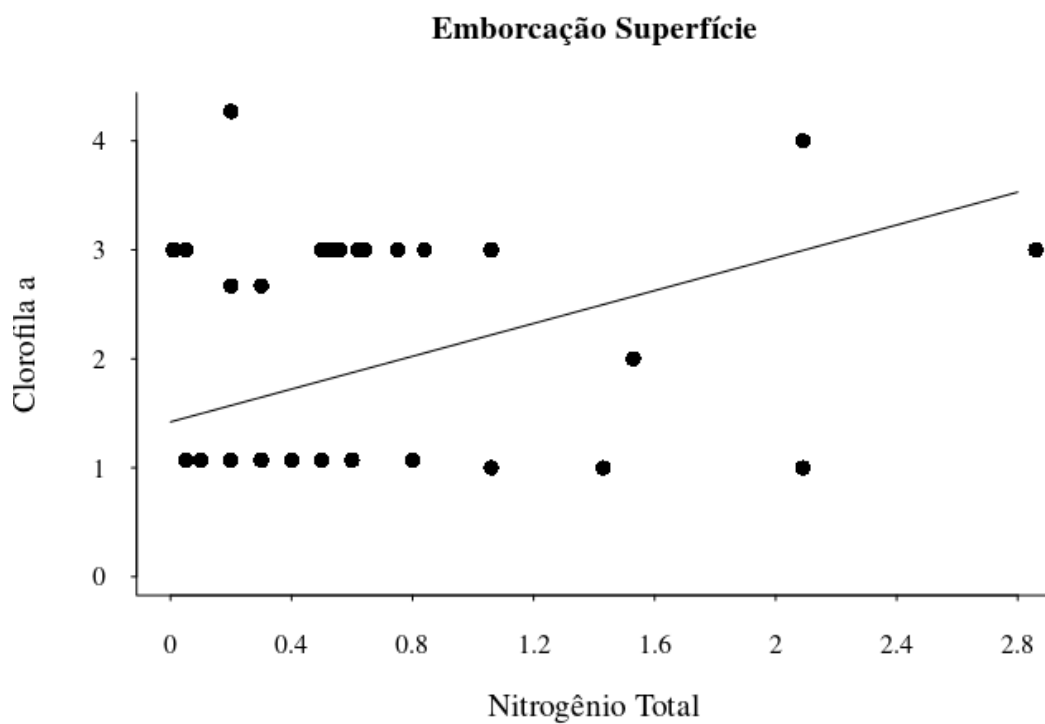


Tabela 2 - Correlação da clorofila (variável resposta) com os parâmetros N amoniacal e Fósforo total no reservatório de Emborcação na profundidade de zona fótica (modelos completo e mínimo)

Variável	GL	Soma dos quadrados	Média dos quadrados	Valor F	Valor p
Fósforo total	1	52.07	52.07	2.2231	0.1444379
N amoniacal	1	330.88	330.88	14.1258	0.0005896*
Resíduos	37	866.69	23.42		

Variável	GL	Soma dos quadrados	Média dos quadrados	Valor F	Valor p
N amoniacal	1	225.82	225.825	8.3817	0.00625*
Resíduos	38	1023.82	26.943	-	-

*Resultados significativos (p valor < 0,05 para $\alpha=95\%$)

Figura 37 - Correlação Reservatório UHE Emborcação Zona Fótica

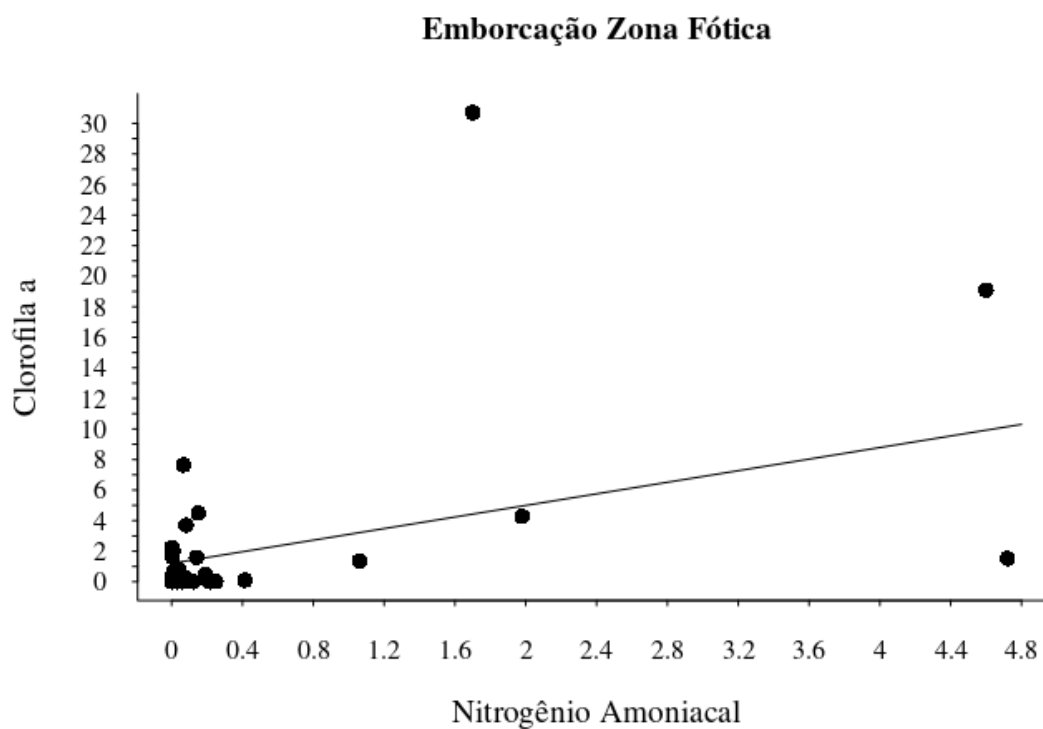
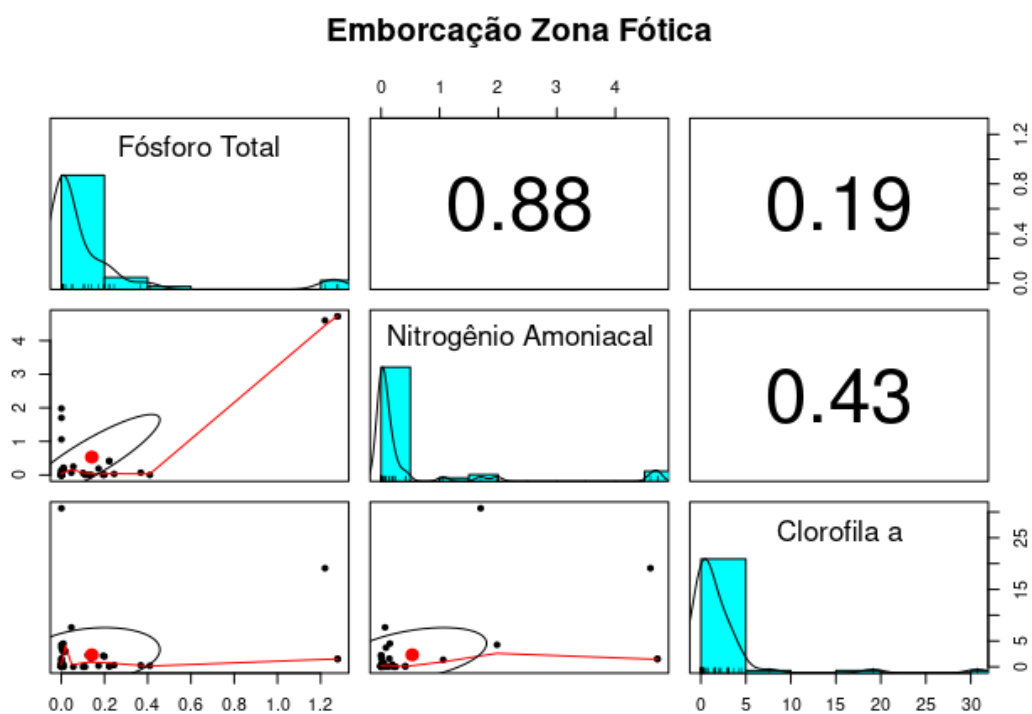


Tabela 3 - Correlação da clorofila (variável resposta) com os parâmetros N amoniacal, N total, Nitrato e Fósforo total. Nova Ponte Superfície (modelos completo e mínimos)

Variável	GL	Soma dos quadrados	Média dos quadrados	Valor F	Valor p
Fósforo total	1	0.6491	0.64913	0.7642	0.4075
N amoniacal	1	1.3789	1.37886	1.6233	0.2384
N total	1	0.0127	0.01272	0.0150	0.9056
Nitrato	1	2.6254	2.62537	3.0909	0.1168
Resíduos	8	6.7952	0.84939	-	-

Variável	GL	Soma dos quadrados	Média dos quadrados	Valor F	Valor p
N amoniacal	1	1.4635	1.46345	1.8953	0.20188
N total	1	0.0052	0.00523	0.0068	0.93621
Nitrato	1	3.0433	3.04328	3.9414	0.07839
Resíduos	9	6.9493	0.77214	-	-

Variável	GL	Soma dos quadrados	Média dos quadrados	Valor F	Valor p
N amoniacal	1	3.727	3.7270	2.9596	0.09603
Nitrato	1	9.491	9.4908	7.5365	0.01027*
Resíduos	29	36.520	1.2593	-	-

Variável	GL	Soma dos quadrados	Média dos quadrados	Valor F	Valor p
Nitrato	1	5.114	5.1139	8.7981	0.004001*
1Resíduos	78	45.338	0.5813	-	-

*Resultados significativos (p valor < 0,05 para $\alpha=95\%$)

Figura 38 - Correlação Reservatório UHE Nova Ponte Superfície

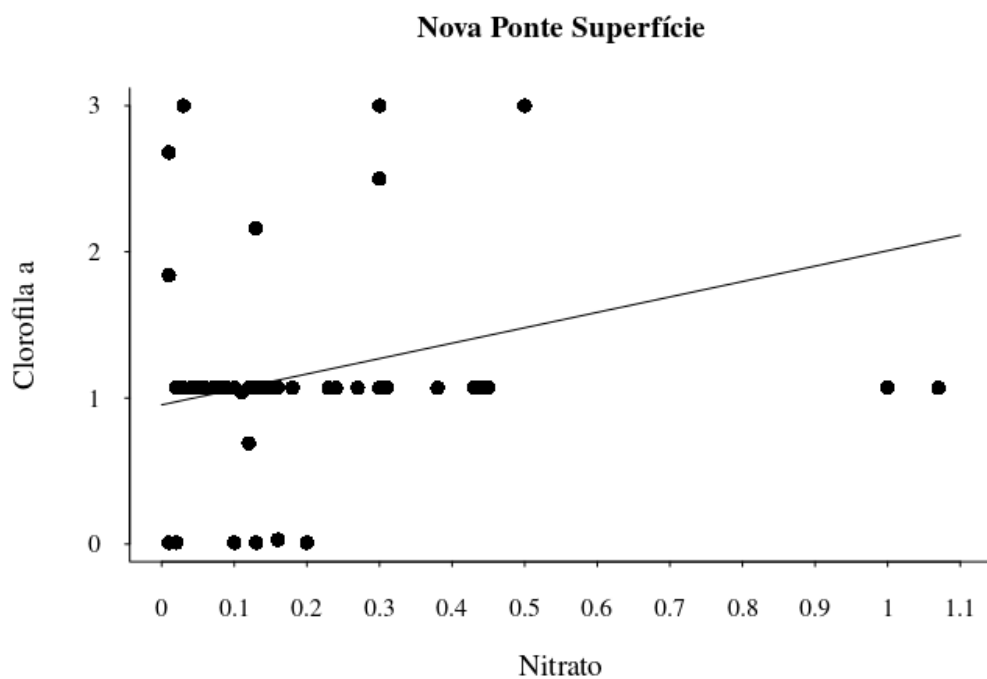
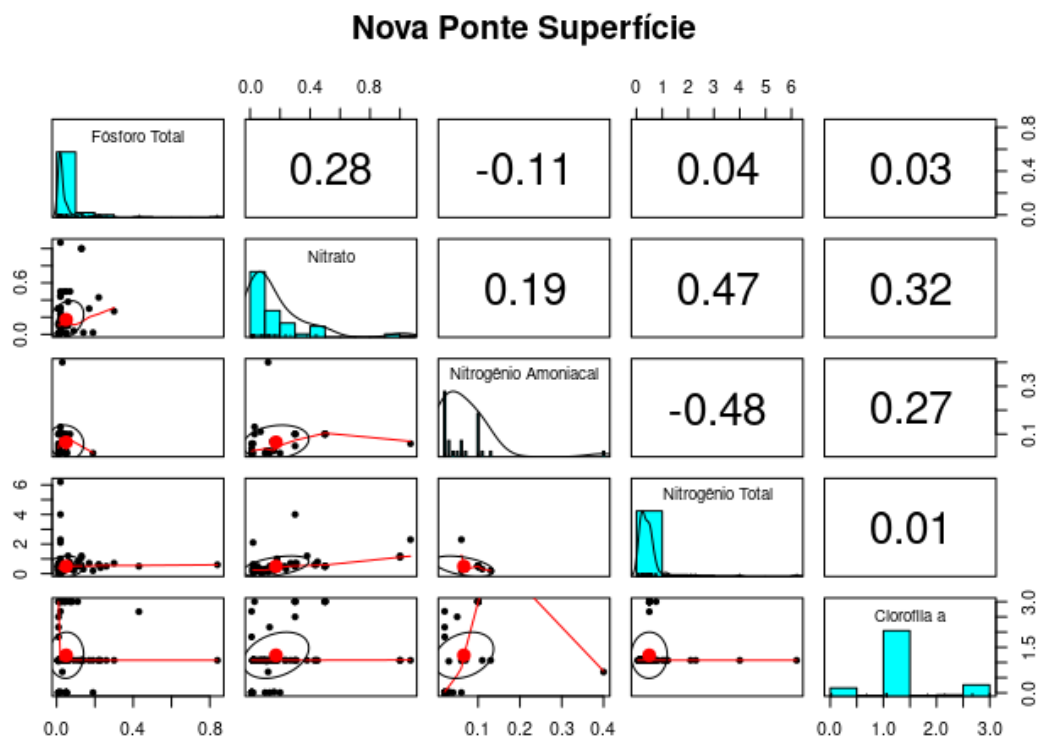


Tabela 4 - Correlação da clorofila (variável resposta) com os parâmetros N amoniacal, N total, Nitrato e Fósforo total no reservatório de Nova Ponte na profundidade de zona fótica (modelos completo e mínimo)

Variável	GL	Soma dos quadrados	Média dos quadrados	Valor F	Valor p
Fósforo total	1	0.00810	0.00810	0.1339	0.71873
N amoniacal	1	0.88858	0.88858	14.6886	0.00122*
N total	1	0.01096	0.01096	0.1811	0.67545
Nitrato	1	0.01791	0.01791	0.2961	0.59299
Resíduos	18	1.08891	0.06049	-	-

Variável	GL	Soma dos quadrados	Média dos quadrados	Valor F	Valor p
Fósforo total	1	0.0022	0.00222	0.131	0.90972
N amoniacal	1	0.5581	0.55811	3.2885	0.07887
Nitrato	1	0.4209	0.42095	2.4803	0.12482
Resíduos	33	5.6006	0.16972	-	-

*Resultados significativos (p valor < 0,05 para $\alpha=95\%$)

Figura 39 - Correlação Reservatório UHE Nova Ponte Zona Fótica

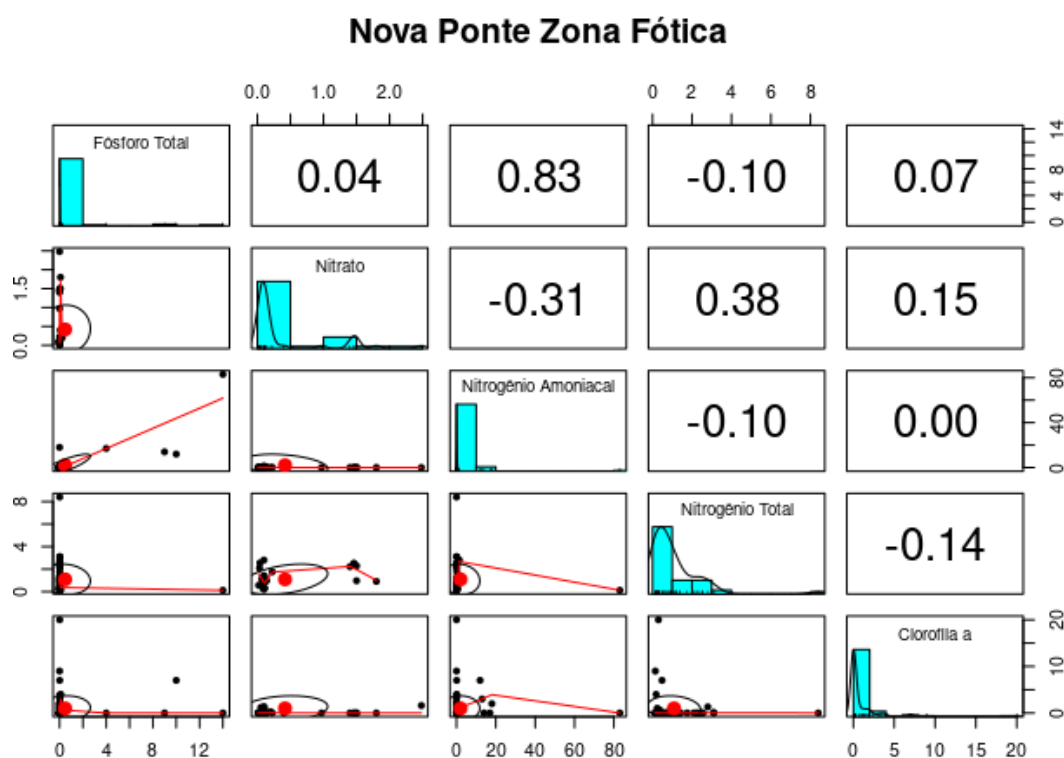


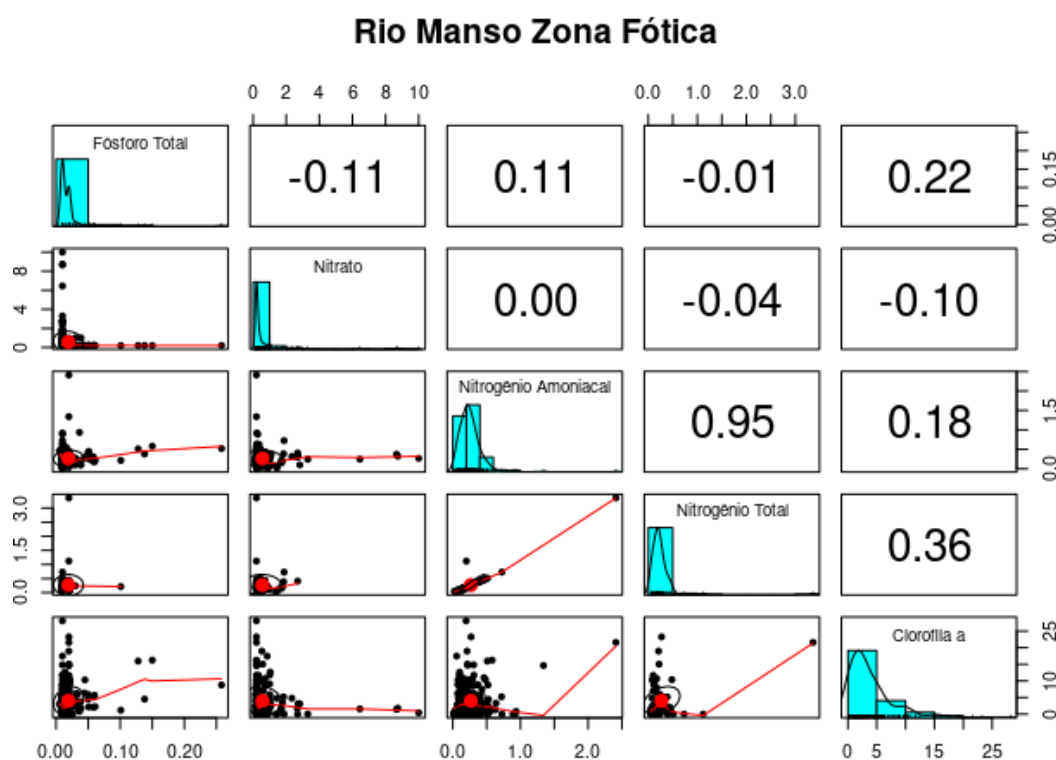
Tabela 5 - Correlação da clorofila (variável resposta) com os parâmetros N amoniacal, N total, Nitrato e Fósforo total. – Rio Manso Zona Fótica (modelos completo e mínimo)

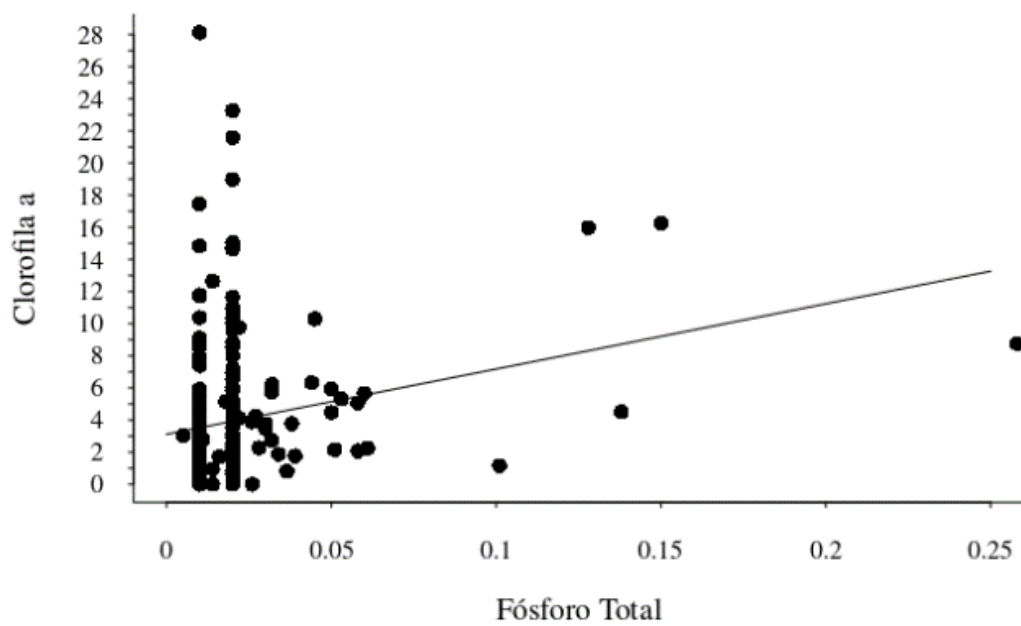
Variável	GL	Soma dos quadrados	Média dos quadrados	Valor F	Valor p
Fósforo total	1	6.46	6.465	0.3498	0.5559220
N amoniacal	1	233.77	233.775	12.6470	0.0006354*
N total	1	0.96	0.959	0.0519	0.8203988
Nitrato	1	20.05	20.048	1.0846	0.3008145
Resíduos	80	1478.76	18.485	-	-

Variável	GL	Soma dos quadrados	Média dos quadrados	Valor F	Valor p
Fósforo total	1	215.5	215.525	12.2637	0.005506*
N amoniacal	1	136.6	136.582	7.7717	0.0057320*

*Resultados significativos (p valor < 0,05 para $\alpha=95\%$)

Figura 40 - Correlação Represa Rio Manso Zona Fótica



Rio Manso Zona Fótica**Rio Manso Zona Fótica**