



SAULO SOARES NEIVA

QUANTIFICAÇÃO DA CARGA DE POLUIÇÃO DIFUSA E PONTUAL COMO
FERRAMENTA PARA PLANEJAMENTO NO ALTO CURSO DA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO MANHUAÇU

Itabira – MG
Agosto de 2021

SAULO SOARES NEIVA

QUANTIFICAÇÃO DA CARGA DE POLUIÇÃO DIFUSA E PONTUAL COMO
FERRAMENTA PARA PLANEJAMENTO NO ALTO CURSO DA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO MANHUAÇU

Trabalho apresentado à Universidade Federal
de Itajubá, Campus Itabira–MG, Programa de
Pós-Graduação em Rede Nacional em Gestão e
Regulação de Recursos Hídricos–Prof.Água.

Área de concentração:

Regulação e governança de recursos hídricos

Linha de pesquisa do projeto:

Segurança hídrica e usos múltiplos da água

Orientador:

Prof.º Dr.º. Eduardo de Aguiar do Couto

Coorientadora:

Prof.ª Dr.ª. Eliane Maria Vieira

Itabira – MG
Agosto de 2021

SUMÁRIO

LISTA DE QUADROS E FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS	v
AGRADECIMENTOS	vi
EPÍGRAFE	vii
RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. OBJETIVO GERAL.....	3
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
3. REVISÃO DE LITERATURA	4
3.1. A GESTÃO INTEGRADA DE RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL.....	4
3.2. O PLANEJAMENTO LOCAL E SUA IMPORTÂNCIA NA GESTÃO INTEGRADA DE RECURSOS HÍDRICOS.....	6
3.3. A GESTÃO TERRITORIAL E BACIAS HIDROGRÁFICAS.....	7
3.4. FERRAMENTAS APLICADAS À GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS NAS BACIAS HIDROGRÁFICAS.....	9
3.4.1. Aplicação dos SIG's em bacias hidrográficas	9
3.4.2. Modelagem matemática em bacias hidrográficas	10
3.4.3. Integração entre modelos matemáticos de simulação e os SIG's	13
3.5. O MODELO MQUAL.....	13
4. METODOLOGIA	20
4.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	20
4.2. PREPARAÇÃO DO MODELO MQUAL 2.0 E DADOS DE ENTRADA.....	25
4.2.1. Delimitação do Alto Curso da bacia do Rio Manhuaçu	26
4.2.2. Elaboração do mapa de uso e ocupação do solo	26
4.2.3. Quantificação da geração de carga poluidora difusa e pontual	27
4.2.4. Calibração e validação do modelo MQUAL 2.0	28
4.3. ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE CARGA POLUIDORA EM DIFERENTES CENÁRIOS.....	29
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
5.1. DELIMITAÇÃO DO ALTO CURSO DA BACIA DO RIO MANHUAÇU.....	33
5.2. MAPAS DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO.....	34
5.3. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO MQUAL 2.0.....	38
5.4. ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE CARGA POLUIDORA EM DIFERENTES CENÁRIOS.....	41

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
7- PRODUTO	56
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
APÊNDICE:	62
APÊNDICE A – Mapa de Uso e Ocupação do Solo do ano de 2009	62
APÊNDICE B – Mapa de Uso e Ocupação do Solo do ano de 2010.....	63
APÊNDICE C – Mapa de Uso e Ocupação do Solo do ano de 2011.....	64
APÊNDICE D – Mapa de Uso e Ocupação do Solo do ano de 2012	65
APÊNDICE E – Mapa de Uso e Ocupação do Solo do ano de 2013.....	66
APÊNDICE F – Mapa de Uso e Ocupação do Solo do ano de 2014	67
APÊNDICE G – Mapa de Uso e Ocupação do Solo do ano de 2015	68
APÊNDICE H – Mapa de Uso e Ocupação do Solo do ano de 2016	69
APÊNDICE I – Mapa de Uso e Ocupação do Solo do ano de 2017.....	70

LISTA DE QUADROS E FIGURAS

Quadro 1 – Tipologias principais de usos rurais e urbanos do modelo MQUAL.....	15
Figura 1 – Procedimentos comuns da modelagem.....	12
Figura 2 – Delimitação da UPGRH DO6.....	21
Figura 3 – Produção de sedimentos na bacia do Rio Doce e DO6.....	24
Figura 4 – Fluxograma das etapas de modelagem.....	26
Figura 5 – Fluxograma dos cenários projetados.....	32
Figura 6 – Mapa de localização do Alto Curso do Rio Manhuaçu.....	33
Figura 7 – Alterações no uso do solo 2008-2018.....	35
Figura 8 – Percentual das áreas por tipo de uso do solo 2008-2018.....	36
Figura 9 – Evolução da exportação de carga poluidora pelo crescimento populacional 2020-2040 no cenário 1.....	42
Figura 10 – Evolução da exportação de carga poluidora conforme cenário 2-1.....	44
Figura 11 – Evolução da exportação de carga poluidora conforme cenário 2-2.....	46
Figura 12 – Evolução da exportação de carga poluidora conforme cenário 3.....	47
Figura 13 – Evolução da exportação de carga poluidora conforme cenário 4-1.....	48
Figura 14 – Evolução da exportação de carga poluidora conforme cenário 4-2.....	49
Figura 15 – Evolução da exportação de carga poluidora conforme cenário 5.....	50
Figura 16 – Evolução da exportação de carga poluidora conforme cenário 6.1.....	52
Figura 17 – Evolução da exportação de carga poluidora conforme cenário 6.2.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficientes de geração de cargas do modelo MQUAL 2.0.....	17
Tabela 2 – Dados de esgoto gerado e tratado na bacia do Rio Manhuaçu.....	22
Tabela 3 – População da parte alta da bacia do Rio Manhuaçu.....	23
Tabela 4 – Características do clima e precipitação na parte alta da UPGRH DO6.....	24
Tabela 5 – Cenários projetados.....	30
Tabela 6 – Evolução da área de pastagem nos municípios da parte alta da DO6 (2006-2017).....	36
Tabela 7 – Evolução da área de agricultura nos municípios da parte alta da DO6 (2006-2017).....	37
Tabela 8 – Exemplo de cálculo de carga exportada estimada por parâmetro em 2009.....	39
Tabela 9 – Coeficientes MQUAL 2.0 calibrados para área de estudo.....	40
Tabela 10 – Índices do CNS encontrados na validação.....	40
Tabela 11 – População da parte alta da bacia do Rio Manhuaçu.....	41
Tabela 12 - Carga Exportada (kg/dia) por Fonte Poluidora no Cenário 1.....	41
Tabela 13 – Carga Exportada (kg/dia) por Fonte Poluidora no Cenário 2-1.....	43
Tabela 14 – Carga Exportada (kg/dia) por Fonte Poluidora no Cenário 2-2.....	44
Tabela 15 – Carga Exportada (kg/Dia) por Fonte Poluidora no Cenário 3.....	46
Tabela 16 - Carga Exportada (kg/dia) por Fonte Poluidora no Cenário 4-1.....	48
Tabela 17 - Carga Exportada (kg/dia) por Fonte Poluidora no Cenário 4-2.....	49
Tabela 18 – Carga Exportada (kg/dia) por Fonte Poluidora no Cenário 5.....	50
Tabela 19 – Carga Exportada (kg/dia) por Fonte Poluidora no Cenário 6-1.....	51
Tabela 20 – Carga Exportada (kg/dia) por Fonte Poluidora no Cenário 6-2.....	52
Tabela 21 – Percentual de redução de poluentes estimados nos cenários.....	54

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, agradeço também ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – PROFÁGUA, Projeto CAPES/ANA AUXPE Nº. 2717/2015, pelo apoio técnico científico aportado até o momento.

Agradeço a Deus, por me permitir superar todos os desafios até aqui.

Ao Coordenador local do ProfÁgua, professor José Augusto por todo incentivo.

Ao meu orientador, Professor Eduardo, por toda a paciência, compreensão e acima de tudo por toda sua contribuição através de seu conhecimento e experiência para o desenvolvimento da pesquisa.

À minha coorientadora, Professora Eliane, por todo o apoio e disponibilidade.

À minha família e amigos por entender minha ausência, sempre ouvindo a mesma frase: “hoje não posso, tenho que trabalhar na minha dissertação”.

Aos colegas de turma, que sempre me apoiaram durante esta etapa.

Aos meus amigos Bruno e Tatiane, sempre juntos nessa longa caminhada.

A todos os professores do ProfÁgua UNIFEI - Campus Itabira.

Aos colegas membros do Comitê da Bacia Hidrográfica Águas do Rio Manhuaçu.

Ao prefeito Diocelio por entender a importância do programa ProfÁgua e por todo apoio durante este período.

EPÍGRAFE

“Não fui eu que ordenei a você? Seja forte e corajoso! Não se apavore nem desanime, pois o Senhor, o seu Deus, estará com você por onde você andar”.

Josué 1:9

RESUMO

NEIVA, Saulo Soares. Quantificação da carga de poluição difusa e pontual como ferramenta para planejamento no Alto Curso da bacia hidrográfica do Rio Manhuaçu. 2020. 59 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – ProfÁgua), Instituto de Ciências Puras e Aplicadas, Universidade Federal de Itajubá, Campus de Itabira, Minas Gerais, 2021.

Entender as influências do uso e ocupação do solo sobre os recursos hídricos é um desafio enfrentado nos últimos anos. A gestão de recursos hídricos brasileira se desenvolveu no decorrer do tempo apoiada em uma base legal muito fortalecida, porém sem a integração com o desenvolvimento territorial, impactando negativamente os recursos hídricos. A modelagem matemática, principalmente associada aos Sistemas de Informações Geográficas (SIG's), surge neste contexto como uma ferramenta extremamente importante no processo de gestão de recursos hídricos, uma vez que pode contribuir desde o diagnóstico até a escolha de alternativas de manejo e intervenção. O objetivo desta pesquisa foi quantificar a geração de cargas de poluição difusa e pontual dos parâmetros N, P e DBO_{5,20} na bacia de contribuição do Alto Curso do Rio Manhuaçu por meio do modelo matemático MQUAL 2.0. Para isso foram elaborados mapas de uso e ocupação do solo de 2008 a 2018 e realizada a calibração e validação do modelo matemático com dados de vazão e dos relatórios trimestrais de qualidade da água do IGAM. A partir disto foram estudados 6 (seis) cenários em um horizonte de 20 (vinte) anos. Com o mapeamento da cobertura do solo, observou-se uma possível substituição, principalmente das áreas de capoeira e campo por atividade agrícola, o que elevaria a exportação em 0,067 kg/km².dia de Fósforo Total; 0,177 kg/km².dia de Nitrogênio Total e 3,838 kg/km².dia de DBO_{5,20}. Os cenários demonstraram que o tratamento de esgoto deve ser priorizado na bacia, mas a associação do tratamento de esgoto com a restauração das APP's traria uma redução da exportação de 93,44% de carga de P, 83,25% de N e 82,08% de DBO_{5,20} até o ano de 2040. Os coeficientes calibrados servirão de base para futuros estudos na bacia, que ainda possui poucos trabalhos científicos publicados, e os cenários projetados são importantes fontes de apoio ao comitê de bacia hidrográfica para escolha dos projetos prioritários, que serão executados na bacia e trarão resultados efetivos para melhoria qualitativa e quantitativa dos recursos hídricos.

Palavras – Chaves: Bacias Hidrográficas, Modelagem matemática, Geotecnologias

ABSTRACT

NEIVA, Saulo Soares. Quantification of the diffuse and punctual pollution load as a planning tool for the high course of the Manhuaçu River watershed. 2020. 59 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – PROFÁGUA), Instituto de Ciências Puras e Aplicadas, Universidade Federal de Itajubá, Campus de Itabira, Minas Gerais, 2020.

Understanding the influences of soil use and occupation on water resources is a challenge faced in last years. Brazilian water resources management develops over time supported by a very strong legal basis, but without integration with territorial development, negatively impacting water resources. Mathematical modeling, mainly associated with Geographic Information Systems (GIS), appears in this context as an extremely important tool in the water resources management process, as it can contribute from diagnosis to the choice of management and intervention alternatives. The objective of this research was to quantify the generation of diffuse and punctual loads of parameters N, P and BOD 5.20 in the contribution basin of the Upper Course of the Rio Manhuaçu using the mathematical model MQUAL 2.0. For this purpose, soil use and occupation maps from 2008 to 2018 were prepared and the mathematical model was calibrated and validated with flow data and quarterly water quality reports from IGAM. Based on this, 6 (six) scenarios were studied over a 20 (twenty) year horizon. With the mapping of the soil cover, it was observed a possible substitution, mainly of the capoeira and field areas by agricultural activity, which would increase the exportation in 0.067 kg / km².day of Total Phosphorus; 0.177 kg / km².day of Total Nitrogen and 3,838 kg / km².day of BOD 5.20. The scenarios showed that sewage treatment should be prioritized in the basin, but the association of sewage treatment with the restoration of APP's would bring a reduction in exports of 93.44% of P load, 83.25% of N and 82, 08% BOD 5.20 by the year 2040. The calibrated coefficients will serve as a basis for future studies in the basin, which still has few published works, and the scenarios are important sources of support for the river basin committee to choose the projects priorities, which will be leveled in the basin, and the effective results for the qualitative and quantitative improvement of water resources.

Keywords: watersheds, mathematical modeling, geotechnologies

1. INTRODUÇÃO

A água é um dos recursos naturais mais importantes e essenciais para a vida no planeta terra, desta forma, a mesma é indispensável para todo o desenvolvimento das espécies. O elevado crescimento populacional desencadeou ao longo do tempo um processo de urbanização sem planejamento, sobrecarregando os recursos hídricos e reduzindo cada vez mais a disponibilidade de água em condições adequadas para o consumo humano. Várias cidades brasileiras já sofreram ou sofrem problemas no abastecimento de água pela falta de planejamento e proteção dos recursos hídricos.

A gestão de recursos hídricos no território objetiva a busca da garantia de água em quantidade e qualidade adequada para toda a população, buscando atender as necessidades atuais sem comprometer as futuras. Nesse sentido, pode-se destacar a descentralização da gestão como algo fundamental, sendo necessária a participação de todos os entes federados (União, Estados e Municípios) nos estudos, planejamento e desenvolvimento das ações para o alcance de bons resultados.

O impacto do uso do solo na qualidade de pequenos cursos d'água tem ganhado interesse de vários estudos em pequenas bacias hidrográficas, como, por exemplo, os estudos de Fernandes *et al.*, (2011), na microbacia Glória em Macaé – RJ, quando constataram que as áreas ocupadas por florestas secundárias e capoeiras favoreceram a melhoria de alguns parâmetros de qualidade de água da bacia, e que os usos do solo pela agricultura, meio urbano e solo exposto influenciaram negativamente e de forma significativa os parâmetros de turbidez e sólidos totais no curso d'água.

A modelagem da qualidade da água vem sendo utilizada de forma eficiente para avaliar os impactos das fontes poluidoras nas bacias hidrográficas, bem como para analisar cenários de intervenção e medidas de controle ambientais (SILVA; FARIA; MOURA, 2017). A modelagem, principalmente associada aos Sistemas de Informações Geográficas - SIG's, é uma ferramenta importante para apoio técnico ao planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos, principalmente nos Comitês de Bacias Hidrográficas, fornecendo subsídios para definição das ações prioritárias para os planos de bacia. Percebe-se que existem diversas pesquisas que abordam a temática “geotecnologias na gestão de recursos hídricos” e várias com a temática “modelagem”, porém a integração destes dois importantes temas ainda é pouco explorada.

A área de estudo deste trabalho, a bacia hidrográfica do Rio Manhuaçu, localiza-se na área de maior produção de sedimentos da bacia do Rio Doce, fator este, que associado ao relevo montanhoso composto por argissolos vermelhos e cambissolos háplicos, elevam a sua susceptibilidade erosiva (IGAM, 2010). Além disso, o crescimento desordenado, o baixo índice de tratamento de esgoto e a utilização descontrolada de fertilizantes na extensa área de produção agrícola da parte alta da bacia potencializam os problemas ambientais, impactando diretamente os recursos hídricos.

Este trabalho buscou, avaliar a integração da ferramenta SIG com a modelagem matemática e projetar cenários para os próximos vinte anos na área de estudo, identificando como o uso do solo e o lançamento pontual de esgoto podem contribuir para a contaminação dos recursos hídricos locais, auxiliando, desta forma, o planejamento e definição de ações prioritárias que trarão melhores resultados para a bacia.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar a relação do uso e ocupação do solo com a qualidade da água no Alto Curso da bacia hidrográfica do Rio Manhuaçu, de modo a prover subsídios para o planejamento e gestão dos recursos hídricos em cenários futuros.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Quantificar a geração de cargas de poluição difusas e pontuais dos parâmetros Nitrogênio (N), Fósforo (P) e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO_{5,20}) na bacia de contribuição do Alto Curso do Rio Manhuaçu por meio do modelo matemático MQUAL 2.0.
- Analisar a atual situação dos municípios da bacia do Rio Manhuaçu quanto ao uso e ocupação do solo;
- Elaborar e avaliar cenários futuros para subsidiar as escolhas do comitê da bacia no tocante as ações prioritárias para uma melhor gestão dos recursos hídricos.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. A GESTÃO INTEGRADA DE RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL

A primeira legislação voltada de forma clara para a gestão dos recursos hídricos no país foi o Código Civil de 1916, Lei Federal nº 3.071, que de forma limitada, no livro II, título II, capítulo II, seção V da regulação do direito de uso das águas, fundamentou sua proteção no direito de vizinhança e na utilização da água como um bem de essência privada e de valor econômico limitado (THEODORO, 2005 citado por (FERREIRA, SILVA e PINHEIRO, 2008).

Em nível mundial, a promulgação da Lei das Águas no ano de 1964, na França, foi o pontapé inicial para a mudança de paradigmas na gestão de recursos hídricos. O modelo criado previa novos princípios, como a adoção da bacia hidrográfica como unidade de administração das águas, a participação dos usuários nos comitês de bacias e a cobrança da água bruta. O modelo inovador difundiu-se no mundo e no Brasil, e provocou a discussão de pesquisadores e técnicos em busca de uma modernização da política de recursos hídricos. Já em 1989, no simpósio da Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH) em Foz do Iguaçu, foi escrita a Carta de Foz do Iguaçu, que apresentou as diretrizes e princípios considerados necessários na reforma da política brasileira de recursos hídricos (CAMPOS, 2013).

No ano de 1992 foi realizada na cidade do Rio de Janeiro a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (CNUMAD), a Rio 92. Esta conferência, que foi organizada pela Organização das Nações Unidas (ONU), contou com a representação de 179 países, que elaboraram um documento com estratégias e compromissos para o paradigma do "Desenvolvimento Sustentável", a denominada "Agenda 21" (TEIXEIRA, MOLLETA e LUEDEMANN, 2016).

A Agenda 21 possui um capítulo que trata especificamente da temática recursos hídricos. O capítulo 18, intitulado "Proteção da qualidade e do abastecimento dos recursos hídricos: aplicação de critérios integrados no desenvolvimento, manejo e uso dos recursos hídricos" objetiva satisfazer as necessidades hídricas de todos os países para o desenvolvimento sustentável. O termo integração é fortemente utilizado, enfatizando a percepção dos recursos hídricos "como parte do ecossistema e um recurso natural e bem econômico e social cuja quantidade e qualidade determinam a natureza de sua utilização" (CAMPOS, 2013).

O ponto chave para a gestão de recursos hídricos brasileira foi a criação da Lei 9.433 no ano de 1997. Conhecida como "Lei das Águas", esta legislação instituiu a política nacional de recursos hídricos e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos -

SINGREH, concretizando a gestão por bacias hidrográficas. Hoje no Brasil, a gestão dos recursos hídricos é organizada por bacias hidrográficas em todo o território, seja em corpos hídricos de domínio da União ou dos Estados (BRASIL, 1997). A política nacional de recursos hídricos reconheceu a água como um bem público dotado de valor econômico, sendo o comitê de bacia responsável pela adequação de seus usos. O principal avanço alcançado foi que o sistema promoveu a descentralização da gestão das águas, considerando a realidade local e envolvendo um maior número de atores e organizações sociais no processo de planejamento.

Em nível mundial existem alguns exemplos de práticas de sucesso na gestão integrada dos recursos hídricos. A Avaliação Ambiental Estratégica (AAE) é o exemplo de um sistema desenvolvido na Escócia para planejamento integrado de bacia hidrográfica e uso do solo. O sistema escocês de planejamento territorial utilizou a AAE como forma de integrar as decisões de planejamento regional às questões de planejamento locais. Para implementação, foram utilizados dois instrumentos: o Plano de Bacia Hidrográfica e o Plano de Desenvolvimento Local. Dessa maneira, a integração entre os níveis de planejamento ocorreu mediante a articulação entre gestores de recursos hídricos e de uso e ocupação do solo, utilizando o gerenciamento dos impactos ambientais como parâmetro de decisão (FABBRO NETO; SOUZA, 2017).

Conforme Ferreira, Silva e Werneck (2008), o grande desafio para gestão das águas é a organização populacional utilizando a bacia hidrográfica como unidade de planejamento. É necessário trabalhar o conceito de bacia hidrográfica, seus limites, interações e alterações causadas pelas ações do homem e os impactos aos recursos hídricos. Logo, é um trabalho educativo e cultural lento, que deve ser trabalhado desde a infância nas séries iniciais.

Assim, trabalhar a bacia hidrográfica como unidade de planejamento significa considerar a dinâmica de todos os seus elementos, como água, solo, flora, fauna, utilização do solo e a interação existente entre eles durante os processos decisórios e de planejamento do território (FERREIRA, SILVA e WERNECK, 2008).

No dia 23 de dezembro de 2010, o Conselho Estadual de Recursos Hídricos de Minas Gerais - CERH/MG publicou a deliberação normativa nº 36, visando padronizar a nomenclatura, as siglas e os códigos das Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos do Estado, utilizados nas atividades de gerenciamento de recursos hídricos. A sigla UPGRH - Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos é a referência espacial para a aplicação da Política Estadual de Recursos Hídricos, e refere-se à área hidrográfica, bacia, grupo de bacias ou sub-bacias hidrográficas contíguas, com características naturais, sociais e

econômicas homogêneas ou similares. Para as siglas, foram consideradas as duas letras do nome do rio de domínio da União, acompanhadas por numeração sequencial (CERH,2010).

3.2. O PLANEJAMENTO LOCAL E SUA IMPORTÂNCIA NA GESTÃO INTEGRADA DE RECURSOS HÍDRICOS

A participação dos municípios no sistema integrado de gerenciamento de recursos hídricos acontece através dos comitês de bacias hidrográficas. A presença dos representantes municipais é importante na composição dos comitês, uma vez que é nos próprios municípios que são gerados os impactos devido a má utilização do solo e conseqüente contaminação dos recursos hídricos. Os municípios são responsáveis por gerenciar o ordenamento territorial, de modo que seja promovida a proteção e fiscalização do uso dos recursos naturais e reguladas as atividades econômicas (PIZELLA, 2015).

A gestão dos recursos hídricos brasileira é considerada uma das mais avançadas do mundo, tanto pela estrutura legislativa como pelo seu arranjo institucional. Neste sistema, os planos de bacias hidrográficas são considerados um elo entre o planejamento e gestão, sendo responsáveis por fundamentar e apoiar a implementação da política de recursos hídricos. Os planos de bacia são formados por diagnósticos, prognósticos, metas, estratégias, programas e projetos, podendo orientar o planejamento do uso e ocupação do solo nas bacias.

Outro instrumento de gestão que atua no espaço dos municípios são os planos diretores municipais, estes podem seguir as diretrizes apontadas nos planos de bacia, respeitando as áreas definidas para crescimento urbano, proteção dos mananciais, localização industrial, irrigação e saneamento (PERES e SILVA, 2013).

Conforme Carneiro et al. (2010), quando elaborado considerando a variável ambiental no processo de controle do uso e ocupação do solo, o plano diretor municipal se torna uma ferramenta para o planejamento integrado sustentável. Logo, os planos diretores podem restringir a expansão urbana e ocupação imobiliária em áreas impróprias para edificações decorrentes de fragilidades ambientais locais.

Contudo, é fundamental que os planos diretores municipais insiram as diretrizes presentes nos planos de recursos hídricos, gerando mecanismos de controle e fiscalização por parte dos cidadãos e da administração pública, que é a responsável por garantir o seu cumprimento. Da mesma forma, no processo de planejamento, os comitês de bacia devem

considerar o uso e ocupação do solo no âmbito municipal e sua relação com a qualidade e quantidade dos recursos hídricos (PIZELLA, 2015).

Assim como os planos diretores, o zoneamento ambiental é uma ferramenta importante para a prevenção dos impactos ambientais negativos gerados pela falta de planejamento territorial nos municípios. Ao serem definidas as áreas prioritárias para conservação, como mananciais, rios, reservas legais, áreas verdes urbanas, dentre outras, os municípios contam com uma forma de controle das futuras áreas de expansão e da localização de empreendimentos cuja atividade pode causar impactos ambientais. Logo, o zoneamento é uma forma de proteção da água subterrânea e superficial presente nos municípios, e sua criação deve ser construída com a presença e participação da sociedade, para que assim os interesses especulativos sobre a terra e soluções pontuais aos problemas ambientais urbanos e rurais não prevaleçam (PIZELLA, 2015).

No entanto, o que se percebe atualmente é que não há uma integração entre os instrumentos de gerenciamento dos recursos hídricos e os de planejamento de uso e ocupação do solo, demonstrando assim uma falta de legitimidade do planejamento e da legislação urbanística nas cidades brasileiras, marcadas por forte grau de informalidade e mesmo de ilegalidade na ocupação do solo (CARNEIRO et al., 2010).

3.3. A GESTÃO TERRITORIAL E BACIAS HIDROGRÁFICAS

Ao longo do tempo, os rios foram se constituindo como referência natural e cultural para o desenvolvimento da humanidade, seja como fonte de água, meio de comunicação e circulação ou como marco territorial que percorre e estrutura o espaço. O sistema fluvial possui características complexas, é dinâmico e pode ser distinto pela sua capacidade de suporte à população humana, animal e vegetal. Devido a exploração desordenada do meio natural e má gestão dos recursos hídricos no decorrer do tempo, hoje, o desempenho e função dos cursos d'água estão seriamente ameaçados (PASTORELLI JUNIOR; ARGOLLO FERRÃO, 2018).

Conforme Mota (1995), citado por Araujo e Prates (2018), o melhor método de gestão territorial para prevenir a degradação dos recursos hídricos é a gestão das bacias hidrográficas baseado em seus atributos ambientais. As bacias hidrográficas possuem um papel muito importante na gestão territorial, pois possibilitam a integração entre ambiente e sociedade para ordenação da ocupação humana e discussão da melhor forma de gerenciamento dos recursos hídricos.

Pastorelli Junior e Argollo Ferrão (2018) afirmam que as intervenções realizadas atualmente pelo homem no meio ambiente tem sido um motivo de preocupação cada vez maior da sociedade, o que tem levado a um crescimento das pesquisas desenvolvidas para qualificar e quantificar os impactos gerados. Nesse sentido, torna-se muito importante o estudo da capacidade de suporte do meio, seja de modo prévio ou mesmo durante o processo produtivo industrial, visando aperfeiçoar as tecnologias aplicadas para redução dos impactos às bacias hidrográficas.

Os recursos hídricos não devem ser geridos sem considerar as estreitas relações com os diferentes componentes naturais, como solos, vegetação, relevo e como as ações antrópicas provocam alterações no meio, afetando diretamente na disponibilidade hídrica em quantidade e qualidade adequada dentro de uma bacia hidrográfica (CARVALHO, 2014).

A gestão de recursos hídricos brasileira conta com um forte amparo legal, seja em nível federal ou estadual. Já na esfera de governo municipal, particularmente nas microbacias, seria fundamental a existência de uma base legal consolidada para estabelecimento de limites e parâmetros de utilização sustentável de recursos ambientais, representando as legislações federais e estaduais e incluindo as peculiaridades locais. No entanto, as legislações municipais relacionadas ao tema, quando existem, ainda trabalham de forma separada o uso e ocupação do solo e o gerenciamento dos recursos hídricos (PASTORELLI JUNIOR; ARGOLLO FERRÃO, 2018).

Conforme Guerra e Cunha (1998) citado por Araujo e Prates (2018), o processo de planejamento do território pode reduzir e até mesmo evitar a ocorrência de impactos ambientais causados por ações antrópicas dentro das bacias hidrográficas. O planejamento, se bem realizado, pode orientar a ocupação humana, protegendo áreas destinadas a preservação ambiental e evitando que sejam ocupadas áreas instáveis, com fragilidades ambientais e alta susceptibilidade erosiva.

O planejamento ambiental nas bacias hidrográficas deve ser realizado como uma política pública de enfoque integral, trabalhando o ordenamento do território de modo sustentável, considerando não só o desenvolvimento econômico, mas incorporando as questões ambientais e de uso e ocupação do solo (CARVALHO, 2014).

O planejamento ambiental deve ter uma visão ampla e integrada, considerando todas as formas de manejo dos recursos naturais presentes na bacia. A utilização de agrotóxicos de forma descontrolada é um exemplo da necessidade de se pensar em todas as ações desenvolvidas nas

bacias hidrográficas. Nos últimos três anos, a liberação da utilização de novos defensivos no Brasil praticamente dobrou. Em 2019, até outubro, 382 novos produtos foram registrados, 68 a mais que no mesmo período de 2018 e 286 a mais que o registrado no mesmo período de 2015 (BRASIL, 2019). A crescente desburocratização para liberação dos agrotóxicos pode gerar impactos negativos à qualidade dos recursos hídricos. A falta de fiscalização, somada a utilização desordenada, faz com que seja elevada a possibilidade de contaminação, tanto de águas superficiais como das águas subterrâneas.

3.4. FERRAMENTAS APLICADAS À GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS NAS BACIAS HIDROGRÁFICAS

3.4.1. Aplicação dos SIG's em bacias hidrográficas

O uso de geotecnologias vem ganhando cada vez mais espaço no contexto ambiental, com ferramentas que avaliam de forma eficiente as características da paisagem, auxiliando a gestão territorial. A eficiência trazida pelos Sistemas de Informações Geográficas (SIG's) no processamento de informações muitas vezes complexas, faz com que haja uma interação de dados de diferentes naturezas de forma detalhada (ARAUJO e PRATES, 2018).

Conforme Santos e Lima (2018), as técnicas de geoprocessamento, associadas ao uso do sensoriamento remoto de imagens orbitais por meio dos SIG's, são muito eficientes na detecção de mudanças nos padrões de uso e ocupação do solo e de alterações provocadas na paisagem de determinado local.

Babu, Sreekumar e Aslam (2014) afirmam que no contexto da análise espacial, os dados de satélites e o SIG são ferramentas capazes de combinar diversos parâmetros ambientais, devido a capacidade de apresentar resultados confiáveis de avaliação dos dados temáticos. Ambos podem ser considerados ferramentas com ótimos potenciais para avaliar, determinar e interpretar informações ambientais relacionadas ao espaço geográfico das bacias hidrográficas.

As geotecnologias, através das técnicas de modelagem espaciais, permitiram estudar a relação entre meio ambiente, bacias hidrográficas e suas fragilidades, reproduzindo matematicamente e graficamente fenômenos espaciais que antes eram considerados complexos de serem identificados. Logo, a modelagem matemático-espacial consiste em transformar problemas da realidade em problemas matemáticos e resolvê-los, interpretando suas soluções na linguagem do mundo real (ARAUJO e PRATES, 2018).

A complexidade dos fenômenos ambientais tem exigido cada vez mais uma visão sistêmica, relacionando o uso do espaço com áreas remanescentes de vegetação, com a qualidade da água e a antropização, mensuradas dentro de uma bacia hidrográfica. Neste contexto, o mapeamento de uso do solo surgiu como uma ferramenta de análise ambiental, que auxilia a identificação de perdas de vegetação nativa, muitas vezes provenientes de desmatamentos, alterações climáticas, além do impacto social causado pela urbanização do espaço (CORNELLI *et al.* 2016).

Medeiros et al., (2016) analisaram a redução da área dos reservatórios em um período de estiagem no semiárido utilizando o ambiente SIG. Em seu estudo foi possível constatar que, além das altas taxas de evaporação características da região, os usos múltiplos das águas no período de estiagem estavam contribuindo para o desaparecimento de diversos reservatórios, sendo necessária melhor gestão para atendimento aos usos prioritários. Já Pinheiro et al., (2009) estudaram o uso do geoprocessamento como ferramenta de integração e análise das informações da qualidade das águas, dos usos preponderantes e das fontes poluidoras na bacia hidrográfica do Rio Macaé. O estudo levou ao comitê de bacias hidrográficas um olhar integrado da qualidade, e principalmente sua relação com a fonte poluidora pontual e difusa e com o uso e cobertura do solo, subsidiando o processo de enquadramento.

Nesse contexto, a utilização das geotecnologias permite não só a elaboração de diagnósticos, mas também o estudo de cenários futuros relacionados às problemáticas ambientais, podendo inclusive ajudar a preveni-las. Do mesmo modo, pode direcionar as melhores áreas para o uso, reduzindo assim a utilização de ambientes possivelmente frágeis e sensíveis a determinado tipo de intervenção (ARAUJO e PRATES, 2018).

3.4.2. Modelagem matemática em bacias hidrográficas

De modo geral, os modelos matemáticos podem ser definidos como representações esquemáticas da realidade, auxiliando a compreensão de fenômenos que a regem. Logo, para que o comportamento de um modelo reflita o mais próximo da realidade local, é necessário que o mesmo exiba a descrição das características essenciais do mundo real (RODRIGUES; JUNIOR; PESSANHA, 2012).

Até o ano de 1960, para modelagem da qualidade da água numa bacia hidrográfica, eram considerados apenas os impactos locais provenientes das cargas de poluição pontuais, sendo realizada uma análise de forma concentrada. Os avanços tecnológicos no decorrer do tempo

tornaram possível a realização da análise com sistemas distribuídos no espaço (CHAPRA, 1997 citado por SILVA *et. al*, 2017).

Os modelos matemáticos podem ser de diversas tipologias, sendo estocásticos quando ao menos uma das variáveis presentes apresentam comportamento aleatório. Já quando não consideram os conceitos de probabilidade, o mesmo é considerado determinístico. Os modelos são empíricos quando utilizam relações baseadas em dados observados, não sendo permitido neste tipo de modelo a previsão nas mudanças de condições não observadas. Os modelos conceituais são baseados em processos, sendo mais complexos que os empíricos. Estes procuram descrever o fenômeno estudado por meio da descrição de todos os processos que envolvem o fenômeno estudado. Portanto, a escolha do modelo a ser aplicado deve ser realizada com base no objetivo pretendido e nos dados de entrada disponíveis para o estudo (SCHNEIDER, 2017).

Segundo Fragoso Jr; Ferreira e Marques (2009), uma modelagem matemática objetiva representar determinado fenômeno de interesse, sendo formada basicamente de quatro componentes: funções governantes ou variáveis externas; variável de estado; equações matemáticas; e parâmetros. Esses componentes auxiliam a reprodução, em linguagem matemática, de um determinado fenômeno encontrado na natureza.

Segundo Fleck, Tavares, Eyng e colaboradores (2013), existem situações que devem ser observadas e consideradas na utilização da modelagem matemática. Os modelos matemáticos de qualidade da água precisam ser ajustados para que os parâmetros de entrada forneçam resultados mais próximos aos resultados observados nos cursos d'água, deste modo torna-se necessário estudar e prever métodos de calibração e validação que tornem o modelo apto a representar a realidade local.

Ainda segundo os autores citados, no decorrer dos anos vários protocolos de calibração foram estudados, todos enfatizando a necessidade de verificar a qualidade dos dados utilizados e a importância de uma definição clara dos objetivos da calibração. Mesmo os modelos e parâmetros possuindo estrutura conhecida, alguns parâmetros exigem um processo de investigação específica.

Como todo método de pesquisa, a modelagem também possui uma orientação metodológica a ser seguida. Existem diversos esquemas que objetivam descrever as etapas de uma modelagem matemática. Mas, o importante é que o método em estudo contemple os objetivos específicos de cada problema, que pode conter distintas escalas

espaciais e temporais. Um esquema geral pode ter diferentes etapas, que podem ser formadas por etapas padrões e outras mais genéricas que podem ser tratadas de forma particular por cada pesquisador (Figura 1) (FRAGOSO JÚNIOR et al., 2009).

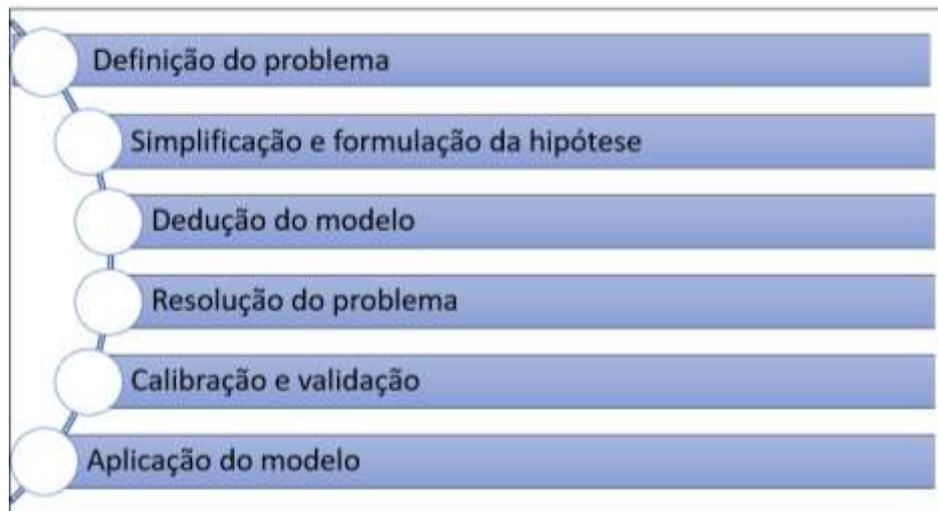


Figura 1 – Procedimentos comuns da modelagem.
Fonte: Adaptado de FRAGOSO JÚNIOR et al., (2009).

Conforme Larentis (2004), citado por Schneider (2017), em um modelo hidrológico, as cargas poluidoras são divididas em pontuais e não pontuais ou difusas. As fontes pontuais são formadas por descargas concentradas em um único ponto através de uma tubulação de saída. As principais fontes deste tipo são os esgotamentos domésticos brutos ou tratados e os efluentes industriais. Essa tipologia possui maior facilidade de identificação e quantificação do volume de lançamento, motivo pelo qual foi objeto principal desta pesquisa na temática de poluição. Já as fontes não pontuais são caracterizadas por seu elevado potencial poluidor, devido a características como:

- lançamento intermitente e está relacionado à precipitação no solo;
- os poluentes presentes no solo são transportados em extensas áreas;
- não se pode identificar o ponto de origem;
- o monitoramento deve possuir caráter extensivo (em nível de bacia hidrográfica) e preventivo;
- dificuldade de se estabelecer padrões de lançamento para o efluente pois a carga varia de acordo com a intensidade e duração de eventos meteorológicos.

A principal contribuição da poluição difusa aos recursos hídricos ocorre através do escoamento superficial, uma vez que as partículas de poluentes se depositam no solo e posteriormente acabam sendo transportadas sobre a superfície da bacia (SCHNEIDER, 2017).

Conforme Rodrigues et al., (2012), os modelos matemáticos aplicados aos recursos hídricos podem abordar os aspectos quantitativos e qualitativos. Os quantitativos podem simular dados como vazão de cursos, campos de velocidade, disponibilidade hídrica. Os modelos qualitativos podem estudar temas como carga máxima de diluição de poluentes, comportamento de plumas de lançamento e taxas de remoção. Percebe-se que o aspecto qualitativo irá sempre depender do quantitativo, uma vez que a avaliação da qualidade de um corpo hídrico passa pela carga presente de certos compostos químicos, que é definida apenas pela taxa de renovação do volume do próprio corpo receptor.

3.4.3. Integração entre modelos matemáticos de simulação e os SIG's

Os modelos matemáticos de qualidade da água, espacialmente distribuídos, que trabalham associados a SIG's, são adequados para trabalho de simulações em bacias hidrográficas, tornando possível identificar tanto a poluição de origem pontual, como a proveniente de fontes difusas (SILVA; FARIA; MOURA, 2017).

Conforme Francisco e Carvalho (2008), citado por Nunes (2018), a integração da modelagem matemática com a tecnologia SIG pode fornecer indicadores importantes no processo de tomada de decisão até para utilização da água no abastecimento. Neste caso, a análise é realizada com base em quatro parâmetros passíveis de serem obtidos, tais como a quantidade hídrica disponível, demanda e qualidade hídrica dos corpos d'água, e as delimitações do uso e ocupação da terra.

Os modelos de qualidade da água podem ainda estar inseridos nos sistemas integrados de suporte à decisão e apoio ao planejamento dos recursos hídricos dentro de uma bacia hidrográfica. Para isso, o modelo precisa simular diferentes cenários de desenvolvimento da bacia, contribuindo para identificar os possíveis impactos nos recursos hídricos e suas respectivas causas e gerando subsídios para o processo de planejamento e intervenção com atividades mitigadoras (SILVA; FARIA; MOURA, 2017).

3.5. O MODELO MQUAL

Segundo Moruzzi et al., (2012), o Modelo de Correlação do Uso e Ocupação do Solo e Qualidade da Água-MQUAL, é formado de três módulos relacionados entre si. São eles: o módulo de geração de cargas, o módulo de simulação dos principais tributários e o módulo de

simulação do reservatório. Cada módulo representa o processo de geração e autodepuração das cargas poluidoras nos três ambientes estudados, as superfícies do terreno, local onde se encontram as fontes de cargas poluidoras, os rios principais e seus afluentes, onde são transportadas as partículas poluidoras, e o reservatório.

Na criação do modelo MQUAL foram identificadas 52 categorias de uso e ocupação do solo na bacia, sendo as mesmas agregadas posteriormente em 8 tipologias principais (Quadro 1), considerando a potencialidade da geração de cargas poluidoras e a deterioração da qualidade da água, conforme definições a seguir (COBRAPE, 2010):

Quadro 1 – Tipologias principais de usos rurais e urbanos do modelo MQUAL

Categoria	Composição
Usos rurais (lançamentos difusos)	
Atividade agrícola	Inclui as culturas temporárias e perenes, a horticultura, a criação de animais e as chácaras isoladas e de subsistência;
Reflorestamento	Áreas de manejo agroflorestal, predominantemente representadas por remanescentes de plantações florestais;
Mata e capoeirão	Formações vegetais arbóreas de grande porte, em grande parte constituídas por vegetação nativa;
Capoeira e campo	Categoria que agrega a vegetação de baixo porte e a vegetação de porte arbóreo no início do processo de regeneração (capoeira inicial);
Chácaras e movimento de terra	Agrega as áreas de lazer em área rural (clubes, marinas, etc) e a movimentação de terra ou rocha, mineração ativa e desativada e as olarias.
Usos urbanos (lançamentos pontuais)	
Área urbana de padrão superior	Categoria de uso residencial de alto e médio padrão; de baixa, média e alta intensidade de ocupação nos loteamentos; presença de equipamentos públicos (escolas e creches, delegacia de polícia, etc), de equipamentos de lazer, considerados de características mais urbanas, atividades econômicas urbanas e área vaga em área urbana;
Área urbana de padrão inferior	Categoria de uso residencial de baixo padrão e habitação sub-normal; de alta, média e baixa intensidade de ocupação dos loteamentos; presença de equipamentos sociais (hospitais, cemitérios, área de disposição de resíduos, etc); carência de infraestrutura urbana, de saneamento e de serviços urbanos, instalados e operantes (incluindo fiscalização) ou com baixa eficiência da infraestrutura instalada;
Área industrial e comercial	Categoria identificada no mapeamento de uso e ocupação do solo, que requer tratamento individualizado, pois, mesmo quando situada em áreas bem atendidas pelos serviços urbanos, induz maior movimentação de pessoas e veículos e o manuseio de cargas de substâncias diversas, apresentando comportamento distinto das áreas predominantemente residenciais.

Fonte: (COBRAPE, 2010)

Desde sua origem, o MQUAL foi desenvolvido como uma ferramenta de planejamento e gestão da bacia hidrográfica, com uma estrutura que permite aperfeiçoamentos progressivos na medida em que novos estudos e informações são descobertas. Em sua criação optou-se por uma estratégia de se avançar na modelagem dos fenômenos envolvidos, numa abordagem compatível com o grau de conhecimento alcançado sobre o ecossistema com a base de dados disponíveis (SMA, 2006).

Segundo Imagiire *et al.* (2017), a formulação básica do primeiro módulo do MQUAL apresenta os três componentes para estimativa da geração de cargas em cada sub-bacia:

- (i) somatório das cargas difusas resultantes dos produtos das áreas de cada categoria de uso do solo pelos respectivos coeficientes de exportação;
- (ii) somatório das cargas pontuais resultantes dos produtos das categorias de população pelos respectivos coeficientes de exportação;
- (iii) somatório de cargas pontuais como lançamentos de estações de tratamento de esgoto ou lançamentos específicos como indústrias, contribuições de transposições, etc.

$$Carga\ Média/Dia = ft \times [\sum i (Ai \times ci) + \sum j (Pj \times ej) + \sum k Bk] \quad \text{Equação (1)}$$

Em que:

f_t = coeficiente de autodepuração na sub-bacia
 A_i = área ocupada por cada categoria de uso (km^2)
 c_i = coeficiente de exportação ($kg/km^2.dia$)
 P_j = População urbana residente (hab)
 e_j = coeficiente de exportação ($kg/hab.dia$)
 B_k = outras cargas pontuais

O MQUAL trabalha no Módulo 1 com a estimativa de geração de cargas de nutrientes (nitrogênio e fósforo), cargas orgânicas (Demanda Bioquímica de Oxigênio carbonácea -DBOc e Demanda Bioquímica de oxigênio nitrogenada DBO_n), cargas de bactérias (coliformes totais) e cargas de sólidos suspensos, provenientes de fontes pontuais e difusas. As estimativas das fontes difusas são baseadas em coeficientes de exportação de cargas associados as diferentes tipologias de uso e ocupação do solo dentro da bacia hidrográfica em estudo para as fontes difusas. Já as fontes pontuais são baseadas na população urbana residente e condições de funcionamento da infraestrutura sanitária (Tabela 1) (SMA, 2006).

Tabela 1 – Coeficientes de geração de cargas do modelo MQUAL 2.0

TIPOS DE FONTES POLUIDORAS	Unidade	Fósforo Total	Nitrogênio Total	DBO _{5,20}
Áreas Urbanas – Padrão Superior	kg/km ² .dia	0,136	0,951	16,000
Áreas de Uso Industrial e Comercial	kg/km ² .dia	0,190	1,665	32,000
Solo exposto/Movimentação de terra	kg/km ² .dia	0,005	0,090	3,800
Mata/Capoeirão	kg/km ² .dia	0,002	0,060	1,172
Reflorestamento	kg/km ² .dia	0,002	0,060	1,172
Capoeira Campo	kg/km ² .dia	0,001	0,050	1,079
Atividade Agrícola	kg/km ² .dia	0,066	0,227	4,917
População com lançamento direto de esgotos nos corpos de água	kg/hab.dia	0,002	0,012	0,056
População de áreas urbanizadas com sistema individual de disposição de esgotos – Baixa Densidade	kg/hab.dia	0,001	0,006	0,034

Fonte: SMA, 2006

O produto gerado pelo modelo matemático MQUAL contribui com diretrizes para estudo das políticas públicas de uso e ocupação existentes e os impactos na disponibilidade hídrica em condições adequadas para os fins que se fizerem necessários, além de direcionar as análises de licenciamento de empreendimentos visando o enquadramento do manancial pelo cumprimento de metas intermediárias (NUNES, 2018).

Conforme COBRAPE (2006); IPT (2008), citado por Nunes (2018), ao longo do tempo o MQUAL tem-se desenvolvido e se adaptado às diferentes realidades de cada bacia hidrográfica. As adequações realizadas geraram diferentes versões do modelo utilizado no PDPA do Guarapiranga, o MQUAL 1.0. As versões adaptadas foram: MQUAL 2.0, MQUAL 2.aj, MQUAL 1.5, MQUAL 1.6G, MQUAL 2.5J, MQUAL – Alto Juquery, MQUAL 2.6 – Guaió, MQUAL SPAT, MQUAL – PDPA ATC.

Steinke e Saito (2008) analisaram, por meio dos modelos MQUAL e *Pollutant Loading Application Overview* – PLOAD, os impactos dos tipos de uso da terra nas áreas úmidas da bacia de contribuição direta da Lagoa Mirim. O estudo utilizou um SIG para mapeamento da cobertura do solo, e através dos parâmetros de carga poluidora analisados nos modelos foram identificadas as áreas mais ameaçadas por poluição, a partir do tipo de uso da terra. O trabalho revelou a necessidade do planejamento para gestão compartilhada na bacia hidrográfica.

Rodrigues-Filho *et al.* (2015) utilizaram o MQUAL para avaliar os impactos das alterações propostas no novo código florestal brasileiro na qualidade da água da bacia hidrográfica do Ribeirão do Lobo. Foram estimadas as cargas difusas de nitrogênio total (Nt) e fósforo total (Pt) com base nos coeficientes de exportação predefinidos pelo modelo. Três cenários foram simulados: cenário 1 (cenário atual), com 30 metros de áreas de preservação

permanente ao longo da margem dos corpos d'água e 50 metros de raio a partir do curso de água; cenário 2, conservador, com áreas de preservação permanente de 100 metros de largura ao longo a margem de corpos d'água; e cenário 3, a substituição de 20% da floresta natural por terras agrícolas. Os resultados mostraram que a supressão de 20% da cobertura vegetal na bacia hidrográfica aumentaria as cargas de nutrientes e, conseqüentemente, a trofia dos ambientes aquáticos da bacia, podendo causar possíveis perdas de serviços ambientais e comprometer a qualidade e o abastecimento de água na bacia hidrográfica.

Já Imagiire et al., (2017) analisaram a aplicação do MQUAL desde sua criação em 1998 no PDPA da bacia do Guarapiranga, constatando que o modelo foi aplicado em várias bacias hidrográficas, sobretudo no Alto Tietê, mas possui maior aplicação nas bacias dos Reservatórios Guarapiranga e Billings. Essas duas bacias sofreram um processo de ocupação intensa e desordenada, contando com grande parte da população localizada em áreas de alta densidade, de situação irregular e de favelas. Desta forma, os impactos dessas ocupações sobre a qualidade da água nos reservatórios são relevantes. Desde os primeiros estudos que aplicaram o MQUAL, foi possível verificar que a quantidade de poluentes afluente aos reservatórios é superior à capacidade de suporte dos mesmos. Logo, o modelo contribuiu para determinação das cargas-meta fixadas nas leis específicas para que fosse mantida a qualidade da água dentro dos padrões aceitáveis para os usos a que é destinada.

Nunes (2018) aplicou o módulo 1 do MQUAL 2.0 para quantificar a geração de cargas difusas por meio de coeficientes de transporte de cargas para os parâmetros fósforo, nitrogênio e demanda bioquímica de oxigênio – DBO_{5,20}. Em seu estudo, foram simuladas as cargas para o ano de 2016 e em cenários com ausência de serviços de saneamento, cenários induzidos pela recuperação de mata nativa e cenários tendenciais em relação à dinâmica na alteração do uso e cobertura da terra em 2026 e 2036. O trabalho foi desenvolvido no Alto Curso do Rio Santo Anastácio, inserido na UGRHI-22 do Estado de São Paulo. O autor recomendou a reaplicação do modelo pela facilidade dos conceitos utilizados pelo mesmo, sendo de fácil entendimento principalmente para demonstração dentro dos comitês de bacia hidrográficas, trazendo uma visualização prática do rio que se tem, do rio que se quer e do rio que se pode ter. O autor concluiu ainda afirmando a necessidade de ampliação dos pontos de monitoramento para calibração e validação prévia dos coeficientes fornecidos pelo MQUAL 2.0, uma vez que cada bacia possui suas características próprias (NUNES, 2018).

Guimarães (2018), simulou a interferência do uso e ocupação do solo na qualidade de água em uma bacia hidrográfica com disponibilidade hídrica crítica. O estudo, que foi

desenvolvido na bacia do Ribeirão do Salitre (MG), utilizou o MQUAL para simulação de seis diferentes cenários. O autor considerou a metodologia eficaz para a determinação dos resultados almejados, recomendando o monitoramento contínuo, devido as transformações causadas pelo uso e ocupação do solo e a ampliação do período de coleta das amostras para validação do modelo ao local de estudo.

4. METODOLOGIA

4.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos “Águas do Rio Manhuaçu” -UPGRH DO6, localiza-se nas mesorregiões Zona da Mata e Vale do Rio Doce e microrregiões de Alegre, Manhuaçu e Aimorés. O acesso se dá principalmente pela BR-116, que passa pelos municípios de São João do Manhuaçu e Realeza, BR-474, que passa pelo município de Ipanema e BR-259, que passa pelo município de Aimorés. Algumas rodovias estaduais também são importantes vias de acesso, como a MG-108 e MG-111, que dão acesso aos municípios da região (IGAM, 2010).

A Bacia Hidrográfica do Rio Manhuaçu é formada pelas sub-bacias dos rios Manhuaçu, Mutum, São Luís, Pocrane, Itueto, José Pedro e Capim, além de ribeirões e rios de menor porte. O Rio Manhuaçu nasce na divisa dos municípios de Divino e São João do Manhuaçu, percorrendo cerca de 347 km até desaguar no Rio Doce, acima da cidade de Aimorés, do qual é um dos principais afluentes pela margem direita (IGAM, 2010).

Com relação a hidrogeologia, cerca de 96% da bacia está localizada sobre aquíferos fissurados, os 4% restantes encontram-se sobre aquíferos granulares. A litologia do sistema de aquífero da região é constituído da seguinte forma: 81% sobre os sistemas aquíferos em rocha cristalina, composto por granitoides de composição diversas; 12% sobre sistemas aquíferos fissurados em quartzo e os outros 3% sobre aquíferos fissurados xistosos (SILVA, 2017).

Localizada junto à divisa entre os Estados de Minas Gerais e Espírito Santo, a UPGRH ocupa uma área de 9.189 km² (Figura 2). A área é composta pela Bacia Hidrográfica do Rio Manhuaçu, que ocupa uma área de 8.826,37 km², e por uma pequena área incremental (362,68 km²) que inclui um trecho com pequenos córregos (Barroso, Barrosinho, Sossego, Natividade, Santana, da Barata e Lorena), os quais drenam diretamente para o Rio Doce (IGAM, 2010).

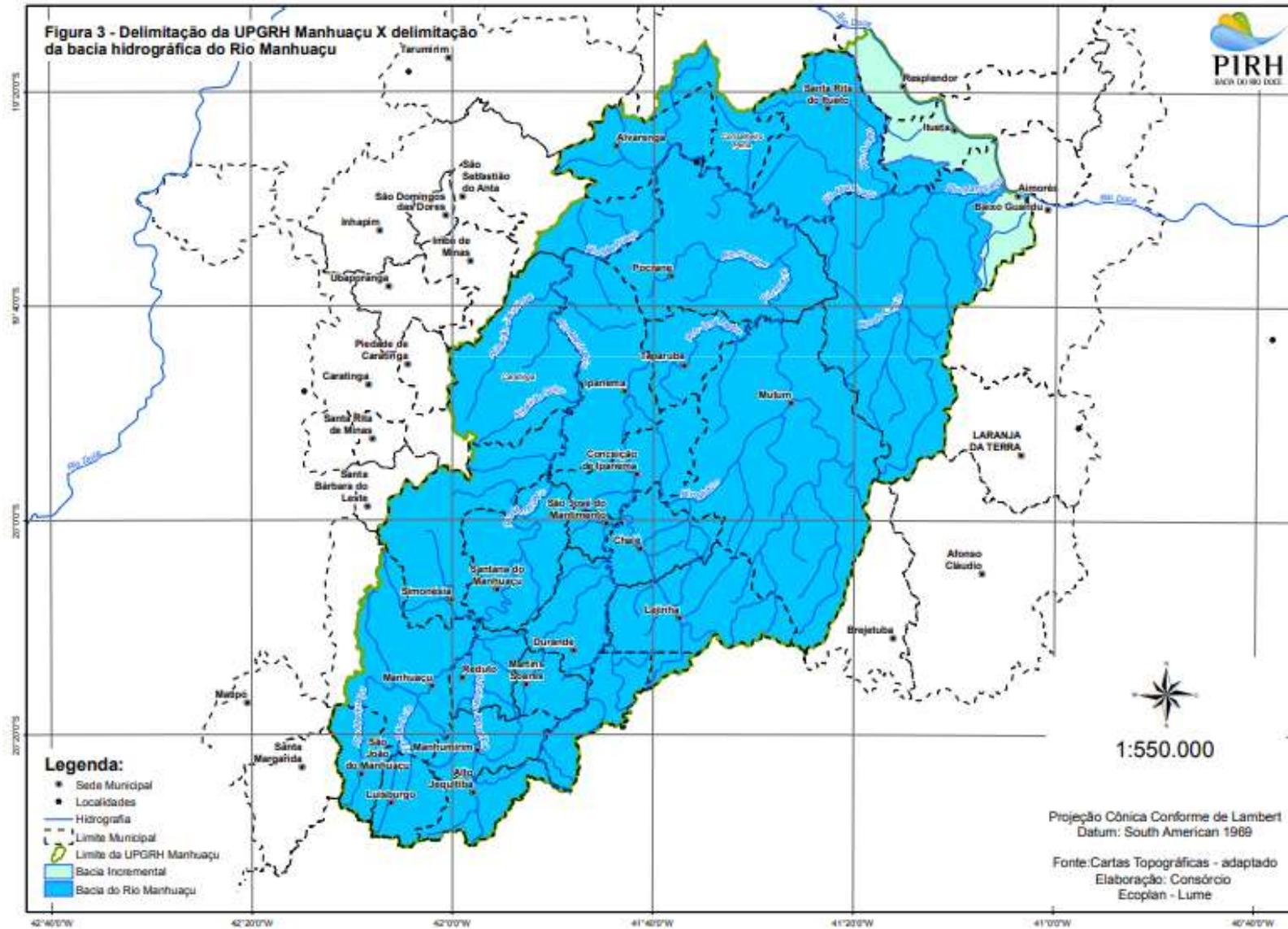


Figura 2 – Delimitação da UGRH DO6
Fonte: IGAM, 2010

O tratamento de esgoto na bacia é precário. Segundo dados da Agência Nacional de Águas - ANA do ano de 2013, publicados em 2017, na bacia do Rio Manhuaçu eram gerados 26.438,40 m³ de esgoto por dia, e apenas 2.842,56 eram tratados, ou seja, apenas 10,75 %. Com relação aos municípios, observa-se que apenas 2 contam com sistemas de tratamento (Tabela 2) (ANA, 2017).

Tabela 2 – Dados de esgoto gerado e tratado na bacia do Rio Manhuaçu

MUNICÍPIO	TOTAL GERADO (m³/dia)	VOLUME TRATADO (m³/dia)
Aimorés	4.233,60	2.496,96
Alto Jequitibá	518,40	0,00
Alvarenga	233,28	0,00
Caratinga	17,28	0,00
Chalé	207,36	0,00
Conceição de Ipanema	164,16	0,00
Durandé	267,84	0,00
Ipanema	2.868,48	0,00
Ítueta	362,88	345,60
Lajinha	1.123,20	0,00
Luisburgo	233,28	0,00
Manhuaçu	8.372,16	0,00
Manhumirim	3.205,44	0,00
Martins Soares	250,56	0,00
Mutum	1.391,04	0,00
Pocrane	708,48	0,00
Reduto	319,68	0,00
Santa Rita do Itueto	172,80	0,00
Santana do Manhuaçu	328,32	0,00
São João do Manhuaçu	371,52	0,00
São José do Mantimento	181,44	0,00
Simonésia	665,28	0,00
Taparuba	241,92	0,00
Total	26.438,40	2.842,56

Fonte: ANA, 2017

A UPGRH DO6 conta com 26 municípios de pequeno porte (população inferior a 20 mil habitantes), somando um total de aproximadamente 300 mil habitantes que vivem nas respectivas áreas pertencentes a bacia, segundo os dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE de 2010. Cerca de 39% da população total é rural, representando 16,3% de toda população rural da bacia do Rio Doce (IBGE, 2010). A taxa de crescimento demográfico dos municípios da bacia do Rio Manhuaçu é abaixo da média da bacia do rio Doce, tanto para população rural quanto para urbana (SILVA, 2017).

A parte alta, onde foram concentrados os estudos, é formada por sete municípios, todos com sede na bacia, sendo que destes, seis possuem 100% de área na DO6, e apenas o município

de Manhuaçu não está totalmente inserido na bacia de estudo, 68,76% de área.. A população da parte alta da bacia é de 126.339 habitantes, conforme o último censo do IBGE (Tabela 3).

Tabela 3 – População da parte alta da bacia do Rio Manhuaçu

MUNICÍPIO	SEDE NA BACIA	% DA ÁREA NA DO6	POPULAÇÃO NA DO6	POPULAÇÃO TOTAL
Alto Jequitibá	sim	100,00	7.976	7.976
Luisburgo	sim	100,00	6.276	6.276
Manhuaçu	sim	68,76	69.802	74.297
Manhumirim	sim	100,00	20.209	20.209
Martins Soares	sim	100,00	6.338	6.338
Reduto	sim	100,00	6.344	6.344
São João do Manhuaçu	sim	100,00	9.394	9.394
Total			126.339	130.834

Fonte: IBGE, 2010

Na UPGRH DO6 predominam os solos das classes latossolos, argilossolos e cambissolos. Destas classes, os argilossolos são os de maior erodibilidade e os latossolos, os de menor. Os latossolos vermelho-amarelos, predominantes ao longo da bacia, são solos profundos, bem drenados, com horizonte B latossólico de coloração vermelho-amarela, que ocorrem, principalmente, nos planaltos dissecados. Já os argissolos vermelhos são caracterizados pela profundidade variável, com um horizonte subsuperficial com maior teor de argila e a menor condutividade hidráulica que o superficial. Quase o total das áreas ocupadas pelos argissolos está em relevos fortes e ondulados, e por se tratar de solos com grande susceptibilidade erosiva, a sua utilização acaba se restringindo a pastagens e culturas permanentes de ciclo longo, como café e citrus, sendo a primeira predominante nos municípios do Alto Curso do Rio Manhuaçu (IGAM, 2010).

A UPGRH DO6 está localizada na área de maior produção de sedimentos da bacia do Rio Doce, onde são gerados de 100 a 200 toneladas de sedimentos por km²/ano (Figura 3). A bacia possui 69% de sua área em classe de forte suscetibilidade e 3% em classe muito forte, a última correspondendo a sua parte alta. Somados às características geomorfológicas dos solos e ao relevo acidentado da bacia do Doce, as fortes chuvas que ocorrem potencializam os processos erosivos (IGAM, 2010).

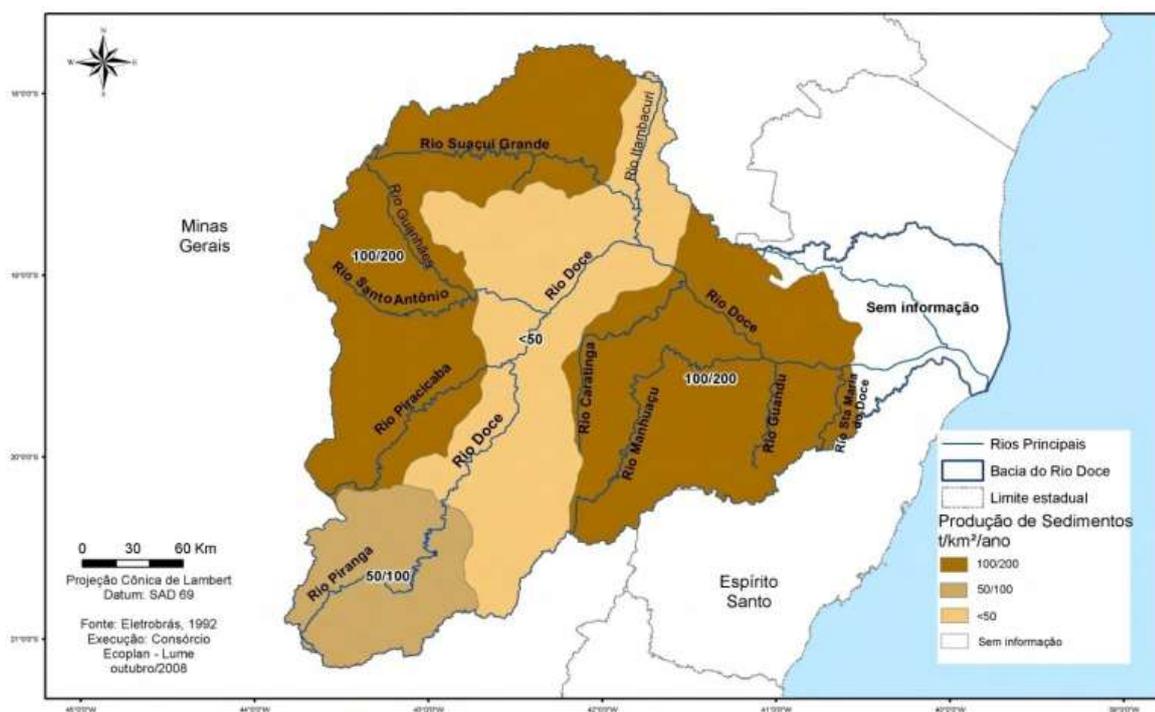


Figura 3 – Produção de sedimentos na bacia do Rio Doce e DO6

Fonte: IGAM, 2010

Segundo a classificação de Köppen, o clima predominante da região da bacia do Rio Manhuaçu é o Cwb – clima temperado marítimo ou clima tropical de altitude, que apresenta verões brandos com estações chuvosas e estiagem no inverno. O Cwa, caracterizado por inverno seco e verão quente, também está presente. A temperatura e precipitação média anual dos municípios da área de estudo são 18,5°C e 1.317,5 mm, respectivamente (Tabela 4). Para análise das características morfométricas da área de estudo, foram calculados os dados como padrão de drenagem, fator forma e índice de circularidade.

Conforme Silva (2017), o Produto Interno Bruto - PIB da bacia hidrográfica do Rio Manhuaçu indica que a atividade econômica principal da região é o setor de serviços, correspondendo a 59% do total, em seguida o setor agropecuário ganha destaque, representando 21% da produção econômica anual da região.

Tabela 4 – Características do clima e precipitação na parte alta da UPGRH DO6

MUNICÍPIO	CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA (koppen)	ALTITUDE MÉDIA (m)	TEMPERATURA MÉDIA ANUAL (c°)	PRECIPITAÇÃO MÉDIA ANUAL (mm)
Alto Jequitibá	Cwb	940,55	18,10	1313,90
Luisburgo	Cwb	1075,97	17,30	1324,40
Martins Soares	Cwb	797,73	19,00	1304,70
Manhuaçu	Cwb	883,51	18,60	1319,40
Manhumirim	Cwb	817,56	18,90	1315,10
Reduto	Cwa	723,97	19,50	1310,00
São João do Manhuaçu	Cwb	963,54	18,10	1334,90

Fonte: Köppen (2020)

A cafeicultura é a principal atividade agropecuária no Alto Curso do Rio Manhuaçu. Conforme Soares (2011), somente na região de Manhuaçu se concentram cerca de 20 mil propriedades cafeeiras. Este número representa 71% das propriedades produtoras de café na Zona da Mata, colocando a região como segunda maior produtora de café, ficando atrás apenas da região sul do estado de Minas Gerais.

Em relação á qualidade das águas, as análises da água bruta, publicadas no Plano de Ação de Recursos Hídricos - PARH Manhuaçu (2010), apontaram que a degradação da qualidade da água na bacia hidrográfica do Rio Manhuaçu pode ser potencializada pela utilização descontrolada de agroquímicos em lavouras cafeeiras e por lançamento de efluentes industriais, tendo sido encontrados valores fora dos padrões aceitáveis para fósforo total, manganês total, Coliformes Termotolerantes, cor, Coliformes Totais, fenóis totais, turbidez e ferro dissolvido (IGAM, 2010). Reforçando que, a prática do uso intensivo de agrotóxicos, aliado às condições ambientais (relevo, intensidade de precipitações e proximidade de lavouras aos cursos de água), elevam as possibilidades de contaminação dos recursos hídricos (SOARES, 2011).

4.2. PREPARAÇÃO DO MODELO MQUAL 2.0 E DADOS DE ENTRADA

Para utilização do modelo MQUAL 2.0 no trabalho, foi seguida uma série de etapas que envolveram tanto a preparação dos dados de entrada, caracterizada principalmente com a elaboração dos mapas de uso e ocupação do solo, como a própria adequação do modelo para a área de estudo. As etapas de adequação, apresentadas na Figura 4, consistiram em quantificar a geração de carga com os coeficientes pré-estabelecidos e utilização dos dados encontrados para calibração e validação dos coeficientes e por fim utilização dos mesmos na projeção dos cenários estabelecidos.

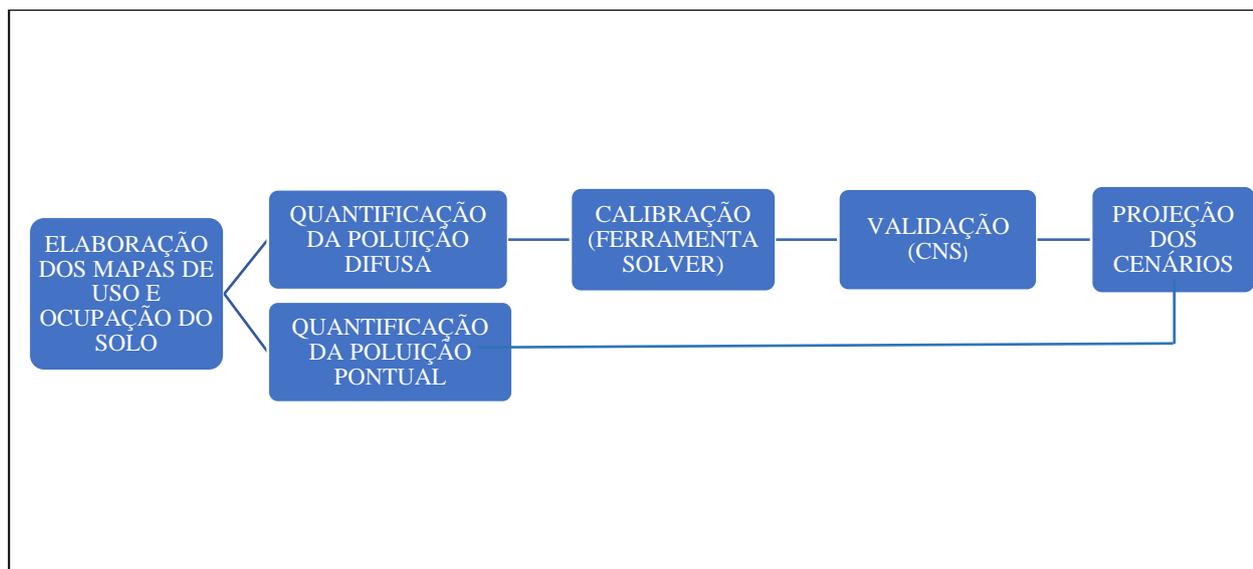


Figura 4 – Fluxograma das etapas de modelagem

Fonte: autor (2021)

4.2.1. Delimitação do Alto Curso da bacia do Rio Manhuaçu

A bacia hidrográfica do Rio Manhuaçu possui nas bases de dados do Instituto Mineiro de Gestão das Águas – IGAM, a sua delimitação elaborada. No entanto, como optou-se por trabalhar apenas com a parte alta da bacia, foi necessário a realização de uma nova delimitação.

Sendo assim, foi utilizado o software livre Quantum GIS (QGIS) versão 2.18 Las Palmas, com ajuda de sua ferramenta Geographic Resources Analysis Support System - GRASS GIS. O modelo Digital de Elevação necessário como entrada para o software foi obtido através do modelo *Alos Palsar*. As imagens do *Alos Palsar* possuem resolução espacial de 12,5 m, e são adquiridas no sistema *Alaska Satellite Facility* operado e distribuído pelo *EarthData/National Aeronautics and Space Administration (NASA)*.

4.2.2. Elaboração do mapa de uso e ocupação do solo

O mapeamento do uso e ocupação do solo é um dos dados de entrada necessários para aplicação do modelo MQUAL 2.0. Para elaboração dos mapas, foram utilizadas imagens do projeto Mapbiomas Brasil, que é uma iniciativa que envolve uma rede colaborativa com especialistas nos biomas, usos da terra, sensoriamento remoto, SIG e ciência da computação, e utiliza processamento em nuvem e classificadores automatizados desenvolvidos e operados pela *Google Earth Engine* para gerar uma série histórica de mapas anuais de cobertura e uso da terra do Brasil. O Mapbiomas utiliza imagens do satélite Landsat com resolução de 30 metros (ROSA, 2016).

Para elaboração dos mapas foram selecionadas as imagens referentes a períodos idênticos aos dados de qualidade da água utilizados para a calibração do modelo, visando assim, obter informações com menores distorções. Foi utilizada como máscara a camada criada na etapa anterior para delimitação do Alto Curso do Rio Manhuaçu. Como as classes que foram estudadas não abrangem todas as tipologias disponíveis no projeto Mapbiomas, foi necessário um agrupamento com as classes de mesmas características das classes objeto do estudo e assim, foi realizada a reclassificação.

Logo, como os coeficientes do modelo MQUAL foram desenvolvidos para 8 tipologias de uso do solo, o mapa de uso e ocupação foi inicialmente elaborado considerando as mesmas classes. No entanto, foram acrescentadas duas novas classes aos mapas de uso e ocupação do solo, sendo elas “Afloramento Rochoso” e “Córregos, lagos e rios”. Esse acréscimo foi necessário devido as características observadas na área de estudo que poderiam alterar a interpretação dos mapas, uma vez que a área de estudo possui longos trechos de afloramento rochoso e córregos, lagos e rios.

4.2.3. Quantificação da geração de carga poluidora difusa e pontual

Para quantificação da geração de carga poluidora, tanto a difusa como a pontual, foram analisados os parâmetros N, P e DBO_{5,20}. Na quantificação difusa, os dados de entrada do modelo MQUAL 2.0 utilizados são as áreas de cada tipologia de uso na bacia de estudo delimitada e os coeficientes predefinidos. O cálculo de geração de carga (C_i), em kg/dia, foi realizado por meio do somatório do produto da área de cada tipologia de uso e cobertura do solo (A_i), por seu respectivo coeficiente de exportação (c_i) (equação 2).

$$C_i = \sum (A_i \times c_i) \qquad \text{Equação (2)}$$

Em que:

C_i = Carga exportada (kg/dia)

A_i = Área de cada tipologia de uso e cobertura do solo (km²)

c_i = Coeficiente de exportação (kg/km².dia)

Já para quantificação da geração de carga poluidora pontual os dados de entrada do modelo que foram utilizados são os coeficientes de exportação predefinidos pelo modelo e o número de habitantes residentes por setor censitário apontados pelo IBGE. O cálculo de geração

de carga pontual em kg/dia, foi realizado através do somatório do produto do coeficiente de exportação (c_i) por cada setor censitário (equação 3).

$$C_i = \sum(P \times c_i) \quad \text{Equação (3)}$$

Em que:

C_i = Carga exportada (kg/dia)

P = População residente por setor censitário (hab)

c_i = Coeficiente de exportação (kg/hab.dia)

4.2.4. Calibração e validação do modelo MQUAL 2.0

A calibração é considerada uma das etapas mais importantes do processo de modelagem, tendo como objetivo ajustar os coeficientes que representam os processos físicos, químicos e biológicos no curso d'água natural, focando-se no melhor ajuste entre os dados simulados com os dados encontrados em campo (NAKAMURA, 2017).

Nunes (2018) aplicou o MQUAL 2.0 no Alto Curso do Rio Santo Anastácio – UGRHI-22/Pontal do Paranapanema – São Paulo, concluindo em seu trabalho a necessidade de calibração prévia dos coeficientes de transporte de cargas difusas nos locais onde o modelo for reaplicado.

Sendo assim, como o modelo foi desenvolvido para uma área de características distintas do local de estudo, e conforme sugerem as literaturas estudadas, foi realizada a calibração prévia de seus coeficientes. A calibração foi realizada através da ferramenta *solver* do *software* Microsoft Excel, buscando obter o melhor valor para o coeficiente de Nash-Sutcliffe (CNS) (Equação 4), para os respectivos coeficientes de N , P e $DBO_{5,20}$. O CNS é uma medida de ajustamento do modelo de forma a indicar quanto esse modelo explica os valores observados (LIMA, MAMEDE e NETO, 2018).

$$CNS = 1 - \frac{\sum[Y_{obs} - Y_{est}]^2}{\sum[Y_{obs} - Y_{obsmed}]^2} \quad \text{Equação (4)}$$

Em que:

CNS = Coeficiente de Nash-Sutcliffe

Y_{obs} = Parâmetro de qualidade por análise

Y_{est} = Dado estimado pelo modelo

Y_{obsmed} = Média dos valores observados

A calibração foi realizada individualmente para cada parâmetro e a cada ano, sendo que foram utilizados como base os dados de 2008 a 2015. Após a calibração dos coeficientes foi realizada uma média dos valores encontrados para alcançar o resultado final de calibração.

Para avaliar a calibração do modelo foi adotada a classificação sugerida por van Liew et al., (2007). Conforme a classificação, valor de $CNS = 1$ indica ajuste perfeito dos dados preditos pelo modelo; $CNS > 0,75$ (modelo é adequado e bom); $0,36 < CNS < 0,75$ o modelo é considerado satisfatório e $CNS < 0,36$ o modelo não é satisfatório.

Foram utilizados também como dados de entrada, os relatórios trimestrais de qualidade da água do Instituto Mineiro de Gestão das Águas - IGAM, de 2008 a 2015, da estação código 56967001, localizada no município de Santana do Manhuaçu/MG, onde foi iniciada a delimitação do Alto Curso da bacia hidrográfica do Rio Manhuaçu. Já para os dados de vazão, a estação utilizada foi a de código 56960005, referentes aos anos de 2008 à 2015, as duas estações estão localizadas próximas e na calha do Rio Manhuaçu.

Considerando as diferentes sazonalidades e períodos climáticos distintos, foram utilizados para calibração os relatórios de um horizonte de oito anos, 2008-2015. Após a calibração do modelo, a validação foi realizada também através dos relatórios trimestrais de qualidade da água do IGAM, porém com os dados mais recentes, dos anos de 2016 a 2018, e da mesma forma para os dados de vazão.

4.3. ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE CARGA POLUIDORA EM DIFERENTES CENÁRIOS

A última etapa do estudo foi a quantificação da geração de carga de poluição difusa e pontual nos diferentes cenários propostos. As simulações realizadas por meio do modelo poderão contribuir para o processo de planejamento, principalmente na elaboração e revisão dos planos de bacia, norteados na forma de um estudo técnico, as escolhas de ações prioritárias a serem desenvolvidas, visando a redução da exportação de cargas poluidoras aos cursos d'água.

A metodologia de cálculo foi a mesma adotada nas etapas anteriores, porém considerando seis cenários distintos, descritos na Tabela 5.

Tabela 5 – Cenários projetados

CENÁRIO	POPULAÇÃO	TRATAMENTO DE ESGOTO	USO E OCUPAÇÃO DO SOLO
Cenário 1	Projeção para o ano de 2040	Manutenção das condições atuais	Manutenção das condições de degradação atuais
Cenário 2	Projeção para o ano de 2040	Manutenção das condições atuais de tratamento de esgoto	Restauração de 50% das APP's até 2040.
Cenário 3	Projeção para o ano de 2040	Alcançar tratamento de 50% do esgoto até 2040	Manutenção das condições de degradação atuais
Cenário 4	Projeção para o ano de 2040	Alcançar tratamento de 50% do esgoto até 2040	Restauração de 50% das APP's até 2040
Cenário 5	Projeção para o ano de 2040	Universalização do tratamento de esgoto até 2040;	Manutenção das condições de degradação atuais
Cenário 6	Projeção para o ano de 2040	Universalização do tratamento de esgoto até 2040;	Restauração de 50% das APP's até 2040

Fonte: autor (2021)

A definição dos cenários que foram estudados considerou o horizonte de planejamento dos planos de bacias, que é de vinte anos. Para a projeção da população foram utilizadas as taxas estabelecidas pelos planos municipais de saneamento básico, onde o método escolhido para projeção foi o método aritmético, que pressupõe que o crescimento de uma população se dá aritmeticamente, sendo semelhante a uma linha reta, seguindo uma taxa de crescimento constante. Este método pode ser indicado para pequenos municípios, devido a pouca variação anual, como no caso dos cinco dos sete municípios presentes na área de estudo, todos com menos de dez mil habitantes.

As taxas de crescimento adotadas foram as seguintes:

- Manhuaçu: Taxa de crescimento de 2,0% a.a. para a população urbana e -1,05% a.a. para a população rural;
- Manhumirim: Taxa de crescimento de 1,65% a.a. para a população urbana e -0,33% a.a. para a população rural;
- São João do Manhuaçu: Taxa de crescimento de 1,5% a.a. para a população urbana e -0,22% a.a. para a população rural;
- Alto Jequitibá: Taxa de crescimento de 1,5% a.a. para a população urbana e -0,18% a.a. para a população rural;

- Reduto: Taxa de crescimento de 1,5% a.a. para a população urbana e -0,08% a.a. para a população rural;
- Martins Soares: Taxa de crescimento de 1,5% a.a. para a população urbana e -0,01% a.a. para a população rural;
- Luisburgo: Taxa de crescimento de 2,0% a.a. para a população urbana e -1,2% a.a. para a população rural.

Para cálculo da manutenção das condições de degradação da vegetação nativa, considerou-se que os índices de vegetação existentes não seriam alterados nos próximos vinte anos, mantendo a mesma área do ano de 2020 da categoria Mata e Capoeirão.

A situação de tratamento de esgoto dos municípios localizados na área de estudo foi levantada por meio dos diagnósticos apresentados nos planos municipais de saneamento básico, que foram elaborados com o apoio do Comitê da Bacia Hidrográfica Águas do Rio Manhuaçu - CBH Manhuaçu.

Para o cálculo da geração de carga nos cenários 2, 4 e 6, com a recuperação de 50% das Áreas de Preservação Permanentes - APP's, foram gerados buffers através do software QGIS 2.18, os mesmos foram vetorizados e calculados sua área em km². Nessa quantificação, foi utilizado o software livre QGIS, versão 3.14, onde foram geradas as APP's através de um buffer fixo de 30 metros, considerando que quase em sua totalidade os cursos d'água do Alto Curso do Rio Manhuaçu não ultrapassam a largura de 10 metros, e conforme a Lei Federal 12.651, as APP's para cursos d'água de até 10 metros de largura são obrigatoriamente de 30 metros.

Nos cenários de recuperação de APP, as áreas de APP hídrica foram transportadas para a categoria mata e capoeirão, sendo observadas duas possibilidades. A primeira considerando a redução da área correspondente na categoria capoeira e campo e a segunda considerando a redução na categoria atividade agrícola, ambas as mais representativas na área de estudo ao lado da categoria mata e capoeirão (Figura 5). Para análise dos resultados, utilizou-se como base o cenário 1, onde não foi projetada nenhuma ação de tratamento de esgoto e recuperação de APP's e a partir daí foi realizada a comparação de cada cenário projetado com o cenário base.

Cenário 1	<ul style="list-style-type: none"> • Manutenção das condições atuais de tratamento de esgoto; • Manutenção das condições de degradação atuais.
Cenário 2	<ul style="list-style-type: none"> • Manutenção das condições atuais de tratamento de esgoto; • Restauração de 50% das APP's até 2040.
Cenário 3	<ul style="list-style-type: none"> • Alcançar tratamento de 50% do esgoto até 2040; • Manutenção das condições de degradação atuais.
Cenário 4	<ul style="list-style-type: none"> • Alcançar tratamento de 50% do esgoto até 2040; • Restauração de 50% das APP' s até 2040.
Cenário 5	<ul style="list-style-type: none"> • Universalização do tratamento de esgoto até 2040; • Manutenção das condições de degradação atuais.
Cenário 6	<ul style="list-style-type: none"> • Universalização do tratamento de esgoto até 2040; • Restauração de 50% das APP' s até 2040.
<p>Para restauração da APP hídrica as áreas das mesmas foram transportadas para a categoria mata e capoeirão considerando duas possibilidades:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Redução da área correspondente na categoria Capoeira e Campo; - Redução da área correspondente na categoria atividade agrícola 	

Figura 5 – Fluxograma dos cenários projetados
 Fonte: autor (2021)

encontrados sugerem, portanto, riscos baixos a médios de inundação na parte alta da bacia em condições normais de precipitação, uma vez que por ser mais alongada há menor possibilidade de ocorrência de chuvas intensas cobrindo simultaneamente toda sua extensão e há menor contribuição dos tributários. No entanto, esses fatores naturais, associados ao uso do solo de forma inadequada na área rural e ocupação desordenada do espaço urbano, podem elevar a tendência de ocorrência de inundações na bacia.

O padrão de drenagem da bacia hidrográfica em estudo pode ser considerado do tipo dendrítico, que é caracterizado pelas formas arborescentes e, conforme Trajano (2012), ocorre em áreas com predomínio de rochas homogêneas de caráter sedimentar e, em certa medida, isotrópicas (igualmente em todas as direções) em relação à erosão pluvial e fluvial.

5.2. MAPAS DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

Analisando os dados encontrados de uso do solo para o período 2008-2018, observou-se que a atividade agrícola teve crescimento contínuo, passando de 279,148 km² no ano de 2008 para 367,006 km² no ano de 2018, uma expansão de 87,858 km² em dez anos, 31,47% de crescimento. A atividade contou apenas com uma pequena queda no ano de 2014, ano em que houve um crescimento da classe Capoeira e Campo e uma ligeira queda da classe Mata e Capoeirão (Figura 7). Os mapas dos outros anos encontram-se em anexo.

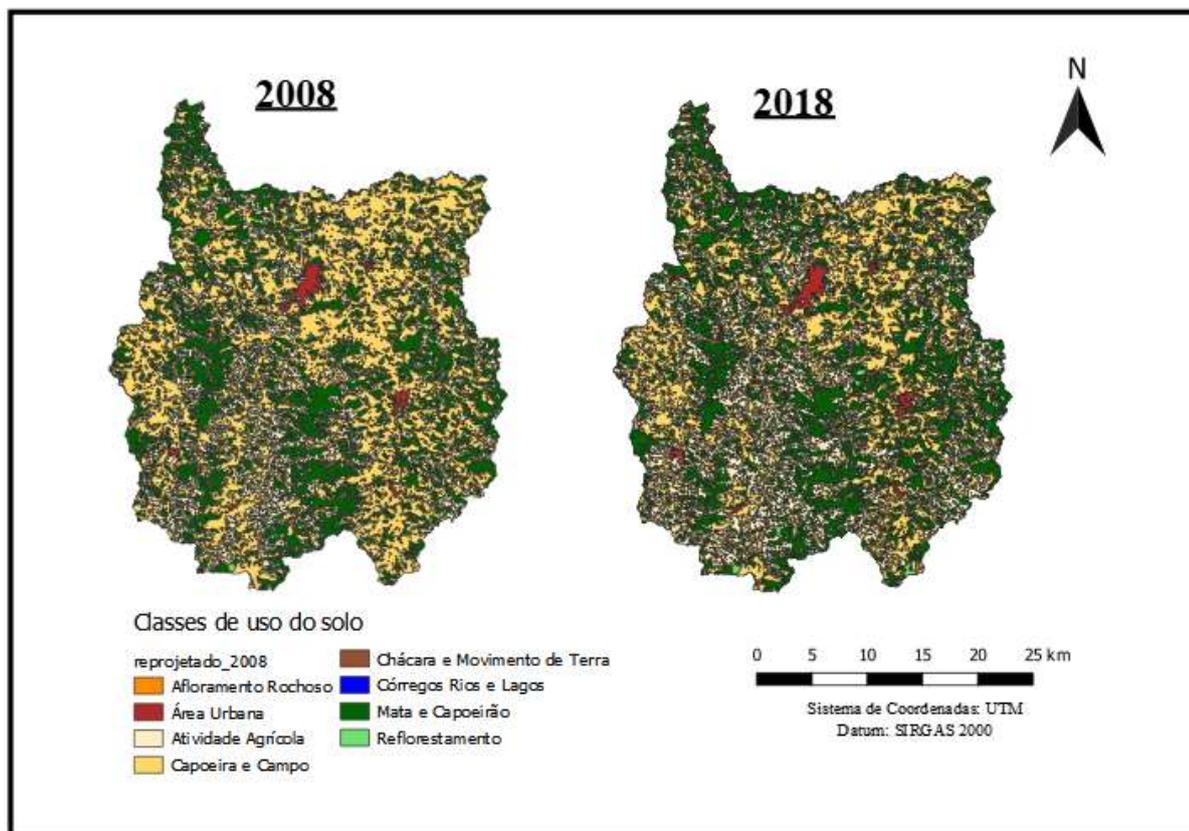


Figura 7 – Alterações no uso do solo nos anos de 2008 e 2018

Fonte: autor (2021)

Ao se analisar o comportamento da classe Capoeira e Campo, pode-se perceber crescimento apenas nos anos de 2013 e 2014, sendo que em todos os outros houve redução de sua área. De modo geral, a classe contou com uma redução de 25,65% no período 2008-2018, sendo a área de 112,589 km².

A Classe Mata e Capoeirão apresentou redução de sua área apenas nos anos de 2013, 2014 e 2015, passando de 328,614 km² em 2008 para 340,927 km² no ano de 2018, um crescimento de 12,313 km² ou 3,74% no período de estudo.

As classes Reflorestamento e Área Urbana se elevaram, de modo contínuo, em todo período, avançando em dez anos para 9,838 km² e 2,450 km², respectivamente. Em termos percentuais, este crescimento observado foi de 130,25% para a classe Reflorestamento e de 25,81% para a Área Urbana. O crescimento das áreas da classe Reflorestamento pode ser motivado pelas ações em desenvolvimento pelo Comitê de Bacia Hidrográfica Águas do Rio Manhuaçu, visando a restauração florestal, a entidade é atuante no território e desenvolveu diversos cercamentos de APP's e nascentes com a ajuda de parceiros.

De modo geral, observou-se uma possível substituição, principalmente das áreas de capoeira e campo por atividade agrícola, o que elevaria a exportação em 0,067 kg/km².dia de Fósforo Total; 0,177 kg/km².dia de Nitrogênio Total e 3,838 kg/km².dia de DBO_{5,20} (Figura 8), considerando os coeficientes ainda sem calibração.

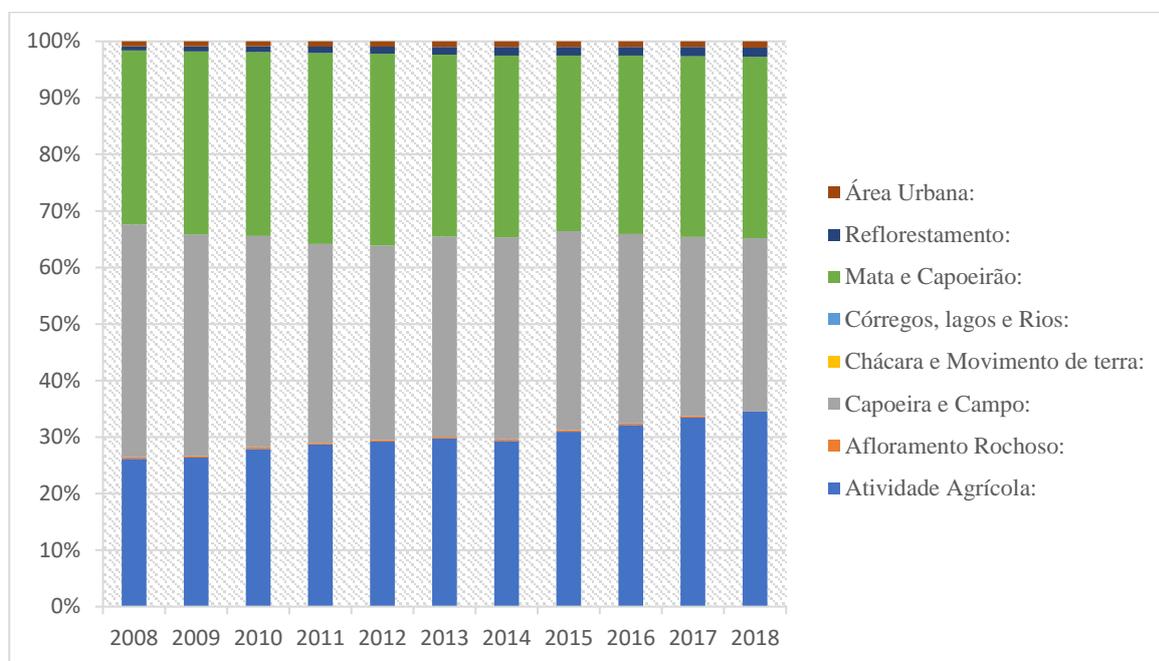


Figura 8 – Percentual das áreas por tipo de uso do solo no período de 2008-2018

Fonte: autor (2021)

Os dados dos dois últimos censos agropecuários realizados pelo IBGE apontam esta mesma tendência de redução das áreas de campo e crescimento da atividade agrícola. Além disso, as áreas levantadas pelo censo agropecuário indicam que as áreas de pastagem nos municípios da área de estudo passaram de 333,1 km² em 2006 para 283,5 km² no ano de 2017, uma redução de cerca de 15% no período analisado (Tabela 6).

Tabela 6 – Evolução da área de pastagem nos municípios da parte alta da DO6 (2006-2017)

MUNICÍPIO	ÁREA DE PASTAGEM (km ²)	
	2006	2017
Manhuaçu	97,5	64,2
Reduto	36,3	24,2
Manhumirim	26,2	25,0
Santana do Manhuaçu	132,4	116,1
Alto Jequitibá	11,6	22,9
Luisburgo	19,1	18,0
Martins Soares	9,8	12,8
Total	333,1	283,5

Fonte: (IBGE, 2017)

O comportamento da classe de atividade agrícola também foi semelhante aos dados do censo, passando de 342,9 km² no ano de 2006 para 593,3 km² no ano de 2017, correspondendo a um crescimento de cerca de 42% no período analisado pelo censo (Tabela 7). Embora os dados disponíveis pelo censo agropecuário não sejam exatamente do mesmo período dos mapas de uso e ocupação eles apontam a mesma tendência observada, reforçando os resultados obtidos no mapeamento do uso e ocupação do solo.

Tabela 7– Evolução da área de agricultura nos municípios da parte alta da DO6 (2006-2017)

MUNICÍPIOS	ÁREA DE AGRICULTURA (km ²)	
	2006	2017
Manhuaçu	34,5	221,0
Reduto	50,5	42,1
Manhumirim	58,5	61,9
Santana do Manhuaçu	50,8	91,9
Alto Jequitibá	56,4	57,1
Luisburgo	62,7	67,6
Martins Soares	29,4	51,6
Total	342,9	593,3

Fonte: (IBGE, 2017)

Nunes e Roig (2015) observaram um comportamento parecido com este ao analisarem o mapeamento do uso e ocupação do solo da bacia do alto do descoberto, DF/GO, por meio de classificação automática. Seu estudo constatou um aumento significativo das áreas de vegetação agrícola (aproximadamente 11%) em detrimento das áreas de campo e savana (aproximadamente 6% cada). Outro ponto com comportamento parecido foi o aumento das áreas de construções e edificações (áreas urbanas).

Brito e Prudente (2005) já observaram a mesma tendência de comportamento de uso do solo quando desenvolveram o estudo de análise temporal do uso do solo e cobertura vegetal do município de Uberlândia-MG, durante os anos de 1988 e 2002. Conforme a pesquisa, as áreas de pastagem sofreram redução no período analisado, sendo substituídas, principalmente, pela atividade agrícola, com destaque para milho e soja.

O documento Projeções do Agronegócio Minas Gerais 2017 a 2027, elaborado pela SEAPA - Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento, em parceria com as suas empresas vinculadas (Emater-MG, IMA e Epamig), reforça essa tendência de ampliação da área de cultivo agrícola em Minas Gerais. Conforme a publicação, as projeções de grãos apresentam um crescimento médio anual de 0,6% na área colhida e 1,6% na produção, o que

levará para os próximos 10 anos um aumento de 6,0% da área e 17,6% da produção, passando dos atuais 3,4 milhões de ha para 3,6 milhões de ha em 2027 e a produção de 14,3 milhões de toneladas para 16,8 milhões de t. (SEAPA, 2017).

Como pode ser observado, a evolução da fronteira agrícola vem acontecendo nos últimos anos e tende a continuar nos próximos. Esta evolução aconteceu principalmente na área de estudo com a substituição da área de pastagem por área de cultivo. No entanto, a projeção de crescimento do setor agrícola e os impactos da substituição das áreas de vegetação nativa por esta atividade deve ser estudada para que haja um controle e elimine possíveis riscos de crescimento da contaminação dos recursos hídricos.

Essas alterações no uso do solo podem aumentar em várias ordens de magnitude a produção de sedimentos em bacias hidrográficas. Somados aos impactos causados pelo carreamento de sedimentos ao curso d'água, a conversão do uso para a agricultura provoca mudanças na composição química do solo, que podem levar à perda significativa de substâncias estocadas, como, por exemplo, a nitrificação de nitrogênio orgânico do solo, e por consequência, a liberação de nitrato para as águas subterrâneas (NOVOTNY e OLEM, 1994).

Verificou-se que parte dos municípios da área de estudo possuem legislação de uso e ocupação do solo, apesar que, na prática, o crescimento ainda acontece de modo desordenado, fato este evidenciado pela ausência acentuada de tratamento de esgoto e também ao elevado índice de cursos d'água assoreados, os quais foram verificados em campo.

5.3. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO MQUAL 2.0

Iniciou-se a calibração utilizando os dados de contribuição difusa. Através da ferramenta solver do software Excel foi realizado o ajuste dos coeficientes, que sofreram variação de modo a igualarem os resultados observados em campo e estimados pelo modelo. Para isso, foi necessário a realização dos cálculos da carga exportada (kg/dia) sem a calibração e utilização dos dados de vazão do curso d'água fornecidos pelo IGAM no ponto de análise para cálculo da carga diária observada de cada parâmetro (Tabela 8).

Tabela 8 – Exemplo de cálculo de carga exportada estimada por parâmetro em 2009

PARÂMETROS (2009)	TIPOLOGIA DE USO	ÁREA DE USO E OCUPAÇÃO (km ²)	CARGA EXPORTADA (kg/dia)
NITROGÊNIO	Atividade Agrícola:	281,548	185,793
	Capoeira e Campo:	417,772	33,908
	Chácara e Movimento de terra:	0,547	0,049
	Mata e Capoeirão:	345,304	33,526
	Reflorestamento:	9,646	0,588
	Área Urbana:	9,523	11,503
	Total:		265,370
FÓSFORO	Atividade Agrícola:	281,548	23,084
	Capoeira e Campo:	417,772	0,420
	Chácara e Movimento de terra:	0,547	0,002
	Mata e Capoeirão:	345,304	0,696
	Reflorestamento:	9,646	0,019
	Área Urbana:	9,523	1,316
	Total:		25,540
DBO_{5,20}	Atividade Agrícola:	281,548	1196,840
	Capoeira e Campo:	417,772	430,892
	Chácara e Movimento de terra:	0,547	2,078
	Mata e Capoeirão:	345,304	388,670
	Reflorestamento:	9,646	11,292
	Área Urbana:	9,523	150,096
	Total:		2.179,870

Fonte: autor (2021)

Após a realização da calibração, a maioria dos coeficientes sofreram alteração, os únicos que mantiveram os mesmos valores foram as categorias reflorestamento, capoeira e campo para o parâmetros fósforo total e a categoria chácara e movimento de terra para os parâmetros fósforo total e nitrogênio total (Tabela 9).

Os maiores valores dos coeficientes de exportação observados foram para as categorias áreas urbanas e atividade agrícola. As áreas urbanas são fontes de contaminação por nitrogênio total e fósforo total devido, principalmente, ao lançamento de esgoto doméstico sem tratamento e através da drenagem pluvial. Já nas áreas onde são desenvolvidas as atividades agrícolas, o escoamento da água de chuva no solo onde foram aplicados fertilizantes tornam esta atividade uma importante fonte de exportação de nitrogênio e fósforo para o curso d'água.

Molisani et al., (2013), analisaram as emissões naturais e antrópicas de nitrogênio, fósforo e metais para a bacia do Rio Macaé, destacando que além da exportação natural, as culturas agrícolas permanentes e temporárias fazem uso de fertilizantes e defensivos agrícolas, tendo em suas composições N, P e metais que são escoados para as águas superficiais dependendo do tipo do solo e da prática agrícola.

Tabela 9 – Coeficientes MQUAL 2.0 calibrados para área de estudo

FONTES POLUIDORAS	UNIDADE	FÓSFORO TOTAL	NITROGÊNIO TOTAL	DBO_{5,20}
Áreas Urbanas	kg/km ² .dia	0,138	1,563	15,815
Chácara e Movimento de terra:	kg/km ² .dia	0,005	0,090	3,799
Mata/Capoeirão	kg/km ² .dia	0,006	0,147	1,014
Reflorestamento	kg/km ² .dia	0,002	0,063	1,031
Capoeira Campo	kg/km ² .dia	0,001	0,116	1,100
Atividade Agrícola	kg/km ² .dia	0,083	1,287	4,398
População com lançamento direto de esgotos	kg/hab.dia	0,002	0,012	0,056

Fonte: autor (2021)

Os resultados da validação encontrados variaram de 0,60 a 0,70, enquadrando o modelo calibrado na faixa $0,36 < \text{CNS} < 0,75$ na classificação sugerida por van Liew et al., (2007) (Tabela 10), sendo considerado, portanto, satisfatório. Ressalta-se que, em estudos futuros poderão ser utilizados modelos associados ou mesmo os demais módulos do MQUAL, como SIMOX III, que conforme COBRAPE (2010), calculam o abatimento da carga de nutrientes na extensão do curso d'água. Deste modo, os coeficientes poderão se aproximar mais do ajuste perfeito avaliado pelo CNS.

Tabela 10 – Índices do CNS encontrados na validação

ANO DA VALIDAÇÃO	P Total	N Total	DBO_{5,20}
2016	0,63	0,70	0,66
2017	0,60	0,60	0,60
2018	0,60	0,61	0,60

Fonte: autor (2021)

5.4. ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE CARGA POLUIDORA EM DIFERENTES CENÁRIOS

Para estimativa dos cenários de estudo, foi necessária a preparação dos dados de entrada do modelo para cada cenário que seria projetado. Utilizou-se inicialmente a projeção populacional em um horizonte de 20 anos para os municípios da área de estudo, os dados foram os disponíveis nos Planos Municipais de Saneamento Básico (Tabela 11).

Tabela 11 – População da parte alta da bacia do Rio Manhuaçu – DO6

MUNICÍPIO	POPULAÇÃO (2020)	POPULAÇÃO TOTAL	PERCENTUAL (%)	POPULAÇÃO (2040)
Alto Jequitibá	7.976	7.976	100	9.594
Luisburgo	6.276	6.276	100	5.592
Manhuaçu	69.802	74.297	94	90.411
Manhumirim	20.209	20.209	100	27.850
Martins Soares	6.338	6.338	100	7.430
Reduto	6.344	6.344	100	6.461
São João do Manhuaçu	9.394	9.394	100	10.478
Total	126.339	147.348		157.816

Fonte: IBGE, 2010

Na etapa de construção dos cenários, para o cenário 1, considerou-se, nos cálculos, a manutenção das condições atuais de tratamento de esgoto, ou seja, ausência de estações de tratamento em todos os municípios da área de estudo e a manutenção dos níveis atuais de degradação da vegetação nativa. Com a projeção da população para o ano de 2040 já realizada. Os resultados foram a exportação de 350 kg de fósforo total, 2.473,88 kg de nitrogênio total e 11.365,88 kg de DBO_{5,20} por dia (Tabela 12).

Tabela 12 - Carga Exportada (kg/dia) por Fonte Poluidora no Cenário 1

FONTES POLUIDORAS	FÓSFORO TOTAL (kg/dia)	NITROGÊNIO TOTAL (kg/dia)	DBO _{5,20} (kg/dia)
Áreas Urbanas	1,640	18,650	188,790
Chácara e Movimento de terra	0,005	0,060	2,830
Mata/Capoeirão	2,040	50,110	345,690
Reflorestamento	0,030	1,090	17,920
Capoeira Campo	0,320	37,850	358,960
Atividade Agrícola	30,460	472,330	1.614,000
População com lançamento direto	315,630	1.893,790	8.837,690
Total exportado (kg/Dia)	350,125	2.473,880	11.365,880

Fonte: autor (2021)

Somente a evolução populacional do ano de 2020 para 2040 será responsável pela exportação de 53,96 kg de fósforo total, 323,78 kg de nitrogênio total e 1.510,992 kg de DBO_{5,20} por dia para o Rio Manhuaçu (Figura 9), caso não ocorra melhorias no tratamento de esgoto dos municípios da área de estudo.

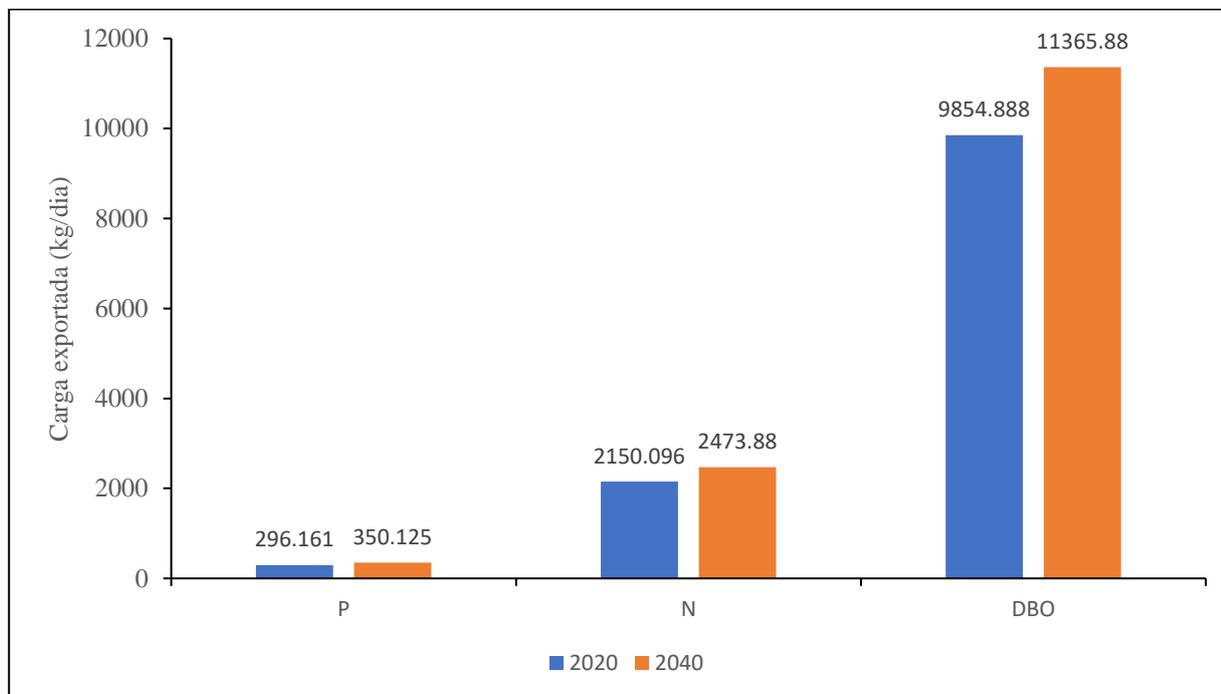


Figura 9– Evolução da exportação de carga poluidora pelo crescimento populacional 2020-2040 no cenário 1

Fonte: autor (2021)

Analisando o parâmetro fósforo total, as duas categorias que mais contribuíram com a sua exportação foram a população com lançamento direto de esgoto e a atividade agrícola, com 315,63 kg e 30,46 kg diários, respectivamente. Neste cenário, a exportação de fósforo total pela atividade agrícola corresponde a 8,68% do total exportado ao curso d'água.

O comportamento do parâmetro Nitrogênio total foi semelhante, sendo também mais expressivos os lançamentos direto de esgotos com 1.893,790 kg e as atividades agrícolas com 472,330 kg. As atividades agrícolas serão responsáveis neste cenário pela exportação de 19,09% do total de nitrogênio total exportado.

Conforme Von Sperling (2014), as principais fontes de nitrogênio e fósforo nos cursos d'água, em geral, são os esgotos domésticos, além de efluentes de indústrias e excrementos de animais. O escoamento de águas pluviais também contribui de forma significativa, em geral,

sua origem é tanto proveniente dos solos fertilizados das áreas agrícolas quanto das áreas urbanas.

Os impactos da exportação em excesso de nutrientes nos recursos hídricos são grandes, a aceleração do processo de eutrofização compromete a qualidade da água, tanto para manutenção da vida aquática, como para utilização da água pelo homem para seus mais diferentes fins.

Para o Cenário 2 utilizou-se para estimativa a manutenção das condições atuais de tratamento de esgoto e restauração de 50% das APP's até o ano de 2040. As estimativas consideraram apenas as APP's Hídricas, que conforme os dados obtidos no software QGIS ocupam 145,325 km² da área de estudo.

Analisando a primeira possibilidade do segundo cenário, foram exportados 350,86 kg de Fósforo Total, 2.478,38 kg de Nitrogênio Total e 11.353,39 kg de DBO_{5,20} diariamente (Tabela 13). Observou-se que a carga de Nitrogênio e Fósforo total tiveram crescimento de 0,74 kg e 4,5 kg por dia, respectivamente e a DBO_{5,20} teve uma redução de 12,49 kg diários, comparados ao cenário base (Cenário 1).

Tabela 13 – Carga Exportada (kg/dia) por Fonte Poluidora no Cenário 2-1

FONTES POLUIDORAS	FÓSFORO TOTAL (kg/dia)	NITROGÊNIO TOTAL (kg/dia)	DBO_{5,20} (kg/dia)
Áreas Urbanas	1,640	18,650	188,790
Chácara e Movimento de terra	0,005	0,060	2,830
Mata/Capoeirão	2,920	71,470	493,060
Reflorestamento	0,030	1,090	17,920
Capoeira Campo	0,180	20,990	199,100
Atividade Agrícola	30,460	472,330	1.614,000
População com lançamento direto	315,630	1.893,790	8.837,690
Total exportado (kg/Dia)	350,865	2.478,380	11.353,390

Fonte: autor (2021)

Os resultados apontam um crescimento de 0,21% da carga de Fósforo Total, 0,18% de Nitrogênio Total e redução de 0,10% da carga diária de DBO_{5,20}, ao se comparar com o cenário 1 (Figura 10).

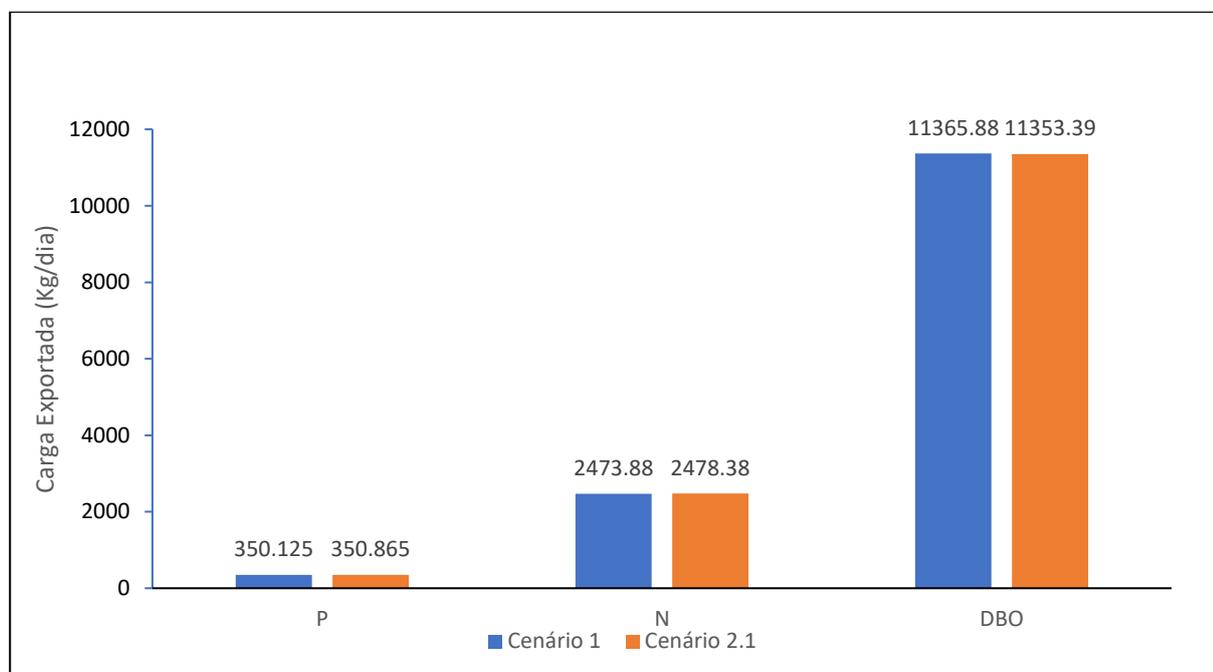


Figura 10– Evolução da exportação de carga poluidora conforme cenário 2-1.

Fonte: autor (2021)

Analisando a segunda possibilidade, foram estimados a exportação de 338,93 kg de fósforo total, 2.308,21 kg de Nitrogênio Total e 10.874,20 kg de DBO_{5,20} (Tabela 14). Neste cenário houve redução da carga diária de 11,19 kg de fósforo total, 165,67 kg de nitrogênio total e 491,68 kg de DBO_{5,20}, comparado ao cenário base.

Tabela 14 – Carga Exportada (kg/dia) por Fonte Poluidora no Cenário 2-2

FONTES POLUIDORAS	FÓSFORO TOTAL (kg/dia)	NITROGÊNIO TOTAL (kg/dia)	DBO_{5,20} (kg/dia)
Áreas Urbanas	1,640	18,650	188,790
Chácara e Movimento de terra	0,005	0,060	2,830
Mata/Capoeirão	2,920	71,470	493,060
Reflorestamento	0,030	1,090	17,920
Capoeira Campo	0,320	37,850	358,960
Atividade Agrícola	18,390	285,300	974,950
População com lançamento direto	315,630	1.893,790	8.837,69
Total exportado (kg/Dia)	338,935	2.308,210	10.874,2
			0

Fonte: autor (2021)

Os resultados apontam uma redução diária de 3,19 % da carga de Fósforo Total, 6,69% de Nitrogênio Total e de 4,32% da carga diária de DBO_{5,20} (Figura 11). A redução observada com a recuperação de APP's situadas em áreas agrícolas, ao se comparar com a possibilidade

de recuperação da categoria capoeira e campo evidenciam a contribuição da atividade para o aporte de N, P e $DBO_{5,20}$ no curso d'água em estudo.

Conforme Palma-Silva, (1999), o parâmetro nitrogênio contribui com o total de nutrientes encaminhados ao curso d'água e, conseqüentemente, com o crescimento do nível de eutrofização do mesmo. Este elemento ao atingir o curso d'água provoca o aumento da proliferação de microrganismos, que através da fotossíntese, convertem carbono inorgânico em novas células (matéria orgânica), aumentando também a $DBO_{5,20}$ do sistema.

Já com relação ao fósforo total, Silva & Pruski (1997), verificaram em seu trabalho que ficou evidente a influência da concentração de PO_4^- na deterioração da qualidade da água, sendo o uso agrícola considerado importante exportador deste nutriente.

Conforme Von Sperling (2014), a retirada da mata ciliar de um curso d'água pode causar a redução na quantidade de oxigênio dissolvido, devido ao aumento da disponibilização de nutrientes na água provenientes do carreamento de solos (sólidos em suspensão e sólidos dissolvidos) e material de origem orgânica animal e vegetal, microrganismos, adubo, despejos industriais e domésticos.

Os benefícios da restauração das APP's vão além da melhoria nos índices dos parâmetros estudados, a recomposição vegetal das APP's pode reduzir o carreamento de partículas de sedimentos para o curso d'água, fator este de grande importância principalmente para a área de estudo, composta por diversos trechos com elevados níveis de assoreamento do Rio Manhuaçu.

Vários estudos demonstraram a eficiência da redução de exportação de poluentes alcançados com a restauração de APP's. Gillian (1994) mostrou em seus experimentos a remoção de mais de 90% na concentração de sedimentos e de nitrato e, aproximadamente, 50% de fósforo da água escoada através da mata ciliar. Bartran e Balance (1996) afirmaram que vários estudos da dinâmica de nutrientes da mata ciliar demonstram que a maioria de nutrientes e sedimentos, tanto nos fluxos de águas subterrâneas como superficiais das terras cultiváveis, são removidos nas matas nativas, antes de chegarem ao curso d'água.

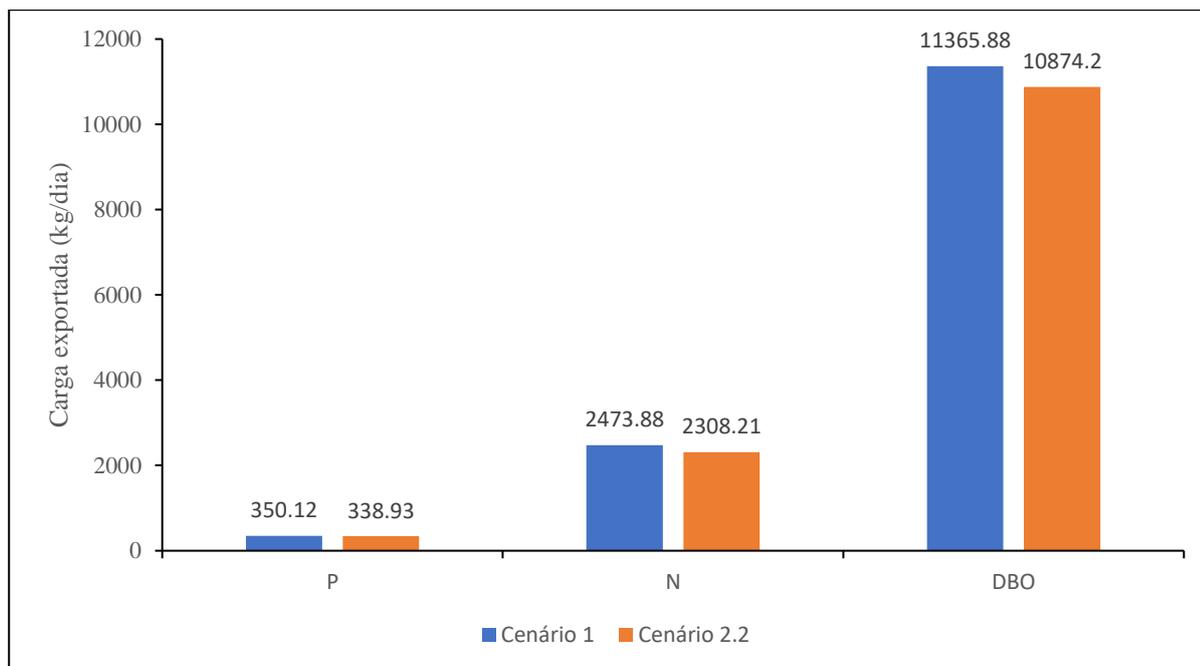


Figura 11 – Evolução da exportação de carga poluidora conforme cenário 2-2.

Fonte: autor (2021)

No Cenário 3 considerou-se a possibilidade de tratamento de 50% do esgoto até o ano de 2040 e manutenção das condições atuais de degradação da vegetação nativa. Os resultados apontaram a exportação de 192,30 kg de Fósforo Total diariamente; 1.526,98 kg de Nitrogênio e 6.947,03 kg de DBO_{5,20} (Tabela 15).

Tabela 15 – Carga Exportada (kg/Dia) por Fonte Poluidora no Cenário 3

FONTES POLUIDORAS	FÓSFORO TOTAL (kg/dia)	NITROGÊNIO TOTAL (kg/dia)	DBO_{5,20} (kg/dia)
Áreas Urbanas	1,640	18,650	188,790
Chácara e Movimento de terra	0,005	0,060	2,830
Mata/Capoeirão	2,040	50,110	345,690
Reflorestamento	0,030	1,090	17,920
Capoeira Campo	0,320	37,850	358,960
Atividade Agrícola	30,460	472,330	1614,000
População com lançamento direto	157,810	946,890	4.418,840
Total exportado (kg/Dia)	192,305	1.526,980	6.947,030

Fonte: autor (2021)

Os dados demonstram uma redução diária da exportação de 157,82 kg de Fósforo total, 946,90 kg de Nitrogênio total e 4.418,85 kg de DBO_{5,20}, correspondendo a 45,07%; 38,27% e 38,87%, respectivamente (Figura 12), ao comparado com o cenário base. o se comparar com a

redução da exportação projetada para a recuperação de APP nos cenários anteriores, percebe-se que o tratamento de esgoto traria resultados consideravelmente superiores.

Conforme Piveli e Kato (2005), a presença de fósforo e compostos de nitrogênio em águas superficiais podem estar relacionadas a duas fontes principais: das águas vindas, direta ou indiretamente, de terras cultivadas e adubadas com fertilizantes químicos e, principalmente, referentes ao lançamento de esgoto doméstico, tratado ou não.

Uma das formas de reduzir a exportação dos poluentes desta fonte e, conseqüentemente, reduzir seus impactos negativos ao meio ambiente é através da coleta e tratamento de esgotos antes de seu lançamento no corpo receptor, visto que grande parte dos contaminantes presentes neste meio são removidos nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) através de processos químicos, físicos e biológicos (PAGANINI, 2007).

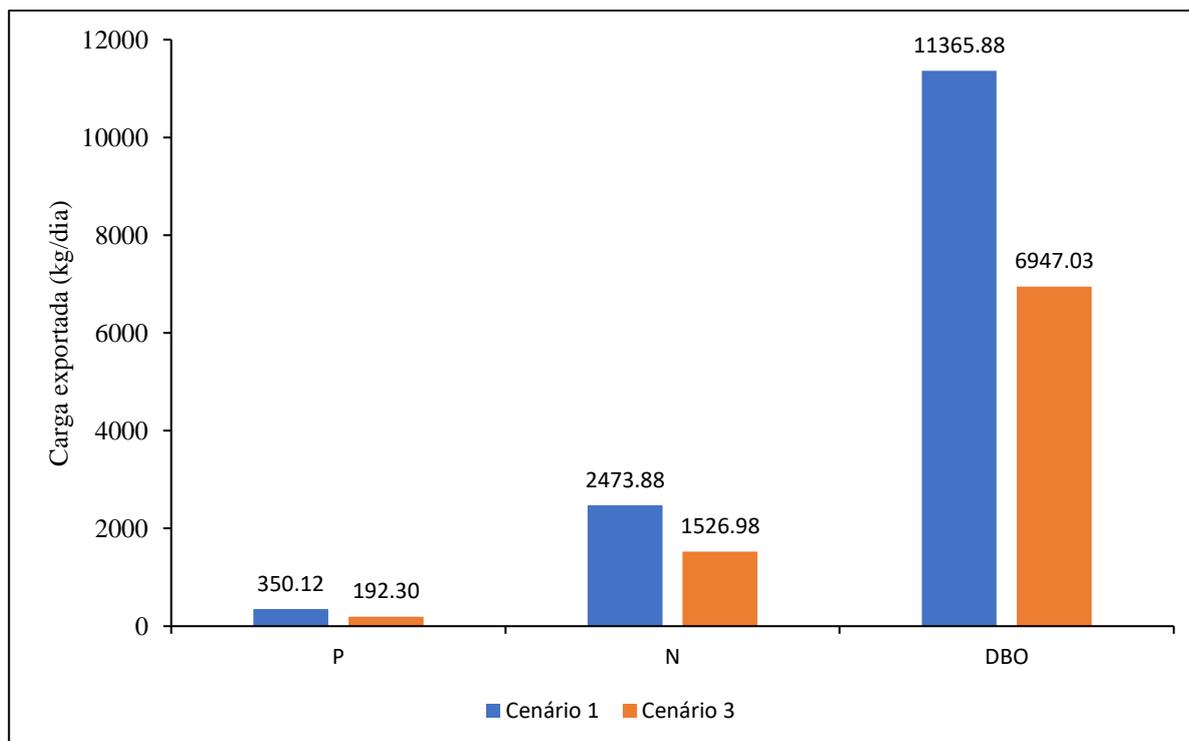


Figura 12 – Evolução da exportação de carga poluidora conforme cenário 3.

Fonte: autor (2021)

Na estimativa do Cenário 4 também considerou as duas possibilidades levantadas no Cenário 2 para recuperação das APP's hídricas, acrescentando a possibilidade de alcance do tratamento de 50% do esgoto gerado na bacia até o ano de 2040.

Para a possibilidade 1, foram estimados a exportação de 193,04 kg de fósforo total, 1.531,48 kg de Nitrogênio Total e 6.934,54 kg de DBO_{5,20} (Tabela 16). O cenário proporcionou uma redução da exportação diária de 157,08 kg de Fósforo total, 942,40 kg de Nitrogênio total e 4.431,34 kg de DBO_{5,20} (Tabela 16).

Os resultados apontam uma redução diária de 44,86% da carga de Fósforo Total, 38,09% de Nitrogênio Total e de 38,98% da carga diária de DBO_{5,20} (Figura 13).

Tabela 16 - Carga Exportada (kg/dia) por Fonte Poluidora no Cenário 4-1

FONTES POLUIDORAS	FÓSFORO TOTAL (kg/dia)	NITROGÊNIO TOTAL (kg/dia)	DBO_{5,20} (kg/dia)
Áreas Urbanas	1,640	18,650	188,790
Chácara e Movimento de terra	0,005	0,060	2,830
Mata/Capoeirão	2,920	71,470	493,060
Reflorestamento	0,030	1,090	17,920
Capoeira Campo	0,180	20,990	199,100
Atividade Agrícola	30,460	472,330	1614,000
População com lançamento direto	157,810	946,890	4418,840
Total exportado (kg/Dia)	193,045	1.531,480	6.934,540

Fonte: autor (2021)

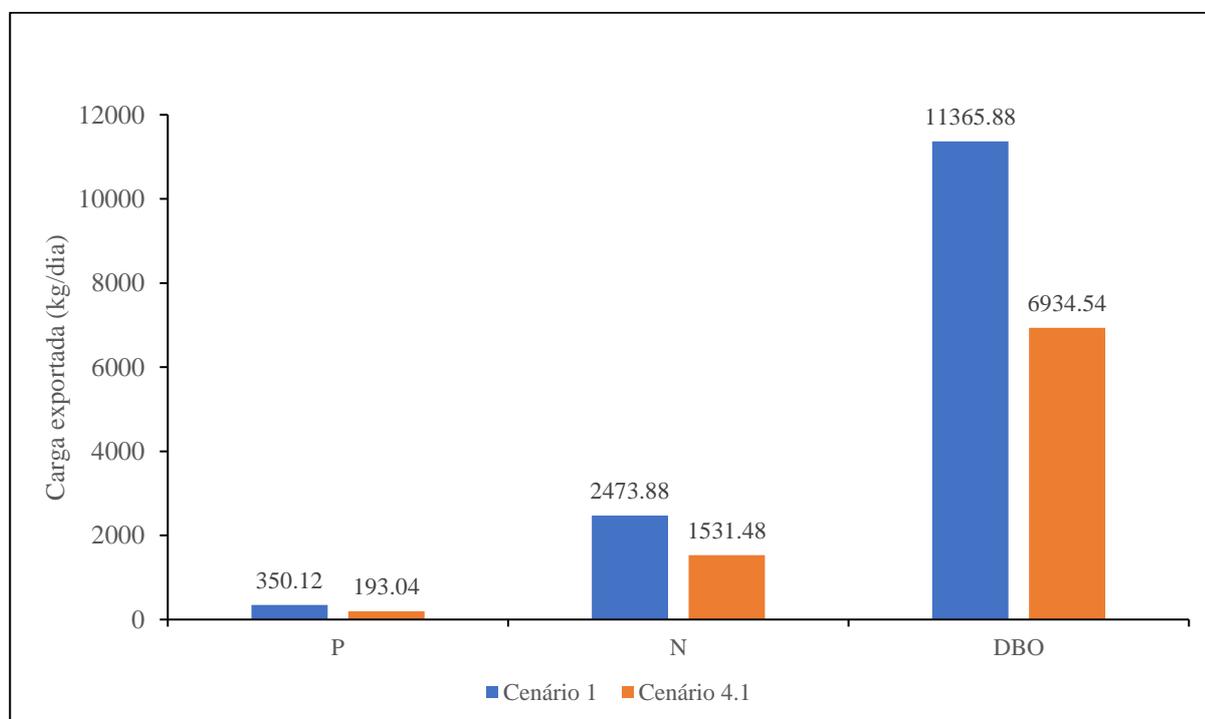


Figura 13 – Evolução da exportação de carga poluidora conforme cenário 4-1.

Fonte: autor (2021)

Já considerando a possibilidade dois, a exportação de nutrientes correspondeu a 181,11 kg de fósforo total, 1.361,31 kg de Nitrogênio Total e 6.455,35 kg de DBO_{5,20} (Tabela 17). O cenário proporcionou uma redução da exportação de 169,01 kg de Fósforo Total, 1.112,57 kg de Nitrogênio total e 4.910,53 kg de DBO_{5,20} diariamente. Os dados demonstram uma redução diária de 48,27% da carga de Fósforo Total, 44,97% de Nitrogênio Total e de 43,20% da carga diária de DBO_{5,20} (Figura 14).

Tabela 17 - Carga Exportada (kg/dia) por Fonte Poluidora no Cenário 4-2

FONTES POLUIDORAS	FÓSFORO TOTAL (kg/dia)	NITROGÊNIO TOTAL (kg/dia)	DBO_{5,20} (kg/dia)
Áreas Urbanas	1,640	18,650	188,790
Chácara e Movimento de terra	0,005	0,060	2,830
Mata/Capoeirão	2,920	71,470	493,060
Reflorestamento	0,030	1,090	17,920
Capoeira Campo	0,320	37,850	358,960
Atividade Agrícola	18,390	285,300	974,950
População com lançamento direto	157,810	946,890	4.418,840
Total exportado (kg/Dia)	181,115	1.361,310	6.455,350

Fonte: autor (2021)

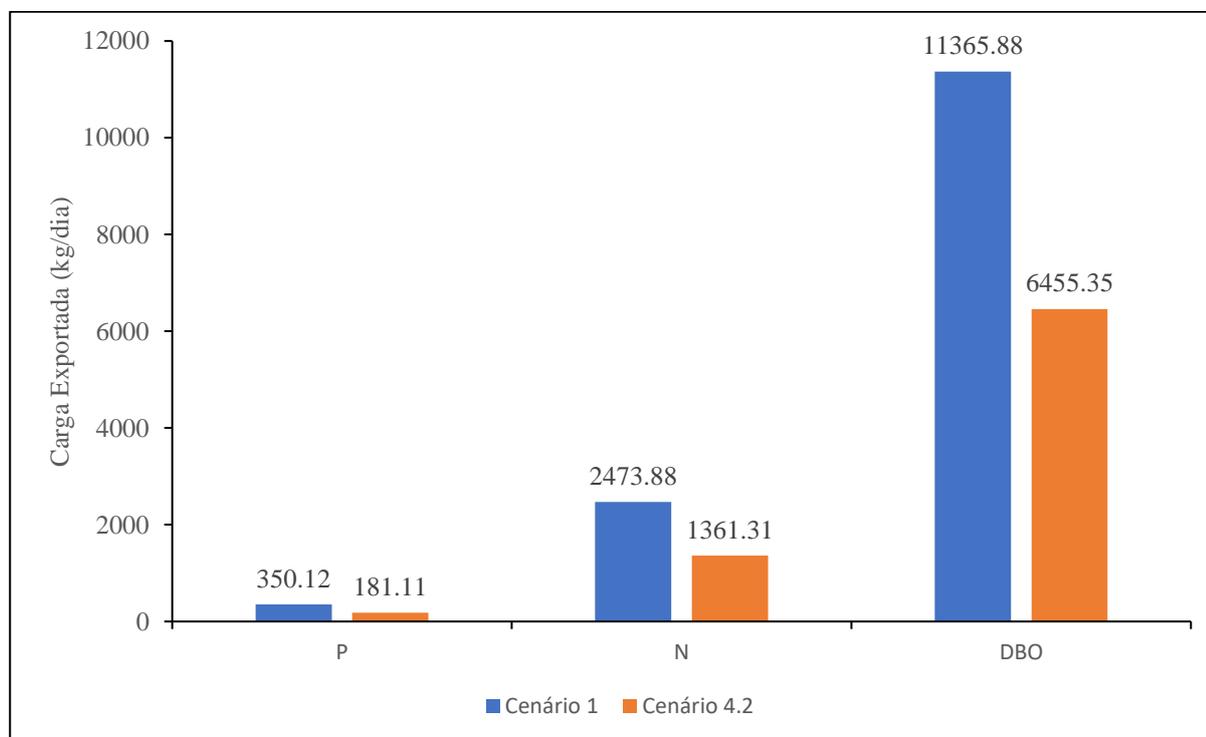


Figura 14 – Evolução da exportação de carga poluidora conforme cenário 4-2.

Fonte: autor (2021)

Já o cenário 5 considerou o alcance da meta do Plano Nacional de Saneamento Básico, alcançando a universalização do tratamento de esgoto até o ano de 2040 e manutenção das condições atuais de degradação da vegetação nativa. Os resultados foram a exportação de 34,495 kg de Fósforo Total, 580,09 kg de Nitrogênio total e 2.528,19 de DBO_{5,20} diariamente (Tabela 18).

Os resultados observados neste cenário foram a redução de 90,15 % da carga diária de Fósforo total exportada, 76,55 % da carga de Nitrogênio total exportada e 77,75 % da carga de DBO_{5,20} ao se comparar com o primeiro cenário (Figura 15).

Tabela 18 – Carga Exportada (kg/dia) por Fonte Poluidora no Cenário 5

FONTES POLUIDORAS	FÓSFORO TOTAL (kg/dia)	NITROGÊNIO TOTAL (kg/dia)	DBO_{5,20} (kg/dia)
Áreas Urbanas	1,640	18,650	188,790
Chácara e Movimento de terra	0,005	0,060	2,830
Mata/Capoeirão	2,040	50,110	345,690
Reflorestamento	0,030	1,090	17,920
Capoeira Campo	0,320	37,850	35,960
Atividade Agrícola	30,460	472,330	1.614,000
População com lançamento direto	0	0	0
Total exportado (kg/Dia)	34,495	580,090	2.528,190

Fonte: autor (2021)

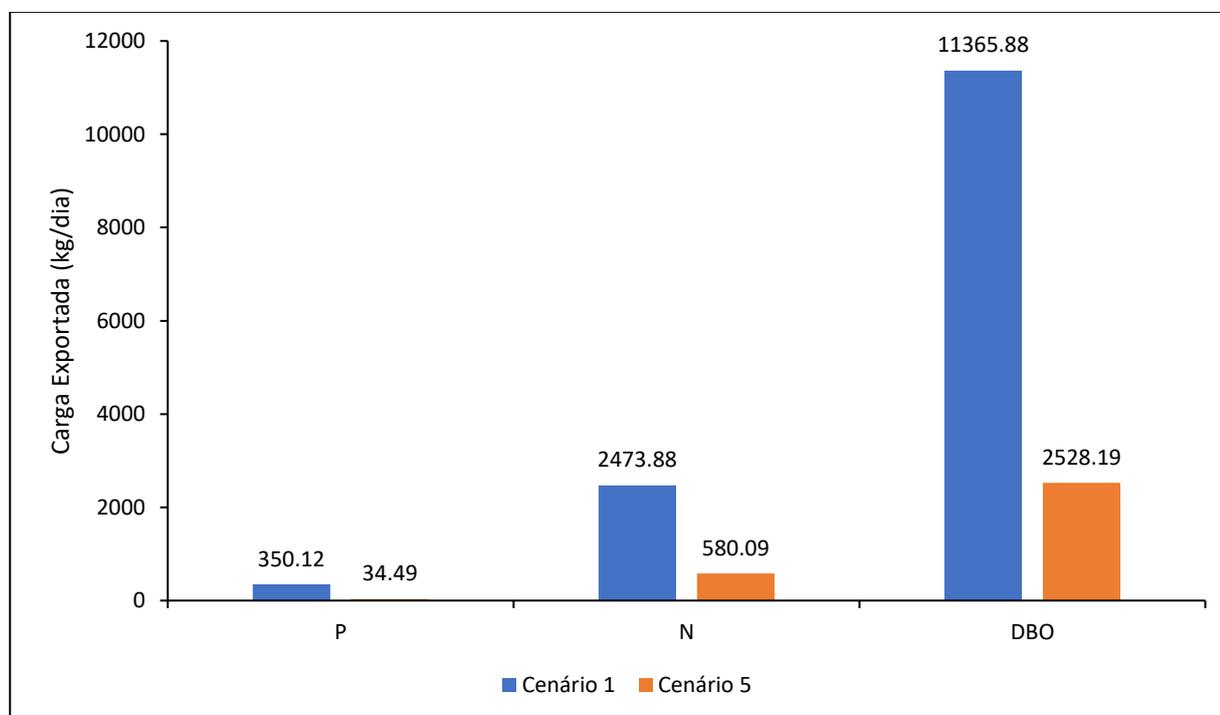


Figura 15– Evolução da exportação de carga poluidora conforme cenário 5.

Fonte: autor (2021)

No cenário 6 também foram consideradas as duas possibilidades levantadas no Cenário 2 para recuperação das APP's hídricas, acrescentando a possibilidade de alcance do tratamento de 100% do esgoto gerado na bacia até o ano de 2040.

Para a possibilidade 1, foram estimados a exportação de 35,23 kg de fósforo total, 584,59 kg de Nitrogênio Total e 2.515,70 kg de DBO_{5,20} (Tabela 19). O cenário proporcionou uma redução da exportação diária de 314,89 kg de Fósforo total, 1.889,29 kg de Nitrogênio total e 8.850,18 kg de DBO_{5,20}.

Os resultados alcançados neste cenário apontam uma eficiência de redução de carga diária de 89,94% para Fósforo total, 76,37% para Nitrogênio total e 77,87% para DBO_{5,20} (Figura 16).

Tabela 19 – Carga Exportada (kg/dia) por Fonte Poluidora no Cenário 6-1

FONTES POLUIDORAS	FÓSFORO		
	TOTAL (kg/dia)	NITROGÊNIO TOTAL (kg/dia)	DBO _{5,20} (kg/dia)
Áreas Urbanas	1,640	18,650	188,790
Chácara e Movimento de terra	0,005	0,060	2,830
Mata/Capoeirão	2,920	71,470	493,060
Reflorestamento	0,030	1,090	17,920
Capoeira Campo	0,180	20,990	199,100
Atividade Agrícola	30,460	472,330	1.614,000
População com lançamento direto	0	0	0
Total exportado (kg/Dia)	35,235	584,590	2.515,700

Fonte: autor (2021)

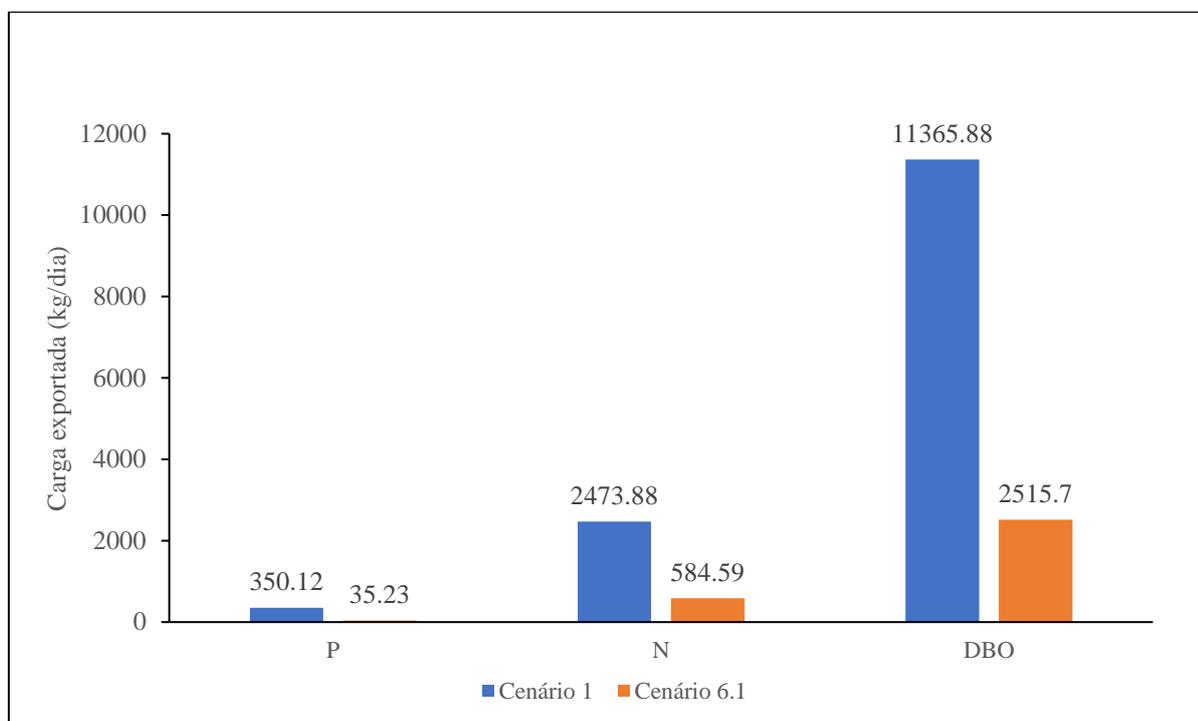


Figura 16 – Evolução da exportação de carga poluidora conforme cenário 6-1.

Fonte: autor (2021)

Para a possibilidade 2, foram estimados a exportação de 22,95 kg de fósforo total, 414,36 kg de Nitrogênio total e 2.036,51 kg de DBO_{5,20} (Tabela 20). O cenário proporcionou uma redução da exportação diária de 327,17 kg de Fósforo total, 2.059,52 kg de Nitrogênio total e 9.329,37 kg de DBO_{5,20}.

Os resultados alcançados neste cenário apontam uma eficiência de redução de carga diária de 93,44% para Fósforo total, 83,25% para Nitrogênio total e 82,08% para DBO_{5,20} (Figura 17).

Tabela 20 – Carga Exportada (kg/dia) por Fonte Poluidora no Cenário 6-2

FONTES POLUIDORAS	FÓSFORO TOTAL (kg/dia)	NITROGÊNIO TOTAL (kg/dia)	DBO _{5,20} (kg/dia)
Áreas Urbanas	1,640	18,650	188,790
Chácara e Movimento de terra	0,005	0,060	2,830
Mata/Capoeirão	2,920	71,470	493,060
Reflorestamento	0,030	1,090	17,920
Capoeira Campo	0,320	37,850	358,960
Atividade Agrícola	18,390	285,300	974,950
População com lançamento direto	0	0	0
Total exportado (kg/Dia)	22,950	414,360	2.036,510

Fonte: autor (2021)

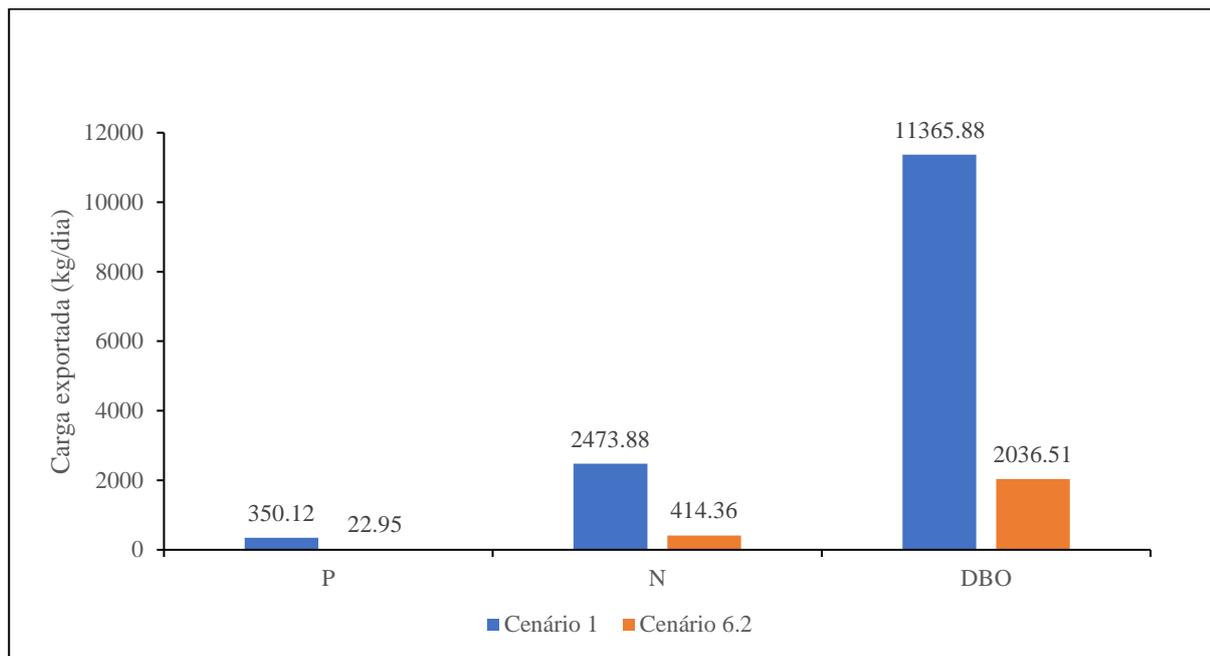


Figura 17 – Evolução da exportação de carga poluidora conforme cenário 6.2.

Fonte: autor (2021)

Analisando os cenários projetados, percebe-se que, mesmo se tratando de uma região de forte produção agrícola, e que a atividade e manejo do solo das culturas principalmente cafeeiras são responsáveis pela exportação de grande quantidade de nutrientes para o curso d'água. As principais fontes de poluição dos cursos d'água da região de estudo ainda são as pontuais, onde a ausência de tratamento de esgoto em todos os municípios comprometem a qualidade do curso d'água do Rio Manhuaçu em sua parte alta. Com a projeção populacional estima-se que apenas o esgotamento sanitário seja responsável pelo lançamento de 53,96 kg/dia do nutriente fósforo total; 323,78 kg/dia de nitrogênio total, e 1.510,99 kg/dia de DBO_{5,20} no curso d'água da área de estudo no ano de 2040.

Os cenários consideraram apenas a recuperação das APP's, não sendo projetada a sua degradação. Deste modo, a falta de tratamento de esgoto, associada a degradação da vegetação nativa nos próximos anos, poderia elevar ainda mais a poluição do curso d'água do Rio Manhuaçu, além de contribuir significativamente para o assoreamento do leito do rio que já se encontra em condições avançadas, prejudicando os usos prioritários, como abastecimento humano e a manutenção da vida aquática e elevando a possibilidade de potencialização dos eventos de inundações dos povoados e cidades ribeirinhas.

Os cenários apontam que a associação de práticas de restauração das APP's com as de tratamento de esgoto trariam bons resultados. Se associadas, as duas práticas no período analisado poderiam alcançar eficiência na redução de exportação de 3,29% de Fósforo Total, 6,7% de Nitrogênio Total e 4,33% de DBO_{5,20} a mais. No entanto, o investimento em tratamento de esgoto na bacia deve ser visto como prioritário para os próximos anos, sendo que o alcance do tratamento de 100% do esgoto dos municípios da área de estudo traria impactos positivos na redução da poluição do curso d'água do Rio Manhuaçu, alcançando eficiência superior a 76% de todos os parâmetros estudados, chegando a 90,15% ao se analisar o parâmetro Fósforo Total (Tabela 21).

Tabela 21 – Percentual de redução de poluentes estimados nos cenários

CENÁRIOS	PERCENTUAL DE REDUÇÃO (%)		
	P	N	DBO _{5,20}
Cenário 1	0	0	0
Cenário 2-1	0	0	0,10
Cenário 2 -2	3,19	6,69	4,32
Cenário 3	45,07	38,27	38,87
Cenário 4-1	44,86	38,09	38,98
Cenário 4-2	48,27	44,97	43,20
Cenário 5	90,15	76,55	77,75
Cenário 6-1	89,94	76,37	77,87
Cenário 6-2	93,44	83,25	82,08

Fonte: autor (2021)

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise temporal do uso e ocupação do solo no Alto Curso do Rio Manhuaçu demonstrou uma mudança significativa no padrão de uso do solo na área de estudo no período de dez anos. A atividade agrícola se destacou com um crescimento acentuado e, por sua vez, a categoria Capoeira e Campo obteve um decréscimo. Esta mudança pode contribuir para a elevação da carga de nutrientes encaminhados ao curso d'água, mas, de modo positivo, a categoria Mata e Capoeirão se comportou praticamente estável, indicando, possivelmente, que no período estudado o crescimento da atividade agrícola pode estar acontecendo em áreas já consolidadas, presentes na categoria Capoeira e Campo.

A quantificação dos parâmetros por meio do modelo matemático MQUAL 2.0 foi satisfatória após calibração e validação, porém, sugere-se que sejam adotados os demais módulos ou um modelo complementar para cálculo do abatimento da concentração dos nutrientes no decorrer do curso d'água, de modo a aproximar o modelo cada vez mais com os dados reais. Sugere-se também, para trabalhos futuros na região da bacia do Rio Manhuaçu, estudar a correlação entre a precipitação e o aporte de sedimentos no rio, especialmente em um cenário de mudanças climáticas.

Os cenários estimados demonstraram que o tratamento de esgoto deve ser priorizado na bacia, podendo reduzir em até 78% a carga de poluentes exportados se alcançada a universalização na área de estudo, portanto, isto deve ser discutido junto ao Comitê de Bacia e elencado como ação prioritária no plano de bacia e no plano de aplicação plurianual. As ações de restauração de APP's se demonstraram importantes, mas visando a redução da carga de nutrientes e as condições atuais da bacia o tratamento de esgoto traria resultados mais significativos.

7- PRODUTO

Com o início do desenvolvimento da pesquisa, observou-se o baixo índice de publicações relacionadas à área de estudo. As pesquisas e publicações são fundamentais principalmente como apoio nos processos decisórios nos comitês de bacias hidrográficas, que muitas vezes pela falta de conhecimento e dados referentes a situação da bacia acabam não priorizando os temas de maior relevância. Logo, como forma de contribuir para a gestão de recursos hídricos e ao sistema de gerenciamento, o produto final será um relatório técnico, que será disponibilizado ao Comitê da Bacia Hidrográfica Águas do Rio Manhuaçu.

O produto será entregue a diretoria do comitê, e na reunião ordinária em que houver a disponibilidade, o relatório desenvolvido será apresentado, destacando as sugestões de priorização de ações a serem desenvolvidas na bacia, de modo a alcançar resultados na prática mais eficientes.

O relatório apresentará os resultados alcançados através da dissertação e fornecerá os coeficientes do modelo MQUAL 2.0 calibrados e validados para a bacia hidrográfica do Rio Manhuaçu, servindo como base para o desenvolvimento de futuros trabalhos que utilizem o mesmo modelo na região.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Atlas esgotos: despoluição de bacias hidrográficas. Brasília, 2017. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/snirh-1/atlas-esgotos>>. Acesso em: 31 de Outubro de 2020.

ARAUJO, A.N.; PRATES, W.P. Modelagem matemático-espacial na identificação de fragilidades ambientais da microbacia do Rio Jarucu, município de Brasil Novo – PA. **InterEspaço**. Grajaú, v.4, n.12., p. 207-226, 2018.

BABU, K.J.; SREEKUMAR, S.; ASLAM, A. Implication of drainage basin parameters of a tropical river basin of South India. **Applied Water Science**, v. 6, n. 67, p. 67-75, 2016.

BARTRAN, J.; BALLANCE, R. (Ed.). Quality studies and monitoring programmes. United Nations Environment Programme and the **World Health Organization**. London: UNEP/WHO, 1996.

BRASIL. **Informações Técnicas sobre Agrotóxicos - Ministério da Agricultura, pecuária e abastecimento, 2019**. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/agrotoxicos/informacoes-tecnicas>>. Acesso em 12 de Julho de 2019.

BRASIL. **Lei nº. 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm>. Acesso em: 21 de novembro de 2019.

BRITO, J.L.S.; PRUDENTE, T.D. Análise temporal do uso do solo e cobertura vegetal do município de Uberlândia-MG, utilizando imagens ETM*/LANDSAT7. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, 17 (32): 37-46, 2005.

CAMPOS, J.N.B. A Gestão integrada dos recursos hídricos: Uma perspectiva histórica. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais (GESTA)**, v.1, N.1-p. 111-121, 2013.

CARNEIRO, P. R. F.; CARDOSO, A. L.; ZAMPRONIO, G. B. e MARTINGIL, M. de C. A gestão integrada de recursos hídricos e do uso do solo em bacias urbano-metropolitanas: o controle de inundações na bacia dos rios Iguaçú/Sarapuí, na Baixada Fluminense. **Ambient. soc. [online]**. 2010, vol.13, n.1, pp.29-49.

CARVALHO, R.G. As bacias hidrográficas enquanto unidades de planejamento e zoneamento ambiental no Brasil. **Caderno Prudentino de Geografia**, Presidente Prudente, n.36, Volume Especial, p. 26-43, 2014.

CERH. **Deliberação Normativa nº 36, de 23 de Dezembro de 2010**. Padroniza a utilização dos nomes, siglas e códigos das Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos (UPGRH) do Estado de Minas Gerais. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=15534>> Acesso em 28 de Outubro de 2019.

COBRAPE - Companhia Brasileira de Projetos e Empreendimentos. **Elaboração do plano de desenvolvimento e proteção ambiental da bacia hidrográfica do reservatório Billings: relatório final**. Contrato SMA/CPLEA nº09/07. São Paulo, SMA, 2010.

CORNELLI, R.; SCHNEIDER, V.E.; BORTOLIN, T.A.; CEMIN, G.; SANTOS, G.M. Análise da influência do uso e ocupação do solo na qualidade da água de duas sub-bacias hidrográficas do município de Caxias do Sul. **Scientia Cum Industria**, V.4, N. 1, 2016.

IMAGIIRE, L.O.K.M.; JUNIOR, C.E.S.; PEREIRA, C.A.A.O.; JESUS, J.A.O.; TIERNO, R. O modelo de correlação uso do solo qualidade da água – MQUAL e sugestões de aprimoramento. In: Congresso ABES FENASAN – 2017, São Paulo, **Anais...**São Paulo, 2017.

FABBRO NETO, F.; SOUZA, M.P. Water basin management plan integrated in spatial plans in Scotland. **Eng. Sanit. Ambient. [online]**., vol.22, n.6, pp.1215-1223, 2017.

FERNANDES, M.M.; CEDDIA, M.B.; RAMOS, G.M.; GASPAR, A.; MOURA, M.R. Influência do uso do solo na qualidade de água da microbacia Glória, Macaé – RJ. **Engenharia Ambiental - Espírito Santo do Pinhal**, v. 8, n. 2, p. 105-116, 2011.

FERREIRA, M.I.P.; SILVA, J.A.F.; PINHEIRO, M.R.C. Políticas públicas e gerenciamento de recursos hídricos. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego**, v. 2 n. 2, 2008.

FLECK, L.; TAVARES, M.H.F.; EYNG, E. Conceitos e importância da modelagem matemática de qualidade da água para gestão dos recursos hídricos. **Ambiência - Revista do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais**, V.9 N.3, 2013.

FRAGOSO JÚNIOR, Carlos Ruberto; FERREIRA, Tiago Finkler; MARQUES, David da Motta. Modelagem Ecológica em Ecossistemas Aquáticos. **Oficina de Textos**, São Paulo, 295 p., 2009.

GILLIAN, J. W. Riparian wetlands and water quality. **Journal of Environmental Quality**, v. 3, n. 5, p.896-900, 1994.

GUIMARAES, T. M. H. **Interferência do uso e ocupação do solo na qualidade da água em bacia hidrográfica com disponibilidade hídrica crítica**. (Dissertação de Mestrado), Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2018.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico 2010**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010a. Disponível em: <<http://censo2010.ibge.gov.br>>. Acesso em: 17 de novembro de 2019.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010a. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/manhuacu/pesquisa/24/76693?ano=2006&localidade1=314053>>. Acesso em: 03 de novembro de 2020.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010a. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/manhuacu/pesquisa/24/76693?ano=2006&localidade1=314053>>. Acesso em: 12 de outubro de 2020

IGAM. **Plano de ação de recursos hídricos da Unidade de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos DO6 – Rio Manhuaçu**. PARH Manhuaçu, 2010.

IMAGIIRE, L.O.K.M.; JUNIOR, C.E.S.; PEREIRA, C.A.A.O.; JESUS, J.A.O.; TIERNO, R. O modelo de correlação uso do solo qualidade da água – MQUAL e sugestões de aprimoramento. **Congresso ABES Fenasan**, São Paulo, 2017.

LIMA, B.P.; MAMEDE, G.L. e LIMA NETO, I.E. Monitoramento e modelagem da qualidade de água em uma bacia hidrográfica semiárida. **Eng. Sanit. Ambient. [online]**., vol.23, n.1, pp.125-135, 2018.

KOPPEN BRASIL. **Classificação climática de Köppen para os municípios brasileiros.**

Disponível em: <<https://koppenbrasil.github.io/>>. Acesso em 17 de Novembro de 2019.

MEDEIROS, L., GUEDES, J., OLIVEIRA, A., e COSTA, D. (2016). Uso de SIG na análise dos recursos hídricos no município de Caicó (RN). **Geoambiente On-Line**, (27).

<https://doi.org/10.5216/revgeoamb.v0i27.38604>. 2016.

MOLISANI, M, M. et al . Emissões naturais e antrópicas de nitrogênio, fósforo e metais para a bacia do Rio Macaé (Macaé, RJ, Brasil) sob influência das atividades de exploração de petróleo e gás na Bacia de Campos. **Quím. Nova**, São Paulo,v. 36, n.1, p.27-66, 2013.

MORUZZI, R.B.; CONCEIÇÃO, F.T.; SARDINHA, D.S.; HONDA, F.P.; NAVARRO, G.R.B. Avaliação de Cargas Difusas e Simulação de Autodepuração no Córrego da Água Branca, Itirapina (SP). **Geociências**, São Paulo, 2012. V. 31, n 3, p. 447 - 458.

NAKAMURA, C.H. **Calibração de um modelo de qualidade da água em trecho crítico qualitativo do Rio Lambari, Poços de Caldas, MG.** Dissertação (Mestrado)–Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 128 f. 2017.

NOVOTNY, V.; OLEM, H. **Water Quality: prevention, identification and management of diffuse pollution.** Van Nostrand Reinhold, New York, 1994.

NUNES, H.M. **Aplicação de modelo de correlação entre uso e cobertura da terra e qualidade da água no manancial do Alto Curso do Rio Santo Anastácio – UGRHI-22/Pontal do Paranapanema – São Paulo / Brasil,** Dissertação (Mestrado) Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, Ilha Solteira, 135 f., 2018.

NUNES, J.F. e ROIG, H.L. Análise e mapeamento do uso e ocupação do solo da bacia do alto do descoberto, DF/GO, por meio de classificação automática baseada em regras e lógica nebulosa. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.39, n.1, p.25-36, 2015.

PAGANINI, W.S. A identidade de um Rio de contrastes: Tiête e seus múltiplos usos. São Paulo: **Imprensa Oficial do Estado de São Paulo**, 2007. São Paulo SP, 2007.

PALMA-SILVA, G. M. Diagnóstico ambiental, qualidade da água e índice de depuração do Rio Corumbataí - SP. 1999. 155 f. **Dissertação (Mestrado em Manejo Integrado de Recursos)** - Centro de Estudos Ambientais, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1999.

PASTORELLI JUNIOR, J.H.; ARGOLLO FERRÃO, A.M. Aspectos de gestão integrada de bacias hidrográficas. **Cidades [Online]**, 37, 2018, online no dia 31 dezembro 2018, consultado o 19 abril 2019. URL: <<http://journals.openedition.org/cidades/901>>.

PERES, R. B.; SILVA, R. S. Análise das relações entre o Plano de Bacia Hidrográfica Tietê-Jacaré e os Planos Diretores Municipais de Araraquara, Bauru e São Carlos, SP: avanços e desafios visando a integração de instrumentos de gestão. **Revista Sociedade & Natureza**, v. 25, n. 2, 2013.

PINHEIRO, M.R.C.; WERNECK, B.R.; OLIVEIRA, A.F.; MOTÉ, F.; MARÇAL, M.S.; J.A.F.; FERREIRA, M.I.P. Geoprocessamento aplicado à gestão dos recursos hídricos na bacia hidrográfica do Rio Macaé-RJ. **Anais... XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Natal, Brasil, INPE, p. 4247-4254, 2009.

PIVELI, R.P., KATO, M.T. Qualidade das águas e poluição: aspectos físico-químicos. **ABES**; 2005. São Paulo SP, 2005.

PIZELLA, D. G. The relationship between the Municipal Master Plan and local Watershed Plans in water management. **Rev. Ambient. Água**. vol.10, n.3 [cited 2019-11-16], pp.635-645, 2015

RODRIGUES, P.P.G.W.; JUNIOR, J.L.; PESSANHA, C. Uso de modelos matemáticos na gestão de recursos hídricos, In: **Uso de modelos matemáticos na gestão de recursos hídricos**/ Organizador por Pedro Paulo Gomes Watts Rodrigues e Jader Lugon Junior. Campos dos Goytacazes (RJ): Essentia Editora, 2012.

RODRIGUES-FILHO, J.L.; DEGANI, R.M.; SOARES, F.S.; PERIOTTO, N.A. BLANCO, F.P.; ABE, D.S.; MATSUMURA-TUNDISI, T.; TUNDISI, J.E.; TUNDISI, J.G. Alterations in land uses based on amendments to the Brazilian Forest Law and their influences on water quality of a watershed. **Braz. J. Biol.**, vol. 75, no. 1, p. 125-134, 2015.

ROSA, M.R. Comparação e análise de diferentes metodologias de mapeamento da cobertura florestal da Mata Atlântica. **Boletim Paulista de Geografia**, v.95, 2016, p.25-34.

STEINKE, V.A.; SAITO, C.H. Exportação de carga poluidora para identificação de áreas úmidas sob risco ambiental na bacia hidrográfica da Lagoa Mirim. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, 20 (2): 43-67, 2008.

SANTOS, L.A.; LIMA, P.E.M. Comparação entre diferentes algoritmos de classificação supervisionada no mapeamento temático de uma bacia hidrográfica. **Rev. Tree dimensional**, ProFloresta - Goiânia, v.3 n.5; p.2018.

SCHNEIDER J.A. **Simulação e avaliação da qualidade da água em rios: Estudo de caso da bacia hidrográfica do Rio Forqueta, RS**. (Trabalho de Conclusão de Curso), curso de Engenharia Ambiental, do Centro Universitário UNIVATES. Lajeado, 2017.

SCHUMM, S. A. Evolution of drainage systems and slopes in badlands of Perth Amboy. **Geological Society of America Bulletin**, New York, v. 67, n. 5, p. 597-646, May 1956.

SEAPA - Secretaria de Agricultura, Pecuária e Abastecimento de Minas Gerais. **Projeções do agronegócio**. Minas Gerais, 2017. Disponível em :<http://www.agricultura.mg.gov.br/images/Arq_Relatorios/Publicacoes/projecoes_2017_a_2027.pdf>. Acesso em: 19 de Fevereiro de 2021.

SILVA, D.D.; PRUSKI, F.F. Recursos hídricos e desenvolvimento sustentável da agricultura. *Brasília: MMA; SRH; ABEAS*; Viçosa, MG: UFV, 1997. 252 p.

SILVA, M.M.A.P.M.; FARIA, S. D.; MOURA, P.M. Modelagem da qualidade da água na bacia hidrográfica do Rio Piracicaba (MG). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.22 n.1, p.133-143.2017.

SILVA, G.F.P. **Contribuições para diagnóstico ambiental da bacia hidrográfica do Rio Manhuaçu**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Ouro Preto – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental – PROAMB - Área de concentração: Recursos Hídricos. Ouro Preto, 2017.

SMA, Secretaria de Estado do Meio Ambiente Estado de São Paulo. **Elaboração do Plano de Desenvolvimento e Proteção Ambiental da Bacia Hidrográfica do Reservatório Billings**. São Paulo: [s.n.], 274 p.,2010.

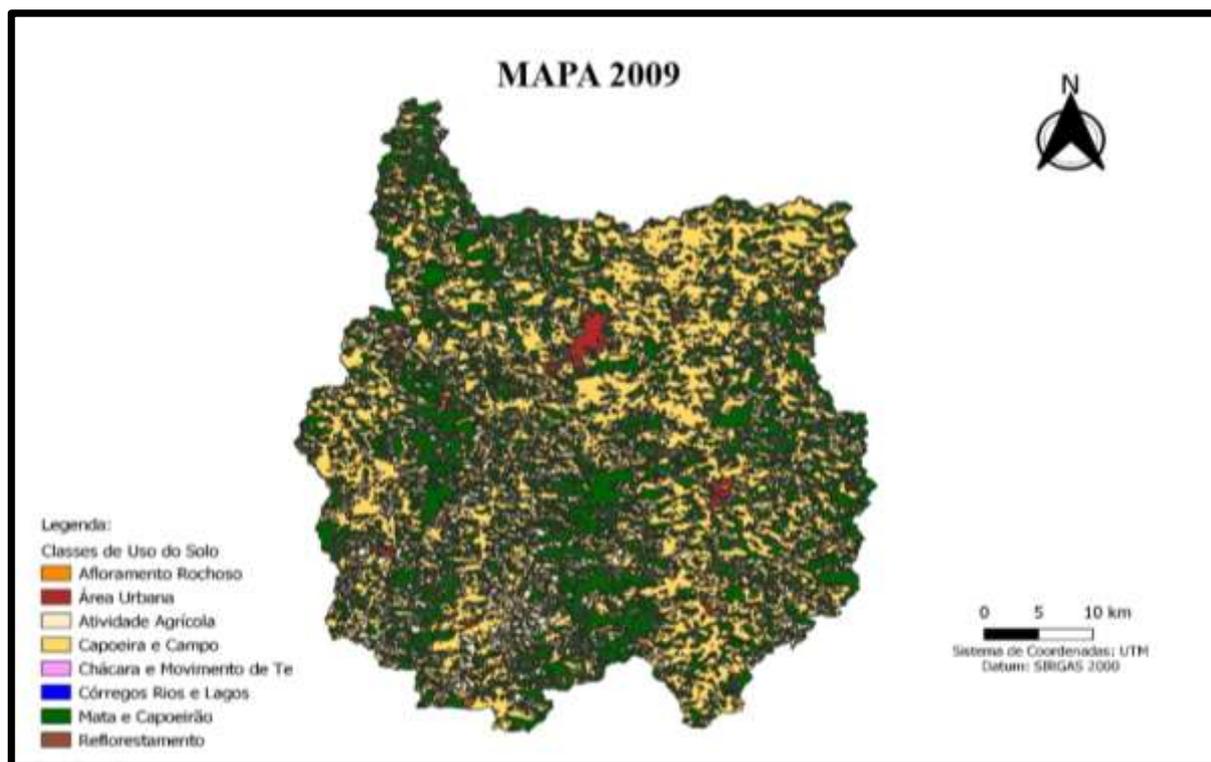
SOARES, A.F.S. **Uso de agrotóxicos, contaminação de mananciais e análise da legislação pertinente: um estudo na região de Manhuaçu – MG**, Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, 294 f., 2011.

TEIXEIRA,B.S.;MOLLETA,D.G.S.; LUEDEMANN,G. Brasil: Esforços nacionais sobre as mudanças climáticas. **In:Governança ambiental no Brasil : instituições, atores e políticas públicas** / organizadora: Adriana Maria Magalhães de Moura . – Brasília : IPEA, 352 p.,2016.

TRAJANO, S.R.R.S... [et al.]. Análise morfométrica de bacia hidrográfica: subsídio à gestão territorial, estudo de caso no alto e médio Mamanguape- – (**Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Gestão Territorial, ISSN 2317-8779 ; 2**). Campinas, SP, 2012. 33 p.

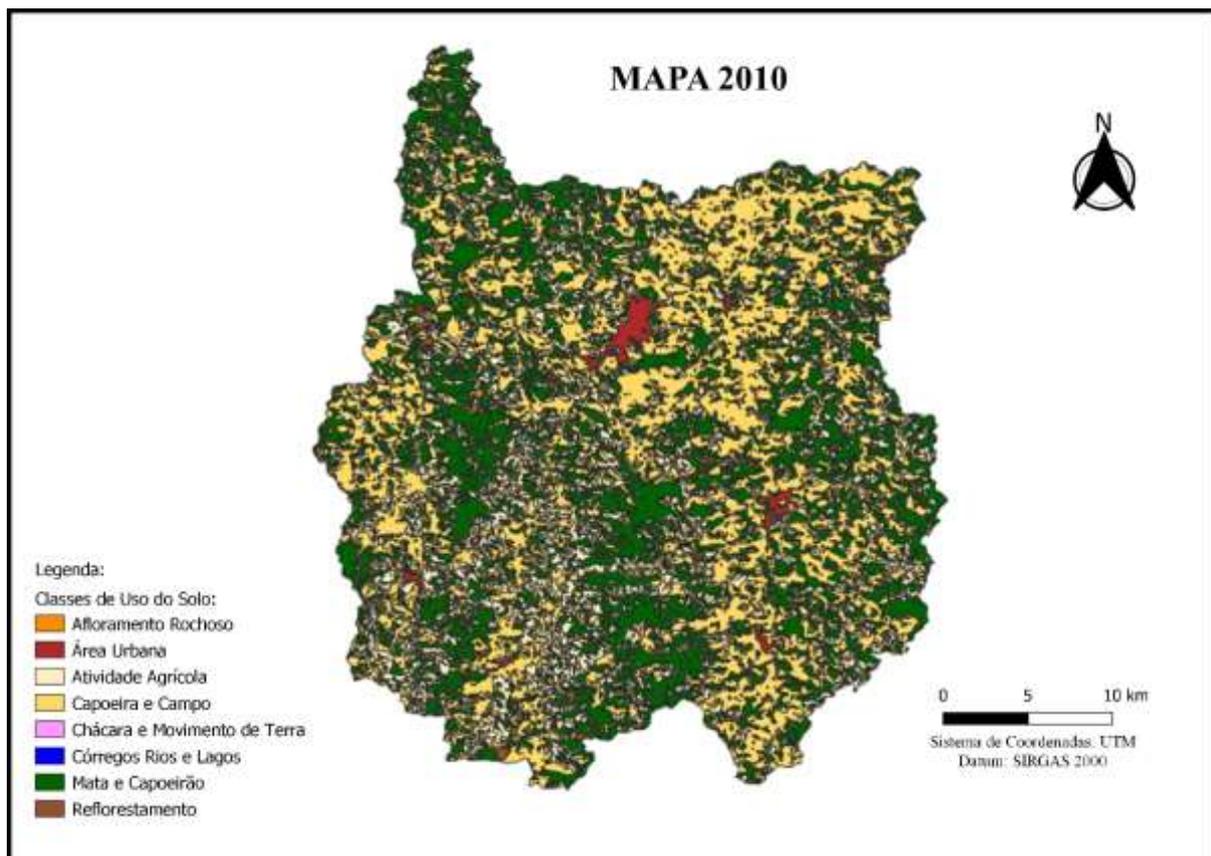
VAN LIEW, M. W.; VEITH, T. L.; BOSCH, D. D.; ARNOLD, J. G. Suitability of SWAT for the Conservation effects assessment project: A comparison on USDA-ARS watersheds. **Journal of Hydrologic Engineering**, Lincoln, v. 12, n. 2, p. 173-189, 2007.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2014. 472p.

APÊNDICE:**APÊNDICE A – Mapa de Uso e Ocupação do Solo do ano de 2009**

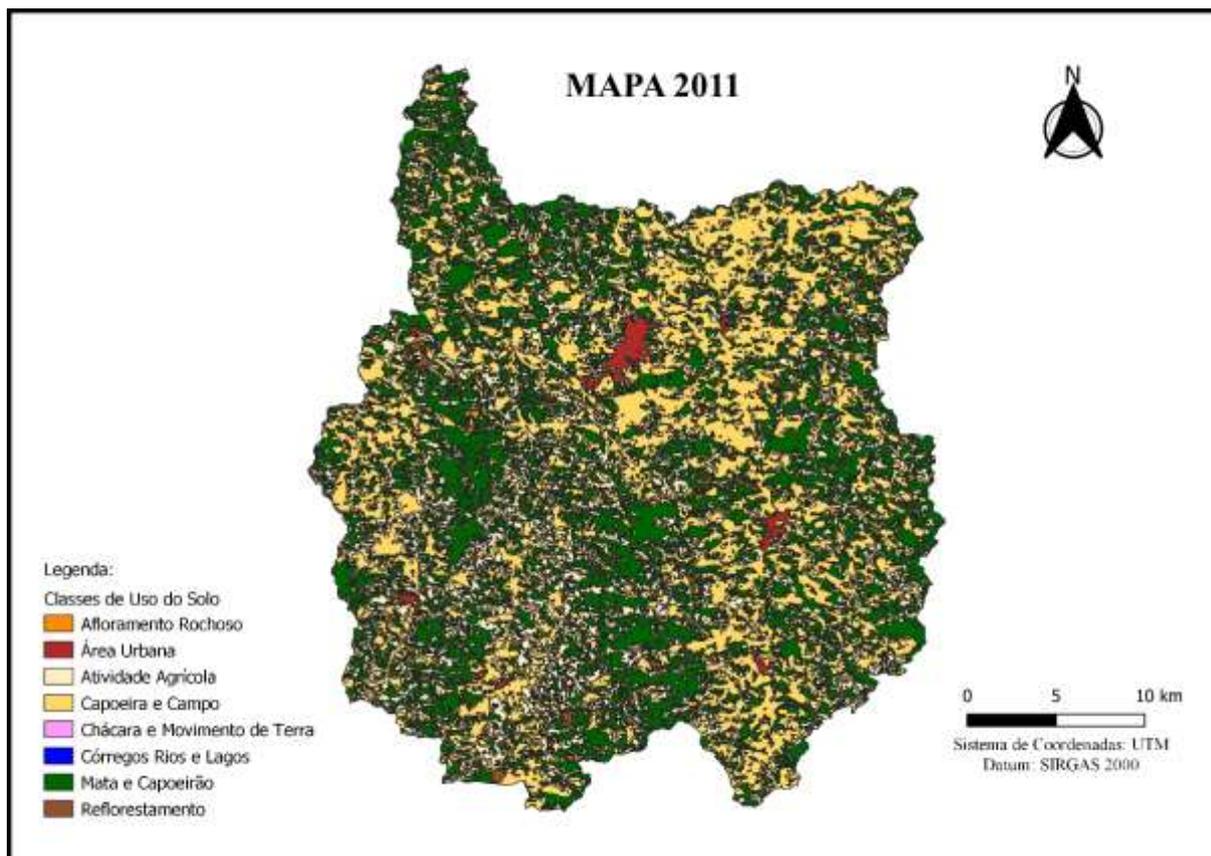
Fonte: autor (2021)

APÊNDICE B – Mapa de Uso e Ocupação do Solo do ano de 2010



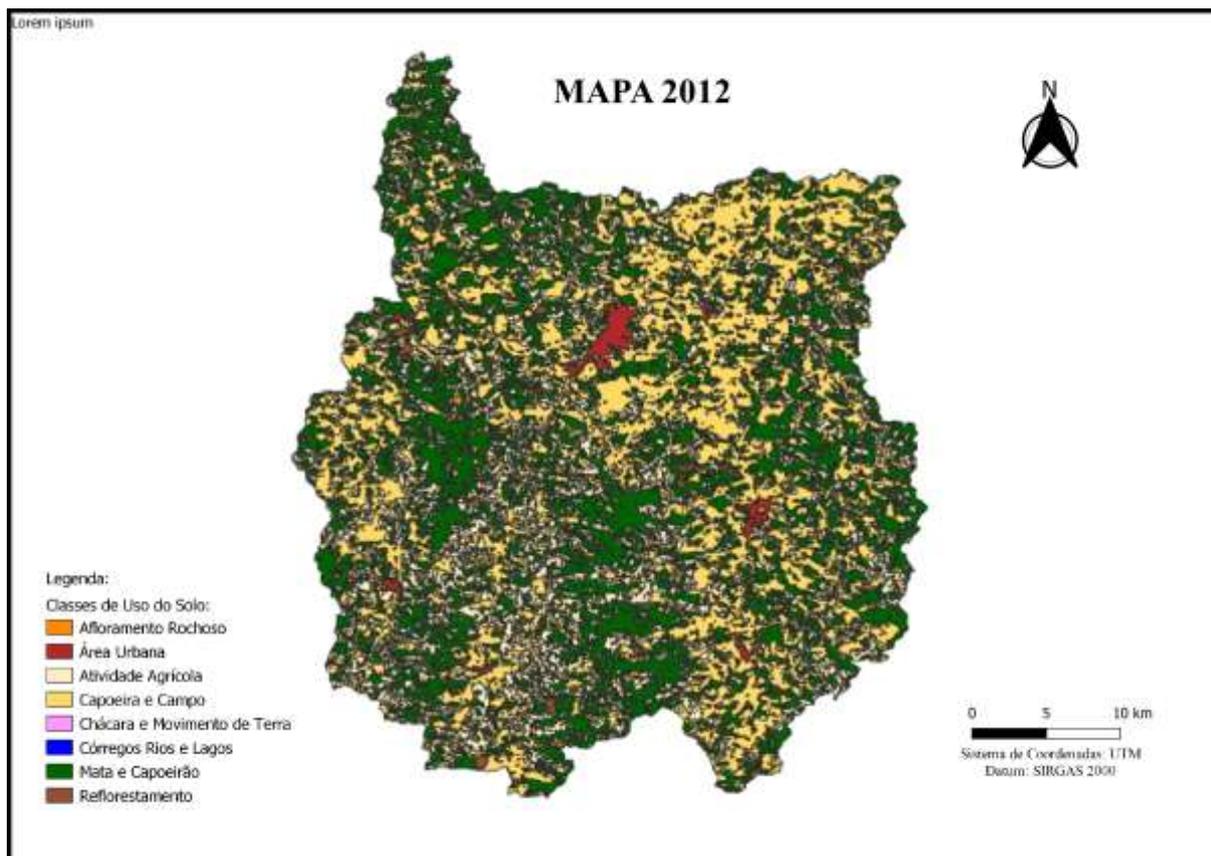
Fonte: autor (2021)

APÊNDICE C – Mapa de Uso e Ocupação do Solo do ano de 2011



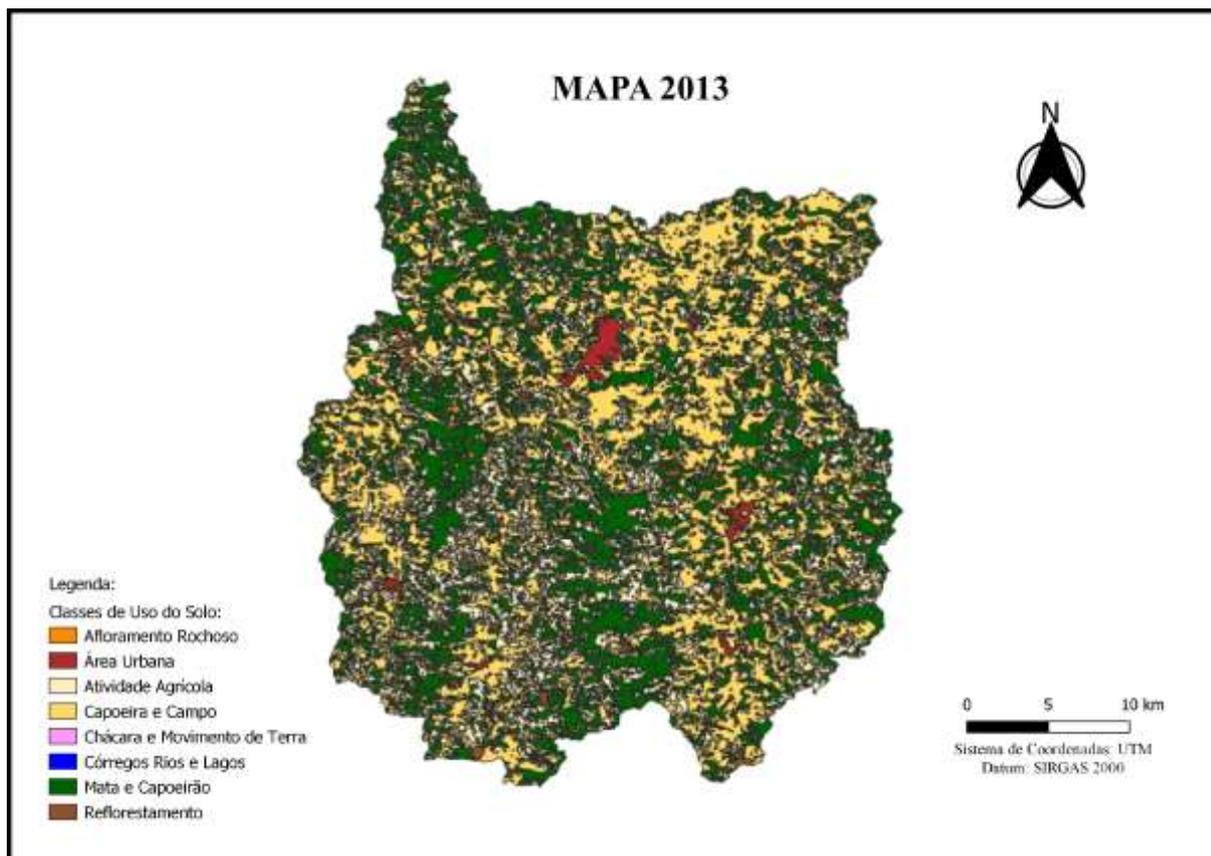
Fonte: autor (2021)

APÊNDICE D – Mapa de Uso e Ocupação do Solo do ano de 2012



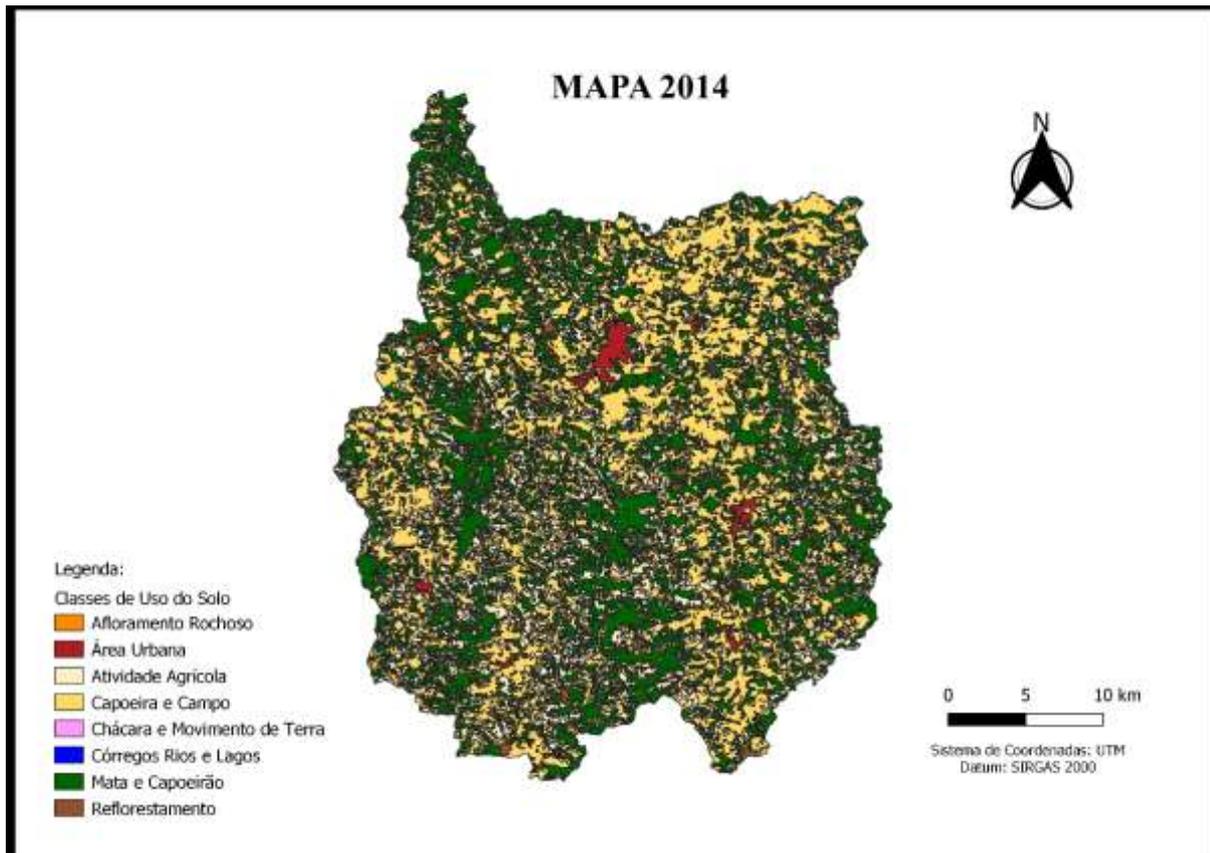
Fonte: autor (2021)

APÊNDICE E – Mapa de Uso e Ocupação do Solo do ano de 2013



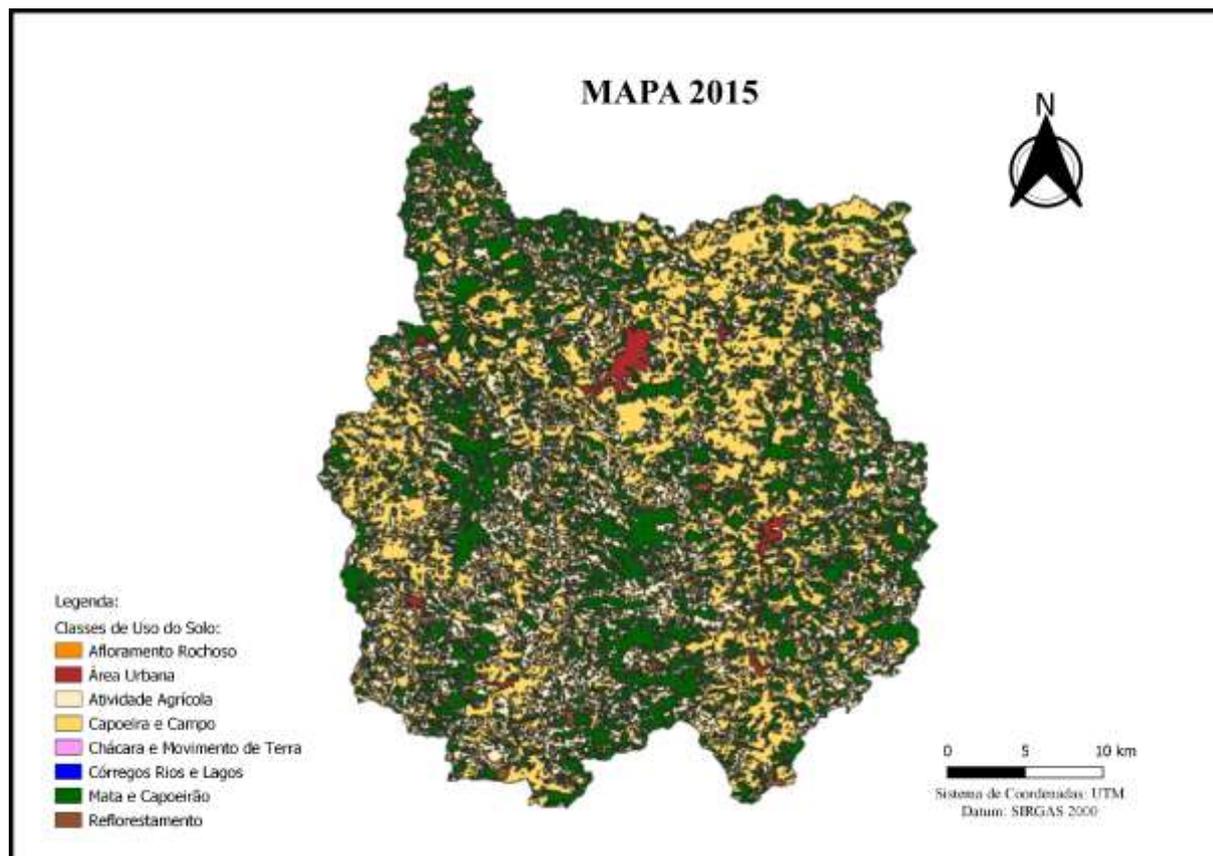
Fonte: autor (2021)

APÊNDICE F – Mapa de Uso e Ocupação do Solo do ano de 2014



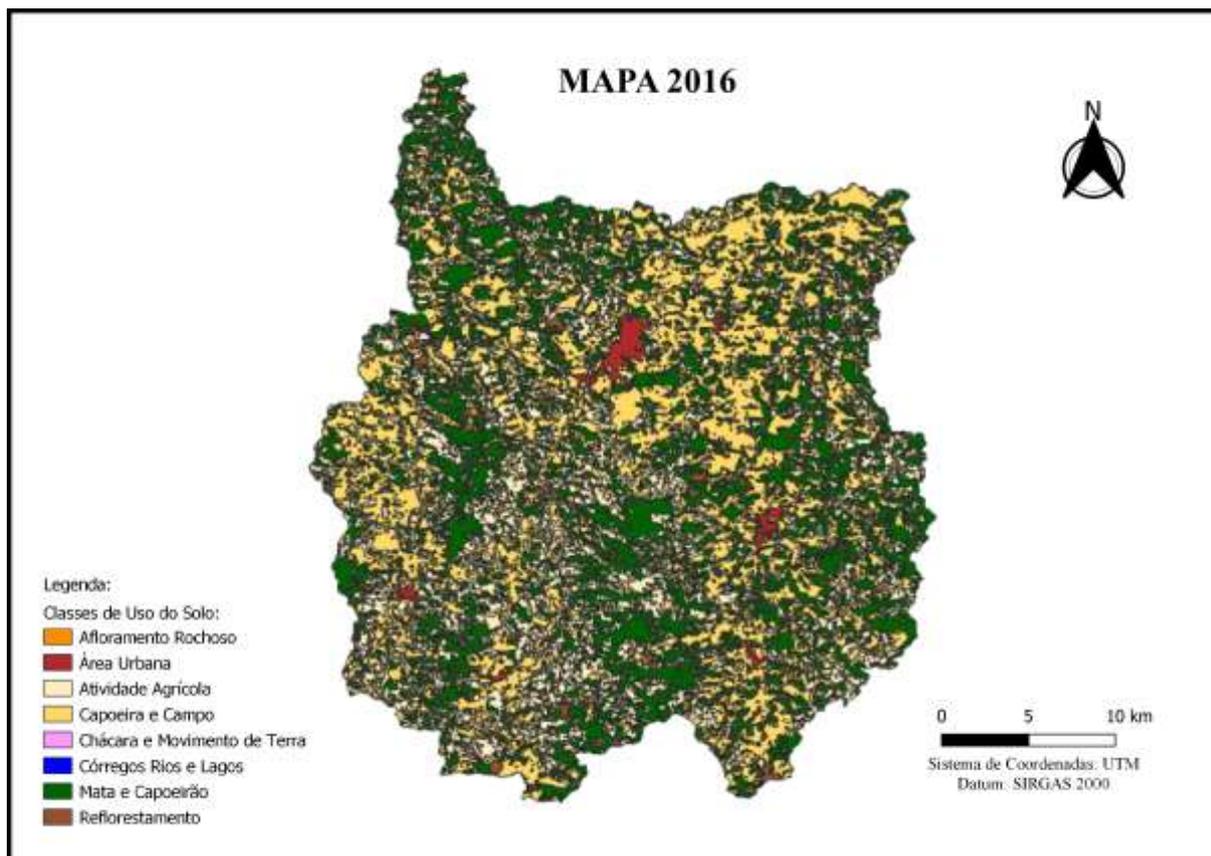
Fonte: autor (2021)

APÊNDICE G – Mapa de Uso e Ocupação do Solo do ano de 2015



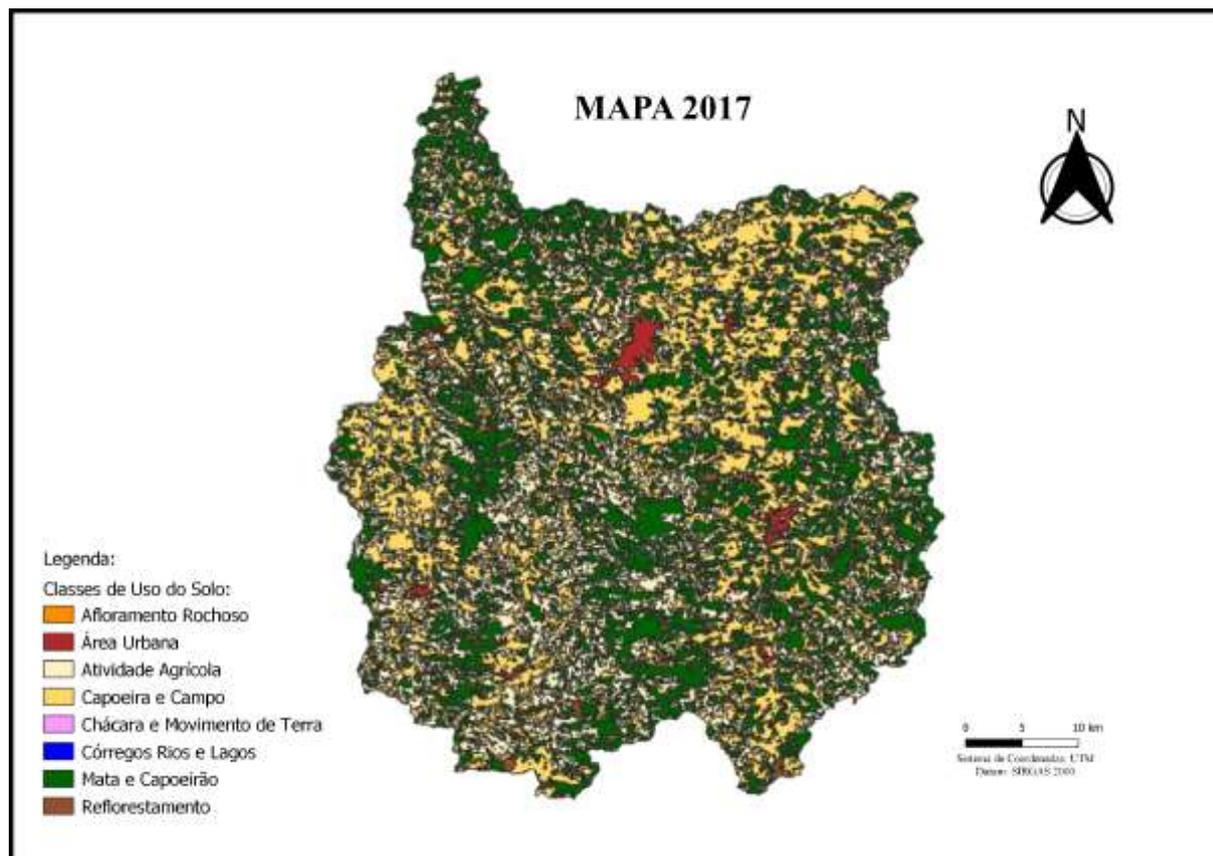
Fonte: autor (2021)

APÊNDICE H – Mapa de Uso e Ocupação do Solo do ano de 2016



Fonte: autor (2021)

APÊNDICE I – Mapa de Uso e Ocupação do Solo do ano de 2017



Fonte: autor (2021)