ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>

Proposta de enquadramento de corpos hídricos em classes de uso na bacia hidrográfica do rio Piranga utilizando geoprocessamento

Fernanda Mourão Fonseca Carneiro¹, Micael de Souza Fraga², Guilherme Barbosa Reis³, Tiago Tozi⁴, Demetrius David da Silva⁵

¹ Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa (UFV), Avenida P. H. Rolfs, s/n, CEP 36570-900, Viçosa, Minas Gerais, Brasil. fee.mourao@gmail.com (autor correspondente); ² Gerência de Monitoramento Hidrometeorológico e Eventos Críticos, Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), Rodovia João Paulo II, 4143, CEP 31630-900, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. micaelfraga@gmail.com; ³ Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa (UFV), Avenida P. H. Rolfs, s/n, CEP 36570-900, Viçosa, Minas Gerais, Brasil. guilherme.eaa.reis@gmail.com; ⁴ Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa (UFV), Avenida P. H. Rolfs, s/n, CEP 36570-900, Viçosa, Minas Gerais, Brasil. Brasil.tiagotozi@gmail.com; ⁵ Professor Titular, Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa (UFV), Avenida P. H. Rolfs, s/n, CEP 36570-900, Viçosa, Minas Gerais, Brasil. demetrius@ufv.br.

Artigo submetido em 28/12/2019 e aceite em 21/08/2020

RESUMO

O enquadramento dos corpos d'água em classes de uso consiste em uma importante ferramenta para a gestão dos recursos hídricos, pois permite a conexão entre os seus aspectos qualitativos e quantitativos. Sendo assim, o presente trabalho teve como objetivo elaborar uma proposta de enquadramento dos corpos hídricos em classes de uso na bacia do rio Piranga, estado de Minas Gerais. A metodologia foi aplicada em função de critérios considerados relevantes ao enquadramento e da meta de qualidade da água a ser alcançada na bacia, sendo executada com o auxílio do geoprocessamento. Os critérios utilizados para a elaboração do enquadramento foram: finalidade das outorgas, volume outorgado, uso e a ocupação do solo, vazão mínima de referência e densidade populacional. Para cada critério foi atribuído um peso e o mapa de enquadramento foi gerado a partir da sobreposição dos mapas dos critérios adotados. Para definição das áreas prioritárias de intervenção, o Índice de Conformidade ao Enquadramento (ICE) foi calculado com base no enquadramento obtido para os trechos de rio. Como resultado, os rios Piranga, Xopotó, Turvo Limpo e Ribeirão dos Oratórios foram enquadrados nas classes 1 e 2, sendo as zonas de cabeceira enquadradas prioritariamente como classe 1 com exceção para o rio Turvo Limpo, que foi classificado como classe 2 em toda sua extensão. Os resultados mostraram que a metodologia se mostrou adequada, entretanto alguns ajustes foram fundamentais para a obtenção do mapa final de enquadramento dos corpos hídricos na bacia.

Palavras-chave: geoprocessamento, hidrologia, Minas Gerais, qualidade da água.

Proposed framing of water bodies in use classes in the Piranga river watershed using geoprocessing

ABSTRACT

The framing of water bodies in classes of use is an important tool for the management of water resources, as it allows the connection between their qualitative and quantitative aspects. Thus, the present work had as objective to elaborate a proposal of framing the water bodies in classes of use in the Piranga river basin, state of Minas Gerais. The methodology was applied according to criteria considered relevant to the framework and the water quality target to be obtained in the basin, being carried out with the aid of geoprocessing. The criteria used to elaborate the proposal were the purposes of the grants, volumes granted, usage and occupation of the soil, minimum reference flow and population density. For each criterion, a weight was attributed, and the framing map was generated from the overlay of the adopted criteria maps. Framing Conformity Index (FCI) was also calculated in order to define priority areas for intervention purposes. As a result, Piranga, Xopotó, Turvo Limpo e Oratórios rivers were classified in classes 1 and 2, and the headwaters classified as class 1, except for the Turvo Limpo river, which was classified as class 2 throughout extension. The results showed that the methodology proved to be adequate, however some adjustments were essential to obtain the final map of the water bodies in the basin.

Keywords: geoprocessing, hydrology, Minas Gerais, water quality.

Introdução

A adequada gestão dos recursos hídricos é

um tema recorrente na atualidade, uma vez que a disponibilidade da água, em especial para fins

nobres como o abastecimento humano, tem sofrido restrições significativas em função do comprometimento de seus aspectos qualitativo e quantitativo (Cunha e Calijuri, 2010).

Segundo Rebouças et al. (2006), a crise hídrica, além dos problemas de escassez quantitativa e qualitativa, é decorrente de uma crise de gestão desse recurso natural. Para que essa gestão seja mais eficiente e otimize os usos múltiplos da água e sua conservação, é fundamental uma integração entre o conhecimento científico adquirido e o gerenciamento. Tal fato demonstra a necessidade cada vez maior do uso de ferramentas adequadas que possam auxiliar no planejamento e gestão do uso destes recursos.

Martins et al. (2017) enfatizam que a qualidade das águas deve ser necessariamente conhecida em todos os corpos hídricos, justificado pelo motivo de ser um mecanismo capaz de definir estratégias que viabilizem a conservação, a recuperação e o uso racional dos recursos hídricos, reduzindo assim os conflitos e direcionando as atividades econômicas. Diante disso, uma das ferramentas utilizadas no planejamento e gestão dos recursos hídricos, prevista na Lei nº 9.433 do ano de 1997, é o enquadramento de corpos d'água em classes de uso (Brasil, 1997).

O enquadramento dos corpos de água em classes de uso permite o link entre a gestão qualitativa e quantitativa dos recursos hídricos, servindo como referência para outros instrumentos de gestão, como outorga, cobrança pelo uso da água, entre outros. Na resolução CONAMA nº 357 de 2005 (Brasil, 2005) são dadas as diretrizes para a classificação das classes a serem utilizadas.

No Brasil, diversos trabalhos vêm realizando estudos que oferecem suporte ao enquadramento de corpos hídricos (Amorim et al., 2017; Calmon et al., 2016; Cunha e Calijuri, 2010; Ferreira et al., 2016; Guimarães et al., 2016). Entretanto, muitas das metodologias utilizadas têm se constituído em análises probabilísticas e de violação da classe de enquadramento, sem levar em conta alguns critérios relevantes no diagnóstico da bacia (Reis et al., 2019).

Para agregar maior precisão aos estudos de enquadramento, o uso do geoprocessamento aparece como ferramenta para facilitar a manipulação e análise de dados espaciais, pois permite agregar vários tipos de informação em um único banco de dados (Fraga et al., 2018). Dessa forma, diversos fatores relevantes ao enquadramento podem ser incorporados em um mesmo sistema de decisão.

Em uma proposta de enquadramento de corpos hídricos na bacia hidrográfica do rio Santo

Antônio (MG), Reis et al. (2019) enquadrou os corpos hídricos da bacia utilizando cinco critérios distintos. Conforme os autores supracitados, a metodologia aplicada com o auxílio do geoprocessamento mostrou-se adequada, no entanto foi necessária uma análise crítica dos resultados a fim de eliminar inconsistências.

Também utilizando um sistema de decisão com o auxílio do geoprocessamento, Fraga et al. (2019) propôs uma metodologia para subsidiar a alocação de estações de monitoramento da qualidade da água, onde seis critérios foram analisados. Os autores concluíram que a metodologia se mostrou robusta, sendo os critérios e a estrutura de suporte a decisão utilizados totalmente aplicáveis a qualquer área de estudo.

Com base no exposto, o objetivo do presente trabalho foi de apresentar, por meio de técnicas de geoprocessamento, uma proposta de enquadramento de corpos hídricos em classes de uso na bacia do rio Piranga, estado de Minas Gerais, a ser implementada em função de critérios considerados relevantes ao enquadramento e da meta de qualidade da água a ser alcançada. A metodologia utilizada inclui aspectos qualitativos e quantitativos, de modo a aplicar uma análise integrada dos corpos hídricos da bacia.

Material e Métodos

Caracterização da área de estudo

A proposta de enquadramento dos corpos de água em classes de uso utilizou como área de estudo a bacia hidrográfica do rio Piranga, afluente do rio Doce. O rio Piranga nasce no município de Ressaquinha, estado de Minas Gerais, e percorre aproximadamente 470 km até encontrar o Ribeirão do Carmo e formar o rio Doce. Seus principais afluentes são os rios São Bernardo, Xopotó, Turvo Limpo e Oratórios (ECOPLAN-LUME, 2010a).

A bacia possui sete estações de monitoramento da qualidade da água, todas elas referente ao Projeto “Águas de Minas”, em operação desde o ano de 1997 e atualmente sob responsabilidade do Instituto Mineiro de Gestão

das Águas (IGAM) (Figura 1).

Figura 1. Localização da bacia hidrográfica do rio Piranga, estado de Minas Gerais, e das estações de monitoramento qualitativo operadas pelo IGAM.

Obtenção da proposta de enquadramento em classes de uso

A definição dos critérios utilizados teve como base informações identificadas em ANA (2009). Sendo assim, os critérios considerados relevantes foram: finalidade da outorga, volume outorgado, uso e ocupação do solo, vazão mínima específica e densidade populacional.

Todos os dados obtidos foram transformados em *layers* de informação em ambiente de sistema de informação geográfica (SIG), utilizando para tal o *software* ArcGIS 10.2/ArcMap®, o que originou uma base de dados para a proposta de enquadramento de cursos d'água na bacia do rio Piranga. Na Tabela 1 pode ser observada as fontes de cada um dos dados utilizados na proposta de enquadramento.

Tabela 1. Base de dados utilizada para obtenção da proposta de enquadramento

Base de dados	Fonte
Hidrografia e ottobacias	ANA (2013)
Finalidade da outorga	SEMAD (2017)
Volume outorgado	SEMAD (2017)
Uso e ocupação do solo	ANA (2016)
Vazão mínima de referência específica	Elesbon et al. (2014)
Densidade populacional	IBGE (2010)

Os dados de finalidade das outorgas e

volume outorgados foram obtidos das portarias de outorga referente aos anos de 2013 a 2017. A vazão mínima utilizada por Elesbon et al. (2014) foi a $Q_{7,10}$ por ser a vazão mínima de referência no estado de Minas Gerais para fins de outorga.

No processamento dos dados foi utilizado o arquivo vetorial das ottobacias da bacia do rio Piranga, referente ao nível 6 de ottocodificação. Sendo assim, foi aplicado, em ambiente SIG, um tipo de estatística para cada um dos critérios (Tabela 2), o que resultou em um mapa de enquadramento referente a cada um deles com valores discretizados por ottobacia.

Posteriormente, os mapas foram reclassificados numa ordem hierárquica de categorias entre 1 e 5, sendo os maiores números atribuídos às condições mais impactantes para os cursos de água, conforme definição de classes prevista na resolução CONAMA n° 357/2005.

Tabela 2. Estatística utilizada em cada critério

Critério	Estatística
Finalidade da outorga	Majoritária
Volume outorgado	Somatório
Uso e ocupação do solo	Majoritária
Vazão mínima de referência específica	Média
Densidade populacional	Média

A Categoria 1 é correspondente à classe especial, cujas condições de entorno do recurso hídrico em que o ambiente se encontra estejam em alto grau de preservação e conservação. Foram consideradas nesta categoria as tipologias que naturalmente possuem maior fragilidade com relação ao seu uso direto e as localidades em que a densidade populacional é nula ou muito pequena e onde não se tenha nenhum empreendimento considerado de impacto ambiental.

A Categoria 2 é referente à Classe 1, em que são considerados níveis médios de interferência antrópica e bons níveis de conservação/preservação ambiental. Foram enquadradas nesta categoria as tipologias que indiquem baixos níveis de resistência referente aos processos erosivos, localidades em que tenha a presença de baixa ocupação antrópica de residências ou propriedades rurais, localidades onde a presença de empresas é baixa e possuem pequeno impacto.

A Categoria 3 está associada à Classe 2, em que são considerados ambientes que se encontram alterados pelo crescimento populacional e empreendimentos, com níveis médios de interferência antrópica. Áreas com bons níveis de resistência à erosão, assim como áreas com média

densidade de ocupação antrópica por residências e com alta densidade de empreendimentos de impacto médio foram enquadradas nesta categoria.

A Categoria 4 é vinculada à Classe 3, em que as áreas consideradas devem apresentar níveis altos de alteração causado pela ação antrópica, serem destinadas à implantação de empresas de grande porte e com alto impacto ambiental, tendo atributos favoráveis à ocupação humana e a empreendimentos, e onde a densidade de ocupação humana seja elevada.

Por fim, a Categoria 5 se refere à Classe 4, em que os ambientes se encontrem totalmente degradados por atividade de mineração a céu aberto ou qualquer atividade industrial, sendo o ambiente totalmente descaracterizado de sua forma natural e com alta densidade populacional.

Para o peso dos critérios, foi utilizada a metodologia proposta por Monteiro (2016) e também utilizada por Reis et al. (2019). Essa metodologia tem como base o cruzamento de cada critério estabelecido versus os usos de água preponderantes determinados pela resolução CONAMA nº 357/2005. Desta forma, as ponderações foram efetuadas comparando-se a influência de um sobre o outro, avaliando-se em 1 (interferência negativa ou positiva) e 0 (interferência nula). Em seguida, a ponderação para cada critério foi obtida pela divisão do total de interferência de cada critério pelo somatório do total de interferências.

Após categorizar todos os mapas e ponderar os critérios, foi realizada a sobreposição destes através do *software* ArcGIS 10.2/ArcMap®, em que foi feita o somatório da multiplicação dos valores de cada critério pelo seu respectivo peso de importância. O resultado foi um mapa com todos os critérios sobrepostos e as respectivas classes dos usos da água para cada otobacia. Em seguida extraiu-se estas informações para a hidrografia da bacia, obtendo assim o mapa final com os corpos d'água da bacia do rio Piranga enquadrados.

Para o presente trabalho foi proposto apenas o enquadramento do rio Piranga e dos seus principais afluentes, sendo eles: rio Xopotó, rio Turvo Limpo e Ribeirão dos Oratórios.

Para realizar a adequação do enquadramento à realidade da bacia hidrográfica do rio Piranga, a metodologia também contou com algumas etapas adicionais, sendo elas: a) metas de qualidade propostas pelo Plano de Ação de Recursos Hídricos da bacia do rio Piranga (PARH-Piranga) (ECOPLAN-LUME, 2010a); b) eliminação de trechos isolados com classes diferentes das classes majoritárias em cada trecho; e c) o Índice de Conformidade ao Enquadramento

(ICE), desenvolvido pelo *Canadian Council of Ministers of the Environment* (CCME, 2001).

O ICE atualmente é utilizado pela ANA para avaliar o cumprimento das metas de qualidade das águas dos rios brasileiros definidas pelas classes de uso em que estão enquadrados (ANA 2012). O índice avalia a distância entre a qualidade da água atual e a meta estabelecida pelo enquadramento do corpo hídrico. O resultado varia entre 0 e 100, sendo divididos em cinco categorias:

- Excelente (95 – 100): as variáveis apresentam-se dentro dos limites estabelecidos durante todo o tempo.
- Bom (80 – 94): a qualidade da água é protegida, apresentando somente um pequeno grau de ameaça e as condições raramente se afastam dos níveis desejáveis.
- Mediano (65 – 79): a qualidade da água geralmente é protegida, mas é ameaçada ocasionalmente, afastando-se, por vezes, dos níveis desejáveis.
- Marginal (45 – 64): a qualidade da água é frequentemente ameaçada ou danificada, as condições muitas vezes se afastam dos níveis desejáveis.
- Ruim (0 – 44): a qualidade da água quase sempre é ameaçada ou danificada, as condições geralmente fogem dos níveis desejáveis.

Tabela 3. Variáveis de qualidade da água utilizadas no estudo para o cálculo do ICE

Variáveis de qualidade da água
Arsênio total
Chumbo total
Cobre dissolvido
Coliformes termotolerantes
Cor verdadeira
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)
Fósforo total
Mercúrio total
Oxigênio dissolvido (OD)
pH in loco
Turbidez
Zinco total

Para o cálculo, foram utilizados os dados de qualidade de água provenientes das sete estações de monitoramento de qualidade de água do IGAM, sendo os seus valores comparados aos limites estabelecidos pela CONAMA nº 357/2005 para as classes 1, 2 e 3. Sendo assim, delimitou-se a bacia de drenagem para cada estação e as áreas obtidas foram consideradas como áreas de influência das estações.

Foram analisados os dados entre os anos 2012 a 2016. A escolha das variáveis analisadas levou em conta a relevância das mesmas para a bacia do rio Piranga e o não atendimento ao padrão da classe 2, conforme encontra-se apresentado no PARH-Piranga (ECOPLAN-LUME, 2010a). No total, foram selecionadas 12 variáveis (Tabela 3).

Resultados e Discussão

A seguir são apresentados todos os resultados e suas respectivas discussões referente a cada uma das etapas da metodologia aplicada, sendo elas: categorização dos critérios; obtenção do mapa preliminar de enquadramento; e a adequação do mapa preliminar para a obtenção proposta final de enquadramento.

Finalidade da outorga

O levantamento de outorgas para a região possibilitou a identificação de 10 grupos de finalidade de outorga: Abastecimento público; Aquicultura; Consumo humano; Criação animal; Geração de energia; Indústria; Irrigação; Mineração; Outro; Paisagismo; Recreação e Serviços de manutenção no corpo d'água.

A categorização do critério (Figura 2) tomou como base a classificação das águas doces estabelecidas pela Resolução CONAMA n° 357/2005, sendo usos mais restritivos ligados às primeiras categorias e usos mais permissivos correspondentes às últimas categorias.

A categoria 2 agrupou as outorgas destinadas ao abastecimento público, ao consumo humano e à criação animal. Quanto melhor a qualidade da água destinada a esses usos, menores serão os custos com o tratamento para atender aos limites e padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA n° 357/2005. Nesta categoria também estão incluídas as áreas que não possuem outorgas, uma vez que para este estudo só foram consideradas as outorgas dos últimos 5 anos, sendo desconsideradas as anteriores a este período. Portanto, de forma a minimizar os impactos causados na análise e favorecer a retirada de futuras outorgas, estas áreas foram incluídas na Classe 1.

Figura 2. Mapa de finalidade das outorgas, categorizado conforme as classes de uso da água.

A categoria 3 contemplou as outorgas de irrigação. A Resolução CONAMA n° 357/2005 define diferentes regras para o enquadramento de corpos hídricos que atendam ao uso da irrigação, de acordo com o tipo de cultura a ser irrigada. Para o caso de hortaliças, plantas frutíferas, parques, jardins, campos de esporte e lazer, nos quais haverá contato direto com o ser humano, a classe requerida é a 2, aqui representada pela categoria 3.

A categoria 4 é composta pelas outorgas de serviços de manutenção no corpo d'água, como por exemplo, desassoreamento e limpeza de cursos d'água, remoção de sedimentos e resíduos, regularização de vazão, transposição de corpo de água, entre outros. Para tais usos a qualidade de água requerida não é elevada, podendo assim serem enquadrados na categoria 4.

Na categoria 5 estão as outorgas destinadas à mineração. Nos locais outorgados para mineração observa-se ambientes totalmente antropizados e descaracterizados de sua formação natural, com problemas como contaminação hídrica, erosão das margens, assoreamento e diminuição da mata ciliar. De forma a atender aos requisitos estabelecidos na metodologia, as outorgas atreladas à mineração foram inseridas na categoria 5.

Volume outorgado

Com base nos dados de vazão e tempos de captação publicados nas portarias de outorga, foi possível levantar os volumes retirados em cada ottobacia e realizar a categorização (Figura 3).

Figura 3. Mapa do volume de água outorgado, categorizado conforme as classes de uso da água.

Áreas com um menor volume captado foram classificadas como sendo pertencentes à categoria 2, uma vez que representam áreas com maior preservação e, conseqüentemente, águas de melhor qualidade. Já os locais com maiores volumes captados têm uma maior exploração e ocupação da área resultando em uma piora na qualidade da água e, dessa forma, foram classificadas como categoria 5. Do mesmo modo que na análise da finalidade das outorgas, áreas sem nenhum volume outorgado foram incluídas na categoria 2, de modo a minimizar interferências devido à restrição dos dados aqui utilizados.

Uso e ocupação do solo

De acordo com os dados disponibilizados pela ANA (2016), foram obtidos 11 diferentes tipos de uso e ocupação do solo na bacia do rio Piranga, sendo eles: Aeroporto; Afloramento Rochoso; Pastagem; Rodovias; Vegetação Nativa; Água; Áreas Abertas (Úmidas + Secas); Áreas Agrícolas; Áreas Urbanas, Áreas de Mineração e Áreas de Reflorestamento. Como pode ser observado na Tabela 4, existe uma predominância de pastagem e de vegetação nativa na bacia do rio Piranga.

A categoria 2 é composta pela vegetação nativa, sendo essa classificada como “floresta estacional semi-decidual”, tipologia componente do bioma da Mata Atlântica. Já a categoria 4 é composta pela pastagem, que vem cada vez mais substituindo a vegetação nativa. A pastagem possui

baixa capacidade de suporte, que é ainda mais reduzida se atrelada à baixa fertilidade natural dos solos e à topografia acidentada da região, propiciando assim a processos erosivos, cujos sedimentos resultantes tendem a assorear os cursos d’água (ECOPLAN-LUME, 2010b).

Tabela 4. Distribuição percentual das áreas ocupadas por cada tipo de uso e ocupação do solo

Uso	Área (%)
Aeroporto	0,01%
Afloramento rochoso	0,01%
Água	0,36%
Áreas abertas (úmidas + secas)	0,00%
Áreas agrícolas	0,03%
Áreas de mineração	0,02%
Áreas de reflorestamento	2,58%
Áreas urbanas	0,52%
Pastagem	61,89%
Rodovias	0,06%
Vegetação nativa	34,52%

Com base nas características de cada atributo deste critério, foi feita a categorização baseada nestes usos preponderantes (Figura 4).

Figura 4. Mapa de uso e ocupação do solo, categorizado conforme as classes de uso da água.

As categorias 1, 3 e 5 não foram representadas, uma vez que, seguindo a metodologia proposta, não foram obtidos usos preponderantes nas otobacias que se enquadrassem em tais categorias.

Vazão mínima de referência específica

A categorização dos dados de vazão mínima de referência específica para a bacia do rio Piranga é apresentada na Figura 5.

Figura 5. Mapa da vazão mínima de referência específica (L/s.km²), categorizado conforme as classes de uso da água.

A categorização foi feita seguindo o princípio de que quanto menor a produtividade hídrica mais seca é a região e, portanto, mais restrita é a oferta de água e menor a capacidade de diluição de poluentes (Fraga et al., 2019). Dessa forma, a categoria 1, que apresentou uma vazão $Q_{7,10}$ (vazão mínima de referência adotada no estado de Minas Gerais) específica entre 0,00 e 4,503 L/s.km², necessita de melhor qualidade das águas para atender as diferentes demandas dos usos requeridos. Seguindo a lógica inversa, a categoria 5, com valores de $Q_{7,10}$ específica entre 5,746 e 6,356 L/s.km², por possuir maior quantidade de água disponível, possui um maior poder de diluição dos efluentes lançados nos corpos hídricos.

Densidade populacional

Tendo como referência os dados populacionais publicados pelo IBGE no Censo 2010, obteve-se a população média de cada ottobacia pertencente à bacia do rio Piranga. Com o tratamento dessas informações foi possível determinar áreas com maior ou menor concentração populacional, que foram divididas em 5 categorias (Figura 6).

Figura 6. Mapa da população média, categorizado conforme as classes de uso da água.

A categoria 1 está representada por uma população média entre 0 e 5.293 habitantes por ottobacia. Como a concentração populacional é baixa, espera-se que os impactos por ela gerados também sejam menores e, portanto, é possível manter e melhorar a qualidade do sistema hídrico desta região (Monteiro, 2016). A categoria 2 engloba as ottobacias com população média entre 5.293 e 7.799 habitantes. Estes valores ainda são baixos, podendo ainda se esperar uma maior conservação dos recursos hídricos.

A categoria 3 inclui as ottobacias com população entre 7.799 e 14.469 habitantes. A grande maioria dos municípios da bacia do Piranga, cerca de 87%, possui populações até os limites estabelecidos por esta categoria (ECOPLAN-LUME, 2010a). Para esta população já se espera ambientes alterados pelo crescimento populacional e presença moderada de empreendimentos.

A categoria 4 está representada pelas ottobacias com população entre 14.469 e 28.456 habitantes. Nestas regiões já é possível encontrar um maior lançamento de poluentes nos corpos hídricos, oriundos do esgoto doméstico e de empreendimentos de médio porte, contribuindo assim para uma maior degradação do ambiente e consequente deterioração da qualidade da água (Monteiro, 2016).

A categoria 5 engloba as ottobacias com população média entre 28.456 e 95.980 habitantes. Nesta categoria estão inclusos os 4 municípios com maior população e com maiores tendências de

crescimento: Viçosa, Ponte Nova, Ouro Preto e Mariana (ECOPLAN-LUME, 2010a). Nestas regiões existe uma predominância da população urbana sobre a rural, resultando assim em maiores impactos para o meio natural e os corpos hídricos ali presentes.

Obtenção do mapa preliminar de enquadramento

Na Tabela 5 é apresentado o peso de cada um dos critérios utilizados, conforme a metodologia proposta por Monteiro (2016).

Tabela 5. Peso obtido para cada critério utilizado

Critério	Peso
Finalidade da outorga	0,14
Volume outorgado	0,16
Uso e ocupação do solo	0,28
Vazão mínima de referência específica	0,14
Densidade populacional	0,27

O mapa de enquadramento foi obtido pela média ponderada dos critérios conforme os pesos estabelecidos. O mapa resultante apresentou valores variando entre 1 e 4,51. A classificação desses valores em classes de uso foi realizada conforme é apresentado na Tabela 6.

Tabela 6. Distribuição dos valores obtidos em classes de enquadramento

Intervalo	Classe
1 – 1,99	Classe especial
1,99 – 2,99	Classe 1
2,99 – 3,99	Classe 2
3,99 – 4,99	Classe 3
5	Classe 4

Para a distribuição dos valores obtidos em classes de enquadramento foi adotado um critério mais rigoroso no sentido de que, uma vez que o enquadramento busca o rio que se quer ter, é preferível escolher um critério mais restritivo em termos da exigência da qualidade da água a ser mantida. Vale ressaltar que os valores aqui encontrados podem sofrer variações de acordo com a análise feita, uma vez que esta análise é de certa forma subjetiva, porém deve ser feita com bom senso e lógica.

Na Figura 7 é apresentado o resultado da sobreposição dos mapas após a reclassificação dos valores em classes de uso para a área e estudo.

Figura 7. Resultado da sobreposição dos critérios e posterior classificação dos valores obtidos em classes de uso para a bacia do rio Piranga.

Pela Figura 7 é possível observar uma predominância de áreas enquadradas nas classes 1 e 2. Em um estudo de enquadramento, esse é um cenário ideal para o planejamento dos usos dos recursos hídricos, uma vez que, segundo a resolução CONAMA n° 357/2005, a classe 2 expressa a meta mais equilibrada no conflito entre atividades antrópicas impactantes e preservação ambiental para os corpos d'água, ao mesmo tempo que permite um maior número de usos da água.

Ainda na Figura 7, também é possível observar áreas com enquadramento nas classes especial e 3. Para o primeiro caso a predominância de áreas classificadas como classe especial a obtenção de novas outorgas é dificultada, podendo prejudicar o uso deste recurso no futuro. Já para as regiões enquadradas como classe 3, o uso da água é mais permissível, podendo acarretar consequências negativas à preservação dos recursos hídricos. Como pode ser observado, não houve áreas enquadradas na classe 4.

Na Figura 8 é apresentado o mapa da Figura 7 com o recorte dos corpos hídricos para o qual foi proposto o enquadramento, sendo eles: rio Piranga, rio Xopotó, rio Turvo Limpo e Ribeirão dos Oratórios.

Figura 8. Mapa preliminar do enquadramento dos corpos hídricos em classes de uso.

Apesar da metodologia utilizada avaliar multicritérios e apresentar um suposto enquadramento ideal para os rios das áreas de drenagem, o resultado da análise pode apresentar fragmentos isolados com classes diferentes e, muitas vezes, no decorrer de alguns trechos há rios com classes mais abrangentes seguidos imediatamente por rios com classes mais restritas. Tendo em vista essa problemática, foi necessário realizar uma adequação do enquadramento dos cursos d'água com a proposição de alterações.

Adequação do mapa preliminar para a obtenção proposta final de enquadramento

Seguindo a metodologia aqui proposta, obteve-se o ICE para cada uma das 7 estações de monitoramento relativas às classes 1, 2 e 3 para um período de 5 anos, entre 2012 e 2016., os quais estão apresentados na Tabela 7.

De uma forma geral, observa-se que os valores de ICE encontrados em todas as estações de monitoramento estão em uma faixa considerada boa (80-94). Porém, ainda assim é possível identificar valores baixos de ICE, especialmente no ano de 2012. É importante observar que em vários trechos o enquadramento proposto é superado pela atual qualidade da água, como mostrado pelo resultado do ICE, sendo assim possível alterar a classe de enquadramento proposta, a fim de se assegurar uma maior qualidade das águas, conforme será destacado a seguir.

Tabela 7. Resultado do ICE para as estações de monitoramento de qualidade da água avaliadas

Estação	Classe	ICE				
		2012	2013	2014	2015	2016
RD 001	1	49	68	100	93	94
	2	72	78	100	100	100
	3	91	79	100	100	100
RD 004	1	53	85	95	92	93
	2	72	89	100	100	95
	3	82	90	100	100	95
RD 007	1	50	80	100	89	92
	2	69	88	100	94	95
	3	81	89	100	100	100
RD 013	1	42	75	85	81	68
	2	54	83	94	89	79
	3	72	89	95	90	82
RD 068	1	49	85	89	89	89
	2	66	95	100	95	90
	3	84	95	100	100	90
RD 069	1	76	95	94	92	93
	2	89	100	100	100	100
	3	95	100	100	100	100
RD 070	1	47	72	89	84	87
	2	65	82	92	90	92
	3	79	87	95	94	93

O PARH-Piranga apresenta um prognóstico da bacia num horizonte até o ano de 2030. Nele é identificado um aumento significativo do consumo de água para uso industrial, um crescimento não tão expressivo para o abastecimento humano e um ligeiro decréscimo para dessedentação animal e irrigação. Tendo isso em mente, para atender as futuras demandas por água não é interessante tornar a classificação dos rios não tão restritiva, como nos casos dos rios Xopotó e Turvo Limpo, nos quais, mesmo com um ICE equivalente ao de Classe 1, optou-se por mantê-los na Classe 2. No rio Xopotó optou-se em manter seu trecho inicial como Classe 1, conforme encontrado seguindo a metodologia deste trabalho, por ser zona de cabeceira e consequentemente precisar de um planejamento mais restritivo para assegurar a qualidade e quantidade de água disponível.

Para a análise do enquadramento do rio Piranga foi observado não só os resultados aqui obtidos, mas também uma proposta de enquadramento apresentada no PARH-Piranga, onde consta que o ideal seria manter a sua classificação como classe 1 desde sua cabeceira até o momento em que chega na cidade de Piranga, local onde se encontra a estação RD001, que apresentou valores de ICE satisfatórios para a

classe 1 (94 no ano de 2016). A estação RD068, localizada próxima à cabeceira do rio Piranga e a estação RD069, localizada entre as estações RD001 e RD068, também apresentaram ICE elevado (89 e 93 no ano de 2016).

A partir da estação RD001 no rio Piranga, manteve-se todo o restante da sua extensão enquadrado na classe 2. No trecho entre as estações RD070 e RD013, que passa pela cidade de Ponte Nova, alterou-se a classe de 3 para 2, pois os resultados do ICE obtidos em ambas as estações são bons para o enquadramento na classe 2.

Tais mudanças asseguram um maior planejamento dos recursos hídricos nessa região, de forma a atender às demandas pelos diversos usos, ao mesmo tempo que mitigam o comprometimento dos corpos hídricos e proporcionam uma melhoria contínua da qualidade da água. As mudanças propostas podem ser observadas no mapa final de enquadramento para os cursos d'água na bacia (Figura 9).

Figura 9. Mapa final de enquadramento dos corpos hídricos em classes de uso para a bacia hidrográfica do rio Piranga, estado de Minas Gerais.

Como pode ser observado na Figura 9, o enquadramento final resultou em rios com classes 1 e 2, que são consideradas classes mais restritivas em relação ao uso. A adequação dos resultados permitiu que a classe mais restritiva fosse seguida da classe mais abrangente, conforme também adotado por Reis et al. (2019). Tal configuração é importante, uma vez que a qualidade da água tende a piorar à medida que se aumentam as contribuições de cargas poluidoras. No Brasil, o

lançamento de efluentes domésticos sem tratamento se caracteriza como a principal fonte de poluição dos corpos hídricos (Calazans et al., 2018a; Calazans et al., 2018b; Costa et al., 2017; Fraga et al., 2020; Oliveira et al., 2018; Oliveira et al., 2017; Pinto et al., 2017; Soares et al., 2020; Trindade et al., 2017; Vargas et al., 2018).

Embora o estudo tenha resultado na proposição de um enquadramento para alguns corpos hídricos da bacia, vale ressaltar que o enquadramento não é um processo puramente técnico, mas também político e social, que depende de aprovação em audiências públicas com a presença de todos os atores envolvidos no processo, devendo ser respaldado pela comunidade na qual está inserido de forma a atender aos múltiplos usuários da água.

Dessa forma, este trabalho, por se tratar de técnicas de tratamento de informações espaciais, deve ser utilizado para apontar a direção na qual o enquadramento deve seguir, dando uma base de argumentos técnicos e sólidos aos gestores no momento de elaboração final do enquadramento junto aos demais usuários. Sendo assim, o mapa apresentado na Figura 9 poderá ser utilizado como base técnica para eventuais discussões com todos os *stakeholders* envolvidos no processo de tomada de decisão para efetivação do enquadramento.

Conclusões

A metodologia adotada para fins de enquadramento dos corpos de água em classes de uso mostrou-se adequada com a adoção dos critérios e a sua aplicação por meio de técnicas de geoprocessamento.

As zonas de cabeceira foram enquadradas prioritariamente como classe 1, com exceção para o rio Turvo Limpo, que foi classificado como classe 2 em toda sua extensão.

Os trechos enquadrados como classe 2 levaram em consideração a qualidade atual da água, bem como os atuais e futuros usos demandados, buscando assim assegurar a preservação da qualidade da água e as demandas de uso necessárias para o desenvolvimento da região.

A utilização do ICE e das informações existentes no PARH-Piranga foram fundamentais para a adequação do mapa final de enquadramento dos corpos de água na bacia do rio Piranga.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), Coordenação de

Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) no desenvolvimento deste trabalho.

Referências

- Amorim, D.G., Cavalcante, P.R.S., Soares, L.S., Amorim, P.E.C., 2017. Enquadramento e avaliação do índice de qualidade da água dos igarapés Rabo de Porco e Precuá, localizados na área da Refinaria Premium I, município de Bacabeira (MA). Engenharia Sanitaria e Ambiental [online] 22. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522016131212>
- ANA. Agência Nacional de Águas, 2012. Panorama da qualidade das águas superficiais do Brasil.
- ANA. Agência Nacional de Águas, 2013. Base hidrográfica Ottocodificada da bacia do rio Doce 1:50.000/1.100.000.
- ANA. Agência Nacional de Águas, 2016. Uso e ocupação do solo em moderada resolução espacial (10m) da bacia do rio Doce.
- Brasil, 1997. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro.
- Brasil, 2005. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março.
- Calazans, G.M., Pinto, C.C., Costa, E.P., Perini, A.F., Oliveira, S.C., 2018a. Using multivariate techniques as a strategy to guide optimization projects for the surface water quality network monitoring in the Velhas river basin, Brazil. Environmental Monitoring and Assessment [online] 190. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-018-7099-z>
- Calazans, G.M., Pinto, C.C., Costa, E.P., Perini, A.F., Oliveira, S.C., 2018b. The use of multivariate statistical methods for optimization of the surface water quality network monitoring in the Paraopeba river basin, Brazil. Environmental Monitoring and Assessment [online] 190. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-018-6873-2>
- Calmon, A.P.S., Souza, J.C., Reis, J.A.T., Mendonça, A.S.F., 2016. Uso combinado de curvas de permanência de qualidade e modelagem da autodepuração como ferramenta para suporte ao processo de enquadramento de cursos d'água superficiais. Revista Brasileira de Recursos Hídricos [online] 21. Disponível: <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.p118-133>
- CCME. Canadian Council of Ministers of the Environment, 2001. Canadian water quality guidelines for the protection of aquatic life: CCME Water Quality Index 1.0.
- Costa, E.P., Pinto, C.C., Soares, A.L.C., Melo, L.D.V., Oliveira, S.M.A.C., 2017. Evaluation of violations in water quality standards in the monitoring network of São Francisco River basin, the third largest in Brazil. Environmental Monitoring and Assessment [online] 189. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-017-6266-y>
- Cunha, D.G.F., Calijuri, M.C., 2010. Análise probabilística de ocorrência de incompatibilidade da qualidade da água com o enquadramento legal de sistemas aquáticos - estudo de caso do rio Pariqueira-Açu (SP). Engenharia Sanitaria e Ambiental [online] 15. Disponível: <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.211910.1590/s1413-41522010000400006>
- ECOPLAN-LUME, 2010a. Plano de Ação de Recursos Hídricos da Unidade de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos - Piranga.
- ECOPLAN-LUME, 2010b. Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Doce - Volume I.
- Elesbon, A.A.A., Silva, D.D., Sedyama, G.C., Montenegro, A.A.A., Ribeiro, C.A.A.S., Guedes, H.A.S., 2014. Proposta metodológica para projeto de redes hidrométricas: parte I - espacialização não tendenciosa dos dados hidrológicos. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental [online] 18. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v18n09p980-985>
- Ferreira, D.M., Fernandes, C.V.S., Kaviski, E., 2016. Curvas de permanência de qualidade da água como subsídio para o enquadramento de corpos d'água a partir de modelagem matemática em regime não permanente. Revista Brasileira de Recursos Hídricos [online] 21. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.011615143>
- Fraga, M.S., Reis, G.B., Silva, D.D., Guedes, H.A.S., Elesbon, A.A.A., 2020. Use of multivariate statistical methods to analyze the monitoring of surface water quality in the Doce River basin, Minas Gerais, Brazil. Environmental Science and Pollution

- Research [online] 27. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-020-09783-0>
- Fraga, M.S., Silva, D.D., Elesbon, A.A.A., Guedes, H.A.S., 2019. Methodological proposal for the allocation of water quality monitoring stations using strategic decision analysis. *Environmental Monitoring and Assessment* [online] 191. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-019-7974-2>
- Fraga, M.S., Uliana, E.M., Silva, D.D., Campos, F.B., Calijuri, M.L., Santos, D.M.S., 2018. Climatic zoning for eucalyptus cultivation through strategic decision analysis. *Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science* [online] 13. Disponível: <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.2119>
- Guimarães, B.O., Reis, J.A.T., Mendonça, A.S.F., Akabassi, L., 2016. Análise probabilística de parâmetros de qualidade da água para suporte ao processo de enquadramento de cursos d'água. *Engenharia Sanitaria e Ambiental* [online] 21. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522016143190>
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2010. Censo Demográfico 2010.
- Martins, G.L.A., Costa, A.S.V., Barros, A.R., Ramalho, F.M.G., 2017. Qualidade da água do rio Setúbal em Jenipapo de Minas-MG após construção de barragem. *Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science* [online] 12. Disponível: <http://dx.doi.org/10.4136/1980-993X>
- Monteiro, F.S., 2016. Análise geoespacial como subsídio para proposta de enquadramento de corpos hídricos. Universidade do Extremo Sul Catarinense. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Criciúma, UNESC.
- Oliveira, D.G., Vargas, R.R., Saad, A.R., Arruda, R.D.O.M., Dalmas, F.B., Azevedo, F.D., 2018. Land use and its impacts on the water quality of the Cachoeirinha Invernada Watershed, Guarulhos (SP). *Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science* [online] 13. Disponível: <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.2131>
- Oliveira, S.C., Amaral, R.C., Almeida, K.C.B., Pinto, C.C., 2017. Qualidade das águas superficiais do Médio São Francisco após a implantação dos perímetros irrigados de Gortuba/Lagoa Grande e Jaíba. *Engenharia Sanitaria e Ambiental* [online] 22. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522017136784>
- Pinto, C.C., Andrade, S.B., Pinto, É.A., Oliveira, S.M.A.C., 2017. Análise de tendência de concentrações e cargas de parâmetros físicos, químicos e biológicos da bacia do rio Verde. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* [online] 22. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.0117160030>
- Rebouças, A.C., Braga, B., Tundisi, J.G., 2006. *Águas Doces no Brasil: Capital Ecológico, Uso e Conservação*, 3 ed. Escrituras, São Paulo.
- Reis, G.B., Abreu, V.O., Fraga, M.S., Tozi, T., Silva, D.D., 2019. Proposta de enquadramento de corpos hídricos em classes de uso na bacia hidrográfica do Rio Santo Antônio (MG). *Nativa* [online] 7. Disponível: <http://dx.doi.org/10.31413/nativa.v7i2.6333>
- SEMAD. Secretaria de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, 2017. *Outorgas - Relação deferidos, indeferidos, cancelados e outros*.
- Soares, A.L.C., Pinto, C.C., Oliveira, S.C., 2020. Impacts of anthropogenic activities and calculation of the relative risk of violating surface water quality standards established by environmental legislation: a case study from the Piracicaba and Paraopeba river basins, Brazil. *Environmental Science and Pollution Research* [online] 27. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-020-07647-1>
- Trindade, A.L.C., Almeida, K.C.B., Barbosa, P.E., Oliveira, S.M.A.C., 2017. Tendências temporais e espaciais da qualidade das águas superficiais da sub-bacia do Rio das Velhas, estado de Minas Gerais. *Engenharia Sanitaria e Ambiental* [online] 22. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522016131457>
- Vargas, R.R., Barros, M.D.S., Saad, A.R., Arruda, R.D.O.M., Azevedo, F.D., 2018. Assessment of the water quality and trophic state of the Ribeirão Guaraçau Watershed, Guarulhos (SP): a comparative analysis between rural and urban areas. *Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science* [online] 13. Disponível: <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.2170>