

Aplicação do método Grade of Membership na classificação do grau de naturalização das águas na bacia do Rio Doce

Mirella Nazareth de Moura¹
Miguel Fernandes Felipe²

¹ Bacharel em Geografia (UFJF). Graduanda em Letras-Língua inglesa (UNIDERP – Anhanguera).

² Geógrafo (IGC-UFMG). Mestre em Geografia (IGC-UFMG). Doutor em Geografia (IGC-UFMG). Professor da UFJF.

Resumo A qualidade da água é um tema de grande importância para diversos campos da ciência e, também, para a gestão ambiental. Assim, trabalhar com novos caminhos para discutir a qualidade da água é tão desafiador quanto relevante. A abordagem comum para a temática é o IQA, um modelo reconhecido internacionalmente e amplamente replicado. Todavia, a rigidez do IQA leva a lacunas em sua interpretação. Métodos estatísticos baseados na lógica nebulosa oferecem ferramentas robustas capazes de captar a complexidade do tema. Diante disso, esse trabalho traz uma proposta metodológica de utilização do método *Grade of Membership* para avaliar a naturalização das águas. Esse algoritmo pode indicar o quão próximo uma amostra de água está de uma dada condição pristina. Foram utilizados dezesseis anos de dados físicos, químicos e biológicos de águas fluviais, amostradas trimestralmente em 99 estações ao longo da bacia do Rio Doce. Os resultados mostram que todas as amostras verificadas estão distantes de sua condição pristina. Além disso, praticamente todas possuem grau de inserção nas três classes criadas (bom, médio e ruim). Ademais, a lógica nebulosa viabiliza a discussão dos dados para além das classes definidas, apontando os parâmetros mais distantes de sua condição pristina, fornecendo subsídios para iniciativas de planejamento e gestão do meio ambiente e dos recursos hídricos.

Palavras chave: qualidade da água, naturalização, GoM, classificação.

1. Introdução

É inegável a importância da água como elemento primordial à vida (Barcelos *et al.* 2006). Porém, a lógica economicista-utilitarista que rege o sistema capitalista de produção promove uma desregulação da relação sociedade/natureza em escala nunca antes registrada. A conjuntura político-econômica vigente cria a falsa ideia de que os elementos que constituem o meio ambiente são meros recursos naturais (Porto-Gonçalves, 2006), ou seja, são apreendidos enquanto parte do sistema produtivo, como matéria prima, e não em sua essência, com funções naturais para além das necessidades humanas. Uma das consequências disso é a constante alteração nas propriedades biológicas, físicas e químicas das águas fluviais, as quais absorvem transformações diretas e indiretas de uma bacia e funcionam como uma síntese da qualidade ambiental da mesma (Troppmair 1987).

As águas má qualidade podem trazer riscos à saúde e à vida, servindo como veículo de diversos patógenos (Von Sperling 1995). Os atores sociais que tem o poder de definir políticas públicas e/ou promover a degradação ambiental devem estar atentos aos fatores que podem interferir negativamente na qualidade da água que é utilizada pela população. Como Von Sperling (1995) afirma, o conceito de qualidade da água é muito mais amplo do que a simples caracterização da água pela fórmula molecular H₂O. Isto porque a água, devido às suas propriedades de solvente e à sua capacidade de transportar partículas, incorpora a si diversas impurezas, as quais definem a qualidade da mesma. Não obstante, sabe-se

que a água na natureza, ainda que isenta de intervenção humana, possui características distintas, relacionadas aos solutos incorporados por processos geológicos, pedológicos e biológicos (Manoel-Filho e Feitosa 2000). Partindo dessa concepção, avaliar a qualidade ou o grau de naturalização¹ das águas são esforços distintos e complexos.

O termo *qualidade* não se refere ao estado de pureza da água, mas à adequação dos múltiplos usos das águas as suas características químicas, físicas e biológicas (Merten e Minella 2002). De maneira geral, pode-se dizer que a qualidade de uma determinada amostra de água depende das condições naturais do uso e da ocupação do solo na bacia hidrográfica (Von Sperling 1995). Assim, a concepção de qualidade da água remete ao seu uso e não apenas ao seu estado de pureza.

Porém, não se pode furtar da discussão acerca das alterações humanas *stricto sensu* que fazem com que uma amostra de água se distancie de suas características originais. Abre-se campo para o estudo da naturalização das águas (Von Sperling 1995; Merten e Minella 2002). O conceito de naturalização da água utilizado neste trabalho é oriundo do embasamento teórico de Gonçalves *et al.* (2007), em que os pesquisadores, buscam o que chamam de “bom estado” das águas superficiais para a proteção dos ecossistemas aquáticos e adjacências. Segundo os autores, o “estado ecológico”, por definição, é expresso pela distinção de uma determinada massa de água (“desvio ecológico”) em relação à outra

porção de água, com características idênticas (“ecótipos”) e em condições “inalteradas”, situação a que corresponde ao “estado ecológico de referência”. Assim como Gonçalves *et al.* (2007), o presente trabalho também adotará um estado ecológico de referência, visando levar em consideração uma possível condição não alterada (natural) da água. É neste contexto que é levantado o conceito de condição pristina²:

entende-se por situação “pristina” ou de “referência” o estado dos ecossistemas aquáticos na ausência de qualquer influência antrópica significativa. (...) O “estado ecológico” das águas superficiais é classificado com base em parâmetros biológicos (constituem a base de avaliação da qualidade da água, sendo usados como indicadores da sua qualidade ecológica), hidromorfológicos e físico-químicos (dados que suportam os elementos biológicos, pois englobam fatores abióticos que condicionam as suas comunidades) (Gonçalves *et al.* 2007, p.2).

Comparar as características físico-químicas e biológicas de uma amostra de água com sua suposta condição pristina traz avanços em relação à tradicional abordagem de qualidade da água pelo IQA (Índice de Qualidade da Água), ainda que seja inegável que este índice se configure como uma ferramenta essencial, no que diz respeito ao estudo da qualidade dos mais variados corpos hídricos, sendo usado como uma metodologia integradora, convertendo uma série de informações em um único resultado numérico (Almeida e Schwarzbold 2003). Segundo Moretto (2011), o IQA é um instrumento que transforma amplas quantidades de dados num único valor que representa o nível de qualidade da água.

Apesar de sua ampla utilização, intrinsecamente sua metodologia guarda inconsistências que nem sempre são explanadas. As principais referem-se ao modelo matemático de elaboração das curvas-padrão e ao engessamento do algoritmo a nove parâmetros específicos: oxigênio dissolvido, potencial hidrogeniônico, Coliformes termotolerantes, demanda bioquímica de oxigênio, temperatura, nitrogênio total, fósforo total, turbidez e resíduo total (Von Sperling 1995) Para valorar os parâmetros que integra a equação, é criada uma curva-padrão de conversão da unidade de medida do parâmetro (p.e. mg/L, UT, UFC/100ml, etc.) em um escore de zero a cem. Essas curvas, porém, são tomadas acriticamente como funcionais para quaisquer estudos, independentemente das características originais do ambiente. Quanto ao engessamento dos parâmetros, caso haja a impossibilidade (perda, erros laboratoriais, falta de recursos, etc.) de análise de um dos nove parâmetros a equação não pode ser calculada e o índice não é gerado.

É evidente que a utilização do IQA apresenta pontos positivos, a exemplo da simplicidade na comunicação com a população em geral. No entanto, há um problema com o processo de indexação, uma vez que esse possa possibilitar que alguns parâmetros tenham uma influência desproporcional sobre o resultado final, produzindo um índice induzido (Moretto 2011). Desta maneira, percebem-se limitações referentes ao uso do IQA como principal parâmetro de classificação da água, que poderão ser superadas com novas propostas como a deste trabalho, em que a escolha da quantidade e natureza dos parâmetros é livre e as características originais da água não são perdidas.

É nesta conjuntura, que este estudo objetiva classificar o grau de naturalização das águas da bacia do Rio Doce. Para tanto, foi necessário debruçar-se sobre a Teoria dos

Conjuntos Nebulosos (Zadeh 1965) e desenvolver uma metodologia que, a partir da técnica do *Grade of Membership* (Manton 1994), viabilizasse a comparação de amostras de água de diferentes temporalidades e espacialidades, agrupando-as em relação à proximidade de cada uma com a condição pristina predita da bacia do Rio Doce.

2. Caracterização

A bacia do rio Doce localiza-se entre os estados de Minas Gerais (MG) e Espírito Santo (ES), abrangendo 83.431 km² (FIG. 1). O rio Doce tem sua nascente principal situada na serra da Mantiqueira, em Trapizonga (município de Ressaquinha-MG) e percorre 853 km até atingir o Oceano Atlântico próximo da vila de Regência, localizada no município de Linhares-ES.

O processo histórico de sucessiva retirada da cobertura florestal original (Floresta Estacional Semidecidual) promoveu significativos danos ambientais à bacia do rio Doce. Contexto esse agravado a partir do início século XX com a implantação da Estrada de Ferro Vitória-Minas (EFVM), que se tornaria uma importante via de ocupação do território da bacia, culminando na dinamização da economia regional. Destacam-se, na bacia, as atividades agropastoris, a mineração de ferro, a siderurgia e, a partir da década de 1940, a silvicultura do eucalipto (Coelho 2006). Segundo Felipe *et al.* (2016):

Juntamente com os usos urbanos e agrícolas, estas atividades econômicas determinaram distintos recortes espaciais de uso e ocupação do solo e de alteração das condições hidroambientais. Condicionando a estruturação do ordenamento espacial na bacia, os recursos hídricos sofrem, por outro lado, as consequências das atividades humanas, configurando cenários de degradação e rarefação hídrica (Felipe *et al.* 2016, p3).

De acordo com Coelho (2007), no interior da bacia do rio Doce ocorrem contextos morfoestruturais variados, podendo ser divididos em três unidades regionais: Alto, Médio e Baixo Rio Doce. Dessa forma, o autor ressalta que a Unidade Alto Rio Doce tem seus limites situados nas adjacências de Governador Valadares (MG). Além do mais, envolve as bacias que vertem do Espinhaço escoando de Oeste para Leste com altitudes que variam de 300 a 2.600 m. Nesse setor ocorrem sobretudo alinhamentos serranos e topos em cristas controlados por falhamentos regionais sobre o embasamento gnáissico.

A unidade do Médio Rio Doce ocorre em terrenos de altitude entre 200 e 500m, embasados predominantemente por biotita-gnaíse, marcando um relevo de “pontões graníticos e colinas com topos nivelados e vales ora fechados, ora abertos (Coelho 2006, p. 60)”. Por fim e não menos importante, a unidade Baixo Rio Doce está inteiramente inserida no estado do Espírito Santo e é assinalado por relevo colinoso de baixa altitude associado aos tabuleiros do Grupo Barreiras e planícies costeiras quaternárias de controle litológico-estrutural.

Segundo o Plano Integrado de Recursos Hídricos (PIRH 2010), o sistema hidrológico subterrâneo da bacia do Doce está condicionado às características geomorfológicas, litoestratigráficas e estruturais. Assim, nos diferentes litotipos ocorrentes na região é possível definir dois tipos de aquífero, granular e fissurado, que retratam diferentes distribuições espaciais e comportamentos da água subterrânea. O plano ainda acrescenta que os aquíferos

granulares são configurados por uma sequência de materiais detríticos de idade cenozoica, onde a circulação e o armazenamento das águas subterrâneas acontecem através da porosidade primária. Já os aquíferos fissurados, associados a

falhas, fraturas e diáclases, ocupam 91% da área da bacia. Esses são representados por rochas quartzíticas, rochas xistosas ou rochas cristalinas de diversas naturezas (PIRH, 2010).

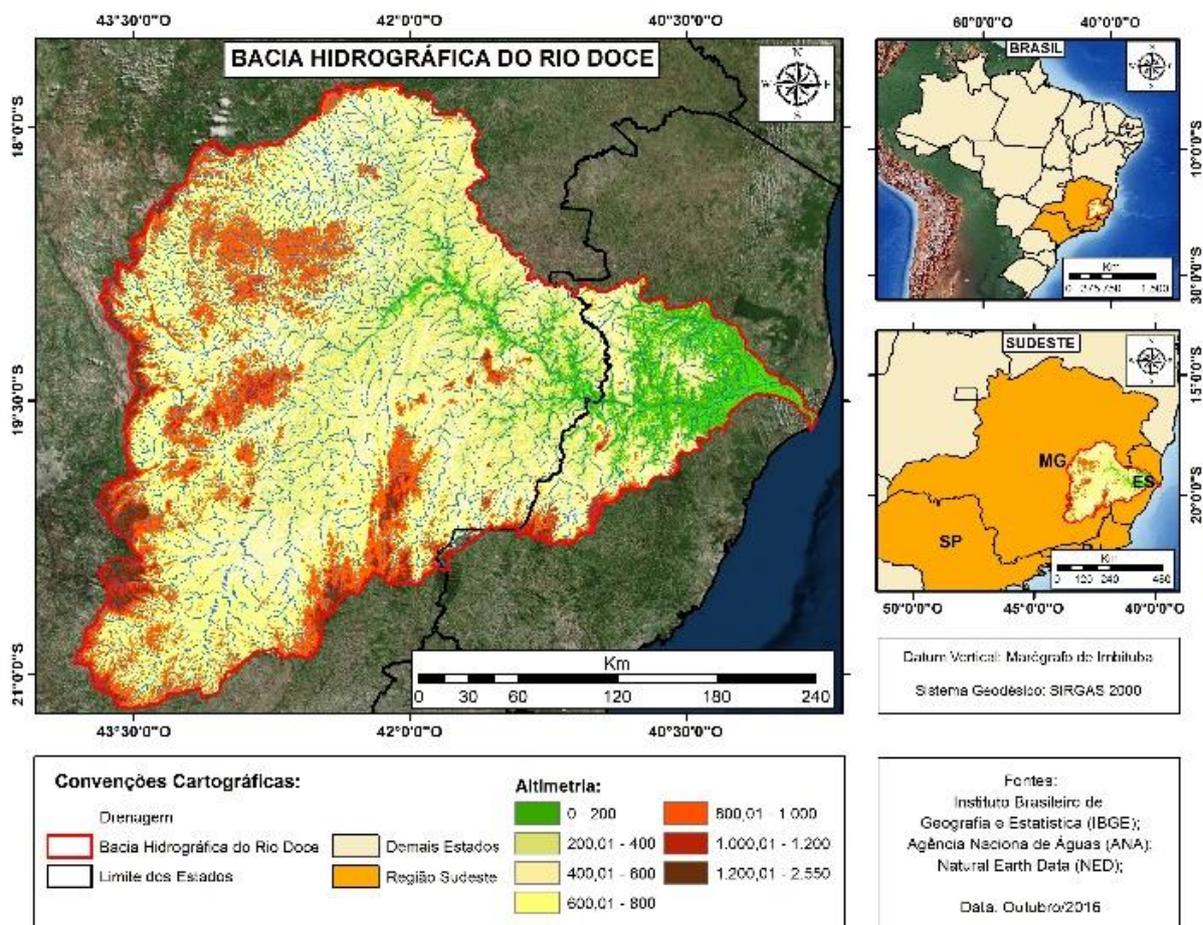


Figura 1 – Localização, cursos d'água e altimetria da Bacia do Rio Doce, Minas Gerais e Espírito Santo.
Fonte: IBGE 2015; ANA 2015; NED 2015.

A proposição de uma nova classificação das águas fluviais que considere o seu grau de naturalização requer uma área de estudo que viabilizasse a aplicação da metodologia preconizada. A área selecionada para a aplicação inicial do modelo deveria apresentar relativa homogeneidade geológica, no intuito de evitar severas oscilações nas propriedades físico-químicas das águas naturais. Ademais, seria necessária a existência de uma série histórica consistente de análises de qualidade de água para dar entrada no modelo. Assim, considerou-se bacia do Rio Doce como a mais adequada para os estudos iniciais dentro do estado de Minas Gerais, uma vez que, como já foi abordado por Coelho (2007), há uma forte predominância de rochas ácidas, em sua maioria gnaisse e granitoides (baixa heterogeneidade química).

Além disso, a bacia do Rio Doce está constantemente em foco nas principais redes de comunicação de massa devido ao rompimento em 2015 de um dos diques da barragem de rejeitos de mineração de Fundão, localizada em Mariana-MG, de responsabilidade da Samarco⁴. Essa tragédia ocasionou quase dezenove mortes, além de danos materiais expressivos nos terrenos marginais do rio Doce e de seus afluentes afetados. Apesar do tempo decorrido desde o rompimento, o contexto atual é ainda de esforços técnicos e acadêmicos para o entendimento da grandeza das consequências, interpretação das causas e mapeamento de efeitos extensivos e locais.

3. Dados e Métodos

3.1 Dados

Para a proposição de uma classificação das águas fluviais quanto ao seu grau de naturalização, o primeiro passo foi escolher uma área de estudo que viabilizasse a aplicação da metodologia preconizada. A área selecionada para a aplicação inicial do modelo deveria apresentar relativa homogeneidade geológica, no intuito de evitar severas oscilações nas propriedades físico-químicas das águas naturais. Ademais, seria necessária a existência de uma série histórica consistente de análises de qualidade de água para dar entrada no modelo. Assim, considerou-se bacia do Rio Doce como a mais adequada para os estudos iniciais dentro do estado de Minas Gerais, uma vez que, como já foi abordado por Coelho (2007), há uma forte predominância de rochas ácidas, em sua maioria gnaisse e granitoides (baixa heterogeneidade química), além de uma vasta rede de monitoramento da qualidade de água, de domínio público, gerenciada pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM). Foram compilados dados de 2391 amostras, distribuídas em 99 estações de monitoramento ao longo dos rios que formam a bacia do Rio Doce, trimestralmente, entre 1997 e 2012. Cada amostra foi interpretada levando em conta a série de parâmetros de qualidade da água monitorados

sistematicamente pelo IGAM, os quais são: alcalinidade, alumínio, arsênio, bário, boro, cádmio, cálcio, chumbo, cianeto, cloro, clorofila, cobre, coliformes fecais, condutividade elétrica, cor, cromo, DBO, dureza, fenóis, ferro, fósforo, magnésio, manganês, mercúrio, níquel, nitrato, nitrito, nitrogênio, nitrogênio amoniacal, OD, pH, potássio, selênio, sódio, sólidos totais dissolvidos, substâncias tensoativas, sulfato, sulfeto, turbidez e zinco. Devem-se ressaltar os dados de entrada foram obtidos da série histórica de monitoramento de qualidade de água da bacia do Rio Doce, do IGAM.

Neste estudo, assumiu-se que a condição pristina seria considerada aquela “ideal” dentro da série histórica, em que a interferência antrópica nos parâmetros físicos, químicos e biológicos da água pudesse ser considerada desprezível. Em termos técnicos, isso implicaria no melhor resultado possível para cada parâmetro assumindo-se as características naturais das águas da bacia do Rio Doce, obtidas junto à literatura especializada³. Contudo, devido à falta de referência para definição dos valores ideais (pristinos) para alguns parâmetros (como óleos e graxas, feofitina, estreptococos fecais, temperatura e DQO), optou-se por excluí-los do modelo.

Tendo em vista que a aplicação do GoM requer dados discretizados, os valores dos parâmetros foram substituídos pelo número da classe (1, 2, 3, 4, ou 5), conforme os intervalos estabelecidos para cada variável que compõe a condição pristina da água. Excetuando-se o intervalo da classe 1 (considerada “ideal” por abranger a condição pristina), definido a priori para cada parâmetro com base na literatura especializada, os demais intervalos foram definidos pela amplitude dos valores.

3.2 Métodos

Devido à natureza dos dados (distribuição não-normal) e à multiplicidade de variáveis disponíveis consideradas não-hierarquizadas, optou-se por um modelo estatístico multivariado e qualitativo. É nesta conjuntura que a lógica nebulosa surge como um método valioso para estudos ambientais já que “ao trabalhar com um número incontável de condicionantes – variáveis –, possibilita uma aproximação à complexidade do meio” (Felippe 2009, p. 42). Os novos conceitos matemáticos apresentados Zadeh (1965) e retrabalhados por Manton *et al.* (1994) trazem a luz a Teoria dos Sistemas Nebulosos, que preconiza o raciocínio impreciso e a análise qualitativa. Na teoria dos conjuntos nebulosos, um elemento pode pertencer parcialmente a múltiplos conjuntos (classes), apresentando, para cada um destes, um grau de pertencimento passível de determinação (Felippe *et al.* 2013; Felippe e Magalhães Jr. 2014).

O desafio que se estabelece na presente pesquisa é o de elaborar uma classificação que, mesmo baseada em um amplo grupo de amostras e um considerável número de parâmetros, permita o enquadramento desses diversos pontos (amostras de qualidade de água) em diversas classes pré-estabelecidas. Dessa forma, promove-se interpretações transversais e evita-se superficialidades, buscando uma resposta mais próxima possível da realidade para cada ponto de coleta. Dessa forma, método *Grade of Membership* – GoM (Manton *et al.* 1994) adequou-se aos quesitos teóricos da proposta da pesquisa. Fundamentado na Teoria dos Conjuntos Nebulosos, o método em questão possibilita a análise multivariada qualitativa, agrupando os objetos de estudo pelo método de máxima verossimilhança em conjuntos nebulosos (Cerqueira, 2004). Conforme Cerqueira (2004):

o método tem propriedades extremamente importantes [...]. A primeira é que permite que as variáveis possam pertencer a mais de um grupo ou perfil, possibilitando que a heterogeneidade entre os mesmos possa ser expressa como um componente do modelo, o que leva a descrições mais naturais dos grupos a serem gerados. Uma outra vantagem é a possibilidade de lidar com grande número de casos e variáveis (Cequeira 2004, p. 59).

As características (parâmetros de qualidade de água) de cada elemento (amostra de água com data e local de coleta) são integradas por uma equação de máxima verossimilhança, gerando agrupamentos de elementos em perfis (classes), aos quais é associado um escore que representa o grau de pertencimento de cada elemento (amostra) em cada perfil (classe). Assim, “a determinação de escores GoM para cada unidade de estudo permite a representação da heterogeneidade entre as mesmas, dentro de cada perfil gerado” (Felippe 2009, p. 44).

Essa característica coloca vantagens comparativas do GoM em relação às metodologias mais comuns como a Análise de Cluster e a Análise Discriminante, que apresentam problemas com a heterogeneidade dos indivíduos. Todavia, o GoM lida com o agrupamento e a estimação de coeficientes de pertencimento simultaneamente, o que é um avanço metodológico considerável (Felippe 2009, p. 44).

Conforme Alves *et al.* (2008) o GoM é considerado um método de grande valia para determinação de classificações, a partir da elaboração de tipologias, que se baseiam nas características quantitativas e qualitativas dos elementos em estudo. Este método lida com duas problemáticas para determinação de uma classificação ou tipologia, que são a identificação de grupos e a descrição de diferenças entre os mesmos. O que permite a identificação de grupos com características semelhantes, sendo possível um avanço na explicação de fenômenos complexos. Neste trabalho, a aplicação do GoM para a elaboração da classificação da água tendo por base um perfil ideal foi realizada com base nos seguintes passos metodológicos:

- Seleção das variáveis – j – a serem utilizadas e elaborar a matriz qualitativa;
- Determinação do número de tipos – k – a serem criados;
- Interpretação da capacidade de explicação ao verificar o grau de pertencimento de cada elemento a cada perfil criado – gik – e também a probabilidade de cada categoria de cada variável em cada perfil – λkjl (princípio da parcimônia);

A função multinomial de máxima verossimilhança do método *Grade of Membership* é expressa por $L(y) = \prod_i \prod_j \prod_l (\sum g_{ik} \lambda_{kjl})$. Na qual: g é o grau de pertinência; i é cada elemento; k é cada subconjunto, ou perfil, ou tipo; l é a probabilidade de cada categoria; j é cada variável.

A matriz a quantitativa a ser utilizada pelo GoM continha 2391 linhas (referentes às amostras), com 40 colunas (referente aos parâmetros), representados agora por algarismos de 1 a 5 (correspondente a sua classe pré-estabelecida). No propósito de alcançar resultados coerentes com a realidade e minimizar a possibilidade de erros futuros

na interpretação dos resultados, foram realizados nove testes com o algoritmo. Nos primeiros testes, viu-se a necessidade de diminuir o montante das amostras. Dessa forma, optou-se por reduzir o recorte temporal para 10 anos, acarretando assim, uma diminuição do número de amostras para 1837. O denso número de elementos (amostras), além de ter dificultado o funcionamento do algoritmo, gerou dificuldade no manuseio dos dados para análise e interpretação.

Para facilitar a interpretação dos dados ao enquadrá-los em categorias, viu-se ainda nos primeiros testes a necessidade de reduzir o número de classes para três (ideal, média e ruim). Por fim, nos últimos testes, notou-se que alguns dos parâmetros apresentavam um erro na distribuição das frequências, onde muitas vezes, esses ficavam unicamente concentrados em apenas um perfil. Dessa forma, optou-se por excluir esses parâmetros, que somaram sete: alcalinidade, chumbo, cor, fenóis, manganês, mercúrio e níquel. Por fim, no último teste com o algoritmo, a nova matriz utilizada para aplicar o GoM contava com 33 variáveis (j), 1837 amostras (elementos) (i) e 3 perfis (k).

A presente proposta metodológica tem um caráter espacial muito claro; ou seja, como as fontes de informações básicas advém de um determinado recorte espacial. Assim, as conclusões a serem formuladas somente poderão ser reverberadas para esse mesmo recorte espacial. Contudo, a proposta é falseável e replicável para quaisquer áreas que apresentem dados suficientes, possibilitando, inclusive, ajustes metodológicos.

4. Resultados e discussão

A partir da função multinomial utilizada no GoM, foram encontradas 72 codificações diferentes de máxima verossimilhança (combinações únicas dos parâmetros), dentre as 1837 amostras analisadas. Deste modo, muitas amostras, mesmo distribuídas em tempos e localidades distintos, apresentaram características similares a outras. A matriz de resultados, incluindo os graus de pertencimento de cada amostra a cada perfil criado, é apresentada na Tabela 1.

Para interpretar os 1867 casos estudados, deve-se ter em mente que uma classificação da água que se baseia na Teoria dos Conjuntos Nebulosos promove uma profunda análise de cada uma das amostras, mesmo após esses serem enquadrados em qualquer um dos perfis criados. Isso é possível, uma vez que um ponto de coleta de determinado tipo (por exemplo, k1) pode também possuir características de outros tipos (por exemplo, k2 e k3). Dessa forma, para se ter uma interpretação mais consistente da diversidade dos dados, é preciso interpretar o grau de pertencimento (g) das amostras (i) aos respectivos perfis (k) gerados pelo GoM. Contudo, é possível observar que praticamente todas as amostras possuem características de mais de um perfil (Gráfico 1).

Uma leitura mais rasa dos dados permitiria afirmar que aproximadamente 50% dos casos possui maior grau de pertencimento ao perfil 1 (ideal). Todavia, assumindo-se a lógica nebulosa, isso está muito longe de afirmar um elevado grau de naturalização das águas da bacia do rio Doce. Faz-se necessário observar os percentuais de inserção nos perfis 2 e 3 de cada amostra, o que, de modo algum, é desprezível. Especificamente, a periodicidade de ampliação do perfil 3 (Gráfico 1) denota a sazonalidade climática: com a diminuição das vazões, aumenta-se a concentração de determinados poluentes.

Em relação às 33 variáveis (parâmetros físico-químico-biológicos) que compõem a matriz, com suas respectivas categorias (bom, médio ou ruim), apenas coliformes fecais apresentou maior concentração na categoria ruim em relação

às demais. Ainda com resultados preocupantes, ficaram os parâmetros oxigênio dissolvido e pH, com elevada inserção no perfil 2 e 3 e baixa representatividade no 1. Alumínio, arsênio, boro, cádmio, cálcio, cloro, clorofila, condutividade elétrica, dureza, nitrogênio orgânico, sulfeto e turbidez também apresentaram maior aderência ao perfil 2. Por outro lado, o número de parâmetros considerados traços foi expressivo. Para essas variáveis, já se esperava uma menor fuga à condição pristina.

Mediante aos aspectos abordados, levando em consideração a comparação dos resultados obtidos neste trabalho pelo GoM e os relatórios de qualidade da água do IGAM, baseados no IQA, percebe-se que os saldos são diferentes, mesmo sendo aplicados na mesma área de pesquisa e com os mesmos dados de entrada nos modelos. Este fato ocorre devido a flexibilidade e a amplitude de variáveis que o método GoM permite abarcar. O IQA, por sua vez, apresenta uma limitação e rigidez de parâmetros, podendo ocultar ou induzir os resultados. O GoM apresentou maior porcentagem na categoria boa, contudo sua interpretação por completo remete ao pertencimento nebuloso de cada amostra nas três classes. Pode-se, assim, transitar entre interpretações mais horizontais ou mais verticais que pautem não apenas nos gik, mas também no lkjl, pois este último aponta para as principais variáveis que destoam do conjunto.

Também vale ressaltar que de acordo com o IQA aplicado na bacia do Doce no ano de 2014, os parâmetros que apresentam os piores valores, são OD, DBO, coliformes fecais e fósforo. Já segundo o GoM, o pior parâmetro retratado foi coliformes fecais. Contudo, de modo algum se desqualifica o IQA. Esse índice é acessível, de fácil uso e interpretação por todos, constituindo-se como uma ferramenta simples e compreensível para os tomadores de decisões. Por outro lado, devido a sua pequena divulgação, o GoM ainda pode trazer problemas para órgãos gestores e para a população em geral, uma vez que esse baseia-se em uma matemática complexa, conseqüentemente, gerando resultados de difícil interpretação.

A definição da condição pristina da água requer um olhar atento para a heterogeneidade espacial das características ambientais da área de estudo, sobretudo sua hidrogeologia, uma vez que tais aspectos interferem diretamente nas características físico-químicas da água. No mais, para possíveis futuros trabalhos referentes a este assunto, não necessariamente na mesma área, os resultados podem constituir-se ainda mais precisos com dados baseados em coletas primárias de campo.

Para desenvolver este estudo, optou-se por buscar um método que abarcasse, da melhor maneira possível, a complexidade da realidade. Dessa forma, o método abordado para essa pesquisa foi o GoM, que segue os fundamentos da matemática nebulosa, capaz de englobar para análise e estudo, diversas variáveis quantitativas ou qualitativas. Comparativamente ao IQA, abordagem mais comum em estudos dessa natureza, o GoM avança em direção ao grau de naturalização das águas a partir de comparações e agrupamentos internos dentro de um banco de dados.

Os resultados da aplicação desse novo método, com todo o respaldo científico, trazem respostas bastantes satisfatórias. Mostra, primeiramente, que cada ponto de coleta é heterogêneo e que as águas da bacia do Rio Doce, apesar de apresentarem graus de pertencimento consideráveis nas categorias média e ruim, também possuem significativa inserção na categoria boa. Mesmo assim, não se permite afirmar que as águas da bacia do Rio Doce estão próximas de sua condição pristina.

Ademais, a interpretação desses complexos resultados é, ainda, inicial. Uma vez que a aplicação do método foi exitosa, cabe agora debruçar-se sobre a espacialidade e temporalidade dos dados. Tais respostas poderão indicar os principais problemas relacionados a qualidade da água na bacia do Rio Doce e criar um precedente para estudos futuros (por exemplo, com dados que abarquem o período após o rompimento da barragem de Fundão) que visem medir a “distância” das águas da bacia do Rio Doce de sua condição original. Atualmente, estudar o grau de naturalização da bacia do Rio Doce ganha mais importância, vide o crime ambiental promovido pela Samarco, que atingiu de forma drástica seu principal rio e conseqüentemente a população que depende de sua água. Assim, estudar o quão natural o Rio Doce é, possibilita uma interpretação de quão distante hoje ele está de sua condição original, contribuindo de certa forma, com a sua recuperação e das partes afetadas na bacia.

Diante disso, estudos posteriores poderão explorar com maior profundidade a evolução do grau de naturalização da água do Rio Doce num contexto pós desastre com base na metodologia desenvolvida neste estudo.

5. Apontamentos finais

- O GoM apresentou-se como um método eficaz no desenvolvimento de uma classificação para o grau de naturalização das águas da bacia do Rio Doce.
- Tendo em vista os graus de pertinência dos casos no perfil k3 (ruim), pode-se afirmar que, de um modo geral, as águas da bacia do Rio Doce estão distantes de sua condição pristina.
- Os parâmetros que mais se afastaram do ideal pelo método aplicado foram: Coliformes termotolerantes, oxigênio dissolvido e pH.
- O grau de naturalização das águas (obtido pelo método do GoM) apresenta resultados mais completos e abrangentes do que o IQA, porém, seriam mais dificilmente compreendidos pelo corpo técnico dos órgãos de gestão de recursos hídricos e pela população em geral.
- A definição da condição pristina de uma área é uma etapa-chave da metodologia. Idealmente, sugere-se que, em estudos futuros, a mesma seja obtida por dados primários.
- A interpretação espaço-temporal dos resultados pode fornecer informações de grande valia na compreensão dos problemas de degradação da qualidade das águas na bacia do Rio Doce.

Tabela 1: Matriz de resposta do modelo

Rótulo do caso	Número de amostras	Parâmetros de qualidade da água																												Grau de pertencimento								
		ALU	ARS	BAR	BOR	CAD	CAL	CIA	CLO	CLL	COB	COL	COM	CRO	DBO	DUR	FER	FOS	MAG	NTA	NTI	NTO	NOR	OXO	PHL	POT	SEL	SOD	SOL	SUB	SUA	SUE	TUR	ZIN	K1	K2	K3	
1	2	1	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,909	0,091	0,000
2	2	1	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	2	1	0,818	0,182	0,000		
3	2	1	2	1	1	2	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	2	1	0,788	0,212	0,000		
4	3	1	2	1	1	2	1	1	1	1	1	2	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	2	1	0,758	0,242	0,000		
5	4	1	2	1	1	2	1	1	1	1	1	2	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	2	1	2	1	1	1	1	1	2	1	0,727	0,273	0,000		
6	14	1	2	1	1	2	1	1	1	1	1	2	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	2	1	2	1	1	1	1	2	2	1	0,697	0,303	0,000		
7	34	1	2	1	1	2	1	1	1	1	1	2	2	1	1	2	1	1	2	1	1	1	2	2	1	2	1	1	1	1	2	2	1	0,667	0,333	0,000		
8	135	1	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2	1	1	2	1	1	2	1	1	1	2	2	1	2	1	1	1	1	2	2	1	0,636	0,364	0,000		
9	31	1	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2	1	1	2	1	1	1	2	2	2	2	1	2	1	1	1	1	1	2	2	1	0,606	0,394	0,000		
10	15	1	2	1	1	2	2	1	1	1	1	3	2	1	1	2	1	1	2	1	1	1	2	2	1	2	1	1	1	1	2	2	1	0,605	0,364	0,030		
11	13	2	1	1	2	1	2	1	2	2	1	3	2	1	1	2	1	2	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	2	2	1	0,576	0,394	0,030		
12	4	2	1	1	2	1	2	1	2	2	1	3	2	1	1	2	1	2	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	2	2	3	0,546	0,394	0,061		
13	113	2	1	1	2	1	2	1	2	2	1	3	2	1	1	2	1	2	1	1	1	1	2	3	3	1	1	1	2	1	1	2	2	1	0,546	0,363	0,091	
14	85	2	1	1	2	1	2	1	2	2	1	3	2	1	1	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1	2	2	1	0,544	0,425	0,030		
15	14	2	1	1	2	1	2	1	2	2	1	3	2	1	1	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	2	1	1	2	2	1	0,516	0,454	0,030	
16	50	2	1	1	2	1	2	1	2	2	1	3	2	1	1	2	2	2	1	1	1	1	2	3	2	1	1	1	2	1	1	2	2	1	0,516	0,423	0,061	
17	53	2	1	1	2	1	2	1	2	2	1	3	2	1	1	2	2	2	1	1	1	1	2	3	3	1	1	1	2	1	1	2	2	1	0,515	0,395	0,091	
18	35	2	1	1	2	1	2	1	2	2	1	3	2	1	1	2	2	2	1	1	2	1	2	2	2	1	1	1	1	1	2	2	1	0,516	0,454	0,030		
19	9	2	1	1	2	1	2	1	2	2	1	3	2	1	1	2	2	2	1	1	3	1	2	2	2	1	1	1	1	1	2	2	1	0,515	0,424	0,061		
20	8	2	1	1	2	1	2	1	2	2	1	3	2	1	1	2	3	2	1	1	1	1	2	3	3	1	1	1	2	1	1	2	2	1	0,515	0,364	0,121	
21	243	2	1	1	2	1	2	1	2	2	1	3	2	1	2	2	1	2	1	1	1	1	2	3	3	1	1	1	2	1	1	2	2	1	0,515	0,395	0,091	
22	28	2	1	1	2	1	2	1	2	2	1	3	2	1	2	2	1	2	1	1	1	2	2	3	3	1	1	1	2	1	1	2	2	1	0,484	0,425	0,091	
23	11	2	1	1	2	1	2	1	2	2	1	3	2	1	2	2	1	2	1	1	1	2	2	3	3	1	1	1	3	1	1	2	2	1	0,485	0,394	0,121	
23	11	2	1	1	2	1	2	1	2	2	1	3	2	1	2	2	1	2	1	1	1	2	2	3	3	1	1	1	3	1	1	2	2	1	0,485	0,394	0,121	
25	1	2	1	1	2	1	2	1	2	2	1	3	3	1	2	2	1	2	1	1	1	2	2	3	3	1	1	1	3	1	1	2	2	1	0,485	0,364	0,152	
26	6	2	1	1	2	1	2	1	2	2	1	3	3	1	2	2	1	3	1	1	1	2	2	3	3	1	1	1	2	1	1	2	2	1	0,485	0,364	0,151	
27	2	2	1	1	2	1	2	1	3	2	1	3	3	1	2	2	1	2	1	1	1	2	2	3	3	1	1	1	2	1	1	2	2	1	0,485	0,364	0,151	
28	4	2	1	1	2	1	2	1	3	2	1	3	3	1	2	2	1	2	1	1	1	3	2	3	3	1	1	1	2	1	1	2	2	1	0,485	0,334	0,182	
29	1	2	1	1	2	1	2	1	3	2	1	3	3	1	2	2	1	2	1	3	1	3	2	3	3	1	1	1	2	1	1	2	3	1	0,455	0,303	0,242	
30	4	2	1	1	2	1	2	1	3	2	1	3	3	1	3	2	1	2	1	1	1	3	2	3	3	1	1	1	2	1	1	2	2	1	0,485	0,303	0,212	
31	2	2	1	1	2	1	2	1	3	2	1	3	3	1	3	2	1	2	1	2	1	3	2	3	3	1	1	1	2	1	1	2	2	1	0,455	0,333	0,212	
32	2	2	1	1	2	1	2	1	3	2	1	3	3	1	3	2	1	2	1	2	1	3	2	3	3	1	1	1	2	1	1	2	3	1	0,454	0,303	0,243	
33	38	2	1	1	2	2	1	2	2	1	3	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	2	1	2	2	1	0,545	0,424	0,030		
34	1	2	1	1	2	2	2	1	2	2	1	3	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	3	2	2	1	1	1	2	1	2	2	1	0,546	0,394	0,061		
35	29	2	1	1	2	2	2	1	2	2	2	3	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1	2	2	1	0,546	0,424	0,030		
36	6	2	1	1	2	2	2	1	2	2	2	3	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1	2	2	2	0,515	0,455	0,030		

Tabela 1: Matriz de resposta do modelo (cont.)

Rótulo do Número de caso	amostras	Parâmetros de qualidade da água																							Grau de pertencimento												
		ALU	ARS	BAR	BOR	CAD	CAL	CIA	CLO	CLL	COB	COL	COM	CRO	DBO	DUR	FER	FOS	MAG	NTA	NTI	NTO	NOR	OXO	PHL	POT	SEL	SOD	SOL	SUB	SUA	SUE	TUR	ZIN	K1	K2	K3
37	5	2	1	1	2	2	2	1	2	2	2	2	3	2	1	1	2	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	3	1	2	2	1	0,515	0,425	0,061	
38	26	2	1	1	2	2	2	1	2	2	2	3	2	1	1	2	1	2	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	0,485	0,485	0,030
39	26	2	1	1	2	2	2	1	2	2	2	3	2	1	1	2	1	2	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	0,485	0,455	0,061
40	1	2	1	1	2	3	2	1	2	2	1	3	2	1	1	2	1	2	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	0,516	0,424	0,061
41	4	2	1	1	2	3	2	1	2	2	3	3	2	1	1	2	1	2	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	0,484	0,425	0,091
42	2	2	1	1	2	3	2	1	2	2	3	3	2	1	1	2	1	2	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1	1	3	2	2	0,485	0,394	0,121
43	105	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	3	2	1	1	2	1	1	2	1	1	1	2	2	2	1	2	1	1	1	1	2	2	1	0,576	0,393	0,030
43	105	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	3	2	1	1	2	1	1	2	1	1	1	2	2	2	1	2	1	1	1	1	2	2	1	0,576	0,393	0,030
44	184	2	2	1	1	2	2	1	1	2	1	3	2	1	1	2	1	1	2	1	1	1	2	2	2	1	2	1	1	1	1	2	2	1	0,548	0,421	0,031
45	145	2	2	1	2	2	2	1	1	2	1	3	2	1	1	2	1	1	2	1	1	1	2	2	2	1	2	1	1	1	1	2	2	1	0,515	0,455	0,030
46	82	2	2	1	2	2	2	1	1	2	1	3	2	1	1	2	1	1	2	1	1	1	2	2	2	1	2	2	1	1	1	2	2	1	0,485	0,485	0,030
47	87	2	2	1	2	2	2	1	2	2	1	3	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	2	1	2	2	1	0,515	0,455	0,030
48	1	2	2	1	2	2	2	1	2	2	1	3	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	0,484	0,486	0,030
49	6	2	2	1	2	2	2	1	2	2	1	3	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	2	3	2	2	1	0,485	0,455	0,061
50	16	2	2	1	2	2	2	1	2	2	1	3	2	2	1	2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	2	1	2	2	1	0,486	0,484	0,030
51	1	2	2	1	2	2	2	1	2	2	1	3	2	3	1	2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	2	1	2	2	1	0,485	0,455	0,061
52	6	2	2	1	2	2	2	1	2	3	1	3	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	2	1	2	2	1	0,515	0,424	0,061
53	5	2	2	1	2	2	2	2	1	2	1	3	2	1	1	2	1	1	2	1	1	1	2	2	2	1	2	1	1	1	1	2	2	1	0,484	0,486	0,030
54	1	2	2	1	2	2	2	3	1	2	1	3	2	1	1	2	1	1	2	1	1	1	2	2	2	1	2	1	1	1	1	2	2	1	0,485	0,454	0,061
55	1	2	2	1	3	2	2	1	1	2	1	3	2	1	1	2	1	1	2	1	1	1	2	2	2	1	2	1	1	1	1	2	2	1	0,515	0,424	0,061
56	33	2	2	2	2	2	2	1	1	2	1	3	2	1	1	2	1	1	2	1	1	1	2	2	2	1	2	2	1	1	1	2	2	1	0,457	0,513	0,030
57	30	2	2	2	2	2	2	1	1	2	1	3	2	1	1	2	1	1	2	1	1	1	2	2	2	1	2	2	1	2	1	2	2	1	0,424	0,546	0,030
58	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2	1	3	2	1	1	2	1	1	2	1	1	1	2	2	2	1	2	2	1	2	2	2	2	1	0,394	0,576	0,030
59	10	2	2	2	2	2	2	1	1	2	1	3	2	1	1	2	1	1	2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	1	0,364	0,605	0,030
60	4	2	2	2	2	2	2	1	2	2	1	3	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	1	0,425	0,545	0,030
61	8	2	2	2	2	2	2	1	2	2	1	3	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	3	1	2	2	2	2	1	0,424	0,515	0,061
62	13	2	2	2	2	2	2	1	2	2	1	3	2	1	1	2	1	1	2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	1	0,334	0,636	0,030
63	6	2	2	2	2	2	2	1	2	2	1	3	2	1	1	3	1	1	2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	1	0,333	0,607	0,061
64	3	2	2	2	2	3	1	2	2	1	3	2	1	1	3	1	1	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	1	0,334	0,575	0,091	
65	10	2	2	2	2	2	3	1	2	2	1	3	2	1	1	3	1	1	2	1	1	1	2	2	2	3	2	2	1	2	2	2	2	1	0,334	0,545	0,121
66	2	2	2	2	2	3	1	2	2	1	3	2	1	1	3	1	1	3	1	1	1	1	2	2	2	1	1	2	1	2	2	2	2	1	0,394	0,485	0,121
67	1	2	2	2	2	2	3	1	2	2	1	3	2	1	1	3	1	1	3	1	1	1	2	2	2	3	2	2	1	2	2	2	2	1	0,334	0,515	0,151
68	1	2	2	2	2	2	3	1	2	2	1	3	2	1	1	3	1	1	3	1	1	1	2	2	2	3	3	2	1	2	2	2	2	1	0,333	0,485	0,182
69	2	2	2	3	2	2	2	1	2	2	1	3	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	3	1	2	2	2	2	1	0,425	0,484	0,091
70	4	2	3	1	2	2	2	1	2	2	1	3	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	2	1	2	2	1	0,515	0,424	0,061
71	1	2	3	1	2	2	2	1	2	2	1	3	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	3	2	2	1	1	1	1	2	1	2	2	1	0,516	0,393	0,091
72	1	3	2	1	1	2	2	1	1	2	1	3	2	1	1	2	1	1	2	1	1	1	2	2	2	1	2	1	1	1	1	2	2	1	0,546	0,394	0,061

Fonte: Output do programa Gom 3.4. Observações: i) Rótulos dos parâmetros de qualidade: 1-bom; 2-médio; 3-ruim ii) Valores dos graus de pertencimento significam a probabilidade de inserção em cada classe respectivamente.

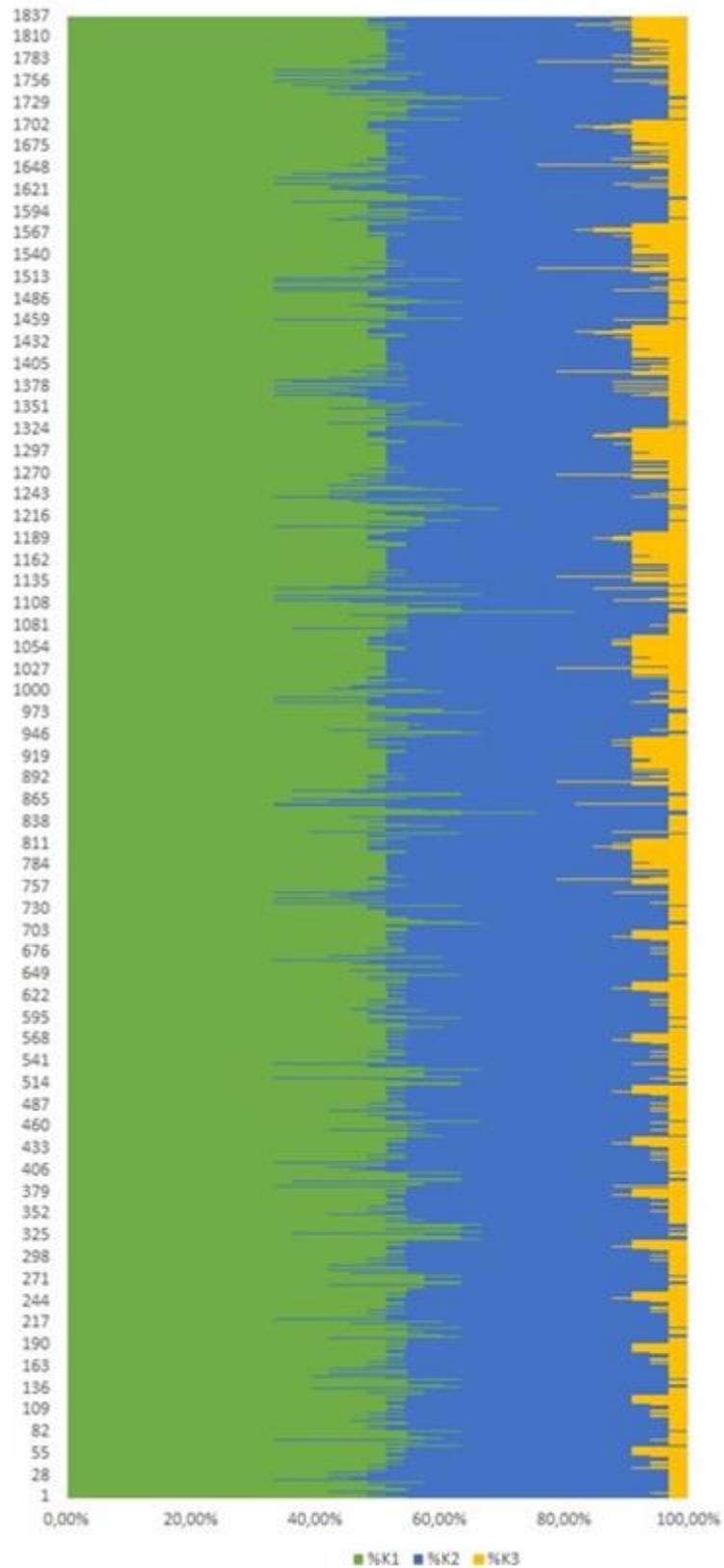


Gráfico 1 - Grau de pertencimento (%) de cada elemento (amostra) em relação aos perfis (k1, k2, k3)
Fonte: Elaborado pelos autores

Notas de Fim

[1] O termo “naturalização” é aqui utilizado em consonância à literatura especializada referindo-se ao estado da água sem quaisquer alterações por parte dos seres humanos. Assim, não se evocam conotações relativas ao conceito de “natureza” dentro da ciência geográfica.

[2] A utilização de um sistema de referência relativo a condições pristinas é um ponto fraco desta abordagem, pois não existe um estado de referência único dado que as comunidades biológicas são naturalmente muito variáveis.

[3] Buscou-se na literatura valores ideais para cada parâmetro em águas subterrâneas de domínios hidrogeológicos quimicamente similares aos da bacia do Rio Doce. Foram utilizados como embasamento teórico os trabalhos de Von Sperling (1995), Lopes (2005), a curva de IQA disponibilizada pela ANA e a Resolução CONAMA 357.

[4] A mineradora Samarco é controlada pela Vale e pela companhia anglo-australiana BHP Billiton, atuando desde 1977 na produção de minério de ferro para produção de aço, com empreendimentos nos estados de Minas Gerais e Espírito Santo (Felippe *et al.* 2016).

REFERÊNCIAS

Almeida, MAB; Schwarzbald A. 2003. Avaliação Sazonal da Qualidade das Águas do Arroio da Cria Montenegro, RS com Aplicação de um Índice de Qualidade de Água (IQA). Artigo publicado RBRH - *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 8 (1): 81–97.

Alves LC, Leite IC, Machado CJ. 2008. Perfis de saúde dos idosos no Brasil: análise da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios de 2003 utilizando o método Grade of Membership. *Cad. Saúde Pública* 24 (3): 535-546.

Barcellos CM, Rocha M, Rodrigues LS, Costa CC, Oliveira PR, Silva IJ, Rolim RG. 2006. Avaliação da qualidade da água e percepção higiênico-sanitária na área rural de Lavras, Minas Gerais, Brasil, 1999-2000. *Cad. Saúde Pública* 22 (9): 1967-1978.

Cerqueira CA. 2004. *Tipologia e características dos estabelecimentos escolares brasileiros*. Tese (doutorado). Universidade Federal de Minas Gerais.

Coelho ALN. 2007. *Alterações Hidrogeomorfológicas no Médio-Baixo Rio Doce/ES*. 227f. Tese de Doutorado (Universidade Federal Fluminense, Instituto de Geociências, Departamento de Geografia), Niterói.

Coelho ALN. 2006. Situação hídricogeomorfológica da bacia do rio Doce com base nos dados da série histórica de vazões da estação de Colatina – ES. *Caminhos de Geografia* 6 (19): 56-79.

Felippe MF. 2009. *Caracterização e tipologia de nascentes em unidades de conservação de Belo Horizonte com base em variáveis geomorfológicas, hidrológicas e ambientais*. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais.

Felippe MF, Junior APM, Mendes LC, Cota GEMC, Carneiro PS, Contijo BM. 2016. Conexões geo-históricas e contemporâneas entre ocupação territorial, degradação

ambiental e rarefação hídrica na Bacia do Rio Doce. *Revista Geografias - Edição Especial - Vale do Rio Doce: formação geo-histórica e questões atuais*.

Felippe MF, Costa A, Franco R, Matos R. 2016. A Tragédia Do Rio Doce: A Lama, O Povo e a Água. Relatório de Campo e Interpretações Preliminares Sobre as Consequências do Rompimento da Barragem de Rejeitos de Fundão (Samarco/Vale/BHP). *Revista Geografias - Edição Especial - Vale do Rio Doce: formação geo-histórica e questões atuais*.

Felippe MF, Magalhães Junior AP. 2014. Desenvolvimento de uma tipologia hidrogeomorfológica de nascentes baseada em estatística nebulosa multivariada. *Revista Brasileira de Geomorfologia* 15 (3).

Felippe MF, Magalhães Junior AP, Garcia RA. 2013. Tipologia e classificação das zonas preferenciais de recarga de aquíferos em Belo Horizonte MG - Aplicação do método grade of membership (GoM). *Boletim de Geografia* 31 (2).

Gonçalves V, Raposeiro P, Marques H, Costa AC, Cymbron R, Pacheco D, Medeiros M. 2007. Definição e caracterização de ecótipos para as massas de água interiores de superfície do Arquipélago dos Açores. Técnicas y Métodos para la Gestión Sostenible del Agua en la Macaronesia II.

Lopes AV. 2005. *Caracterização da água química das águas subterrâneas do aquífero fissural do Município de Igaraci-PE*. Dissertação apresentada a Pós-graduação em Geociências da Universidade Federal de Pernambuco. Recife.

Manoel Filho J, Feitosa FAC. 2000. *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. Coord. Obra Fernando AC.

Manton K, Woodbury M, Tolley D. 1994 *Statistical applications using fuzzy sets*. [s.l.]: Wiley.

Merten GH, Minella JP. 2002. *Qualidade da água em bacias hidrográficas rurais: um desafio atual para a sobrevivência futura*.

Moretto DL. 2011. *Calibração do índice de qualidade da água (IQA) para bacia hidrográfica do Rio Pardo, RS, BRASIL*. Dissertação (Mestrado), Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC.

Porto-Gonçalves CW. 2006. *A globalização da natureza e a natureza da globalização*. Rio de Janeiro: Civilização brasileira.

PIRH - *Plano integrado de recursos hídricos da Bacia do Rio Doce*. Disponível em: http://www.cbhdoce.org.br/wp-content/uploads/2014/10/PIRH_Doce_Volume_I.pdf

Troppmair H. 1987. *Biogeografia e meio ambiente*. Graff Set.

Von Sperling M. 1995. *Introdução a qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. 2 ed. Belo Horizonte. Departamento de Engenharia sanitária da Universidade Federal de Minas Gerais.

Zadeh LA. 1965. Fuzzy sets. *Information and control* 8 (3): 338-353.

Assessing the naturalization degree of water in the Doce River through Grade of Membership (GoM)

Mirella Nazareth de Moura ¹

Miguel Fernandes Felipe²

¹ Geographer (UFJF). Undergraduate student in Languages - English (UNIDERP – Anhanguera).

² Geographer (IGC-UFMG). Masters in Geography (IGC-UFMG). Doctorate in Geography (IGC-UFMG). Professor at UFJF.

Abstract Water quality is an extremely important topic to many scientific fields and also to the environmental management. Therefore, working with new paths to address the water quality is as challenging as relevant. The regular approach to the theme is the WQI, a worldwide-recognized model that integrates nine parameters. Although, the hardness of the WQI lead to gaps of interpretation. Assuming that the fuzzy logic can be an in-depth tool to reach the complexity of water quality, this work brings a methodological proposal to use the Grade of Membership method to measure the naturalization of water. This algorithm can indicate how closer any water sample is to a given pristine pattern. It was used 16 years of physical, chemical and biological parameters of water, sampled by trimester in 99 stations along the Doce River watershed. The results show that all samples are far from their pristine condition. Besides, almost all cases have some grade of membership to the three classes (good, medium and bad). The model was successfully applied, promoting a classification of the degree of naturalization of water. Furthermore, the fuzzy logic allows discussing the data beyond the classes, pointing the farther parameters to its pristine condition and guiding to a more efficient water and environmental management.

Key words: water quality, naturalization, GoM, classification.

Informações sobre os autores

Mirella Nazareth de Moura

Endereço para correspondência: ICH/UFJF, Departamento de Geociências. Rua José Lourenço Kelmer, s/n - Campus Universitário. São Pedro. CEP: 36036-900 - Juiz de Fora, MG – Brasil.

E-mail: mirellanm92@hotmail.com

Link para o currículo lattes: <http://lattes.cnpq.br/8116152806903941>

Miguel Fernandes Felipe

Endereço para correspondência: ICH/UFJF, Departamento de Geociências. Rua José Lourenço Kelmer, s/n - Campus Universitário. São Pedro. CEP: 36036-900 - Juiz de Fora, MG – Brasil.

E-mail: miguel.felippe@ufjf.edu.br

Link para o currículo lattes: <http://lattes.cnpq.br/3591101019508810>

Artigo Recebido em: 03-08-2015

Artigo Aprovado em: 02-12-2015