



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

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



Avaliação do Risco de Contaminação de Recursos Hídricos por Postos de Combustíveis na Bacia do Rio Piracicaba - MG

Carolina Barcelos Silva de Andrade¹, José Augusto Costa Gonçalves²

¹Mestra do Programa de Pós-graduação em Regulação e Gestão de Recursos Hídricos (PROFÁGUA), Universidade Federal de Itajubá-UNIFEI, Itabira, MG. ²Professor Associado do Instituto de Ciências Puras e Aplicadas da Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, Rua Irmã Ivone Drumond, 200 - Distrito Industrial II, Itabira - MG, 35903-087.

E-mail: jaucoستا@unifei.edu.br (Autor Correspondente)

Artigo recebido em 26/02/2023 e aceito em 13/06/2023

RESUMO

A água contaminada é considerada um problema de saúde pública por expor a população a substâncias que causam doenças crônicas e até a morte. Uma fonte de contaminação são as atividades que utilizam combustíveis fósseis, liberando no ambiente os hidrocarbonetos de petróleo (HP), sendo que o ecossistema aquático é considerado um dos destinos desses contaminantes. O objetivo dessa pesquisa é avaliar a potencialidade das contaminações dos recursos hídricos da bacia do Rio Piracicaba em Minas Gerais, por atividades de armazenamento e de distribuição de combustíveis em postos. O desenvolvimento do trabalho foi possível a partir de dados obtidos de licenciamentos ambientais e localização dos postos ou pontos de abastecimento, instalações de sistemas retalhistas e postos revendedores de combustíveis através de relatórios da Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos no período de 2014 a 2020, bem como as informações sobre áreas contaminadas por HP disponibilizados no inventário anual de áreas contaminadas da Fundação Estadual do Meio Ambiente. Para avaliar se havia sobreposição das áreas de contaminação por postos de combustíveis com os locais de captação de água para consumo humano, foram definidos Raios Arbitrários Fixos (RAF), considerando a Zona de Influência (40 metros), Zona de Transporte (150 metros), Zona de Contribuição de baixa e média vulnerabilidade (300 metros) e Zona de Contribuição de alta vulnerabilidade (500 metros). Na bacia do Rio Piracicaba, as captações de água próximas das áreas contaminadas por HP e próximas aos postos de combustíveis, foi constatado o risco potencial de possível contaminação dos recursos hídricos.

Palavras-chave: hidrocarbonetos de petróleo, águas subterrâneas, perímetros de proteção de poços.

Assessment of the Risk of Water Resources Contamination by Gas Stations in the Piracicaba River Basin - MG

ABSTRACT

W Contaminated water is considered a public health problem because it exposes the population to substances that cause chronic diseases and even death. One source of contamination are the activities that use fossil fuels, releasing into the environment petroleum hydrocarbons (HP), and the aquatic ecosystem is considered one of the destinations of these contaminants. The aim of this research is to evaluate the potentiality of the contamination of the hydric resources of the Piracicaba River basin in Minas Gerais, Brazil, by activities of storage and distribution of fuels in gas stations. The development of the work was possible from data obtained from environmental licensing and location of gas stations or supply points, retail systems facilities and fuel retail stations through reports of the Spatial Data Infrastructure of the State System of Environment and Water Resources in the period from 2014 to 2020, as well as the information on HP contaminated areas made available in the annual inventory of contaminated areas of the State Environmental Foundation. To assess whether there was overlap of the areas of contamination by gas stations with the water catchment sites for human consumption, Fixed Arbitrary Ranges (RAF) were defined, considering the Influence Zone (40 meters), Transport Zone (150 meters), Low and Medium Vulnerability Contribution Zone (300 meters) and High Vulnerability Contribution Zone (500 meters). In the Piracicaba River basin, water abstraction near areas contaminated by HP and near gas stations, the potential risk of possible contamination of water resources was found.

Keywords: petroleum hydrocarbons, groundwater, well protection perimeters.

Introdução

A Organização das Nações Unidas para a Água e Saneamento (UN-Water, 2018) ressalta que a água doce, em quantidade e qualidade suficientes, é fundamental em todos os aspectos da vida e do desenvolvimento sustentável (Houben et al., 2022; Barthel et al., 2021; Zhang et al., 2020). Essa mesma organização complementa que a Terra já reduziu 70% de suas zonas úmidas naturais ao longo do último século, o que gera perda e impacto significativo na fauna e flora dos ecossistemas de água doce e poderá impactar 45% do Produto Interno Bruto (PIB) mundial e 52% da população de todo o mundo estarão em risco até 2050.

Nesse contexto, (Hilpert et al., 2015), retratam os combustíveis fósseis como potencial contaminador dos recursos hídricos, podendo ser derramados acidentalmente, vazarem durante o armazenamento ou terem sua liberação sob a forma de vapor e atingindo águas superficiais, subterrâneas e o solo (EPA, 1996). O ecossistema aquático é considerado o destino dos Hidrocarbonetos de Petróleo (HP) e esses contaminantes geram resultados adversos à saúde de todos os organismos vivos do mundo, incluindo os seres humanos (Varjani, 2017; ATSDR, 2021; Lasagna et al., 2020; Pauloo et al., 2020; Fahrmeier et al., 2021).

Dentre os possíveis contaminantes HP, os hidrocarbonetos monoaromáticos - Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xilenos (BTEX) - são poluentes comuns encontrados em plumas de águas subterrâneas e em outros recursos hídricos (Mazzeo et al., 2010; EPA, 2013). Esses contaminantes são tóxicos e cancerígenos e podem ser liberados no ambiente durante a entrega, armazenamento e a distribuição dos combustíveis nos postos. Estudos têm identificado, também, a presença persistente de compostos BTEX no ar e o transporte desses compostos do ar para os corpos d'água como resultado das chuvas (Dutta et al., 2009; Zhang et al., 2012; Maier et al., 2022).

Os contaminantes BTEX são contaminantes com alto potencial para afetar a saúde humana e sua ingestão está associada a doenças crônicas e potencialmente fatais como câncer e lesões hepáticas, além da exposição a eles causar sonolência e irritação de órgãos (Zhang et al., 2012; Tunsaringkarn et al., 2012). Outros estudos relataram a presença de compostos BTEX na água potável, indicando extensos riscos à saúde que podem não ser imediatamente evidentes (Mitra e Roy, 2011; Reddy et al., 2012; WHO, 2011).

Apesar do risco à saúde pública que os contaminantes BTEX significam ao atingirem a água para consumo, eles não são o foco dos

levantamentos de contaminação dos recursos hídricos utilizados pelas populações humanas e nem das técnicas de tratamento e/ou remediação em função da dificuldade de identificação desses compostos na água (Fayemiwo et al., 2017; Espinosa, 2021). Além disso, eles podem ter variadas fontes de contaminação (El-Naas et al., 2014), sendo mais comum que os levantamentos de contaminantes foquem na identificação de hidrocarbonetos poliaromáticos (PAH) e relacionados a acidentes ambientais (Bojes e Pope, 2007). Sendo assim, nos levantamentos de dados de contaminação convencionais das bacias hidrográficas realizados por órgãos como o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) e a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2019) não incluem a avaliação da presença desses contaminantes (Gonçalves et al., 2020).

Lima et al., (2017) afirmam que o gerenciamento de áreas contaminadas por combustíveis fósseis se configura como um grande desafio ambiental para os órgãos reguladores, empreendedores e sociedade em geral, por considerar que o uso dessas áreas pode conferir riscos à saúde humana. Adicionalmente, áreas muito populosas com intenso consumo de combustível podem oferecer maior liberação desses compostos no meio ambiente e resultarem na diluição dos contaminantes para o meio aquoso, ocasionando maior exposição da população a efeitos adversos cumulativos difíceis de mensurar e identificar (Hilpert et al., 2015; Previati e Crosta, 2021).

O monitoramento dos recursos hídricos brasileiros tem revelado, cada vez mais, a degradação da qualidade da água nos grandes centros urbanos e nos açudes do Nordeste, prioritários para o controle da poluição hídrica e proteção de mananciais. No entanto, apesar das relevantes informações sobre a degradação desses recursos, alguns estados do país não realizam qualquer monitoramento de qualidade da água e onde há monitoramento, existem deficiências quanto à representatividade temporal e espacial (ANA, 2007). Desse modo, o conhecimento das demandas e da situação dos recursos hídricos brasileiros ainda se mostram como desafiadoras e preocupantes num momento em que as mudanças climáticas impactam a disponibilidade desse bem tão necessário ao ser humano e aos ecossistemas.

O monitoramento da qualidade da água é importante no sentido de apontar tendências e áreas prioritárias para o controle da poluição hídrica e o enquadramento de corpos hídricos em classes de qualidade segundo os usos preponderantes da água.

Para tal, a ANA considera o Índice de Qualidade das Águas (IQA), composto por nove parâmetros comumente utilizados em avaliações de qualidade de água: temperatura da água, pH, oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), coliformes termotolerantes, nitrogênio total, fósforo total, sólidos totais e turbidez.

Desse modo, as dificuldades técnicas de monitoramento dos compostos advindos do petróleo ficam evidentes quando analisamos os dados de áreas contaminadas no Estado de Minas Gerais, onde cerca de 73% correspondem a postos de combustíveis. O vazamento e a infiltração nos Sistemas de Armazenamento Subterrâneos de Combustíveis (SASCs) de postos de serviço é a principal fonte de contaminação, atingindo solo e águas subterrâneas (FEAM, 2020).

No caso da ocorrência de um passivo ambiental como o derramamento de combustíveis em sistemas de águas superficiais e subterrâneas, há uma necessidade cada vez maior de reabilitação dessas áreas, tanto para as populações locais quanto para a indústria (Chiu et al., 2017; Saari, 2009). Apesar disso, os acidentes com derramamento não são a única fonte desse tipo de contaminação. Considerando a complexidade da infraestrutura e logística associadas à cadeia produtiva do petróleo, são diversas as origens de áreas contaminadas por hidrocarbonetos, inclusive o transporte por caminhões ou dutos. Em escala local, quando se trata dos postos revendedores de combustíveis, a principal origem da contaminação é de vazamentos provenientes de Sistemas de Armazenamento Subterrâneo de Combustíveis - SASCs (Vivian, 2015; CETESB, 2020).

Os SASCs são compostos por tanques de armazenamento e tubulações subterrâneas, entre outros. Referente à normatização para o armazenamento, manuseio e transporte de óleos lubrificantes, a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 362 de 23 de junho de 2005, determina em seu artigo número 14, que as unidades de armazenamento usadas ou contaminadas devem ser construídas e mantidas de forma a evitar infiltrações, vazamentos, ataque pelo seu conteúdo, entre outros riscos associados, bem como, condições de segurança no seu manuseio, carregamento e descarregamento.

O número de postos revendedores autorizados vem crescendo, com aumento de 3% entre 2014 e 2019 (ANP, 2020). Até 2019 o país contava com 40.970 postos revendedores de combustíveis com autorização para o

funcionamento e, deste total, mais de 10 % estão localizados em Minas Gerais.

A definição sobre contaminação de uma área segundo a Resolução CONAMA nº420/2009 é considerada como a presença de substância(s) química(s) no ar, água ou solo, decorrentes de atividades antrópicas, em concentrações tais que restrinjam a utilização desse recurso ambiental para os usos atual ou pretendido, definidas com base em avaliação de risco à saúde humana, assim como aos bens a proteger, em cenário de exposição padronizado ou específico.

Neste contexto, (Carneiro et al., 2020) realizaram o levantamento das áreas contaminadas por compostos orgânicos na bacia hidrográfica do rio das Velhas (MG) e verificaram que os postos de combustíveis representaram a principal atividade econômica poluidora (94%), o que ocorreu por vazamento ou infiltração (98,7%) e houve a contaminação pelos BTEX. Ainda segundo o estudo, o número de áreas declaradas é baixo, em relação ao número de empreendimentos com potencial de causar contaminações (CETESB, 2016; Tong et al., 2021; Witt et al., 2021).

Apesar dos riscos dos compostos BTEX e demais HP para a saúde humana e deles não serem o foco dos levantamentos convencionais de contaminantes presentes na água para consumo humano (Fayemiwo et al., 2017; Wu et al., 2021; Lachassagne et al., 2021), a contaminação de poços de captação de água subterrânea por essas substâncias é relatada em vários estudos (Adewuyi e Olowu, 2012; Tongo et al., 2017; Forte et al., 2007; Anneser et al., 2008; Rodrigues, 2015; Riccardi et al., 2008; Marić et al., 2015; Moraes e Oliva, 2019; Faustorilla et al., 2017). Esses dados evidenciam a relevância de considerar a sua presença na água para abastecimento através das análises de qualidade realizadas pelos órgãos ambientais. As águas superficiais também são afetadas por esses contaminantes. Eles não estão presentes apenas no recurso hídrico utilizado para consumo humano, podendo estar nos sedimentos e presentes nos organismos vivos utilizados na alimentação humana, como peixes (Chiu et al., 2017; Asejeje et al., 2021), levando à circulação desses compostos tóxicos e carcinogênicos a todos os níveis das cadeias tróficas (Ajur e Mogheir, 2020; Naves et al., 2021; Adamson et al., 2021).

Na Resolução CONAMA 420/2009, encontram-se os Valores Orientadores para solos e para águas subterrâneas que se aplicam a uma série de substâncias químicas. O Valor de Referência de Qualidade (VRQ) é a concentração de determinada

substância que define a qualidade natural do solo, sendo determinado com base em interpretação estatística de análises físico-químicas de amostras de diversos tipos de solos. O Valor de Prevenção (VP) é a concentração de valor limite de determinada substância no solo e o Valor de Investigação (VI) é a concentração de determinada substância no solo ou na água subterrânea acima da qual existem riscos potenciais, diretos ou indiretos, à saúde humana, considerando um cenário de exposição padronizado (CETESB, 2018).

Dos mais de 100 HPA reconhecidos pela União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC), apenas 16 deles são considerados prioritários no monitoramento ambiental dos chamados Poluentes Orgânicos Persistentes (POP) pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA). Ao contrário dos BTEX que são bastante solúveis, os HPA, geralmente se encontram adsorvidos nas partículas sólidas do solo e/ ou sedimento, pois apresentam baixa solubilidade aquosa e alta hidrofobicidade (Bonilla et al., 2009; Chokor, 2021). Os valores orientadores para os diferentes HPA podem ser consultados em (CETESB, 2018).

A Resolução CONAMA nº 273, de 29 de novembro de 2000, que estabelece diretrizes para prevenção e controle da poluição, além de prever um detalhamento de estudos para o licenciamento convencional, deu início ao processo de licenciamento ambiental para postos revendedores, postos ou pontos de abastecimento, instalações de sistemas retalhistas, postos de combustíveis e postos revendedores de aviação. No estado de Minas Gerais, a aplicação dessa legislação se deu através da Deliberação Normativa do COPAM nº 50, de 28 de novembro de 2001. Esta DN foi alterada em 2007 pela DN COPAM nº 108, de 24 de maio de 2007, que incorporou diretrizes para a paralisação temporária das atividades, investigação de passivo ambiental e encerramento das atividades.

A DN nº 74, de 9 de setembro de 2004 do COPAM determina, a nível estadual, critérios de acordo com o porte e com o potencial poluidor dos empreendimentos passíveis de autorização ambiental de funcionamento ou de licenciamento ambiental (FEAM, 2018). O porte do empreendimento também é determinado com base no tipo de atividade e características específicas do empreendimento como, por exemplo, área construída, capacidade de armazenamento e outros, e é dada na também escala para pequeno (P), médio (M) ou grande (G). Os empreendimentos

enquadrados nas classes 1 e 2, potenciais causadores de impactos ambientais não significativos, estão sujeitos à Autorização Ambiental de Funcionamento (AAF). Os empreendimentos enquadrados nas classes 3 a 6, potenciais causadores de impactos ambientais significativos, estão sujeitos ao licenciamento ordinário e, portanto, devem ser submetidos às fases de Licença Prévia (LP), Licença de Instalação (LI) e Licença de Operação (LO).

A água subterrânea é cada vez mais utilizada nos sistemas de abastecimento das cidades e é susceptível à contaminação por compostos BTEX que infiltram e se dispersam no solo através da própria força de gravidade ou pela ação da lixiviação (Moraes et al., 2013, ANA, 2007; Zheng et al., 2023; Stigter et al., 2023). Esses compostos presentes na água subterrânea e no solo podem atingir, também, águas fluviais e, dessa forma, representam importante fonte de contaminação hídrica (Mitra e Roy, 2011; Reddy et al., 2012).

Desse modo, é imperativo que seja avaliada a possível correlação espacial entre postos de combustíveis, dados sobre áreas contaminadas por compostos de petróleo e os locais de captação de água para consumo humano nas bacias hidrográficas brasileiras. As implicações para a saúde humana e do ecossistema aquático são extremamente relevantes nesse contexto (CETESB, 2001).

Portanto, este trabalho apresenta relevância ao avaliar as informações sobre a contaminação por derivados do petróleo nos recursos hídricos localizados na bacia do rio Piracicaba, que possui expressiva atividade econômica e concentração urbana. Consequentemente, os resultados deste estudo poderão subsidiar informações para tomada de decisão dos comitês da bacia, prefeituras municipais, e outros atores interessados na busca pela garantia da segurança hídrica para a região.

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a potencialidade da contaminação ambiental por postos de combustíveis às captações outorgadas de águas superficiais e subterrâneas para consumo humano, investigando as áreas no entorno dos postos de combustíveis quanto à presença de substâncias produzidas a partir dos hidrocarbonetos de petróleo.

Material e métodos

A bacia do Rio Piracicaba, também denominada administrativamente por Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos do Rio Piracicaba (CH DO2), está inserida totalmente no estado de Minas Gerais (Figura 1). Com área de drenagem de 5.465,38 km² e por uma área incremental a jusante da foz deste rio com 216,13 km², totalizando 5.681 km² de área de drenagem. O rio Piracicaba nasce no município de Ouro Preto, a

1.680 m de altitude, possui extensão de 241 km e seus principais afluentes são o Rio do Peixe, Rio Santa Bárbara e Rio da Prata. O Rio Piracicaba também recebe a descarga de dezenas de ribeirões e córregos durante o seu percurso, que contribuem para a sua rede de drenagem (Consórcio Ecoplan-Lume, 2010).

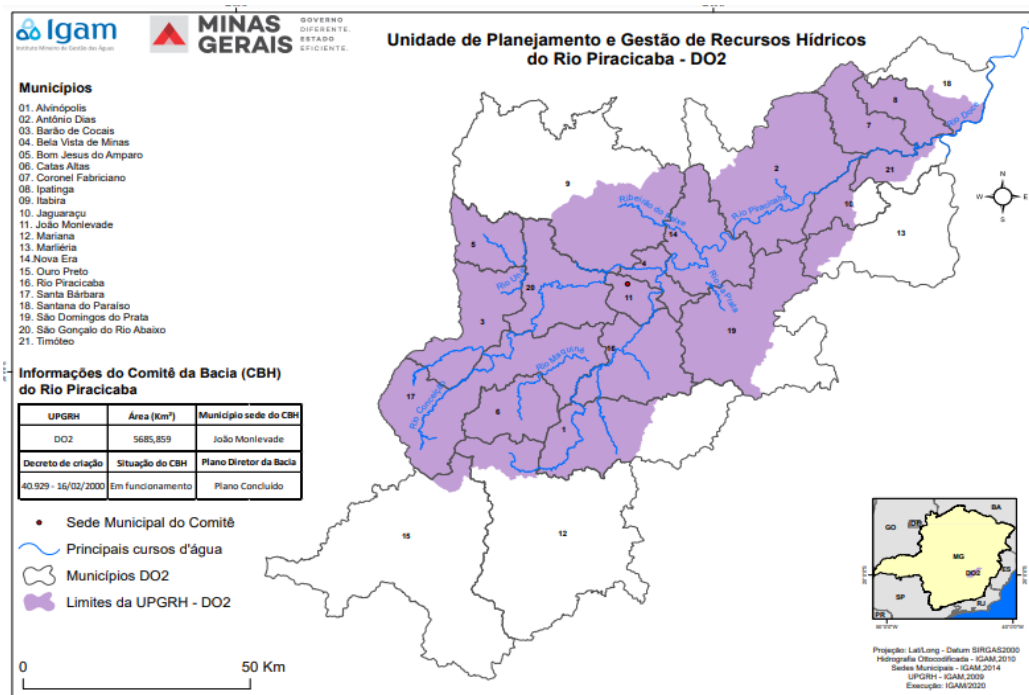


Figura 1. Bacia Hidrográfica do Rio Piracicaba. Fonte: Modificado de IGAM (2010).

A pesquisa é de caráter documental, concentrada na análise de dados técnicos oriundos dos relatórios, no período de 2014 a 2020 (FEAM, 2018), referente às áreas contaminadas por postos de combustíveis na bacia do Rio Piracicaba. A localização dos postos de combustíveis foi considerada como área de risco potencial de contaminação. Desta forma, foram elaborados mapas e análises para avaliação do risco de contaminação por derivados do petróleo das captações outorgadas de água para consumo humano no entorno dos postos de combustíveis. Os dados coletados (2014-2020) foram processados em planilhas Excel e através do software ArcGis 10.1. Dados de postos de combustíveis licenciados foram obtidos através da plataforma do governo estadual Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IDE-Sisema, 2021), extraindo-se as

informações a respeito dos empreendimentos classificados como “Postos revendedores, postos ou pontos de abastecimento, instalações de sistemas retalhistas, postos flutuantes de combustíveis e postos revendedores de combustíveis de aviação”.

Os usos consuntivos de recursos hídricos de uma bacia são conhecidos por meio do banco de dados das outorgas e cadastros de usos insignificantes de captação concedidas pelo órgão ambiental competente, neste caso do estado de Minas Gerais, o IGAM. Para avaliar a dimensão das captações outorgadas que estão na área amostral, optou-se por considerar a média de consumo *per capita* em Minas Gerais como um padrão para a interpretação dos dados encontrados. Os dados mais recentes indicam um consumo *per capita* de 159,8 litros/habitante/dia (SNSI, 2021). Aplicando-se o padrão médio de 4

pessoas/residência, a estimativa é que uma captação outorgada seja suficiente para abastecimento de uma residência com um consumo diário médio próximo de 1 m³. A partir disso, estipulou-se 3 classes de captação diária: até 1 m³/dia, de 1,01 m³ a 10 m³/dia e acima de 10 m³/dia.

Delimitação de Perímetros de Proteção de Fontes de Água para Consumo Humano

A Política Estadual de Recursos Hídricos de Minas Gerais, instituída pela Lei 13.199 de janeiro de 1999 (IGAM, 2010) determina a necessidade de serem determinadas áreas de proteção e conservação dos recursos hídricos do estado, embora não seja determinada nessa lei as áreas dos perímetros de proteção.

A portaria do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) N° 231 de julho de 1998 define que as áreas ou perímetros de proteção de poços ou mananciais utilizados pela indústria das águas minerais, deverão ser conceituadas três diferentes zonas segundo suas características hidráulicas: a ZI ou zona de influência; a ZC ou zona de contribuição e a ZT, zona de transporte (DNPM, 1998):

- i) A zona de influência (ZI) é aquela associada ao cone de depressão (rebaixamento da superfície potenciométrica) de um poço em bombeamento ou de uma fonte ou nascente natural, considerado aqui como um afloramento da superfície piezométrica ou freática, equivalente a um dreno.
- ii) A zona de contribuição (ZC) é a área de recarga associada ao ponto de captação (fonte ou poço), delimitada pelas linhas de fluxo que convergem a este ponto.
- iii) A zona de transporte (ZT) ou de captura é aquela entre a área de recarga e o ponto de captação. É esta zona que determina o tempo de trânsito que um contaminante leva para atingir um ponto de captação, desde a área de recarga. Em geral, este tempo depende da distância do percurso ou fluxo subterrâneo, das características hidráulicas do meio aquífero e dos gradientes hidráulicos.

Desse modo, na ausência de estudos mais detalhados ou na impossibilidade de proteger totalmente o perímetro em torno da fonte hídrica, pode ser útil a definição de raios previamente delimitados para as ZI, ZC e a ZT, os chamados Raios Arbitrários Fixos (RAF).

Para determinação de valores de perímetro de RAF para as ZI, ZC e a ZT de forma a simplificar uma metodologia generalista, aplicável

a outras bacias hidrográficas e de baixo custo, considerou-se estudos brasileiros que obtiveram Raio Calculado Fixo (RCF). Essa metodologia de RCF leva em consideração o conceito de tempo de trânsito até a captação, que indica qual a distância necessária para o contaminante alcançar o poço em um determinado tempo (Medeiros, 2018).

Segundo Foster et al., (2003), a definição do RCF é medida por meio de uma equação volumétrica, em que são necessários dados de vazões de bombeamento, comprimento da seção filtrante (screened-interval), porosidade do aquífero e o tempo de trânsito selecionado. A Equação (1) aplicada para a definição do raio é:

$$r_{min} = FS \sqrt{\frac{Q.t}{n.H.\pi}} \text{ Eq. 1}$$

Onde r_{min} = raio do perímetro de proteção para as zonas 2 e 3 (metros); Q = Volume anual médio de bombeamento (m³/ano); t= tempo de trânsito, que de acordo com o documento de Diretrizes de Proteção de Poços da EPA, é de 2 anos para zona 2 e 5 anos para zona 3; n= porosidade do aquífero; H = seção filtrante de bombeamento da água do aquífero; $\pi = 3.1416$; FS = fator de segurança, que é de 1,3 quando todos os valores são conhecidos e de 1,5 quando um ou mais valores não são conhecidos.

Para realizar a aplicação do RAF a partir do trabalho de Medeiros (2018), optou-se por proceder a criação das circunferências de raio fixo, nomeadas aqui como *buffers* em torno da localização das áreas contaminadas no período amostral e não dos pontos de captação de água, já que o objetivo é avaliar o potencial que os empreendimentos têm de contaminar o ambiente e, a partir disso, o potencial dos contaminantes dispersarem e ameaçarem a potabilidade da água para consumo humano. Assim, nessa metodologia, propõe-se avaliar se há recursos hídricos e pontos de captação de água no entorno de áreas contaminadas por HP (FEAM 2018) e, também, dos empreendimentos de venda e distribuição de derivados do petróleo.

Para definição do risco de ocorrência de contaminação dos recursos hídricos, foram utilizados dados de captações outorgadas ou não, no entorno dos “Postos revendedores, postos ou pontos de abastecimento, instalações de sistemas retalhistas, postos flutuantes de combustíveis e postos revendedores de combustíveis de aviação” adotando os 4 raios de amostragem (40, 150, 300 e 500 metros). Considerando as áreas já contaminadas, foi elaborada a mesma metodologia

amostral, inserindo os 4 RAF's em torno da localização das áreas contaminadas por HP do período de 2014 a 2020 (FEAM, 2018) e avaliada a existência de captações outorgadas.

Para obtenção desses dados de presença e ausência das outorgas nas áreas de risco de contaminação, foi utilizado o *software* Arcgis 10.0, sobrepondo-se os mapas de delineamento da bacia obtidos na plataforma IDE-Sisema (código do arquivo MG_bacias_hidrograficas_estaduais), o mapa de coordenadas geográficas dos empreendimentos (código do arquivo ide_2101_mg_historico_empreendi_lic_2013_2019_pto) e as coordenadas geográficas das áreas contaminadas obtidas a partir dos Inventários Anuais de Áreas Contaminadas da FEAM.

Em torno das áreas contaminadas e dos empreendimentos, foram aplicados os 4 *buffers* e definindo se havia sobreposição das circunferências sobre a localização das outorgas da água para consumo humano, identificando captações superficiais e de água subterrânea.

Para avaliar se havia presença de corpos d'água superficiais nos limites dos *buffers* das

áreas contaminadas e dos empreendimentos, foi realizada a sobreposição deles sobre o *shapefile* de hidrografia da bacia e realizada a coleta de dados avaliando se havia a presença do recurso hídrico nas proximidades definidas na amostragem ou não, utilizando-se o *shapefile* de hidrografia (código do arquivo ide_0101_do_hidro_otto_lin). Mesma metodologia foi aplicada para avaliar se havia a presença de massas d'água no entorno *buffers* das áreas contaminadas e dos empreendimentos, utilizando o *shapefile* de "massas d'água" disponibilizado no IDE-Sisema (código do arquivo ide_0103_mg_massa_dagua_bho_pol).

Avaliação de risco de contaminação por HP nas captações de Água

Após a coleta de dados, procedeu-se a classificação de riscos das captações de água outorgadas para consumo humano e dos corpos d'água superficiais. Para tal, adotou-se uma escala de pontuação que define os riscos de contaminação das captações, Tabela 1.

Tabela 1. Pontuação para avaliar o risco de contaminação por HP considerando os *buffers* de amostragem.

Locais Avaliados	<i>Buffers</i>			
	40 metros	150 metros	300 metros	500 metros
Pontuação adotada				
Postos de Combustíveis	4 pontos	3 pontos	2 pontos	1 ponto
Áreas Contaminadas por Postos de Combustíveis	8 pontos	6 pontos	4 pontos	2 pontos

A partir dos valores de pontuação obtidos para cada uma das outorgas de uso da água e cada corpo d'água superficial, efetuou-se a soma dos valores e o *total de pontos* classificados de acordo com 3 níveis: até 3 pontos – baixo risco de contaminação; entre 4 e 6 pontos – médio risco de contaminação; acima de 6 pontos – alto risco de contaminação por HP.

Resultados e discussão

As áreas potencialmente contaminadas por HP's na Bacia do Piracicaba entre 2014 e 2020 corresponderam a 23 pontos, sendo que 15 delas tiveram a fonte poluidora classificada como empreendimento "Postos revendedores, postos ou pontos de abastecimento, instalações de sistemas retalhistas, postos flutuantes de combustíveis e postos revendedores de combustíveis de aviação" (Tabela 2).

Tabela 2. Áreas contaminadas por HP oriundos de postos de combustíveis no período de 2014 a 2020, segundo dados da FEAM. Fonte: Autores.

Município	X	Y	Fonte de contaminação	Meios Impactados	Contaminantes
Catas Altas	-43.4027	-20.1139	Vazamento ou Infiltração	Solo, Água Subterrânea	Hidrocarbonetos
Coronel Fabriciano	-42.6413	-19.5136	Vazamento ou Infiltração	Solo, Água Subterrânea	Hidrocarbonetos
Ipatinga	-42.5592	-19.4643	Vazamento ou Infiltração	Solo, Água Subterrânea	Hidrocarbonetos
Ipatinga	-42.5547	-19.4581	Vazamento ou Infiltração	Solo, Água Subterrânea	Hidrocarbonetos
Itabira	-43.2354	-19.6398	Vazamento ou Infiltração	Solo, Água Subterrânea	Hidrocarbonetos
Itabira	-43.2272	-19.617	Vazamento ou Infiltração	Solo, Água Subterrânea	Benzeno; Etil benzeno; Naftaleno; TPH
Itabira	-43.2310	-19.517	Vazamento ou Infiltração	Solo, Água Subterrânea	Hidrocarbonetos
João Monlevade	-43.1695	-19.8348	Vazamento ou Infiltração	Solo, Água Subterrânea	Hidrocarbonetos
João Monlevade	-43.1869	-19.8101	Vazamento ou Infiltração	Solo, Água Subterrânea	Hidrocarbonetos
João Monlevade	-43.1853	-19.8384	Vazamento ou Infiltração	Solo, Água Subterrânea	Hidrocarbonetos
João Monlevade	-43.1696	-19.8346	Vazamento ou Infiltração	Solo, Água Subterrânea	Hidrocarbonetos
João Monlevade	-43.1311	-19.8402	Vazamento ou Infiltração	Solo	Benzeno; Tolueno
Nova Era	-43.0288	-19.7588	Vazamento ou Infiltração	Solo, Água Subterrânea	Hidrocarbonetos
Santa Bárbara	-43.4094	-19.9613	Vazamento ou Infiltração	Solo, Água Subterrânea	Hidrocarbonetos
São Gonçalo Rio Abaixo	-43.3481	-19.835	Vazamento ou Infiltração	Solo, Água Subterrânea	Hidrocarbonetos

As 15 áreas contaminadas por HP na bacia no período amostral foram ocorrências de vazamento ou infiltração. A sobreposição das áreas

contaminadas com os locais de captação de água para consumo humano foi identificada em vários pontos da amostragem (Figura 2).

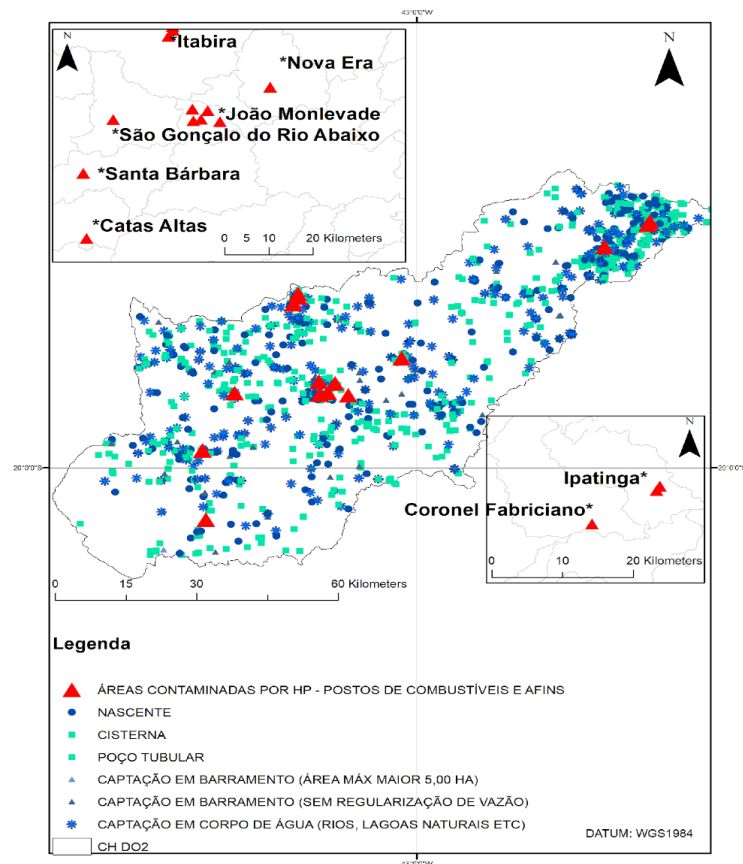


Figura 2. Sobreposição dos pontos de captação de água e as áreas contaminadas por HP.

Dentre as outorgas em torno das áreas contaminadas, foram identificadas 44 de captação subterrânea e 6 de captação superficial. O maior número de captações subterrâneas na amostra é esperado, uma vez que todas as áreas contaminadas

estão situadas em locais próximos de maior adensamento populacional, onde o recurso hídrico superficial geralmente está contaminado por efluente doméstico e, muito possivelmente, não seja visado para consumo humano, Tabela 3.

Tabela 3. Número de outorgas de captação de água subterrânea e superficial em pelo menos um dos buffers de coleta em torno das áreas contaminadas. Fonte: Autores.

Município de Localização da Outorga	Buffers em torno das áreas contaminadas				
	40m	150m	300m	500m	Total de outorgas
Coronel Fabriciano	1	3	4	5	13
Ipatinga	0	0	2	3	5
Itabira	0	0	2	4	6
João Monlevade	0	4	5	8	17
Santa Bárbara	0	0	1	3	4
São Gonçalo do Rio Abaixo	0	0	2	3	5
Total de outorgas por buffer	1	7	16	26	50

Ao analisarmos o volume de captação diária de água subterrânea para consumo humano referente às outorgas no entorno das áreas contaminadas (Figura 3), há um total de 442,9 m³/dia, sendo que apenas uma das outorgas se encontra no *buffer* de 40 metros, com captação de 0,72 m³/dia. Já a captação superficial corresponde a 54,5 m³/dia de água das outorgas distribuídas nos

buffers de 150, 300 e 500 metros (Figura 4). Esses dados demonstram a captação de volume considerável de água para consumo humano de forma tão próxima das áreas contaminadas, ressaltando a necessidade de avaliação da possível contaminação ambiental por HP alcançarem esse recurso.

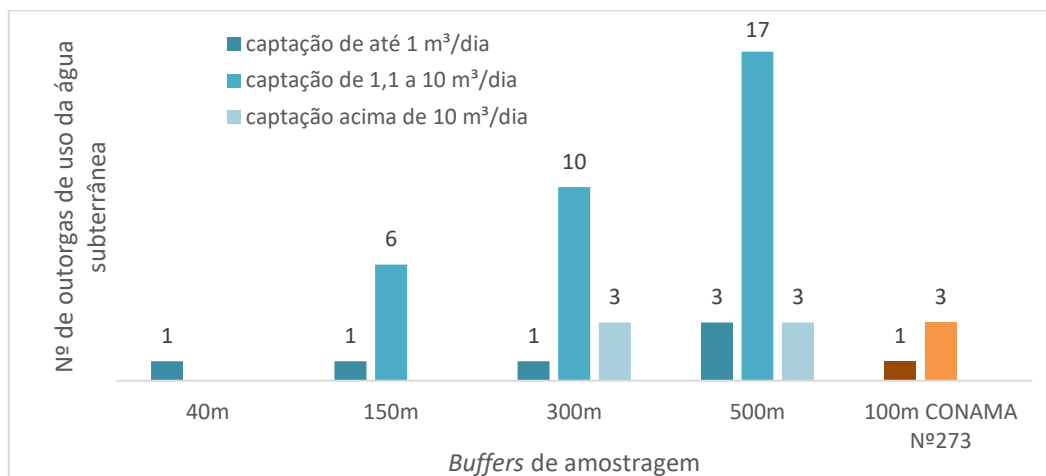


Figura 3. Volumes captados outorgados de água subterrânea nos *buffers* de amostragem.

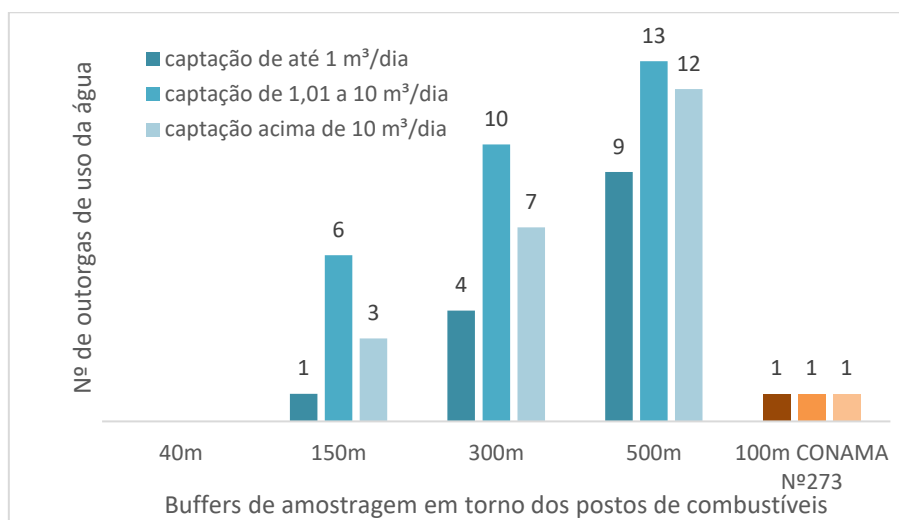


Figura 4: Volumes captados outorgados de água superficial nos *buffers* de amostragem.

Em relação aos volumes captados por dia nos *buffers* de amostragem, 27,6 m³/dia são captados há até 150 metros das áreas contaminadas, 58 m³/dia são captados há até 300 metros e 83,8 m³/dia no *buffer* de até 500 metros. A captação de uso insignificante foi, em média, 6,3

m³/dia, com um total de 196,4 m³/dia de água captada para o consumo humano numa distância de até 500 metros das áreas contaminadas. A maior parte desse volume corresponde a captações de 1,01 a 10m³/dia (Figura 5).

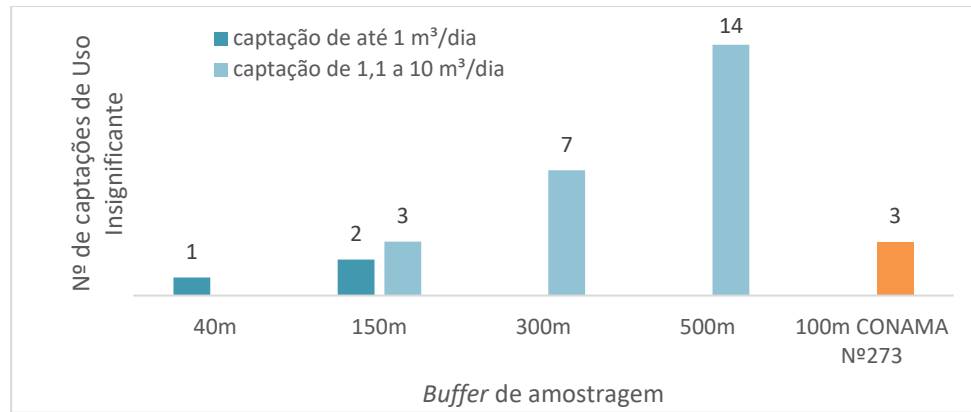


Figura 5. Distribuição das outorgas de água subterrânea nos *buffers* de amostragem.

Há um número relevante de corpos d'água superficiais próximos às áreas contaminadas (Figura 6), estando presentes em todos os *buffers* de amostragem, havendo 108 corpos d'água presentes na área de risco em torno dos pontos contaminados por postos de combustíveis (Figura 7). Apenas 1 corpo d'água de 4ª ordem estava presente no *buffer* de 40 metros, enquanto 16

corpos d'água foram identificados no *buffer* de 150 metros, sendo eles classificados entre 3ª e 6ª ordem. Mais de 50% estavam no *buffer* de 500 metros, mas com cursos d'água que, muitas vezes se ligavam a outros presentes em *buffers* mais próximos do ponto de contaminação, interligados pela própria rede fluvial.

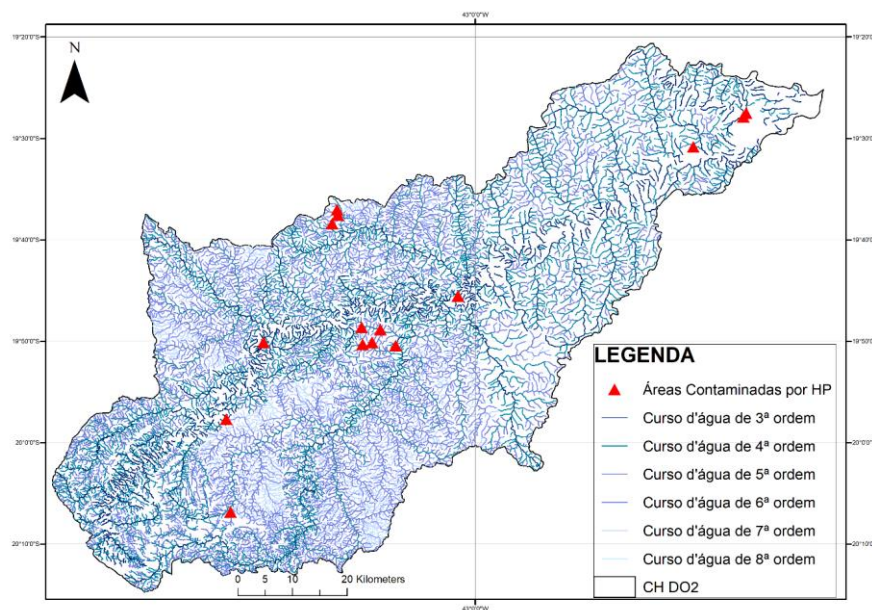


Figura 6. A rede drenagem da bacia em relação aos postos de combustíveis.

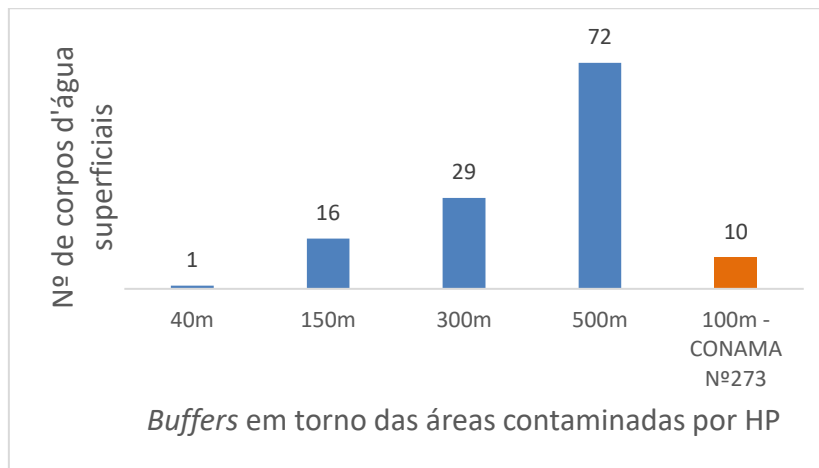


Figura 7. Número de corpos d'água superficiais identificados em cada buffer de amostragem no entorno das áreas contaminadas por HP.

A partir da identificação de pontos de captação de água para consumo humano em torno dos 157 empreendimentos “*Postos revendedores, postos ou pontos de abastecimento, instalações de sistemas retalhistas, postos flutuantes de combustíveis e postos revendedores de combustíveis*”, verificou-se que várias outorgas estavam presentes em mais de um *buffer* de amostragem em razão da proximidade de vários postos de combustíveis na área urbana (Figura 8). Das 227 outorgas de água subterrânea e superficial identificadas nos *buffers* de risco da amostra, 143

delas aparecem em mais de um *buffer*, ou seja, estão situadas próximas de mais de um empreendimento. Sendo assim, os dados apresentados a seguir consideram cada registro de uma outorga em torno de cada ponto amostral (postos de combustíveis) para estabelecer sua avaliação de risco de contaminação por HP, podendo uma mesma outorga estar presente em torno de um ou mais pontos amostrais e, portanto, pode haver múltiplos registros dela no resultado da coleta.

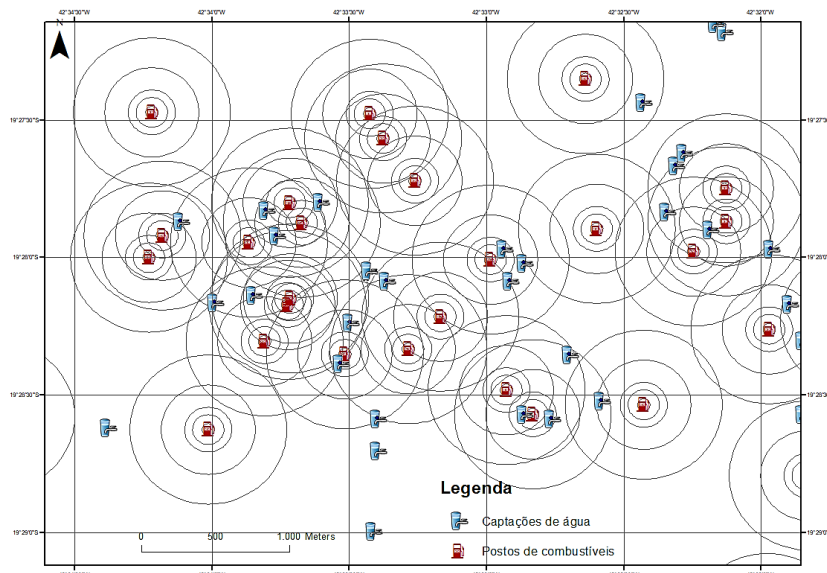


Figura 8. Sobreposição dos buffers nas áreas de maior adensamento populacional

Avaliando-se o entorno dos empreendimentos, foram observados 464 registros de outorgas de uso da água distribuídas em pelo menos um dos *buffers*

de seu entorno, sendo 395 desses registros de outorgas subterrâneas e 69 registros de outorgas superficiais (Figura 9).

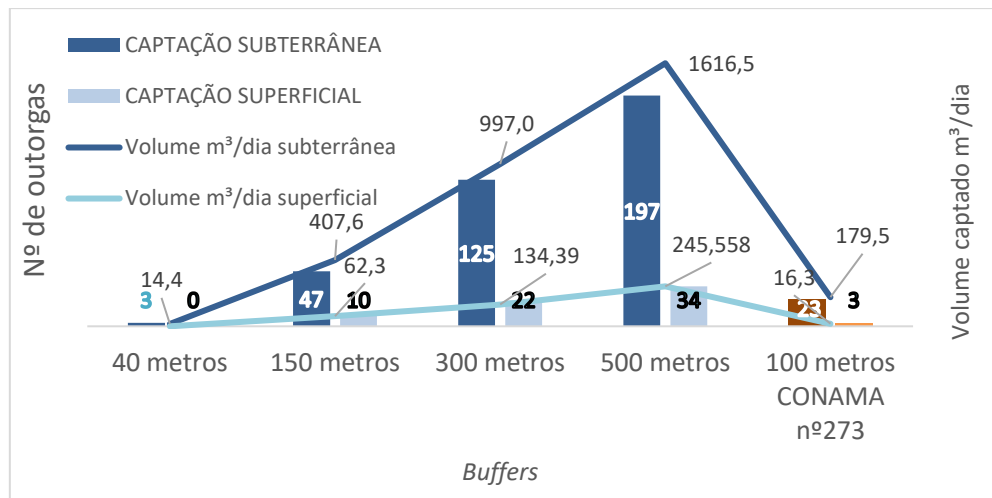


Figura 9. Registros de outorgas de captações superficial e subterrânea nos diferentes *buffers* do entorno dos postos de combustíveis.

Desse montante, 79 registros têm a captação igual ou inferior a 1 m³/dia, ou seja, menos de 25% das outorgas de uso da água subterrânea identificadas na amostragem correspondem à captação de baixo volume, para provável abastecimento de uma única residência (Figura 10). As outorgas com captação entre 1,01 e

10 m³/dia são mais representativas na amostra, correspondendo a 328, demonstrando que a captação de água para consumo humano identificadas nas proximidades dos postos de combustíveis é distribuída, muito provavelmente, para várias residências diferentes.

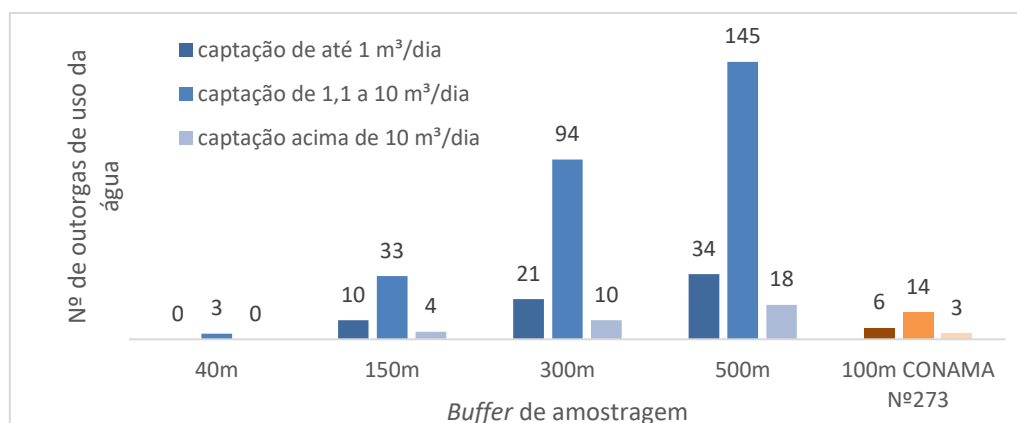


Figura 10. Os volumes outorgados captados de água subterrânea nos buffers de amostragem.

Além disso, 18 outorgas subterrâneas (com 32 registros nos *buffers* de amostragem) têm captação acima de 10 m³/dia, havendo, entre elas, captações de abastecimento público e de condomínios que atingem 100m³/dia. Somando-se apenas as outorgas subterrâneas localizadas até 150

metros de distância dos postos de combustíveis, 350,8 m³/dia de água são captados para consumo humano, ressaltando a relevância de atenção ao risco de contaminação por HP nesse importante volume de água nas proximidades dos locais onde estão os postos de combustíveis.

Avaliando-se esses registros de uso da água de captação superficial, foram identificadas 65 delas presentes na área amostral, com uma

média diária de captação de 6,7 m³/dia. Apenas 14 desses registros tem captação abaixo de 1 m³/dia, enquanto 22 delas tem captação superior a 10 m³/dia (Figura 11).

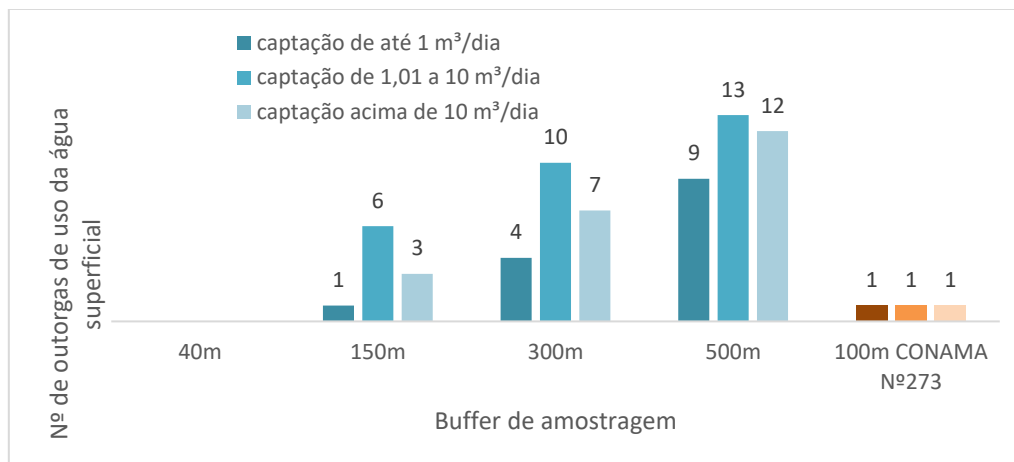


Figura 11. Os volumes outorgados captados de água superficial nos buffers de amostragem.

O entorno dos postos de combustíveis e afins tiveram 678 corpos d'água superficiais identificados nos buffers de amostragem (Figura 12), estando 30 deles situados até a 40 metros desses empreendimentos e classificados entre 2^a e 5^a ordem. O expressivo número de trechos de

córregos, rios e riachos identificados nas proximidades dos postos de combustíveis é ainda mais alarmante quando consideramos que um corpo d'água pode se aproximar de postos de combustíveis e afins ao longo de diferentes trechos de toda a sua extensão.

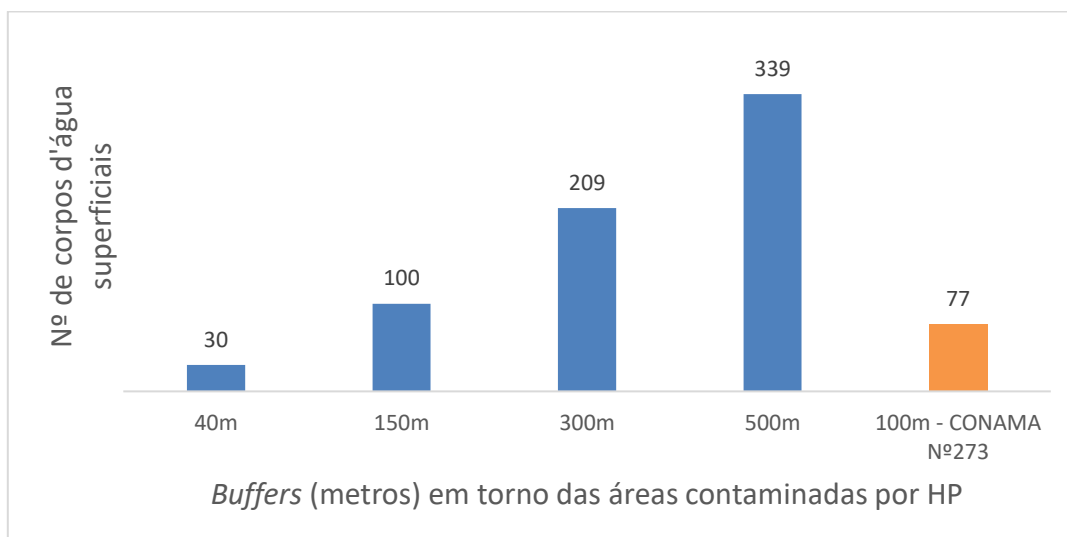


Figura 12. Número de corpos d'água superficiais existentes no entorno dos postos de combustíveis e afins.

Após a elaboração da classificação de risco para cada captação de água para consumo humano em relação à distância das áreas contaminadas por postos de combustíveis na bacia, foram identificadas 242 captações de baixo risco, 79 de

médio risco e 26 captações de alto risco (Figura 13).

Totalizou-se 4.386 m³/dia captados há até 500 metros de distância de postos de combustíveis e

694 m³/dia captados há até 500 metros de áreas contaminadas por HP.

Os municípios tiveram diferenças quanto à distribuição das captações na escala de risco, ocorrendo captações de alto risco em municípios sem áreas contaminadas por HP, como é o caso de Timóteo e/ou com poucos postos em funcionamento, como é o caso de São Domingos

do Prata, que também não possui áreas contaminadas por HP no período amostral. No geral, os municípios com maior registro de captações de médio e alto risco de contaminação são também os que tem maior tamanho populacional, estando as situações mais críticas em Ipatinga, Coronel Fabriciano e Timóteo, na região do Vale do Aço.

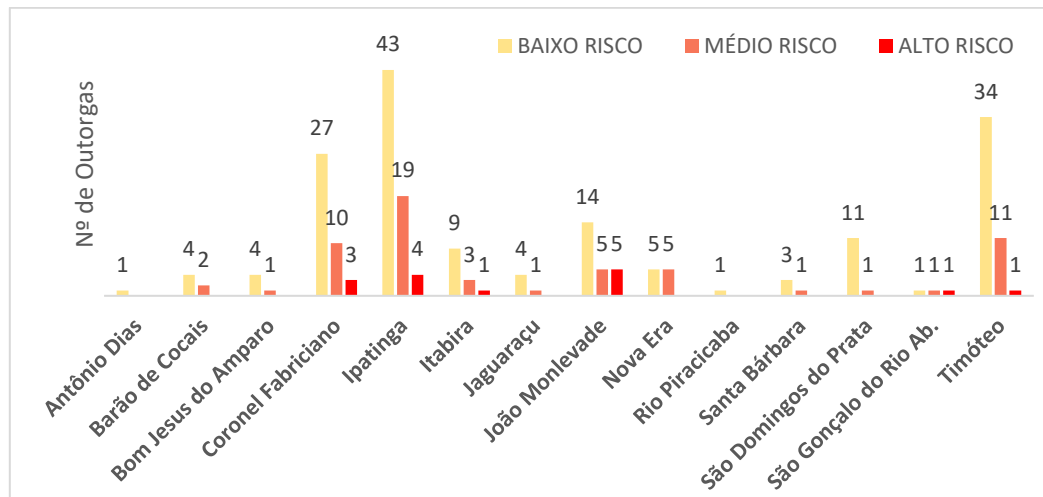


Figura 13. Classificação de Risco das captações outorgadas por município. Fontes: Autores

Os corpos d'água superficiais foram representativos na amostragem, gerando um elevado número desses recursos hídricos na classificação de risco, sendo um total de 345

trechos, com 59 deles classificados como alto risco, 56 médio risco e 230 baixos risco de contaminação por HP (Figura 14).

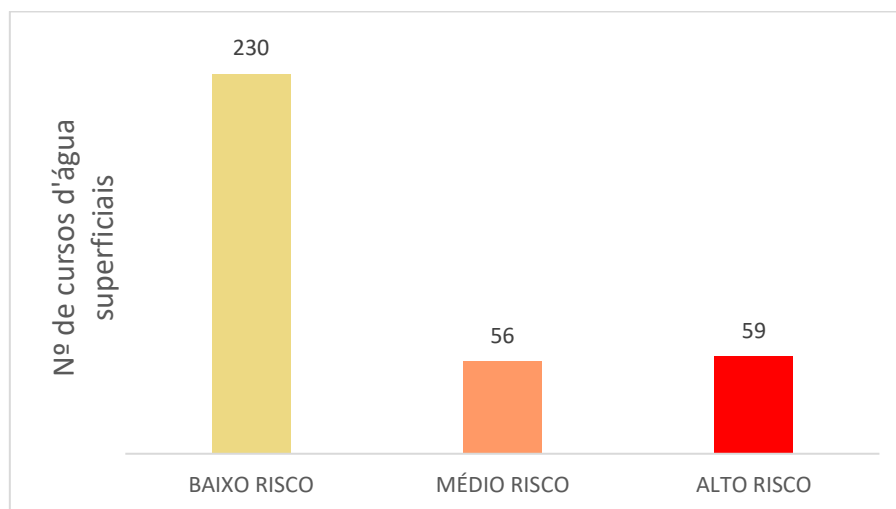


Figura 14. Cursos d'água em cada classificação de risco adotada nesse trabalho.

O monitoramento ambiental em áreas de risco potencial de contaminação por HP pode

envolver procedimentos de elevado custo e demandam muito tempo, o que resulta em barreiras

para o crescimento do monitoramento e acompanhamento de processos de remediação das áreas contaminadas (Potter, 2019). As captações de água próximas das áreas já contaminadas são consideradas de risco evidente, e que podem ser alcançadas pela pluma de contaminação, especialmente locais com vários pontos de captação com volumes de água expressivos captados (Emmanouil et al., 2022).

A presença de contaminação da água por HP proveniente de postos de combustíveis no Brasil é comum (Carneiro et al., 2020; Monteiro et al., 2016; Forte et al., 2007), embora não sejam feitas as análises da água distribuída para a população quanto à concentração desses compostos em MG. As plumas com os contaminantes podem atingir o maior buffer amostral – de 500 metros - proposto no presente trabalho (Brindha e Elango, 2014) e perdurarem por mais de 10 anos no local (Teramoto et al., 2019). Ainda assim, várias captações de água para consumo humano foram registradas nos nestes buffers, estando presentes na amostragem em torno de mais de um posto de combustível (em função da proximidade de alguns desses empreendimentos) e, em alguns casos, as captações estavam presentes no entorno de áreas contaminadas e de postos de combustíveis, tendo múltiplas fontes de possível contaminação.

A maior parte das captações identificadas corresponde à água subterrânea, sendo a captação superficial observada em apenas 1% das amostras. Águas subterrâneas podem receber os contaminantes tanto diretamente dos vazamentos dos Sistemas de Abastecimento Subterrâneo (SAS), como através do percurso no qual a água percola entre os poros do subsolo e das rochas, infiltrando-se pela força da gravidade.

Conclusões

Ao avaliar a bacia em relação à localização das captações de água próximas das áreas contaminadas por HP, identificou-se a dimensão do possível risco à saúde que representa o não monitoramento do recurso hídrico em relação à concentração de HP. A metodologia de utilização de perímetros de proteção e *buffers*, mostrou-se ser uma ferramenta potencialmente de grande valia nas investigações, avaliações e análises de possíveis contaminações de recursos hídricos.

É preocupante as captações para consumo humano identificadas no estudo, merecendo atenção

especial foi o volume captado em até 150 metros dos pontos de contaminação, totalizando 81,3m³/dia captados sem o adequado monitoramento para o risco de contaminação por HP.

O contato dos recursos hídricos com contaminações na superfície do solo, pode levar a camadas mais profundas e/ou através dos canais subterrâneos grandes volumes de espécies ou substâncias potencialmente perigosas nos fluxos subterrâneos (Logeshwaran et al., 2018; Petitta et al., 2023; Pardo-Igúzquiza et al., 2023).

Sendo assim, sugere-se a avaliação da qualidade da água para consumo humano, considerando a presença de contaminação numa captação é um indício para a análise de outras captações da região, avaliando-se a possível dispersão dos contaminantes HP para localidades que não tenham proximidade com postos de combustíveis (Misstear et al., 2023; Maier et al., 2022; Fahrmeier et al., 2022).

Recomenda-se que os poços de monitoramento da água subterrânea sejam instalados próximos aos SAS, perfurados na mesma cava que os tanques subterrâneos, limitando a área de amostragem em torno dos empreendimentos que podem ter várias outras fontes de HP que atinjam o recurso hídrico. As inconformidades relacionadas à estrutura física dos empreendimentos, como a falta de limpeza das canaletas e das caixas separadoras e fissuras e trincas no piso da pista de abastecimento podem ocasionar a contaminação ambiental por longos períodos até que sejam identificadas durante fiscalização.

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 N°. 2717/2015, pelo apoio técnico científico aportado até o momento

Referências

- Adamson, J.K., LaVanchy, G.T., Stone, B., 2021. Geological and hydrogeological assessment of the Brito Formation: Municipio de Tola, Nicaragua. *Hydrogeology Journal* 29, 2285-

2304. <https://doi.org/10.1007/s10040-021-02360-w>.
- Adewuyi, G. O., Olowu, R. A., 2012. Assessment of oil and grease, total petroleum hydrocarbons and some heavy metals in surface and groundwater within the vicinity of NNPC oil depot in Apata, Ibadan metropolis, Nigeria. *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences* 13, 1, 166-174.
- Agência de Substâncias Tóxicas e Registro de Doenças (ATSDR). 2021.
- Agência Nacional de Águas (ANA). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2019: informe anual. Brasília. 2019. 100p.
- Agência Nacional de Águas (ANA). Panorama do enquadramento dos corpos d'água do Brasil, e, Panorama da qualidade das águas subterrâneas no Brasil. Brasília. 2007. 124p.
- Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Brasília. 2020.
- Ajjur, S. B., Mogheir, Y. K., 2020. Identification of intrinsic suitable sites in Gaza Strip for the application of artificial groundwater recharge using a geographic information system multicriteria decision analysis. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis* 27, 255-265. <https://doi.org/10.1002/mcda.1701>.
- Anneser, B., Einsiedl, F., Meckenstock, R. U., Richters, L., Wisotzky, F., Griebler, C., 2008. High-resolution monitoring of biogeochemical gradients in a tar oil contaminated aquifer. *Applied Geochemistry* 23, 6, 1715-1730. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2008.02.003>
- Asejeje, G. I., Ipeaiyeda, A. R., Onianwa, P. C., 2021. Occurrence of BTEX from petroleum hydrocarbons in surface water, sediment, and biota from Ubeji Creek of Delta State, Nigeria. *Environmental Science and Pollution Research International* 12, 15361-15379. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-020-11196-y>.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). 2008 NBR 15495-2 - Poços de monitoramento de águas subterrâneas em aquíferos granulares - Parte 2: Desenvolvimento (constitui a segunda parte da NBR 15495 e apresenta as técnicas para o desenvolvimento de poços de monitoramento de águas subterrâneas). Rio de Janeiro, 24 p.
- Barthel, R., Haaf, E., Giese, M., 2021. Similarity-based approaches in hydrogeology: proposal of a new concept for data-scarce groundwater resource characterization and prediction. *Hydrogeology Journal* 29, 1693-1709. <https://doi.org/10.1007/s10040-021-02358-4>.
- Bojes, H. K., Pope, P. G., 2007. Characterization of EPA's 16 priority pollutant polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in tank bottom solids and associated contaminated soils at oil exploration and production sites in Texas. *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 47, 3, 288-295. [10.1016/j.yrtph.2006.11.007](https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2006.11.007)
- Bonilla, N., Vidal, J. L., Garrido Frenich, A., Romero-González, R., 2009. Comparison of ultrasonic and pressurized liquid extraction for the analysis of polycyclic aromatic compounds in soil samples by gas chromatography coupled to tandem mass spectrometry. *Talanta* 15, 78, 156-64. <http://dx.doi.org/10.1016/j.talanta.2008.10.048>.
- Brindha, K., Elango, L., 2014. PAHs contamination in groundwater from a part of metropolitan city, India: a study based on sampling over a 10-year period. *Environmental Earth Sciences* 71, 12, 5113-5120. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-013-2914-x>
- Carneiro, G. C. A., Dias, D. A. F., Fonseca, E. R., Gonçalves, J. A. C., 2020. Contamination of groundwater by organic compounds in the Velhas river watershed, in the state of Minas Gerais, Brazil. *Research, Society and Development* 9, 10. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i10.8536>.
- Chiu, H.Y., Verpoort, F., Liu, J.K., Chang, Y., Kao, C., 2017. Using intrinsic bioremediation for petroleum-hydrocarbon contaminated groundwater cleanup and migration containment: Effectiveness and mechanism evaluation. *Journal of The Taiwan Institute of Chemical Engineers* 72, 53-61. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtice.2017.01.002>
- Chokor, A. A., 2021. Total Petroleum and Aliphatic Hydrocarbons Profile of the River Niger Surface Water at Okpu and Iyiowa-Odekpe Regions in South-Eastern, Nigeria. *Chemistry International* 7, 3, 188-196. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4899763>
- Cleary, R. W., 2007. Águas Subterrâneas. Tampa: Princeton Groundwater, Inc, 117 p.
- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos. São Paulo. 2018.
- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). Lista holandesa de valores de qualidade do solo e da água subterrânea – Valores STI. São Paulo. 2016.

- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas. São Paulo. 2001.
- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). Postos de Revenda. São Paulo. 2020.
- Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução Nº 273, de 29 de novembro de 2000. Brasília. 2000.
- Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução Nº 362, de 23 de junho de 2005. Brasília. 2005.
- Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução Nº 420, de 28 de dezembro de 2009. Brasília. 2009.
- Consórcio Ecoplan-Lume. Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Doce: Volume I, Relatório Final. 2010.
- Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). Portaria Nº 231, de 31 de julho de 1998, Regulamenta as Áreas de Proteção das fontes de Águas Minerais.
- Dutta, C., Som, D., Chatterjee, A., Mukherjee, A. K., Jana, T. K., Sen, S., 2009. Mixing ratios of carbonyls and BTEX in ambient air of Kolkata, India and their associated health risk. *Environ Monit Assess.* 148, 97-107. <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-007-0142-0>.
- El-Naas, M. H., Acio, J. A., El Telib, A. E., 2014. Aerobic biodegradation of BTEX: Progresses and prospects. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 2, 1104-1122. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2014.04.009>
- Emmanouil, A., Varouchakis, E. K., Ioannis, T., Gerald, A., George, P. K., 2022. An integrated method to study and plan aquifer recharge. *Hydrology Research* 53, 1-20. <https://doi.org/10.2166/nh.2022.054>.
- Environmental Protection Agency (EPA). 1996. How to effectively recover free product at leaking underground storage tanks sites – a guide for state regulators. Washington, 165 p.
- Environmental Protection Agency (EPA). 2013. Drinking water contaminants. Washington, 19 p.
- Espinosa, C. I., 2021. Vulnerability of Human Populations to Contamination from Petroleum Exploitation in the Napo River Basin: An Approach for Spatially Explicit Risk Assessment. *Sustainability.* 13, 9230. <https://doi.org/10.3390/su13169230>
- Fahrmeier, N., Goeppert, N. Goldscheider, N., 2022. A novel probe for point injections in groundwater monitoring wells. *Hydrogeology Journal* 30, 1021-1029. <http://doi.org/10.1007/s10040-022-02477-6>.
- Fahrmeier, N., Goeppert, N., Goldscheider, N., 2021. Comparative application and optimization of different single-borehole dilution test techniques. *Hydrogeology Journal.* <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02271-2>.
- Faustorilla, M. V., Chen, Z., Dharmarajan, R., Naidu, R., 2017. Determination of Total Petroleum Hydrocarbons in Australian Groundwater Through the Improvised Gas Chromatography-Flame Ionization Detection Technique. *Journal of Chromatographic Science* 1, 55, 775-783. <http://dx.doi.org/10.1093/chromsci/bmx038>.
- Fayemiwo, O. M., Daramola, M. O., Moothi, K., 2017. BTEX compounds in water – future trends and directions for water treatment. *Water AS* 43, 4, <https://doi.org/10.4314/wsa.v43i4.08>
- Forte, E. J., Azevedo, M. S., Oliveira, R. C., Almeida, R., 2007. Contaminação de aquífero por hidrocarbonetos: estudo de caso na Vila Tupi, Porto Velho-Rondônia. *Química Nova* 30, 7, 1539-1544. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422007000700008>
- Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elia, M., Paris, M., 2003. Protección de la Calidad del Agua Subterránea. Banco Mundial, Washington, D.C., 28p.
- Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM). 2018. Inventário de Áreas Contaminadas do Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte, 27 p.
- Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM). 2020. Inventário de Áreas Contaminadas Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte, 35 p.
- Gonçalves, J. A. C., Pereira, P. H. R., Vieira, E. M., 2020. Evaluation of the groundwater recharge potential using GIS multi-criteria data analysis: a case study from district of Itabira, Minas Gerais, southeastern Brazil. *Ciência e Natura* 42. <https://doi.org/10.5902/2179460X40433>.
- Hilpert, M., Mora, B. A., Ni, J., Rule, A. M., Nachman, K. E., 2015. Hydrocarbon Release During Fuel Storage and Transfer at Gas Stations: Environmental and Health Effects. *Current Environmental Health Reports* 2, 4, 412-422. <http://dx.doi.org/10.1007/s40572-015-0074-8>.
- Houben, G.J., Collins, S., Bakker, M., 2022. Review: Horizontal, directionally drilled and radial collector wells. *Hydrogeology Journal* 30, 329-357. <https://doi.org/10.1007/s10040-021-02425-w>.

- Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IDE-Sisema). 2021. Disponível em: <https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/webgis>
- Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM). 2010. Plano de ação de recursos hídricos da unidade de planejamento e gestão DO2- PARH- Piracicaba. Belo Horizonte, 100 p.
- Lachassagne, P., Dewandel, B., Wyns, R., 2021. Review: Hydrogeology of weathered crystalline/hard-rock aquifers-guidelines for the operational survey and management of their groundwater resources. *Hydrogeology Journal* 29, 2561-2594. <https://doi.org/10.1007/s10040-021-02339-7>.
- Lasagna, M., Mancini, S., De Luca, D. A., 2020. Groundwater hydrodynamic behaviours based on water table levels to identify natural and anthropic controlling factors in the Piedmont Plain (Italy). *Science of the Total Environment* 716, 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137051>.
- Lima, S. D., Oliveira, A. F., Golin, R., Caixeta, D. S., Lima, Z. M., Morais, E. B., 2017. Gerenciamento de áreas contaminadas por postos de combustíveis em Cuiabá, Mato Grosso, Brasil. *Revista Ambiente & Água* 12, 2, 299-315. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1872>
- Logeshwaran, P., Megharaj, M., Chadalavada, S., Bowman, M., Naidu, R., 2018. Petroleum hydrocarbons (PH) in groundwater aquifers: An overview of environmental fate, toxicity, microbial degradation and risk-based remediation approaches. *Environmental Technology and Innovation* 10, 175-193. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2018.02.001>
- Maier, R., Leven, C., Sánchez-León, E. Strasser, D., Maximilian Stoll, M., Cirpka, O.A., 2022. Revealing vertical aquifer heterogeneity and hydraulic anisotropy by pumping partially penetrating wells. *Hydrogeology Journal* 30, 463-477. <https://doi.org/10.1007/s10040-022-02458-9>.
- Maier, R., Leven, C., Sánchez-León, E., Strasser, D., Stoll, M., Cirpka, O. A., 2022. Revealing vertical aquifer heterogeneity and hydraulic anisotropy by pumping partially penetrating wells. *Hydrogeology Journal* 30, 463-477. <https://doi.org/10.1007/s10040-022-02458-9>.
- Marić, N., Ilić, M., Miletić, S., Gojgić-Cvijović, G., Beškoski, V., Vrvic, M. M., Petar Papić, P., 2015. Enhanced in situ bioremediation of groundwater contaminated by petroleum hydrocarbons at the location of the Nitex textiles, Serbia. *Environmental Earth Sciences* 74, 6, 5211-5219. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4531-3>
- Mazzeo, D. E. C., Levy, C. E., Angelis, D. F., Marin-Morales, M. A., 2010. BTEX biodegradation by bacteria from effluents of petroleum refinery. *Science of The Total Environment* 408, 20, 4334-4340. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.07.004>.
- Medeiros, K. A. 2018. Proposta metodológica para delimitação de perímetros de proteção de captações de águas subterrâneas: aplicação no Distrito Federal. Dissertação Mestrado. Universidade de Brasília, Brasília, 121p.
- Missteear, B., Vargas, C.R., Lapworth, D., 2023. A global perspective on assessing groundwater quality. *Hydrogeology Journal* 31, 11-14. <https://doi.org/10.1007/s10040-022-02461-0>.
- Mitra, S., Roy, P., 2011. BTEX: A serious groundwater contaminant. *Research Journal of Environmental Sciences* 5, 5, 394-398. <https://doi.org/10.3923/rjes.2011.394.398>.
- Monteiro, D. D. S., Oliva, S. T., Tavares, T. M., 2016. Investigação da Presença de Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos em Poços Freáticos ao Norte do Recôncavo da Bahia, Brasil. *Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais* 4, 2, 129-140. <https://doi.org/10.9771/gesta.v4i2.15189>
- Moraes, S., Teixeira, C. E., Maximiniano, A. M. S., 2013. Guia de elaboração de planos de intervenção para o gerenciamento de áreas contaminadas. IPT, São Paulo. 395p.
- Moraes, Y. G., Oliva, P. C., 2019. Estudo integrado para identificação por hidrocarbonetos na subsuperfície de postos de combustíveis no município de Baião (Pará, Brasil). *Brazilian Journal of Development* 5, 12, 30252-30271. <https://doi.org/10.34117/bjdv5n12-153>
- Naves, A., Samper, J., Pisani, B., 2021. Hydrogeology and groundwater management in a coastal granitic area with steep slopes in Galicia (Spain). *Hydrogeology Journal* 29, 2655-2669. <https://doi.org/10.1007/s10040-021-02349-5>.
- Pardo-Igúzquiza, E., Dowd, P.A., Luque-Espinar, J.A., 2023. Increasing knowledge of the transmissivity field of a detrital aquifer by geostatistical merging of different sources of information. *Hydrogeology Journal*. <https://doi.org/10.1007/s10040-023-02644-3>.

- Pauloo, R. A., Escrivá-Bou, A., Dahlke, H., Fencel, A., Guillon, H., Fogg, G. E., 2020. Domestic well vulnerability to drought duration and unsustainable groundwater management in California's central Valley. *Environmental Research Letters* 15, 1-14. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab6f10>.
- Petitta, M., Kreamer, D., Davey, I., 2023. Topical Collection: International Year of Groundwater-managing future societal and environmental challenges. *Hydrogeology Journal* 31, 1-6. <https://doi.org/10.1007/s10040-022-02587-1>.
- Potter, T. L., 2019. Analysis of Petroleum Contaminated. In: Calabrese, E. J.; Kostecki, P. T. Principles and practices for petroleum contaminated soils, In: Principles and Practices for Petroleum Contaminated Soils. Routledge, 1ª ed. Londres, 672p.
- Prevati, A., Crosta, G.B., 2021. Characterization of the subsurface urban heat island and its sources in the Milan city area, Italy. *Hydrogeology Journal* 29, 2487-2500. <https://doi.org/10.1007/s10040-021-02387-z>.
- Reddy, C. M., Arey, J.S., Seewald, J. S., Sylva, S. P., Lemkau, K. L., Nelson, R. K., Carmichael, C. A., McIntyre, C. P., Fenwick, J., Ventura, G. T., Van Mooy, B. A., Camilli, R., 2011. Composition and fate of gas and oil released to the water column during the Deepwater Horizon oil spill. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 11, 109, 50, 20229-20234. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1101242108>.
- Riccardi, C., Di Filippo, P., Pomata, D., Incoronato, F., Di Basilio, M., Papini, M. P., Spicaglia, S., 2008. Characterization and distribution of petroleum hydrocarbons and heavy metals in groundwater from three Italian tank farms. *Science of the Total Environment* 1, 393, 50-63. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.12.010>.
- Rodrigues, G. M. A., 2015. Atividade de armazenamento e distribuição de combustível nos centros urbanos: os postos de combustíveis e a saúde pública. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 88p.
- Saari, E., 2009. Towards minimizing measurement uncertainty in total petroleum hydrocarbon determination by GC-FID. *Acta Universal* 544.
- Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS). 2021. Ministério do Desenvolvimento Regional Secretaria Nacional de Saneamento. Diagnóstico Temático - Serviços de Água e Esgoto, Brasília.
- Stigter, T.Y., Miller, J., Chen, J., 2023. Groundwater and climate change: threats and opportunities. *Hydrogeology Journal* 31, 7-10. <https://doi.org/10.1007/s10040-022-02554-w>.
- Teramoto, E. H., Baessa, M. P. M., Chang, H. K., 2019. Simulações da migração de plumas dissolvidas de compostos BTEX geradas por LNAPL trapeado. *Águas Subterrâneas* 33, 3, 280-291. <https://doi.org/10.14295/ras.v33i3.29529>.
- Tong, X., Illman, W.A., Berg, S.J., 2021. Hydraulic tomography analysis of municipal-well operation data with geology-based groundwater models. *Hydrogeology Journal* 29, 1979-1997. <https://doi.org/10.1007/s10040-021-02320-4>.
- Tongo, I., Ogbeide, O., Ezemonye, L., 2017. Human health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in smoked fish species from markets in Southern Nigeria. *Toxicology Reports* 4, 55-61. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2016.12.006>.
- Tunsaringkarn, T., Siri Wong, W., Rungsiyothin, A., Nopparatbundit, S., 2012. Occupational exposure of gasoline station workers to BTEX compounds in Bangkok, Thailand. *The international journal of occupational and Environmental Medicine*. 3, 3, 117-125.
- United Nations Water (UN-WATER). 2018. Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 6: Relatório-síntese sobre Água e Saneamento. Resumo Executivo. Unesco: Brasil.
- Varjani, S. J., 2017. Microbial degradation of petroleum hydrocarbons. *Bioresource Technology* 223, 277-286. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.10.037>.
- Vivian, R. B. 2015. Análise de contaminação em solo e água subterrânea por hidrocarbonetos derivados de petróleo. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 113p.
- Witt, L., Müller, M.J., Gröschke, M., Vincent E. A., 2021. Experimental observations of aquifer storage and recovery in brackish aquifers using multiple partially penetrating wells. *Hydrogeology Journal* 29, 1733-1748. <https://doi.org/10.1007/s10040-021-02347-7>.
- World Health Organization (WHO). 2011. Guidelines drinking-water quality. Geneva, Fourth edition. 564 p.
- Wu, S., Fiaz, H., Yuan-Chien, Lin., Tzu-Yu, Y., Kai-Chun, Yu., 2021. Characterization of

- Regional Groundwater System Based on Aquifer Response to Recharge–Discharge Phenomenon and Hierarchical Clustering Analysis. *Water* 13, 15-21. <https://doi.org/10.3390/w13182535>.
- Zhang, H., Xu, Y., Kanyerere, T., 2020. A review of the managed aquifer recharge: historical development, current situation and perspectives. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 118-119. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2020.102887>.
- Zhang, Y., Mu, Y., Liu, J., Mellouki, A., 2012. Levels, sources and health risks of carbonyls and BTEX in the ambient air of Beijing, China. *Journal of Environmental Sciences* 24, 1, 124-130, [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(11\)60735-3](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(11)60735-3).
- Zheng, Y., Vanderzalm, J., Hartog, N., 2023. The 21st century water quality challenges for managed aquifer recharge: towards a risk-based regulatory approach. *Hydrogeology Journal* 31, 31-34. <https://doi.org/10.1007/s10040-022-02543-z>