

Uso potencial e vulnerabilidade das águas subterrâneas em áreas de expansão urbana: Distrito de Icoaraci, Belém, Pará

Layla Maria Monteiro Gomes de Barros
Universidade Federal do Pará

Aline Maria Meiguins de Lima
Universidade Federal do Pará

RESUMO

A vulnerabilidade das águas subterrâneas varia em função das características hidrogeológicas e das formas de uso do solo, sendo de alta relevância socioambiental pelo potencial de abastecimento humano. Com o objetivo de avaliar a vulnerabilidade das águas subterrâneas em uma área de expansão urbana (Distrito de Icoaraci, Belém, Pará), adotando o método GOD (Grau, Ocorrência, Distância) e admitindo as condições de urbanização em áreas de planície amazônica, foram empregados o total de 129 poços oriundos do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) e do banco de dados da companhia de saneamento (COSANPA). Estes foram consistidos e espacializados em uma base georreferenciada, interpolados e processados por álgebra de mapas. Os produtos indicaram que: 64% da área foi classificada como vulnerabilidade média e 16% como insignificante; as áreas de maior concentração da ocupação comprometem as águas subterrâneas; e a desigual distribuição dos poços, pode subestimar o resultado de algumas áreas. O estudo da vulnerabilidade deve ser ponto fundamental no planejamento para a implantação de captações subterrâneas para fins de abastecimento público e de coleta e tratamento de esgoto sanitário, a ausência ou fragilidade deste, compromete o uso das águas e favorece a contaminação hídrica subterrânea, principalmente dos aquíferos de comportamento não confinado.

Palavras-chave: Aquífero; Contaminação; Usos da água.

Potential use and groundwater vulnerability in areas of urban expansion: Icoaraci District, Belém, Pará

ABSTRACT

The vulnerability of groundwater changes according to hydrogeological characteristics and land use forms, being of high socio-environmental relevance due to its potential for human supply. The main goal was to assess the vulnerability of groundwater in an area of urban expansion (District of Icoaraci, Belém, Pará) and adopt the GOD methodology (Degree, Occurrence, Distance), highlighting the urbanization process in the Amazonian wetplain. The total of 129 wells from the Groundwater Information System (SIAGAS) and the sanitation company's (COSANPA) database were used. These were consisted and specialized in a georeferenced base, interpolated and processed by map algebra. The products indicated that: 64% of the area was classified as medium vulnerability and 16% as insignificant; the areas with the highest concentration of occupation compromise groundwater; and the unequal distribution of wells may underestimate the result in some areas. The vulnerability evaluation is fundamental for groundwater collection implementation for public supply purposes and sewage destinations. These studies' absence or fragility compromises the water use and favors groundwater contamination, mainly of unconfined aquifers.

Keywords: Aquifer; Contamination; Water uses.



Uso potencial y vulnerabilidad de las aguas subterráneas en áreas de expansión urbana: Distrito de Icoaraci, Belém, Pará

RESUMEN

La vulnerabilidad de las aguas subterráneas varía de acuerdo con las características hidrogeológicas y las formas de uso de la tierra, siendo de gran relevancia socioambiental debido a su potencial para el abastecimiento humano. Con el objetivo de evaluar la vulnerabilidad natural de los acuíferos subterráneos en una zona de expansión urbana (Distrito de Icoaraci, Belém, Pará); adoptando el método GOD (Grado, Ocurrencia, Distancia) y admitiendo las condiciones de urbanización en áreas de la llanura amazónica. se utilizaron un total de 129 pozos del Sistema de Información de Aguas Subterráneas (SIAGAS) y de la base de datos de la empresa de saneamiento (COSANPA). Estos fueron constituidos y especializados en una base georeferenciada, interpolada y procesada mediante álgebra cartográfica. Según los resultados: el 64% de la zona estaba clasificada como de vulnerabilidad mediana y el 16% como insignificante; las zonas con una concentración más elevada de ocupación ponen en peligro las aguas subterráneas; y la desigualdad en la distribución de los pozos puede subestimar el resultado en algunas áreas. El estudio de la vulnerabilidad debería ser un punto fundamental en la planificación de la aplicación de captaciones subterráneas para el abastecimiento público. Este también abarca la recogida y el tratamiento de aguas residuales sanitarias, su ausencia o fragilidad pone en peligro el uso del agua y favorece la contaminación de las aguas subterráneas, principalmente acuíferos de comportamiento no confinado.

Palabras clave: Acuífero; Contaminación; Usos del agua.

INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural limitado dotado de valor econômico (PNRH, 1997). As águas subterrâneas são destacadas por possuírem a maior parcela das águas doces em estado físico líquido, geralmente ter boa qualidade natural e por, em alguns casos, apresentar inviabilidade técnica ou econômica para recuperação da qualidade de seus mananciais depois de contaminados, fato este que leva a manutenção da qualidade das águas subterrâneas ser indispensável (FOSTER *et al.*, 2002). Os aquíferos constituem formações geológicas, constituída por rochas permeáveis, que armazenam água em seus poros ou fraturas (REBOUÇAS *et al.*, 2002). O aquífero freático, também chamado do tipo livre, é constituído por uma formação geológica permeável e superficial, aflorante em toda a sua extensão, e limitado na base por uma camada impermeável; a superfície superior da zona saturada está em equilíbrio com a pressão atmosférica, com a qual se comunica livremente (BORGUETTI *et al.*, 2004).

A exploração das águas subterrâneas, consideradas bens de domínio estadual, está sujeita à obtenção de outorga de direito de uso do recurso hídrico, esse instrumento constitui o ato administrativo que define os termos e as condições mediante as quais o Poder Público permite, por prazo determinado, o uso do recurso hídrico. A proteção das águas subterrâneas deve estar baseada em quatro estratégias: cadastro de usuários (com identificação de fontes de contaminação); delimitação das áreas de recarga; monitoramento da qualidade da água; e mapeamento da vulnerabilidade de aquíferos (Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), Lei n. 9.433, de 8 de janeiro de 1997).

A Lei n. 14.026, de 15 de julho de 2020, atualiza o marco legal do saneamento básico e atribui competências à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), apresentando elementos que foram derivados da PNRH. O destaque de relação direta com o planejamento do



uso das águas subterrâneas está na implementação de um “*sistema de informações sobre os serviços públicos de saneamento básico, articulado com o Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico (SINISA), o Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (SINIR) e o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH), observadas a metodologia e a periodicidade estabelecidas pelo Ministério do Desenvolvimento Regional*” (Art. 8, VI). A integração da informação associada as políticas de saneamento básico e de recursos hídricos possibilita que os gestores públicos acompanhem o crescimento da demanda hídrica, evitando comprometer a disponibilidade e ainda garantindo a manutenção continuada de oferta.

Em hidrogeologia o conceito de vulnerabilidade começou a ser usado intuitivamente a partir da década de 1970 na França (FOSTER *et al.*, 2002), e de maneira mais ampla na década de 1980 (HAERTLE, 1983; ALLER *et al.*, 1987; FOSTER; HIRATA, 1988). A avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas permite caracterizar o grau de influência de fontes potenciais de contaminação que estão na superfície do solo ou perto dela, e que possam influenciar a recarga subterrânea; as condições geológicas, geomorfológicas ou de cobertura da terra intervenientes; condições de risco de transporte de contaminantes ou de atividades que envolvam perfurações subterrâneas, que podem representar riscos adicionais para as águas subterrâneas (STEMPVOORT *et al.*, 2013).

Na busca de um método de definição do amplo aspecto de variáveis que podem compor as vulnerabilidades, são desenvolvidas de forma continuada, técnicas onde o uso de sistemas de informação geográfica e de ferramentas de sensoriamento remoto combinadas auxiliam, por exemplo, a prevenção de contaminação do abastecimento de água para consumo humano (OROJI, 2018a) principalmente nas zonas urbanas consolidadas ou em expansão. Apesar dos níveis de incerteza observados no desenvolvimento de mapas de vulnerabilidade, estes permitem a identificação de áreas mais sensíveis, possibilitando o planejamento de ações futuras (BOUFEKANE; SAIGHI, 2013).

Os métodos existentes para a vulnerabilidade das águas subterrâneas podem ser classificados em três categorias básicas (FANNAKH; FARSANG, 2022, p. 3): Métodos baseados em índices (métodos qualitativos), acoplados a Sistemas de Informação Geográfica (SIG); Métodos estatísticos; e métodos baseados em processos (métodos quantitativos), que incluem modelagem de simulação na definição da “*vulnerabilidade específica*” das águas subterrâneas, enquanto os métodos qualitativos e ferramentas estatísticas pretendem examinar a “*vulnerabilidade intrínseca*”.

Com relação ao estudo da vulnerabilidade das águas subterrâneas, Meneses (2016) e Maria (2018) destacam alguns dos modelos existentes: Poluição dos Lençóis Aquíferos (PLA) - analisa as formações geológicas segundo a condutividade hidráulica e das características de sorção do material; DRASTIC - considera a profundidade da água subterrânea, material do aquífero, solo, topografia, litologia da zona vadosa e condutividade hidráulica; SINTACS - voltado para avaliações e mapeamento de vulnerabilidades em média e grande escala, utilizando ponderação por pesos, abrange a profundidade do nível estático, recarga líquida, espessura da zona não saturada, tipo de solo, tipo de aquífero, condutividade hidráulica e topografia; SI (*Susceptibility Index*) - envolve a profundidade, recarga líquida, meio aquífero, topografia e uso do solo; GOD - adota o tipo de aquífero, litologia da zona vadosa e profundidade; AVI (*Aquifer Vulnerability Index*) - admite a condutividade hidráulica e a espessura das camadas dos diferentes materiais que se encontram sobre o nível da água do aquífero; GODS (metodologia modificada do método GOD) - avalia o tipo de aquífero, litologia da zona vadosa, profundidade da água e fator solo.



São encontradas aplicações com múltiplas finalidades para os métodos GOD e DRASTIC no Brasil e em diversos países (FRAGA *et al.*, 2013; FELDKIRCHER *et al.*, 2014; GUETTAIA *et al.*, 2017; OROJI, 2018b; RUKMANA *et al.*, 2019; TAAZZOUZTE *et al.*, 2020; AKINLALU *et al.*, 2021; FANNAKH; FARSANG, 2022; SEKAR *et al.*, 2023). Estes se adequam a uma condição comum em vários países que é a disponibilidade limitada dos conjuntos de dados geológicos, hidrológicos e hidrogeológicos que influenciam a vulnerabilidade das águas subterrâneas; onde a atribuição de pesos e classificações visam reduzir as incertezas significativas (FANNAKH; FARSANG, 2022).

O grau de poluição/contaminação das águas subterrâneas depende da condição hidrogeológica e litológica do subsolo, da profundidade do aquífero e do ambiente ao redor (BANKS *et al.*, 2002). Neste contexto, questiona-se: como a necessidade de urbanização pode confrontar com o limite de oferta ou vulnerabilidade hídrica, tanto superficial quanto subterrânea?. O fato é que as cidades estão crescendo, horizontalmente e de forma vertical, ambientes antes dominados por residências, tornam-se aglomerados de condomínios verticais, multiplicando de forma expressiva o número de residentes e conseqüente consumo de água. Assim, o sistema de gestão pública voltado ao saneamento deveria basear-se em estudos prévios que direcionassem a melhor estratégia de aproveitamento e as demandas por proteção em função da qualidade hídrica. Desta forma, teve-se como objetivo avaliar a vulnerabilidade natural das águas subterrâneas em uma área de expansão urbana (Distrito de Icoaraci, Belém, Pará), adotando o método GOD, considerando as condições de urbanização em áreas de planície amazônica.

O Distrito de Icoaraci se destaca pelo seu polo de artesanato em cerâmica, com uma vasta gama de obras Marajoaras e Tapajônicas, assim como o porto pesqueiro e hidroviário presentes em sua Orla. Apresenta cerca de 110 empresas instaladas de naturezas diversas (setor alimentício, químico e de processamento de couro) que são atendidas por infraestrutura urbana que supre as suas necessidades (GAMA *et al.*, 2013). Apesar de geograficamente estar cercado por águas fluviais, a principal fonte de abastecimento público, comercial e industrial advém das águas subterrâneas.

A hidrogeologia do município de Belém foi discutida pela Agência Nacional de Águas (ANA) em Brasil (2018), em estudos voltados à gestão das águas subterrâneas de Belém. Os principais destaques foram para: o Sistema Aquífero Barreiras, que compreende reservatórios livres em sua porção superior e semiconfinados em sua porção inferior; o Sistema Aquífero Pirabas, composto principalmente de reservatórios semiconfinados, representado por aquíferos espessos encerrados por camadas impermeáveis a semipermeáveis, onde a frequência dos reservatórios arenosos é variável, os dados de poços e de perfilagens indicam sucessão com recorrência frequente de camadas arenosas e argilosas, por esta razão, são os reservatórios mais explotados pelo sistema público de abastecimento e grandes indústrias; e para as ocorrências de aquíferos livres, influenciados pela descarga extensa rede hidrográfica instalada na área.

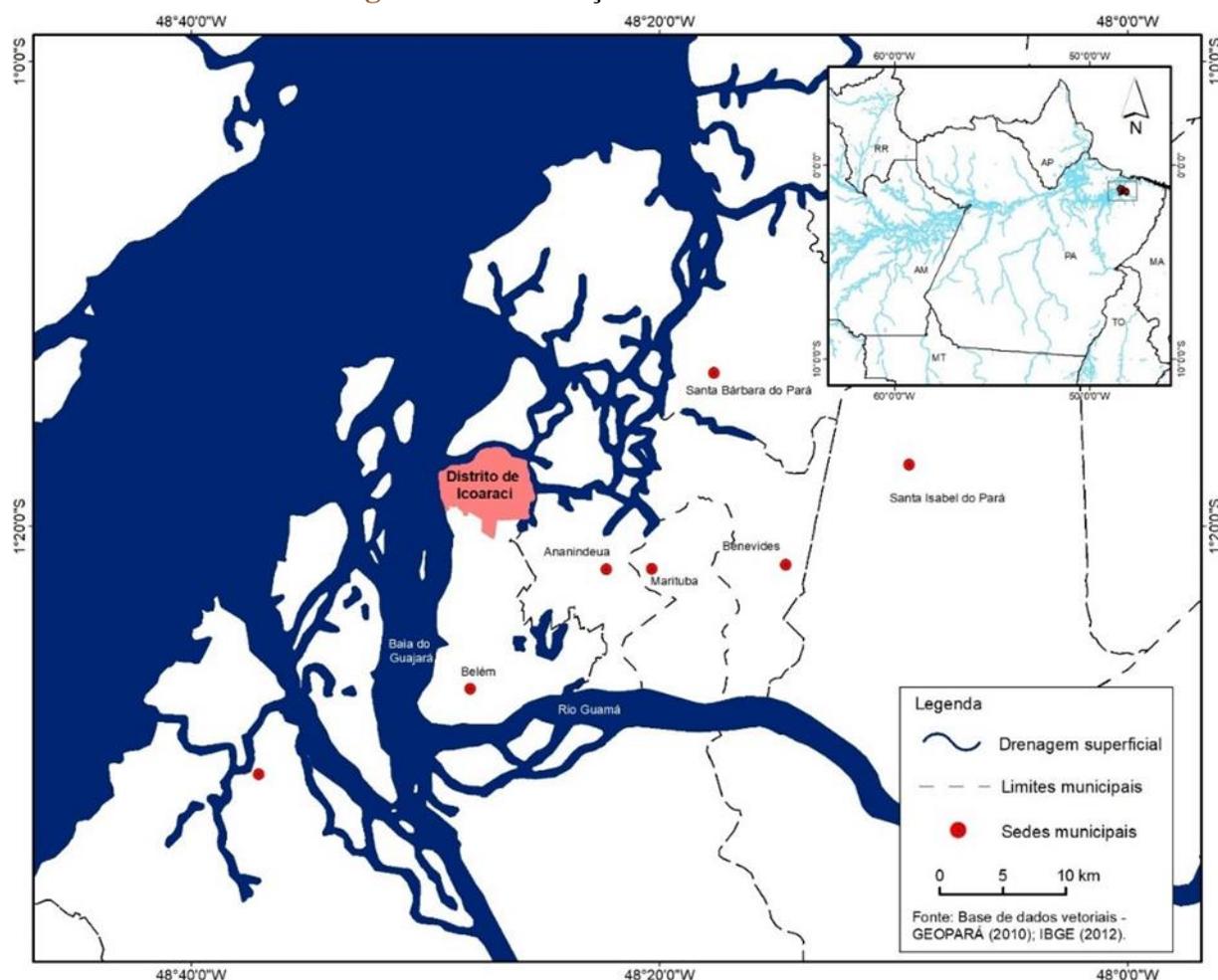
As inúmeras feições hídricas superficiais, topografia plana, baixas altitudes e nível de água raso indicam que a maior parte da área se comporta, predominantemente, como zona de descarga das águas subterrâneas. Imbiriba Júnior *et al.* (2021) apresentam a denominação de aquífero Marajó para os níveis definidos como aquífero Pirabas para esta região, com base na reformulação proposta por Nogueira *et al.* (2021).

MATERIAL E MÉTODOS

A área objeto da pesquisa faz parte da região de expansão urbana do município de Belém (PA), localizada nas margens do sistema estuarino amazônico, com forte influência das águas

fluviais e definida por uma topografia de ambiente de várzea. O denominado Distrito de Icoaraci é um Distrito Administrativo de Belém que, no final dos anos 60 (Século XX), não passava de uma área afastada do centro da capital paraense e que servia de “dormitório” da população de menor poder aquisitivo que vinha do interior paraense para trabalhar na cidade, nas décadas seguintes cresceu e hoje é parte integrante da Região Metropolitana de Belém (RMB), estando localizado em uma área de expansão de Belém (Figura 1) (DIAS; SILVA, 2009).

Figura 1 - Localização Distrito de Icoaraci.



Fonte: Autores (2021).

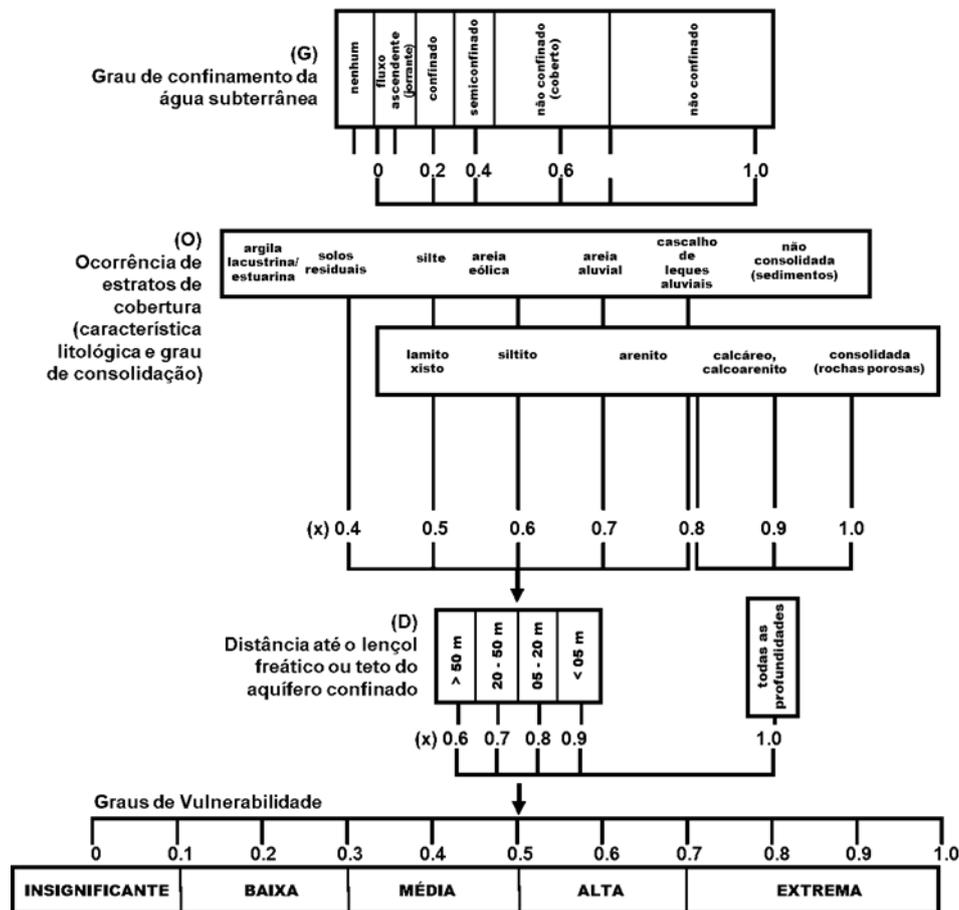
Como trata-se basicamente da análise voltada para o potencial subterrâneo, a base de informações disponível foi composta pelos poços cadastrados no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) do Serviço Geológico do Brasil CPRM e pelos operados pela companhia de saneamento do estado do Pará (CONSAPA). O total de poços obtidos foi de 144, sendo a maioria (134) do SIAGAS. A revisão da qualidade destes dados, permitiu que fossem selecionados 129, para o tratamento final. Os critérios de revisão adotados foram a qualidade das informações associadas ao perfil construtivo do poço e a correta identificação do perfil geológico/hidrogeológico. Poços com descrição incompleta ou incerta quanto as características hidrogeológicas e construtivas foram retirados da análise.

Na caracterização da altimetria foi usada a base do SRTM (Missão Topográfica Radar Shuttle, Resolução de 30 m). O método de avaliação constou de três etapas: (1) a seleção da



base de dados; (2) a avaliação da vulnerabilidade; (3) a definição de áreas prioritárias de atenção para gestão das águas subterrâneas. Os poços avaliados (129) foram identificados considerando os critérios de: grau de confinamento dos aquíferos; característica dos estratos acima da zona saturada do aquífero em termos do grau de consolidação e caráter litológico; e profundidade do topo do aquífero. Nesse momento, foi priorizado o comportamento de recarga direta, o que caracteriza principalmente a condição de aquífero livre, com as profundidades que atendiam esse comportamento. A avaliação das condições de vulnerabilidade buscou uma metodologia que atendesse a qualidade da informação fornecida pela maior quantidade de poços existentes, assim a que se mostrou de melhor adequação foi o método GOD (FOSTER; HIRATA, 1988) (Figura 2).

Figura 2 - Método GOD para avaliação da vulnerabilidade natural.



Fonte: Adaptada para aplicação de Foster e Hirata (1988).

As variáveis que o método avalia não permitem estabelecer uma relação de causa-efeito com a forma de contaminação associada (FOSTER *et al.*, 2002). Primeiramente seleciona-se o parâmetro G (tipo de aquífero), multiplicando-se em seguida pelo valor atribuído ao parâmetro O (litologia). O resultado desta operação será multiplicado finalmente pelo valor atribuído a D (Distância ao topo).

O Método GOD de mapeamento da vulnerabilidade natural à contaminação foi desenvolvido inicialmente por Foster (1987), sendo aperfeiçoado por Foster e Hirata (1988) e Foster *et al.* (2002), e fundamentam-se nos mecanismos de recarga da água subterrânea e na capacidade natural de atenuação de efluentes, podendo variar em função das condições

geológicas superficiais e da profundidade do nível d'água. Cada parâmetro recebe um valor entre 0 e 1, e o índice de vulnerabilidade é obtido multiplicando-se os três valores.

Este método obtém o índice de vulnerabilidade como resultado da interação entre três variáveis (Equação 1), onde (*G*) equivale ao “Grau de confinamento hidráulico” da água subterrânea; (*O*) a “Ocorrência de estratos” de cobertura (característica litológica e grau de consolidação da zona vadosa ou camada confinante); e (*D*) a “Distância até o lençol freático ou o teto do aquífero confinado”: $V_a = (G)x(O)x(D)$ (eq. 1)

Admitindo que o método GOD além de avaliar a vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos, orienta sobre o comportamento de contaminantes em subsuperfície. O tratamento da base de informação associada aos poços foi realizado em programa de tabulação de dados (planilhas tipo Excel); e importados para um sistema de tratamento de dados geoespaciais (Qgis 3.28), onde cada componente foi inicialmente tratado individualmente, para a seguir, por meio de álgebra de mapas simples (multiplicação) serem processados de forma integrada.

A distribuição por categoria de análise utilizou o método de interpolação que sistematiza segundo a Ponderação do Inverso da Distância (*Inverse Distance Weighting - IDW*), “onde são atribuídos pesos aos pontos amostrados de acordo com a distância que estão do ponto com valor desconhecido” (HERNANDEZ *et al.*, 2021, p. 4), neste caso parte-se do princípio que os pontos mais próximos ao amostrado, são mais semelhantes a este do que os mais distantes. A geração do processo de interpolação foi realizada no mesmo sistema de tratamento de dados geoespaciais citado.

De forma complementar, foram realizadas atividades de campo para avaliação das condições *in loco* dos poços. As atividades de campo consistiram na tomada de registros fotográficos dos principais poços amostrados e da descrição de suporte às análises das condições ambientais do entorno dos poços.

A definição de áreas prioritárias de atenção para gestão das águas subterrâneas considerou os resultados do método GOD, que filtra principalmente as ocorrências associadas a recarga direta (freático) e os “vazios” de informação pela falta de adensamento de poços. O Quadro 1 sistematiza a hierarquia adotada de classificação, assim como, utilizados os mapeamentos de Brasil (2018) para avaliar de forma comparativa os resultados obtidos, oriundos dos “Estudos Hidrogeológicos para a Gestão das Águas Subterrâneas da Região de Belém/PA” (disponíveis no Catálogo de Metadados da ANA).

Quadro 1 - Definição das Classes de Vulnerabilidade.

Classes	Definição
Extrema	Vulnerável à maioria dos contaminantes com impacto rápido em muitos cenários de contaminação.
Alta	Vulnerável a muitos contaminantes (exceto os que são fortemente adsorvidos ou rapidamente transformados), em condições múltiplas de contaminação.
Moderada	Vulnerável a alguns contaminantes, mas somente quando continuamente lançados ou lixiviados.
Baixa	Vulnerável somente a contaminantes conservadores, a longo prazo, quando contínua e amplamente lançados ou lixiviados.
Insignificante	Presença de camadas confinantes sem fluxo vertical significativo de água subterrânea (percolação).

Fonte: Adaptado de Brasil (2018).

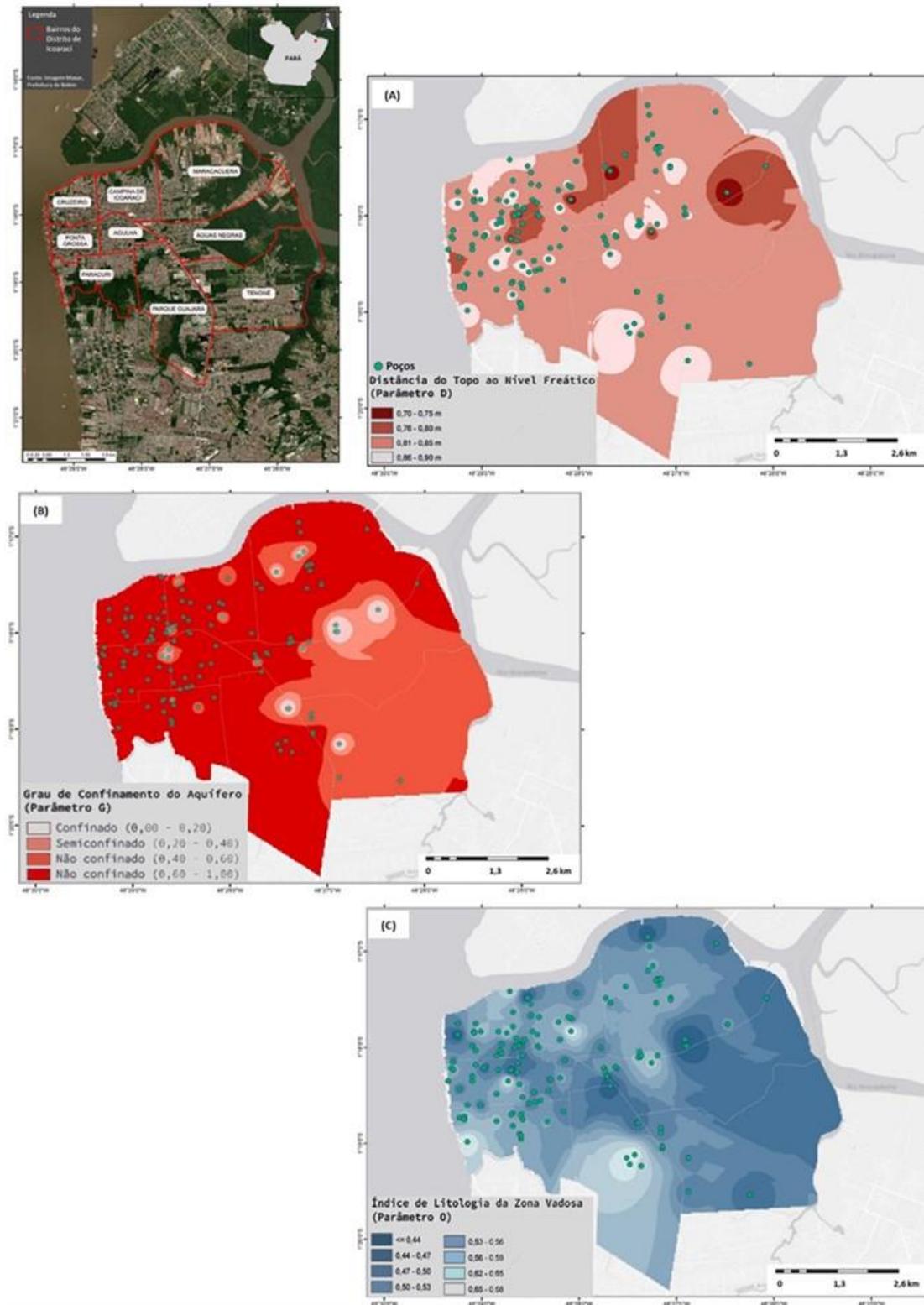
RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os poços amostrados estão localizados em uma área urbanizada, com aglomerações locais, associadas com algumas áreas verdes marginais aos cursos d'água (Figura 3). Por ser uma região de várzea, observa-se o adensamento de poços com abastecimento direto de



aqüíferos rasos, não confinados, coincidindo com a maior concentração residencial (Figuras 3A e 3B).

Figura 3 - Espacialização das áreas amostradas. (A) Distribuição espacial dos poços segundo a distância do topo ao nível freático. (B) Grau de confinamento do aquífero. (C) Perfil de cobertura da zona não saturada.



Fonte: Autores (2021).



O grau de confinamento é fundamental para determinar a vulnerabilidade natural de uma região, pois é através da precipitação e posterior carreamento de sólidos pela água, que o contaminante pode possuir a capacidade de adentrar a zona vadosa ou não saturada. Foram obtidos três tipos diferentes quanto ao grau de confinamento dos aquíferos analisados. Dentre eles, 93 poços são caracterizados como não confinados (livres) (áreas que apresentam maior probabilidade de infiltração de contaminantes), 21 poços são confinados (áreas que possuem maior dificuldade em infiltração de possíveis poluentes), enquanto apenas 5 poços são classificados como semiconfinado (áreas que apresentam probabilidade intermediária de ter as águas subterrâneas afetadas). Nesta contabilidade encontram-se oito sistemas de abastecimento de água (totalizando 10 poços), com características de profundidade (> 50 m) e confinamento, irão naturalmente se deslocar para a menor vulnerabilidade.

A variável de cobertura do aquífero ficou dependente do grau de informação do SIAGAS e das demais bases coletadas. Assim, buscou-se compatibilizar as informações com a pesquisa sobre a hidrogeologia local, e demais registros que validassem os perfis litológicos (BRASIL, 2018; IMBIRIBA JÚNIOR *et al.*, 2021; NOGUEIRA *et al.*, 2021). Foram encontradas as variações entre estratos argilosos, arenosos, areno-argilosos e argilo-arenosos predominantemente (Figura 3C).

Com relação à distância da superfície até o lençol freático, percebe-se que ocorre uma pequena variação: 88 poços estão na classificação entre 5 a 20 m (variando entre 5 a 19 m), enquanto 34 poços possuem profundidade inferior a 5 m de acordo com a classificação do método (entre 2,1 a 4,8 m), e apenas 7 poços estão na classificação entre 20 a 50 m.

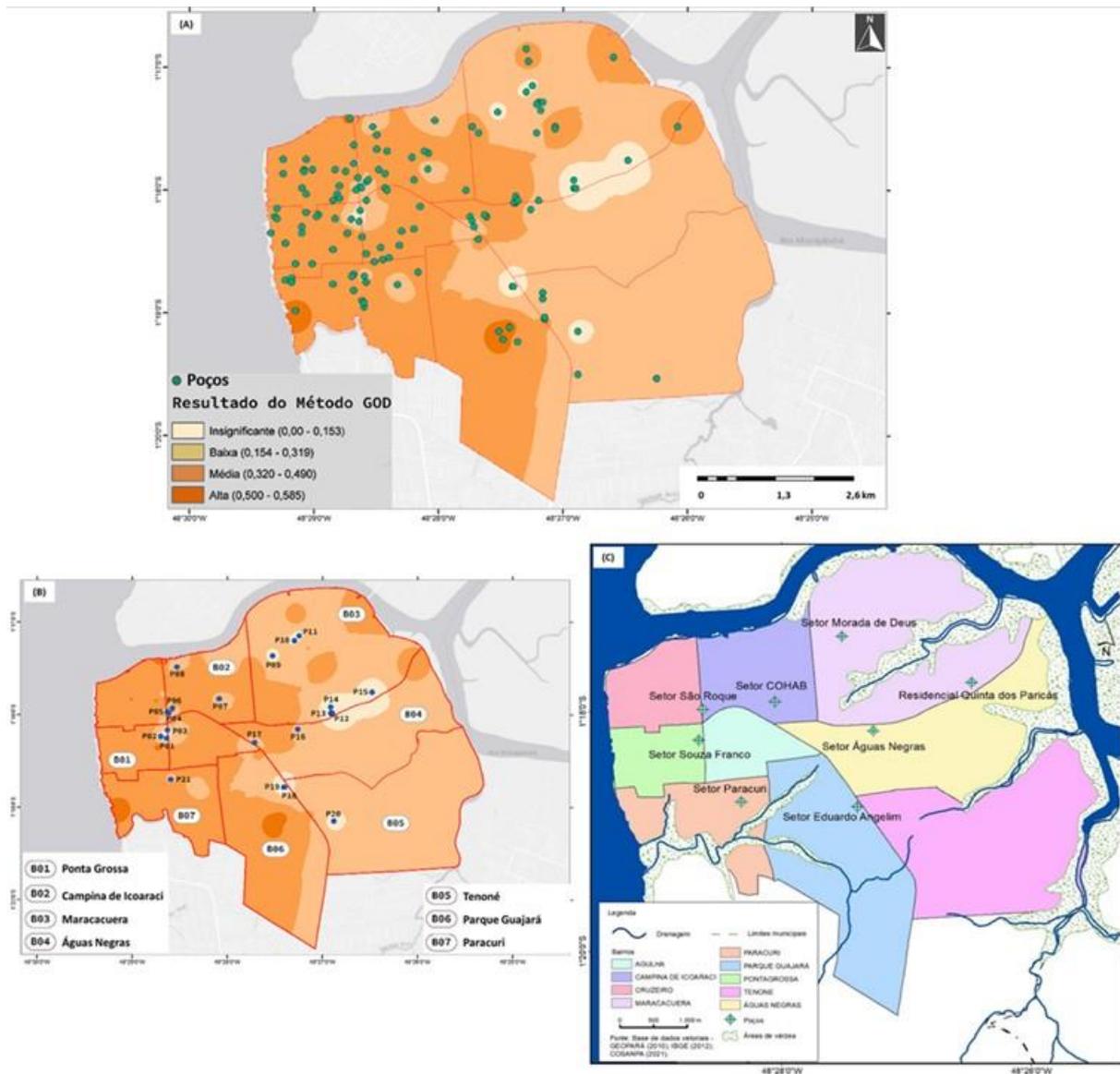
A aplicação do método GOD resultou na distribuição da Figura 4. Onde o percentual obtido foi de: 8% de vulnerabilidade alta (10 poços), 12% baixa (15 poços), 16% insignificante (21 poços) e 64% de média vulnerabilidade (83 poços).

Na área em que são encontrados os poços de característica confinados e semiconfinados, com cobertura de argilas e argilas arenosas, e de maior profundidade (filtro do método), resultam os valores de vulnerabilidade baixa ou de insignificante. A vulnerabilidade média é representada por aquíferos do tipo livre, areias média, fina e muito fina e areno-argilosas, bem como distâncias do topo ao nível freático entre 1 e 20 m. As áreas de vulnerabilidade alta apresentam as mesmas características de grau de confinamento e aproximadamente a mesma litologia que as áreas de média vulnerabilidade, se distinguindo pela distância do topo ao nível freático, de no máximo 5 m.

Ressalta-se um fator associado a representação por meio da interpolação de valores: a presença de faixas de menor adensamento de poços, onde predominam os valores interpolados. Assim, a melhoria da qualidade e quantidade dos dados, pode resultar em mudanças de comportamento. O grau de incerteza destas áreas é inversamente proporcional ao número de poços usados como parâmetro, um zoneamento refinado será possibilitado com a continuidade da amostragem e sua melhor distribuição geográfica em uma malha mais regular. A realização de estudos de vulnerabilidade natural dos aquíferos é de grande importância para que sejam evitadas a alocação de sistemas de abastecimento de água para fins de abastecimento público em áreas que tenham alta vulnerabilidade natural, pois isso poderia elevar o risco de ocorrências de contaminação.

Desta forma, o estudo de vulnerabilidade natural do aquífero é útil para propiciar uma boa gestão e melhor aproveitamento dos recursos hídricos subterrâneos, bem como a alocação mais adequada de sistemas de abastecimentos público de água. Entretanto, deve-se ter o aporte de outras informações e estudos para garantir a eficiente tomada de decisão dos gestores públicos e as ações dos demais atores sociais envolvidos no uso e no gerenciamento das águas subterrâneas.

Figura 4 - (A) Mapa de distribuição de vulnerabilidades à contaminação. (B) Áreas prioritárias para futuras perfurações de poços. (C) Setorização da região.



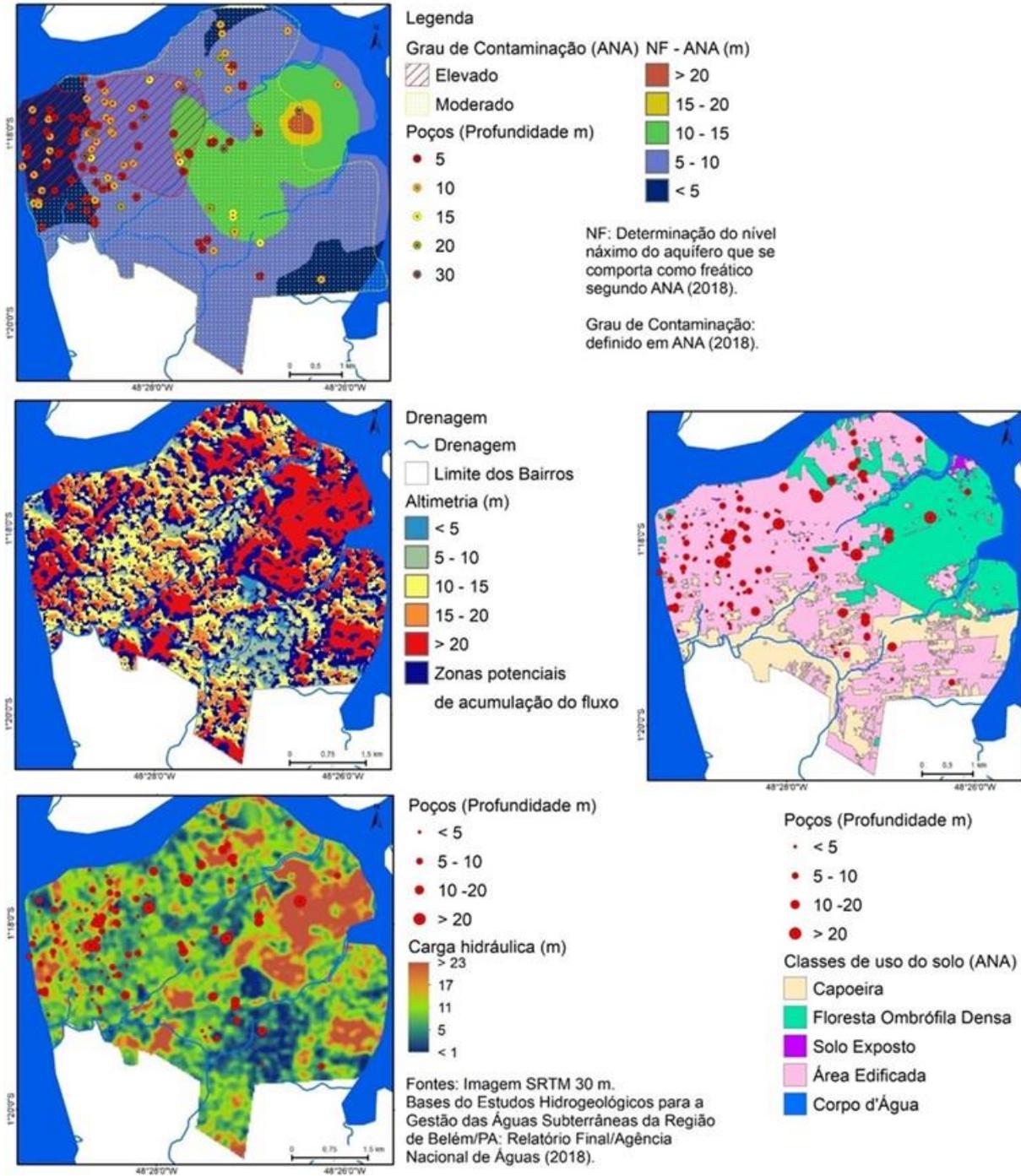
Fonte: Autores (2021).

Na Figura 4B é apresentada uma releitura da Figura 4A, em termos de necessidade de implantação de poços, segundo os setores de abastecimento (Figura 4C), para melhoria da distribuição de água na área, assim como com vistas a maior segurança em termos de vulnerabilidades. O zoneamento obtido foi compatível com o mapeamento de Brasil (2018) como pode ser observado na Figura 5.

O grau de contaminação identificado por Brasil (2018) foi equivalente ao obtido pelo GOD aplicado. O nível mais elevado é coincidente com a área urbanizada, e com áreas de retenção do fluxo superficial.



Figura 5 - Aspectos do mapeamento realizado por Brasil (2018), associados a base de informações elaborada.



Fonte: Adaptado da ANA (BRASIL, 2018) - Estudos Hidrogeológicos Para a Gestão das Águas Subterrâneas da Região de Belém (PA).



Utilizando os dados de 1026 poços cadastrados no SIAGAS, Brasil (2018, p. 43) estabeleceu “uma correlação da altitude do terreno versus cota do nível estático, confirmando a existência de uma superfície freática controlada pela altitude do terreno, típica de aquíferos livres” (aproximadamente 88%). Esta gerou a equação 2, onde, X= altitude do terreno (m) e Y= carga hidráulica (m): $Y = 0,8951 X - 3,407$ (eq. 2).

Por meio da Equação 2 e da altimetria definida para o terreno, foi calculada a carga hidráulica, onde as zonas mais vulneráveis voltam a coincidir com os locais de maior adensamento de poços de até 10 m de profundidade e adensamento urbano. Neste contexto, é possível avaliar os pontos destacados por Maria (2018, p. 1):

- A vulnerabilidade avaliada ressalta o comportamento do aquífero relativo à contaminação, vinculado as condições geológicas e hidrogeológicas, visando retratar a resposta ao “processo de absorção e tempo de deslocamento do fluído contaminante”; “a dinâmica do escoamento do fluído contaminante na zona saturada”; e “a concentração residual do contaminante ao atingir a zona saturada”.

- O mapeamento com base em técnicas de geoprocessamento, possibilita a melhoria continuada das informações, incluindo o adensamento urbano e o aumento do número de poços processados.

- E o método GOD é mais adequado para levantamentos de menor escala de detalhamento, sendo um sistema clássico para avaliação rápida da exposição do aquífero à contaminação.

Segundo estimativas o Distrito de Icoaraci teria aproximadamente 167.035 mil habitantes integrando a área de maior adensamento da Região Metropolitana de Belém (RMB) nos últimos anos (RAMOS; COSTA, 2019). Adotando-se o parâmetro definido pela Organização das Nações Unidas (ONU), onde cada pessoa necessitaria de 3,3 m³/pessoa/mês (cerca de 110 litros de água por dia), a região teria um consumo de cerca de 551 mil m³/pessoa/mês. Brasil (2019) enquadra estes valores como ainda de menor consumo, quando comparados com outras capitais do país, porém em Belém não existe um sistema de coleta de esgoto eficiente para a totalidade da população, dado que pode ser observado pelas estatísticas do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), indicando que este consumo não retorna ao sistema com qualidade para o reaproveitamento e ainda favorecendo o desperdício de água.

A carência na infraestrutura de saneamento básico e de saneamento *in situ* são fatores que podem influenciar diretamente as águas subterrâneas. Estudos conduzidos na Região Metropolitana de Belém apontam que o alto índice pluviométrico e o decorrente incremento potencial da infiltração de efluentes domésticos através do sistema de saneamento *in situ*, podem ser fontes potenciais de contaminação do aquífero Barreiras (CABRAL; LIMA, 2006; GAMA *et al.*, 2013; RAMOS; COSTA, 2019), principalmente por compostos nitrogenados e cloreto (HIRATA; FERREIRA, 2001).

A localização estuarina do Distrito e o ambiente de várzea amazônica reforçam a necessidade de se desenvolver diretrizes de gestão com base no ambiente local, com destaque para um sistema de tratamento de águas residuais e monitoramento da poluição costeira; sendo essencial a atualização do cadastro de poços pelas agências estaduais de gerenciamento da água, e em paralelo e de maneira continuada a realização de programas de educação ambiental pública sobre a poluição da água e conscientização sobre a gestão das águas subterrâneas (SEKAR *et al.*, 2023).

A aplicação do método GOD permite adotar uma escala de prioridade para a gestão das águas subterrâneas de forma a minimizar o impacto da urbanização, principalmente nas áreas potenciais de recarga (RUKMANA *et al.*, 2019). Fraga *et al.* (2013), Oroji (2018a) e Fannakh e Farsang (2022), na análise comparativa com outros métodos, principalmente com o



DRASTIC, destacam que de acordo com as abordagens, a interpretação da vulnerabilidade de uma determinada região vai variar com os critérios e com os fatores de análise, sempre sendo dependentes do tipo das interações possíveis de serem mapeadas.

Connel e Van Den Daele (2003) e Moraru e Hannigan (2017) discutem a necessidade de avanços técnicos para resolver o problema da análise de vulnerabilidade das águas subterrâneas, pela sua dependência da qualidade e da quantidade da informação do poço (construtiva e hidrogeológica). Estes valorizam o uso de métodos estatísticos e de simulação, principalmente pela limitação dos vários índices adotados, que apresentam dificuldades de diferenciar a variabilidade de comportamento dos fatores contaminantes. Taghavi *et al.* (2022) complementam com a proposição de uma avaliação híbrida, com uma análise estatística, de superposição de indicadores e de processos, onde as várias probabilidades aplicadas, podem ser continuamente atualizadas com novos dados, facilitando o processo futuro de tomada de decisão. De forma geral, identificar os pontos vulneráveis à contaminação de um aquífero consiste o primeiro passo para sua proteção, pois, a partir desse é possível delinear áreas de proteção, bem com traçar metas e definir critérios para seu melhor gerenciamento, mediante controle no uso e ocupação do solo e na locação de poços em áreas adequadas (FOSTER *et al.*, 2013).

CONCLUSÃO

O estudo da vulnerabilidade natural da água subterrânea no Distrito de Icoaraci mostrou que 64% da área tem vulnerabilidade média e cerca de 12% possuem vulnerabilidade baixa. Isso já evidencia um sinal de alerta para essas áreas de média vulnerabilidade. O método GOD é passível de uso em uma dimensão com menor detalhamento, desta forma sugere-se que as áreas de média e alta vulnerabilidade sejam aplicadas com métodos mais abrangentes para obtenção de resultados mais detalhados.

Como recomendações que se pode apresentar em função dos resultados apresentados indicamos: instalação de sistemas de tratamento adequado de efluentes domésticos (coleta e tratamento) bem como de deposição de resíduos sólidos; realização de estudos da evolução de poluição pelo uso errôneo de fossas sépticas e agentes químicos; e nas áreas classificadas de extrema, elevada e de moderada vulnerabilidade à contaminação, devem ser tomadas várias precauções, para evitar que haja infiltração de efluentes de fossas sépticas, chorume proveniente de depósitos de lixo a céu aberto e aterros sanitários, vazamento de tanques de postos de gasolina e outros.

Como a maioria do Distrito está inserido em área de moderada vulnerabilidade, deve ser ampliado o serviço de abastecimento público de água para que a população não utilize fonte alternativa (poços) para abastecimento sem nenhum tratamento, e com riscos à saúde. E dada a condição estuarina da região, o uso de poços com abastecimento direto do lençol freático deve ser observado, dada a susceptibilidade do ambiente à contaminação pelos efeitos do desflorestamento e lançamento de efluentes diretamente no ambiente sazonalmente alagado.

REFERÊNCIAS

AKINLALU, A. A.; MOGAJI, K. A.; ADEBODUN, T. S. Assessment of aquifer vulnerability using a developed “GODL” method (modified GOD model) in a schist belt environ, Southwestern Nigeria. **Environmental Monitoring and Assessment**, 193:199, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-08960-z>



- ALLER, L.; BENNETT, T.; LEHR, J. H.; PETTY, R. J.; HACKETT, G. DRASTIC: a standardised system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. **US-EPA Report**, n. 600/2-87-035, p. 38-57, 1987.
- ANA. Catálogo de Metadados da ANA. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/home>.
- BANKS, D.; KARNACHUK, O. V.; PARNACHEV, V. P.; HOLDEN, W.; FRENGSTAD, B. Groundwater contamination from rural pit latrines: examples from Siberia and Kosova. **Journal of the Chartered Institution of Water and Environmental Management**, v. 16, n. 2, p. 147-152, 2002. <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2002.tb00386.x>
- BORGHETTI, N. R. B.; BORGHETTI, J. R.; ROSA FILHO, E. F. **Aquífero Guarani: a verdadeira integração dos países do Mercosul**. Curitiba, 2004, 214 p.
- BOUFEKANE, A.; SAIGHI, O. Assessment of groundwater pollution by nitrates using intrinsic vulnerability methods: A case study of the Nil valley groundwater (Jijel, North-East Algeria). **African Journal of Environmental Science and Technology**, v. 7, n. 10, p. 949-960, 2013. <https://doi.org/10.5897/AJEST2013.1428>
- BRASIL. Agência Nacional de Águas (ANA). **Estudos Hidrogeológicos Para a Gestão das Águas Subterrâneas da Região de Belém/Pa: Relatório Final**. Volume 2, Agência Nacional de Águas, Elaboração e Execução: Profill Engenharia e Ambiente S.A., Brasília: ANA, 2018.
- BRASIL. **Atualiza o Marco Legal do Saneamento Básico** (Lei Federal n. 14.026, de 15/07/2020). Brasília (DF): Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), 2020.
- BRASIL. **Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil**. Brasília: Agência Nacional de Águas (ANA), 2019, 75 p.
- BRASIL. **Política Nacional de Recursos Hídricos - PNRH** (Lei Federal n. 9.433, de 08/01/1997). Brasília (DF): Agência Nacional de Águas, 1997.
- CABRAL, N. M. T.; LIMA, L. M. Comportamento hidrogeoquímico das águas do aquífero Barreiras nos bairros centrais de Belém, Pará. **Ciências Naturais**, v. 1, n. 1, p. 149-166, 2006.
- CONNEL, L. D.; VAN DEN DAELE, G. A quantitative approach to aquifer vulnerability mapping. **Journal of Hydrology**, v. 276, n. 1-4, p. 71-78, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00038-6](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00038-6)
- DIAS, M. B.; SILVA, M. J. B. O Distrito de Icoaraci e sua inserção no contexto urbano e regional amazônico. In: Encontro Latinoamericano de Geografia, 12, Montevideo. Anais... Montevideo: Unión Geográfica Internacional/EGAL, p. 01-09, 2009.
- FANNAKH, A.; FARSANG, A. DRASTIC, GOD, and SI approaches for assessing groundwater vulnerability to pollution: a review. **Environmental Sciences Europe**, v. 34, v. 77, 2022. <https://doi.org/10.1186/s12302-022-00646-8>
- FELDKIRCHER, T.; LÖBLER, C. A.; SILVÉRIO DA SILVA, J. L. Aplicação do sistema GOD para determinar a vulnerabilidade natural das águas subterrâneas do município de Teutônia (RS). **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 18, p. 1137 - 1145, 2014. <http://dx.doi.org/10.5902/2236117013860>
- FOSTER, S. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. **TNO Proc. Inf.**, v. 38, p. 69-86, 1987.



FOSTER, S.; HIRATA, R. **Groundwater pollution risk assessment**: a methodology using available data. WHO-PAHO/HPE-CEPIS Technical Manual, Lima, Peru, 1988.

FOSTER, S.; HIRATA, R.; ANDREO, B. The aquifer pollution vulnerability concept: aid or impediment in promoting groundwater protection. **Hydrogeology Journal**, v. 21, 2013.

FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. **Underground water quality protection**: a guide for water utilities, municipal authorities and environment agencies. Washington DC, USA: World Bank Publication, 2002.

FRAGA, C. M.; FERNANDES, L. F. S.; PACHECO, F. A. L.; REIS, C.; MOURA, J. P. Exploratory assessment of groundwater vulnerability to pollution in the Sordo River Basin, Northeast of Portugal. **REM: Revista Escola de Minas**, v. 66, n. 1, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0370-44672013000100007>

GAMA, R. M. M. F.; LIMA, A. M. M.; BORDALO, C. A. L.; NUNES, M. C. G. A implantação de clusters na Amazônia: Revisão legal e avaliação dos aspectos administrativos e ambientais do distrito industrial de Icoaraci/Belém-PA. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego**, p. 159-179, 2013.

GUETTAIA, S.; HACINI, M.; BOUDJEMA, A.; ZAHROUNA, A. Vulnerability assessment of an aquifer in an arid environment and comparison of the applied methods: case of the mio-plio-quadernary aquifer. **Energy Procedia**, v. 119, p. 482-489, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.057>.

HAERTLE, A. Method of working and employment of EDP during the preparation of groundwater vulnerability maps. **Groundwater in Water Resources Planning**, v. 142, p. 1073-1085, 1983.

HERNANDEZ, P. G. L.; ATHAYDE, G. B.; ATHAYDE, C. V. M.; LICHT, O. A. B. Efeito da interpolação de dados hidrogeológicos em aquíferos sedimentares: estudo de caso no estado do Paraná. **Águas Subterrâneas**, v. 35, n. 1, p. 1-11, 2021. <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v35i1.29911>

HIRATA, R. C. A.; FERREIRA, L. M. R. Os aquíferos da bacia hidrográfica do alto Tietê: disponibilidade hídrica e vulnerabilidade à poluição. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 31, n. 1, p. 43-50, 2001.

IMBIRIBA JÚNIOR, M.; NOGUEIRA, A. C. R.; SENA, C.; GÓES, A. M.; BANDEIRA, J.; SOARES, J. L.; ROJAS, L. E. G.; NOGUEIRA, A. A. E.; KIRCHHEIM, R.; SUNDAL, A. Hydrostratigraphic redefinition of the subsurface from eastern Amazonian coast, Brazil: The Marajó aquifer. In: IAH Congress, 47, 2021. Proceedings ... São Paulo (SP): ABAS, 2021.

MARIA, R. Comparative studies of groundwater vulnerability assessment. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 118, n. 1, article 012018, 2018.

MENESES, L. F. Elaboração de Mapa de Vulnerabilidade dos Aquíferos Superiores no Município de João Pessoa - PB, Através de Técnicas de Geoprocessamento. **Revista Tecnologia**, v. 30, n. 1, p. 123-132, 2016.

MORARU, C.; HANNIGAN, R. Overview of Groundwater Vulnerability Assessment Methods. **Analysis of Hydrogeochemical Vulnerability**, p. 01-16, 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-70960-4_1



- NOGUEIRA, A. C. R.; AMORIM, K. B.; GÓES, A. M.; TRUCKENBRODT, W.; PETRI, S.; NOGUEIRA, A. A. E.; BANDEIRA, J.; SOARES, J. L.; BAÍA, L. B.; IMBIRIBA JÚNIOR, M.; BEZERRA, I. S.; RIBAS, C. C.; CRACRAFT, J. Upper Oligocene-Miocene deposits of Eastern Amazonia: Implications for the collapse of Neogene carbonate platforms along the coast of northern Brazil. **Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology**, v. 563, p. 110178-19, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2021.110799>
- OROJI, B. Assessing groundwater vulnerability by pollution mapping in Iran: Case study Hamadan - Bahar plain. **Geofísica Internacional**, v. 57, n. 3, p. 161-174, 2018b.
- OROJI, B. Groundwater vulnerability assessment using GIS-based DRASTIC and GOD in the Asadabad plain. **Journal of Materials and Environmental Sciences**, v. 9, n. 6, p. 1809-1816, 2018a. <https://doi.org/10.26872/jmes.2018.9.6.201>
- RAMOS, E. A. S.; COSTA, L. M. G. Icoaraci, entre o antigo e o novo: apontamentos sobre a centralidade urbana e a representação social na metrópole de Belém. In: Simpósio Nacional de Geografia Urbana, 16, Vitória. Anais ... Vitória (ES): Universidade Federal do Espírito Santo, p. 981-1000, 2019.
- REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B. TUNDISI, J. G. **Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. 2. ed. São Paulo: Escrituras, 2002.
- RUKMANA, B. R. S.; BARGAWA, W. S.; CAHYADI, T. A. Assessment of Groundwater Vulnerability Using GOD Method. **IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science**, 477, 01, 2020. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/477/1/012020>
- SEKAR, S.; KAMARAJ, J.; POOVALINGAM, S.; DURAISAMY, R.; SENAPATHI, V.; SANG YONG, C. Appraisal of Groundwater Vulnerability Pollution Mapping Using GIS Based GOD Index in Tiruchendur, Thoothukudi District, India. **Water**, 15, 520, 2023. <https://doi.org/10.3390/w15030520>
- STEMPVOORT, D. V.; EWERT, L.; WASSENAAR, L. Aquifer Vulnerability INDEX: a GIS - compatible method for groundwater vulnerability mapping. **Canadian Water Resources Journal**, v. 18, n. 1, p. 25-37, 1993. <https://doi.org/10.4296/cwrj1801025>
- TAAZZOUZTE, M.; GHAFIRI, A.; LEMACHA, H.; EL MOUTAKI, S. Study of Intrinsic Vulnerability to Pollution by the GOD-Foster Method: Application to Temara Groundwater (Morocco). **Journal of Geoscience and Environment Protection**, v. 8, p. 129-145, 2020. <https://doi.org/10.4236/gep.2020.88010>
- TAGHAVI, N.; NIVEN, R. K.; PAULL, D. J.; KRAMER, M. Groundwater vulnerability assessment: A review including new statistical and hybrid methods. **Science of The Total Environment**, v. 822, n. 20, 153486, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153486>

HISTÓRICO

Submetido: 12 de fevereiro de 2023.

Aprovado: 08 de junho de 2023.

Publicado: 09 de junho de 2023.

DADOS DO(S) AUTOR(ES)

Layla Maria Monteiro Gomes de Barros

Mestre pela Universidade Federal do Pará (UFPA). Servidora da Companhia de Saneamento do Pará (COSANPA), Belém, Pará, Brasil. Endereço para correspondência: Av. José Bonifácio, 417, São Brás, Belém, Pará, Brasil, 66063-075.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1604-3219>.



Lattes: <http://lattes.cnpq.br/7852990560873555>.

E-mail: laylamaria.gomes@gmail.com.

Aline Maria Meiguins de Lima

Doutora pela Universidade Federal do Pará (UFPA). Docente da Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém, Pará, Brasil.
Endereço para correspondência: R. Augusto Corrêa, 01, Guamá, Belém, Pará, Brasil, 66075-110.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0594-0187>.

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6572852379381594>.

E-mail: ameiguins@ufpa.br.

COMO CITAR O ARTIGO - ABNT

BARROS, L. M. M. G.; LIMA, A. M. M. Uso potencial e vulnerabilidade das águas subterrâneas em áreas de expansão urbana: Distrito de Icoaraci, Belém, Pará. **Revista GeoUECE**, Fortaleza (CE), v. 12, n. 22, e202302, 2023. <https://doi.org/10.59040/GEOUECE.2317-028X.v12.n22.e202302>