

## **AValiação DO RISCO POTENCIAL DE CONTAMINAÇÃO COM FOCO NA CAPTAÇÃO EM POÇOS UTILIZADOS PARA ABASTECIMENTO PÚBLICO E DOMÉSTICO NA PLANÍCIE COSTEIRA DO RIO GRANDE DO SUL**

**Suzy Darley de Lima**

Universidade Federal do Rio Grande do Sul,  
Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Porto Alegre, RS, Brasil  
[suzyd.lima@gmail.com](mailto:suzyd.lima@gmail.com)

**Pedro Antonio Roehe Reginato**

Universidade Federal do Rio Grande do Sul,  
Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Porto Alegre, RS, Brasil  
[pedro.reginato@ufrgs.br](mailto:pedro.reginato@ufrgs.br)

**Alfonso Rizzo**

Universidade Federal do Rio Grande do Sul,  
Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Porto Alegre, RS, Brasil  
[alfonso.rizzo@ufrgs.br](mailto:alfonso.rizzo@ufrgs.br)

### **RESUMO**

A água subterrânea é essencial para o abastecimento público e doméstico, exigindo estudos que subsidiem sua proteção. Este estudo avaliou a vulnerabilidade e o risco potencial de contaminação no Sistema Aquífero Costeiro do Rio Grande do Sul, com foco nas áreas de captação. A metodologia combinou os métodos GOD, para determinar a vulnerabilidade dos aquíferos, e POSH, para classificar o potencial de carga contaminante, considerando os perímetros de proteção microbiológica definidos para poços tubulares e ponteira. Os métodos selecionados têm boa adequação a contextos com dados limitados e integram características hidrogeológicas e pressões antrópicas. Foram analisados 53 poços nos litorais norte e médio, considerando seus perímetros de proteção. Os resultados indicaram predomínio de vulnerabilidade alta e média, especialmente em áreas urbanas com solos arenosos. Cerca de 46 captações apresentaram fontes de contaminação dentro de seus perímetros, destacando-se postos de combustíveis, oficinas e áreas com baixa cobertura de esgoto (20,44%). Mais de 50% dos poços apresentaram risco moderado a alto. Os resultados devem ser interpretados considerando limitações associadas ao uso de dados secundários, a inferências hidrogeológicas e à análise restrita aos perímetros. Os métodos permitiram identificar áreas prioritárias, reforçando a necessidade de gestão integrada, ampliação do saneamento e monitoramento contínuo.

**Palavras-chave:** Vulnerabilidade. Gestão qualitativa. Métodos GOD e POSH.

### **ASSESSMENT OF THE POTENTIAL RISK OF CONTAMINATION FOCUSING ON WATER INTAKE FROM WELLS USED FOR PUBLIC AND DOMESTIC WATER SUPPLY IN THE COASTAL PLAIN OF RIO GRANDE DO SUL**

### **ABSTRACT**

Groundwater plays a crucial role in public and domestic water supply, requiring studies that support its protection. This study assessed the vulnerability and potential contamination risk of groundwater in the coastal aquifer system of Rio Grande do Sul, focusing on water abstraction areas. The GOD method, to evaluate aquifer vulnerability, and the POSH method, to classify the potential contaminant load, considering microbiological protection perimeters for tube wells and well points. Were selected due to their suitability for data-scarce environments and their ability to integrate hydrogeological characteristics and anthropogenic pressures. A total of 53 wells located in the northern and middle coastal regions were analyzed. Results showed a predominance of high and medium vulnerability, especially in urban areas and with sandy soils. Approximately 46 wells presented contamination sources within their protection zones, including fuel stations, mechanical workshops, and areas with low sewage coverage (20.44%). More than 50% of the wells were classified as having moderate to high contamination risk. The results should be interpreted considering limitations related to secondary data, indirect hydrogeological inference, and the spatial restriction to protection perimeters. Nevertheless, the methods

proved effective in identifying priority areas, highlighting the need for integrated management, improved sanitation, and continuous groundwater monitoring.

**Keywords:** Vulnerability. Qualitative management. GOD and POSH methods.

## INTRODUÇÃO

A água subterrânea é essencial para o abastecimento humano, agrícola e industrial, além de contribuir para os ecossistemas e o desenvolvimento socioeconômico. No litoral do Rio Grande do Sul, a captação ocorre predominantemente por poços ponteira e poços tubulares no Sistema Aquífero Costeiro (SAC), composto por unidades aquíferas livres e semiconfinadas formadas por depósitos arenosos recentes e antigos. Apesar de sua relevância, esse tipo de abastecimento desperta preocupações quanto à vulnerabilidade e ao risco à contaminação antrópica, especialmente em áreas com ausência ou ineficiência de saneamento básico.

O conceito de vulnerabilidade de aquíferos consolidou-se a partir da década de 1980 com o desenvolvimento de metodologias voltadas à sua quantificação, como os métodos DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) e GOD (Foster & Hirata, 1988). Essas abordagens incorporam variáveis hidrogeológicas, como tipo de aquífero, litologia, profundidade do nível freático e características da zona não saturada, permitindo avaliar a suscetibilidade à contaminação. Neste estudo, a vulnerabilidade constitui a base para a análise do risco potencial em áreas de captação por poços, com foco na zona de influência direta das captações.

A vulnerabilidade aquífera expressa a suscetibilidade do sistema à contaminação (Foster & Hirata, 1993), e é influenciada pela atenuação do solo, profundidade do nível d'água e presença de camadas confinantes. Em aquíferos livres, explorados por poços ponteira, a ausência de proteção natural e a baixa profundidade do lençol freático favorecem a infiltração de contaminantes, situação agravada em áreas sem rede de esgoto, onde sistemas individuais de disposição de efluentes contribuem para a recarga contaminada (Trindade, 2022).

O índice GOD destaca-se pela simplicidade e aplicabilidade em contextos com limitação de dados, baseando-se em três parâmetros: grau de confinamento do aquífero (G), características da zona não saturada (O) e profundidade do nível d'água (D). A combinação dos fatores resulta em vulnerabilidade insignificante a extrema. Aplicações em diferentes regiões brasileiras, como Ceará (Araújo *et al.*, 2017), Rio Grande do Norte (Diniz Filho *et al.*, 2015; Vasconcelos *et al.*, 2018); Alagoas (Silva, 2013) e em Canoas no Rio Grande do Sul (Feron e Reginato, 2014) demonstram sua eficiência na identificação de áreas suscetíveis, contribuindo para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos subterrâneos.

No litoral do Rio Grande do Sul, estudos recentes evidenciam a elevada vulnerabilidade do Sistema Aquífero Costeiro, especialmente nas áreas de aquífero livre, enquanto aquíferos confinados e semiconfinados apresentam menor suscetibilidade à contaminação (Barbosa, 2023; Trindade, 2022; Camargo, 2016). Além disso, foram identificados riscos potenciais moderados a elevados, associados principalmente à maior densidade de poços e às atividades agropecuárias.

Em escala internacional, destaca-se a importância da avaliação de riscos em sistemas de abastecimento por águas subterrâneas, com ênfase na identificação de fontes de contaminação em áreas de captação (Chique, *et al.*, 2020). Estudos recentes também reforçam que a integração entre vulnerabilidade aquífera e uso do solo é essencial para a gestão sustentável desses recursos (Yuan, *et al.*, 2024), consolidando abordagens metodológicas como DRASTIC e GOD na análise da suscetibilidade à contaminação (Foster e Hirata, 1988; Aller, *et al.*, 1987).

Além da vulnerabilidade intrínseca, a avaliação do risco potencial de contaminação requer a consideração das fontes de poluição da carga contaminante associada às atividades humanas. Segundo Foster *et al.* (2006), o risco resulta da interação entre a vulnerabilidade do aquífero e o potencial de carga contaminante, que pode ser classificado pela metodologia POSH (*Pollutant Origin Surcharge Hydraulically*). Essa abordagem diferencia fontes pontuais, como postos de combustíveis, cemitérios e áreas industriais, e fontes difusas, como fossas sépticas e atividades agrícolas, permitindo identificar áreas mais críticas.

A combinação dos métodos GOD e POSH, associada à análise do uso e ocupação do solo, fornece uma visão abrangente da segurança das captações subterrâneas. Nesse sentido, a definição de perímetros de proteção de poços (PPP) é uma estratégia recomendada por diversos autores (Guedes Junior, 2005;

Bofill, 2021 e Lima, 2025), visando estabelecer áreas de restrição de uso e controlar atividades potencialmente poluidoras próximas às captações.

Diante desse panorama, o estudo da vulnerabilidade e do risco potencial de contaminação no litoral do Rio Grande do Sul é essencial para subsidiar políticas públicas de gestão e conservação das águas subterrâneas. No entanto, observa-se uma lacuna no entendimento de como a variabilidade construtiva das captações, contrastando o uso predominante de poços ponteira, mais rasos e expostos, com poços tubulares profundos, influencia a segurança hídrica em áreas de urbanização acelerada.

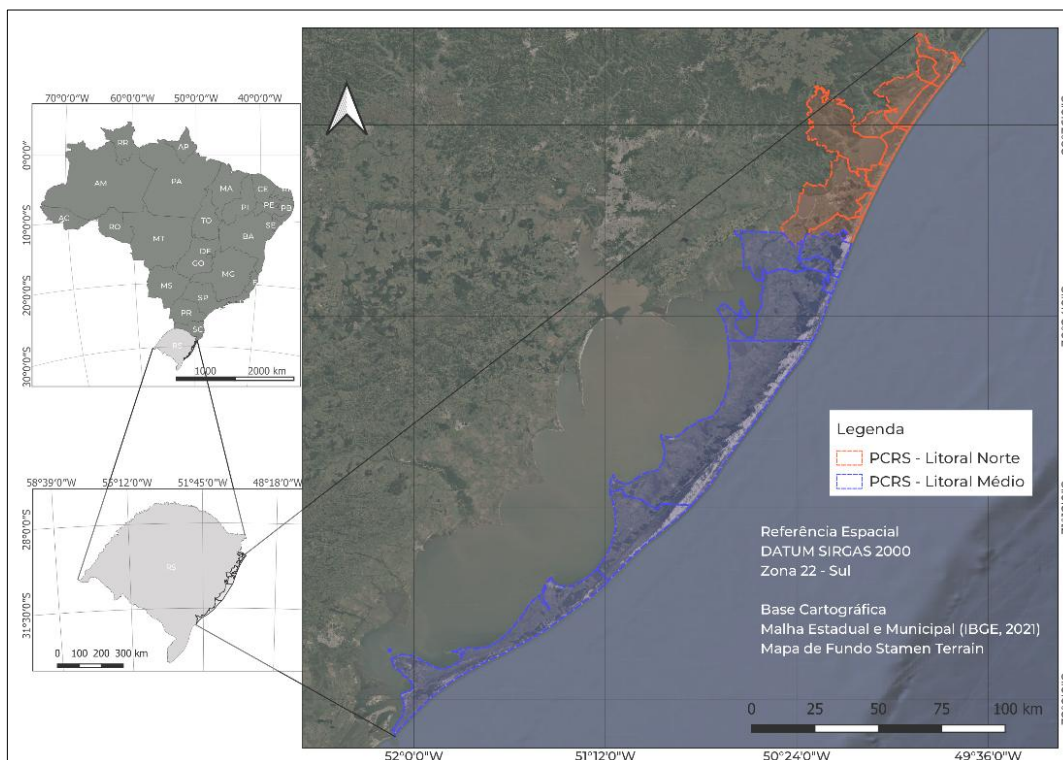
A compreensão das condições hidrogeológicas locais, aliada à aplicação integrada dos métodos GOD e POSH, permite preencher essa lacuna ao correlacionar a proteção natural dos aquíferos com as pressões antropogênicas específicas da região. Dessa forma, a pesquisa não apenas aplica modelos teóricos, mas gera dados sobre o risco real a que estão submetidas as comunidades litorâneas que dependem exclusivamente de soluções individuais de abastecimento e esgotamento, orientando ações preventivas e o uso sustentável dos recursos hídricos costeiros.

## MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo foi desenvolvido na área de ocorrência do SAC, localizado na Planície Costeira do Rio Grande do Sul (PCRS), com extensão aproximada de 33.000 km<sup>2</sup>, caracterizada por depósitos sedimentares arenosos, siltsos e argilosos, com ocorrência de matéria orgânica (turfas). A morfologia local é composta predominantemente por terras baixas e depressões formadas por água doce, localizadas na borda litorânea e conhecidas como ambientes lagunares (Villwock & Tomazelli, 1995).

A área específica da pesquisa abrange o litoral médio e norte da planície costeira, compreendendo os municípios de São José do Norte a Torres, totalizando aproximadamente 406 km de extensão e 7.738,655 km<sup>2</sup> de área (Figura 1). As análises concentraram-se nos poços que captam água do SAC, englobando tanto poços tubulares quanto do tipo ponteira, utilizados para o abastecimento público e doméstico.

Figura 1 - Planície Costeira do Rio Grande do Sul (RS): área de estudo, 2023



Fonte: Os autores, 2023.

Primeiramente, foi realizado um levantamento das informações referentes aos poços de abastecimento público existentes na área de estudo. Essa etapa envolveu uma revisão bibliográfica e documental de

estudos prévios realizados na região, com o objetivo de compreender as características hidrogeológicas locais e reunir subsídios técnicos para o desenvolvimento da pesquisa.

Em seguida, foram reunidos dados provenientes de diversas fontes institucionais, incluindo a Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN), o Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS), a Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura (SEMA) e o banco de dados de projetos desenvolvidos pelo Grupo de Pesquisas Águas Subterrâneas do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH).

A integração das fontes exigiu avaliação crítica da consistência e compatibilidade dos dados. Embora o uso de bases institucionais e acadêmicas garanta uma ampla cobertura amostral, foram identificadas limitações relacionadas à precisão do posicionamento geográfico e à variabilidade na descrição dos perfis litológicos e construtivos dos poços. Para mitigar essas limitações e reduzir a incerteza nos modelos de vulnerabilidade, procedeu-se a uma etapa de filtragem e validação cruzada, descartando-se registros inconsistentes ou incompletos.

Além disso, foram consultadas empresas de perfuração de poços, que disponibilizaram informações sobre perfis geológicos, construtivos e parâmetros técnicos de poços ponteira, incluindo espessura de filtros, profundidades médias e vazões. Esse levantamento permitiu compreender os padrões construtivos predominantes e a heterogeneidade dos poços utilizados na região.

Com base no conjunto de informações, foi elaborado um banco de dados específico dos poços que captam água no SAC, excluindo-se aqueles associados a outros sistemas aquíferos, como o Serra Geral e o Guarani. Dados duplicados foram consolidados em um único cadastro, priorizando-se as informações mais recentes e completas. O banco de dados final inclui variáveis como coordenadas geográficas dos poços; natureza da captação; uso da água; situação dos poços (ativo, inativo, abandonado etc.); dados construtivos e litológicos; informações hidrogeológicas e resultados de análises de água, quando disponíveis.

Após a triagem e a consolidação dos dados, foram selecionados 53 poços (36 tubulares e 17 ponteira), destinados ao abastecimento público e doméstico com base na integridade das informações e na localização geoespacial. A vulnerabilidade na captação foi determinada pelo método GOD (Foster e Hirata, 1988), que considera três parâmetros: G (*Groundwater occurrence*), grau de confinamento da água subterrânea (confinado, semiconfinado ou livre); O (*Overall lithology of the unsaturated zone*), caracterização do aquífero quanto a litologia, porosidade e permeabilidade e o parâmetro D (*Depth to water table*), profundidade do nível freático, obtida a partir dos níveis estáticos registrados nos poços.

O produto entre as variáveis determina o índice de vulnerabilidade ( $GOD = G \times O \times D$ ). A atribuição de pesos iguais aos parâmetros segue a concepção original do método, validada para aquíferos sedimentares por Foster *et al.* (2002), e justifica-se pela homogeneidade geológica regional, onde a profundidade do nível d'água e a natureza dos sedimentos de cobertura exercem influência equivalente na proteção do recurso. As classes de vulnerabilidade do aquífero variam de insignificante a extrema, quanto mais próximo a 1, maior a vulnerabilidade do meio aquífero.

Os mapas temáticos utilizados na determinação dos parâmetros foram obtidos junto a instituições oficiais, como CPRM/SGB (escala 1:250.000) e IBGE (escala 1:50.000 para solos e 1:250.000 para bases cartográficas) e processados em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG). Foram utilizados mapas de solos, geologia e hidrogeologia integrados aos pontos de captação. As análises espaciais e o processamento dos dados foram realizados por meio de software QGIS (versão 3.22 "Białowieża"), de acesso livre, enquanto os cálculos estatísticos e tabulações foram desenvolvidos em planilhas eletrônicas no software Microsoft Excel.

Foi elaborado um inventário das atividades potenciais de contaminação na área definida pelo perímetro de proteção para cada tipo de poço, incluindo fontes pontuais (disposição de resíduos sólidos, efluentes domésticos, postos de combustíveis, oficinas mecânicas, lava-rápidos, cemitérios, indústrias e lagoas de estabilização) e fontes difusas (atividades agropecuárias e áreas de saneamento *in situ*). Os perímetros de proteção dos poços foram obtidos do estudo realizado por Lima (2025).

Para a classificação das atividades com potencial poluidor também foram consideradas as diretrizes da Resolução CONSEMA nº 372/2018, a mesma utilizada pela Fundação Estadual de Proteção Ambiental (FEPAM-RS) para determinação das atividades licenciáveis, capazes de causar algum tipo de degradação ambiental.

Os dados foram obtidos através de trabalhos realizados anteriormente na região, de levantamento de dados junto à FEPAM e análise de imagens (Google Earth 2025). As informações foram organizadas em banco de dados e espacializadas em ambiente SIG, permitindo a correlação entre as fontes e os

poços de captação. Para o mapeamento das fontes difusas, foi utilizado o MapBiomas 2023 (Coleção 8.0), complementado com análise visual de imagens de alta resolução espacial do catálogo Google Earth (sensores Maxar e Airbus), com datas de passagem correspondentes ao período de 2023 a 2025.

A identificação e a classificação das fontes potenciais de contaminação próximas às áreas de captação foram realizadas com base no método POSH (*Pollutant Origin Surcharge Hydraulically*), conforme proposto por Foster *et al.* (2006). Esse método diferencia as fontes de poluição segundo a origem do poluente e sua sobrecarga hidráulica, produzindo três níveis qualitativos de potencial de contaminação: reduzido, moderado e elevado. Essa classificação, aplicada as fontes difusas de contaminação sob a ótica do seu potencial de impacto na qualidade da água subterrânea, encontra-se sistematizada na Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação e mapeamento das fontes de contaminação difusas – POSH

| POTENCIAL DE CARGA CONTAMINANTE DE SUBSOLO | FONTE DE CONTAMINAÇÃO                                                                          |                                                                                                                                                                                            |
|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                            | saneamento <i>in situ</i>                                                                      | práticas agrícolas                                                                                                                                                                         |
| <b>Elevado</b>                             | cobertura da rede de esgoto inferior a 25% e densidade populacional superior a 100 pessoas/ha. | culturas comerciais intensivas, geralmente monoculturas em solos bem drenados, em climas úmidos ou com baixa eficiência de irrigação, pasto intensivo em campos intensamente fertilizados. |
| <b>Moderado</b>                            | intermediário entre elevado e reduzido.                                                        |                                                                                                                                                                                            |
| <b>Reduzido</b>                            | cobertura da rede de esgoto superior a 75% e densidade populacional inferior a 550 pessoas/ha. | rotação das culturas, terra para pasto extensivo, sistemas de cultivo ecológico, plantações com alta eficiência de irrigação em regiões áridas e semiáridas.                               |

Fonte: Foster *et al.*, 2002 e 2006. Elaboração: os autores, 2025.

Na Tabela 2 é apresentada a classificação das fontes pontuais de contaminação, elaborada a partir do sistema POSH, que ranqueia os diferentes tipos com base em seu potencial de impacto sobre a qualidade da água subterrânea.

Tabela 2 - Classificação e ranqueamento das fontes de contaminação pontuais – POSH

| POTENCIAL DE GERAR CARGA CONTAMINANTE NO SUBSOLO | FONTES DE CONTAMINAÇÃO                                                                                 |                                                                                              |                                                                                                     |                                                                                           |                                                               |
|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
|                                                  | deposição de resíduos sólidos                                                                          | áreas industriais*                                                                           | lagoas de águas residuais                                                                           | outras (urbanas)                                                                          | mineração e exploração de petróleo                            |
| <b>Elevado</b>                                   | resíduo industrial tipo 3, resíduo de origem desconhecida                                              | indústria tipo 3 ou qualquer atividade que manuseie >100 kg/d de produtos químicos perigosos | todos os resíduos industriais tipo 3, qualquer efluente (exceto esgoto residencial) se a área >5 ha |                                                                                           | operações em campos de petróleo, mineração de metais          |
| <b>Moderado</b>                                  | chuva >500 mm/a com resíduos residenciais/agroindustriais/industriais tipo 1, ou todos os demais casos | indústria tipo 2                                                                             | esgoto residencial se a área >5 ha, demais casos não relacionados acima ou abaixo                   | postos de gasolina, vias de transporte com tráfego regular de produtos químicos perigosos | algumas atividades de mineração/extração de materiais inertes |
| <b>Reduzido</b>                                  | Chuva <500 mm/a com resíduos residenciais/agroindustriais/                                             | indústria tipo 1                                                                             | águas residuais residenciais, mistas, urbanas, agroindustriais e de mineração de não                | cemitérios                                                                                |                                                               |

| POTENCIAL DE GERAR CARGA CONTAMINANTE NO SUBSOLO                                                           | FONTES DE CONTAMINAÇÃO                                                                                                                                                          |                    |                           |                  |                                    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------------------------|------------------|------------------------------------|
|                                                                                                            | deposição de resíduos sólidos                                                                                                                                                   | áreas industriais* | lagoas de águas residuais | outras (urbanas) | mineração e exploração de petróleo |
|                                                                                                            | industriais tipo 1                                                                                                                                                              |                    | metálicos                 |                  |                                    |
| * solos contaminados de indústrias abandonadas devem ter a mesma classificação que a da própria indústria. |                                                                                                                                                                                 |                    |                           |                  |                                    |
| Indústrias Tipo 1:                                                                                         | madeireiras, manufaturas de alimentos e bebidas, destilarias de álcool e açúcar, processamento de materiais não metálicos.                                                      |                    |                           |                  |                                    |
| Indústrias Tipo 2:                                                                                         | fábricas de borracha, fábricas de papel e celulose, indústrias têxteis, fábricas de fertilizantes, usinas elétricas, fábricas de detergente e sabão.                            |                    |                           |                  |                                    |
| Indústrias Tipo 3:                                                                                         | oficinas de engenharia, refinarias de gás/petróleo, fábricas de produtos químicos/farmacêuticos/plásticos/pesticidas, curtumes, indústrias eletrônicas, processamento de metal. |                    |                           |                  |                                    |

Fonte: Foster *et al.*, 2002 e 2006. Elaboração: os autores, 2025.

A avaliação do risco potencial de contaminação das águas subterrâneas foi conduzida conforme a metodologia de Foster e Hirata (1993), a qual considera a interação entre a vulnerabilidade intrínseca do aquífero e a carga contaminante existente.

Neste estudo, a análise foi restrita à área definida pelo perímetro de proteção dos poços de captação, não abrangendo todo o sistema aquífero regional. O mapa de vulnerabilidade, obtido a partir do método GOD, foi cruzado com os dados de carga contaminante derivados do inventário POSH, resultando na classificação do perigo potencial dentro do perímetro de proteção dos poços, conforme definido por Lima (2025).

As fontes de contaminação foram ponderadas de acordo com seu potencial de alterar a qualidade da água e causar impactos à saúde humana. A correlação entre a vulnerabilidade (insignificante a extrema) e o potencial da carga contaminante (reduzido a elevado) permitiu a classificação final dos poços, por meio da matriz do risco de contaminação, adaptada de Barbosa *et al.* (2011), com a classificação final de cinco categorias de risco potencial: desprezível, baixo, moderado, alto e extremo.

A abordagem integrada possibilitou identificar as zonas críticas de risco, subsidiando ações de gestão e proteção das captações no SAC. Contudo, reconhece-se que o método POSH possui caráter qualitativo e não contempla a quantificação da carga contaminante, devido à escala do mapeamento e da indisponibilidade de dados detalhados sobre efluentes e poluentes no solo. A respeito dessa limitação, a abordagem qualitativa é tecnicamente consistente para o zoneamento de áreas prioritárias, ao estabelecer uma hierarquia de perigo que orienta ações preventivas.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base nas informações extraídas e interpretadas do banco de dados, foram selecionados 53 poços, sendo 36 tubulares e 17 ponteira, todos destinados ao abastecimento doméstico e urbano de uso coletivo. Observou-se que 11 poços não apresentavam descrição explícita de uso, entretanto, por serem de responsabilidade da Prefeitura ou da Corsan, foram incluídos na análise dos critérios de vulnerabilidade, considerando a possibilidade de também contribuírem para o abastecimento urbano.

Ressalta-se como limitação formal deste estudo, a dificuldade de obtenção de dados técnicos padronizados para os poços do tipo ponteira. Devido à predominância de sua instalação de forma informal e à carência de registros detalhados em cadastros oficiais, as informações sobre esses poços foram tratadas predominantemente de forma descritiva.

De modo geral, os poços do tipo ponteira apresentaram escassez de informações detalhadas sobre o perfil geológico e construtivo. Entre os 11 poços com dados disponíveis, as profundidades variaram entre 9,5 e 22 m, evidenciando predominância de camadas de areia fina, intercaladas com solo arenoso e areia quartzosa de granulometria fina nas porções superiores, e camadas aquíferas arenosas na base. A presença de argila no topo foi registrada em poucos casos.

Os poços tubulares com perfis construtivos descritos apresentaram profundidades entre 14 e 180 m, com predominância de sedimentos arenosos acima da primeira seção filtrante, em especial camadas de areia fina e média, seguidas por poços que exibiam camadas principais de argila.

A distribuição espacial dos poços contempla os seguintes municípios: Osório (5 poços), Tramandaí (2), Capivari do Sul (2), Balneário Pinhal (9), Palmares do Sul (4), Mostardas (12), Tavares (1), São José do Norte (15), Cidreira (2) e Torres (1). Os mapas finais foram elaborados para avaliar a vulnerabilidade das captações subterrâneas, sendo posteriormente extrapolados para o perímetro de proteção de cada poço, conforme a definição dos raios apresentados nos estudos de Lima (2025).

O parâmetro G, no método GOD, classifica os aquíferos segundo o grau de confinamento, com valores variando de 0,1 a 1,0. Os valores entre 0,5 e 1,0 foram atribuídos aos aquíferos livres, com ou sem cobertura, e definidos conforme a presença de elementos capazes de atenuar a contaminação, como camadas de sedimentos sobre a primeira seção filtrante e o nível estático da água.

A avaliação da cobertura dos aquíferos não confinados considerou a espessura e o tipo de litologia das camadas acima da zona saturada. Quando predominavam sedimentos mais permeáveis, favorecendo o fluxo de água subterrânea, atribuíram-se pesos mais elevados, próximos a 1,0. Para aquíferos semiconfinados, o peso foi 0,4, e para confinados, 0,2. Os critérios específicos utilizados na atribuição dos pesos encontram-se resumidos na Tabela 3.

Tabela 3 - Pesos do Parâmetro G

| Tipo de poço | Aquífero           | Características do material de cobertura | Peso  |
|--------------|--------------------|------------------------------------------|-------|
| Ponteira     | Livre              | Não confinado (NC)                       | 1,0   |
|              |                    | Não confinado coberto (NCC)              | 0,6*  |
|              | Semiconfinado (SC) | Silte, Argila arenosa                    | 0,4   |
| Tubular      | Livre              | Areia                                    | 1,0** |
|              |                    | Areia média e grossa                     | 0,9   |
|              |                    | Areia muito fina e fina                  | 0,8   |
|              |                    | Areia argilosa                           | 0,6   |
|              |                    | Argila arenosa                           | 0,4   |
|              | Confinado (C)      | Argila                                   | 0,2   |

\* Mapa Geológico – poço localizado em áreas com sedimentos lagunares (critério utilizado na ausência de perfil geológico e construtivo). \*\* Profundidade do 1º filtro < 20 m e NE próximo a superfície.

Fonte: Os autores, 2025.

Entre os poços tubulares com perfil construtivo, aqueles que captavam água de aquíferos livres, com primeira seção filtrante a menos de 20 m de profundidade e nível estático próximo à superfície, receberam peso 1,0. Poços com camadas de areia muito fina acima da seção filtrante receberam peso 0,8, enquanto a presença de areia argilosa reduziu o valor para 0,6.

Nos casos em que a primeira seção filtrante estava recoberta por camadas de argila arenosa, o poço foi considerado semiconfinado (peso 0,4); já os que possuíam camadas predominantemente argilosas, foram classificados como confinados (peso 0,2).

Os poços ponteira sem perfil construtivo foram considerados não confinados (peso 1,0), quando localizados em áreas de sedimentos lagunares, presumiu-se a presença de cobertura parcial, classificando-os como não confinados cobertos (peso 0,6).

Nos poços ponteira com perfis disponíveis, quando havia ocorrência de areia ao longo de todo o poço o peso atribuído foi 1,0; já a presença de camadas finas (silte ou argila arenosa) resultou em peso 0,4, caracterizando condição semiconfinado.

A análise dos valores de G (Figura 2) indica que a maioria dos poços estão associados a aquíferos livres ou pouco protegidos, resultando em maior suscetibilidade à contaminação. Os pesos atribuídos situaram-se, predominantemente, entre 0,6 e 1,0, abrangendo 65% dos poços tubulares e 88% dos poços tipo ponteira classificados com G=1,0. Os valores de G apresentaram média de 0,90, mediana 1,0 e desvio padrão de, aproximadamente, 0,12.

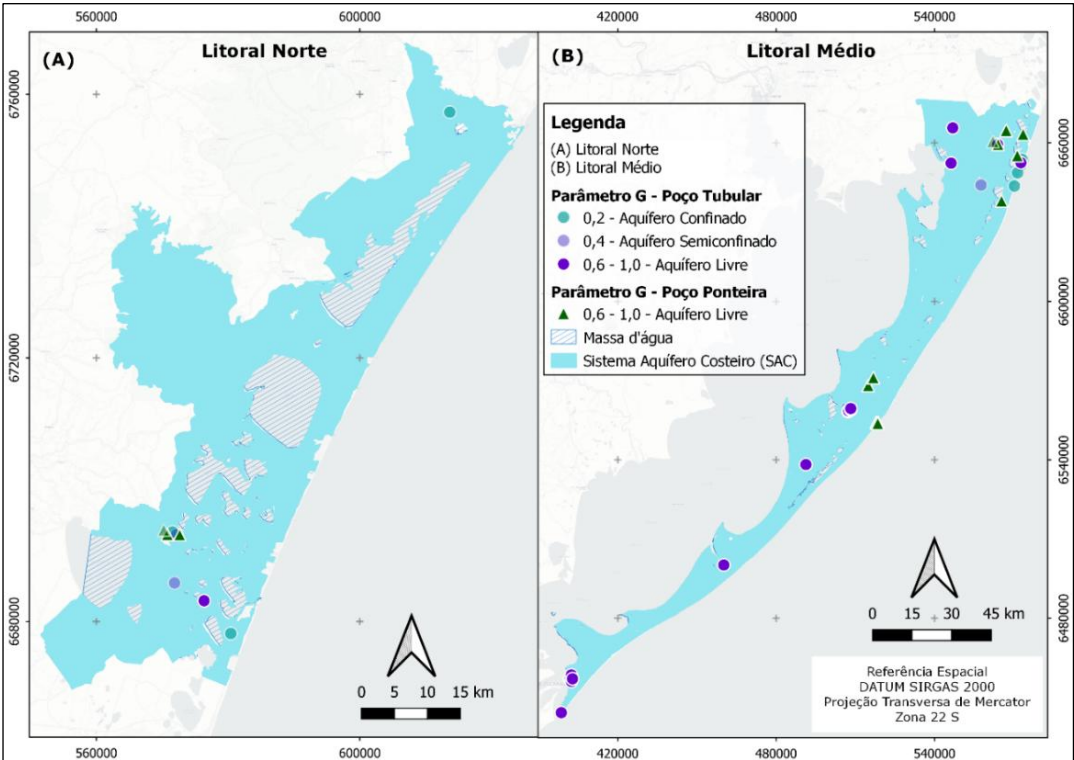
Em termos comparativos, a mediana superior à média indica concentração de valores elevados, com predominância de G=1,0, e uma distribuição levemente assimétrica para valores mais altos. Essa predominância reflete a ampla ocorrência de captações em aquíferos livres (não confinados e não

confinados cobertos), condição típica das formações arenosas superficiais observadas em grande parte da planície costeira.

O parâmetro O representa as características litológicas e estratigráficas da zona não saturada do aquífero, influenciando diretamente a porosidade e a permeabilidade dos materiais e, conseqüentemente, a infiltração e o transporte de contaminantes. Sua determinação baseou-se na interpretação das camadas de sedimentos presentes na zona vadosa ou na camada confinante. Os valores dos pesos atribuídos variam entre 0,4 e 1,0, sendo os menores associados a condições de menor risco e maior suscetibilidade.

Devido à ausência de perfis geológicos detalhados para a maioria dos poços ponteira, a litologia da zona não saturada foi inferida com base na localização dos poços no mapa geológico. Os pesos atribuídos (Tabela 4) variaram entre 0,4 e 0,7, conforme o tipo de depósito sedimentar predominante, em consonância com os critérios apresentados por Trindade (2022).

Figura 2 - Mapa do parâmetro G – Grau de confinamento da água subterrânea



Fonte: Os autores, 2025.

Tabela 4 - Pesos do Parâmetro O para poços ponteira

| Tipo de poço | Depósitos de Sedimentos                 | Peso |
|--------------|-----------------------------------------|------|
| Ponteira     | Depósitos de retrabalhamento eólico     | 0,7  |
|              | Depósitos eólicos                       | 0,7  |
|              | Depósitos de planície lagunar           | 0,5  |
|              | Depósitos de praias e cristas lagunares | 0,4  |
|              | Turfeiras                               | 0,4  |
|              | Depósitos praias eólicos                | 0,6  |

Fonte: Os autores, 2025.

Para os poços tubulares em aquíferos livres, os pesos do parâmetro O (Tabela 5) foram definidos segundo a granulometria e a composição dos sedimentos acima da primeira seção filtrante. Valores mais elevados

(0,8-0,7) foram atribuídos a sedimentos mais permeáveis (areia grossa e média), enquanto materiais mais finos ou argilosos receberam pesos menores (0,6-0,4).

Tabela 1 - Pesos do Parâmetro O para poços tubulares que captam água no aquífero livre

| Tipo de poço | Sedimentos              | Peso |
|--------------|-------------------------|------|
| Tubular      | Areia grossa            | 0,8  |
|              | Areia media             | 0,7  |
|              | Areia fina e muito fina | 0,6  |
|              | Areia argilosa          | 0,6  |
|              | Silte                   | 0,5  |
|              | Argila                  | 0,4  |

Fonte: Os autores, 2025.

Já os poços tubulares com seções filtrantes em aquíferos confinados ou semiconfinados tiveram seus pesos atribuídos considerando a litologia da camada confinante e das camadas sobrejacentes, conforme sintetizado na Tabela 6.

Tabela 6 - Pesos do Parâmetro O que captam água no aquífero confinado e semiconfinado

| Tipo de poço | Sedimentos     | Peso |
|--------------|----------------|------|
| Tubular      | Silte          | 0,5  |
|              | Argila arenosa | 0,5  |
|              | Argila         | 0,4  |

Fonte: Os autores, 2025.

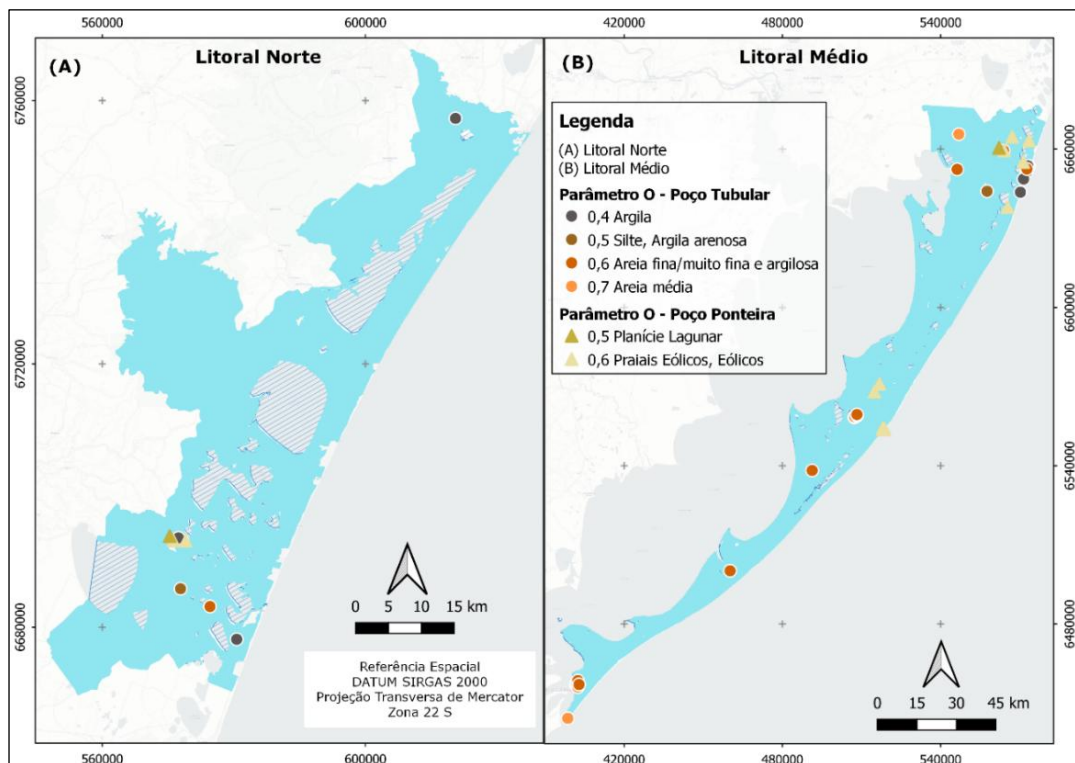
Na Figura 3 (parâmetro O), observou-se um potencial intermediário de suscetibilidade (valores entre 0,6 e 0,7) na maioria das captações. Essa condição foi verificada em 65% dos poços tubulares, com camadas de areia média a fina acima da seção filtrante, e em 88% dos poços ponteira, caracterizados por camadas de areia fina ao longo de toda a sua extensão. Tais materiais, por apresentarem alta permeabilidade e baixa capacidade de atenuação, contribuem para o maior potencial de contaminação das águas subterrâneas.

Entretanto, destaca-se que os resultados estão sujeitos a limitações da base de dados, pois a ausência de perfis geológicos detalhados para a maioria dos poços do tipo ponteira exigiu a inferência da zona não saturada a partir do mapa geológico, podendo influenciar a estimativa dos valores do parâmetro O. Ainda assim, os resultados são coerentes com o contexto hidrogeológico da área de estudo, caracterizado pela predominância de depósitos arenosos.

O parâmetro D refere-se à profundidade que um contaminante deve percorrer até atingir a zona saturada, relacionada ao nível estático da água (aquíferos livres) ou à espessura da camada confinante (aquíferos confinados). Conforme a metodologia GOD, foram adotados pesos de 0,9 para nível estático inferior a 5 m e 0,8 entre 5 e 20 m em aquíferos livres. Nos aquíferos confinados, os pesos variam de 0,9 (< 5 m) a 0,6 (> 50 m), decrescendo com o aumento da profundidade (Tabela 7). Esses valores refletem a relação inversa entre profundidade e vulnerabilidade da água subterrânea na captação, indicando maior proteção em condições mais profundas.

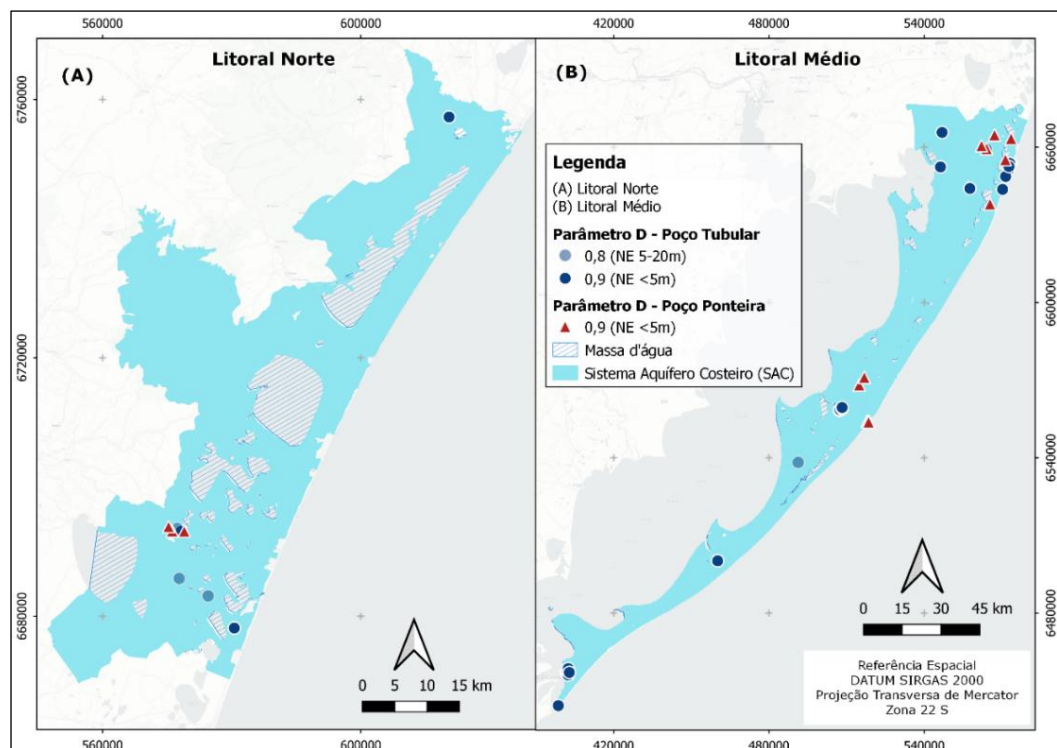
O parâmetro D apresentou valores elevados (0,9) na maioria dos casos (Figura 4), ocorrendo em 84% dos poços tubulares e em 100% dos ponteira, indicando níveis freáticos rasos e maior suscetibilidade ao contato com contaminantes provenientes de fontes superficiais. Essa configuração está associada a um maior risco potencial de contaminação, especialmente em áreas com fontes antrópicas. Estudos realizados no SAC têm evidenciado a ocorrência de nitrato e coliformes em aquíferos rasos, reforçando a relação entre profundidade do nível freático e risco efetivo à qualidade da água.

Figura 3 - Mapa do Parâmetro O – Ocorrência de estratos de cobertura do aquífero



Fonte: Os autores, 2025.

Figura 4 - Mapa do Parâmetro D – Distância até o aquífero



Fonte: Os autores, 2025.

Tabela 7 - Pesos do Parâmetro D para diferentes profundidades

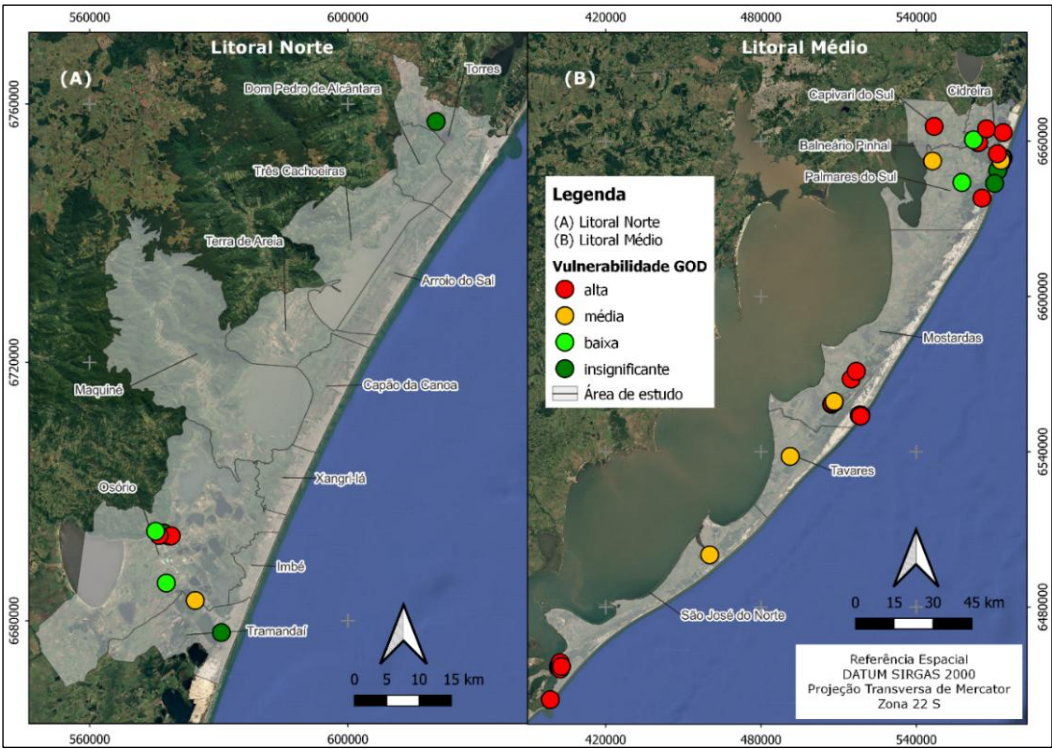
| Aquífero  | Profundidade (m)* | Peso |
|-----------|-------------------|------|
| Livre     | <5                | 0,9  |
|           | 5-20              | 0,8  |
| Confinado | <5                | 0,9  |
|           | 5-20              | 0,8  |
|           | 20-50             | 0,7  |
|           | >50               | 0,6  |

\* Nível estático (NE)

Fonte: Os autores, 2025.

A análise integrada dos parâmetros resultou na classificação dos poços (Figura 5), predominantemente localizados no Litoral Médio da PCRS, em áreas compostas por sedimentos arenosos praias, eólicos e cristas lagunares. Nesses locais, 41% das captações apresentaram alta vulnerabilidade, associada a aquíferos livres e camadas de areia média, fina e muito fina sobre a primeira seção filtrante. Esses poços exibiram níveis estáticos rasos (média de 2,3 m), e estão situados em áreas urbanas, o que aumenta a exposição a fontes de contaminação.

Figura 5 - Mapa de vulnerabilidade nas captações dos poços tubulares e ponteira – Método GOD



Fonte: Os autores, 2025.

Os índices médios de vulnerabilidade foram observados em 22% dos poços, predominantemente localizados em aquíferos não confinados cobertos, com camadas mais espessas de areia fina sobre o topo do aquífero. Esses poços estão instalados em ambientes urbanos e campestres, onde a presença de sedimentos de maior espessura proporciona moderada capacidade de atenuação.

Vulnerabilidade baixa (8%) e insignificante (30%) ocorreu em aquíferos semiconfinados e confinados, com camadas argilosas espessas acima da seção filtrante, que atuam como barreiras naturais à percolação de contaminantes, reduzindo o risco de impacto direto sobre a água subterrânea.

### **Comparação com estudos anteriores**

Os resultados obtidos são consistentes com os achados de Trindade (2022), que identificou predominância de vulnerabilidade média em 73% da área estudada no litoral norte da PCRS, abrangendo poços em aquíferos semiconfinados e confinados, enquanto os aquíferos livres apresentaram vulnerabilidade alta em 61% da área, nos municípios de Cidreira e Balneário Pinhal.

Entretanto, no presente estudo, observa-se maior concentração de valores elevados de vulnerabilidade associada a captações rasas. Essa convergência entre os resultados não é trivial, pois indica que o padrão de elevada vulnerabilidade em aquíferos livres não é um fenômeno localizado, mas sim uma característica estrutural da PCRS.

Barbosa (2023), ao estudar o Sistema Aquífero Quaternário Costeiro (SAQC) na porção oeste da planície, registrou índices de vulnerabilidade médio (12,31%), alto (81,76%) e extremo (5,93%), com maior suscetibilidade associada a níveis estáticos rasos e à ocorrência de gleissolos como estrato de cobertura. Esse alinhamento reforça a validade metodológica, mas evidencia uma limitação recorrente na literatura regional, a ausência de análises integradas entre vulnerabilidade e pressões antrópicas, como o uso e ocupação do solo, o que compromete a transição dos diagnósticos para ações preventivas concretas.

A análise dos poços ponteira revelou elevada suscetibilidade à contaminação, com 88% das captações classificadas como de vulnerabilidade alta, associada a sedimentos arenosos finos e níveis estáticos rasos. Cerca de 53% desses poços se concentram em áreas urbanas do município de Mostardas, enquanto os demais se distribuem entre Balneário Pinhal, Cidreira, Osório e Palmares do Sul, configurando um cenário crítico entre vulnerabilidade alta e adensamento urbano. A ausência de saneamento básico adequado potencializa o risco de contaminação, evidenciando uma lacuna recorrente na literatura quanto à integração entre vulnerabilidade e uso do solo para fins de planejamento territorial.

Situação semelhante foi descrita por Camargo (2016), que observou vulnerabilidade alta em poços ponteira localizados em regiões com atividades agropecuárias e de reflorestamento no município de Palmares do Sul (RS). Entretanto, a comparação entre os estudos evidencia que, embora os fatores hidrogeológicos sejam determinantes, o risco potencial de contaminação depende da interação com o uso e ocupação do solo, indicando que a vulnerabilidade, isoladamente, não é suficiente para explicar os padrões observados.

Em síntese, os resultados apontam que a maior vulnerabilidade das águas subterrâneas está associada a poços instalados em aquíferos livres, sedimentos arenosos finos a médios e níveis estáticos rasos, condições típicas da PCRS. Contudo, a análise evidencia que a interpretação desses padrões deve considerar limitações dos dados disponíveis, variações locais não capturadas e, principalmente, a influência das atividades antrópicas, que desempenham papel decisivo na materialização do risco de contaminação das águas subterrâneas.

### **Identificação das fontes potenciais de contaminação e do potencial de geração de carga contaminante**

Dos 53 poços selecionados para a avaliação dos perímetros de proteção, oito poços tubulares e três poços ponteira apresentaram fontes pontuais de contaminação localizadas dentro do perímetro de alerta calculado por Lima (2025). A identificação e classificação dessas fontes foram realizadas com base na Resolução CONSEMA nº 372/2018, que estabelece as atividades potencialmente causadoras de degradação ambiental e que, portanto, estão sujeitas ao licenciamento pela FEPAM.

O potencial de geração de carga contaminante das onze fontes identificadas foi determinado conforme a adaptação do método POSH (Foster *et al.*, 2006). Verificou-se que 45,5% das fontes apresentam potencial elevado de contaminação, 9% potencial moderado e 45,5% potencial reduzido (Tabela 8). Essas classificações consideram o tipo de atividade desenvolvida e o risco associado à manipulação, armazenamento ou disposição inadequada de substâncias químicas perigosas, expressando apenas o potencial de contaminação, não refletindo diretamente o impacto real na qualidade das águas subterrâneas.

Tabela 8 - Fontes pontuais dentro dos perímetros de proteção dos poços tubulares e ponteira

| Fontes potenciais de contaminação | Qt.       | Poço                                           | POSH | %          | Atividades que podem gerar contaminação subterrânea                                                              |
|-----------------------------------|-----------|------------------------------------------------|------|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Oficina mecânica                  | 1         | PT_BP_08561                                    | E    | 45,5       | manuseio de produtos químicos perigosos (óleos, graxas e solventes) (Raio=92m)                                   |
| Posto de combustível              | 2         | PP_OSO_25690<br>PT_TAV_09520                   | E    |            | armazenamento de combustíveis, alto risco de vazamentos (R=33m e R=118m)                                         |
| Lava-rápido                       | 2         | PT_CDS_09532<br>PT_SJDN_09559<br>PT_SJDN_09560 | E    |            | manuseio de produtos químicos perigosos (óleos, graxas e solventes), resíduos de lavagem (R=103m, R=46m e R=49m) |
| Concessionária de carros          | 1         | PP_OSO_25692                                   | M    | 9          | pode envolver manutenção leve, lavagem de veículos, lubrificantes (R=11m)                                        |
| Estação de tratamento de água*    | 2         | PT_CDS_09532<br>PT_SJDN_09556                  | R    | 45,5       | produtos químicos usados no tratamento (R=103m e R=87m)                                                          |
| Hotel / Pousada*                  | 3         | PP_BP_25662<br>PT_BP_08560<br>PT_CDS_09533     | R    |            | geração de efluentes (R=33m, R=100m e R=111m)                                                                    |
| <b>Total</b>                      | <b>11</b> |                                                |      | <b>100</b> |                                                                                                                  |

Potencial de gerar carga contaminante no subsolo – POSH: E=elevado; M=moderado; R=reduzido

\* Não incidência de licenciamento ambiental (CONSEMA-RS 372/2018).

Fonte: Os autores, 2025.

A ocorrência de contaminação depende da interação entre a carga poluidora, a vulnerabilidade do aquífero e as condições locais, como profundidade do nível freático e eficiência dos sistemas de controle. Assim, fontes de alto potencial podem não gerar impacto, enquanto atividades de baixo potencial podem degradar a água em áreas vulneráveis, especialmente em aquíferos rasos. Evidências regionais indicam contaminantes antrópicos, como nitrato, em áreas urbanizadas.

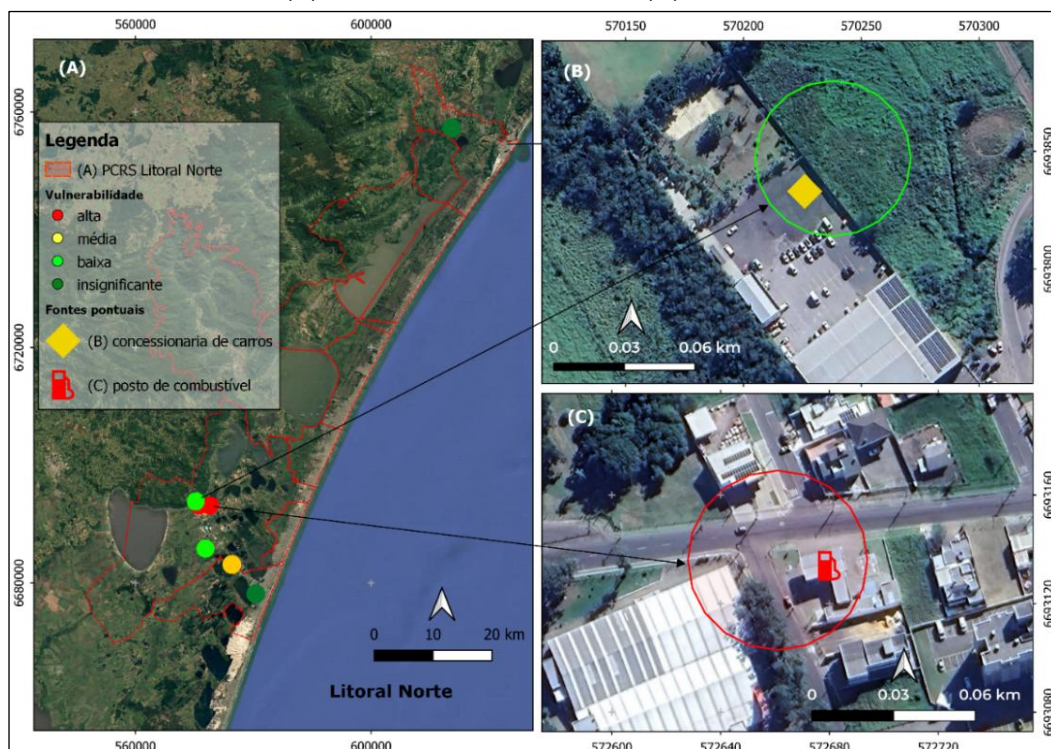
Nesse contexto, a análise integrada entre POSH, vulnerabilidade aquífera e uso do solo é essencial para uma avaliação mais realista do risco. Ademais, conforme a Resolução CONSEMA nº 372/2018, a gestão dessas áreas requer articulação entre diferentes instrumentos e órgãos fiscalizadores, especialmente em zonas de captação de água subterrânea.

Na Figura 6 é apresentada a distribuição das fontes pontuais identificadas dentro dos perímetros de proteção no litoral norte, enquanto a Figura 7 apresenta os resultados para o litoral médio. Em Osório, observou-se uma concessionária de veículos classificada com potencial moderado, situada em área de vulnerabilidade baixa, com presença de cobertura vegetal no entorno. Na mesma região, um posto de combustível com potencial elevado localiza-se em área de vulnerabilidade alta, inserida em zona densamente urbanizada.

No litoral médio, destacam-se diferentes contextos de risco. Em Balneário Pinhal, uma oficina mecânica de potencial elevado está em área de vulnerabilidade insignificante, mas cercada por ocupações residenciais. Em Tavares, um posto de combustível (potencial elevado) situa-se em área de vulnerabilidade média, inserido em ambiente urbano consolidado. Já em São José do Norte, um lava-rápido (potencial elevado) localizado dentro do perímetro de proteção de um poço classificado como de vulnerabilidade insignificante, reforçando a importância de controle preventivo mesmo em áreas consideradas menos suscetíveis.

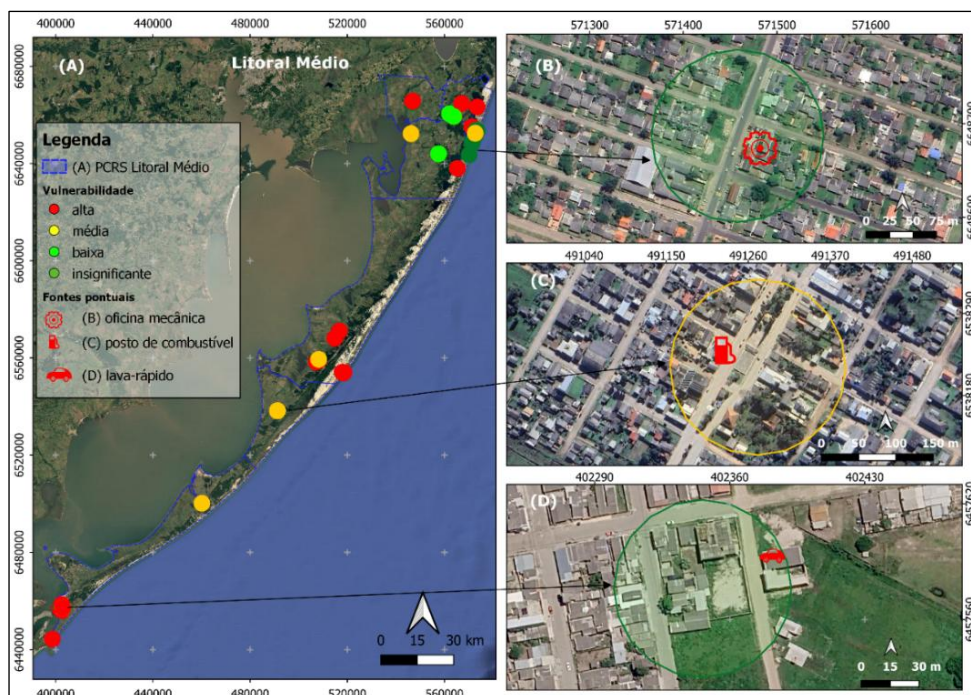
As Figuras 8 e 9 mostram a distribuição espacial das áreas com potencial difuso de contaminação segundo o método POSH (Foster *et al.*, 2006).

Figura 6 - Mapa de vulnerabilidade e identificação das fontes pontuais no litoral norte: (A) PCRS do Litoral Norte; (B) Concessionária de carros; (C) Posto de combustível



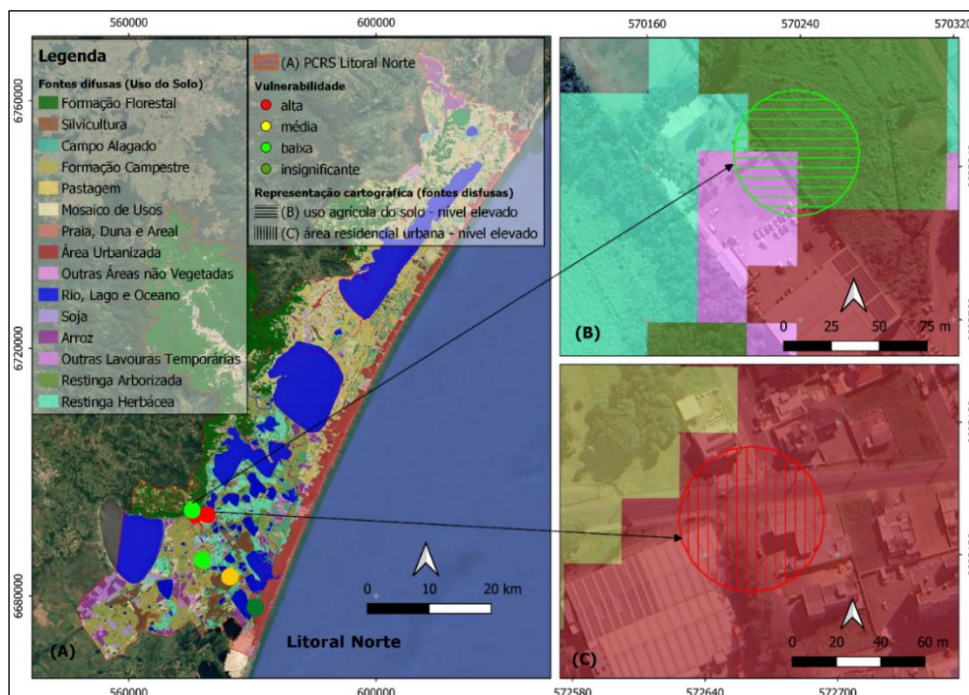
Fonte: Os autores, 2025.

Figura 7 - Mapa de vulnerabilidade e identificação das fontes pontuais no litoral médio: (A) PCRS do Litoral Médio; (B) Oficina mecânica; (C) Posto de combustível; (D) Lava-rápido



Fonte: Os autores, 2025.

Figura 8 - Mapa de uso do solo e identificação das fontes difusas no litoral norte



Fonte: Os autores, 2025.

O mapeamento foi realizado a partir dos dados do MapBiomas 2023 - Coleção 8.0, complementado com análise visual de imagens de satélite (Google Earth, 2025) possibilitando as análises das fontes difusas nos perímetros de proteção de 34 poços tubulares e 12 poenteira.

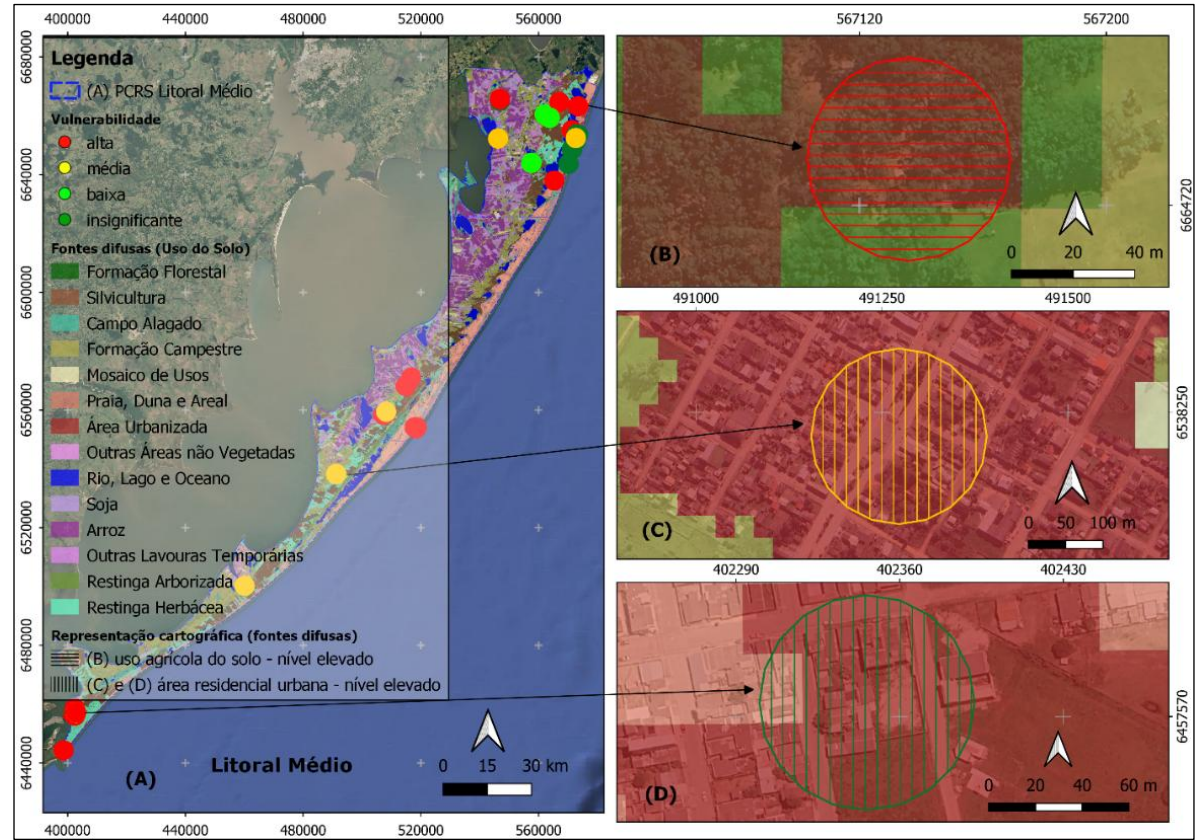
No litoral médio, observam-se áreas agrícolas (silvicultura) em zonas de vulnerabilidade alta, que evidencia risco de contaminação difusa por insumos agrícolas. Em áreas urbanas densamente ocupadas, classificadas como vulnerabilidade média, predominam usos residenciais e comerciais, que podem contribuir para a infiltração de efluentes e resíduos urbanos. Mesmo em zonas de vulnerabilidade insignificante, verificou-se a presença de ocupação urbana, reforçando a necessidade de monitoramento.

A Tabela 9 apresenta a distribuição percentual das classes de uso do solo dentro dos perímetros de proteção analisados, associados à classificação POSH. Observa-se que as áreas urbanizadas correspondem a aproximadamente 68% da área total, seguidas pelas áreas agropecuárias e de silvicultura, todas classificadas como de potencial elevado de geração de carga contaminante. Esse cenário indica que a maior parte das captações ocorre em ambientes sujeitos a pressões antrópicas intensas, o que eleva o risco de degradação da qualidade da água subterrânea.

Do ponto de vista prático, os resultados evidenciam a necessidade de fortalecer a gestão territorial nas áreas de proteção de poços, com controle de atividades potencialmente poluidoras e ampliação da fiscalização. Além disso, destaca-se a importância da integração entre políticas de recursos hídricos, planejamento urbano e saneamento básico, visando reduzir a carga contaminante nas áreas mais vulneráveis.

A análise do saneamento *in situ* (Tabela 10), baseada em dados do IBGE (2022), mostra que a cobertura média da rede de esgoto na área de estudo é de 20,44%, enquanto a densidade populacional média é de 157,45 hab/km<sup>2</sup>. Segundo o método POSH, áreas com cobertura inferior a 25% e densidade superior a 100 hab/km<sup>2</sup> são classificadas como de potencial elevado de contaminação, condição observada em grande parte dos municípios analisados.

Figura 9 - Mapa de uso do solo e identificação das fontes difusas no litoral médio: (A) PCRS do Litoral Médio; (B) Área agrícola; (C) e (D) Área residencial



Fonte: Os autores, 2025.

Tabela 9 - Percentual de uso do solo com relação aos perímetros de proteção e classificação POSH

| Uso do solo         | Área (m <sup>2</sup> ) | %             | POSH           |
|---------------------|------------------------|---------------|----------------|
| Área urbanizada     | 468.535,90             | 67,72         | E              |
| Agropecuária        | 6.392,10               | 4,91          | E              |
| Silvicultura        | 7.665,50               | 1,02          | E              |
| Formação campestre  | 67.902,90              | 9,06          | Não se aplica. |
| Praia, Duna e Areal | 63.296,20              | 8,44          |                |
| Restinga arborizada | 12.673,80              | 1,70          |                |
| Restinga herbácea   | 32.337,90              | 4,31          |                |
| Campo alagado       | 21.330,10              | 2,84          |                |
| <b>Total</b>        | <b>749.981,30</b>      | <b>100,00</b> |                |

Potencial de geração de carga contaminante no subsolo – POSH: E=elevado; M=moderado; R=reduzido.  
Fonte: Os autores, 2025.

Tabela 10 - Classificação das fontes difusas quanto ao saneamento *in situ*, classificação POSH

| Município              | Coleta de esgoto (%) | Fossa séptica (%) | Fossa rudimentar (%) | Outros* (%) | População | área km <sup>2</sup> | hab. / km <sup>2</sup> |
|------------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------|-----------|----------------------|------------------------|
| Dom Pedro de Alcântara | 0,55                 | 86,77             | 12,68                | 0           | 2.562     | 78,22                | 32,75                  |
| Torres                 | 45,59                | 41,06             | 12,46                | 0,89        | 41.751    | 161,18               | 259,03                 |
| Três Cachoeiras        | 12,8                 | 86,6              | 0,47                 | 0,13        | 10.962    | 251,48               | 43,59                  |
| Arroio do Sal          | 2,95                 | 91,02             | 5,73                 | 0,3         | 11.057    | 119,16               | 92,79                  |
| Balneário Pinhal       | 6,21                 | 44,07             | 49,16                | 0,56        | 14.955    | 102,39               | 146,06                 |
| Capão da               | 27,07                | 53,87             | 18,73                | 0,33        | 63.594    | 98,29                | 647,00                 |

| Município         | Coleta de esgoto (%) | Fossa séptica (%) | Fossa rudimentar (%) | Outros* (%) | População     | área km²      | hab. / km²    |
|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------|---------------|---------------|---------------|
| Canoa             |                      |                   |                      |             |               |               |               |
| Capivari do Sul   | 43,92                | 52,79             | 3,16                 | 0,13        | 3.991         | 412,89        | 9,67          |
| Cidreira          | 8,14                 | 74,84             | 16,8                 | 0,22        | 17.071        | 243,42        | 70,13         |
| Imbé              | 2,34                 | 94,24             | 3,3                  | 0,12        | 26.824        | 39,77         | 674,48        |
| Maquiné           | 4,58                 | 63,44             | 30,32                | 1,66        | 7.418         | 621,56        | 11,93         |
| Mostardas         | 54,96                | 32,97             | 10,76                | 1,31        | 12.090        | 1977,4        | 6,11          |
| Osório            | 49,65                | 45,87             | 3,84                 | 0,64        | 47.396        | 663,56        | 71,43         |
| Palmares do Sul   | 13,74                | 76,78             | 8,92                 | 0,56        | 12.844        | 949,2         | 13,53         |
| São José do Norte | 39                   | 60,02             | 0,5                  | 0,48        | 25.443        | 1110          | 22,92         |
| Tavares           | 25,86                | 63,04             | 11,03                | 0,07        | 5.212         | 610,11        | 8,54          |
| Terra de Areia    | 2,14                 | 82,64             | 15,17                | 0,05        | 10.334        | 142,28        | 72,63         |
| Tramandaí         | 14,94                | 77,6              | 7,16                 | 0,3         | 54.387        | 142,88        | 380,65        |
| Xangri-lá         | 13,54                | 43,06             | 42,78                | 0,62        | 16.463        | 60,80         | 270,77        |
| <b>Média</b>      | <b>20,44</b>         | <b>65,04</b>      | <b>14,05</b>         | <b>0,47</b> | <b>21.353</b> | <b>432,48</b> | <b>157,45</b> |

\*vala; rio, lago, córrego ou mar; outra forma.

Fonte: IBGE, censo 2022. Elaboração: os autores, 2025.

Além disso, cerca de 65% dos domicílios utilizam fossa séptica como sistema de tratamento individual. Embora esse tipo de sistema proporcione algum grau de tratamento, sua eficiência é limitada em solos arenosos e altamente permeáveis, predominantes na região. Evidências empíricas indicam que a ausência de manutenção adequada favorece a recarga contaminada, elevando os teores de nitrato na água subterrânea, comportamento semelhante ao descrito por Cavalcante *et al.* (2004) em estudos realizados no Ceará.

Diante desse contexto, a classificação de potencial elevado de contaminação atribuída à área de estudo não se restringe a uma estimativa teórica, sendo consistente com a presença de indicadores de impacto antrópico na qualidade da água subterrânea. Considerando os resultados gerais, dos 53 poços analisados, 46 apresentaram algum tipo de fonte pontual ou difusa de risco dentro de seus perímetros de proteção, reforçando a necessidade de ações preventivas, ampliação da cobertura de saneamento e gestão integrada para a proteção das captações e a segurança hídrica regional.

### **Análise do Risco Potencial de Contaminação das Águas Subterrâneas**

A avaliação do risco potencial de contaminação foi realizada a partir da metodologia de Foster e Hirata (1993), baseada na interação entre a vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos e o potencial poluidor das fontes de contaminação. Nesta pesquisa, a aplicação foi restrita aos perímetros de proteção dos poços, de modo que o risco foi estimado em relação à zona de influência direta das captações e não a dinâmica regional do aquífero, uma vez que não consideram processos em maior escala, como fluxos subterrâneos, conexões entre unidades aquíferas e a propagação de contaminantes além dos limites locais.

Assim, a análise desenvolvida deve ser interpretada como uma avaliação localizada do risco potencial, voltada à proteção imediata das captações, não sendo diretamente extrapolável para o conjunto do SAC.

A matriz de risco utilizada foi adaptada de Barbosa *et al.* (2011), também empregada por Trindade (2022) e Fritzen (2023) em estudos similares no SAC. No Quadro 1, são apresentados os resultados referentes aos 11 poços (8 tubulares e 3 ponteira) que têm fontes pontuais identificadas dentro de seus perímetros de proteção (conforme descrito na Tabela 8). A maioria desses poços encontra-se nas classes de vulnerabilidade alta (5) e insignificante (4), refletindo a heterogeneidade das condições hidrogeológicas e das pressões antrópicas observadas.

Ressalta-se que essa classificação constitui uma abordagem determinística simplificada. O nível de confiança da classificação varia conforme a disponibilidade e o detalhamento dos dados de uso do solo e das características hidrogeológicas locais, sendo considerado alto para áreas com dados consolidados e médio para áreas com inferência indireta, especialmente nos poços tipo ponteira.

Quadro 1 - Risco de contaminação da água subterrânea por fontes pontuais

| Risco de contaminação<br>Fontes Pontuais |                |             | Potencial de Contaminação                    |          |              |         |                                              |  |
|------------------------------------------|----------------|-------------|----------------------------------------------|----------|--------------|---------|----------------------------------------------|--|
|                                          |                |             | Reduzido                                     |          | Moderado     |         | Elevado                                      |  |
| Índice de Vulnerabilidade                | Insignificante |             | PT_BP_08560                                  |          |              |         | PT_BP_08561<br>PT_CDS_09532<br>PT_SJDN_09559 |  |
|                                          | Baixo          |             |                                              |          | PP_OSO_25692 |         |                                              |  |
|                                          | Médio          |             |                                              |          |              |         | PT_TAV_09520                                 |  |
|                                          | Alto           |             | PP_BP_25662<br>PT_CDS_09533<br>PT_SJDN_09556 |          |              |         | PP_OSO_25690<br>PT_SJDN_09560                |  |
|                                          | Extremo        |             |                                              |          |              |         |                                              |  |
|                                          | Risco:         | Desprezível | Baixo                                        | Moderado | Alto         | Extremo |                                              |  |

Fonte: Os autores, 2025.

### Risco associado às fontes pontuais

Os poços classificados na faixa de risco alto (área em vermelho claro) correspondem a 27% das captações analisadas. Essa classe reúne poços situados em áreas de alta vulnerabilidade média e carga elevada. Esses pontos representam situações críticas de risco ambiental, com potencial de transporte rápido de contaminantes para o aquífero, exigindo prioridade de gestão e medidas preventivas mais rigorosas, como delimitação de zonas de restrição de uso e monitoramento contínuo da qualidade da água.

A faixa de risco moderado (área azul) também abrange 27% dos poços avaliados. Apesar de apresentarem cargas reduzidas, a combinação com alta vulnerabilidade indica possibilidade de infiltração acelerada de contaminantes em caso de falhas estruturais ou eventos acidentais. Esses poços demandam atenção especial, principalmente em contextos urbanos densos e com baixa cobertura de saneamento.

Os poços classificados com risco baixo (36%, área verde claro) encontram-se em condições mais favoráveis, evidenciando proteção natural do aquífero devido à presença de camadas confinantes ou condições geológicas menos permeáveis. Contudo, o risco não é nulo, mudanças futuras no uso do solo, vazamentos ou danos nas estruturas de poço podem modificar o cenário atual. Assim, recomenda-se monitoramento periódico, embora com menor prioridade em relação às áreas críticas.

Por fim, os poços enquadrados na classe de risco desprezível (área cinza) representam baixa preocupação no curto prazo, mas ainda requerem controle do uso e ocupação do entorno para prevenir futuras pressões sobre o sistema aquífero.

### Risco associado às fontes difusas

No Quadro 2 é apresentado a matriz de risco de contaminação associada às fontes difusas, identificadas na Tabela 9, que inclui áreas urbanizadas com alta densidade populacional e baixa cobertura de esgoto, além de áreas agropecuárias e de silvicultura onde há potencial de uso de insumos agrícolas e ocorrência de recarga contaminada por percolação. A classificação é baseada em abordagem determinística simplificada, com nível de confiança maior para dados diretos e intermediário para inferências indiretas (poços tipo ponteira).

Quadro 2 - Risco de contaminação da água subterrânea por fontes difusas

| Risco de contaminação<br>Fontes Difusas |                | Potencial de Contaminação |          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |      |
|-----------------------------------------|----------------|---------------------------|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
|                                         |                | Reduzido                  | Moderado | Elevado                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |
| Índice de Vulnerabilidade               | Insignificante |                           |          | PT_PDS_02950 PT_BP_08558 PT_BP_08560 PT_BP_08561<br>PT_CDS_09532 PT_SJDN_09559 PT_TRA_17379 PT_OSO_26471<br>PT_SJDN_27005 PT_TOR_28460                                                                                                                                                                                                                          |      |
|                                         | Baixo          |                           |          | PP_OSO_25692 PT_BP_08557 PT_PDS_09515                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |      |
|                                         | Médio          |                           |          | PT_TAV_09520 PT_MOS_09529 PT_BP_21247 PT_PDS_21249<br>PT_TRA_25118 PT_OSO_25398 PT_SJDN_27401 PT_SJDN_27403                                                                                                                                                                                                                                                     |      |
|                                         | Alto           |                           |          | PP_MOS_25633 PP_MOS_25635 PP_MOS_25636 PP_MOS_25637<br>PP_MOS_25640 PP_MOS_25643 PP_OSO_25690 PP_OSO_25691<br>PP_PDS_25825 PP_BP_25814 PP_CID_25630 PT_MOS_09522<br>PT_MOS_09523 PT_MOS_09527 PT_CDS_09533 PT_SJDN_09556<br>PT_SJDN_09557 PT_SJDN_09558 PT_SJDN_09560 PT_SJDN_21195<br>PT_SJDN_21251 PT_SJDN_21252 PT_SJDN_27399 PT_SJDN_27400<br>PT_SJDN_27405 |      |
|                                         | Extremo        |                           |          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |      |
| Risco:                                  |                | Desprezível               | Baixo    | Moderado                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Alto |
|                                         |                |                           |          | Extremo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |

Fonte: Os autores, 2025.

Os resultados indicam que 25 poços se concentram em áreas de alta vulnerabilidade e carga elevada, o que caracteriza risco significativo de contaminação por fontes difusas com maior intensidade nos municípios de Mostardas (9 poços) e São José do Norte (10 poços). A ocorrência em outros municípios do litoral médio e norte evidencia a abrangência regional do problema e a necessidade de planejamento integrado entre abastecimento, uso do solo e saneamento.

Em alguns casos, observou-se sobreposição de fontes pontuais e difusas dentro do mesmo perímetro de proteção, como nos poços PP\_OSO\_25690, PT\_TAV\_09520, PT\_SJDN\_09560 e PT\_SJDN\_09556. Nessas áreas, além da presença de fontes difusas com alto potencial de carga contaminante, foram identificadas atividades pontuais de risco elevado, como postos de combustíveis e lava rápido, ampliando a complexidade do cenário de contaminação. O poço PP\_OSO\_25692, classificado com risco moderado, também requer atenção, dado o potencial poluidor das atividades no entorno.

A análise reforça que a baixa cobertura da rede de esgoto (média de 20,44%) impacta diretamente o aumento da carga difusa, especialmente em áreas urbanizadas de alta densidade populacional. Nesses locais, a presença predominante de fossas sépticas individuais e solos arenosos de alta permeabilidade favorece o transporte de contaminantes para o lençol freático, agravando o risco de contaminação.

Nos ambientes agrícolas e de silvicultura, o risco tende a variar de moderado a alto, influenciado pelo tipo de manejo e pelo uso de fertilizantes e defensivos agrícolas. A baixa capacidade de atenuação natural dos solos costeiros, predominantemente arenosos, potencializa a vulnerabilidade e amplia o risco de percolação de nitratos e insumos agrícolas especialmente em períodos de recarga intensa.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise integrada do risco indica a influência combinada das pressões antrópicas sobre a qualidade das águas subterrâneas, especialmente em áreas onde usos urbanos, agropecuários e atividades potencialmente poluidoras coexistem no entorno das captações. Nesse contexto, a proteção das áreas de captação deve ser tratada como prioridade na gestão dos recursos hídricos subterrâneos da região.

Com medida prática, recomenda-se a delimitação e regulamentação efetiva dos perímetros de proteção de poços, com definição de zonas de restrição e controle de uso do solo, especialmente para atividades de maior potencial poluidor, como postos de combustíveis, oficinas mecânicas e lava-rápidos. Nessas áreas sugere-se a exigência de sistemas de contenção, impermeabilização de pisos e planos de gestão de efluentes e resíduos, com fiscalização periódica.

No que se refere às fontes difusas, destaca-se a necessidade de ampliação da cobertura de esgotamento sanitário, priorizando áreas urbanizadas com alta densidade populacional, bem como a adequação e manutenção de sistemas individuais de tratamento, como fossas sépticas. Adicionalmente, recomenda-se a implementação de programas de monitoramento da qualidade da água subterrânea, com ênfase em parâmetros indicadores de contaminação antrópica, como nitrato, coliformes e compostos orgânicos.

Para áreas agrícolas e de silvicultura, sugere-se a adoção de boas práticas de manejo, incluindo o controle do uso de fertilizantes e defensivos, a criação de faixas de proteção no entorno das captações e o monitoramento da recarga em períodos de maior precipitação.

Por fim, ressalta-se a importância da integração entre políticas de recursos hídricos, planejamento urbano e gestão ambiental, com a incorporação dos perímetros de proteção nos planos diretores municipais e instrumentos de gestão territorial. Tais medidas são fundamentais para garantir a proteção preventiva das captações e a sustentabilidade da qualidade das águas subterrâneas, especialmente em regiões onde o aquífero constitui a principal fonte de abastecimento público.

## AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

## REFERÊNCIAS

- ALLER, L.; LEHR, J. H.; PETTY, R.; BENNET, T. DRASTIC: Drastic: A Standardized System to Evaluate Groundwater Pollution Potential using Hydrogeologic Setting. **Journal of the Geological Society of India**, v. 29, n. 1, p. 23–37, 1987. DOI: <https://doi.org/10.17491/jgsi/1987/290112>.
- ARAÚJO, K. V.; CAVALCANTE, I. N.; OLIVEIRA, R. M.; PEIXOTO, F. S.; LIMA NETO, I. O. Vulnerabilidade Natural e Perigo de Contaminação do Sistema Aquífero Dunas na Região Norte do Município de Aquiraz, Ceará. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, v. 38, n. 2, p. 37-48, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5935/0100-929X.20170008>.
- BARBOSA, E. V. B. L. **Avaliação da vulnerabilidade e do risco de contaminação das águas subterrâneas na região da Bacia do Mampituba (Dom Pedro de Alcântara, Mampituba, Morrinhos do Sul e Três Cachoeiras, RS)**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.
- BARBOSA, M. C.; CARVALHO, A. M.; IKEMATSU, P.; FILHO, J. L. A.; CAVANI, A. C. M. Avaliação do perigo de contaminação do Sistema Aquífero Guarani em sua área de afloramento do estado de São Paulo decorrente das atividades agrícolas. **Águas Subterrâneas**, v. 25, n. 1, p. 1-14, 2011. DOI: <https://doi.org/10.14295/ras.v25i1.21296>.
- BOFILL, L. M. **Análise de métodos para delimitação de Perímetros de Proteção de Poços, com aplicação no aquífero costeiro em Jaguaruna/SC**. 2021. 136 f. Dissertação (Mestrado em Geociências), Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2021.
- CAMARGO, P. S. S. **Avaliação da vulnerabilidade do Sistema Aquífero Quaternário Costeiro na região de Palmares do Sul (RS)**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso do Curso (Graduação em Engenharia Ambiental), Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2016.
- CAVALCANTE, I. N.; RIBEIRO, J. A. P.; DIAS, F. W. C.; SABADIA, J. A. B.; GOMES, S. A. Qualidade das águas subterrâneas da faixa costeira leste da região metropolitana de Fortaleza, Ceará. In: **XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**, 2004, Cuiabá. Anais... São Paulo: ABAS, 2004.
- CHIQUE, C.; HYND, P.; BURKE, L.; MORRIS, D.; RYAN, M. P.; O'DWYER, J. DESIGN - Detection of Environmental Sources of Infectious Disease in Groundwater Networks. **EPA Research Report**, v. 742, p. 89, 2025.
- DINIZ FILHO, J. B.; MACEDO, L. G. M.; MELO, J. G. Aspectos sobre a Hidrogeologia e Vulnerabilidade do Aquífero Barreiras Semi-confinado, a Oeste da Lagoa do Bonfim, Nísia Floresta (RN). **Águas Subterrâneas**, v. 29, n. 1, 2015.

FERON, G. L.; REGINATO, P. A. R. Avaliação da vulnerabilidade de aquíferos localizados na região central de Canoas-RS. **Águas Subterrâneas**, v. 28, n. 2, 2014. DOI: <https://doi.org/10.14295/ras.v28i2.27866>.

FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R. C. A. Determinação do risco de contaminação das águas subterrâneas: um método baseado em dados existentes. São Paulo: Instituto Geológico, 1993. 92 p. (**Boletim**, 10).

FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R. C. A. **Groundwater pollution risk evaluation: the methodology using available data**. Lima: CEPIS/PAHO/ WHO, 1988.

FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. **Proteção da qualidade da água subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais**. Washington: Banco Mundial, 2006. 114 p.

FRITZEN, M. **O uso e ocupação da terra e as águas subterrâneas: análise do perigo de contaminação, aplicando os métodos GOD e POSH no Aquífero Tubarão, município de Itu/SP**. 2023. Dissertação (Mestrado em Geografia), Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2023.

GUEDES JUNIOR, A. **Áreas de proteção ambiental para poços de abastecimento público em aquíferos costeiros**. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

HIRATA, R. C. A.; BASTOS, C. R. A.; ROCHA, G. A.; GOMES, D. C.; IRITANI, M. A. Groundwater Pollution Risk and Vulnerability Map of the State of São Paulo, Brazil. **Water Science and Technology**, v. 24, n. 11, p. 159–169, 1991. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.1991.0348>.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico 2022: População e Domicílios**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 06 de maio de 2025.

LIMA, S. D. **Análise da qualidade e do risco potencial de contaminação da água subterrânea no sistema aquífero costeiro do Rio Grande do Sul**. 2025. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2025.

QGIS Development Team. **QGIS Geographic Information System**. Open Source Geospatial Foundation Project, 2024. Disponível em: <https://qgis.org>.

SILVA, W. F. **Análise da vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação na região metropolitana de Maceió**. 2013. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento), Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2013.

TRINDADE, S. **Análise da vulnerabilidade e do risco potencial de contaminação das águas subterrâneas do sistema aquífero costeiro na região de Cidreira e Balneário Pinhal, RS**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia), Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

VASCONCELOS, M. B.; MELO, J. G.; DEMETRIO, J. G. A.; ALVES, R. S. Avaliação do Potencial Risco de Contaminação das Águas Subterrâneas na Zona Norte de Natal, RN. **REGA**, Porto Alegre, v. 15, e13, 2018.

VILLWOCK, J. A.; TOMAZELLI, L. J. Geologia Costeira do Rio Grande do Sul. **Notas Técnicas do CECO-IG-UFRGS**, Porto Alegre, v. 8, p. 1-45, 1995.

YUAN, W.; WANG, Z.; ZHANG, T.; LI, Z.; MA, Y.; XIONG, Y.; AN, F. Assessment and prediction of groundwater vulnerability based on land use change - A case study of the central urban area of Zhengzhou. **Water**, v. 16, n. 24, p. 3716, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/w16243716>.

Recebido em: 04/02/2026

Aceito para publicação em: 07/05/2026