

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E
AMBIENTAL**

RHUAN FELIPE JERANOSKI

**AVALIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DE PARÂMETROS DA QUALIDADE DA
ÁGUA BRUTA DE POÇOS URBANOS UTILIZADOS PARA CONSUMO HUMANO**

**PONTA GROSSA
2023**

RHUAN FELIPE JERANOSKI

**AVALIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DE PARÂMETROS DA QUALIDADE DA
ÁGUA BRUTA DE POÇOS URBANOS UTILIZADOS PARA CONSUMO HUMANO**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre na Universidade Estadual de Ponta Grossa no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Área de Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Giovana Kátie Wiecheteck

PONTA GROSSA

2023

J55

Jeranoski, Rhuan Felipe

Avaliação espaço-temporal de parâmetros da qualidade da água bruta de poços urbanos utilizados para consumo humano / Rhuan Felipe Jeranoski. Ponta Grossa, 2023.

100 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental - Área de Concentração: Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos), Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientadora: Profa. Dra. Giovana Katie Wiecheteck.

1. Águas subterrâneas. 2. Contaminação microbológica. 3. Poços artesianos. 4. Potabilidade. 5. Qualidade da água. I. Wiecheteck, Giovana Katie. II. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos. III.T.

CDD: 628.4



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO - DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
Certificado nº 01/2023 PPGESA

Título da Dissertação: “AVALIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DE PARÂMETROS DA QUALIDADE DA ÁGUA BRUTA DE POÇOS URBANOS UTILIZADOS PARA CONSUMO HUMANO”

Nome: RHUAN FELIPE JERANOSKI

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Giovana Kátie Wiecheteck

Aprovado pela Comissão Examinadora:

Prof^a. Dr^a. Giovana Kátie Wiecheteck
Universidade Estadual de Ponta Grossa/Ponta Grossa (PR)

Prof^a. Dr^a. Cristina Filomena Pereira Rosa Paschoalato
Universidade de Ribeirão Preto/Ribeirão Preto (SP)

Prof. Dr. Carlos Emmanuel Ribeiro Lautenschläger
Universidade Estadual de Ponta Grossa/Ponta Grossa (PR)

Ponta Grossa, 17 de julho de 2023.



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Emmanuel Ribeiro Lautenschlager, Professor(a)**, em 24/07/2023, às 17:12, conforme Resolução UEPG CA 114/2018 e art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Giovana Katie Wiecheteck, Professor(a)**, em 24/07/2023, às 19:03, conforme Resolução UEPG CA 114/2018 e art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.uepg.br/autenticidade> informando o código verificador **1542874** e o código CRC **4562C12A**.



Documento assinado digitalmente
CRISTINA FILOMENA PEREIRA ROSA PASCI
Data: 01/08/2023 07:57:15-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dedico esse trabalho à minha esposa Giovana e aos meus pais Rosana e Jackson.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à minha orientadora Giovana Wiecheteck, à toda coordenação e a todos os professores do PPGESA que contribuíram com seus conhecimentos, sugestões na orientação da dissertação e pelo apoio dado para que o trabalho fosse realizado.

À minha esposa, Giovana Janz, por toda paciência e incentivo desde a concepção do pré-projeto, na participação nas aulas e na redação da minha dissertação. Além disso, mesmo com todas as mudanças ao longo desses dois anos sempre foi meu maior suporte para a finalização desse trabalho.

Aos meus pais, Rosana e Jackson, que sempre acreditaram no meu potencial e me auxiliaram em todos os aspectos desde a graduação até esse momento.

À Dr^a. Daniela Huller pelo suporte e dedicação em contribuir com seus conhecimentos para a realização do trabalho.

Aos colegas da Vigilância Sanitária do município de Ponta Grossa e aos colegas de classe pelo apoio e troca de experiências na elaboração deste trabalho

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento desta dissertação.

RESUMO

A qualidade da água destinada ao consumo humano deve atender ao padrão de potabilidade estabelecido na legislação brasileira vigente, Portaria GM/MS 888/2021, uma vez que a água pode veicular grande quantidade de contaminantes microbiológicos e/ou físico-químicos causadores de doenças. O presente estudo utilizou dados abertos de resultados das características microbiológicas e físico-químicas da água bruta de nove poços artesianos no período de 2016 a 2021 cadastrados no Programa VIGIAGUA no município de Ponta Grossa - Paraná. Foram analisadas 296 amostras verificando a conformidade com os padrões para o consumo humano, segundo parâmetros básicos de coliformes totais (CT), *E. coli*, turbidez e fluoretos estipulados pela Diretriz Nacional do Plano de Amostragem de Água. Para as análises estatísticas, utilizou-se o teste de Kruskal-Wallis, com teste de comparação de grupos Dwass-Steel-Critchlow-Fligner (DSCF), e a correlação de Spearman para associação entre variáveis. Além disso, foi conduzida a análise quali-quantitativa espacial dos possíveis riscos de contaminação microbiológica e mapas de vulnerabilidade dos poços por meio de formulário de inspeção sanitária definido pela Organização Mundial de Saúde. Os resultados apontaram a contaminação da água bruta por CT e *E. coli* em 34% e 7% das amostras avaliadas, respectivamente. Os parâmetros de turbidez e fluoretos atenderam o preconizado pelo Ministério da Saúde em 99% das amostras, apresentando, respectivamente, médias de 0,46 uT e 0,19 mg.L⁻¹ e medianas de 0,22 uT e 0,15 mg.L⁻¹. A ocorrência de chuvas 48 horas antes das coletas de amostras de água influenciou no aumento da contaminação da água de ambos os parâmetros microbiológicos ($p < 0,05$). Esses resultados refletem a precariedade de alguns poços artesianos instalados na cidade de Ponta Grossa, apresentando índices de vulnerabilidade das águas subterrâneas. Os mapeamentos espaço temporais e a matriz de risco de ingestão de águas contaminadas por *E. coli*, elaborados para apresentar os resultados desta pesquisa, podem auxiliar os gestores públicos nas ações referentes à saúde pública e saneamento básico na cidade de Ponta Grossa.

Palavras-chave: Águas Subterrâneas. Contaminação Microbiológica. Poços Artesianos. Potabilidade. Qualidade da Água.

ABSTRACT

The water quality for human consumption must meet potability standards established in the Brazilian legislation, Ordinance GM/MS 888/2021, as water can carry a large amount of microbiological and/or physicochemical contaminants that cause diseases. The present study used open data on the results of the microbiological and physicochemical characteristics of raw water from nine artesian wells from 2016 to 2021 registered in the VIGIAGUA Program in the city of Ponta Grossa - Paraná. A total of 296 samples were analyzed, verifying compliance with the potability standards for human consumption, according to basic parameters of total coliforms (TC), *E. coli*, turbidity and fluorides stipulated by the National Guideline of the Water Sampling Plan. For the statistical analyses the Kruskal-Wallis test was used, followed by the post-hoc Dwass-Steel-Critchlow-Fligner (DSCF), and Spearman correlation test was used to assess the association between variables. In addition, a qualitative spatial analysis of the possible risks of microbiological contamination and vulnerability maps of the wells were carried out using sanitary inspection form, defined by the World Health Organization. The results indicated raw water contamination by TC and *E. coli* in 34% and 7% of the samples evaluated, respectively. Results of turbidity and fluoride met the recommendations of the Brazilian legislation in 99% of the samples, with averages of 0.46 uT and 0.19 mg.L⁻¹ and medians of 0.22 uT and 0.15 mg.L⁻¹, respectively. The results showed that rainfall 48 hours before the collection of the water samples influenced the increase of the water contamination for both microbiological parameters ($p < 0.05$). From the vulnerability maps and field visits, the precariousness of some artesian wells installed in the city of Ponta Grossa was observed, with consequences for the groundwater quality. The spatio-temporal mapping and the risk matrix for ingestion of the contaminated water by *E. coli*, developed to present the results of this research, can help public managers in public health and sanitation actions in the city of Ponta Grossa.

Keywords: Groundwater. Microbiological Contamination. Deep Wells. Potability. Water Quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Média anual da retirada de água em m ³ /s dos principais usos no Brasil ..	20
Figura 2 - Interação da água no subsolo e superfície	22
Figura 3 - Classificação dos aquíferos conforme o tipo de porosidade da rocha.	24
Figura 4 - Tipos de poços em aquíferos confinados e livres	27
Figura 5 - Principais tipos de SACs.....	28
Figura 6 - Principais componentes e processos de contaminação de aquíferos.....	33
Figura 7 - Fontes indiretas de contaminação de água subterrânea	34
Figura 8 - Médias de precipitação (mm) dos anos de 2002 a 2022 em Ponta Grossa – PR	35
Figura 9 - Esquema de PPPs baseados no critério do tempo de trânsito ao redor de um poço em aquífero não confinado	36
Figura 10 - Perímetro Imediato de Proteção Sanitária (PIPS) estabelecido no Decreto Estadual nº 32.955/91	38
Figura 11 - Mapa de situação urbana/rural do município de Ponta Grossa – PR.....	43
Figura 12 - Página de pesquisa no portal de dados abertos	44
Figura 13 - Caixa térmica refrigerada contendo frascos de coleta de amostras microbiológicas e físico-químicas.....	45
Figura 14 - Exemplo da sobreposição do raio de influência	51
Figura 15 - Distribuição geográfica dos locais de instalação dos poços estudados ..	54
Figura 16 - Condições construtivas e conservação do entorno dos poços	56
Figura 17 - Mapeamento espaço-temporal do parâmetro <i>E. coli</i> entre os anos de 2016 e 2021	74
Figura 18 - Mapeamento espaço-temporal do parâmetro CT entre os anos de 2016 e 2021	75
Figura 19 - Mapeamento espaço-temporal do parâmetro turbidez entre os anos de 2016 e 2021	76
Figura 20 - Mapeamento espaço-temporal do parâmetro fluoreto entre os anos de 2016 e 2021	77

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Número de amostragens realizadas em cada poço separadas por ano..	59
Gráfico 2 - Porcentagem e número de amostras em conformidade com o padrão de qualidade para consumo humano separados por tipo de parâmetro	60
Gráfico 3 - Porcentagem e número de amostras de cada poço em conformidade com o padrão de qualidade para consumo humano	61
Gráfico 4 - Boxplot da diferença estatística das distribuições do parâmetro de coliformes totais entre os poços estudados (teste H de Kruskal-Wallis, N = 296).....	63
Gráfico 5 - Boxplot da diferença estatística das distribuições do parâmetro de <i>E. coli</i> entre os poços estudados (teste H de Kruskal-Wallis, N = 296).....	64
Gráfico 6 - Boxplot da diferença estatística das distribuições do parâmetro de turbidez entre os poços estudados (teste H de Kruskal-Wallis, N = 296).....	65
Gráfico 7 - Boxplot da diferença estatística das distribuições do parâmetro de fluoretos entre os poços estudados (teste H de Kruskal-Wallis, N = 296).....	67

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Tipos de aquíferos de acordo com sua estrutura.	23
Quadro 2 - Definições de PPPs em estados brasileiros	37
Quadro 3 - Parâmetros e métodos de análises das amostras de água dos poços, realizadas pelo laboratório de recursos hídricos	46
Quadro 4 - Risco para a saúde da ingestão de água contaminada por <i>E. coli</i> com base nas diretrizes da OMS para a qualidade da água potável	48
Quadro 5 - Exemplo de matriz de prioridade de ações corretivas baseado na contagem microbiológica e pontuação do formulário de inspeção sanitária	49
Quadro 6 - Principais ações de remediação de acordo com a matriz de ações	49
Quadro 7 - Dados gerais e características dos poços estudados	55
Quadro 8 - Diagnóstico individualizado de risco de contaminação dos poços	58
Quadro 9 - Matriz de prioridade de ações corretivas baseado na contagem microbiológica e pontuação do formulário de inspeção sanitária	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados de amostras de qualidade da água de consumo humano na região sul do Brasil no ciclo quadrienal 2016-2019.....	30
Tabela 2 - Indicadores quantitativos de análises de qualidade da água para os anos de 2016 a 2021 do município de Ponta Grossa – PR	31
Tabela 3 - Resultado do teste de normalidade de Shapiro-Wilk para os parâmetros analisados no período de 2016 a 2021	53
Tabela 4 - Estatística descritiva dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos..	62
Tabela 5 - Porcentagem de amostras anuais fora do padrão de qualidade para consumo humano.....	68
Tabela 6 - Diferenças estatísticas anuais dos parâmetros estudados em cada poço	70
Tabela 7 - Matriz de correlação de Spearman dos valores médios dos parâmetros microbiológicos e as pontuações de risco sanitário	79
Tabela 8 - Matriz de correlação de <i>Spearman one-tailed</i> dos parâmetros estudados e volumes de precipitação pluviométrica.....	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CIB	Comissões Intergestores Bipartites
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
COVID-19	Coronavírus
DSCF	Dwass-Steel-Critchlow-Fligner
<i>E. coli</i>	<i>Escherichia coli</i>
GAL	Gerenciador de Ambiente Laboratorial
IAT	Instituto Água e Terra
PIPS	Perímetro Imediato de Proteção Sanitária
PPP	Perímetro de Proteção de Poços
SAA	Sistema de Abastecimento de Água
SAC	Solução Alternativa Coletiva
SIH	Sistema de Informações Hidrológicas
SISAGUA	Sistema de Informação de Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano
SMEWW	<i>Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater</i>
UEPG	Universidade Estadual de Ponta Grossa
UNICEF	Fundo das Nações Unidas para a Infância
UTM	Unidade Transversa de Mercator
VIGIAGUA	Programa de Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano
VMP	Valor Máximo Permitido

LISTA DE SÍMBOLOS

ed	edição
$m^3 \cdot s^{-1}$	metros cúbicos por segundo
$mg \cdot L^{-1}$	miligrama por litro
mL	mililitro
mm	milímetro
UFC	unidade formadora de colônia
uT	unidade de turbidez
σ	desvio padrão
\bar{x}	média
π	Pi

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS	18
2.1 OBJETIVO GERAL	18
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
3.1 RECURSOS HÍDRICOS.....	19
3.1.1 Distribuição de Recursos Hídricos e Usos da Água	19
3.1.2 Águas Subterrâneas.....	21
3.2 SOLUÇÕES ALTERNATIVAS COLETIVAS	27
3.3 O PROGRAMA VIGIAGUA.....	29
3.4 FONTES DE CONTAMINAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA	31
3.5 PERÍMETRO DE PROTEÇÃO DE POÇOS	35
3.6 ASPECTOS LEGAIS RELACIONADOS AO CONSUMO HUMANO	39
3.6.1 Parâmetros Microbiológicos	39
3.6.1.1 Coliformes totais.....	39
3.6.1.2 <i>Escherichia coli</i>	40
3.6.2 Parâmetros Físico-Químicos	40
3.6.2.1 Turbidez.....	40
3.6.2.2 Fluoreto	41
3.7 DOENÇAS DE VEICULAÇÃO HÍDRICA	41
4 METODOLOGIA	43
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E ABORDAGEM DAS COLETAS.....	43
4.1.1 Pesquisa em Banco de Dados Abertos de Qualidade da Água.....	44
4.1.2 Definição dos Pontos de Coleta e Períodos de Abrangência	46
4.2 ANÁLISE QUALITATIVAS.....	47
4.2.1 Georreferenciamento e Caracterização das SACs.....	47
4.2.2 Perímetros de Proteção dos Poços	47
4.2.3 Classificação de Risco de Ingestão da Água	48
4.2.4 Mapeamento de Vulnerabilidade	50
4.2.5 Mapa de Calor de Kernel.....	51

4.3 ANÁLISES QUANTITATIVAS	52
4.3.1 Ocorrência de Precipitação	52
4.3.2 Tratamento Estatístico.....	52
4.3.3 Correlação entre os parâmetros, índice de risco e presença de chuvas	53
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	54
5.1 CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO QUALIQUANTITATIVA DOS POÇOS	54
5.2 AVALIAÇÃO DOS DADOS MICROBIOLÓGICOS E FÍSICO-QUÍMICOS	59
5.2.1 Avaliação Estatística Individual	62
5.2.2 Avaliação Estatística Temporal	68
5.3 MAPEAMENTO ESPAÇO-TEMPORAL E CLASSIFICAÇÃO DO RISCO	73
5.3.1 Interpolação de Dados	73
5.3.2 Matriz de Classificação de Risco.....	78
5.4 CORRELAÇÃO DOS PARÂMETROS, ÍNDICE DE RISCO E PRECIPITAÇÃO..	79
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	82
6.1 CONCLUSÕES	82
6.2 RECOMENDAÇÕES	83
REFERÊNCIAS.....	85
APÊNDICE A - FORMULÁRIO DE INSPEÇÃO SANITÁRIA	98
ANEXO A – AUTORIZAÇÃO DE USO DE DADOS.....	100

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso imprescindível para manutenção da vida terrestre, permeando toda a cadeia vital para a subsistência humana, relacionando-se com setores fundamentais para a manutenção e o desenvolvimento da sociedade. Apesar de sua essencialidade, segundo o relatório da UNICEF (Fundo das Nações Unidas para a Infância), em 2020, cerca de 25% da população mundial não tinha acesso à água potável gerida de forma segura¹.

Mesmo o Brasil possuindo uma posição privilegiada na disponibilidade de água, em 2021 enfrentou-se a pior crise hídrica dos últimos 91 anos devido à baixa precipitação e redução dos níveis dos mananciais (AMATO, 2021). O crescimento das demandas hídricas no Brasil, a partir do aumento da população e das atividades econômicas intensivas no uso da água, também contribuiu para o aumento do estresse hídrico (BRASIL, 2018), onde a procura de água por habitante é maior que a capacidade de oferta, gerando assim a necessidade de fontes alternativas de água para abastecimento, com isso, pesquisadores do Serviço Geológico Brasileiro têm sugerido o uso da água subterrânea como alternativa mais viável, devido à alta disponibilidade e ao baixo investimento².

Quando levantadas as informações sobre as fontes de abastecimento da água subterrânea no Brasil, projeções realizadas em 2018 e 2019, indicaram a quantidade estimada de poços tubulares existentes no país na ordem de 1,2 a 2,5 milhões, respectivamente, onde apenas cerca de trezentos mil desses poços são cadastrados junto aos órgãos competentes (BRASIL, 2018; HIRATA *et al.*, 2019a).

Sabendo do aumento da demanda pela busca de soluções alternativas de uso de água nos últimos anos (IRITANI; EZAKI, 2012a), tem-se que considerar uma atenção especial aos índices de qualidade para consumo, principalmente devido à possibilidade de contaminação dos aquíferos por atividades antropogênicas. Portanto, o monitoramento microbiológico e físico-químico da qualidade da água manifesta-se como um importante instrumento no sentido de apontar tendências e áreas prioritárias

1 Bilhões de pessoas em todo o mundo não terão acesso aos serviços de água potável. <<https://www.unicef.org/guineabissau/pt/comunicados-de-imprensa/bilh%C3%B5es-de-pessoas-n%C3%A3o-ter%C3%A3o-acesso-%C3%A1-gua-pot%C3%A1vel-saneamento-e-higiene-em>>

2 Água subterrânea pode ser alternativa para crise hídrica, diz SGB <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2021-08/agua-subterranea-pode-ser-alternativa-para-crise-hidrica-diz-sgb>>

para o controle da poluição hídrica, além de evitar a transmissão de doenças infecciosas causadas por consumo de água não tratada que podem resultar em diferentes tipos de sintomas característicos, tais como a diarreia, perda de apetite, fraqueza e febre (BRASIL, 2013; WHO, 2017).

Levantamentos bibliográficos e estudos em diversos países, apontados por Marras *et al.* (2020), De Giglio *et al.* (2016), Rivera-Rodríguez *et al.* (2018), Moreira e Bondelind (2016), Almeida *et al.* (2019) e Kløve *et al.* (2017), indicaram contaminações microbiológicas na água subterrânea para consumo humano, ocasionadas por deficiências na construção dos poços e carreamento superficial de poluentes pela precipitação pluviométrica, evidenciando a necessidade de melhoria dos sistemas de exploração, proteção e tratamento da água subterrânea, corroborando que a água destinada ao consumo humano deve ser periodicamente submetida a análises laboratoriais para verificar sua integridade e adequação para uso.

Destaca-se que o monitoramento e as ações de controle da qualidade da água subterrânea, geralmente, apresentam dificuldades, principalmente nas Soluções Alternativas Coletivas (SACs), que incluem os poços urbanos, sendo definidas como toda modalidade de abastecimento coletivo de água distinta do convencional Sistema de Abastecimento de Água (SAA). Tais dificuldades acontecem, principalmente, em função da prioridade dada ao monitoramento dos SAAs, por ser a principal forma de abastecimento urbano, por questões logísticas e pela característica privada das explorações por meio de poços tubulares, onde 90% dos cadastros no Brasil são de captações particulares (QUEIROZ *et al.*, 2012; HIRATA *et al.*, 2019b).

Nesse sentido, em âmbito municipal, o Programa de Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano (VIGIAGUA³) tem como objetivo fazer a vigilância e o monitoramento da prestadora de serviço de abastecimento de água para consumo humano e das SACs (poços tubulares ou escavados, fontes, entre outros), impedindo de forma preventiva, alguma inconformidade que possa causar danos à saúde coletiva. Ainda assim, segundo Fortes *et al.* (2019) apesar do avanço nas publicações e na transparência do processo de vigilância da qualidade da água, há dificuldades na comunicação efetiva com o público geral.

3 Consiste no conjunto de ações adotadas continuamente pelas autoridades de saúde pública para garantir à população o acesso à água em quantidade suficiente e qualidade compatível com o padrão de potabilidade. Disponível em: <http://sisagua.saude.gov.br/sisagua/paginaExterna.jsf>

Por se constituir de um programa complexo, que ainda não alcança a totalidade dos municípios por dificuldades técnicas e de recursos humanos, demanda de avaliações pontuais nos diversos âmbitos governamentais, objetivando seu aprimoramento, o que torna necessário agregar além das análises quantitativas, avaliações qualitativas sobre a sua implantação (OLIVEIRA *et al.*, 2019; QUEIROZ *et al.*, 2012).

Considerando que a cidade de Ponta Grossa está rodeada de indústrias e áreas agrícolas próximas aos seus mananciais, por possuir relevos cársticos com elevada permeabilidade do solo (MELO *et al.*, 2011; PONTES, 2014; PONTES *et al.*, 2021) e com população estimada em cerca de 358.367 habitantes (IBGE, 2023), presume-se uma possível vulnerabilidade de contaminação dos reservatórios subterrâneos de água. Ainda que a maioria das pessoas tenham acesso à água tratada por meio de SAA com rede de distribuição, parte da população ainda utiliza poços tubulares privados sem rede de distribuição e muitas vezes sem controle técnico adequado de desinfecção da água.

Nesse sentido a área de estudo possui características e oportunidades para estruturar análises referentes ao acesso e à qualidade da água provenientes dos poços tubulares, a fim de subsidiar ações para minimizar os impactos na saúde pública, buscando auxiliar os gestores na tomada de decisões no que tange à alocação de recursos e definição de políticas públicas para alavancar os níveis de monitoramento da qualidade da água e conseqüentemente possibilitar a diminuição de problemas de saúde causados por doenças de veiculação hídrica.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Realizar a análise espaço-temporal da qualidade da água bruta anterior ao consumo humano proveniente de poços tubulares na área urbana do município de Ponta Grossa – PR, por meio dos dados secundários do Programa Nacional de Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano (VIGIAGUA).

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

a) Identificar, descrever e georreferenciar os poços artesianos caracterizados como SACs no município de Ponta Grossa cadastrados no Programa VIGIAGUA;

b) Apresentar níveis de risco de consumo da água bruta combinando a matriz de relação do índice de suscetibilidade de contaminação por *E. coli* com o resultado do preenchimento do formulário de inspeção sanitária visual;

c) Verificar se os resultados das análises microbiológicas e físico-químicas da água bruta subterrânea estão atendendo aos critérios dispostos na legislação sanitária para consumo humano e criar mapas de vulnerabilidade com os resultados médios dos parâmetros estudados;

d) Identificar estatisticamente se ocorreram diferenças significativas dos parâmetros analisados entre os anos (2016-2021), se as chuvas podem influenciar na qualidade da água bruta e se existe correlação entre a contaminação microbiológica e as avaliações qualitativas do nível de proteção de poços.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 RECURSOS HÍDRICOS

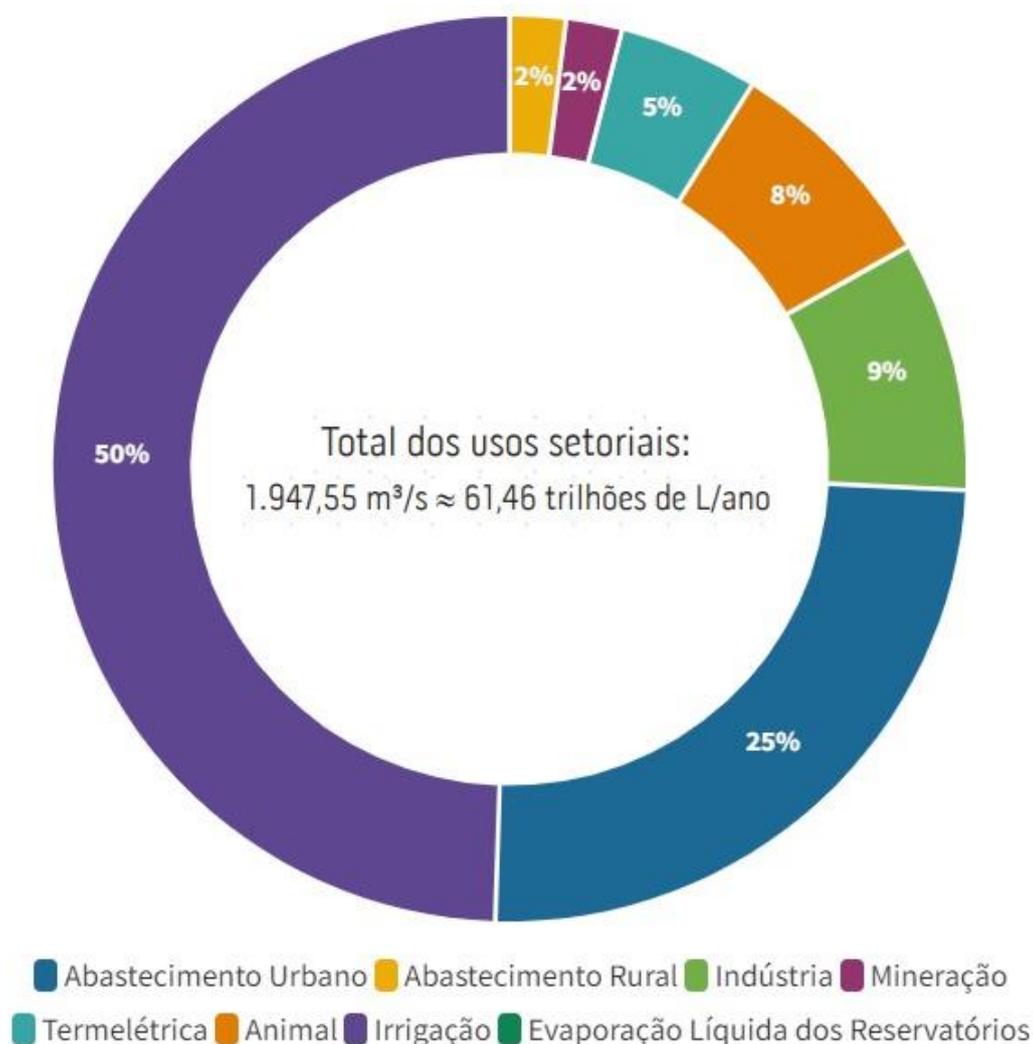
Nesse item é apresentada uma visão geral sobre a distribuição e utilização dos recursos hídricos com ênfase na água subterrânea, bem como as formas de exploração em poços artesianos, partindo do panorama da distribuição deste recurso no planeta, detalhando os tipos de aquíferos e culminando no aspecto particular das formas de exploração.

3.1.1 Distribuição de Recursos Hídricos e Usos da Água

O globo terrestre é coberto por dois terços de água, no entanto, apenas 2,6% desse montante trata-se de água doce (OLIVEIRA, 2017), estando presentes em rios, lagos, geleiras, *permafrost* (gelo no subsolo), atmosfera e no subsolo (UNESCO, 2020a). Em análises mais recentes, segundo Velis *et al.* (2017) e Guppy *et al.* (2018), a água presente no subsolo pode corresponder entre 97 e 98% do total da água doce disponível para consumo no planeta.

O volume de água doce é distribuído irregularmente pelos continentes e o Brasil é um dos países que possuem a maior disponibilidade de água doce do mundo, cerca de 12% (OECD, 2022; UNESCO, 2022). Contudo, devido a extensão do país, existem disparidades de volumes de água em termos de disponibilidade hídrica superficial, onde a região Amazônica detém cerca de 70 % dos recursos hídricos superficiais (BICUDO *et al.*, 2010; BRASIL, 2013; OECD, 2022).

Apesar das diferenças de volume disponíveis entre localidades, a água brasileira é utilizada em todas as regiões principalmente para a irrigação, seguindo do abastecimento humano e animal, processos industriais, geração de energia, mineração, entre outros, conforme apresentado na Figura 1 (BRASIL, 2021a).

Figura 1 - Média anual da retirada de água em $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ dos principais usos no Brasil

Fonte: adaptado de Brasil (2021a)

Nota-se o grande volume utilizado pela agropecuária, representando 52% do total da água retirada do meio ambiente, principalmente devido à irrigação, seguido pelo abastecimento humano (urbano e rural) com um somatório de cerca de 27%. Além de tudo, o consumo de água tem aumentado globalmente cerca de 1% por ano nos últimos 40 anos e prevê-se que cresça a um ritmo semelhante até 2050, devido a uma combinação de crescimento demográfico, desenvolvimento socioeconômico e da alteração dos padrões de consumo (UNESCO, 2023). Mesmo com previsões de aumento na demanda por água para os próximos anos, já é possível verificar a

ocorrência de escassez e a poluição desse recurso, abrangendo milhões de pessoas⁴, fato que desacelera e limita o desenvolvimento social e econômico.

Além da má distribuição dos recursos hídricos no Brasil, as atividades antrópicas também modificam os ciclos de regime natural das águas, sendo a poluição hídrica um grande problema causado pelo descontrole das atividades em diferentes escalas espaço-temporais (MORAES; LORAND, 2016; WANG *et al.*, 2019). Devido ao intenso aumento do uso dos recursos ambientais, crises hídricas estão emergindo mundialmente causando alterações na distribuição dos recursos hídricos, porém, algumas incertezas permanecem sobre a disponibilidade de uso, especialmente em escala local (UNESCO, 2020b).

Abbott *et al.* (2019) apontam a necessidade de amplificar os esforços científicos para que exista uma compreensão e aceleração de uma gestão sustentável da água, garantindo que o ciclo hidrológico mantenha sua capacidade e efetividade de renovação dos recursos hídricos. Essa problemática tem afetado tanto os recursos hídricos superficiais quanto a água subterrânea, dado o fato de que as mudanças climáticas têm aumentado os desafios relacionados à água, tornando-os mais urgentes a cada ano (UNESCO, 2023).

3.1.2 Águas Subterrâneas

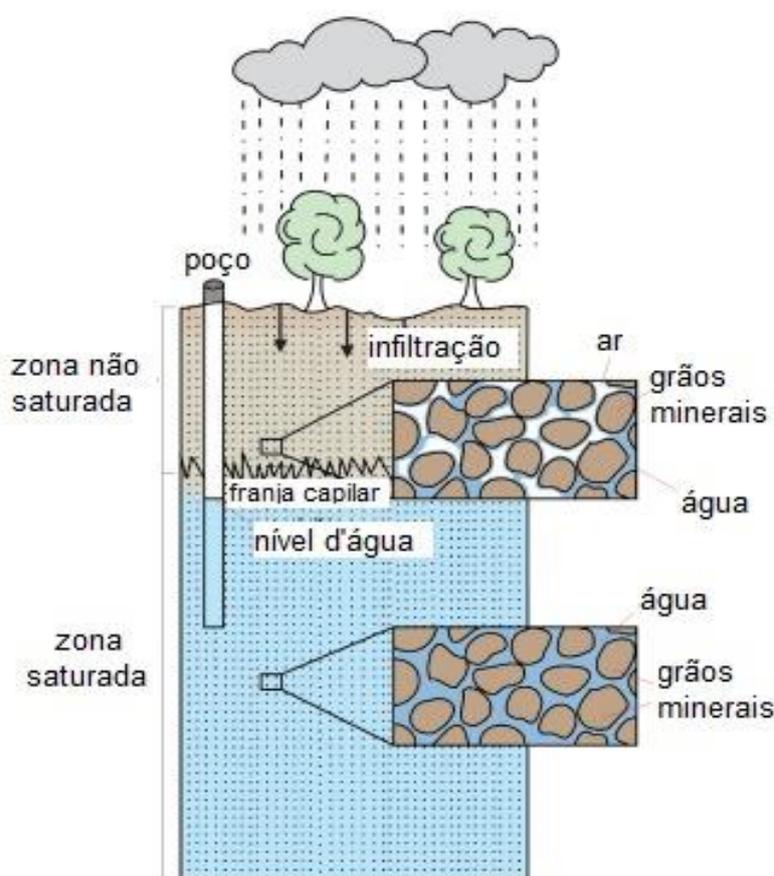
As águas subterrâneas encontram-se abaixo da superfície do solo, preenchendo completamente os poros das rochas e dos sedimentos, e constituindo assim os chamados aquíferos, representando a maior porção das águas doces e líquidas do planeta, evidenciando sua importância para a sociedade atual (HIRATA *et al.*, 2019a; FREEZE; CHERRY, 2017; IRITANI; EZAKI, 2012a).

Manzione (2015) cita que a água subterrânea tem uma grande notoriedade no ciclo d'água e em diversos outros aspectos da vida na Terra. Paraná (2020a) destaca que muitos corpos hídricos superficiais só possuem água durante todo o ano devido à descarga permanente dos aquíferos que drenam para as bacias hidrográficas, contribuindo para que boa parte dos rios sejam perenes.

4 Quase 35 milhões de brasileiros não têm acesso à água tratada. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/noticias/infomaterias/2022/03/estudo-aponta-que-falta-de-saneamento-prejudica-mais-de-130-milhoes-de-brasileiros>

Nota-se na Figura 2⁵ que a água precipitada percola e circula entre os espaços intergranulares (poros) que formam os solos e as rochas sedimentares (IRITANI; EZAKI, 2012a; DARANCO, 2021), possuindo divisão em zona não saturada e zona saturada. Por meio do fluxo da água na zona saturada que ocorre a alimentação dos corpos hídricos superficiais, geralmente, até a profundidade média de mil metros, fluindo lentamente na ordem de poucos centímetros por dia através do subsolo (FEITOSA, 2008; REBOUÇAS, 2002).

Figura 2 - Interação da água no subsolo e superfície



Fonte: Adaptado de Iritani e Ezaki (2012a)

A zona não saturada contém ar e água, enquanto na zona saturada todos os vazios estão preenchidos por líquido. De acordo com Schmoll *et al.* (2006), é o lençol freático que marca a fronteira entre as duas zonas, sendo a superfície em que a pressão do fluido é exatamente igual à pressão atmosférica. O escoamento superficial

5 Hidrogeologia – Água subterrânea - Conhecer para proteger e preservar. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/70656852.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2022

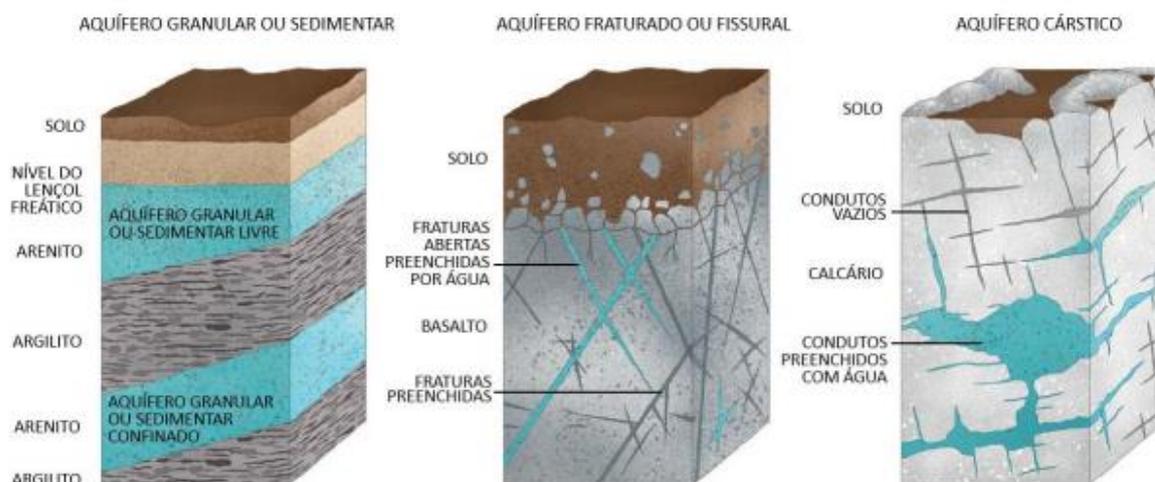
até as zonas mais profundas também pode ocorrer por meio de fraturas, porções onde as rochas se romperam devido à movimentação da crosta terrestre, cuja escala pode variar de poucos centímetros a dezenas de metros (FREEZE; CHERRY, 2017). Os aquíferos são classificados, geomorfologicamente, em três tipos principais segundo a sua estrutura e porosidade conforme demonstrado no Quadro 1 e Figura 3.

Quadro 1 - Tipos de aquíferos de acordo com sua estrutura.

Denominação	Formação	Armazenamento	Características
Porosos ou Granulares	Rochas sedimentares	Água armazenada nos espaços entre os grãos da rocha ou solo	Constituem os mais importantes aquíferos pelo grande volume de água que armazenam e por sua ocorrência em grandes áreas
Faturados ou Fissurados	Rochas ígneas e metamórficas	Água armazenada nas fraturas interconectadas da rocha	A capacidade destas rochas em acumularem água está relacionada à quantidade e à natureza das fraturas existentes
Cárstico	Rochas carbonáticas	Água armazenada nos condutos e canais das rochas carbonáticas	Constituem um tipo peculiar de aquífero fraturado, onde as fraturas, devido à dissolução do carbonato pela água, podem atingir aberturas muito grandes (cavernas) criando verdadeiros rios subterrâneos

Fonte: Adaptado de Iritani e Ezaki (2012a)

Figura 3 - Classificação dos aquíferos conforme o tipo de porosidade da rocha.



Fonte: Reginato *et al.* (2017)

Também podem ser classificados em função da capacidade de transmissão de água das respectivas camadas limítrofes. Assim, denomina-se aquífero a formação geológica que contém água e permite movimentação dessa massa no interior do solo em condições naturais (FEITOSA, 2008), sendo basicamente divididos em dois tipos:

a) Aquífero livre: parcialmente saturado de água, contendo uma base de camada impermeável ou semipermeável. Também chamado de aquífero freático, pois o nível freático constitui o seu limite superior (FREEZE; CHERRY, 2017), nesse caso, em qualquer profundidade abaixo do nível freático, a pressão da água é maior do que a atmosférica, e em qualquer ponto acima, a pressão da água é menor que a atmosférica (SCHMOLL *et al.* 2006).

b) Aquífero confinado: é uma unidade de rocha permeável separada entre camadas impermeáveis. Segundo Manzione (2015) nesse tipo de aquífero, também chamado de aquífero sob pressão, pode ocorrer artesianismo nos poços que captam suas águas, jorrando de forma natural quando a pressão da água no topo da zona saturada é maior do que a pressão atmosférica.

Nesta conjuntura, a água subterrânea presente em ambos os tipos de aquíferos é intensamente explorada na maioria dos países do mundo, incluindo o Brasil, sendo retirada por poços e muitas vezes operando por um sistema de

bombeamento, sendo utilizada para diversos fins, como a irrigação, indústria, lazer e abastecimento humano (ZOBY, 2008; DARANCO, 2021).

O uso da água subterrânea como fonte de água cotidiana ocorre tanto em países desenvolvidos quanto nos subdesenvolvidos. Em países nórdicos, incluindo a Islândia, Noruega, Suécia, Finlândia e Dinamarca, a exploração subterrânea é a principal fonte de água para cerca de 14 milhões de pessoas (KLØVE *et al.*, 2017). No Canadá quase 30% da população utiliza águas subterrâneas para uso doméstico, existindo tendências que indicam que a utilização futura das águas subterrâneas continuará a aumentar (BHATTI *et al.*, 2021).

Quando a água subterrânea é acessível, a utilização de poços é uma fonte de água muito útil em países em desenvolvimento, principalmente por não precisarem de grandes redes de distribuição (INDRASTUTI *et al.*, 2021), sendo a realidade de alguns países do leste asiático, segundo Carrard *et al.* (2019), 79% das populações urbanas e rurais utilizam águas subterrâneas como fonte primária de água potável.

No perfil brasileiro, a água explorada do subsolo serve como fonte de abastecimento humano para cerca de 30 a 40% da população, sobretudo em cidades de médio e pequeno porte, uma vez que, no Estado de São Paulo, 70% dos núcleos urbanos são abastecidos total ou parcialmente pelas águas subterrâneas (BICUDO, *et al.* 2010; ANA, 2022). Segundo Hirata *et al.* (2019b) os estados de São Paulo, Piauí, Ceará, Rio Grande do Sul, Bahia e Paraná são mais dependentes dos recursos subterrâneos, além disso, mais de 50% dos municípios brasileiros são abastecidos total ou parcialmente por águas subterrâneas, 36 e 16%, respectivamente.

Conforme Hirata *et al.* (2019b) com base em estudo do Serviço Geológico do Brasil, estima-se que 48% da água explorada do subsolo é exclusivamente utilizada para consumo humano, sendo 30% por meio de SACs e 18% por meio de SAAs. No Paraná, nos últimos anos, tem ocorrido o aumento da exploração de água subterrânea para abastecimento humano devido aos períodos de seca e escassez hídrica, e ao aumento expressivo da população urbana. Entre 2016 e 2018 houve um crescimento de mais de 200% no número de poços outorgados no estado paranaense, sendo que, em 2020 e 2021⁶, respectivamente, foram cadastrados 2739 e 2838 poços

6 Relatório de Conjuntura dos Recursos Hídricos do Estado do Paraná – 2021
<https://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Relatorio-de-Conjuntura-dos-Recursos-Hidricos-do-Estado-do-Parana>

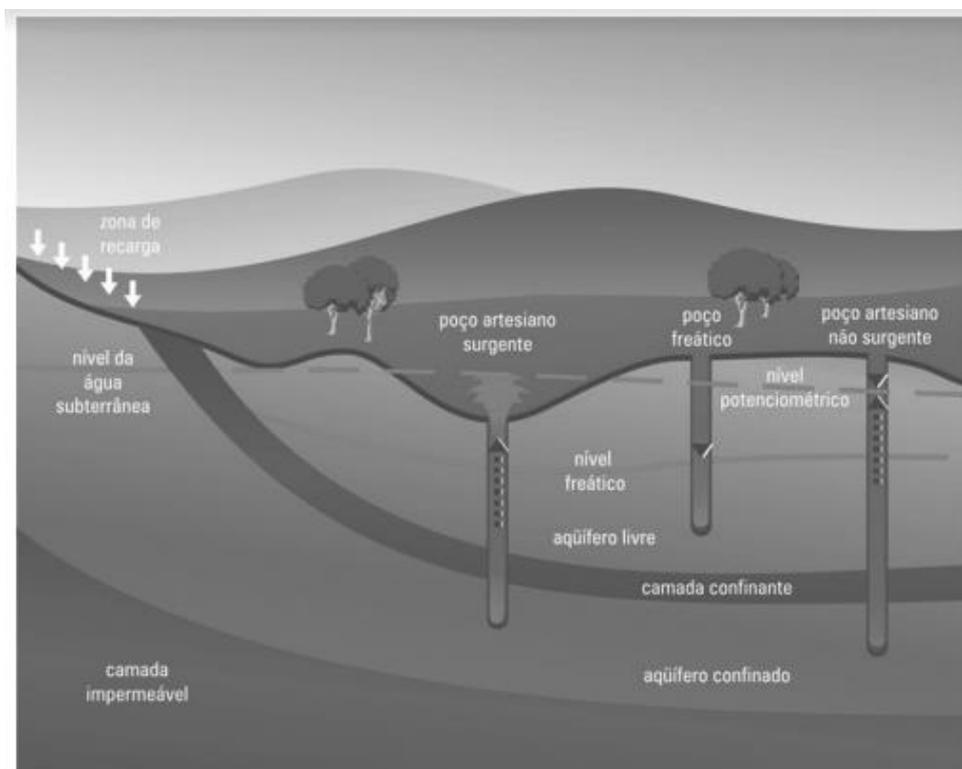
considerando todos os tipos de usos e, exclusivamente para saneamento e abastecimento humano, 395 e 329 perfurações (PARANÁ, 2015; PARANÁ, 2020a).

Geomorfologicamente, a região da cidade de Ponta Grossa situa-se próximo à Escarpa Devoniana sobre três formações principais, Grupo Itararé, Formação Furnas e Formação Ponta Grossa (MELO *et al.*, 2015). Neste contexto, a gênese do solo garante características tectônicas que condicionam na distribuição e ocorrência de depressões no terreno e formação de cavidades subterrâneas, sendo verificadas áreas com fissuras e carstes, tais como as furnas (poços naturais e cavernas verticais), sumidouros, ressurgências e túneis subterrâneos (MELO *et al.*, 2011, PONTES *et al.*, 2016; PONTES *et al.*, 2021).

Além disso, segundo Melo *et al.* (2015), vem se acentuando o uso dos mananciais subterrâneos por meio de poços subterrâneos profundos na área urbana e no seu entorno, especialmente sobre as áreas de recarga dos aquíferos com características de vulnerabilidade por escoamento superficial, implicando crescentes riscos de contaminação das águas subterrâneas.

Consoante Hirata *et al.* (2019b), tais poços podem ser divididos em tubulares, popularmente chamados de artesianos ou semiartesianos, e escavados, conforme Figura 4, que podem receber diversos nomes de acordo a região de perfuração do solo.

Figura 4 - Tipos de poços em aquíferos confinados e livres



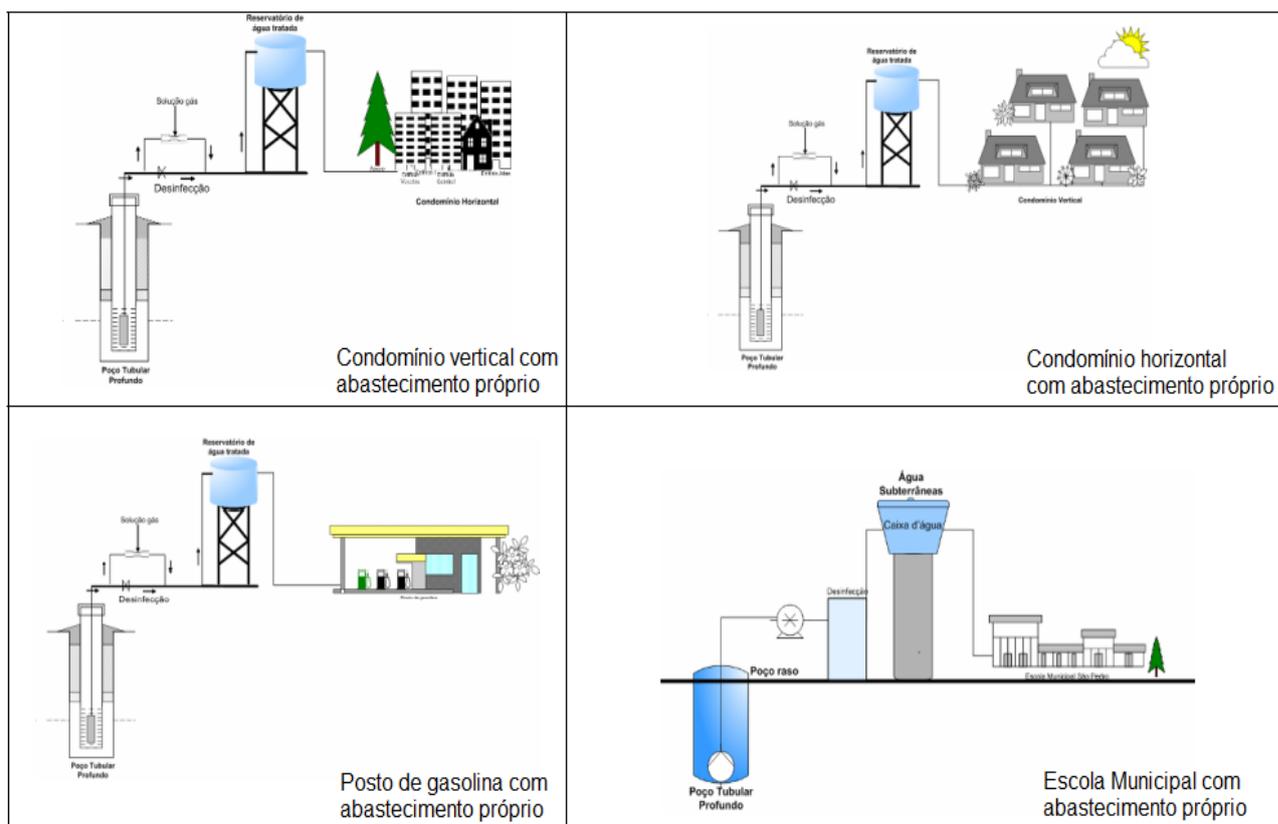
Fonte: Manzione (2015)

3.2 SOLUÇÕES ALTERNATIVAS COLETIVAS

Segundo a Portaria GM/MS 888/2021, uma SAC pode ser caracterizada como uma fonte de abastecimento de água para consumo humano distinta de um SAA convencional, sendo uma modalidade de abastecimento coletivo destinada a fornecer água potável, sem a necessidade de rede de distribuição de água.

Essa água pode ser fornecida de diferentes maneiras incluindo, fonte, poço comunitário, distribuição por veículo transportador e instalações condominiais horizontal e vertical (BRASIL, 2005). Nesse caso, são vários os arranjos passíveis de serem encontrados nas SACs, conforme Figura 5, podendo ser agrupadas de acordo com o tipo de manancial (subterrâneo ou superficial) e a forma de distribuição de água.

Figura 5 - Principais tipos de SACs



Fonte: Adaptado de Brasil (2007)

Observa-se que condomínios verticais ou horizontais, postos de combustível, escolas, hospitais, hotéis, entre outros, que não recebem água do sistema de abastecimento convencional e possuem poço artesiano próprio são exemplos típicos de SACs, pois distribuem água coletivamente para os moradores, alunos, clientes, pacientes ou hóspedes, de acordo com o tipo da atividade.

Além disso, a SAC deve dispor de responsável técnico pela operação e manutenção do sistema de abastecimento, além de exercer o controle da qualidade da água para consumo humano. O cadastramento dessas unidades é uma ação de responsabilidade da secretaria de saúde municipal, especificamente pelo setor de Vigilância em Saúde, sendo regulamentada pela Portaria GM/MS 888/2021.

A principal finalidade do cadastramento das SACs é a obtenção de informações relevantes para o conhecimento das etapas que compõem esses sistemas, com intuito de criar indicadores que permitam mapear grupos e fatores ou situações de riscos, além de permitir avaliação da sua distribuição e evolução,

espacial e temporal (BRASIL, 2007). De acordo com Brasil (2005) após o cadastramento deve ser realizada a inspeção visual das condições físicas dos componentes dos sistemas das SACs. Em síntese, na Portaria GM/MS 888/2021 são estabelecidas as responsabilidades por parte das autoridades sanitárias, nas diversas instâncias de governo, a quem cabe a missão de implementar e executar o Programa de Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano (VIGIAGUA).

3.3 O PROGRAMA VIGIAGUA

A água é um recurso natural que, apesar de ser um bem público, possui valor econômico agregado ao seu uso. Para garantir sua disponibilidade a padrões de qualidade adequados, são necessárias estratégias de controle da qualidade da água baseadas em parâmetros estabelecidos pelos órgãos ambientais e sanitários deliberativos (BRASIL, 2005).

No Brasil, as águas subterrâneas distribuídas por SACs são monitoradas por meio do Programa VIGIAGUA, atendendo os parâmetros mínimos para consumo humano de *E. coli.*, coliformes totais (CT), turbidez e fluoretos, definidos segundo a Diretriz Nacional do Plano de Amostragem de Água (BRASIL, 2016). Os três primeiros parâmetros foram escolhidos devido a sua importância como indicadores básicos da qualidade microbiológica da água para consumo humano, e o fluoreto, por ser um parâmetro avaliativo de saúde pública em função de sua deficiência ou excesso.

Kumar *et al.* (2014) descrevem que o risco de contaminação fecal das fontes de água potável deve ser reconhecido e investigado pelas autoridades municipais que controlam os sistemas hídricos para consumo humano. Nesse contexto, os municípios brasileiros realizam análises rotineiras e fornecem esses dados anualmente aos órgãos responsáveis em nível Estadual e Federal, Secretaria de Saúde e Ministério da Saúde, respectivamente, conforme número mínimo obrigatório de amostras mensais, com objetivo de promover a saúde e prevenir a contaminação de doenças de veiculação hídrica (OLIVEIRA *et al.*, 2019).

As metas a serem atingidas por estado, regional de saúde e município são estabelecidas nas Comissões Intergestores Bipartites (CIB) de cada estado. A inserção dos dados no SISAGUA (Sistema de Informação de Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano) permite caracterizar a cobertura de

abastecimento de água para consumo humano no Brasil e a qualidade da água consumida pela população. Essa caracterização é importante para a identificação de vulnerabilidades e para a tomada de decisão dos gestores. As informações cadastradas no SISAGUA são utilizadas tanto pelo setor de saúde quanto por outros setores envolvidos na temática, tais como: saneamento, meio ambiente, recursos hídricos, órgãos de controle, entre outros (BRASIL, 2020a).

Cerca de 80% dos municípios brasileiros desenvolvem ações de vigilância em qualidade das águas, uma vez que, as regiões centro-oeste (86%), sudeste (90%) e sul (96%) superam este valor. Já as regiões nordeste e norte apresentaram resultados inferiores, 67% e 47%, respectivamente (BRASIL, 2020b). Com isso, faz-se necessário manter os esforços em nível nacional para que ocorra evolução dos indicadores de municípios com dados de cadastro e controle da qualidade da água.

Os indicadores de qualidade da água em nível nacional apresentam um valor médio de 8,91% das amostras com presença de contaminação bacteriológica e 4,70% das amostras com resultados fora do padrão de qualidade da água para consumo humano de turbidez (uT). Para a região sul do Brasil, observa-se os seguintes dados de porcentagem de amostras fora do padrão para consumo humano (Tabela 1).

Tabela 1 - Dados de amostras de qualidade da água de consumo humano na região sul do Brasil no ciclo quadrienal 2016-2019

	Parâmetro	Valor Máximo Permitido para consumo¹	Total de amostras analisadas	Total de amostras fora do padrão	% de amostras fora do padrão
SUL (477 municípios)	CT/ <i>E. coli</i>	Ausência em 100 mL	68.356	8.452	12,36%
	Turbidez	5 uT	80.828	2.522	3,12%

Notas: ¹Portaria GM/MS 888/2021

Fonte: Adaptado de Brasil (2020a)

Nota-se que para parâmetros microbiológicos, mais de 12% das amostras coletadas estão fora do padrão de qualidade para consumo humano em 477 municípios cadastrados na região sul do Brasil, o mesmo ocorre para 3,12% do

parâmetro de turbidez. Para o município de Ponta Grossa, são apresentadas as porcentagens de atendimento ao Programa VIGIAGUA para cada parâmetro especificado na Diretriz Nacional do Plano de Amostragem de Água (BRASIL, 2016) entre 2016 e 2021 (Tabela 2), tais metas de número mínimo de análises de amostras de qualidade da água são estabelecidas pela Secretaria Estadual de Saúde do Estado do Paraná.

Tabela 2 - Indicadores quantitativos de análises de qualidade da água para os anos de 2016 a 2021 do município de Ponta Grossa – PR

Parâmetro	Quantitativo mínimo de análises		Número de amostras analisadas no período*					
	Anual	Total no Período	2016	2017	2018	2019	2021	% total no período
CT/ <i>E. coli</i>	444	2220	387 87,16%	456 102,70%	522 117,57%	446 100,45%	629 141,66%	2440 109,90%
Turbidez	444	2220	390 87,84%	457 102,93%	521 117,34%	446 100,45%	642 144,59%	2456 110,63%
Fluoreto	156	780	388 248,7%	457 292,9%	522 334,6%	446 285,9%	642 411,5%	2455 314,74%

Notas: *Devido à pandemia de COVID-19 não foram realizadas análises relevantes de qualidade de água no ano de 2020.

Fonte: Adaptado de Brasil (2022)

Pode-se observar que no período avaliado, foram realizadas 7.351 análises de água de diferentes fontes de abastecimento de água, caracterizadas como SACs no município de Ponta Grossa - PR, somando os parâmetros de CT, *E. coli.*, turbidez e fluoretos. No período estudado, nota-se a grande quantidade de amostragens realizadas para os quatro parâmetros, onde as metas estabelecidas pelo Estado do Paraná referente ao número mínimo de análises foram atendidas em mais de 100% em todos os indicadores, exceto em 2016.

3.4 FONTES DE CONTAMINAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

Diversos estudos ao redor do mundo demonstram que em muitas situações a água subterrânea utilizada para consumo humano tem indícios de contaminação

microbiológica. Pitkänen *et al.* (2011), em pesquisa realizada na Finlândia, citam que 40% de amostras de doze sistemas de abastecimento de água subterrânea testaram positivas para contaminação por coliformes, sendo destacado que a causa mais provável para esses valores é a má construção dos poços, permitindo o escoamento de águas superficiais possivelmente contaminadas por meio de chuvas ou inundações para os reservatórios subterrâneos.

Os resultados de De Giglio *et al.* (2016) indicam que, na região sudeste da Itália, 189 poços do total de 207 (91,3%) apresentaram contaminação de origem fecal. Rivera-Rodríguez *et al.* (2018), Indastruti *et al.* (2021) e Khan *et al.* (2021), em estudos recentes realizados no México, Indonésia e Paquistão, respectivamente, apresentam que a água proveniente de poços não atende aos requisitos mínimos de água potável, principalmente com relação à presença de CT e *E. coli*.

No Brasil, Ernesto *et al.* (2020) apontam que 11% das amostras de poços artesianos de Santa Maria – RS são impróprias para consumo humano devido à presença de *E. coli*. Estudos realizados por Junior *et al.* (2021) sobre a qualidade da água proveniente de SAC de uma universidade do oeste do Paraná apontam que 66% dos pontos de coleta analisados apresentaram contaminação bacteriológica por CT e termotolerantes.

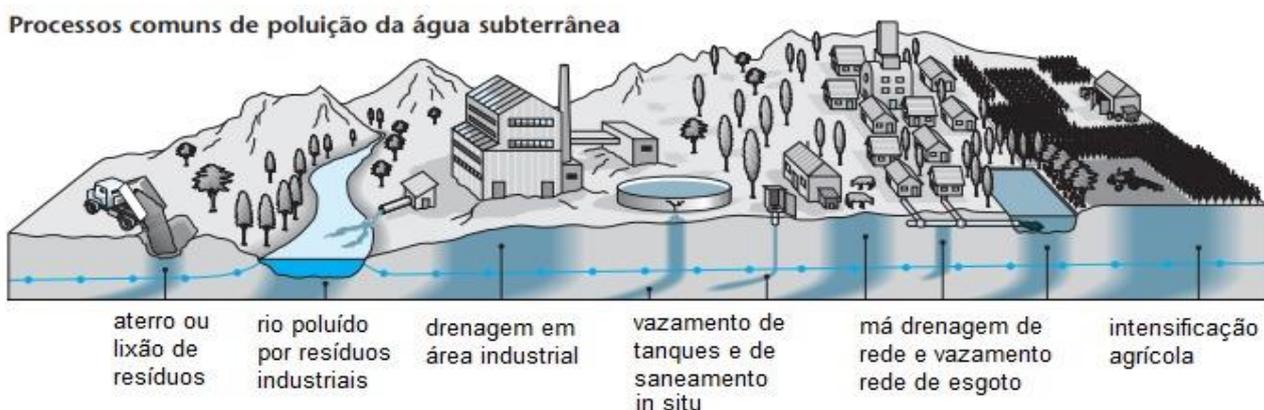
As secas prolongadas, bem como as chuvas fortes e as inundações podem causar impactos na qualidade e disponibilidade desses recursos. Portanto, a grande demanda pela água exerce uma pressão crescente sobre as águas subterrâneas (RETTTER *et al.*, 2021). Ademais, as águas para fins de abastecimento público, nesse contexto de uso, estão cada vez mais comprometidas em quantidade e qualidade, até mesmo as subterrâneas que apresentam a barreira do solo como proteção estão mais vulneráveis aos poluentes ambientais oriundos de fontes antropogênicas (MEDEIROS *et al.*, 2016).

Ações antropogênicas como o uso de fossas sépticas mal construídas, com operação e manutenção incorretas, possibilitam a contaminação das águas subterrâneas por microrganismos patogênicos (INDASTRUTI *et al.* 2021). Já Almeida *et al.* (2019) explicam que as deficiências técnicas na construção dos poços com relação a sua cimentação inadequada podem criar condições de vulnerabilidade à contaminação. Estudos de Elisante e Muzuka (2016) e Pujari *et al.* (2011) salientam que os microrganismos tendem a ser retidos e filtrados pelo solo ao longo da

profundidade, porém, mostraram que poços mal construídos podem permitir a percolação de contaminantes microbiológicos diretamente para a água subterrânea por meio de escoamento vertical em fraturas ou articulações mal encaixadas.

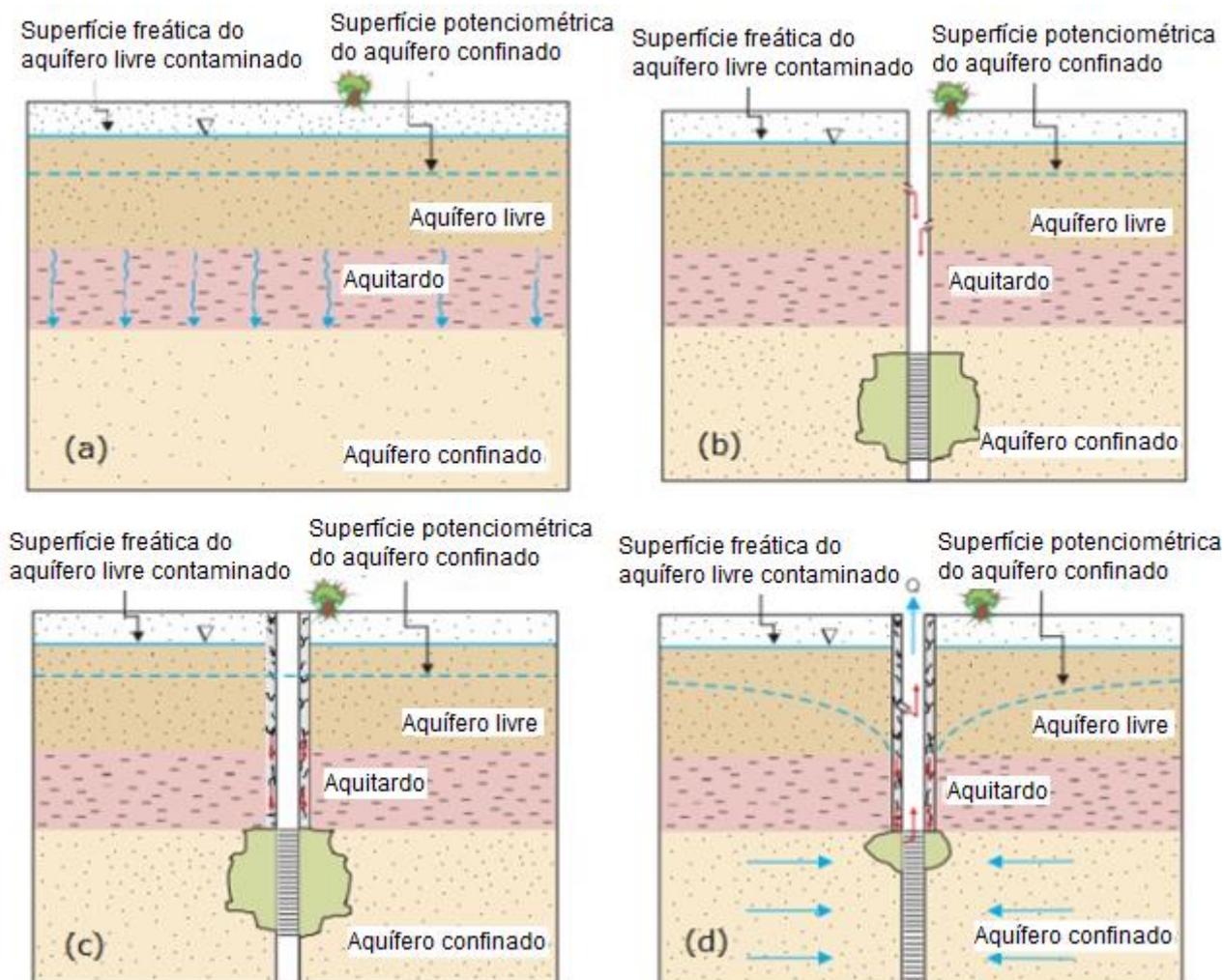
Segundo Foster *et al.* (2006) a poluição das águas subterrâneas ocorre nos pontos em que a carga contaminante gerada nos lixiviados produzidos pela atividade humana não é controlada e, principalmente nas atividades urbanas, industriais, agrícolas e de mineração (Figura 6), excedendo a capacidade de atenuação natural dos solos e das camadas de cobertura. Ademais, Feitosa (2008) apresenta na Figura 7 alguns modelos indiretos de contaminação de águas subterrâneas.

Figura 6 - Principais componentes e processos de contaminação de aquíferos



Fonte: adaptado de Foster *et al.* (2006)

Figura 7 - Fontes indiretas de contaminação de água subterrânea



Fonte: Adaptado de Feitosa (2008)

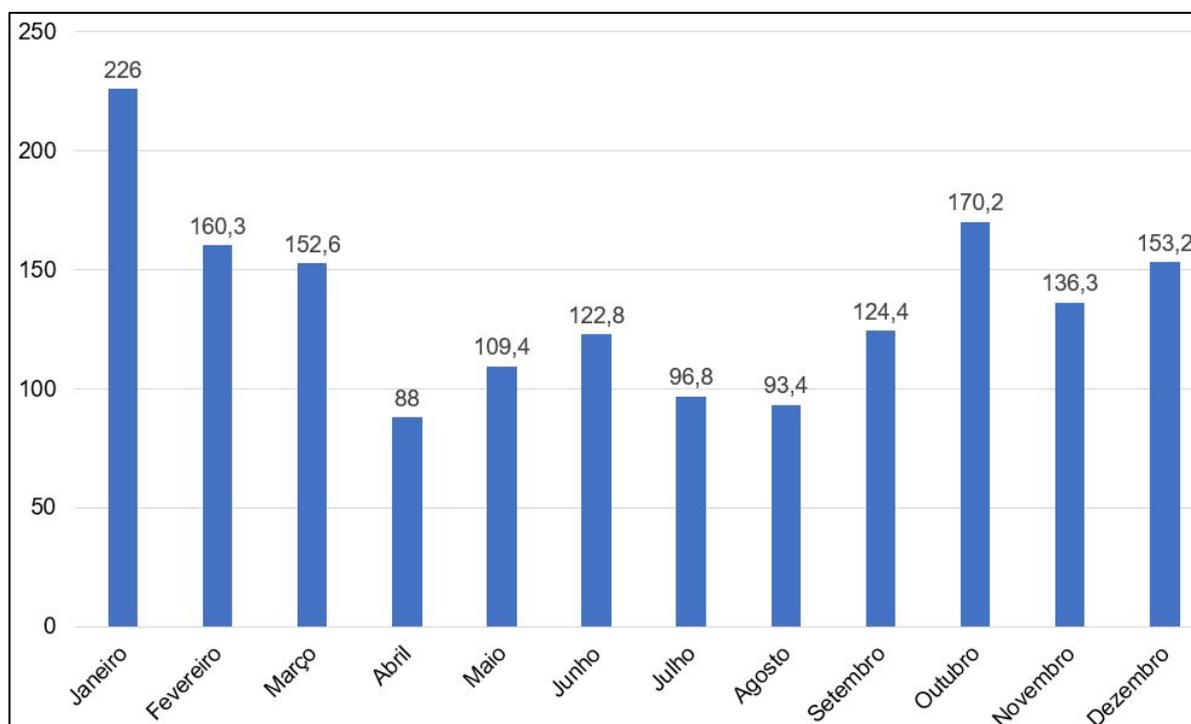
Sendo (a) filtração descendente de águas contaminadas de um aquífero livre para confinado através de camada semipermeável; (b) contaminação de um aquífero freático para um confinado profundo por meio de um poço abandonado com rupturas e fissuras; (c) contaminação de um aquífero freático para um confinado profundo por meio de um poço com defeito de cimentação, permitindo filtração vertical pelo espaço anelar; (d) aquífero confinado profundo contaminado através de poço com rupturas no revestimento que permitem entrada direta de água.

Outro ponto a ser destacado é o regime de chuvas que pode interferir diretamente nas fontes indiretas de contaminação de água subterrânea devido ao carreamento de sólidos e possíveis contaminantes de origem biológica (PITKÄNEN *et*

al., 2011; RETTER, 2021). Para o município de Ponta Grossa, segundo Leite *et al.* (2011), cita-se que o mês com maior média de precipitação é janeiro (185,4 mm) e que o mês com menor média de precipitação é agosto (78,9 mm).

Observa-se também que conforme os dados do AGUASPARANÁ⁷ na estação pluviométrica de Itaiacoca - código 02549052, situada no município de Ponta Grossa, no outono e no inverno são apresentados os menores índices de chuva e no período da primavera e do verão ocorrem as maiores precipitações pluviométricas (Figura 8).

Figura 8 - Médias de precipitação (mm) dos anos de 2002 a 2022 em Ponta Grossa – PR



Fonte: O autor

3.5 PERÍMETRO DE PROTEÇÃO DE POÇOS

Conforme Foster *et al.* (2006) as áreas de proteção os poços devem ser delimitadas a fim de proporcionar vigilância contra a contaminação das fontes de água

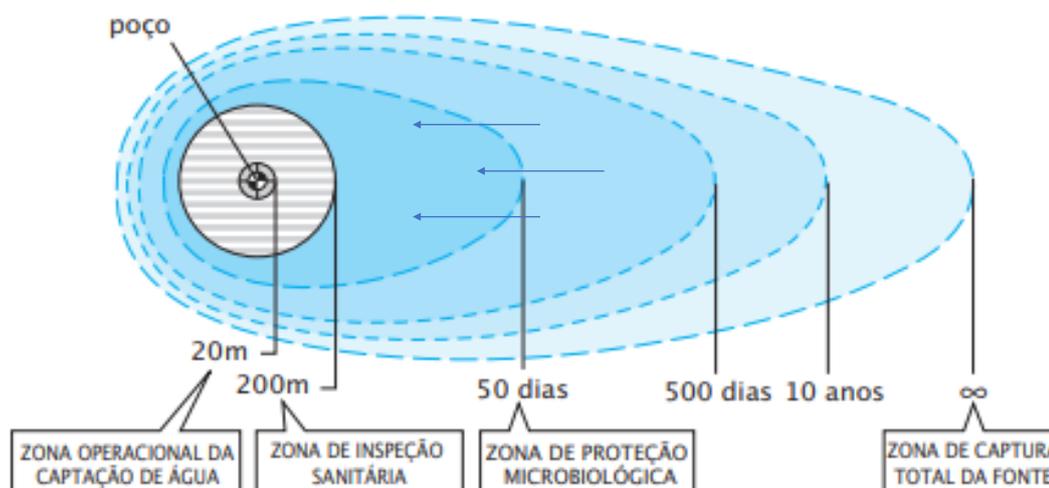
⁷ Relatório de Alturas Diárias de Precipitação: <http://www.sih-web.aguasparana.pr.gov.br/sih-web/gerarRelatorioAlturasDiariasPrecipitacao.do?action=carregarInterfacelInicial>

destinadas ao abastecimento público, principalmente devido às atividades antrópicas na proximidade de uma SAC.

Além dos parâmetros quantitativos microbiológicos e físico-químicos de controle da qualidade da água, segundo WHO (2012) as inspeções sanitárias do entorno dos poços podem auxiliar na avaliação dos riscos para a segurança dos consumidores da água, tendo em conta as condições, dispositivos e práticas no sistema de abastecimento.

As inspeções sanitárias nas áreas de proteção de poços são complementares à análise da qualidade da água, existindo um aumento do poder de análise subsequente quando ambos os tipos de dados estão disponíveis (WHO, 2012). A inspeção tem um valor adicional, uma vez que oferece uma perspectiva de longo prazo sobre os riscos de futuras contaminações microbiológicas e antropogênicas. Nesse contexto, são destacados os perímetros de proteção de poços (PPP) que possibilitam a atenuação de possível contaminação dos aquíferos em relação ao uso e ocupação do solo (Figura 9).

Figura 9 - Esquema de PPPs baseados no critério do tempo de trânsito ao redor de um poço em aquífero não confinado



Fonte: adaptado de Foster *et al.* (2006)

O raio fixo arbitrário estipula medidas fixas para qualquer tipo poço e localização, nesse caso, podem ser definidos os PPPs como zona operacional de captação da água (20 metros) e zona de inspeção sanitária (200 metros), pois não

levam em consideração o fluxo das águas subterrâneas nem a zona de interferência hidráulica ou cone de rebaixamento (FOSTER *et al.*, 2006).

Entretanto, no Brasil, de acordo com a Resolução CONAMA 396/2008, os PPPs, objetivando a proteção da qualidade da água subterrânea, devem ser definidos pelos órgãos ambientais estaduais em conjuntos com os órgãos gestores dos recursos hídricos. Apesar da obrigatoriedade de definição dos perímetros, apenas oito estados brasileiros especificam os valores estabelecidos em legislação própria, conforme Quadro 2.

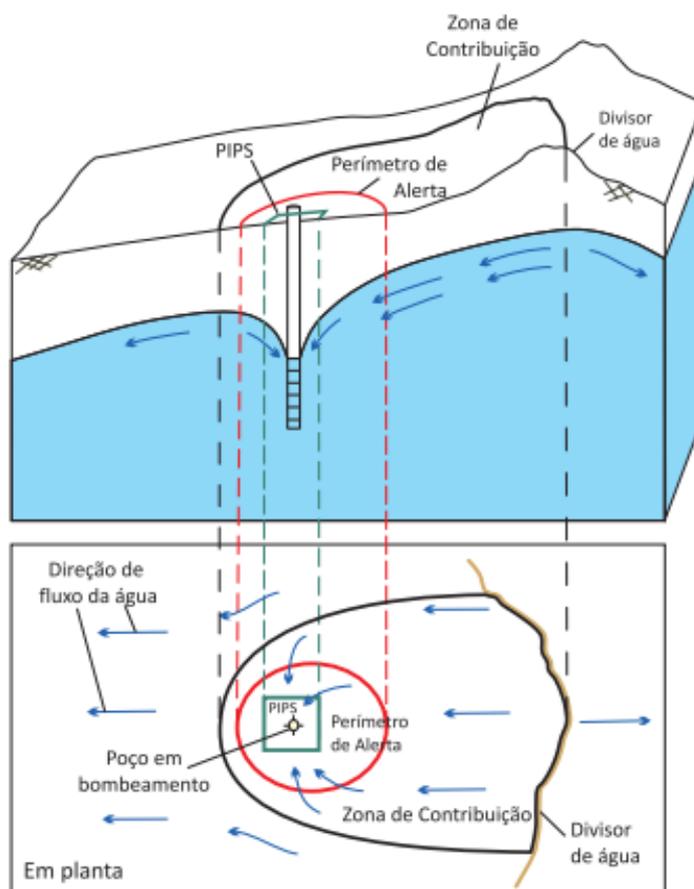
Quadro 2 - Definições de PPPs em estados brasileiros

Estado	Perímetro Estabelecido	Legislação
São Paulo	10 metros	Decreto Estadual nº 32.955/1991
Pernambuco	10 metros	Decreto Estadual nº 20.423/1998
Piauí	10 metros	Decreto Estadual nº 5.165/2000
Distrito Federal	30 metros	Decreto Estadual nº 22.358/2001
Pará	10 metros	Lei Estadual nº 6.381/2001
Rio Grande do Sul	10 metros	Decreto Estadual nº 42.047/2002
Tocantins	50 metros	Lei Estadual nº 1.307/2002
Roraima	10 metros	Lei Estadual nº 547/2006

Fonte: O autor

O Instituto Água e Terra do Paraná (IAT), não possui legislação específica para PPP, sendo assim, para embasar o presente estudo foi utilizado o formulário de inspeção sanitária adaptado da Organização Mundial da Saúde (WHO, 2012) abrangendo o raio fixo de 10 metros a partir do ponto de captação baseado na maioria dos estados destacados. Cabe destaque para a legislação do Estado de São Paulo, Decreto Estadual nº 32.955/91, que regulamenta e dispõe sobre a preservação de águas subterrâneas e define o Perímetro Imediato de Proteção Sanitária (PIPS), conforme Figura 10. A normativa define que os poços devem ser cercados e protegidos com telas, devendo o seu interior ficar resguardado da entrada ou penetração de poluentes, sendo que, para proteção efetiva dos poços, os mesmos devem ser construídos com lajes de proteção de concreto armado, tubo de revestimento, ter declividade do centro para as bordas, entre outros (SÃO PAULO, 1991).

Figura 10 - Perímetro Imediato de Proteção Sanitária (PIPS) estabelecido no Decreto Estadual nº 32.955/91



Fonte: Iritani e Ezaki (2012b)

Como complementação, as medidas de controle das fontes de águas subterrâneas devem incluir a proteção contra contaminação do aquífero na área local ao redor do poço, assegurando a sua integridade física com cimentação, superfície selada, invólucro intacto, e outros (WHO, 2017). Em resumo, são avaliações visuais das infraestruturas e do ambiente, concentram-se geralmente na área imediata em torno da fonte de água, utilizando uma abordagem semiquantitativa normalizada com base em perguntas lógicas e uma abordagem simples de sistema de pontuação (WHO, 2012).

3.6 ASPECTOS LEGAIS RELACIONADOS AO CONSUMO HUMANO

Nesse item, são apresentados, em termos de prioridade, os indicadores do plano de amostragem básico de avaliação e monitoramento da qualidade da água que podem ser resumidos em análises de parâmetros microbiológicos e parâmetros físico-químicos (WHO, 2012).

3.6.1 Parâmetros Microbiológicos

Há uma grande variedade de microrganismos que podem ser encontrados na água. Estes incluem alguns que são patogênicos e outros não patogênicos (WHO, 2012). A contagem padrão de bactérias é muito importante para avaliação da qualidade da água. Embora a maioria dessas bactérias não seja patogênica, podem representar riscos à saúde, como também deteriorar a qualidade da água, provocando odores e sabores desagradáveis (BRASIL, 2013).

Os agentes patogênicos são geralmente derivados das fezes humanas e animais, sendo prática normal utilizar organismos indicadores, geralmente bactérias termotolerantes, para a análise da qualidade microbiológica da água potável (WHO, 2012).

3.6.1.1 Coliformes totais

O grupo dos CT contempla bactérias de vida livre, as quais podem ocorrer naturalmente no solo, na água e em plantas. Esse grupo de bactérias, em teoria, é mais resistente do que as bactérias patogênicas, podendo ser utilizado como um indicador de desinfecção (WHO, 2017). O emprego exclusivo desse indicador para avaliação da qualidade da água, especialmente as de fontes individuais, pode levar a superestimativa dos riscos à saúde associados ao consumo de água.

Muito embora a simples presença de CT em uma dada amostra pode não garantir relação com poluição da água por material fecal, tal fato não deve ser de todo negligenciado, servindo como alerta a uma possível exposição da fonte a focos de poluição/contaminação (BRASIL, 2016).

3.6.1.2 *Escherichia coli*

A origem fecal da *E. coli* é inquestionável e sua natureza ubíqua pouco provável. O estágio atual do conhecimento em microbiologia sanitária permite caracterizar esse microrganismo como o mais preciso indicador da contaminação da água por material fecal, sendo a sua presença um indício da ocorrência de possíveis microrganismos patogênicos na água (BRASIL, 2013; BRASIL, 2016). Por isso, as Portarias de potabilidade estabelecem que a água para consumo humano deve ser isenta de *E. coli* em qualquer situação.

Conforme a Diretriz Nacional do Plano de Amostragem de Água (BRASIL, 2016) as amostras de água natural (não submetidas à desinfecção) devem ser submetidas à análise específica para *E. coli*, sendo facultada a realização de análise para o parâmetro CT, onde a água para consumo deve estar totalmente isenta de ambos os indicadores microbiológicos em alíquotas de 100mL.

3.6.2 Parâmetros Físico-Químicos

3.6.2.1 Turbidez

A turbidez é uma medida da matéria sólida em suspensão na água, seja silte, argila, coloides, matéria orgânica (MANZIONE, 2015), podendo ser ocasionada por microrganismos como bactérias, protozoários, plâncton e outros. Brasil (2006) indica que a turbidez é medida pelo grau de atenuação de intensidade que um feixe de luz sofre ao atravessar tais partículas (ocorrendo absorção e espalhamento, uma vez que as partículas que provocam turbidez nas águas são maiores que o comprimento de onda da luz branca).

De acordo com o padrão organoléptico de potabilidade da Portaria GM/MS 888/2021 o valor máximo permitido (VMP) é de 5 uT em qualquer ponto da rede de distribuição e 1 uT na saída das estações de tratamento. Mesmo em valores baixos, a turbidez ocasionada por partículas em suspensão pode proteger os microrganismos da ação dos agentes desinfetantes como o cloro, ácido peracético e até mesmo a radiação UV (SOUZA, 2015; BRASIL, 2006).

Além disso, muitos consumidores associam a turbidez à segurança e consideram a água turva como sendo insegura para beber (WHO, 2017). A alta turbidez, mesmo na ausência de bactérias indicadoras de coliformes fecais, podem ser motivo de preocupação uma vez que pode ser ocasionada por redução da integridade sanitária do sistema e, conseqüentemente, a segurança pode estar comprometida (WHO, 2012).

3.6.2.2 Fluoreto

O uso do flúor promove melhorias significativas na saúde bucal e na qualidade de vida da população com a redução dos índices de cárie dental (WHO, 2017), porém, segundo Cangussu *et al.* (2002) seu excesso pode causar fluorose dental, ocorrendo geralmente em locais onde o flúor está presente em altas concentrações na água bruta.

Conforme Ahmad *et al.* (2020) águas naturais subterrâneas podem ter níveis elevados de flúor, ocorrendo predominantemente em locais com rochas que se desgastam frequentemente, bem como em áreas com escoamento e infiltrações. Para SACs desprovidas da etapa de tratamento com aplicação de flúor, o monitoramento visa identificar a ocorrência natural de fluoretos nas águas subterrâneas, verificando o atendimento do VMP estabelecido no padrão de potabilidade (1,5 mg.L⁻¹).

Quando encontrados valores que superam esse VMP, pensando no uso dessa água para consumo humano, deve ser avaliada a necessidade de implantação de tratamento específico para remoção de fluoreto, principalmente em localidades com histórico de ocorrência natural de fluoreto em concentrações elevadas (BRASIL, 2016).

3.7 DOENÇAS DE VEICULAÇÃO HÍDRICA

As doenças transmitidas pela água tornaram-se uma das maiores preocupações de saúde pública a nível mundial, pois são principalmente causadas por água contaminada, causando vários tipos de doenças diarreicas, tais como cólera e disenteria (AHMAD *et al.*, 2020). De acordo com WHO (2017) os grupos com maior risco de doenças transmitidas pela água são os bebês, crianças pequenas, as pessoas debilitadas e os idosos, especialmente quando vivem em condições de falta de saneamento básico.

Globalmente, a cada ano, estima-se que aproximadamente 829.000 pessoas morram de diarreia como resultado de falta de água potável e saneamento adequado, incluindo quase 300.000 crianças menores de cinco anos (UNESCO, 2021). Nesse enquadramento, surtos de doenças transmitidas pela água devem ser particularmente evitados devido a sua capacidade de resultar na infecção simultânea de um grande número de pessoas e causando problemas potenciais à comunidade e represamento de atendimento nas unidades de atenção primária (WHO, 2017).

Quando compostos químicos excedem o valor máximo recomendado, provocam alterações na característica de coloração e odor da água. Essas modificações aparentes podem levar a rejeição ao consumo da água, além de possibilitarem o surgimento de risco de surtos de doenças de veiculação hídrica (ALMEIDA *et al.*, 2019).

Outro ponto relevante levantado por Moreira e Bondelind (2016) são os eventos hidrológicos extremos, como secas, estiagens e alterações na temperatura do ar, que podem aumentar o risco de transmissão de doenças de veiculação hídrica. No mesmo estudo foi identificado que os principais patogênicos causadores de doenças vinculados à água são: *Cryptosporidium*, norovírus, *Giardia*, *Campylobacter* e rotavírus.

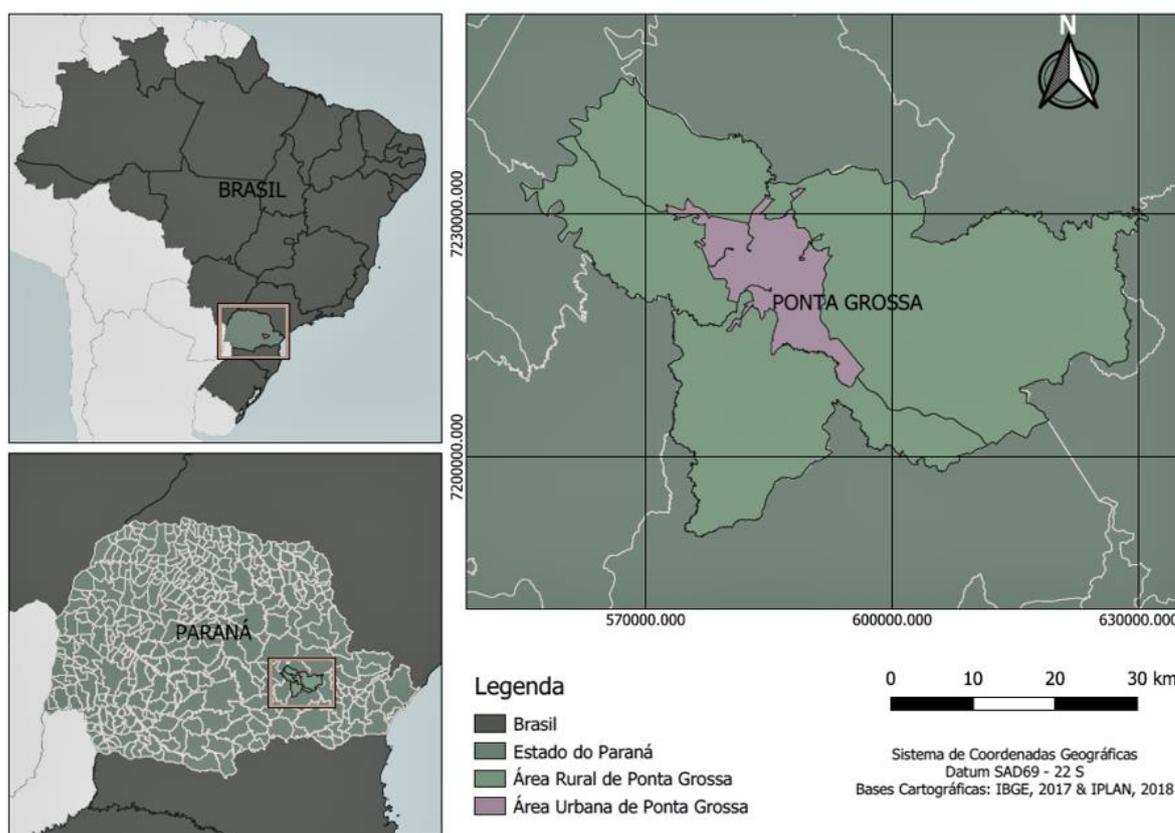
Sendo assim, a contaminação da água torna-se um problema de saúde pública, visto que, a incidência de doenças de veiculação hídrica associadas à má qualidade da água consumida e a precariedade ou inexistência de estruturas de distribuição de água e tratamento de esgoto, refletem, principalmente, nos indicadores de mortalidade infantil (BICUDO *et al.*, 2010). Ademais, o consumo de água subterrânea não tratada ou inadequadamente desinfetada ocorre com frequência devido às deficiências técnicas ou falta de conhecimento da população, também sendo responsável por surtos de doenças de veiculação hídrica (AMARAL *et al.*, 2003; WHO, 2011; MOREIRA; BONDELIND, 2016; CHAN *et al.*, 2021).

4 METODOLOGIA

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E ABORDAGEM DAS COLETAS

O presente estudo foi realizado na cidade de Ponta Grossa – Paraná (Figura 11) com população estimada em cerca de 358.367 habitantes (IBGE, 2023). Possui clima Subtropical Úmido Mesotérmico, temperatura média no mês mais frio abaixo de 18°C (mesotérmico), com verões frescos, temperatura média no mês mais quente abaixo de 22°C e sem estação seca definida (MAACK, 2012). O regime pluviométrico é bastante variado, em média, todos os meses são chuvosos, apresentando volumes de precipitação máxima nos meses de verão (CRUZ, 2007). Grande parte do perímetro urbano do município está localizado sobre a área baixa do Graben de Ponta Grossa, também conhecido como fossa tectônica, devido as suas características geomorfológicas, apresenta relevo bastante acidentado, facilitando o surgimento de vales profundos e, conseqüentemente, a exposição do lençol freático (PARANÁ, 2021).

Figura 11 - Mapa de situação urbana/rural do município de Ponta Grossa – PR



Fonte: O autor

4.1.1 Pesquisa em Banco de Dados Abertos de Qualidade da Água

Inicialmente foi realizada busca pelos dados no Portal Brasileiro de Dados Abertos – Vigilância de Parâmetros Básicos⁸ (Figura 12), que são dados secundários em que qualquer pessoa pode livremente acessá-los, utilizá-los e compartilhá-los para qualquer finalidade, estando sujeito às exigências que visem preservar sua proveniência e sua abertura. Tais dados são disponibilizados em plataformas governamentais a fim de garantir a transparência na gestão pública. Além disso, foram verificados os resultados dos parâmetros específicos do Programa VIGIAGUA municipal, com base nas amostras coletadas pela Vigilância Sanitária de Ponta Grossa, que são analisadas e registradas pelo Laboratório de Recursos Hídricos da UEPG na plataforma GAL (Gerenciador de Ambiente Laboratorial), interligada ao SISAGUA.

Figura 12 - Página de pesquisa no portal de dados abertos

The screenshot displays the 'gov.br' portal interface for the 'Dados Abertos' section. The main heading is 'Sisagua - Vigilância parâmetros básicos'. Below this, there are buttons for '+ Seguir' and 'Avaliar ★'. A '# Atualizado' field shows '0 / 10'. A progress bar for 'ESCALA DE SATISFAÇÃO' is at 0/10. The '0 - RESPOSTAS' section shows '0' responses and '53' downloads. The 'INFO' section includes the license 'Licença: Creative Commons Attribution', formats 'Formatos: ODT, ZIP, api;', and the last update 'Última alteração: 28/03/2023 02:45:28'. On the right, the 'Organização' section identifies the 'Ministério da Saúde' with a description and '31 conjuntos de dados' and '1 reusos'. Below this are buttons for '+ Seguir' and 'Contato'. Further down are sections for 'Descrição', 'Recursos 12', and 'Ações', each with a dropdown arrow.

Fonte: O autor

8 Dados do monitoramento da qualidade da água para consumo humano. SISAGUA - Vigilância (Parâmetros Básicos) Disponível em: <https://dados.gov.br/dados/conjuntos-dados/sisagua-vigilancia-parametros-basicos>

Os dados abertos são alimentados no sistema do SISAGUA após análise dos resultados de amostras de água que são coletadas mensalmente pela equipe do VIGIAGUA municipal, sendo que, as coletas seguem os procedimentos operacionais padrão, estabelecidos pelo Manual de Coleta de Amostras de Água (PARANÁ, 2020b). Em cada ponto de amostragem realiza-se coleta de duas alíquotas da mesma amostra: uma em um frasco estéril de 200 mL para turbidez e fluoreto e outra, em um frasco estéril de 100 mL para análises microbiológicas (CT e *E. coli*). Por meio de acordo com a Secretaria Estadual de Saúde do Paraná, estes frascos esterilizados são fornecidos pelo Laboratório de Recursos Hídricos da UEPG aos municípios pertencentes à região dos Campos Gerais.

Após a coleta, a amostra é transportada ao laboratório em um prazo de até 24 horas, utilizando caixa térmica refrigerada com gelo reciclável (Figura 13), sendo que, conforme Paraná (2020b) cabe ao laboratório receber, conferir as documentações e analisar as amostras coletadas.

Figura 13 - Caixa térmica refrigerada contendo frascos de coleta de amostras microbiológicas e físico-químicas



Fonte: O autor

Com as amostras em laboratório, realizam-se as análises dos parâmetros básicos da qualidade da água: CT e *E. coli*, turbidez e fluoreto, conforme métodos descritos no Quadro 3.

Quadro 3 - Parâmetros e métodos de análises das amostras de água dos poços, realizadas pelo laboratório de recursos hídricos

Parâmetro	Valor Máximo Permitido para consumo ¹	Referência	Metodologia
CT	Ausência em 100 mL	APHA (2017) SMEWW, 23ª Ed.	Substrato Cromogênico/ Enzimático - 9223 B
<i>E. coli</i>	Ausência em 100 mL	APHA (2017) SMEWW, 23ª Ed.	Substrato Cromogênico/ Enzimático - 9223 B
Turbidez	5 uT	APHA (2017) SMEWW, 23ª Ed.	Método nefelométrico - 2130 B
Fluoreto	1,5 mg.L ⁻¹	APHA (2017) SMEWW, 23ª Ed.	Método Colorimétrico SPADNS - 4500-F- D

Notas: SMEWW: *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 23th ed. 2017; ¹Portaria MS 888/2021

Fonte: O autor

4.1.2 Definição dos Pontos de Coleta e Períodos de Abrangência

Após aquisição dos dados, foi definido o intervalo de tempo de seis anos de avaliação, compreendendo o período de 2016 a 2021. Devido a pandemia de COVID-19, não foram realizadas análises relevantes de qualidade de água das SACs no ano de 2020, principalmente devido às restrições de coleta e à paralisação dos serviços do laboratório de recursos hídricos da UEPG, portanto, o ano de 2020 foi desconsiderado.

Para definição das SACs escolhidas, determinou-se a necessidade de no mínimo três análises de qualidade da água por ano, gerando um maior nível de precisão e confiança nos dados do estudo. Após a determinação dos poços com número de amostragens mais relevantes, foi realizada a tabulação específica dos elementos por meio do *software LibreOffice Calc*, separando os dados disponíveis por: nome do poço, localização, data da coleta, hora da coleta, ocorrência e volume de

chuva nas últimas 48 horas e resultados de CT e *E. coli.*, turbidez e fluoretos das amostras analisadas.

4.2 ANÁLISE QUALITATIVAS

4.2.1 Georreferenciamento e Caracterização das SACs

Com intuito de identificar e indicar precisamente a localização das SACs de água para consumo humano, realizou-se o georreferenciamento de cada poço com auxílio de GPS marca Garmin, modelo 10X, sendo auxiliado pelos dados já mapeados e georreferenciados existentes na plataforma GeoWEB⁹ do Instituto de Planejamento Urbano de Ponta Grossa e do *software* QGIS 3.16.13.

Além disso, foram caracterizados os tipos de uso e atividades dos estabelecimentos onde estão instalados os poços, as estimativas de profundidade e do número de pessoas abrangidas por meio de entrevistas e coletas de dados junto dos proprietários ou responsáveis técnicos das SACs.

4.2.2 Perímetros de Proteção dos Poços

Como os poços cadastrados no VIGIAGUA não possuem dados de vazão, profundidade, porosidade e espessura saturada, dificultam-se os cálculos específicos do perímetro de proteção para cada poço, sendo assim, foi utilizado como ferramenta de análise o formulário de inspeção sanitária para poços com bombas mecanizadas adaptado de WHO (2012), sendo a coleta de dados autorizada pelo coordenador da vigilância sanitária municipal (ANEXO A). Esse formulário abrange o raio fixo do PIPS do Decreto Estadual nº 32.955/1991 (SÃO PAULO, 1991) de 10 metros para avaliação das condições de uso e ocupação do solo no entorno dos poços

9 Geoprocessamento Corporativo - Prefeitura Municipal de Ponta Grossa - <http://geoweb.pontagrossa.pr.gov.br/>

4.2.3 Classificação de Risco de Ingestão da Água

O preenchimento do formulário de inspeção sanitária adaptado de WHO (2012) ocorreu por meio de visita *in loco* com base em um questionário de dez perguntas (APÊNDICE A) com intuito de realizar um diagnóstico quali-quantitativo do uso e ocupação do solo no entorno dos poços, gerando uma pontuação de 0 (zero) a 10 (dez) dos riscos encontrados para cada local. A inspeção sanitária trata-se de uma técnica visual de identificação de riscos potenciais para a qualidade da água no poço, fornecendo informações sobre possíveis causas da poluição retroativa ou sobre a possibilidade de causas futuras, sendo também uma ferramenta de tratamento preventivo. Ahmad *et al.* (2020) caracterizam a inspeção sanitária como o melhor meio de identificar potenciais problemas e alterações na qualidade da água potável, desempenhando um papel fundamental na garantia do fornecimento consistente e seguro de água potável aos usuários.

Sendo a *E. coli* o indicador mais preciso de contaminação fecal, nota-se a possibilidade de risco à saúde dos consumidores, pois o grau de contaminação das águas é usualmente aferido com base na densidade de organismos indicadores, no pressuposto de que há uma relação semiquantitativa entre estas e a presença de outros agentes patogênicos. Essa categorização de risco é indicada por WHO (2011) de acordo com o número de *E. coli* por 100mL de amostras, conforme exemplificado no Quadro 4.

Quadro 4 - Risco para a saúde da ingestão de água contaminada por *E. coli* com base nas diretrizes da OMS para a qualidade da água potável

Risco à saúde	<i>E. coli</i> (UFC/100mL)
Baixo risco (seguro)	Ausência
Risco intermediário (provavelmente seguro)	1 a 10
Alto risco (provavelmente inseguro)	11 a 100
Altíssimo risco (inseguro)	Maior que 100

Fonte: adaptado de WHO (2011)

Como complementação da análise dos resultados analíticos dos parâmetros de qualidade da água para consumo humano e as pontuações referentes à escala de risco do formulário de inspeção sanitária, foi realizado o enquadramento do risco de contaminação com base na matriz de prioridade de ações (Quadro 5), identificando os poços com maior suscetibilidade à contaminação microbiológica.

Quadro 5 - Exemplo de matriz de prioridade de ações corretivas baseado na contagem microbiológica e pontuação do formulário de inspeção sanitária

Contagem de <i>E. coli</i> (UFC / 100 mL)	Escala de risco da inspeção sanitária (susceptibilidade à contaminação por fezes humanas e animais)			
	0 – 2	3 – 5	6 – 8	9 – 10
< 1				
1 – 10				
11 – 100				
> 100				

Notas: Níveis de risco: 0-2 Baixo; 3-5 Intermediário; 6-8 Elevado; 9-10 Muito elevados
Prioridade de ação: Verde – nenhuma ação necessária; Amarelo – ação simplificada; Laranja – ação prioritária; Vermelho – ação urgente.

Fonte: Adaptado de WHO (2011)

A análise combinada desses dados pode ser utilizada para identificar as possíveis causas de contaminação e as medidas preventivas de controle, sendo importante para apoiar a tomada de decisões de maneira eficaz e racional (WHO, 2011). As pontuações associadas aos níveis de risco devem ser selecionadas de acordo das circunstâncias locais (WHO, 1997), onde podem ser descritas as principais ações de remediação de acordo com o Quadro 6:

Quadro 6 - Principais ações de remediação de acordo com a matriz de ações

Tipo de ação	Descrição da ação
Ação básica	Treinamento sobre condições higiênico-sanitárias para o responsável e para a comunidade (Educação Ambiental)
Ação intermediária	Realizar limpeza e desinfecção do entorno além do monitoramento da qualidade da água semanalmente
Ação urgente	Notificar os usuários e/ou responsável técnico para ferver a água ou aumentar as concentrações de desinfetantes químicos (cloração) antes do consumo. Podendo ocorrer interdição do consumo.

Fonte: Adaptado de WHO (1997)

4.2.4 Mapeamento de Vulnerabilidade

O estimador de Kernel é um método simplificado para obtenção da estimativa de intensidade de um fenômeno por um valor de área, segundo Carvalho e Câmara (2004) um *kernel estimator* é um estimador cujos parâmetros básicos são:

- (a) um raio de influência que define a vizinhança do ponto a ser interpolado;
- (b) uma função de estimação com propriedades “convenientes” de suavização do fenômeno.

O raio de influência (R) é de extrema importância, podendo resultar em uma superfície muito suavizada, com um raio muito grande. A partir desse parâmetro é definido a vizinhança ao redor de um ponto, com isso, deve ser estimada a intensidade de Kernel para o determinado fenômeno (CARVALHO; CÂMARA, 2004). Para chegar até o mapa de densidade de Kernel, é necessário descobrir o raio de influência dos poços estudados, primeiramente, obtendo-se os valores de distância máxima e mínima dos poços.

A fim de gerar um valor único entre as distâncias apresentadas, realiza-se a subtração e adição dos valores da média da distância média (\bar{x}) pela média do desvio padrão ($\bar{x}\sigma$) de todos os pontos (RIZZATTI *et al.*, 2020) como mostra a Equação 1.

$$R = \bar{x} \pm \bar{x}\sigma \quad (1)$$

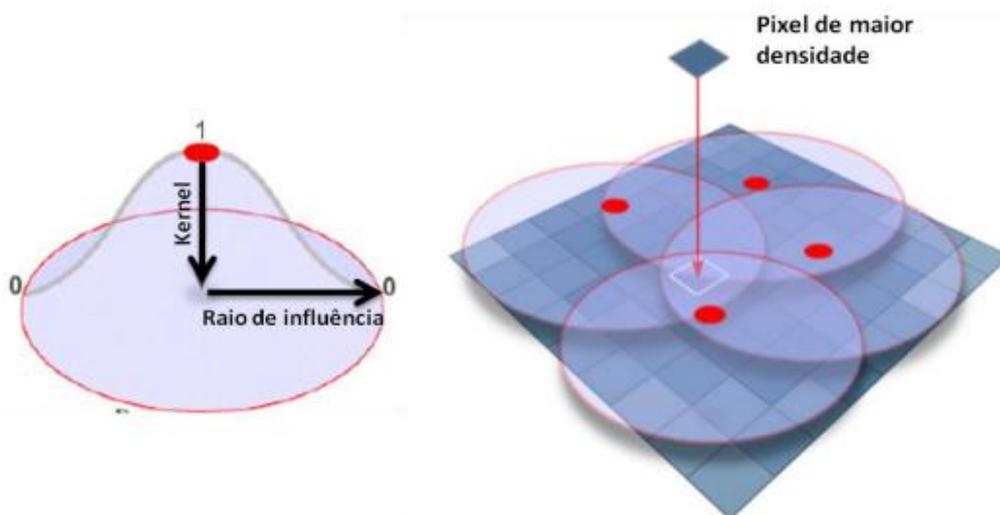
Para determinar a distância média, desvio padrão, distância mínima e máxima de cada um dos pontos, utiliza-se algoritmo “Matriz de Distância” dentro do *software* QGIS 3.16.13. Após criação da tabela de matrizes de distância, utilizando o *software* livre Libreoffice Calc, foram realizados os cálculos para determinação do valor de raio final a ser utilizado (R = 2.442m).

Para a função de estimação, utiliza-se a forma quártica, Equação 2, na qual o cômputo dos pesos é dependente da distância (poços próximos têm maior peso do que poços distantes, mas o decréscimo é gradual), onde a função de interpolação (h) é dada em função da distância euclidiana (R) entre o ponto localizado e o evento observado.

$$h(R) = \frac{3}{\pi} \times (1 - R^2)^2 \quad (2)$$

Como pode ser verificado na Figura 14, o maior grau de densidade ocorre quando existe a sobreposição dos raios de influência de dois ou mais pontos em uma superfície matricial onde o valor para aquele pixel é a soma dos valores sobrepostos, divididos pela área de cada raio de pesquisa (BERGAMASCHI, 2010).

Figura 14 - Exemplo da sobreposição do raio de influência



Fonte: Bergamaschi (2010)

4.2.5 Mapa de Calor de Kernel

Com o raio definido e a função escolhida, torna-se possível a criação dos mapas de Kernel (mapa de calor) para os resultados das médias dos valores de contaminação microbiológica e físico-química para cada ano estudado (2016 a 2021). Para realizar a densidade de Kernel, utilizou-se o algoritmo “Mapa de Calor (Estimativa de Densidade de Kernel)” dentro do *software* QGIS 3.16.13. A função Kernel é escolhida de acordo com a distribuição dos poços, dessa maneira é importante analisar a intensidade dos valores microbiológicos e físico-químicos a partir de seus valores próximos, mas também considerando os valores de pontos distantes.

Os mapas de calor são designados por esquemas de cores, que passam do amarelo para o laranja e depois para o vermelho à medida que os valores de concentração aumentam, dando a aparência de estarem “mais quentes” (DEBOER, 2015). A fim de viabilizar a identificação das regiões de concentração de contaminação,

o *raster* resultante foi reclassificado em classes visuais de concentração, denominadas como: muito baixa (azul), baixa (verde), média (amarelo), alta (laranja) e muito alta (vermelho).

4.3 ANÁLISES QUANTITATIVAS

4.3.1 Ocorrência de Precipitação

Durante as coletas de amostras de água dos poços vinculados ao programa VIGIAGUA os fiscais sanitários responsáveis indicam nas fichas de campo sobre a ocorrência ou não de chuva nas últimas 48 horas no município. Aliado aos dados ambientais do SIH (Sistema de Informações Hidrológicas)¹⁰ da estação meteorológica de Itaiacoca – código 2549052, foi possível quantificar e tabular os volumes de precipitação anteriores a cada coleta de amostras.

4.3.2 Tratamento Estatístico

Uma vez que se tratam de dados ambientais, independentes e aleatórios, os resultados de CT e *E. coli* foram convertidos em logaritmo de base 10, essa transformação (UFC/100mL para log UFC/100mL) apresenta maior precisão nas análises estatísticas, maior coeficiente de determinação, menor coeficiente de variação e menores erros-padrão.

Por meio do teste de normalidade de Shapiro-Wilk, determinou-se que as concentrações dos parâmetros de qualidade da água não possuem distribuição normal (Tabela 3), devido a sua alta variabilidade sazonal. Nesse caso, o tratamento estatístico dos dados foi realizado por meio de análise descritiva e teste de Kruskal-Wallis para dados não paramétricos com mais de três grupos, avaliando a variabilidade dos resultados no período de 2016 a 2021. Nas análises que indicam a presença de diferenças significativas ($p \leq 0,05$), foi realizada a comparação múltiplas em pares dos valores (Teste DSCF), também com 5% de probabilidade para

10 Relatório de Alturas Diárias de Precipitação. Disponível em: <http://www.sih-web.aguasparana.pr.gov.br/sih-web/gerarRelatorioAlturasDiariasPrecipitacao.do?action=carregarInterfacelInicial>

comparação de médias. Por fim, realizado teste de Kruskal-Wallis, equivalente à ANOVA para dados não paramétricos, para verificar a ocorrência de diferenças estatísticas anuais dos parâmetros estudados em cada poço, sendo utilizado em todos os testes estatísticos o *software open source* JAMOV v2.2.5 que possui integração com a linguagem de programação R.

Tabela 3 - Resultado do teste de normalidade de Shapiro-Wilk para os parâmetros analisados no período de 2016 a 2021

Parâmetro	Total de amostras analisadas (N)	Shapiro-Wilk (p-valor)
CT	296	<0,001
<i>E. coli</i>	296	<0,001
Turbidez	296	<0,001
Fluoreto	296	<0,001

Fonte: O autor

4.3.3 Correlação entre os parâmetros, índice de risco e presença de chuvas

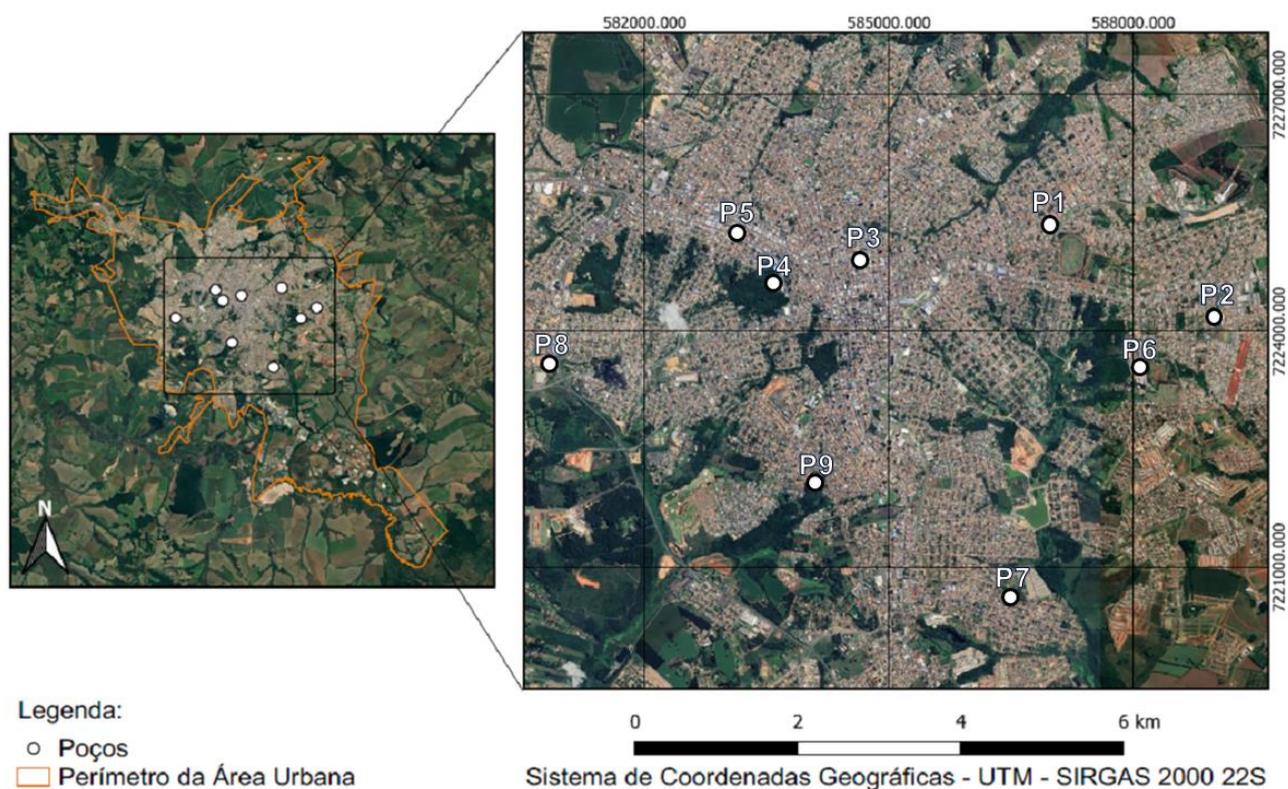
Considerando a coleta de dados de precipitação nos dias anteriores de todas as amostragens do período estudado, foi avaliada a correlação entre os dados microbiológicos e físico-químicos e os volumes de chuva tabulados, além disso, foi comparado se as análises quantitativas dos parâmetros microbiológicos possuem correlação com os índices de risco em escala ordinal levantados por meio do formulário de inspeção sanitária. Ambas as análises utilizaram o coeficiente de Spearman com auxílio do *software* JAMOV v2.2.5 em nível de 5% de probabilidade, aplicada para identificar a relação entre os parâmetros. Os coeficientes de correlação foram avaliados conforme a hierarquia descrita por Baba *et al.* (2014) onde são definidos os valores de correlação da seguinte forma: 0,00 a 0,19 = muito fraca, 0,20 a 0,39 = fraca, 0,40 a 0,69 = moderada, 0,70 a 0,89 = forte e 0,90 a 1,00 = muito forte.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO QUALIQUANTITATIVA DOS POÇOS

Após investigação dos dados abertos, foram definidos nove poços tubulares localizados na área urbana do município que atendem a predefinição de três análises anuais gerando maior nível de precisão e confiança nos dados. Neste contexto, o Quadro 7 apresenta as coordenadas geográficas e características gerais de cada um dos poços escolhidos e a distribuição geográfica dos locais de instalação dos poços está ilustrada na Figura 15.

Figura 14 - Distribuição geográfica dos locais de instalação dos poços estudados



Fonte: O autor

Quadro 7 - Dados gerais e características dos poços estudados

Poço	Coordenadas (UTM)		Atividade principal	Profundidade estimada (m)	Estimativa de pessoas atendidas
	X	Y			
P1	586968,2	7225396,1	Clube Esportivo	220	315
P2	588991,2	7224219,1	Educação	SI*	1000
P3	584646,0	7224947,6	Condomínio	130	36
P4	583571,5	7224642,4	Supermercado	60	221
P5	583118,1	7225254,8	Hospital	180	783
P6	588069,0	7223554,8	Hospital	150	368
P7	586497,5	7220657,7	Educação/Alojamento	30	290
P8	580823,3	7223603,2	Posto de Combustível	145	42
P9	584088,1	7222128,8	Educação	SI*	78

*SI: Sem informação

Fonte: O autor

Os dados de profundidade estimada e número de pessoas atendidas foram coletados após entrevistas com os responsáveis pelos locais em conjunto com o preenchimento do formulário de inspeção sanitária. É possível identificar que as profundidades dos poços variam de 30 a 220 metros em pontos espalhados pela área urbana do município, sendo que, os poços P2 e P9 não possuem informações a respeito da profundidade de exploração. Referente ao número estimado de pessoas atendidas, os poços P2, P5 e P6, são respectivamente os mais relevantes, atendendo um maior número de usuários. A somatória total de pessoas atendidas em todos os poços é de 3.133, dado que, tal quantitativo pode sofrer variações diárias, pois, na maioria, tratam-se de estabelecimentos comerciais ou de prestação de serviços que podem passar por interferências no consumo em determinados momentos como finais de semana, períodos de férias, entre outros.

A avaliação do PIPS enfocou principalmente os aspectos de proteção sanitária dos poços tendo como base o diagnóstico determinado pelo formulário de inspeção sanitária adaptado da Organização Mundial da Saúde (WHO, 2012) e o raio fixo de dez metros pré-definido anteriormente. As informações de cada poço foram registradas em ficha específica e refletem a situação observada entre junho e setembro de 2022, quando foram realizadas as visitas de campo.

Os componentes construtivos dos poços e fatores de uso do solo avaliados e indicados no APÊNDICE A incluem: presença de rede de esgoto no entorno (RE), presença de fossa séptica no entorno (FS), presença de fontes de poluição no entorno (FP), presença de poços rasos no entorno (PR), inconformidade no canal de drenagem (CD), ausência de cerca de proteção (CP), permeabilidade na base do mecanismo de bombeamento (PB), presença de água estagnada no entorno (AE), presença de resíduos sólidos no entorno (RS) e presença de rachaduras na cimentação da laje do poço (RC).

Nessa avaliação foi possível observar que a grande parte dos poços estão instalados ao redor de redes de esgotamento sanitário e abaixo do nível do solo; não são cercados adequadamente a fim impedir a entrada de pessoas e animais; não possuem lajes de proteção adequadas; não existem dados das características técnicas de construção e em alguns casos é evidente a insalubridade do local onde os poços estão instalados. Sendo a proteção sanitária do entorno fundamental para impedir o carreamento e infiltração de contaminantes pelo próprio poço, verificou-se que a maioria dos poços visitados e avaliados apresentam condições de vulnerabilidade como pode ser observado na Figura 16.

Figura 15 - Condições construtivas e conservação do entorno dos poços





Fonte: O autor

De acordo com as avaliações individuais realizadas com base no formulário de inspeção sanitária foi definido o risco de contaminação de cada poço, sendo classificados com potencial baixo, médio, alto e muito alto de vulnerabilidade. No Quadro 8 apresenta-se o diagnóstico de risco de contaminação dos poços para cada tipo de condicionante, a pontuação de risco sanitário e o índice de risco de contaminação das águas subterrâneas.

Quadro 8 - Diagnóstico individualizado de risco de contaminação dos poços

Poço	Itens condicionantes de risco de contaminação com base no preenchimento do APÊNDICE A										Pontuação de Risco Sanitário	Índice de Risco
	RE	FS	FP	PR	CD	CP	PB	AE	RS	RC		
P1	x				x	x	x	x			5/10	Médio
P2	x		x		x	x	x			x	6/10	Alto
P3	x				x	x	x				4/10	Médio
P4	x								x		2/10	Baixo
P5	x										1/10	Baixo
P6	x				x					x	3/10	Médio
P7	x				x	x				x	4/10	Médio
P8	x		x		x	x	x		x		6/10	Alto
P9	x						x				2/10	Baixo

Notas: presença de rede de esgoto no entorno (RE), presença de fossa séptica no raio de 10 metros (FS), presença de fontes de poluição no entorno (FP), presença de poços rasos no entorno (PR), inconformidade no canal de drenagem (CD), ausência de cerca de proteção (CP), permeabilidade na base do mecanismo de bombeamento (PB), presença de água estagnada no entorno (AE), presença de resíduos sólidos no entorno (RS) e presença de rachaduras na cimentação da laje do poço (RC).

Fonte: O autor

Pode-se identificar que as condicionantes que menos atendem o padrão estabelecido pelo formulário de inspeção sanitário são: presença de rede de esgoto no entorno (9/9), inconformidade no canal de drenagem (6/9), ausência de cerca de proteção (5/9) e permeabilidade na base do mecanismo de bombeamento (5/9). Além disso, verifica-se que os únicos itens que estão em conformidade em 100% dos poços são: presença de fossa séptica no raio de 10 metros e poços rasos no entorno.

Neste caso, 22% dos poços enquadram-se como alto risco de contaminação, 44% como médio risco e 34% como baixo risco, dados similares aos encontrados por Ercumen *et al.* (2017) que categorizaram 902 poços tubulares rasos, onde 31% foram enquadrados como baixo risco, 45% de médio risco e 24% de alto risco ou muito alto.

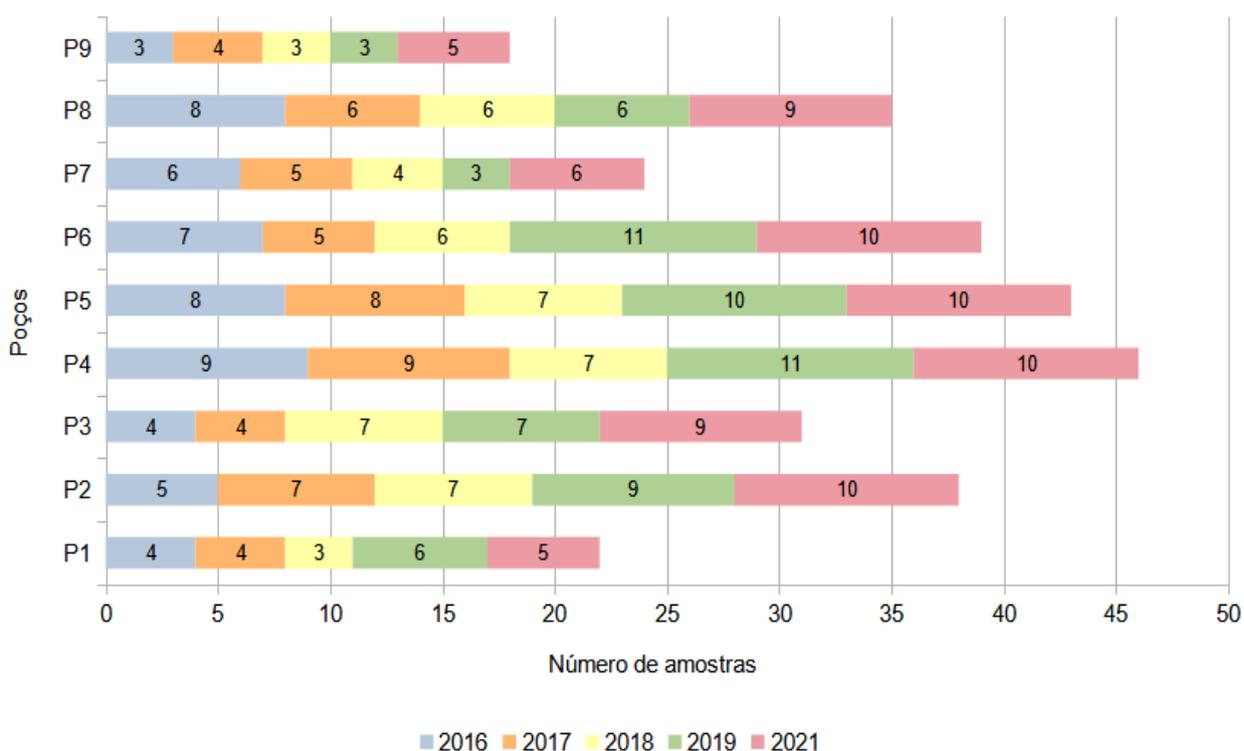
Em outro prisma, Lutterodt *et al.* (2022) realizaram análise de risco sanitário em 36 poços em Gana onde 16,6% apresentaram alto risco sanitário e 77,8% médio risco devido, principalmente, a falta de canais de drenagem, deficiência na vedação cimentícia e fissuras que poderiam permitir a entrada de água contaminada, sendo que, nenhum dos poços avaliados possuíam cercas de proteção, além disso, apenas 33% dos poços apresentaram amostras de água isentas de coliformes fecais.

Conforme os resultados apresentados, é possível indicar que as bactérias *E. coli* podem persistir em ambientes de águas subterrâneas dentro da área de estudo por períodos que variam de um mês até quatro anos no pior cenário possível, neste caso é provável identificar que o uso e ocupação do solo e condições construtivas dos poços afetam diretamente os níveis de risco de contaminação da água subterrânea.

5.2 AVALIAÇÃO DOS DADOS MICROBIOLÓGICOS E FÍSICO-QUÍMICOS

A presente pesquisa envolveu a análise de 296 amostras de água relacionadas a nove SACs, no período de 2016 a 2021, exclusivamente de poços tubulares instalados na área urbana do município de Ponta Grossa, atendendo uma população total estimada de 3.133 pessoas. Conforme Gráfico 1, é possível identificar o número de amostragens realizadas por poço anualmente.

Gráfico 1 - Número de amostragens realizadas em cada poço separadas por ano

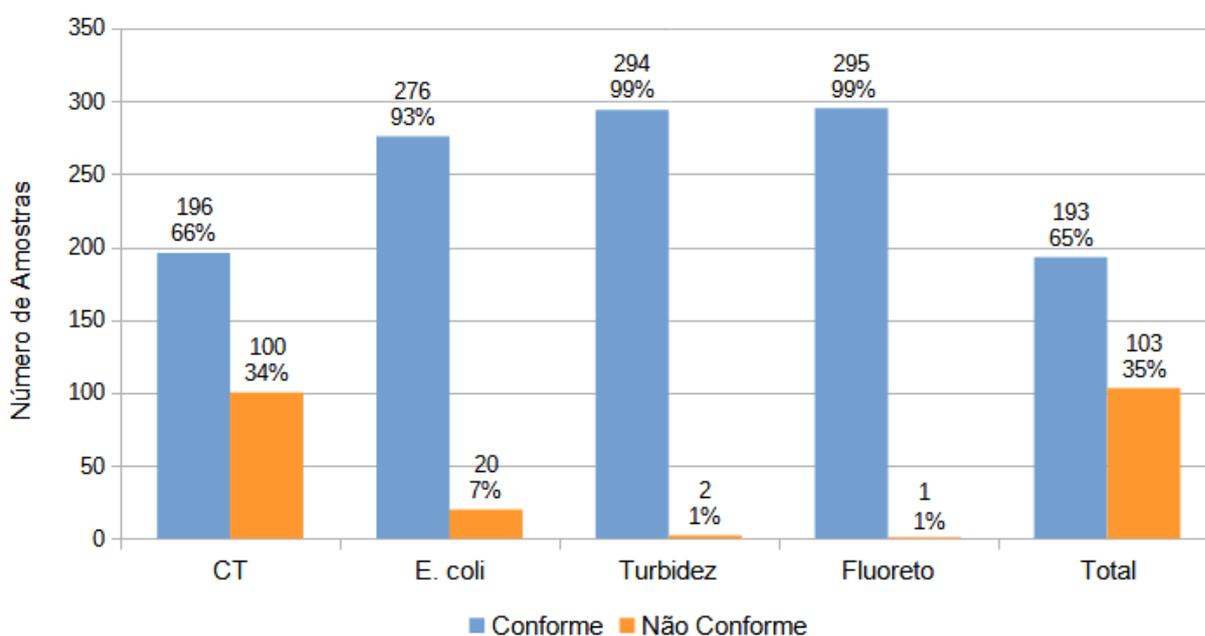


Fonte: O autor

Observa-se que o P4 é o poço com maior número de amostragens e o P9 com menor número, porém, mesmo possuindo um número inferior, está enquadrado nos requisitos previamente estabelecidos de três análises mínimas anuais. Nesse contexto, durante os anos estudados, a média de amostras por poço é de aproximadamente 35 análises, onde é possível destacar a menor somatória anual de amostragem no ano de 2018 e a maior no ano de 2021, respectivamente, 50 e 74 análises.

Em relação à qualidade da água bruta em um contexto geral, 193 amostras “conformes” (65%) apresentaram qualidade que se enquadram nos padrões de potabilidade para os parâmetros avaliados e 103 amostras se enquadram como “não conformes” (35%) de acordo com a Portaria MS 888/2021 (Gráfico 2).

Gráfico 2 - Porcentagem e número de amostras em conformidade com o padrão de qualidade para consumo humano separados por tipo de parâmetro



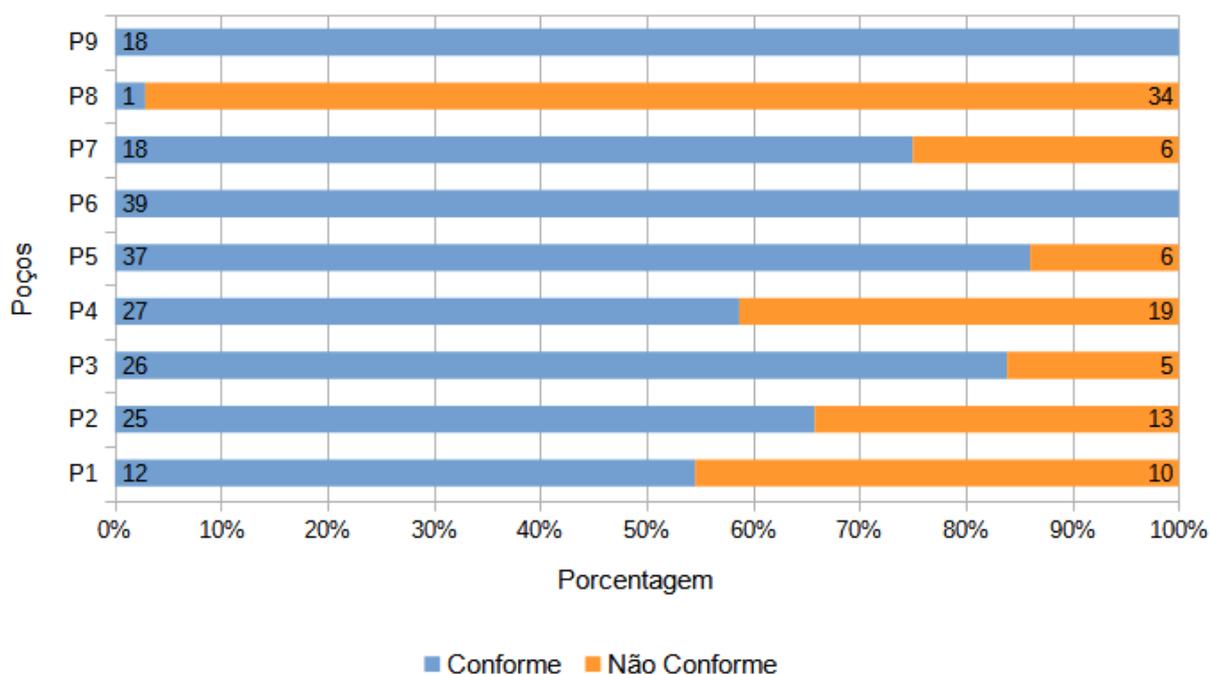
Fonte: O autor

Individualmente, percebe-se que os parâmetros microbiológicos apresentaram a maior porcentagem de amostras “não conformes”, sendo 34% para CT e 7% para *E. coli*, refletindo a possível ocorrência de risco de ingestão dessa água, visto que, índices elevados de CT e *E. coli* em águas para consumo humano podem

causar doenças de veiculação hídrica (AHMAD *et al.*, 2020; WHO, 2017). Já os parâmetros de turbidez e fluoretos obteve-se 99% das amostras dentro do VMP previsto pela legislação, indicando que os parâmetros físico-químicos avaliados não interferem diretamente na qualidade da água, sendo praticamente isentos de riscos à saúde dos usuários.

Quando avaliados os poços e seus respectivos parâmetros individualmente durante os anos (Gráfico 3), dois poços (P6 e P9) apresentaram 100% das coletas de água bruta em condições satisfatórias para consumo humano.

Gráfico 3 - Porcentagem e número de amostras de cada poço em conformidade com o padrão de qualidade para consumo humano



Fonte: O autor

Entretanto, sete poços apresentaram porcentagem maior que 13% de amostras fora do padrão estabelecido pela legislação vigente, com destaque negativo para os poços P1, P4 e P8 que apresentaram, respectivamente, 45,45%, 41,30% e 97,14% das amostras fora do VMP. Esta constatação, quando interpretada de acordo com a Portaria GM/MS 888/2021, sugere um possível comprometimento da ingestão das águas subterrâneas sem um devido tratamento, considerando minimamente desinfecção/cloração da água bruta, podendo também ser necessário um sistema de filtração.

5.2.1 Avaliação Estatística Individual

Utilizando o *software* JAMOOVI v2.2.5, foi realizada estatística descritiva dos valores de mínimo, máximo, mediana, 1º e 3º quartil dos parâmetros analisados em cada poço (Tabela 4), como complementação, foram avaliadas as diferenças estatísticas utilizando o teste Kruskal-Wallis e *post-hoc* de DSCF.

Tabela 4 - Estatística descritiva dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos

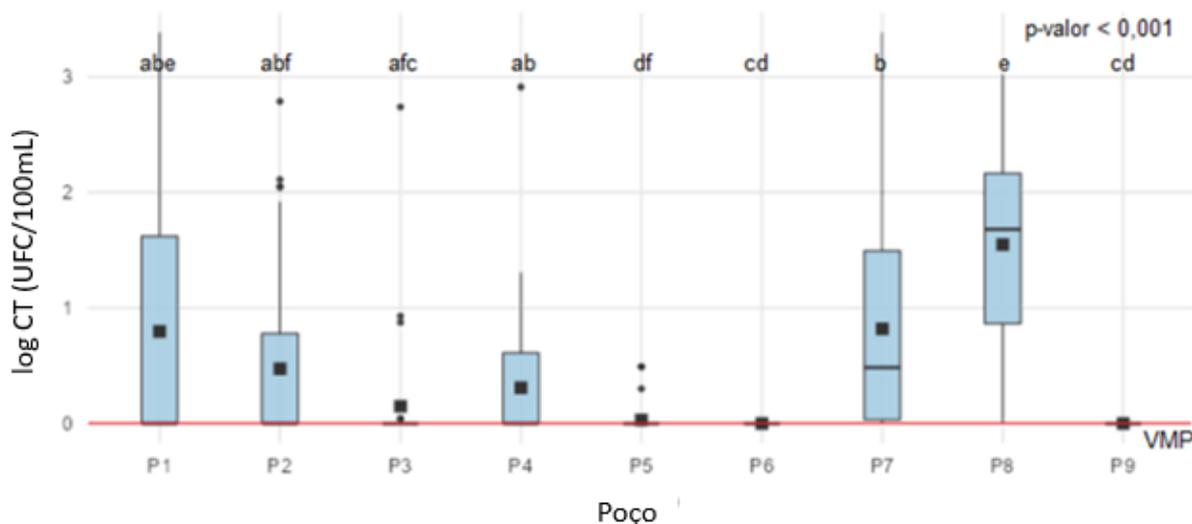
Poço	N	Parâmetros	Mínimo	Máximo	Mediana	1º Quartil	3º Quartil
P1	22	Turbidez	0,08	1,30	0,24	0,17	0,36
		Fluoreto	0,00	0,60	0,14	0,00	0,24
		log CT	0,00	3,38	0,00	0,00	1,62
		log <i>E.coli</i>	0,00	1,13	0,00	0,00	0,00
P2	38	Turbidez	0,08	1,44	0,27	0,17	0,27
		Fluoreto	0,00	1,73	0,31	0,03	0,31
		log CT	0,00	2,79	0,00	0,00	0,00
		log <i>E.coli</i>	0,00	0,49	0,00	0,00	0,00
P3	31	Turbidez	0,09	0,71	0,21	0,15	0,33
		Fluoreto	0,00	0,79	0,04	0,00	0,15
		log CT	0,00	2,74	0,00	0,00	0,00
		log <i>E.coli</i>	0,00	2,37	0,00	0,00	0,00
P4	46	Turbidez	0,07	1,30	0,18	0,15	0,28
		Fluoreto	0,00	0,60	0,00	0,00	0,17
		log CT	0,00	3,38	0,00	0,00	0,61
		log <i>E.coli</i>	0,00	1,13	0,00	0,00	0,00
P5	43	Turbidez	0,08	9,98	0,25	0,15	0,46
		Fluoreto	0,00	0,38	0,10	0,00	0,17
		log CT	0,00	0,49	0,00	0,00	0,00
		log <i>E.coli</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P6	39	Turbidez	0,11	1,96	0,35	0,20	1,12
		Fluoreto	0,00	1,05	0,12	0,00	0,27
		log CT	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		log <i>E.coli</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P7	24	Turbidez	0,11	2,33	0,46	0,30	0,66
		Fluoreto	0,00	0,84	0,07	0,00	0,44
		log CT	0,00	3,38	0,48	0,03	1,50
		log <i>E.coli</i>	0,00	0,61	0,00	0,00	0,00
P8	35	Turbidez	0,08	1,30	0,23	0,17	0,33
		Fluoreto	0,00	0,43	0,09	0,00	0,16
		log CT	0,00	3,02	1,68	0,86	2,17
		log <i>E.coli</i>	0,00	2,32	0,00	0,00	0,04
P9	18	Turbidez	0,11	1,02	0,19	0,15	0,39
		Fluoreto	0,00	0,26	0,00	0,00	0,13
		log CT	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		log <i>E.coli</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Notas: log CT (UFC/100 mL); log *E. coli* (UFC/100 mL); Turbidez (uT); Fluoreto (mg.L⁻¹).

Fonte: O autor

Para os valores de log CT (UFC/100mL) foi constatada diferença estatisticamente significativa entre os poços (p -valor $< 0,05$). Conforme Gráfico 4, é possível identificar os agrupamentos indicados pelo teste DSCF com 95% de confiança.

Gráfico 4 - Boxplot da diferença estatística das distribuições do parâmetro de coliformes totais entre os poços estudados (teste H de Kruskal-Wallis, N = 296)



Notas: Poços com distribuições identificadas com a mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo *post-hoc* DSCF a 5%.

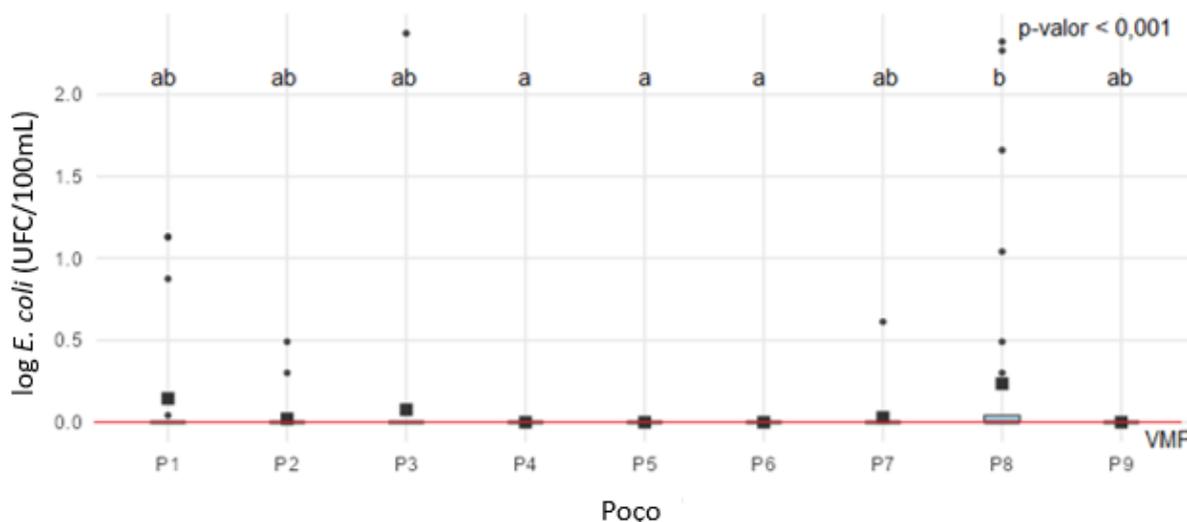
Fonte: O autor

É possível identificar a alta variabilidade de classes de distribuições de CT nos poços estudados, destacando o P8 que possui o maior valor de mediana (48 UFC/100mL), entretanto, os poços P1, P4 e P7 apresentaram, no mínimo, um resultado acima do limite de detecção do método de análise (2.398 UFC/100mL), sendo que, apenas para o P4 este valor ficou enquadrado como *outlier*. Durante os cinco anos estudados, somente os poços P6 e P9 estiveram em conformidade com o padrão de potabilidade em 100% das análises.

A presença de CT em mais de 30% das amostras de águas subterrâneas provenientes de poços artesianos no Paraná também foi indicada em estudos de Vicente *et al.* (2021), Schuroff *et al.* (2013) e Blanc *et al.* (2020), apontando a vulnerabilidade das águas subterrâneas em diferentes localidades do Estado.

Para os valores de log *E. coli* (UFC/100mL) foi constatada diferença estatisticamente significativa entre os poços (p-valor < 0,05). No Gráfico 5 é possível identificar os agrupamentos indicados pelo teste DSCF com 95% de confiança.

Gráfico 5 - Boxplot da diferença estatística das distribuições do parâmetro de *E. coli* entre os poços estudados (teste H de Kruskal-Wallis, N = 296)



Notas: Poços com distribuições identificadas com a mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo *post-hoc* DSCF a 5%.

Fonte: O autor

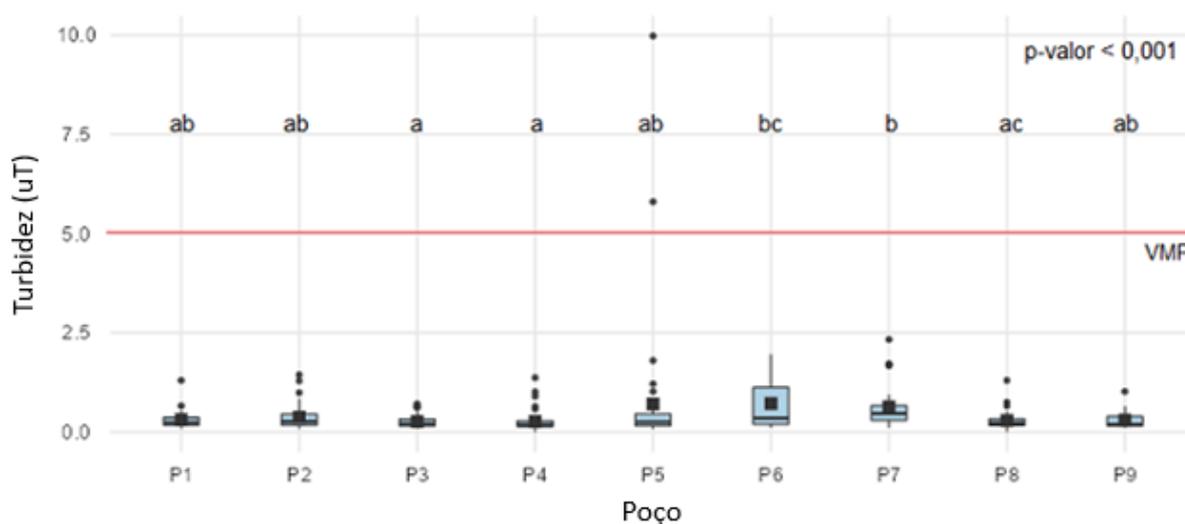
Observa-se a presença de *outliers* nos poços estudados, alguns valores podem parecer discrepantes do grupo, mas por serem dados ambientais representarem uma situação real, dado que, possuem alta variabilidade em seus resultados. Destacam-se, o P3 e P8 que apresentaram valores elevados de máxima, respectivamente, 234 e 209 UFC/100mL, entretanto, o P3 apresentou apenas 3% de amostras fora do padrão de consumo, já no P8 observou-se 29% de amostras com presença de *E. coli*. Durante os cinco anos estudados, somente os poços P5, P6 e P9 estiveram em conformidade com o padrão de potabilidade em 100% das análises.

Os resultados de Ahmad *et al.* (2020), Boadi *et al.* (2020) e De Gligio *et al.* (2016) indicaram que mais de 80% das amostras de água bruta de poços estavam contaminadas com coliformes totais e fecais, tornando-as impróprias para consumo. Já Andrade *et al.* (2022) identificaram que 66,7% (88/132) dos poços testaram positivos para *E. coli* pelo menos uma vez durante um período de estudo de 10 anos, pois 29,5% apresentaram concentrações acima de 10 UFC/100 mL pelo menos uma

vez no mesmo período. Nos estudos realizados na área rural de Bangladesh por Ercumen *et al.* (2017), 41% de 1.684 amostras testaram positivas para *E. coli*, a maioria em baixas concentrações.

Para os valores de turbidez foi constatada diferença estatisticamente significativa entre os poços (p-valor < 0,05). Conforme Gráfico 6, é possível identificar os agrupamentos indicados pelo teste DSCF com 95% de confiança.

Gráfico 6 - Boxplot da diferença estatística das distribuições do parâmetro de turbidez entre os poços estudados (teste H de Kruskal-Wallis, N = 296)



Notas: Poços com distribuições identificadas com a mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo *post-hoc* DSCF a 5%.

Fonte: O autor

Observa-se que o único poço que teve amostras acima do VMP foi o P5, porém, sua distribuição é estatisticamente igual aos demais poços. Neste caso, considerando que todos os valores medianos de turbidez estão abaixo de 0,465 uT (P7), é possível caracterizar as duas amostragens acima do VMP como *outliers* que não interferiram significativamente na qualidade da água para consumo humano do P5 ao longo dos anos. Mesmo o teste de Kruskal-Wallis apresentando diferença estatística entre os poços, todas as medianas dos valores da distribuição estão abaixo do VMP de 5 uT, atendendo o padrão de consumo humano estabelecido pela Portaria GM/MS 888/2021, com destaque para P3 e P4 que possuem os menores valores medianos de turbidez em suas amostragens durante o período estudado de 2016 a 2021, respectivamente, 0,21 uT e 0,18 uT.

Alguns valores podem parecer discrepantes do grupo, mas representam uma situação real, dado que, por serem dados ambientais, são conhecidos por apresentarem muitos valores que parecem *outliers*, entretanto são dados corretos. Esses dados pontuais muitas vezes são importantes e devem ser estudados, pois são valores independentes que podem indicar índices de risco (CHAPMAN, 2005).

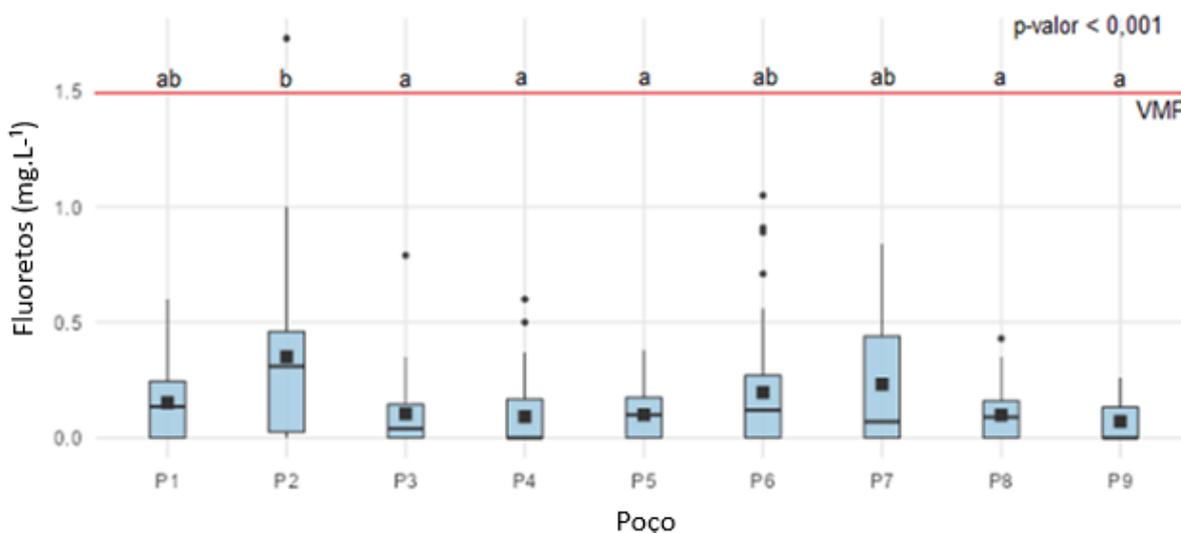
Como mencionado por Nascimento *et al.* (2021), na área de qualidade de água, um dado considerado *outlier*, pelas metodologias de detecção normalmente aplicadas, nem sempre significa um erro ou uma anomalia. Tais dados, podem ocorrer por variados aspectos, neste caso, observa-se que algum comportamento anormal pode ser o responsável pelos dois *outliers* tais como: chuvas fora do padrão, erro de digitação, problemas na coleta ou até mesmo a falta de calibração do equipamento utilizado para medição.

Estudos de Boadi *et al.* (2020) também indicam amostras de turbidez em poços tubulares variando de 0,57 a 2,31 uT, estando abaixo do limite de 5 uT para água potável de SACs, esta observação também é consistente com pesquisas anteriores sobre a turbidez de amostras de poços para consumo humano realizados no Brasil por Daronco (2021) e Andrade *et al.* (2020).

Ademais, valores muito baixos de turbidez que garantem o aspecto clarificado da água explotada pode incentivar o consumo indiscriminado da água bruta sem o devido tratamento por estar visualmente boa para consumo, porém, a translucidez da água não garante sua potabilidade, principalmente para os fatores microbiológicos. Ressalta-se que o consumo direto da água sem antes passar por algum tratamento ou mesmo manipulada de forma errônea pode acarretar casos de diarreia e outras doenças de veiculação hídrica (BRASIL, 2006; WHO, 2017).

Para os valores de fluoretos foi constatada diferença estatisticamente significativa entre os poços (p -valor $< 0,05$). Conforme Gráfico 7, é possível identificar os agrupamentos indicados pelo teste DSCF com 95% de confiança.

Gráfico 7 - Boxplot da diferença estatística das distribuições do parâmetro de fluoretos entre os poços estudados (teste H de Kruskal-Wallis, N = 296)



Notas: Poços com distribuições identificadas com a mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo *post-hoc* DSCF a 5%.

Fonte: O autor

Assim como os dados de *E. coli*, é possível identificar a presença de alguns *outliers* no boxplot, dado que, apenas uma análise do P2 (1,73 mg.L⁻¹) ultrapassou o VMP de 1,5 mg.L⁻¹ estabelecido pela legislação. Esse valor especificamente pode ter interferido significativamente na qualidade da água para consumo humano, pois, mesmo que o P2 possua padrão de variação de dados iguais aos poços P1, P6 e P7, diferiu estatisticamente acima das variações dos poços P3, P4, P5, P8 e P9.

Entretanto, conforme Hypolito *et al.* (2010) foram encontrados valores médios de fluoretos em amostras de poços tubulares de 3,03 mg.L⁻¹, chegando à máxima de 6,95 mg.L⁻¹, indicando alto risco de consumo de águas subterrâneas na região de Salto-Indaiatuba - São Paulo. Já Ahmad *et al.* (2020) indicam que o fluoreto é encontrado naturalmente em águas subterrâneas devido à decomposição das rochas, além do escoamento superficial e infiltração de fertilizantes em áreas agrícolas ou águas residuais industriais.

Sendo assim, com base nos dados apresentados evidencia-se que a região urbana de Ponta Grossa não possui altas concentrações de fluoretos nas fontes de águas naturais subterrâneas, assim como no estudo de Singh e Hussian (2016), e que possíveis contaminações por fertilizantes e efluentes industriais não afetam diretamente os níveis de fluoretos na água explotada, deste modo, durante o período

estudado, a água esteve de acordo com as diretrizes de potabilidade e não existiram riscos de manifestação de fluorose dentária nos consumidores da água explotada nos poços estudados.

5.2.2 Avaliação Estatística Temporal

Também foram calculadas as quantidades de análises para cada ano no período de 2016 a 2021 e as respectivas porcentagens de amostragens que não atendem a legislação vigente de qualidade da água para consumo humano em cada ano (Tabela 5) com base nos parâmetros estabelecidos na Diretriz Nacional do Plano de Amostragem de Água.

Tabela 5 - Porcentagem de amostras anuais fora do padrão de qualidade para consumo humano

Parâmetro Avaliado	VMP¹	2016 %	2017 %	2018 %	2019 %	2021 %	Média geral%
Número de amostras		54	52	50	66	74	296
CT	0	42,59%	28,84%	36,00%	19,70%	40,54%	33,53%
<i>E. coli</i>	0	12,96%	11,54%	4,00%	4,55%	2,70%	7,15%
Turbidez	5	0	0	0	1,52%	1,35%	0,57%
Fluoreto	1,5	0	1,92%	0	0	0	0,38%

Notas: ¹Portaria GM/MS 888/2021; CT = coliformes totais (UFC/100 mL); *E. coli* = *Escherichia coli* (UFC/100 mL); Turbidez (uT); Fluoreto (mg.L⁻¹).

Fonte: O autor

Segundo a Tabela 5, o parâmetro com maior porcentagem de amostras em desacordo com a legislação é o de CT, chegando a atingir 42,59% das análises no ano de 2016, e 40,54% no ano de 2021. Em sequência, o resultado de *E. coli* apresenta os picos de piores porcentagens nos anos de 2016 e 2017, 12,96% e 11,54%, respectivamente. Nota-se uma redução gradativa do número de amostras de *E. coli* fora do padrão estabelecido pela legislação ao longo dos cinco anos estudados, de 12,96% em 2016 para 2,70% em 2021.

Considerando que a técnica de coleta foi executada de forma padrão ao longo dos anos, a existência de concentrações variáveis de microrganismos nas amostras pode estar relacionada a fatores externos que podem interferir na presença de CT e

E. coli nas amostras de água bruta. Assim como descrito por Lutterodt *et al.* (2022) e Kelly *et al.* (2021), os fatores que sugerem uma explicação para elevada presença de contaminação microbiológica consideram a ausência de proteção adequada dos poços, presença de animais próximo aos pontos de captação, estruturas físicas em mau estado de conservação, falta de manutenção e limpeza do entorno e possível ocorrência de grandes volumes de precipitação nos dias anteriores às coletas.

Ao analisar os volumes de chuvas nos respectivos anos, conforme dados do Sistema de Informações Hidrológicas do Paraná, observa-se uma redução no acumulado geral de chuva de 1829,2 mm para 1404,0 mm (2016 e 2021), ou seja, uma diminuição de cerca de 23% do volume de precipitação acumulada no município, tal redução do quantitativo total de chuvas pode estar atrelada à diminuição das amostras contaminadas por *E. coli*.

Quando comparados os resultados da média geral de amostras não conformes de *E. coli* (7,15%) com o panorama de qualidade de indicadores de água para consumo humano (BRASIL, 2020a) nas regiões sudeste (2,46%), norte (4,03%) e centro-oeste (2,31%), os resultados das análises microbiológicas do presente estudo mostram uma elevada porcentagem de amostras contaminadas por *E. coli*, indicando que a qualidade da água bruta dos poços tubulares de Ponta Grossa é inadequada e acima da média destas regiões.

No entanto, quando comparado com resultados da região sul e nordeste, os resultados seguem abaixo da média do número de amostragens fora do padrão, 12,36% e 9,81%, respectivamente. Além disso, quando levado em consideração os 955 municípios brasileiros que realizaram levantamento quantitativo de análises e seus percentuais fora do padrão para o parâmetro microbiológico de *E. coli*, pode-se inferir que os poços urbanos analisados estão abaixo da média nacional de 8,91%.

Utilizando o *software* JAMOV v2.2.5, com base no teste H não paramétrico (Kruskal-Wallis), foram avaliadas as diferenças estatísticas anuais das medidas centrais e de variabilidade interquartil dos parâmetros em cada poço. Na Tabela 6 é possível identificar diferença estatística significativa entre os anos (p -valor < 0,05) para alguns dos parâmetros estudados.

Tabela 6 - Diferenças estatísticas anuais dos parâmetros estudados em cada poço

(continua)

Poço	Parâmetros	Mediana, 1º e 3º Quartil das Distribuições					p-valor
		2016	2017	2018	2019	2021	
P1	Turbidez	0,41 (0,34; 0,66)	0,20 (0,16; 0,27)	0,29 (0,18; 0,32)	0,19 (0,12; 0,25)	0,23 (0,20; 0,31)	0,278
	Fluoreto	0,00 (0,00; 0,00)	0,24 (0,17; 0,30)	0,12 (0,12; 0,23)	0,00 (0,00; 0,11)	0,25 (0,20; 0,29)	0,017
	log CT	1,51 (1,10; 2,01)	0,00 (0,00; 0,41)	0,00 (0,00; 0,00)	0,00 (0,00; 0,00)	1,69 (1,64; 2,10)	0,020
	log <i>E.coli</i>	0,46 (0,03; 0,94)	0,00 (0,00; 0,28)	0,00 (0,00; 0,00)	0,00 (0,00; 0,00)	0,00 (0,00; 0,00)	0,030
P2	Turbidez	0,17 (0,17; 0,58)	0,32 (0,30; 0,42)	0,28 (0,26; 0,72)	0,20 (0,15; 0,25)	0,29 (0,24; 0,38)	0,465
	Fluoreto	0,00 (0,00; 0,00)	0,47 (0,20; 0,82)	0,50 (0,27; 0,67)	0,14 (0,00; 0,33)	0,32 (0,29; 0,40)	0,010
	log CT	0,00 (0,00; 0,00)	0,00 (0,00; 0,00)	1,11 (0,00; 1,87)	0,00 (0,00; 0,00)	0,00 (0,00; 0,73)	0,178
	log <i>E.coli</i>	0,00 (0,00; 0,00)	0,00 (0,00; 0,15)	0,00 (0,00; 0,00)	0,00 (0,00; 0,00)	0,00 (0,00; 0,00)	0,059
P3	Turbidez	0,21 (0,14; 0,27)	0,29 (0,19; 0,45)	0,28 (0,15; 0,38)	0,32 (0,17; 0,42)	0,23 (0,16; 0,29)	0,824
	Fluoreto	0,00 (0,00; 0,00)	0,15 (0,04; 0,28)	0,12 (0,00; 0,14)	0,00 (0,00; 0,17)	0,17 (0,10; 0,30)	0,055
	log CT	0,00 (0,00; 0,22)	0,00 (0,00; 0,00)	0,00 (0,00; 0,00)	0,00 (0,00; 0,02)	0,00 (0,00; 0,08)	0,769
	log <i>E.coli</i>	0,00 (0,00; 0,00)	0,00 (0,00; 0,00)	0,00 (0,00; 0,00)	0,00 (0,00; 0,00)	0,00 (0,00; 0,00)	0,849
P4	Turbidez	0,16 (0,13; 0,29)	0,28 (0,21; 0,70)	0,19 (0,15; 0,25)	0,17 (0,15; 0,64)	0,16 (0,14; 0,47)	0,311
	Fluoreto	0,17 (0,00; 0,32)	0,00 (0,00; 0,00)	0,10 (0,04; 0,13)	0,00 (0,00; 0,00)	0,14 (0,00; 0,20)	0,015
	log CT	0,00 (0,00; 1,04)	0,00 (0,00; 0,61)	0,00 (0,49; 0,65)	0,00 (0,00; 0,00)	0,00 (0,15; 0,57)	0,314
	log <i>E.coli</i>	0,00 (0,00; 0,00)	0,00 (0,00; 0,00)	0,00 (0,00; 0,00)	0,00 (0,00; 0,00)	0,00 (0,00; 0,00)	NA

Tabela 6 - Diferenças estatísticas anuais dos parâmetros estudados em cada poço

(conclusão)

P5	Turbidez	0,20 (0,15; 0,29)	0,35 (0,27; 0,70)	0,22 (0,15; 0,25)	0,33 (0,16; 0,64)	0,23 (0,16; 0,47)	0,305
	Fluoreto	0,17 (0,10; 0,24)	0,02 (0,00; 0,10)	0,08 (0,13; 0,00)	0,00 (0,04; 0,00)	0,14 (0,09; 0,18)	0,070
	log CT	0,00 (0,00; 0,12)	0,00 (0,00; 0,00)	0,00 (0,00; 0,00)	0,00 (0,00; 0,00)	0,00 (0,00; 0,00)	0,336
	log <i>E.coli</i>	0,00 (0,00; 0,00)	NA				
P6	Turbidez	0,23 (0,18; 1,34)	0,19 (0,16; 0,30)	0,57 (0,19; 1,06)	1,11 (1,05; 1,77)	0,24 (0,18; 0,33)	0,004
	Fluoreto	0,00 (0,00; 0,06)	0,00 (0,00; 0,07)	0,00 (0,00; 0,00)	0,32 (0,19; 0,80)	0,21 (0,18; 0,26)	<0,001
	log CT	0,00 (0,00; 0,00)	NA				
	log <i>E.coli</i>	0,00 (0,00; 0,00)	NA				
P7	Turbidez	0,39 (0,31; 0,59)	0,44 (0,22; 0,63)	0,41 (0,26; 0,58)	0,39 (0,34; 0,42)	1,16 (0,58; 1,71)	0,135
	Fluoreto	0,00 (0,00; 0,02)	0,00 (0,00; 0,10)	0,07 (0,04; 0,23)	0,00 (0,00; 0,07)	0,75 (0,69; 0,79)	0,006
	log CT	0,46 (0,08; 0,61)	0,04 (0,00; 0,30)	1,04 (0,37; 1,59)	1,16 (0,58; 1,31)	0,70 (0,48; 1,52)	0,657
	log <i>E.coli</i>	0,00 (0,00; 0,00)	0,849				
P8	Turbidez	0,00 (0,00; 0,00)	0,129				
	Fluoreto	0,00 (0,00; 0,16)	0,00 (0,00; 0,00)	0,23 (0,14; 0,32)	0,06 (0,00; 0,12)	0,12 (0,05; 0,17)	0,035
	log CT	1,65 (1,56; 2,28)	1,29 (0,23; 1,81)	1,79 (0,98; 2,13)	1,98 (1,16; 2,19)	1,44 (1,08; 1,77)	0,872
	log <i>E.coli</i>	0,00 (0,00; 0,60)	0,00 (0,00; 0,03)	0,00 (0,00; 0,37)	0,02 (0,00; 0,04)	0,00 (0,00; 0,00)	0,295
P9	Turbidez	0,42 (0,30; 0,54)	0,46 (0,30; 0,68)	0,19 (0,17; 0,30)	0,15 (0,13; 0,21)	0,18 (0,16; 0,19)	0,343
	Fluoreto	0,00 (0,00; 0,00)	0,09 (0,00; 0,20)	0,00 (0,00; 0,04)	0,09 (0,04; 0,15)	0,11 (0,00; 0,14)	0,429
	log CT	0,00 (0,00; 0,00)	NA				
	log <i>E.coli</i>	0,00 (0,00; 0,00)	NA				

Notas: N = Número de amostras; CT = coliformes totais (log UFC/100 mL); *E. coli* = *Escherichia coli* (log UFC/100 mL); Turbidez (uT); Fluoreto (mg.L⁻¹); NA = Não aplicável (toda a distribuição com valor zero); p-valor em negrito indica diferença estatística temporal.

Fonte: O autor

Os resultados estatisticamente significativos ($p < 0,05$) na análise temporal sugerem que existem algumas variações nos parâmetros analisados em determinados poços ao longo do tempo (entre 2016 e 2021). De outro modo, verifica-se que os poços P3, P5 e P9 possuem constância nos resultados dos quatro parâmetros examinados ao longo dos anos, não ocorrendo diferença estatisticamente significativa ($p > 0,05$). Possivelmente, as interferências externas de uso e ocupação do solo nas adjacências e condições dos poços não afetam diretamente nos resultados, visto que, a apuração da categorização de risco no Quadro 8 indicou, respectivamente, índices médio, baixo e baixo de vulnerabilidade para os poços mencionados.

Verifica-se que apenas o P6 apresentou diferença estatística anual para turbidez, onde é possível destacar o aumento da mediana no ano de 2019 (1,11 uT), embora esse acréscimo não ultrapasse o VMP para consumo humano. Para o parâmetro de fluoreto, apesar da existência de diferença estatística nos poços P1, P2, P4, P7 e P8, apenas uma amostragem realizada no P2 no ano de 2017 apresentou valor acima do VMP estabelecido pela legislação vigente, atingindo valor máximo de $1,73 \text{ mg.L}^{-1}$. Todos os outros valores variaram estatisticamente entre os anos dentro da margem aceita pela Portaria GM/MS 888/2021 de $1,5 \text{ mg.L}^{-1}$.

Para os parâmetros microbiológicos CT e *E. coli*, apenas as análises do P1 apresentaram diferença estatística entre os anos estudados, respectivamente, $p = 0,020$ e $p = 0,030$, indicando valores mais altos de medianas de CT em 2016 e 2021 (32 e 49 UFC/100mL), demonstrando a variabilidade quando comparados com os demais anos estudados. O mesmo ocorre para a mediana de *E. coli* em 2016 (3 UFC/100mL) sendo que nos demais anos, apresentaram ausência de *E. coli* em suas medianas.

No geral, os resultados mostraram que a maioria dos poços estudados apresentou concentrações estáveis dos parâmetros ao longo do período estudado, com maiores alterações, dentro do VMP, associadas a fluoretos, ocorrendo em 6 dos 9 poços. Para os demais parâmetros turbidez, CT e *E. coli*, ocorreram diferenças estatísticas entre os anos em apenas 1 dos 9 poços avaliados. Neste caso, apesar dos resultados microbiológicos de CT e *E. coli* não variarem significativamente ao longo do tempo, não garantem o atendimento do VMP definido pela Portaria GM/MS 888/2021. Além disso, neste trabalho, foram usadas as medidas de amplitude

interquartil dos parâmetros com grande variabilidade, onde essas mudanças nas concentrações podem ocorrer por conta de interferências ambientais pontuais, como infiltrações por chuvas (ATHERHOLT *et al.*, 2016), sem necessariamente haver tendência temporal sazonal.

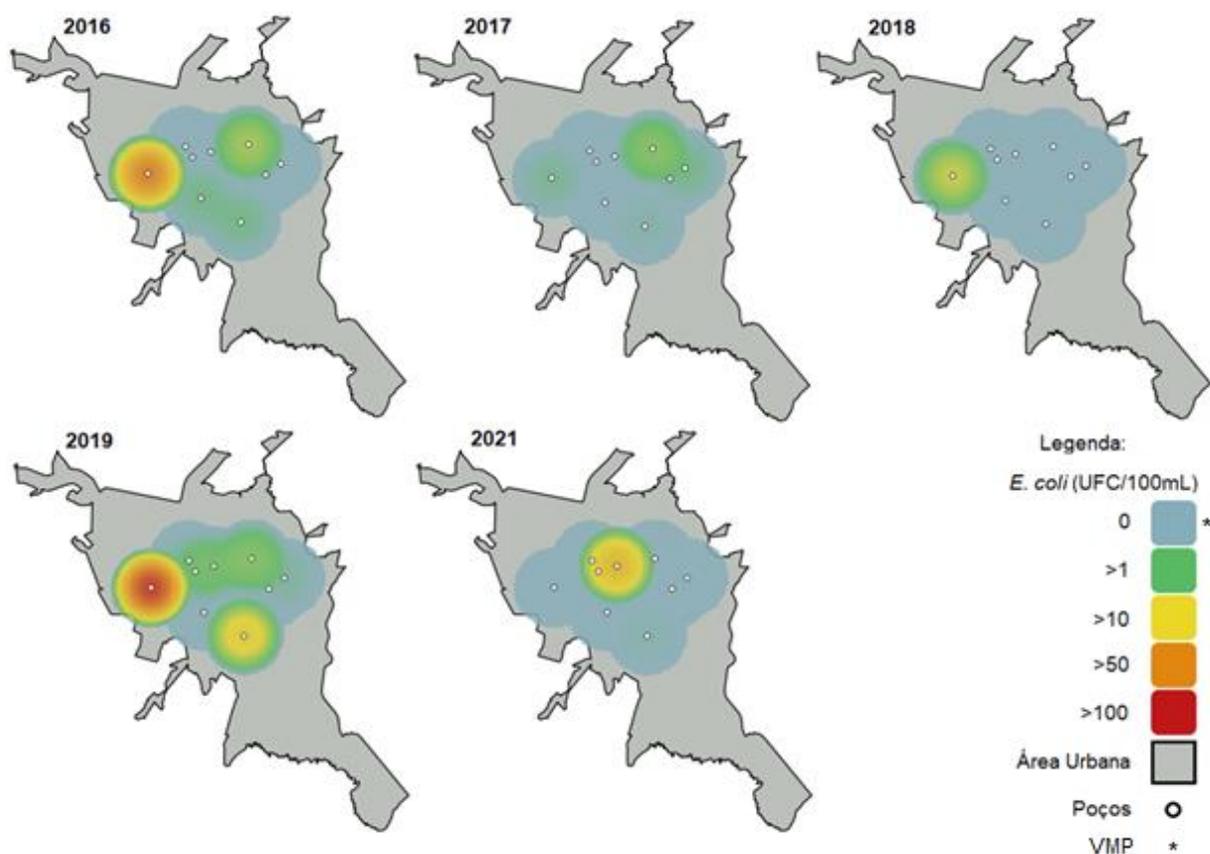
A análise temporal indica que existiram variações para fluoretos, porém, sem ultrapassar os limites estabelecidos na legislação. Os parâmetros microbiológicos e turbidez não apresentaram grandes variações de resultados entre os anos, onde é possível inferir que as condições de uso e ocupação do solo e as condições dos poços tem se mantido estáveis. Ainda que os resultados das análises estatísticas empregadas apontem características já conhecidas da água para consumo, a utilização de técnicas criteriosas para chegar às conclusões fornece segurança para tomadas de decisão, sendo de grande importância para a gestão adequada dos recursos hídricos.

5.3 MAPEAMENTO ESPAÇO-TEMPORAL E CLASSIFICAÇÃO DO RISCO

5.3.1 Interpolação de Dados

Com base nos dados médios anuais de cada parâmetro em cada poço foi possível realizar a interpolação de dados resultando no mapeamento espaço-temporal dos parâmetros estudados (Figuras 17 a 20).

Figura 17 - Mapeamento espaço-temporal do parâmetro *E. coli* entre os anos de 2016 e 2021



Fonte: O autor

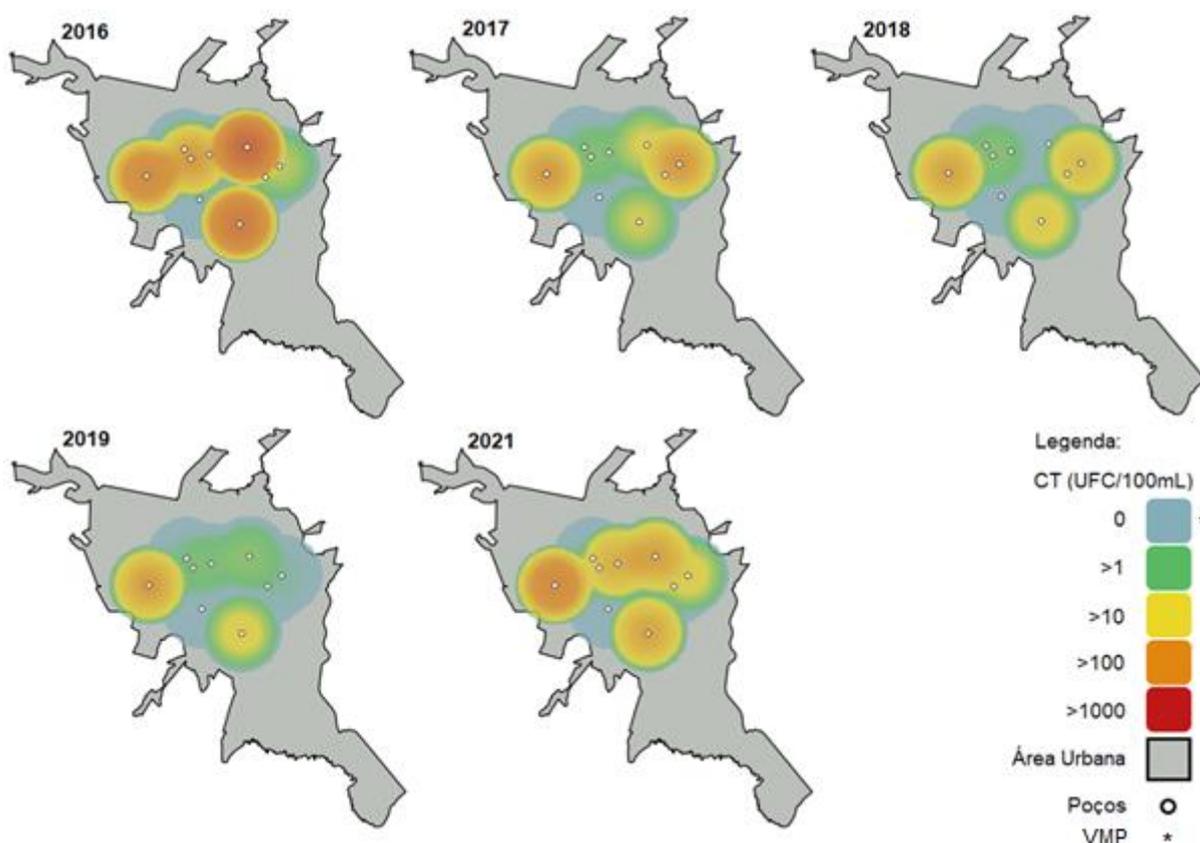
Realizando a comparação anual, a Figura 17 exhibe os valores médios de *E. coli* nos períodos entre 2016 e 2021. Observa-se alta contagem de colônias no P8 nos anos de 2016 e 2019, ultrapassando o valor de 50 UFC/100 mL e indicando possível relação com a classificação de alto risco citado no Quadro 8, sendo que, o poço possui diversos itens condicionantes de risco em não conformidade com o formulário de inspeção sanitária: presença de rede de esgoto no entorno, presença de fontes de poluição no entorno, inconformidade no canal de drenagem, ausência de cerca de proteção, permeabilidade na base do mecanismo de bombeamento e presença de resíduos sólidos no entorno.

Já os poços P3 e P7 ultrapassaram, na média, montantes acima de 10 UFC/100 mL, e como destacado no Quadro 4, valores acima do indicado apresentam risco alto de ingestão, não existindo garantia de qualidade para o consumo da água

bruta pela população. Os demais poços apresentam variações médias de 0 a 9 UFC/100 mL, sendo a água enquadrada como provavelmente segura para consumo.

A Figura 18 mostra o padrão de distribuição de CT contido nas águas subterrâneas nos locais de estudo, onde os fatores que podem causar a presença de coliformes já foram descritos anteriormente.

Figura 18 - Mapeamento espaço-temporal do parâmetro CT entre os anos de 2016 e 2021



Fonte: O autor

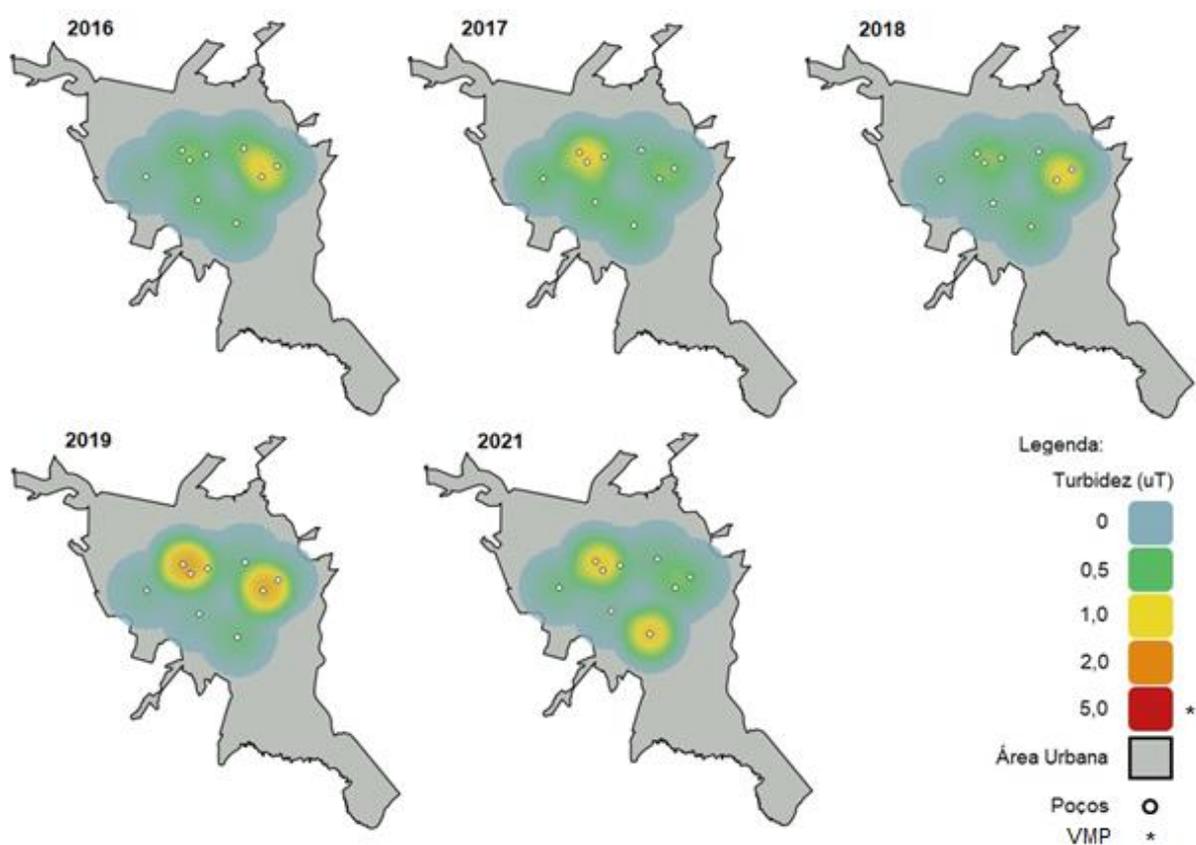
A distribuição espacial dos índices de risco acima de 100 UFC/100mL pode ser identificada em um grande número de poços, principalmente no ano de 2016, sendo visualmente o período com piores resultados para o parâmetro de CT. O padrão de distribuição dos anos entre 2017 e 2019 não apresenta grandes variações, porém, é possível identificar aumento nas concentrações médias de CT no ano de 2021, aproximando-se do retrato apresentado para o ano de 2016.

Cabe destaque ao P9 que está fora do intervalo de contaminação (0 UFC/100mL) em todos os anos estudados, além de apresentar resultados dentro do

VMP estabelecido pela legislação, garantindo que existe qualidade de proteção das águas subterrâneas nesse poço.

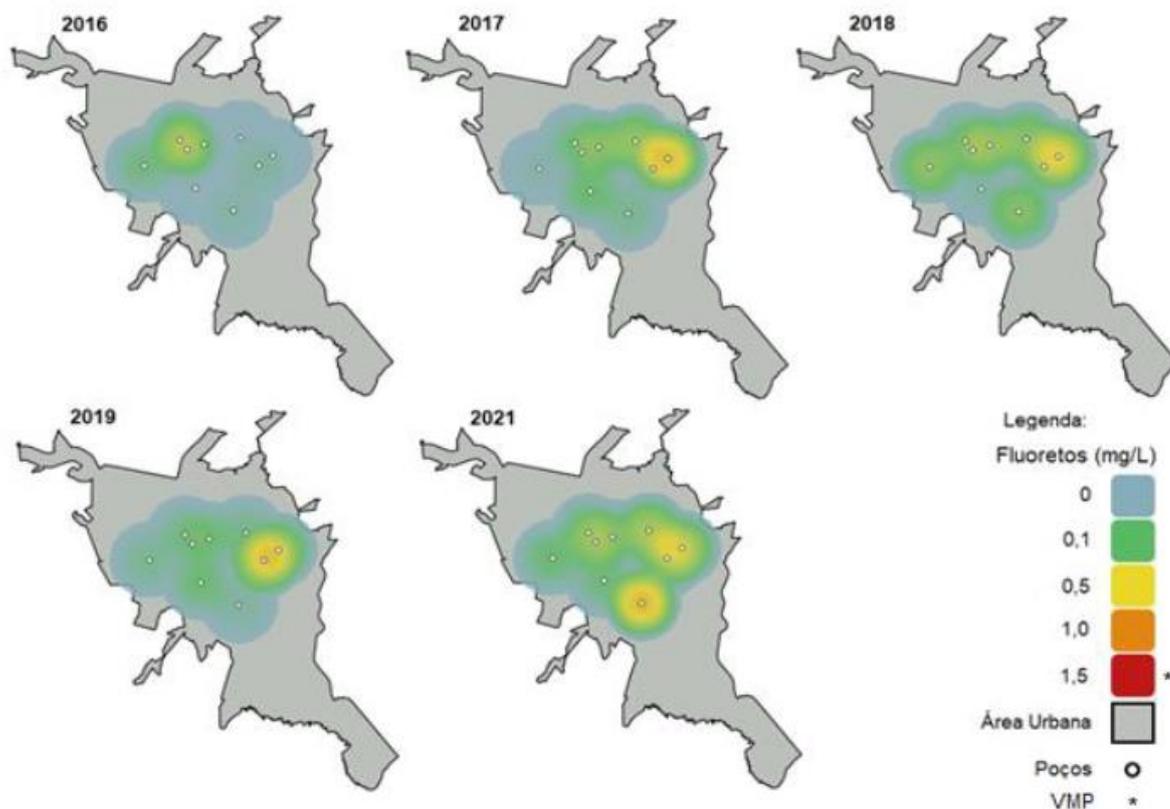
Por fim, as Figuras 19 e 20 apresentam a distribuição de turbidez e fluoretos contidos nas águas subterrâneas dentro da área de estudo e como mencionado anteriormente, 99% das análises estiveram dentro do VMP estabelecido pela legislação para ambos os parâmetros avaliados, não gerando grandes variações visuais nos mapas de calor.

Figura 19 - Mapeamento espaço-temporal do parâmetro turbidez entre os anos de 2016 e 2021



Fonte: O autor

Figura 20 - Mapeamento espaço-temporal do parâmetro fluoreto entre os anos de 2016 e 2021



Fonte: O autor

É possível identificar visualmente que em nenhum momento a média anual de ambos os parâmetros atingiu os valores críticos de 5,0 uT e 1,5 mg.L⁻¹ estabelecido pela legislação, sendo os valores mais elevados de turbidez identificados em 2019, onde foram atingidos resultados médios próximos de 2 uT nos poços P2 e P5, ainda assim, nos demais anos avaliados o valor de turbidez não ultrapassou a média de 1 uT.

Para o parâmetro de fluoretos também não foram identificados valores altos que possam causar risco de ingestão da água bruta, uma vez que, em nenhum momento a média ultrapassou 1,0 mg.L⁻¹. Neste caso, observa-se que existe variação visual de fluoretos no ano de 2016, onde quase todos os poços, com exceção do P4 e P5, obtiveram resultados abaixo de 0,1 mg.L⁻¹, diferentemente dos demais anos onde notam-se variações espaciais entre 0,1 e 0,5 mg.L⁻¹.

5.3.2 Matriz de Classificação de Risco

Para avaliar a carga potencial de contaminação, especialmente por *E. coli*, relacionada ao saneamento em área urbana foi utilizado o sistema de classificação da matriz de prioridade de ações corretivas (Quadro 9) baseado no cruzamento dos resultados de contagem média microbiológica de *E. coli* (UFC/100mL) e a pontuação do formulário de inspeção sanitária de cada poço.

Quadro 9 - Matriz de prioridade de ações corretivas baseado na contagem microbiológica e pontuação do formulário de inspeção sanitária

Contagem de <i>E. coli</i> (UFC / 100 mL)	Escala de risco da inspeção sanitária (susceptibilidade à contaminação por fezes humanas e animais)			
	0 – 2	3 – 5	6 – 8	9 – 10
< 1	P4; P5; P9	P6; P7	P2	
1 – 10	P1	P3		
11 – 100			P8	
> 100				

Notas: Níveis de risco: 0-2 Baixo; 3-5 Intermediário; 6-8 Elevado; 9-10 Muito elevados
Prioridade de ação: Verde – nenhuma ação necessária; Amarelo – ação simplificada; Laranja – ação prioritária; Vermelho – ação urgente.

Fonte: Adaptado de WHO (2011)

Com base na matriz acima é possível identificar que os poços P4, P5 e P9 estão em boas condições de uso e não possuem susceptibilidade à contaminação da água, sendo seguras para consumo humano, diferentemente dos poços P2 e P8 que estão enquadrados no nível elevado de vulnerabilidade à contaminação microbiológica por *E. coli*, sendo necessárias a tomada de ações prioritárias na melhoria do sistema de exploração e da conscientização dos usuários na proteção, limpeza do entorno, desinfecção da água bruta, além do monitoramento da qualidade da água semanalmente. Os demais poços P1, P3, P6 e P7 enquadram-se no nível intermediário de risco, onde podem ser indicados treinamentos aos consumidores sobre condições higiênico-sanitárias, desinfecção da água bruta e manutenções do sistema.

Destaca-se que a inspeção sanitária e a análise da qualidade da água devem ser trabalhadas como ferramentas complementares, visto que, a poluição fecal bacteriana está ligada aos riscos sanitários identificados pelas pontuações de risco

sanitário dos poços, destacando o fato de que quanto maior o tempo de instalação dos poços, maior a probabilidade de identificação de contaminação microbiológica por *E. coli* (MUSHI *et al.*, 2012; ERCUMEN *et al.*, 2017; LUTTERODT *et al.*, 2022). Além disso, SACs instaladas em locais mais afastados possuem dificuldades logísticas para realizar o controle da qualidade da água com a frequência recomendada pela legislação vigente, sendo assim, no que diz respeito à prevenção, a inspeção sanitária deve ter utilizada como meio de identificar e dar prioridade à reparação de sistemas de proteção dos poços, tentando garantir a qualidade da água consumida (KELLY *et al.*, 2021).

5.4 CORRELAÇÃO DOS PARÂMETROS, ÍNDICE DE RISCO E PRECIPITAÇÃO

Considerando as médias das amostragens dos parâmetros microbiológicos de CT e *E. coli* em cada poço, foi calculada a matriz de correlação de *Spearman* (Tabela 7) com as pontuações de risco sanitário com intuito de verificar se existe relação entre as análises quantitativas e os índices de risco qualitativos definidos por meio de formulário de inspeção sanitária. A Tabela 8 apresenta os resultados de correlação entre os resultados dos parâmetros e os valores de precipitação pluviométrica.

Tabela 7 - Matriz de correlação de *Spearman* dos valores médios dos parâmetros microbiológicos e as pontuações de risco sanitário

Matriz de Correlação	log CT	log <i>E. coli</i>	Pontuação de Risco Sanitário
log CT	-		
log <i>E. coli</i>	0,76 p-valor = 0,017	-	
Pontuação de Risco Sanitário	0,75 p-valor = 0,020	0,79 p-valor = 0,011	-

Notas: CT = coliformes totais (UFC/100 mL); *E. coli* = *Escherichia coli* (UFC/100 mL).

Fonte: O autor

É possível identificar que existe correlação estatisticamente significativa entre as pontuações de risco e a quantidade média de microrganismos nas amostras de água coletadas durante os anos, tanto para CT quanto para *E. coli* ($p = 0,020$ e $p =$

0,011), resultando em coeficientes de correlação altos de 0,75 e 0,79, respectivamente. Os resultados são próximos aos destacados por Mushi *et al.* (2012) que indicam a associação estatisticamente significativa do aumento da poluição fecal com a diminuição das infraestruturas e da proteção de poços instalados em zonas periurbanas.

Assim como mencionado por Kelly *et al.* (2020) é possível estipular que o mecanismo de inspeção sanitária tem papel informativo importante sobre os riscos de contaminação dos poços, sendo assim, os operadores e usuários podem prever os riscos de consumo da água e realizar reparações ou melhorias cabíveis nos pontos de captação de água, facilitando a resposta imediata anteriormente aos resultados das análises quantitativas obrigatórias por legislação.

Além do destacado acima, a vulnerabilidade natural do aquífero, os transbordos de córregos, as erosões hídricas, a danificação das redes de esgotamento sanitário e o vazamento de efluentes no solo, formam uma série de vulnerabilidades ambientais que podem contribuir para a lixiviação de poluentes nos poços de águas subterrâneas (SANTOS, 2018), causados principalmente por grandes intensidades de chuvas. Para aferir essa atribuição específica da precipitação com possibilidade de contaminação da água dos poços, foi avaliada a correlação entre os parâmetros estudados e o volume de chuva nas últimas 48 horas anteriores às coletas.

Tabela 8 - Matriz de correlação de *Spearman one-tailed* dos parâmetros estudados e volumes de precipitação pluviométrica

Matriz de Correlação	Precipitação (48h)	log <i>E. coli</i>	log CT	Turbidez	Fluoreto
Precipitação (48h)	-				
log <i>E. coli</i>	0,16 p-valor = 0,002	-			
log CT	0,10 p-valor = 0,037	0,46 p-valor <0,001	-		
Turbidez	-0,03 p-valor = 0,687	0,05 p-valor = 0,205	0,00 p-valor = 0,492	-	
Fluoreto	-0,10 p-valor = 0,954	-0,16 p-valor = 0,997	0,03 p-valor = 0,312	0,09 p-valor = 0,059	-

Notas: Precipitação (mm/48h); CT = coliformes totais (UFC/100 mL); *E. coli* = *Escherichia coli* (UFC/100 mL); Turbidez (uT); Fluoreto (mg.L⁻¹).

Fonte: O autor

Observa-se a existência de correlação entre a precipitação nas 48 horas anteriores à coleta e os parâmetros de CT e *E. coli* (p -valor = 0,037 e 0,002) com coeficientes de 0,10 e 0,16, respectivamente. Apesar de apresentar níveis de correlação baixa, esse resultado converge com outros estudos que demonstram interação entre a qualidade microbiológica da água e os volumes de chuva. Ademais, foi possível verificar correlação positiva moderada entre os parâmetros microbiológicos, evidenciando que os resultados são válidos, visto que, conforme Brasil (2013) os coliformes fecais (*E. coli*) são um subgrupo de CT e estão diretamente correlacionados.

Conforme Andrade *et al.* (2022) e Alemayehu *et al.* (2020) a precipitação pluviométrica acumulada demonstrou relação significativa ($p < 0,05$) na presença de *E. coli* e na incidência de contaminação acima de 10 UFC/100mL em águas subterrâneas, facilitando o ingresso de contaminantes em poços mal protegidos devido ao carreamento vertical e horizontal de bactérias na interface do solo.

Howard *et al.* (2003) relataram que a precipitação durante o período anterior à amostragem de 24 e 48 horas aumenta a probabilidade de presença de coliformes termotolerantes e fecais ($p < 0,05$) em águas subterrâneas pouco profundas em Uganda, ademais, indicam associação entre a contaminação microbiológica, os períodos de pluviosidade e condições sanitárias deficientes dos poços. Andrade *et al.* (2022) e Bauer *et al.* (2013) indicam que áreas cársticas são frequentemente mais contaminadas devido à elevada permeabilidade do solo e à existência de aberturas e cavidades nas formações do solo, permitindo a entrada de contaminação microbiológica em taxas mais altas.

Em resumo, como mencionado por Melo *et al.* (2011), Pontes (2014) e Pontes *et al.* (2021) o crescimento urbano de Ponta Grossa apresenta tendência de expansão sobre o sistema cárstico da Formação Furnas, acentuando os riscos de contaminação de mananciais superficiais e subterrâneos. Neste caso, a proteção dos poços e a avaliação das condições sanitárias tem papel fundamental para reduzir os riscos de contaminação nas áreas de maior fragilidade ambiental, devendo ser seguidas medidas que previnam impactos negativos à qualidade da água.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo visaram caracterizar a potabilidade das águas subterrâneas da cidade de Ponta Grossa, a elaboração de mapas, gráficos, e dados estatísticos das análises físico-químicas e microbiológicas das águas dos nove poços avaliados na pesquisa proporcionaram enumerar as seguintes conclusões:

Inicialmente foi possível identificar os poços artesanais urbanos mais relevantes cadastrados no VIGIAGUA atendem um número considerável de pessoas no município de Ponta Grossa em diferentes tipos de atividades principais, e as inspeções sanitárias foram significativas para classificar as possíveis vulnerabilidades construtivas dos poços.

Os níveis de poluição microbiológica excederam as recomendações da legislação sanitária sobre a qualidade da água para consumo humano, oferecendo ameaça à saúde dos consumidores, em particular nos poços enquadrados na categoria de alto risco conforme o preenchimento do formulário de inspeção sanitária, necessitando de uma melhor construção ou manutenção quando já instalados. Com intuito de bloquear as vias de contaminação, também foi identificada a importância de garantir práticas de higiene em torno do poço e medidas de gestão abrangentes para proteger os poços de atividades antropogênicas, principalmente devido ao carreamento de contaminantes microbiológicos pela chuva.

Mesmo apresentando bons índices de atendimento ao padrão de turbidez, confirma-se a importância de a água bruta ser submetida a tratamentos específicos antes do consumo, como a desinfecção e em alguns casos a filtração, buscando cumprir o padrão microbiológico para a água potável. Alguns poços foram estatisticamente indicados como vulneráveis ao risco de ingestão de água, fato revelado pelos índices elevados do parâmetro *Escherichia coli*, indicador associado a material fecal, sendo que, o consumo dessa água sem um devido tratamento pode constituir um fator crítico de risco na transmissão de agentes patogênicos transportados pela água, criando vias de acesso para doenças de veiculação hídrica em humanos. Além disso, foi apresentado que as chuvas nas 48 horas anteriores as coletas interferiram significativamente no aumento dos níveis de contaminação

microbiológica, evidenciando a importância da manutenção de condições sanitárias satisfatórias ao redor dos poços.

A inspeção sanitária dos poços - utilizando a pontuação de risco de contaminação conforme formulário estabelecidos pela OMS - indicou uma capacidade de prever a poluição fecal bacteriana dos poços estudados, sendo assim a classificação de risco torna-se uma ferramenta útil e rentável para apoiar a gestão da qualidade da água subterrânea nestes locais, sendo um complemento para as análises quantitativas.

Dessa forma, sabendo que as águas subterrâneas de alguns poços privados se encontram vulneráveis pelas ações antrópicas, espera-se que esse trabalho possa contribuir para a saúde pública dos moradores do município de Ponta Grossa, onde foi demonstrada a importância da avaliação prévia antes da ingestão de água bruta sem o devido tratamento.

6.2 RECOMENDAÇÕES

Algumas ações podem ser implementadas com objetivo de garantir a proteção das águas subterrâneas para assegurar à atual e às futuras gerações disponibilidade em quantidade e qualidade de acordo com os padrões de potabilidade da legislação vigente:

- Realizar avaliação preliminar adequada para emissão de outorga dos poços, garantindo que estejam de acordo com as normas para construção;
- Incentivar o uso do formulário de inspeção sanitária para diagnosticar possíveis vulnerabilidades dos poços;
- Desenvolver um programa orientativo para reparação e manutenção apropriada da infraestrutura dos poços privados já instalados;
- Definir os PPPs por meio de legislação estadual específica assim como em outros estados brasileiros;
- Promover campanhas informativas e educativas combinadas com a implementação de projetos demonstrativos para garantir condições sanitárias adequadas no entorno dos poços;

- Promover campanhas orientativas à população quanto à desinfecção da água bruta das soluções alternativas coletivas, principalmente no período chuvoso, com o intuito de preservar a saúde humana.

Além disso, sugere-se investigação adicional na mesma região concentrando-se na determinação de parâmetros microbiológicos e físico-químicos complementares além dos destacados na Diretriz Nacional do Plano De Amostragem da Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano e, considerando a diversidade de solos da região de Ponta Grossa, realizar estudos de sondagem e caracterização geotécnica nas regiões avaliadas. Por fim, com a adoção das medidas supracitadas, espera-se proteger os recursos hídricos subterrâneos, garantindo a preservação ambiental e da saúde da população local, reduzindo possíveis incidências de doenças de veiculação hídrica.

REFERÊNCIAS

ABBOTT, B. W.; BISHOP, K.; ZARNETSKE, J. P.; MINAUDO, C.; CHAPIN, F. S., III; KRAUSE, S.; HANNAH, D. M.; CONNER, L.; ELLISON, D.; GODSEY, S. E.; PLONT, S.; MARÇAIS, J.; KOLBE, T.; HUEBNER, A.; FREI, R. J.; HAMPTON, T.; GU, S.; BUHMAN, M.; SARA SAYEDI, S.; PINAY, G. Human domination of the global water cycle absent from depictions and perceptions. **Nature Geoscience**, v. 12, p. 533–540, jun. 2019. DOI 10.1038/s41561-019-0374-y. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41561-019-0374-y>. Acesso em: 10 nov. 2022.

AHMAD, M.; JAMAL, A.; TANG, X.-W.; AL-SUGHAIYER, M. A.; AL-AHMADI, H. M.; AHMAD, F. Assessing Potable Water Quality and Identifying Areas of Waterborne Diarrheal and Fluorosis Health Risks Using Spatial Interpolation in Peshawar, Pakistan. **Water**, v. 12, n. 8:2163, jul. 2020. DOI 10.3390/w12082163. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/8/2163>. Acesso em: 12 set. 2022.

ALEMAYEHU, T. A.; WELDETINSAE, A.; DINSSA, D. A.; DERRA, F. A.; BEDADA, T. L.; ASEFA, Y. B.; MENGESHA, S. D.; ALEMU, Z. A.; SERTE, M. G.; TEKLU, K. T.; WOLDEGABRIEL, M. G.; KENEA, M. A.; VAN DEN BERG, H.; DE RODA HUSMAN, A. M. Sanitary condition and its microbiological quality of improved water sources in the Southern Region of Ethiopia. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 192, n. 319. abr. 2020. DOI 10.1007/s10661-020-08297-z. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-020-08297-z>. Acesso em: 10 nov. 2022.

ALMEIDA, A. B. B. de; LIMA, M. R. P. de; SANTOS, Y. T. da C.; MOREIRA, Y. W. N.; SILVA, P. B. de A. Concentração de ferro e manganês em águas de abastecimento no município de Crato, Ceará: caracterização e proposta de tratamento. **Águas Subterrâneas**, v. 33, n. 2, abr. 2019. DOI 10.14295/ras.v33i2.29520. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/29520>. Acesso em: 10 abr. 2022.

AMARAL, L. A. do; NADER FILHO, A.; ROSSI JUNIOR, O. D.; FERREIRA, F. L. A.; BARROS, L. S. S. Água de consumo humano como fator de risco à saúde em propriedades rurais. **Revista de Saúde Pública**, v. 37, n. 4, ago. 2003. DOI 10.1590/s0034-89102003000400017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rsp/a/Gf5rNkVxPCSQYSXxHGykMFB/?lang=pt>. Acesso em: 12 set. 2022.

AMATO, F. **Menor nível de chuvas em 91 anos obriga governo a preparar plano para evitar falta de energia**. G1 Economia - Distrito Federal [online] Curitiba, 15 mai. 2021 Disponível em: <https://g1.globo.com/economia/noticia/2021/05/14/menor-nivel-de-chuvas-em-91-anos-obriga-governo-a-preparar-plano-para-evitar-falta-de-energia.ghtml>. Acesso em: 05 jun. 2022.

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **As Águas subterrâneas na política nacional de recursos hídricos** /Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico / Pilar Carolina Villar; Ricardo Hirata; José Luiz Albuquerque; Ana Maciel de

Carvalho. – Brasília: ANA, 2022. Disponível em: https://biblioteca.ana.gov.br/sophia_web/Busca/Download?codigoArquivo=155644. Acesso em: 10 abr. 2023.

ANDRADE, A. M. C.; SILVA, D. A.; ARAÚJO, N. M. C. Avaliação da turbidez de águas de poços da zona rural do município de Caruaru-PE. **Brazilian Journal of Health Review**, v. 3, n. 2, p. 1933–1942, mar./abr. 2020. DOI 10.34119/bjhrv3n2-052. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BJHR/article/view/7720/6692>. Acesso em: 10 abr. 2023

ANDRADE L.; BOUDOU, M.; HYND, P.; CHIQUÉ, C.; WEATHERILL, J.; O'DWYER, J. Spatiotemporal dynamics of Escherichia coli presence and magnitude across a national groundwater monitoring network, Republic of Ireland, 2011–2020. **Science of The Total Environment**, vol. 840, p. 156311, set. 2022. DOI 10.1016/j.scitotenv.2022.156311. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969722034088?via%3Dihub>. Acesso em: 10 nov. 2022

APHA - American Public Health Association. American Water Works Association – AWWA & Water Environment Federation – WEF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. Eaton, A. D.; L. S. Clesceri; A. E. Greenberg; (Ed.), 23h ed. Washington, D. C.: [s.n.], 2017

ATHERHOLT, T. B.; PROCOPIO, N. A.; GOODROW, S. M. Seasonality of Coliform Bacteria Detection Rates in New Jersey Domestic Wells. **Groundwater**, vol. 55, n. 3, p. 346–361, out. 2016. DOI 10.1111/gwat.12482. Disponível em: <https://ngwa.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gwat.12482>. Acesso em: 10 set. 2022.

BABA, R. K.; VAZ, M. S. M. G.; COSTA, J. da. Correção de dados agrometeorológicos utilizando métodos estatísticos. **Revista Brasileira de Meteorologia**, vol. 29, n. 4, p. 515–526, dez. 2014. DOI 10.1590/0102-778620130611. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbmet/a/TJPzfbvqdFbXpvHVkYRTxHk/?lang=pt>. Acesso em 5 abr. 2022

BAUER, A. C.; WINGERT, S.; FERMANICH, K. J.; ZORN, M. E. Well Water in Karst Regions of Northeastern Wisconsin Contains Estrogenic Factors, Nitrate, and Bacteria. **Water Environment Research**, vol. 85, n. 4, p. 318–326 abr. 2013. DOI 10.2175/106143012x13373575831358. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2175/106143012X13373575831358>. Acesso em: 10 nov. 2022

BERGAMASCHI, R. B. **SIG aplicado a segurança no trânsito – estudo de caso no município de Vitória**. Orientador André Luiz Nascentes Coelho – Vitória. Espírito Santo 74 f. (Monografia de Graduação). Universidade Federal do Espírito Santo: Vitória, 2010. Disponível em: https://geo.ufes.br/sites/geografia.ufes.br/files/field/anexo/m_bergamasch.pdf. Acesso em: 10 abr. 2022

BICUDO, C.E.M. TUNDISI, J.G. & SCHEUENSTUHL, M.C.B. (eds.) **Águas do Brasil: Análises Estratégicas**. 2010. Instituto de Botânica, São Paulo. 224 p.

BHATTI, A. Z.; FAROOQUE, A. A.; LI, Q.; ABBAS, F.; ACHARYA, B. Spatial Distribution and Sustainability Implications of the Canadian Groundwater Resources under Changing Climate. **Sustainability**, vol. 13, n. 17, p. 9778, ago. 2021. DOI 10.3390/su13179778. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/17/9778>. Acesso em: 5 abr. 2022

BLANC, R. L.; CALDERAN, S. A.; LOZADA, E. M. K de. Qualidade da água de soluções alternativas individuais de quatro municípios da região meso-centro ocidental do Paraná. *In*: SIMBRAVISA - 8º simpósio brasileiro de vigilância sanitária, 2019, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, 2019; SIMBRAVISA, 2019. Disponível em: <https://proceedings.science/simbravisa-2019/trabalhos/qualidade-da-agua-de-solucoes-alternativas-individuais-de-quatro-municipios-da-r>. Acesso em: 10 nov. 2022.

BOADI, N. O.; SAAH, S. A.; BAA-POKU, F.; MENSAH, E. A.; ADDO, M. Safety of borehole water as an alternative drinking water source. **Scientific African**, vol. 10, p. e00657, nov. 2020. DOI 10.1016/j.sciaf.2020.e00657. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468227620303938?via%3Dihub>. Acesso em: 2 mar. 2022.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Programa Nacional de Vigilância em Saúde Ambiental relacionada à qualidade da água para consumo humano** / Ministério da Saúde, Secretaria de Vigilância em Saúde, Coordenação-Geral de Vigilância em Saúde Ambiental. – Brasília: Editora do Ministério da Saúde, 2005. 106 p.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. **Vigilância e controle da qualidade da água para consumo humano**/ Ministério da Saúde, Secretaria de Vigilância em Saúde. – Brasília: Ministério da Saúde, 2006. 212 p.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Águas subterrâneas um recurso a ser conhecido e protegido**. Secretaria de Saneamento e Recursos Hídricos. Brasília, 2007. Disponível em: <https://www.agrolink.com.br/downloads/%C3%81GUAS%20SUBTERR%C3%82NEA.S.pdf>. Acesso em: 15. mar. 2022.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Manual de orientação para cadastramento das diversas formas de abastecimento de água para consumo humano** / Ministério da Saúde, Secretaria de Vigilância em Saúde. – Brasília: Ministério da Saúde, 2007. 40p.
BRASIL. Fundação Nacional de Saúde. Manual prático de análise de água / Fundação Nacional de Saúde – 4. ed. – Brasília: Funasa, 2013. 150 p.

BRASIL. Superintendência de Assuntos Estratégicos da Presidência da República do Brasil. **Água e Desenvolvimento Sustentável: Recursos Hídricos Fronteiriços e Transfronteiriços do Brasil**. 2013. Disponível em: http://estatico.cnpq.br/portal/premios/2013/pjc/imagens/noticias/publicacao_agua_sa_e.pdf. Acesso em: 21 mar. 2022

BRASIL. **Diretriz Nacional do Plano de Amostragem da Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano [recurso eletrônico]** / Ministério da Saúde, Secretaria de Vigilância em Saúde, Departamento de Vigilância em Saúde Ambiental e Saúde do Trabalhador. – Brasília: Ministério da Saúde, 2016.

BRASIL. Agência Nacional de Águas - **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2018: informe anual**. Brasília: ANA, 2018. Disponível em <https://arquivos.ana.gov.br/portal/publicacao/Conjuntura2018.pdf>. Acesso em: 20 mai. 2021

BRASIL. Ministério da Saúde. **Indicadores institucionais do Programa Nacional de Vigilância da Qualidade da Água para consumo humano – 2018** / Secretaria de Vigilância em Saúde, Departamento de Saúde Ambiental, do Trabalhador e Vigilância das Emergências em Saúde Pública. – Brasília: Ministério da Saúde, 2020a. 40 p.: il.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Indicadores institucionais do Programa Nacional de Vigilância da Qualidade da Água para consumo humano – 2019**/ Secretaria de Vigilância em Saúde, Departamento de Saúde Ambiental, do Trabalhador e Vigilância das Emergências em Saúde Pública. – Brasília: Ministério da Saúde, 2020b. 35 p.: il.
BRASIL. Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro. **Portaria Nº 888, de 04 de maio de 2021**. Brasília, 2021a.

BRASIL. Agência Nacional de Águas - **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2021: informe anual**. Brasília: ANA, 2021b. Disponível em https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conjuntura_2021_pdf_final_revdirec.pdf. Acesso em: 02 mai. 2023

BRASIL. Ministério da Saúde. **Cumprimento da Diretriz Nacional do Plano de Amostragem - Parâmetros Básicos Quantitativo de amostras analisadas pela Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano**. Disponível em: https://infoms.saude.gov.br/extensions/sisagua_diretrizes/sisagua_diretrizes.html. Acesso em: 20. mai. 2022

CANGUSSU, M. C. T.; NARVAI, P. C.; CASTELLANOS FERNANDEZ, R.; DJEHIZIAN, V. A fluorose dentária no Brasil: uma revisão crítica. **Cadernos de Saúde Pública**, vol. 18, n. 1, p. 7–15, fev. 2002. DOI 10.1590/s0102-311x2002000100002. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/csp/a/qDf6LmzYjhD3NX37pzVTk6q/?lang=pt>. Acesso em: 10 nov. 2022

CARVALHO, M. S.; CÂMARA, G. Análise Espacial de Dados Geográficos. In: Suzana DRUCK, S et al. (Ed.). **Análise Espacial de Dados Geográficos**. Brasília: EMBRAPA, 2004. cap 2, p. 15. (ISBN: 85-7383-260-6). Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/analise/>. Acesso em: 10 abr. 2022.

CARRARD, N.; FOSTER, T.; WILLETTS, J. Groundwater as a Source of Drinking Water in Southeast Asia and the Pacific: A Multi-Country Review of Current Reliance and Resource Concerns. **Water**, vol. 11, n. 8, p. 1605, ago. 2019. DOI

10.3390/w11081605. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/11/8/1605>. Acesso em: 12 set. 2022.

CHAN, E. Y. Y.; TONG, K. H. Y.; DUBOIS, C.; MC DONNELL, K.; KIM, J. H.; HUNG, K. K. C.; KWOK, K. O. Narrative Review of Primary Preventive Interventions against Water-Borne Diseases: Scientific Evidence of Health-EDRM in Contexts with Inadequate Safe Drinking Water. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, vol. 18, n. 23, p. 12268, nov. 2021. DOI 10.3390/ijerph182312268. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1660-4601/18/23/12268>. Acesso em: 10 abr. 2022.

CHAPMAN, A. D. **Principles of Data Quality, version 1.0**. Report for the Global Biodiversity Information Facility, Copenhagen. 2005.

CRUZ, G. C. F. da. Alguns aspectos do clima dos Campos Gerais. In: MELO, M. S.; MORO, R. S.; GUIMARÃES, G. B. **Patrimônio natural dos Campos Gerais do Paraná**. Ponta Grossa: Editora UEPG, 2007. Cap. 5, p.59-72.

DARONCO, C.R. **Qualidade da água para consumo humano proveniente de captação subterrânea**. Orientadora: Eniva M. Fernandes Stumm. 2021. 121 f. Dissertação de Mestrado – PPGSAS – UNIJUÍ Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2021. Disponível em: [https://bibliodigital.unijui.edu.br:8443/xmlui/bitstream/handle/123456789/7115/Carla Regina Daronco.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://bibliodigital.unijui.edu.br:8443/xmlui/bitstream/handle/123456789/7115/Carla_Regina_Daronco.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Acesso em: 14 mar. 2022

DE GIGLIO, O.; BARBUTI, G.; TREROTOLI, P.; BRIGIDA, S.; CALABRESE, A.; DI VITTORIO, G.; LOVERO, G.; CAGGIANO, G.; URICCHIO, V. F.; MONTAGNA, M. T. Microbiological and hydrogeological assessment of groundwater in southern Italy. **Environmental Monitoring and Assessment**, vol. 188, n. 11, out. 2016. DOI 10.1007/s10661-016-5655-y. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-016-5655-y>. Acesso em: 5 abr. 2022.

DEBOER, M. Understanding the Heat Map. **Cartographic Perspectives**, n. 80, p. 39–43, nov. 2015. DOI 10.14714/cp80.1314. Disponível em: <https://cartographicperspectives.org/index.php/journal/article/view/cp80-deboer>. Acesso em: 12 set. 2022.

ELISANTE, E.; MUZUKA, A. N. N. Sources and seasonal variation of coliform bacteria abundance in groundwater around the slopes of Mount Meru, Arusha, Tanzania. **Environmental Monitoring and Assessment**, vol. 188, n. 7, jun. 2016. DOI 10.1007/s10661-016-5384-2. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-016-5384-2>. Acesso em: 10 nov. 2022.

ERCUMEN, A.; NASER, A. M.; ARNOLD, B. F.; UNICOMB, L.; COLFORD, J. M., Jr.; LUBY, S. P. Can Sanitary Inspection Surveys Predict Risk of Microbiological Contamination of Groundwater Sources? Evidence from Shallow Tubewells in Rural Bangladesh. **The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene**, v. 96, n. 3 p. 561–568, jan. 2017. DOI 10.4269/ajtmh.16-0489. Disponível em:

<https://www.ajtmh.org/view/journals/tpmd/96/3/article-p561.xml>. Acesso em: 14 de mar. de 2022

ERNESTO, F. de A.; MARTINI, R.; WEISS, R. D. N.; PARAGINSKI, V. T. K.; BACH, B. C.; STÜKER, B.; ANGELI, M. Estudo microbiológico de águas de poços artesianos para consumo humano na região de Santa Maria, RS. **Revista Brasileira de Análises Clínicas**, vol. 52, n. 4, 2020. DOI 10.21877/2448-3877.202100954. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21877/2448-3877.202100954>. Acesso em 4 de jul. de 2022.

FEITOSA, F. A. C. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações** / organização e coordenação científica Fernando A. C. Feitos [et al.]. - 3 ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro. CPRM: Laboratório de Hidrogeologia. 2008 812p.

FORTES, A. C. C.; BARROCAS, P. R. G.; KLIGERMAN, D. C. A vigilância da qualidade da água e o papel da informação na garantia do acesso. **Saúde em Debate**, vol. 43, nº spe3, p. 20–34, dez. 2019. DOI 10.1590/0103-11042019s302. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/sdeb/a/MScwKFMGMHc9j5yv49ZwhHM/?lang=pt>. Acesso em: 10 abr. 2022.

FREEZE, A.R.; CHERRY, J.A. **Água subterrâneas**. Tradução de Everton de Oliveira [et al.]; Everton de Oliveira (Coord.). – São Paulo (SP): Everton de Oliveira. 698 p.: il; 30cm, 2017.

GUPPY, L.; UYTENDAELE, P.; VILLHOLTH, K. G.; SMAKHTIN, V. **Groundwater and Sustainable Development Goals: Analysis of Interlinkages**. UNU-INWEH Report Series, Issue 04. United Nations Unive. 2018. Disponível em: <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/98576>. Acesso em: 14 de mar. de 2022

HOWARD, G.; PEDLEY, S.; BARRETT, M.; NALUBEGA, M.; JOHAL, K. Risk factors contributing to microbiological contamination of shallow groundwater in Kampala, Uganda. **Water Research**, vol. 37, n. 14, p. 3421–3429, ago. 2003. DOI 10.1016/S0043-1354(03)00235-5. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1354\(03\)00235-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1354(03)00235-5). Acesso em: 5 de jul. de 2022.

HYPOLITO, R.; EZAKI, S.; PÉREZ-AGUILAR, A. Fluoreto nas águas subterrâneas dos aquíferos Tubarão e Cristalino, região de Salto-Indaiatuba (SP). **Rem: Revista Escola de Minas**, vol. 63, n. 4, p. 715–726, dez. 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rem/a/Lm4TwgXpYKqNSnhHrsSLPHz/?lang=pt>. Acesso em: 19 de mar. de 2022

INDRASTUTI; KAZAMA, S.; TAKIZAWA, S. Evaluation of Microbial Contamination of Groundwater under Different Topographic Conditions and Household Water Treatment Systems in Special Region of Yogyakarta Province, Indonesia. **Water**, vol. 13, n. 12, p. 1673, jun. 2021. DOI 10.3390/w13121673. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/12/1673>. Acesso em: 17 de nov. de 2022

IRITANI, M. A. R. E EZAKI, S. **As águas subterrâneas do Estado de São Paulo**. Cadernos de Educação Ambiental – São Paulo: Secretaria de Estado do Meio Ambiente – SMA, 2012a. 104p. il. Color.; 23 cm. 3ª edição.

IRITANI, M. A. R. E EZAKI, S. **Roteiro orientativo para delimitação de área de proteção de poço**. 2. ed. – São Paulo: Instituto Geológico, 2012b. 60 p.

HIRATA, R.; SUHOGUSOFF, A.; MARCELLINI, S.; VILLAR, P; MARCELLINI, L. **As águas subterrâneas e sua importância ambiental e socioeconômica para o Brasil**. São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Instituto Trata Brasil, CEPAS|USP, 2019a. 64 p.

HIRATA, R.; SUHOGUSOFF, A.; MARCELLINI, S.; VILLAR, P; MARCELLINI, L. **A revolução silenciosa das águas subterrâneas no Brasil: uma análise da importância do recurso e os riscos pela falta de saneamento**. 2019b. Disponível em: http://www.tratabrasil.org.br/images/estudos/itb/aguas-subterraneas-e-saneamento-basico/Estudo_aguas_subterraneas_FINAL.pdf. Acesso em: 27 de set. 2021

IBGE. **Panorama do Censo - Ponta Grossa**. 2023. Disponível em: <https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/>. Acesso em: 18 jul. 2023.

JUNIOR, E. de O. P.; AMARO, I. P. de M.; FERREIRA, F. A. B.; FELTRIN, V. P. Qualidade microbiológica da água para consumo de uma Universidade do Oeste do Paraná. **Brazilian Journal of Development**, vol. 7, n. 3, p. 31398–31413, 2021. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/27161/21475>. Acesso em: 18 out. 2022.

KELLY, E. R.; CRONK, R.; KUMPEL, E.; HOWARD, G.; BARTRAM, J. How we assess water safety: A critical review of sanitary inspection and water quality analysis. **Science of The Total Environment**, vol. 718, p. 137237, mai. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969720307476?via%3Dihub>. Acesso em: 10 nov. 2022.

KELLY, E.; CRONK, R.; FISHER, M.; BARTRAM, J. Sanitary inspection, microbial water quality analysis, and water safety in handpumps in rural sub-Saharan Africa. **npj Clean Water**, Londres, vol. 4, n. 1, jan. 2021.

KHAN, M. H.; NAFEEES, M.; MUHAMMAD, N.; ULLAH, U.; HUSSAIN, R.; BILAL, M. Assessment of Drinking Water Sources for Water Quality, Human Health Risks, and Pollution Sources: A Case Study of the District Bajaur, Pakistan. **Archives of Environmental Contamination and Toxicology**, vol. 80, nº 1, p. 41–54, jan. 2021. DOI 10.1007/s00244-020-00801-3. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s00244-020-00801-3>.

KLØVE, B.; KVITSAND, H. M. L.; PITKÄNEN, T.; GUNNARSDOTTIR, M. J.; GAUT, S.; GARDARSSON, S. M.; ROSSI, P. M.; MIETTINEN, I. Overview of groundwater sources and water-supply systems, and associated microbial pollution, in Finland,

Norway and Iceland. **Hydrogeology Journal**, Basileia, vol. 25, nº 4, p. 1033–1044, mar. 2017.

KUMAR, A., NIRPEN, L., RANJAN, A., GULATI, K., THAKUR, S. AND JINDAL, T. (2014). Microbialgroundwater contamination and effective monitoring system. **Asian J. Environ. Sci.**, 9(1): 37-48. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/267376077_MICROBIAL_GROUNDWATER_CONTAMINATION_AND_EFFECTIVE_MONITORING_SYSTEM_REVIEW. Acesso em: 06 abr. 2022

LEITE, M. D. L.; ADACHESKI, P. A.; VIRGENS FILHO, J. S. das. Análise da frequência e da intensidade das chuvas em Ponta Grossa, Estado do Paraná, no período entre 1954 E 2001. **Acta Scientiarum. Technolog**, Maringá, v. 33, n. 1, fev. 2011

LUTTERODT, G.; MIYITTAH, M. K.; ADDY, B.; ANSA, E. D. O.; TAKASE, M. Groundwater pollution assessment in a coastal aquifer in Cape Coast, Ghana. **Heliyon**, vol. 7, n. 4, p. e06751, abr. 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06751>. Acesso em: 29 out. 2022

MAACK, R. **Geografia física do Estado do Paraná**. 4.ed. Ponta Grossa: Editora UEPG, 2012. 526p

MANZIONE, R. **Águas Subterrâneas: Conceitos e Aplicações sob uma visão multidisciplinar**. Jundiaí: Paco Editorial, 2015. 383 p.

MARRAS, L.; BERTOLINO, G.; SANNA, A.; PINNA, A.; CARRARO, V.; SCHINTU, M.; CORONEO, V. Potential issues of well water in domestic use in a retrospective study from 2014 to 2018. **Environ Monit Assess**, Basileia, vol. 192, n. 6, jun. 2020.

MEDEIROS, A. C.; LIMA, M. de O.; GUIMARÃES, R. M. Avaliação da qualidade da água de consumo por comunidades ribeirinhas em áreas de exposição a poluentes urbanos e industriais nos municípios de Abaetetuba e Barcarena no estado do Pará, Brasil. **Ciência & Saúde Coletiva**, vol. 21, n. 3, p. 695–708, mar. 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/csc/a/yMFrN4hmSW7KzZnj5B6WVYK/?lang=pt>. Acesso em: 9 out. 2022

MELO, M.S.; GUIMARÃES, G.B.; PONTES, H.S.; MASSUQUETO, L.L.; PIGURIM, I.; BAGATIM, H.Q.; GIANNINI, P.C.F. FIGUEIREDO L.A.V., RASTEIRO, M.A., RODRIGUES, P.C. 2010. Carste em rochas não-carbonáticas: o exemplo dos arenitos da formação furnas, campos gerais do Paraná/Brasil e as implicações para a região. **Espeleo-Tema**. v.22, n.1. 2011. SBE – Campinas, SP. p.81-97 Disponível em: http://www.sbe.com.br/wp-content/uploads/2021/02/Espeleo-Tema_v22_n1_081-097.pdf. Acesso em: 14 mar. 2022

MELO, M. S. D.; GOMES, R. M.; PEREIRA, G. K. ÁGUA SUBTERRÂNEA NO GRÁBEN DE PONTA GROSSA, PR. **Boletim Paranaense de Geociências**, Curitiba, v. 72, p. 1-12. out. 2015.

MORAES, M.E.B.; LORANDI, R. Métodos e Técnicas de Pesquisa em Bacias Hidrográficas. Bahia, Editora da UESC - **Editus**, 2016, 283 p. Disponível em: <https://static.scielo.org/scielobooks/4wbr2/pdf/moraes-9788574554433.pdf>. Acesso em: 14 mar. 2022

MOREIRA, N. A.; BONDELIND, M. Safe drinking water and waterborne outbreaks. **Journal of Water and Health**, vol. 15, n. 1, p. 83–96, out. 2016. Disponível em: <https://iwaponline.com/jwh/article/15/1/83/28437/Safe-drinking-water-and-waterborne-outbreaks>. Acesso em: 9 out. 2022

MUSHI, D.; BYAMUKAMA, D.; KIRSCHNER, A. K. T.; MACH, R. L.; BRUNNER, K.; FARNLEITNER, A. H. Sanitary inspection of wells using risk-of-contamination scoring indicates a high predictive ability for bacterial faecal pollution in the peri-urban tropical lowlands of Dar es Salaam, Tanzania. **Journal of Water and Health**, Londres, vol. 10, n. 2, p. 236–243, mar. 2012.

NASCIMENTO, M. B. S.; DA SILVA, J. P. G.; VILLAS BOAS, M. D.; DA SILVA, J. P. C.; SACRAMENTO, C. E. S.; ABREU, A. M.; KENUP, R. E. Avaliação dos Dados Monitorados de Qualidade da Água usando a detecção de Outliers nas bacias Experimentais e Representativa do Rio Piabanha – Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro – RJ. *In*: XXIV – SBRH - SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS 2021, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte; SBRH, 2021. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/22593>. Acesso em: 30 nov. 2022.

OECD - Organisation for Economic Co-operation and Development. **Building Water Resilience in Brazil Ten Years of OECD & ANA Work on Water Governance, Finance and Regulation 2012-2022.** 2022 Disponível em: <https://www.oecd.org/cfe/cities/BrazilWaterResilience.pdf>. Acesso em: 01 mai. 2023

OLIVEIRA, C. M. de. Sustainable access to safe drinking water: fundamental human right in the international and national scene. **Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, Taubaté, vol. 12, n. 6, p. 985, nov. 2017.

OLIVEIRA, A. de; MAGALHÃES, T. de B.; MATA, R. N. da; SANTOS, F. S. G. dos; OLIVEIRA, D. C. de; CARVALHO, J. L. B. de; ARAÚJO, W. N. de. Sistema de Informação de Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano (Sisagua): características, evolução e aplicabilidade. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, Brasília, vol. 28, n. 1, abr. 2019.

PARANÁ. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. **O Paraná e suas águas: águas do planeta Terra, no Brasil e no Paraná.** Curitiba: SEMA 2015. 216 p

PARANÁ - Instituto Água e Terra (IAT). **Relatório de conjuntura dos recursos hídricos do Estado do Paraná.** - Curitiba: IAT - Instituto Água e Terra, 2020a. ISBN 978-65-87716-00-8 Disponível em: http://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files/documento/2020-07/relatorio_conjuntura_recursohidricos_2020.pdf. Acesso em: 27 de set. 2021

PARANÁ – Laboratório Central do Estado do Paraná (LACEN). **Manual de coleta e envio de amostras de vigilância ambiental**. Manual 1.40.002. Revisão 1. 2020b. Disponível em: https://lacen.saude.pr.gov.br/sites/lacen/arquivos_restritos/files/documento/2020-12/manual_1.40.002_rev_01.pdf. Acesso em: 22 abr. 2022

PARANÁ - Instituto Água e Terra (IAT). **Geologia ambiental aplicada às associações de municípios do Paraná associação dos municípios da região dos campos gerais AMCG**. Curitiba: IAT - Instituto Água e Terra, 2021. Disponível em: <https://www.documentador.pr.gov.br/documentador/pub.do?action=d&uuid=@gtf-escriba-minerop@7a5bc506-0edc-498c-8649-d13394c89e63>. Acesso em: 2 set. 2022

PITKÄNEN, T.; KARINEN, P.; MIETTINEN, I. T.; LETTOJÄRVI, H.; HEIKKILÄ, A.; MAUNULA, R.; AULA, V.; KURONEN, H.; VEPSÄLÄINEN, A.; NOUSIAINEN, L.-L.; PELKONEN, S.; HEINONEN-TANSKI, H. Microbial Contamination of Groundwater at Small Community Water Supplies in Finland. **AMBIO**, vol. 40, n. 4, p. 377–390 nov. 2010. DOI 10.1007/s13280-010-0102-8. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13280-010-0102-8>. Acesso em: 2 set. 2022

PONTES, H. S. **Espacialização de feições cársticas da Formação Furnas: Ferramenta para Gestão do Território no Município de Ponta Grossa (PR)** / Dissertação (Mestrado em Gestão do Território) Henrique Simão Pontes. Ponta Grossa, 2014. 163p. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/66390>. Acesso em 07 nov. 2022

PONTES, H.S.; PINTO, M.L.C.; MELO, M.S.; MASSUQUETO, L.L. Análise das depressões do terreno como forma de identificação de processos endocársticos na formação furnas e os problemas da localização dos aterros sanitários em Ponta Grossa (PR). In: XI SINAGEO - Simpósio Nacional de Geomorfologia - UGB - União da Geomorfologia Brasileira, 2016, Maringá. **Anais...** Maringá: SINAGEO, UEM, 2016. n. 511. Disponível em: <https://www.sinageo.org.br/2016/trabalhos/8/8-511-133.html>. Acesso em: 5 ago. 2022.

PONTES, H. S.; FERNANDES, L. A.; DE MELO, M. S.; MASSUQUETO, L. L. A região cárstica dos Campos Gerais, Paraná-São Paulo, Brasil: revisão de conceitos, potencial espeleológico e políticas públicas de geoconservação. **Pesquisas em Geociências**, v. 48, n. 2, 2021. DOI: 10.22456/1807-9806.100555. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/index.php/PesquisasemGeociencias/article/view/100555>. Acesso em: 31 ago. 2022.

PUJARI, P. R.; PADMAKAR, C.; LABHASETWAR, P. K.; MAHORE, P.; GANGULY, A. K. Assessment of the impact of on-site sanitation systems on groundwater pollution in two diverse geological settings—a case study from India. **Environmental Monitoring and Assessment**, vol. 184, n. 1, p. 251–263, mar. 2011. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-011-1965-2>. Acesso em: 3 ago. 2022.

QUEIROZ, A. C. L.; CARDOSO, L. S. de M.; SILVA, S. C. F. da; HELLER, L.; CAIRNCROSS, S. Programa Nacional de Vigilância em Saúde Ambiental Relacionada

à Qualidade da Água para Consumo Humano (Vigiagua): lacunas entre a formulação do programa e sua implantação na instância municipal. **Saúde e Sociedade**, São Paulo, vol. 21, nº 2, p. 465–478, jun. 2012.

REBOUÇAS, A. C. A inserção da água subterrânea no sistema nacional de gerenciamento, **RBRH**, v. 7, n. 4, p. 39-50, Porto Alegre, 2002. Disponível em: https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/101/1eb408f1beb6eb467b1194ddcbf68a0d_8794a2e40db7eed3bd419e2a8cce570b.pdf. Acesso em: 15 mar. 2022

REGINATO, P. A. R.; MICHALSKI, E. Z.; PAIM, R.A. Água Subterrânea Na Região De Osório. p.209-218. In: SCHÄFER, A.; LANZER, R.; SCUR, L. (Org.). **Atlas socioambiental do município de Osório**. Caxias do Sul: EDUCS, 2017, 237p.

RETTTER, A.; KARWAUTZ, C.; GRIEBLER, C. Groundwater Microbial Communities in Times of Climate Change. **Current Issues in Molecular Biology**, v. 41 p. 509-538, 2021.

RIVERA-RODRÍGUEZ, D. A.; BELTRÁN-HERNÁNDEZ, R. I.; LUCHO-CONSTANTINO, C. A.; CORONEL-OLIVARES, C.; HERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, S.; VILLANUEVA-IBÁÑEZ, M.; NOLASCO-ARIZMENDI, V.; VÁZQUEZ-RODRÍGUEZ, G. A. Water quality indices for groundwater impacted by geogenic background and anthropogenic pollution: case study in Hidalgo, Mexico. **International Journal of Environmental Science and Technology**, Teerã, vol. 16, nº 5, p. 2201–2214, jun. 2018.

RIZZATTI, M.; LAMPERT BATISTA, N.; CEZAR SPODE, P. L.; BOUVIER ERTHAL, D.; MAURO DE FARIA, R.; VOLPATO SCOTTI, A. A.; TRENTIN, R.; PETSCH, C.; TURBA COSTA, I.; QUOOS, J. H. Mapeamento da COVID-19 por meio da densidade de Kernel. **Metodologias e Aprendizado**, v. 3, p. 44–53, 2020. DOI: 10.21166/metapre.v3i0.1312. Disponível em: <https://publicacoes.ifc.edu.br/index.php/metapre/article/view/1312>. Acesso em: 10 abr. 2022.

SANTOS, R. C. **Avaliação da potabilidade das águas subterrâneas do sistema aquífero bauru provenientes de poços de soluções alternativas coletivas do município de Tupã – SP**. Orientadora: Alessandra Furtado da Silva. Londrina: [s.n], 2018. 102 f: il; 30cm. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal Do Paraná Utfpr - Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Ambiental. Londrina, 2017. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/3597/1/LD_PPGEA_M_Santos%2c%20Roberto%20Costa_2018.pdf. Acesso em: 17. nov. 2022

SÃO PAULO. **Decreto nº 32.955, de 07 de fevereiro de 1991**. Regulamenta a Lei nº 6.134, de 02/06/1988, que dispõe sobre a preservação dos depósitos naturais de águas subterrâneas do Estado. Disponível em <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/1991/decreto-32955-07.02.1991.html>. Acesso em: 02 mai. 2022

SCHMOLL, O., HOWARD, G., CHILTON, J. & CHORUS, I. **Protecting groundwater for health. Managing the quality of drinking-water sources**, WHO, IWA Publishing, Londres. 2006 Disponível em: https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/43186/9241546689_eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y Acesso em: 14 mar. 2022

SCHUROFF, P. A.; LIMA, N. R.; LOPES, A. M.; BURGOS, T. N.; KLEIN, A. L.; SILVA, C. R.; BURGOS, C. N.; PELAYO, J. S. Avaliação da qualidade bacteriológica das águas de poços no norte do estado do Paraná, Brasil. *In: VIII EPCC – Encontro Internacional de Produção Científica Cesumar UNICESUMAR – Centro Universitário Cesumar*, 2013, Maringá. **Anais...** Maringá; 2013. EPCC, 2013. Disponível em: http://www.cesumar.br/prppge/pesquisa/epcc2013/oit_mostra/Paulo_Alfonso_Schuroff_3.pdf. Acesso em: 10. nov. 2022

SINGH, S.; HUSSIAN, A. Water quality index development for groundwater quality assessment of Greater Noida sub-basin, Uttar Pradesh, India. **Cogent engineering**. vol. 3, n. 1, p. 1177155. 2016. Disponível em <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/23311916.2016.1177155>. Acesso em: 1. nov. 2022

SOUZA, J.; QUEIROZ VALDEZ, F.; JERANOSKI, R. F.; VIDAL, C. M. de S.; CAVALLINI, G. S. Water and Wastewater Disinfection with Peracetic Acid and UV Radiation and Using Advanced Oxidative Process PAA/UV. **International Journal of Photoenergy**, vol. 2015, p. 1–7. 2015. DOI 10.1155/2015/860845. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/ijp/2015/860845>. Acesso em: 10. nov. 2022

UNESCO. United Nations. **World Water Development Report 2020: Water and Climate Change**, Paris, UNESCO, 2020a. Disponível em: <https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report-2020>. Acesso em: 06 mai. 2023

UNESCO. United Nations. **Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2020: água e mudança climática, resumo executivo**. 2020b. Disponível em: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000372882_por?posInSet=4&queryId=ad620686-981b-4609-a7ad-df12ffc7eaa8. Acesso em: 21 mar. 2022.

UNESCO - United Nations. **The United Nations World Water Development Report 2021 - VALUING WATER**. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. UNESCO, Paris. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000375724/PDF/375724eng.pdf.multi> Acesso em: 06 mai. 2023

UNESCO - United Nations., **The United Nations World Water Development Report 2022: Groundwater: Making the invisible visible**. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. UNESCO, Paris. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380721/PDF/380721eng.pdf.multi> Acesso em: 01 mai. 2023

UNESCO - United Nations. **The United Nations World Water Development Report 2023: Partnerships and cooperation for water.** 2023. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. UNESCO, Paris. Disponível em: <https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report-2023> Acesso em: 02 mai. 2023.

VELIS, M.; CONTI, K. I.; BIERMANN, F. Groundwater and human development: synergies and trade-offs within the context of the sustainable development goals. **Sustainability Science**, vol. 12, n. 6, p. 1007–1017, set. 2017. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11625-017-0490-9#citeas>. Acesso em: 02 nov. 2022.

VICENTE, Y. S.; BUENO, P. A. A.; GONZALEZ, R. da S.; FILHO, N. C.; FEITOZA, L. de L.; MARQUES, M. M. M.; SOUZA, D. C. de; MEDEIROS, F. V. da S.; PERON, A. P. Qualidade de águas de poços artesianos da cidade de Peabiru, Paraná, Brasil: um município sem tratamento de esgoto. **Ciências da saúde: Políticas públicas, assistência e gestão**, p. 197-210, 10 dez. 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.22533/at.ed.62521101217>. Acesso em: 30 mar. 2022.

WANG, X.; ZHANG, P.; LIU, L.; LI, D.; WANG, Y. Effects of Human Activities on Hydrological Components in the Yiluo River Basin in Middle Yellow River. **Water**. Basileia, vol. 11, n. 4, p. 689, abr. 2019.

WHO. World Health Organization. **Guidelines for drinking-water quality, 2nd ed. Vol. 3.** Surveillance and control of community supplies. 1997. Geneva, World Health Organization Disponível em: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/42002/9241545038.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 30 mar. 2022

WHO. World Health Organization. **Guidelines for drinking-water quality, 4th ed.** 2011. World Health Organization, Geneva, Switzerland. Disponível em: http://whqlibdoc.who.int/publications/2011/9789241548151_eng.pdf Acesso em: 30 mar. 2022

WHO. World Health Organization. **Rapid assessment of drinking-water quality a handbook for implementation.** 138 p. 2012. Geneve 2012; UNICEF. Disponível em: <https://apps.who.int/iris/rest/bitstreams/1272345/retrieve>. Acesso em: 30 jul. 2022

WHO. World Health Organization. **Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first addendum.** Geneva: World Health Organization; 2017. Disponível em: <https://apps.who.int/iris/rest/bitstreams/1080656/retrieve>. Acesso em: 14 mai. 2022

ZOBY, J. L. G. Panorama da qualidade das águas subterrâneas no Brasil. **Águas Subterrâneas**, 2008. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23802>. Acesso em: 14 mar. 2022

APÊNDICE A - FORMULÁRIO DE INSPEÇÃO SANITÁRIA

AVALIAÇÃO RÁPIDA DA QUALIDADE DA ÁGUA POTÁVEL
Poço artesiano com bomba mecanizada

I. Informações Gerais

- a. Endereço.:
- b. Coordenadas: X.....Y.....
- c. Data da Visita:
- d. Região: () Urbana () Rural
- e. Pessoas Servidas.....

II. Informações de diagnóstico específica para avaliação:

(Indicar em que locais o risco foi identificado)	Risco
1. Existe uma fossa ou esgoto a menos de 100 m da bomba?	() S () N
2. Existe uma fossa a 10 m da perfuração?	() S () N
3. Existe alguma outra fonte de poluição a 50 m do poço (por exemplo, criação de animais, agricultura, indústria, postos, etc.)?	() S () N
4. Existe um poço raso não tampado dentro de 100 m?	() S () N
5. O canal de drenagem está ausente, rachado precisando de limpeza?	() S () N
6. Animais podem atravessar a cerca de proteção do poço?	() S () N
7. A base do mecanismo de bombeamento é permeável à água?	() S () N
8. Há água estagnada a menos de 2 m do mecanismo de bombeamento?	() S () N
9. O poço é insalubre (lixo, fezes ou outros resíduos no entorno)?	() S () N
10. A laje do poço está rachada?	() S () N

Pontuação total dos riscos: _____ / 10

III Resultados e comentários:

a. Nota de risco da inspeção sanitária (assinalar a caixa apropriada):

9-10 = Muito alto 6-8 = Alto 3-5 = Médio 0-2 = Baixo

b. Foram observados os seguintes pontos de risco importantes:

- Comentários adicionais (se necessário, continuar no verso do formulário)

Fonte: Adaptado de WHO (2012)

COMPLEMENTAÇÃO DO APÊNDICE A

NOTAS EXPLICATIVAS POÇO COM BOMBA MECANIZADA

1. Existe uma fossa ou esgoto a menos de 100 m do mecanismo de bombeamento?

Qualquer fuga do esgoto ou infiltração da fossa que pode contaminar a água do poço por tração causada por bombeamento. É possível observar as fossas e verificar com os residentes. Se observar quaisquer fossas ou esgoto perto do mecanismo de bombeamento, responda 'Sim'.

2. Existe uma fossa a 10 m do poço?

As fossas próximas dos lençóis freáticos podem afetar a qualidade da água (por exemplo, por infiltração). Pode ser necessário verificar visualmente as estruturas ou perguntar aos moradores. Se observar quaisquer fossas perto do poço, responder 'Sim'.

3. Existe alguma outra fonte de poluição a menos de 50 m do poço (por exemplo, criação de animais, cultivo, indústria, etc.)?

As fezes de animais ou humanos no solo perto do poço constituem um sério risco para a qualidade da água, especialmente quando não existem valas de drenagem de água. Eliminação de outros resíduos (doméstico, agrícola, etc.) indica que as práticas de saneamento ambiental são deficientes, o que constitui um risco para a qualidade da água. Isto pode ser observado nos arredores da comunidade onde ocorre a amostragem de água. Se encontrar alguma destas práticas dentro de 50 m, responder 'Sim'.

4. Existe um poço não tampado dentro de 100 m?

Os poços não tampados podem ser facilmente contaminados e a poluição propaga-se através do aquífero. Pode verificar visualmente a existência de tais poços e também perguntar aos residentes. Se existirem poços não tapados na área, responder 'Sim'.

5. O canal de drenagem está ausente ou rachado, partido ou a precisar de ser limpo?

Há má construção da manutenção do canal de drenagem, levando a fissuras ou rupturas, especialmente quando combinado com derramamento de água e más condições sanitárias, representa um risco elevado para a água qualidade. Se observar algum destes problemas, responda "Sim".

6. Animais podem atravessar a cerca de proteção do poço?

Se não houver cerca (ou se a cerca estiver danificada), os animais podem aceder ao local do poço e podem danificar a estrutura, bem como poluir a área com excrementos. Terá de verificar a proteção do local, bem como verificar se os animais estão rotineiramente na área. Se observar algum destes problemas, responda Sim'.

7. A base do mecanismo de bombeamento é permeável à água?

Se a base for permeável (por exemplo, não há cobertura ou a cobertura tem fissuras profundas) qualquer escoamento superficial poderia fornecer uma via de contaminação para entrar na fonte de água. Se isto for observado, responder 'Sim'.

8. Existe alguma água estagnada a menos de 2 m do mecanismo de bombeamento?

Se as poças de água se acumularem em volta do mecanismo de bombeamento podem fornecer uma rota para a entrada de contaminantes na fonte. Se observar água derramada ou poças de água perto do mecanismo, então responda Sim'.

9. O poço é insalubre?

Fezes, lixo e outros resíduos no entorno do selo do poço representam um risco para a qualidade da água. Se vir estes perto do selo, responder 'Sim'.

10. A tampa do poço está rachada? Rachaduras permitem a entrada de contaminantes no poço, colocando em risco a qualidade da água. Se existirem fissuras profundas na tampa (não apenas as superficiais, responder 'Sim'.

ANEXO A – AUTORIZAÇÃO DE USO DE DADOS

PREFEITURA MUNICIPAL DE PONTA GROSSA
FUNDAÇÃO MUNICIPAL DE SAÚDE
COORDENADORIA DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA COLETA DE DADOS

Ponta Grossa, 12 de abril de 2022.

Eu, ISAIAS MONTES FILHO, Coordenador da Vigilância Sanitária da Fundação Municipal de Saúde, tenho ciência e autorizo a coleta de dados nessa instituição, com a finalidade de realizar a pesquisa de mestrado acadêmico sob responsabilidade do discente Rhuan Felipe Jeranoski intitulada: *Avaliação espaço temporal de parâmetros da qualidade da água bruta de poços utilizados para consumo humano*, cujo objetivo é avaliar a qualidade da água para o consumo humano proveniente de poços tubulares no município de Ponta Grossa – PR, por meio dos dados abertos do programa nacional de vigilância em saúde ambiental relacionada à qualidade da água para consumo humano (VIGIÁGUA).

A coleta de informações ocorrerá mediante a utilização de dados do Portal Brasileiro de Dados Abertos – Vigilância de Parâmetros Básicos, preenchimento de formulários nos locais de coleta e dados secundários de cadastros de poços e resultados de amostras incluídos no sistema SISAGUA e no GAL (Gerenciador de Ambiente Laboratorial).

Igualmente, informa que a utilização dos dados obtidos deverá ser usada somente para fins científicos, bem como, deverão ser disponibilizados os resultados obtidos para esta Fundação Municipal de Saúde.

Isaias Montes Filho
Farmacêutico-Bioquímico
MT/CO 200.578 / CRF-PR 10.256
Vigilância Sanitária - SMS

ISAIAS MONTES FILHO
COORDENADOR DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA