

MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA POR MEIO DE BIOINDICADORES: ESTUDO DE CASO DA SUB-BACIA DO ARROIO DURO NO RIO GRANDE DO SUL

Daviline Caldasso da Silva

Técnica em Controle Ambiental (IFSul)

E-mail: davilinesilva.cm027@academico.ifsul.edu.br

Lucas Thurow

Técnico em Controle Ambiental (IFSul)

E-mail: lucasthurow.cm019@academico.ifsul.edu.br

Camila Ferraz Correa

Tecnóloga em Saneamento Ambiental (IFSSul), Mestra em Ciência e Engenharia de Materiais (UFPel)

Professora Substituta no Instituto Federal Sul Riograndense - Campus Camaquã

E-mail: camilafcorrea@gmail.com

Gabriel Borges dos Santos

Engenheiro Ambiental e Sanitarista (UFPel), Doutor em Recursos Hídricos (UFPel)

Pesquisador no Centro Interinstitucional de Observação e Previsão de Eventos Extremos – CIEEX (FURG)

E-mail: gabrielwxsantos@hotmail.com

Caroline Neugebauer Wille

Bióloga (UFPel), Doutora em Fitossanidade (UFPel)

Professora no Instituto Federal Sul Riograndense - Campus Camaquã

E-mail: carolinewille@ifsul.edu.br

Luciana Rodrigues Nogueira

Engenheira de Bioprocessos e Biotecnologia (UERGS), Doutora em Qualidade Ambiental (FEEVALE)

Professora no Instituto Federal Sul Riograndense - Campus Camaquã

E-mail: luciananogueira@ifsul.edu.br

RESUMO

A qualidade dos recursos hídricos é crítica para o desenvolvimento econômico e sustentabilidade ambiental, exigindo ações integradas e contínuas para preservação dos mananciais. Por isso, o objetivo deste estudo foi monitorar a qualidade hídrica da sub-bacia hidrográfica do Arroio Duro (SBHAD), que abrange os municípios de Camaquã, Chuvisca, Dom Feliciano e São Jerônimo no estado do Rio Grande do Sul, por meio dos organismos bioindicadores, contribuindo para a preservação dos recursos hídricos da área em questão. A série de dados analisadas é composta por 5 amostragens que foram coletadas entre os anos de 2022 a 2024 e os parâmetros analisados e utilizados neste estudo foram: *Escherichia coli* (*E. coli*) e genotoxicidade determinada por aborto polínico em *Tradescantia pallida* var. *purpurea*. Os dados obtidos neste estudo indicam que a zona urbana e as áreas agrícolas, influenciam a qualidade da água do Arroio Duro. Observou-se que a presença de *E. coli* está associada à passagem pela zona urbana, enquanto a exposição a agentes presentes em áreas de cultivo de tabaco contribui para elevar o potencial genotóxico da água deste manancial. Diante dos achados, salienta-se a importância de investigações futuras, contemplando um maior número de coletas e pontos de amostragem, a inclusão de novos parâmetros e a análise temporal, para obtenção de um diagnóstico mais abrangente que permita observar a evolução da qualidade da água e dos impactos ao longo do tempo, contribuindo para estratégias de mitigação e gestão ambiental neste ecossistema.

MONITORING OF WATER QUALITY THROUGH BIOINDICATORS: CASE STUDY OF THE ARROIO DURO SUB-BASIN IN RIO GRANDE DO SUL

ABSTRACT

The quality of water resources is critical for economic development and environmental sustainability, requiring integrated and continuous actions to preserve water sources. Therefore, the objective of this study was to monitor the water quality of the Arroio Duro sub-basin (SBHAD), which encompasses the municipalities of Camaquã, Chuvisca, Dom Feliciano, and São Jerônimo in the state of Rio Grande do Sul, Brazil, using bioindicator organisms, contributing to the preservation of the area's water resources. The dataset analyzed consists of five samplings collected between 2022 and 2024. The parameters analyzed and used in this study were *Escherichia coli* (*E. coli*) and genotoxicity, determined by pollen abortion in *Tradescantia pallida* var. *purpurea*. The data obtained indicate that urban zones and agricultural areas influence the water quality of Arroio Duro. The presence of *E. coli* was associated with urban areas, while exposure to agents present in tobacco cultivation areas contributed to increasing the water's genotoxic potential. Given these findings, future investigations are essential, including a larger number of samples and sampling points, the inclusion of new parameters, and a temporal analysis. This would allow for a more comprehensive diagnosis, enabling the observation of water quality trends and impacts over time, ultimately contributing to mitigation strategies and environmental management of this ecosystem.

KEYWORDS: Water pollution, Pesticides, Land use, *Escherichia coli*, Genotoxicity.

INTRODUÇÃO

Os recursos hídricos e os serviços a eles associados são essenciais para o abastecimento público, a agricultura, a indústria e as atividades recreativas. Nesse sentido, desempenham um papel fundamental no combate à pobreza, no crescimento econômico e na sustentabilidade ambiental (ONU, 2020). No entanto, a gestão e conservação da água representam desafios globais devido ao aumento da demanda, à poluição e aos impactos das mudanças climáticas, que comprometem sua disponibilidade em escala mundial (Guedes *et al.*, 2012).

As águas superficiais frequentemente recebem grandes quantidades de poluentes provenientes de diversas fontes, como atividades domésticas, agropecuárias e industriais, o que pode comprometer seus múltiplos usos (Pinto *et al.*, 2019). Além disso, a utilização de recursos hídricos de qualidade desconhecida no abastecimento público, na irrigação agrícola e em atividades recreativas pode representar sérios riscos à saúde pública (Van Vliet *et al.*, 2021).

No contexto regional, a sub-bacia hidrográfica do Arroio Duro (SBHAD), localizada na região centro-sul do Rio Grande do Sul, é marcada pela vulnerabilidade à poluição de diversas fontes, tanto pontuais quanto difusas (Fróes; Karam, 2007). Esse curso hídrico atravessa áreas urbanas e recebe esgoto não tratado, refletindo as limitações no saneamento básico local. Além disso, o uso intensivo de agrotóxicos nas culturas de tabaco a montante de sua captação e de arroz a jusante também

contribuem para a contaminação das águas (Fróes; Karam, 2007). Essas condições não apenas comprometem o meio ambiente e a saúde humana, mas também geram impacto nas atividades econômicas que dependem do Arroio.

Assim, desafios relacionados à preservação ambiental, ao uso racional da água e à mitigação de impactos negativos incluem ações integradas e contínuas (Behmel *et al.*, 2016). Nesse contexto, o monitoramento constante e a implementação de práticas de conservação tornam-se imprescindíveis para garantir a disponibilidade e a qualidade da água desse importante manancial, contribuindo para a segurança hídrica da população e do meio ambiente.

Diante desse cenário, o biomonitoramento surge como uma ferramenta essencial para a avaliação dos impactos ambientais decorrentes da liberação de substâncias tóxicas no ambiente. Essa abordagem permite análises integradas sobre a qualidade dos ecossistemas e oferece subsídios para o desenvolvimento de estratégias de conservação e manejo sustentável da água (Nogueira; Cassanego; Droste, 2022; Jung *et al.*, 2023).

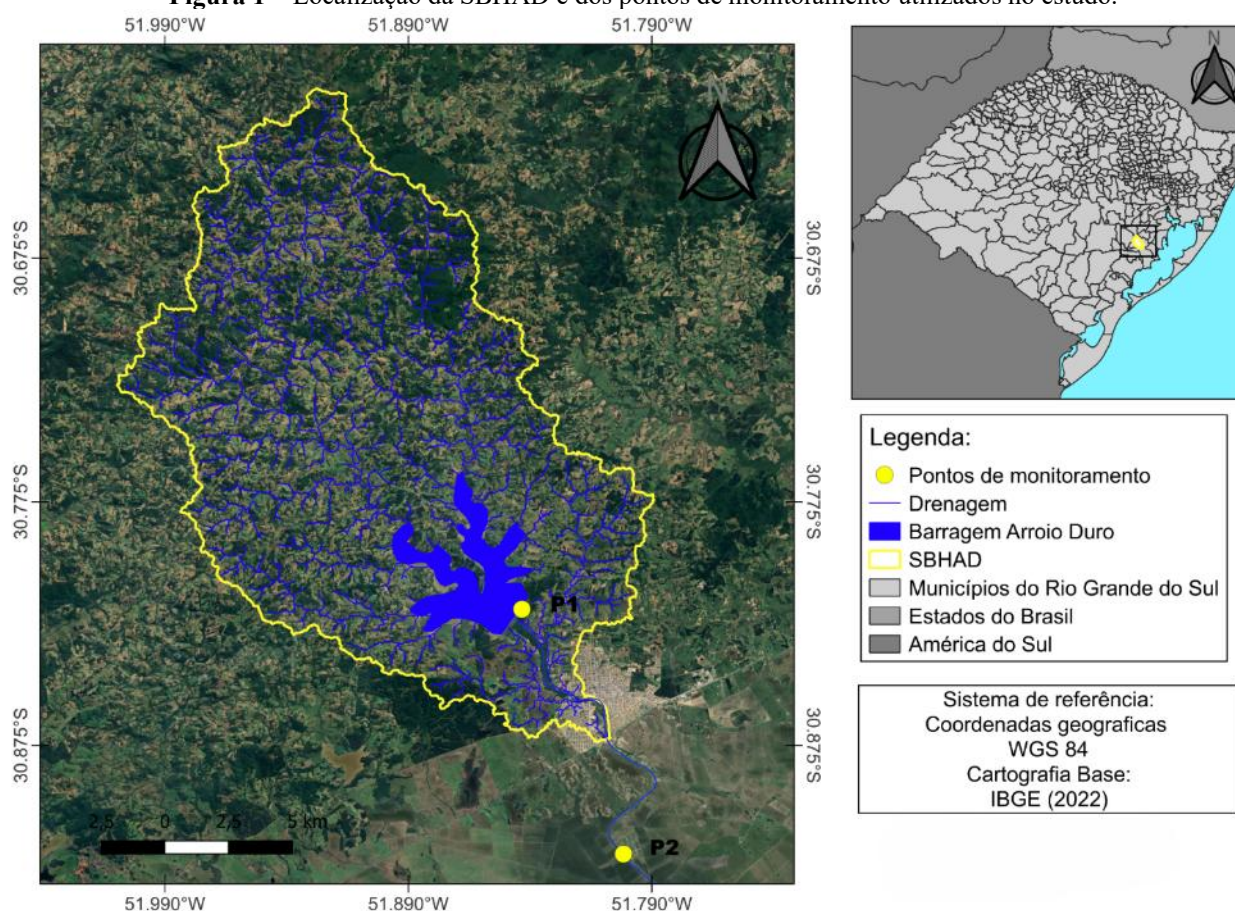
Embora ainda exista uma carência de estudos abrangentes e de longo prazo que analisam a qualidade ambiental da SBHAD, o uso integrado de bioindicadores tradicionais e de genotoxicidade pode oferecer um panorama mais preciso sobre a qualidade ambiental desse manancial, possibilitando o entendimento das condições atuais de suas águas e promovendo ações de manejo e conservação. Dados obtidos a partir de bioindicadores, como a bactéria *Escherichia coli* e a planta indicadora de genotoxicidade *Tradescantia pallida* var. *purpurea*, possibilitam uma avaliação abrangente das condições ambientais da sub-bacia do Arroio Duro (Silva *et al.*, 2025). Desta forma, o objetivo deste estudo é monitorar a qualidade ambiental da SBHAD, por meio de organismos bioindicadores de diferentes espécies, contribuindo para a preservação dos recursos hídricos, essenciais para o abastecimento público, a agricultura e o desenvolvimento sustentável da região.

MATERIAIS E MÉTODOS

Descrição do local de estudo

A área de estudo compreende a sub-bacia hidrográfica do Arroio Duro (SBHAD), conforme Figura 1, que possui uma área de aproximadamente 339 km² abrangendo os municípios de Camaquã, Chuvisca, Dom Feliciano e São Jerônimo. Além disso, o Arroio Duro é o principal corpo hídrico da SBHAD. O clima na região é o subtropical úmido (de acordo com a classificação climática de Koppen) apresentando precipitações bem distribuídas ao longo do ano e temperaturas com grande variação sazonal (temperatura média variando de 15° e 18°C) (Álvares *et al.*, 2013).

Figura 1 – Localização da SBHAD e dos pontos de monitoramento utilizados no estudo.



Fonte: Autores.

A SBHAD está localizada na província geomorfológica do Escudo Sul-rio-grandense, onde ocorrem as rochas mais antigas do Rio Grande do Sul e que apresenta elevada diversidade litológica (Streck *et al.*, 2018). No que compete à geomorfologia, a SBHAD está inserida no Planalto Sul-rio-grandense, que é um planalto desnudado, de formato dômico, gerado por arqueamento da crosta terrestre (Bilhar *et al.*, 2022). O relevo da área é formado por colinas e morros amplos, chamados regionalmente de coxilhas (Bilhar *et al.*, 2022).

Existe na SBHAD a barragem do Arroio Duro, localizada no município de Camaquã (Figura 1), que possui como principais afluentes o Arroio Duro e o Arroio Geraldino. A delimitação da SBHAD foi realizada a partir da definição do exutório localizado no Arroio Duro, a montante da área ocupada por lavouras de arroz irrigado. Essa escolha metodológica se justifica pelo fato de que, a jusante desse ponto, o curso d'água passa a se ramificar em múltiplos canais artificiais de irrigação, característicos do sistema de cultivo de arroz, os quais alteram significativamente a drenagem natural da bacia.

Coleta de dados e pontos de monitoramentos

Os dados utilizados neste estudo pertencem ao projeto de pesquisa “Conhecer para preservar” e tem por objetivo a aplicação de bioindicadores e fatores ambientais integrados no monitoramento ambiental da BHRC (Bacia Hidrográfica do Rio Camaquã), visando orientar o seu manejo integrado. Tais dados foram coletados em dois pontos de monitoramento descritos na Tabela 1 e apresentados espacialmente na Figura 1.

Tabela 1 - Descrição dos pontos de monitoramento.

Ponto	Local	Descrição	Latitude	Longitude
1	Barragem do Arroio Duro	Localizado a montante da área urbana do município de Camaquã	-30,8191165°	-51,8433528°
2	Arroio Duro (trecho urbano)	Localizado a jusante da área urbana do município de Camaquã	-30,919577°	-51,801664°

Fonte: Autores.

O ponto 1 situa-se na Barragem do Arroio Duro, que é um reservatório proveniente de uma bacia de captação de 290 km², com capacidade para armazenar 170 milhões de metros cúbicos de água, distribuída para abastecimento público de cerca de 62.200 habitantes, e também fornece água para a irrigação de cerca de 60.000 hectares de lavouras de arroz e soja, contribuindo para o desenvolvimento econômico regional (IBGE, 2022; AUD, 2023).

O ponto 2 foi escolhido por estar localizado no Arroio Duro após passagem do trecho urbano da cidade de Camaquã, recebendo efluentes de origem doméstica sem nenhum tratamento prévio (SNIS, 2019). As coletas foram realizadas na localidade do Banhado do Colégio, onde arroio ainda percorre seu curso natural, antes de ser drenado para os canais de irrigação (Figura 1).

A série de dados analisadas é composta por 5 amostragens que foram coletadas entre os anos de 2022 a 2024 e os parâmetros analisados e utilizados neste estudo foram: *Escherichia coli* e genotoxicidade determinada por aborto polínico em *Tradescantia pallida* var. *purpurea*.

A água foi coletada de acordo com a metodologia descrita no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2017). Em cada amostragem foram coletados 6 L de água com auxílio de um balde preso na ponta de um cabo. Para o teste de aborto polínico as amostras foram preservadas em garrafas plásticas previamente higienizadas e transportadas até o laboratório. Para análise microbiológica, alíquotas de 100 mL foram recolhidas das amostras e acondicionadas em frascos de vidro estéreis transportados sob refrigeração até o laboratório. As amostras foram mantidas sob refrigeração, transcorrendo no máximo 24 horas até a análise microbiológica.

Avaliação da contaminação de origem fecal

Avaliou-se a contaminação de origem fecal, por meio da concentração da bactéria bioindicadora *Escherichia coli*. Neste estudo, a presença de *E. coli* foi utilizada como um indicador microbiológico tradicional de contaminação fecal em recursos hídricos, uma vez que sua detecção em amostras de água é amplamente associada à presença de patógenos de origem fecal e à precariedade da qualidade sanitária da água analisada (Pequeno *et al.*, 2024).

A técnica utilizada na análise foi a determinação do número mais provável em 100 mL com meio de cultivo Colilert® (IDEXX) seguindo instruções do fabricante e do *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2017). Para análise, o reagente cromogênico foi acrescido diretamente nas amostras, em seguida, foram preparadas diluições da amostra em água estéril, compondo cinco séries com diluições decimais seriadas. As amostras diluídas foram fracionadas em tubos de ensaio. Cada série foi composta de cinco tubos com 10 mL de amostra em cada tubo. Como controle positivo, foi preparado um tubo contendo água destilada, reagente cromogênico e a cepa padrão *E. coli*. Como controle negativo foi utilizado um tubo contendo água destilada estéril e o reagente cromogênico.

Os tubos foram incubados a 35°C por 24 horas. Decorridas 24 h observou-se a coloração dos tubos, comparando as amostras com os padrões. Foram considerados positivos os tubos que apresentaram alteração da coloração do reagente para a cor amarela, que, quando expostos a luz ultravioleta, apresentaram coloração azul fluorescente. Foram considerados negativos os tubos que permaneceram com a coloração original do reagente, ou apresentaram coloração amarela, mas, quando expostos a luz ultravioleta, não apresentaram coloração fluorescente.

A combinação de resultados positivos nas três séries de diluição mais representativas foi utilizada para consulta do número mais provável de *E. coli* em 100 mL de amostra.

A série crítica, é composta a partir da série mais diluída que apresente todos os tubos positivos, complementando com as duas séries seguintes. Após consultar o número mais provável (NMP), sempre que necessário é aplicado o fator de correção, multiplicando o resultado de acordo com o fator de diluição da primeira diluição usada para compor a série crítica.

Por fim, após ter os resultados, os mesmos foram enquadrados conforme os padrões estipulados pela Resolução CONAMA nº 274/2000 (BRASIL, 2000). Os padrões estipulados pela resolução em questão para a *E. coli* se encontram na Tabela 2.

Tabela 2 - Enquadramento dos corpos hídricos usando a *E.coli* conforme Resolução CONAMA nº 274/2000.

Classes	Limite para <i>E.coli</i> (NMP/100mL)
1	≤ 200
2	≤ 1000
3	≤ 2500
4	>2500

Fonte: Adaptado de (Brasil, 2000).

Determinação da genotoxicidade

A avaliação da genotoxicidade por meio do bioensaio de aborto polínico em *Tradescantia pallida* var. *purpurea* foi usada neste trabalho pois permite detectar efeitos de agentes ambientais que causam danos ao material genético, quantificando respostas como a interrupção do desenvolvimento do grão de pólen quando exposto a substâncias genotóxicas na água (Nogueira *et al.*, 2024).

Foram utilizados 20 ramos de *Tradescantia pallida* var. *purpurea* (10 a 15 cm de comprimento) contendo botões florais em estágio anterior à antese, todos coletados no mesmo dia e horário, as plantas são provenientes de coleção mantida em canteiro próprio. Os ramos foram adaptados em água destilada por 24 horas, posteriormente foi realizada a exposição à água do Arroio Duro e ao controle negativo (água destilada) por 8 horas e finalmente a recuperação por 28 horas em água destilada conforme metodologia descrita por Nogueira *et al.* (2024). Após o período de recuperação, os botões florais foram fixados em solução de etanol absoluto: ácido acético (3:1 v:v) por 24 h e, em seguida, armazenados em álcool etílico 70% sob refrigeração (4°C) até o momento da análise.

Para preparação das lâminas e análise dos grãos de pólen, os botões florais foram dissecados e as anteras maceradas e coradas com carmim acético 1%. Em cada lâmina, foram contados 300 grãos de pólen. Foram analisadas 10 lâminas para cada coleta e mais 10 para o controle negativo, totalizando 7.000 grãos de pólen em cada repetição. Os grãos de pólen foram analisados sob aumento de 400 vezes e as frequências de aborto polínico (AP) foram expressas em AP/100 (número de grãos de pólen abortivos em 100 células). As frequências de aborto polínico atenderam aos pressupostos de normalidade e foram submetidas ao teste t de Student para amostras independentes. Os testes foram realizados utilizando o Statistical Package for the Social Sciences (SPSS) versão 25 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA), com nível de significância fixado em 5%.

Análise das concentrações dos parâmetros

Após o tabelamento dos dados, desenvolveu-se em um primeiro momento uma estatística descritiva sobre os mesmos, como média, desvio padrão, máximo e mínimo, para cada um dos parâmetros aqui analisados neste estudo.

Posteriormente foi realizada a concentração média por ponto de cada um dos parâmetros de monitoramento. Para ter uma melhor visualização da variação da concentração de cada parâmetro entre os pontos, elaboraram-se mapas por meio de um software livre de código aberto conhecido como QGIS, versão 3.22.5, o qual permite a visualização, edição e análise de dados georreferenciados para a construção de mapas ilustrativos.

Uso e ocupação do solo

Para melhor compreender os resultados obtidos, elaborou-se um mapa de uso e ocupação do solo para a SBHAD a partir do banco de dados do MapBiomias (2023) por meio do QGIS. Tal mapa foi subdividido em nove classes de uso e ocupação, descritas na Tabela 3.

Tabela 3 - Descrição das classes de uso e ocupação do solo.

Classes	Descrição
Áreas não vegetadas	Áreas com cobertura vegetal menor que 5%. Classe mista incluindo praias e dunas, infraestrutura urbana e rural, áreas de mineração e afloramentos rochosos.
Silvicultura	Espécies arbóreas plantadas para fins comerciais (ex. pinus, eucalipto, araucária).
Formação florestal	Vegetação lenhosa com espécies arbóreas ou arbóreo-arbustivas, com predomínio de dossel contínuo. Inclui as tipologias florestais: ombrófila, estacional decidual e semidecidual e parte das formações pioneiras.
Formação campestre	Na maioria dos casos corresponde à vegetação nativa, mas podem estar presentes manchas de vegetação exótica invasora ou de uso forrageiro (pastagem plantada).
Arroz	Áreas cultivadas com cultura de arroz (sob sistema de irrigação).
Soja	Áreas cultivadas com a monocultura da soja.
Lavouras temporárias	Áreas ocupadas com cultivos agrícolas de curta ou média duração, geralmente com ciclo vegetativo inferior a um ano, que após a colheita necessitam de novo plantio para produzir.
Campos alagado e área pantanosa	Áreas pantanosas, denominadas regionalmente de banhados ou marismas (influência salina). Vegetação tipicamente higrófila, com plantas aquáticas emergentes, submersas ou flutuantes. Ocupam planícies e depressões do terreno com solo encharcado e também as margens rasas de lagoas ou reservatórios de água.

Fonte: Adaptado de MapBiomias (2023).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise descritivas dos parâmetros

As estatísticas descritivas permitem obter um panorama geral da qualidade das águas da SBHAD ao longo de todos os pontos de monitoramento. Nesse sentido, a Tabela 4 demonstra as médias, desvios padrão, máximos e mínimos de cada parâmetro de qualidade da água estudado.

Tabela 4 - Estatística descritiva dos dados.

	<i>E. coli</i> (NMP/100mL)		Genotoxicidade (Frequência média de aborto polínico)	
	P1	P2	P1	P2
Média	78,88	567,17	8,17	5,18
Desvio Padrão	101,64	575,06	0,58	0,42
Máximo	240	1600	22,83	16,40
Mínimo	2	23	2,47	3,00

Fonte: Autores.

Nos termos da resolução nº 274/2000 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), os valores médios para a concentração de *E. coli* encontrados ao longo da SBHAD, conforme Tabela 4, podem ser classificados como classe 1 para P1 e classe 2 para P2 (Brasil, 2000). Destaca-se ainda, conforme Tabela 4, que se encontrou como valores máximos para o P1 e P2, 240 e 1600 (NMP/100mL), respectivamente. Isso indica que, em determinadas coletas, os valores de *E. coli* para o P1 o classificou como classe 2 enquanto para o P2 como classe 3.

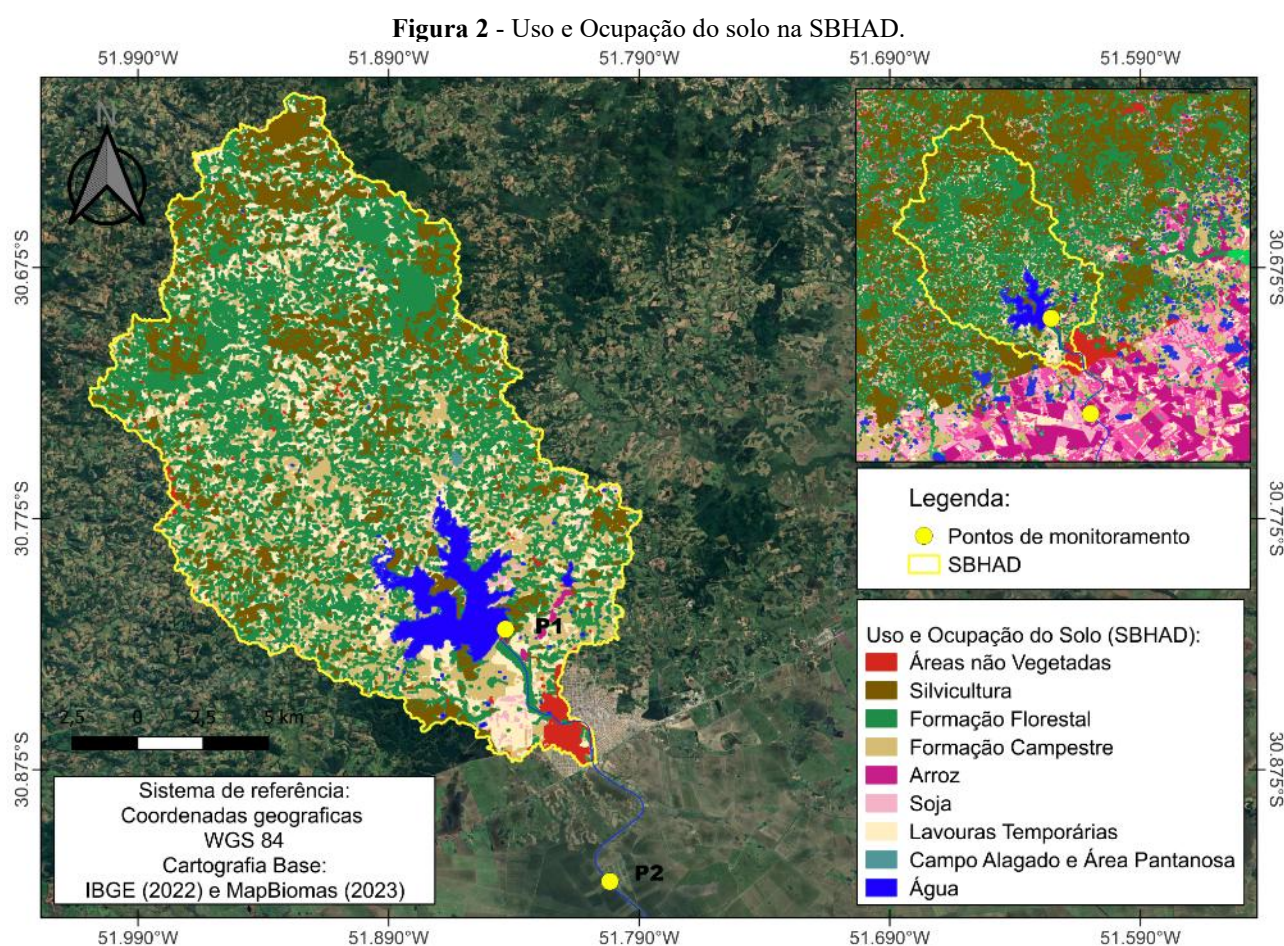
Já as frequências médias de aborto polínico para o Arroio Duro foram de 8,17 para P1 e 5,18 para P2 (Tabela 4). Em estudo semelhante a este, realizado no Arroio Luis Rau em Novo Hamburgo (RS), que apresenta características ambientais semelhantes ao Arroio Duro, como a passagem pela zona urbana e o recebimento de efluentes sem tratamento de fontes de origem difusa, Nogueira *et al.* (2024) encontraram frequência média de aborto polínico 5,07 para a água do arroio, 11,0 para o controle positivo (sulfato de cobre 5%) e 2,90 para o controle negativo (água destilada). Os resultados encontrados corroboram com o encontrado no estudo de Nogueira *et al.* (2024) e sinalizam para uma genotoxicidade elevada na água do Arroio Duro nos dois pontos amostrados.

Vale destacar que, no Brasil, o monitoramento da qualidade da água é realizado principalmente por análises físico-químicas e microbiológicas, que verificam o cumprimento dos limites legais estabelecidos (Brasil, 2005). No entanto, embora sejam precisas para identificar a concentração de poluentes, essas análises não revelam os impactos que esses compostos podem causar nos organismos, como alterações no DNA (Viscardi *et al.*, 2020; Mendes *et al.*, 2020).

Assim, é essencial incluir ferramentas biológicas no monitoramento para avaliar os efeitos dos poluentes nos organismos expostos, como a análise de genotoxicidade. Plantas do gênero *Tradescantia* são mundialmente reconhecidas como bioindicadoras, integrando diversos estudos que elucidaram os efeitos genotóxicos de ecossistemas aquáticos, como na avaliação do potencial mutagênico de rios urbanos no Brasil (Cassanego e Droste, 2017; Viscardi *et al.*, 2020; Nogueira, Cassanego e Droste, 2022).

Análise do uso e ocupação do solo da SBHAD

Nesse contexto, a Figura 2 demonstra o uso e a ocupação do solo na SBHAD com base no banco de dados do MapBiomas (2023). Já a Tabela 5 apresenta a área e a porcentagem de cada uso dentro da SBHAD.



Fonte: Autores.

Tabela 5 - Uso e ocupação do solo da SBHAD.

Classes	Área (km²)	Área (%)
Áreas não vegetada	4,30	1,28
Silvicultura	34,00	10,04
Formação florestal	118,35	34,94
Formação campestre	69,71	20,58
Arroz	0,61	0,18
Soja	6,30	1,86
Lavouras temporárias	89,36	26,38
Campos alagado e área pantanosa	1,28	0,38
Água	14,78	4,36
Total	338,69	100

Fonte: Adaptado do MapBiomias (2023).

Podemos observar na Tabela 5 que quatro usos do solo obtiveram resultados superiores a 10% de ocupação da área de estudo (SBHAD). São eles: formação florestal (34,94%), lavouras temporárias (26,38%), formação campestre (20,58%) e silvicultura (10,04%). A formação florestal e campestre corresponde, na maioria das vezes, à vegetação nativa presente no bioma Pampa, sendo caracterizada principalmente por campos naturais, com predominância de gramíneas e herbáceas, além de formações florestais associadas a matas ciliares e áreas com maior disponibilidade hídrica (MapBiomias, 2023).

A silvicultura está associada ao cultivo de espécies arbóreas plantadas para fins comerciais. Ressalta-se que, quando a silvicultura é implantada em determinada área, podem ocorrer problemas relacionados ao consumo excessivo de água e de nutrientes do solo. No entanto, a retirada dessas espécies arbóreas plantadas também pode acarretar danos ao ambiente, uma vez que os solos ficam desprotegidos e expostos, aumentando o impacto da água da chuva sobre a superfície. Esse processo favorece a ocorrência de erosão, comprometendo a qualidade dos corpos hídricos (Guerino *et al.*, 2022).

As lavouras temporárias, conforme Fróes e Karam (2007), estão localizadas em sua maior parte a montante da barragem da SBHAD. De acordo com tais autores, nas áreas a montante da barragem, predomina o sistema de produção típico da agricultura familiar com plantio voltado principalmente à policultura, com grande destaque a produção de tabaco como a principal fonte de renda monetária para a maioria dos produtores da região. No entanto, o uso de técnicas agrícolas inadequadas tem gerado significativos impactos ambientais, como erosão, assoreamento e poluição das águas por agrotóxicos (Fróes; Karam, 2007).

Entre os estados brasileiros, o Rio Grande do Sul é o maior produtor de tabaco (fumo em folha). De acordo com a Pesquisa Agrícola Municipal do IBGE, o estado registrou uma média de 309 mil toneladas/ano no triênio 2020-2022. Dados do Sinditabaco indicam que o município de Camaquã produziu cerca de 13,7 mil toneladas entre os anos de 2018/2019, distribuídos entre 2.508 produtores (SindiTabaco, 2019). O Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul contribuiu para tal constatação, destacando o município de Camaquã como um dos principais produtores de tabaco do Rio Grande do Sul, sendo classificado na maior escala, de 10 a 20,6 toneladas por ano de 2020 a 2022 (Atlas, 2022).

Análise da variação espacial das concentrações médias dos parâmetros por ponto

No intuito de compreender a extensão do efeito das divergências mencionadas sobre a qualidade da água da SBHAD, foram construídos mapas que ilustram a concentração média dos parâmetros avaliados para cada ponto de monitoramento. As Figuras 3 e 4 demonstram as concentrações médias de *E. Coli* (NMP/100mL) e a genotoxicidade determinada através do aborto polínico em *Tradescantia pallida* var. *purpurea*, respectivamente.

Figura 3 - Concentração do parâmetro *E. coli* nos anos estudados.

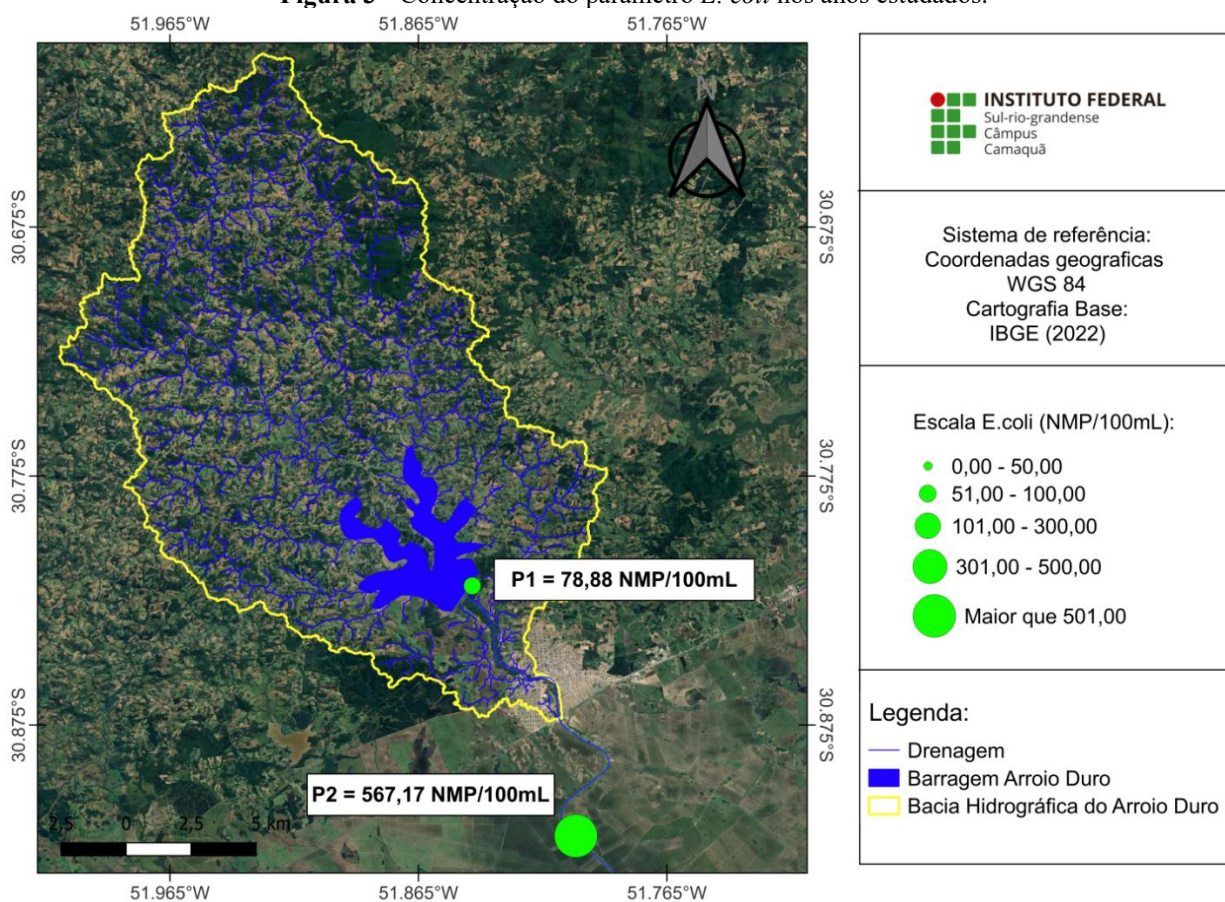
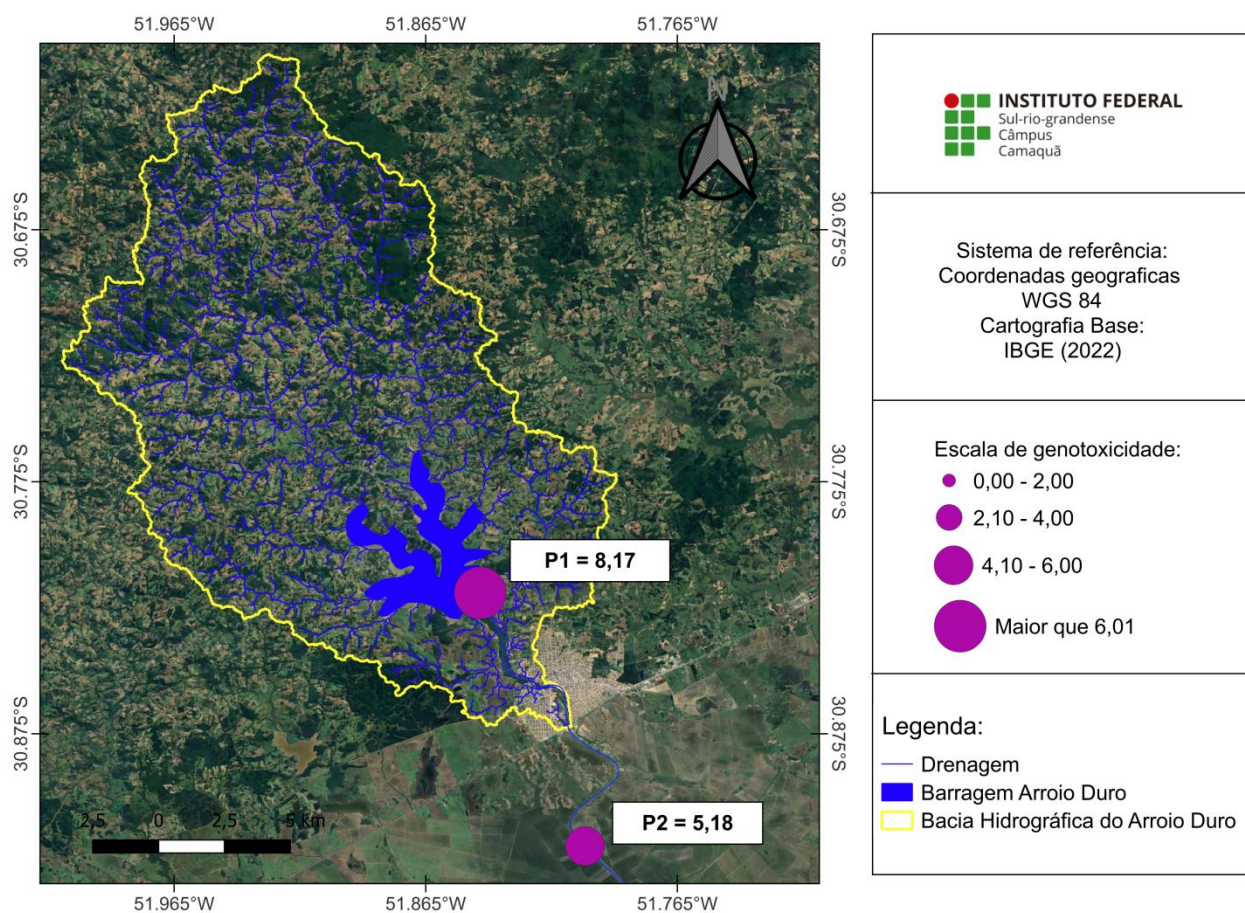


Figura 4 - Concentração da genotoxicidade nos pontos estudados.



Fonte: Autores.

A partir da análise da variação espacial dos parâmetros apresentados pelos dois bioindicadores, é possível afirmar que existe um gradiente crescente na concentração de *E. coli* em P1 em comparação a P2 (Figuras 3), já na escala de genotoxicidade ocorre o contrário, sendo possível observar que ocorre redução na frequência de aborto polínico quando comparados P1 e P2 (Figura 4). Embora essa redução ocorra, ambos valores encontrados remetem a genotoxicidade acima da frequência de aborto polínico considerada normal para a espécie, que é 2,90, encontrada no controle negativo (Nogueira *et al.*, 2024). A divergência observada pode ser justificada com base no uso e ocupação do solo da região estudada e nas alterações ambientais que cada parâmetro indica.

A bactéria *E. coli* presente no intestino humano indica com precisão a contaminação de origem fecal recente (Santos *et al.*, 2023). As menores concentrações observadas em P1 (Barragem do Arroio Duro) são encontradas a montante da passagem do Arroio Duro pela zona urbana, já P2 (Banhado do Colégio) está situado a jusante da zona urbana, após o corpo hídrico receber grande quantidade de esgoto sanitário sem nenhum tratamento (SNIS, 2019). Diversos estudos corroboram com os

resultados encontrados neste trabalho, onde a área urbana acabou influenciando negativamente na qualidade do corpo hídrico, constatado por meio da análise de *E.coli* (Santos *et al.*, 2020; Santos; Valentini; Vieira, 2021; Valentini *et al.*, 2021; Valentini; Santos; Vieira, 2021; Santos *et al.*, 2023).

Embora a classificação do CONAMA (Brasil, 2000) enquadre este corpo hídrico (utilizando o valor médio pontual da *E.coli*) como classe 2 no P1 e classe 3 no P2, esta se baseia somente na qualidade sanitária da água, enquanto que a genotoxicidade (Figura 4) pode indicar um nível elevado de contaminação proveniente de misturas complexas (Nogueira; Cassanego; Droste, 2022), que pode estar associado à lixiviação de áreas utilizadas para atividades agrícolas na região. De acordo com dados do Ministério da Saúde, em 2020 foram monitorados 27 tipos de agrotóxicos na água da cidade de Camaquã, destes 4 apresentaram resultado maior que o limite de detecção e a concentração encontrada foi maior que o limite de potabilidade europeu (0,1µg/L) e que o valor máximo permitido (VMP) pela Portaria de Consolidação nº 5/2017 (Brasil, 2020), Anexo XX, alterada pelas Portarias nº 888 e nº 2.472 de 2021 (Brasil, 2021a,b).

Ao associar os resultados da genotoxicidade (Figura 4) com o uso e ocupação (Figura 2) podemos observar que o ponto P1 (na barragem) sofre grande influência de lavouras temporárias a montante, e como foi discutido no tópico “Análise do uso e ocupação do solo da SBHAD”, é em sua maior parte plantações da cultura de tabaco que utilizam agrotóxicos ao longo do cultivo (Maia *et al.*, 2018). Estudos como o de Lucas *et al.* (2020), realizado na região central do estado do Rio Grande do Sul, demonstraram a detecção de múltiplos princípios ativos de pesticidas em amostras de água destinadas ao consumo humano, evidenciando a persistência dessas substâncias mesmo após o tratamento convencional da água e apontando potenciais impactos negativos à qualidade da água e à saúde pública.

Além disso, análises de risco, como a desenvolvida por Ziliotto *et al.* (2023), indicam que a diversidade e a concentração de agrotóxicos detectados em corpos d'água do Pampa Gaúcho representam uma ameaça significativa aos ecossistemas aquáticos e aos serviços ecossistêmicos associados, incluindo a manutenção da biodiversidade e a disponibilidade de recursos hídricos para abastecimento humano. A presença recorrente desses compostos em ambientes aquáticos evidencia a influência das práticas agrícolas intensivas sobre a degradação da qualidade da água no Rio Grande do Sul, especialmente em regiões com forte atividade fumageira e agrícola. Esses achados reforçam a necessidade de monitoramento ambiental contínuo e da implementação de políticas públicas e estratégias de manejo que visem reduzir o aporte de agrotóxicos nos recursos hídricos do estado.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os dados obtidos neste estudo indicam que a zona urbana e as áreas agrícolas, especialmente aquelas ocupadas com plantações de tabaco, influenciam a qualidade da água do Arroio Duro. Observa-se que a presença de *Escherichia coli* (*E. coli*) está associada à passagem pela zona urbana, possivelmente devido ao impacto da carência de saneamento urbano na região. Além disso, a exposição a agentes presentes em áreas de cultivo de tabaco contribui para elevar o potencial genotóxico da água deste manancial.

Diante dos achados, as investigações futuras deverão contemplar um maior número de coletas e a ampliação dos pontos de amostragem dentro da Sub-Bacia Hidrográfica do Arroio Duro (SBHAD), permitindo uma caracterização mais precisa deste ambiente. Além disso, a inclusão de novos parâmetros permitirá um diagnóstico mais abrangente da qualidade ambiental. Por fim, uma análise temporal desses dados poderá fornecer informações essenciais sobre a evolução da qualidade da água e dos impactos ao longo do tempo, contribuindo para estratégias de mitigação e gestão ambiental neste ecossistema.

REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 23rd ed. Washington, D.C.: APHA, 2017.

ATLAS. **Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul**. 2022. Disponível em: <https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/fumo>. Acesso em 06 dez. 2024.

AUD. **Associação dos Usuários dos Perímetro de Irrigação do Arroio Duro**. Disponível em: <https://www.audcamaqua.com.br>. Acesso em: 31 jan. 2025.

BEHMEL, S.; DAMOUR, M.; LUDWIG, R.; RODRIGUEZ, M. J. Water quality monitoring strategies - A review and future perspectives. **Science of the Total Environment**, v. 571, p. 1312-1329, 2016.

BILHAR, J. D.; KORMANN, T. C.; SILVA, R. F.; MIDUGNO, R. Identificação de Sítios da Geodiversidade na bacia hidrográfica do rio Camaquã: avaliação dos valores culturais, turísticos e riscos de degradação. **Revista Thema**, v. 22, n. 1, p. 190-209, 2022.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. **Resolução nº 274, de 29 de novembro de 2000**. Diário Oficial da União, Brasília, 2000.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005**. Diário Oficial da União, Brasília, 2005.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Revisão do Anexo XX da Portaria de Consolidação nº 5 de 28 de setembro de 2017 do Ministério da Saúde (antiga Portaria MS nº 2914/2011)**: padrão de potabilidade e planos de amostragem: substâncias químicas: agrotóxicos: subsídios para discussão e orientações para revisão: substâncias listadas na PRC nº 5/2017. Brasília, DF: MS, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/saude/pt-br/acesso-a-informacao/participacao-social/consultaspublicas/2020/arquivos/DOCSNTESEAGROTXICOS1METODOLOGIADESELEO.pdf>. Acesso em: 31 jan. 2025.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021**. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação nº 5/GM/MS, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília, DF: MS, 2021a. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888_07_05_2021.html. Acesso em: 31 jan. 2025.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria GM/MS nº 2.472, de 28 de setembro de 2021**. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação nº 5/GM/MS, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília, DF: MS, 2021b. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt2472_30_09_2021.html. Acesso em: 31 jan. 2025.

CASSANEGO, M. B. B.; DROSTE, A. Assessing the spatial pattern of a river water quality in southern Brazil by multivariate analysis of biological and chemical indicators. **Brazilian Journal of Biology**, v. 77, p. 118-126, 2017.

FRÓES, M. N.; KARAM, K. F. Possibilidades de Gestão de Recursos Hídricos: A Situação na Sub-Bacia do Arroio Duro - Camaquã/RS. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 2, n.1, p. 757-760, 2007.

GUEDES, H. A. S.; SILVA, D. D.; ELESBON, A. A. A.; RIBEIRO, C. B. M.; MATOS, A. T.; SOARES, J. H. P. Aplicação da análise estatística multivariada no estudo da qualidade da água do Rio Pomba, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 5, p.558-63, 2012.

GUERINO, R. M. G.; MORAIS, I. L.; SANTOS, A. B. S.; CAMPOS, R. M. Expansão e impactos socioambientais da cultura de *Eucalyptus* spp. (*Myrtaceae*) no Brasil: um panorama da literatura. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 3, p. 1-26, 2022.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades**. 2022. Disponível em: <http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?codmun=430510>. Acesso em: 31 jan. 2025.

JUNG, M. S.; SILVA, J. A. G.; FACHINETTO, J. M.; CARVALHO, I. R.; PETER, C. L.; GALVÃO, L. F.. Bioindicators for monitoring spring water quality. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.14, n.4, p.38-47, 2023.

MAIA, J. M. M.; LIMA, J. L.; ROCHA, T. J. M.; FONSECA, S. A.; MOUSINHO, K. C.; SANTOS, A. F. Perfil de intoxicação dos agricultores por agrotóxicos em Alagoas. **Diversitas Journal**, v. 3, n. 2, p. 486-504, 2018.

MAPBIOMAS. **Projeto MapBiomias Pampa Sudamericano**. Coleção 7.1 da Série Anual de Mapas de Uso e Cobertura da Terra do Brasil, 2023. Disponível em: <https://mapbiomas.org/download>. Acesso em: 13 nov 2024.

MENDES, S. A.; GONÇALVES, E. V.; FRÂNCICA, L. S.; CORREIA, L. B. C.; NICOLA, J. V. N.; PESTANA, A. N. Z.; MEDEIROS, F. V. S.; SOUZA, W. E.; INEU, R. P.; PERON, A. P. Quality of Natural Waters Surrounding Campo Mourão, State of Paraná, Southern Brazil: Water Resources Under the Influences from Urban and Agricultural Activities. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 231, p. 415-425, 2020.

NOGUEIRA, L. R.; CASSANEGO, M. B. B.; DROSTE, A. Temporal analysis of genotoxicity and environmental factors related to water quality of a watershed in South Brazil. **Ciência e Natura**, v. 44, p. 1-21, 2022.

NOGUEIRA, L. R.; STEIN, I. K.; DUARTE, J. H.; DROSTE, A. Aborto polínico em *Tradescantia pallida* var. *purpurea*: uma nova metodologia para biomonitoramento da água superficial. **Revista Thema**, v. 23, n.3, p. 803-813, 2024.

ONU. Organização das Nações Unidas. **Agenda 2030**: Objetivos do Desenvolvimento Sustentável, Objetivo nº 6. Disponível em: <https://www.agenda2030.com.br/ods/6/>. Acesso em: 10 dez. 2024.

PEQUENO, L. A. B.; CAROLINO, M. P.; CARVALHO, M. N.; EL-DEIR, S. G. O paradoxo da *Escherichia coli* como bioindicador. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 9, n.2, p. 114–121, 2024.

PINTO, C. C.; CALAZANS, G. M.; OLIVEIRA, S. C. Assessment of spatial variations in the surface water quality of the Velhas River Basin, Brazil, using multivariate statistical analysis and nonparametric statistics. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 191, p. 1-13, 2019.

SANTOS, G. B.; VALENTINI, M. H. K.; SILVA, L. A.; FRANZ, H. S.; CORRÊA, B. L.; VIANA, F. V.; CORRÊA, G. M.; VIEIRA, B. M.; NADALETI, W. C.; LEANDRO, D.; VIEIRA, B. M. Avaliação dos parâmetros e do índice de qualidade de água para o Arroio Moreira/Fragata, Pelotas/RS. **Revista Ibero-Americana De Ciências Ambientais**, v. 11, n. 4, p. 287–299, 2020.

SANTOS, G. B.; VALENTINI, M. H. K.; VIEIRA, B. M. Análise de regressão linear aplicada à modelagem de uma nova equação para o monitoramento de qualidade da água: estudo de caso do Arroio Moreira/Fragata. **Revista Ambientale**, v. 13, p. 13-27, 2021.

SANTOS, G. B.; GOMES, J. P.; VALENTINI, M. H. K.; FRANZ, H. S.; VIEIRA, B. M. Análise qualitativa das águas superficiais da bacia hidrográfica do Rio Piratini – RS. **Boletim Geográfico do Rio Grande do Sul**, n. 41, p. 9-33, 2023.

SILVA, D. C.; LAGUNA, G. S.; MACHADO, B. N. F.; GONÇALVES, M. E. F.; WOLOSKI, C. D.; WILLE, C. N.; NOGUEIRA, L. R. Biomonitoring the public supply reservoir in Camaquã RS using *Tradescantia pallida* var. *purpurea* and *Escherichia coli*. **Scientia cum Industria**, v. 14, n. 2, p. 1-5, 2025.

SINDITABACO. **Quem são os 30 municípios que mais produziram**. 2019. Disponível em: <https://www.sinditabaco.com.br/item/quem-sao-os-30-municipios-que-mais-produziram/>. Acesso em 06 dez. 2024.

SNIS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos**, nov. 2019. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/diagnostico-anual-agua-e-esgotos/diagnostico-dos-servicos-de-agua-e-esgotos-2019>. Acesso em: 31 jan. 2025.

STRECK, E. V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C.; GIASSON, E.; PINTO, L. F. S. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Emater/RS-Ascar, 3. Ed., 252p., 2018.

VALENTINI, M. H. K.; DOS SANTOS, G. B.; DE LIMA CORRÊA, B.; FRANZ, H. S.; DA SILVA, L. A.; LEANDRO, D. Analysis of the influence of natural factors on the bathing condition of beaches in the cities of Garopaba, Imbituba and Laguna, in the state of Santa Catarina—Brazil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 6, p. 3449-3460, 2021.

VALENTINI, M.; SANTOS, G. B.; VIEIRA, B. M. Multiple linear regression analysis (MLR) applied for modeling a new WQI equation for monitoring the water quality of Mirim Lagoon, in the state of Rio Grande do Sul—Brazil. **SN Applied Sciences**, v. 3, p. 1-11, 2021.

VAN VLIET, M. T.; JONES, E. R.; FLÖRKE, M.; FRANSSEN, W. H.; HANASAKI, N.; WADA, Y.; YEARSLEY, J. R. Global water scarcity including surface water quality and expansions of clean water technologies. **Environmental Research Letters**, v. 16, n. 2, p. 1-12, 2021.

VISCARDI, M. H.; SILVEIRA, L. F.; VARGAS, L. K.; SILVA, F. R.; BENEDUZI, A. Environmental quality and cytogenotoxic impact of the waters of a stream receiving effluents from tannery industry. **Water, Air and Soil Pollution**, v. 231, p. 318-331, 2020.

ZILIOOTTO, M.; KULMANN-LEAL, B.; ROITMAN, A.; BOGO CHIES, J. A.; ELLWANGER, J. H. Pesticide Pollution in the Brazilian Pampa: Detrimental Impacts on Ecosystems and Human Health in a Neglected Biome. **Pollutants**, v. 3, p. 280-292, 2023.