

UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL
CAMPUS ERECHIM
CURSO DE GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS - BACHARELADO

DAVÍ ROBERTO RIBEIRO

INFLUÊNCIA DE RODOVIAS NA QUALIDADE DA ÁGUA ADJACENTE:
UM ESTUDO DE CASO NO SUL DA MATA ATLÂNTICA

ERECHIM

2025

DAVÍ ROBERTO RIBEIRO

**INFLUÊNCIA DE RODOVIAS NA QUALIDADE DA ÁGUA ADJACENTE:
UM ESTUDO DE CASO NO SUL DA MATA ATLÂNTICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Ciências Biológicas - Bacharelado da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), como requisito para obtenção do título de bacharel em Ciências Biológicas.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Afonso Hartmann

ERECHIM

2025

Bibliotecas da Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS

Ribeiro, Davi Roberto

Influência de Rodovias na Qualidade da Água
Adjacente: Um Estudo de Caso no Sul da Mata Atlântica /
Davi Roberto Ribeiro. -- 2025.
31 f.:il.

Orientador: Dr. Paulo Afonso Hartmann

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -
Universidade Federal da Fronteira Sul, Curso de
Bacharelado em Ciências Biológicas, Erechim, RS, 2025.

1. Ecologia de Estradas. 2. Elementos metálicos. 3.
Poluição hídrica. 4. Volume de tráfego. I. Hartmann,
Paulo Afonso, orient. II. Universidade Federal da
Fronteira Sul. III. Título.

DAVÍ ROBERTO RIBEIRO

**INFLUÊNCIA DE RODOVIAS NA QUALIDADE DA ÁGUA ADJACENTE:
UM ESTUDO DE CASO NO SUL DA MATA ATLÂNTICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Ciências Biológicas – Bacharelado da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), como requisito para obtenção do título de bacharel em Ciências Biológicas.

Este trabalho foi defendido e aprovado pela banca em 01/12/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Paulo Afonso Hartmann – UFFS
Orientador

Prof. Dr. Rafael Cardoso – UFFS
Avaliador

Ms. Vagner José de Albuquerque – HC
Avaliador

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, que me deram todo o suporte necessário (e ainda mais) para a conclusão dessa etapa da minha vida. Sem eles, nada disso seria possível. Agradeço também ao meu orientador, o professor Paulo Hartmann, que esteve integralmente presente em todos os momentos da realização desse TCC e me fez sentir seguro e confiante durante todo o processo. Agradeço ao Caio Bagnolo pelo excelente trabalho com o mapa da minha área de estudo e à Arielle Fornari pelo cuidado no processamento das minhas amostras na Central Analítica. Finalmente, agradeço às minhas colegas e amigas Júlia, Laísa e Jéssica. Acho que não teria chegado até o final sem elas.

RESUMO

As rodovias promovem perturbações nos ecossistemas, incluindo a poluição de mananciais hídricos por elementos metálicos oriundos do tráfego. O presente estudo teve como objetivo avaliar a presença e concentração de elementos metálicos em mananciais hídricos com (CI) e sem (SI) influência de rodovias com diferentes volumes de tráfego. O estudo foi conduzido no entorno das rodovias RS-135 (alto tráfego) e RS-331 (baixo tráfego), em uma região de Mata Atlântica no sul do Brasil. Amostras de água foram coletadas em agosto e setembro de 2025 e analisadas para 24 elementos metálicos. Dos 14 elementos que apresentaram valores acima do limite de detecção, todos tiveram concentrações médias mais elevadas nas áreas com influência da rodovia (CI) quando comparadas às áreas sem influência (SI). O V apresentou concentração significativamente maior nas áreas CI. A rodovia de baixo volume de tráfego (RS-331) apresentou concentrações significativamente maiores de Sr, Na, K, Ca e Mg em suas áreas com influência quando comparada à RS-135 (alto tráfego). As concentrações de Al, Fe e Mn excederam os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA n. 357/2005, principalmente nos pontos com influência da rodovia. Este estudo mostra que a operação de rodovias pode promover o aumento na concentração de elementos metálicos nas águas superficiais, e que o volume de tráfego não é o único fator determinante, sendo a contaminação influenciada também por fatores ambientais locais.

Palavras-chave: Ecologia de estradas; elementos metálicos; poluição hídrica, volume de tráfego.

ABSTRACT

Highways cause disturbances in ecosystems, including the pollution of water bodies by metallic elements derived from traffic. This study aimed to assess the presence and concentration of metallic elements in water bodies with (CI) and without (SI) the influence of highways with different traffic volumes. The study was conducted in the vicinity of the RS-135 (high traffic) and RS-331 (low traffic) highways, in an Atlantic Forest region in southern Brazil. Water samples were collected in August and September 2025 and analyzed for 24 metallic elements. Of the 14 elements that presented values above the detection limit, all had higher mean concentrations in the areas with highway influence (CI) compared to the areas without influence (SI). V presented a significantly higher concentration in the CI areas. A counterintuitive finding was that the low-traffic highway (RS-331) presented significantly higher concentrations of Sr, Na, K, Ca, and Mg in its CI areas compared to the high-traffic highway (RS-135). Concentrations of Al, Fe, and Mn exceeded the limits established by CONAMA Resolution n. 357/2005, predominantly at the CI sites. It was concluded that highway operation promotes an increase in the concentration of metallic elements in surface waters, and that traffic volume is not the sole determining factor, as contamination is also influenced by local environmental factors.

Keywords: Road ecology; metallic elements; water pollution; traffic volume.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Mapa da área de estudo com destaque para as duas rodovias e os pontos de amostragem na Mata Atlântica no sul do Brasil.....	8
--	---

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Concentrações dos elementos metálicos por ponto e período amostral em áreas com (CI) e sem (SI) influência nas rodovias RS135 e RS331, na Mata Atlântica sul no Brasil.11

Tabela 2: Resultados das comparações entre as concentrações registradas nos pontos com (CI) e sem influência (SI) da rodovia, geral (CI x SI) e por rodovia (CI x SI; RS135 e RS331); entre os pontos com influência nas duas rodovias rodovia (CIRS135 x CIRS331); e entre os pontos sem influência da rodovia nas duas rodovias (SIRS135 x SIRS331), na Mata Atlântica no sul do Brasil..... 13

APRESENTAÇÃO

O presente estudo intitulado “INFLUÊNCIA DE RODOVIAS NA QUALIDADE DA ÁGUA ADJACENTE: UM ESTUDO DE CASO NO SUL DA MATA ATLÂNTICA” foi desenvolvido no âmbito do curso de Ciências Biológicas - Bacharelado, da Universidade Federal da Fronteira Sul, Campus Erechim. Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) está vinculado ao Laboratório de Ecologia e Conservação e ao Grupo de Pesquisa Biodiversidade e Conservação da Fauna – GPCON. Os projetos desenvolvidos no grupo de pesquisa devem proporcionar o acúmulo de dados para avaliação e análise das relações resultantes da interface entre ambiente e desenvolvimento. Os estudos englobam teses, dissertações, trabalhos de conclusão de curso e de iniciação científica.

Este TCC teve por objetivo avaliar a presença e concentração de elementos metálicos em mananciais hídricos com e sem influência de rodovias. Para tal foram coletadas amostras de água no entorno das duas rodovias com diferentes volumes de tráfegos em região da Mata Atlântica no sul do Brasil. A coleta ocorreu nos meses de agosto e setembro de 2025. Amostras de água foram coletadas em ambientes no entorno das rodovias com (CI) e sem influência (SI) do escoamento de águas superficiais das rodovias. Foram analisadas as concentrações de 24 elementos metálicos, sendo que 14 apresentaram valores acima do limite de detecção (>LD). Os resultados obtidos revelaram que, de maneira geral, as concentrações dos elementos analisados foram mais elevadas nas áreas sob influência do escoamento superficial das rodovias. Todos os 14 elementos analisados apresentaram média de concentração mais elevada nas áreas com influência rodoviária quando consideradas as duas vias conjuntamente. Os resultados mostram que rodovias podem promover o aumento na concentração de elementos metálicos nas águas superficiais, inclusive acima do legalmente permitido.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	3
2 OBJETIVOS	6
2.1 OBJETIVO GERAL	6
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
3 MÉTODOS.....	7
3.1 ÁREA DE ESTUDO	7
3.2 COLETA E ANÁLISE DAS AMOSTRAS DE ÁGUA.....	7
3.3 TRATAMENTO DOS DADOS	9
4 RESULTADOS	11
5 DISCUSSÃO	15
6 CONCLUSÃO.....	18
7 REFERÊNCIAS	19

1 INTRODUÇÃO

A implementação de uma rodovia tem como principal objetivo proporcionar meios de ligação e interligação entre comunidades humanas (Dias *et al.*, 2008). Ao construir-se uma rodovia, abre-se um leque de possibilidades no setor de comunicação e transporte (Dias *et al.*, 2008), redução nos custos de transporte, acesso a serviços sociais, de saúde e novos centros de empregos, gerando um fortalecimento das economias locais e regionais (Environmental Assessment Sourcebook, 1991), além de ampliar os limites das interações sociais (Forman *et al.*, 2003). No Brasil, a importância das rodovias é evidenciada a partir da segunda metade do século XX, pois criou conexões entre áreas centrais e as mais isoladas do país (Meira, 2021). Acompanhado do desenvolvimento e acesso a áreas remotas as rodovias promovem perturbações nas dinâmicas ecossistêmicas, como mudanças no uso e cobertura da terra para o estabelecimento de sistemas agrícolas e urbanos (Ree *et al.*, 2015).

Apesar dos benefícios trazidos pela ampliação da rede viária, os efeitos de uma rodovia nos sistemas naturais são complexos e insuficientemente considerados no planejamento rodoviário, sendo os Estudos de Impactos Ambientais (EIAs) geralmente pobres nesse aspecto (Ree *et al.*, 2015). Rodovias estão entre as atividades antrópicas com maior impacto de fragmentação da paisagem natural (Forman *et al.*, 2003; Karlson *et al.*, 2014). A percepção dos impactos das rodovias surge mais fortemente na década de 1980. O termo “ecologia de estradas”, cunhado pelo ecólogo alemão Heinz Ellenberg e seus colegas, define uma nova abordagem de estudos com foco nos impactos causados pelas rodovias na paisagem (Coffin *et al.*, 2021). Para Forman *et al.* (2003), a ecologia de estradas explora e aborda a relação entre o ambiente natural e o sistema viário. Após o final da década de 1990, a quantidade de estudos e publicações acerca do tema aumentou exponencialmente, com um aumento de 400% em 2020 (Coffin *et al.*, 2021).

Dentre os principais impactos negativos da implantação e operação de uma rodovia nos ecossistemas estão a perda de cobertura vegetal, alterações nos padrões de drenagem natural (Sánchez, 2013), fragmentação de habitats naturais (Forman *et al.*, 2003), alteração do microclima, erosão do solo, sedimentação de córregos e lagos, interferência na movimentação da vida selvagem, poluição luminosa, ferimentos ou mortes de animais por atropelamento, poluição do ar, ruído, acúmulo de lixo na beira da estrada e poluição do solo, da água e da vegetação adjacentes à rodovia (Ree *et al.*, 2015).

A poluição de mananciais hídricos por poluentes oriundos de rodovias se dá por resíduos do desgaste de peças automotivas, como freios e pneus, produtos de combustão expelidos por escapamentos, resíduos de fluídos automotivos e desgaste do próprio asfalto (Duarte, 2003; Aljazzar; Kocher, 2016). Quando ocorre precipitação, esses resíduos, que se encontram acumulados na pista, no solo e na vegetação adjacente são carregados até os ecossistemas aquáticos próximos, causando contaminação tanto de águas superficiais como subterrâneas (Duarte, 2003; Silva, 2014; Aljazzar; Kocher, 2016). Dentre uma ampla variedade, os elementos metálicos são alguns desses contaminantes (Belluta *et al.*, 2020).

Um número significativo de elementos químicos, especialmente metais, é fundamental em processos biológicos (Maret, 2016). Muitos deles atuam como cofatores em enzimas, sendo essenciais para a catálise de reações químicas nos organismos dos seres vivos. Entre os metais essenciais estão Sódio (Na), Potássio (K), Magnésio (Mg) Cálcio (Ca), Ferro (Fe) e Zinco (Zn). A depender da espécie do organismo, a importância dos metais pode variar e alguns, como Níquel (Ni) e Vanádio (V), são essenciais apenas para o metabolismo de organismos específicos. Além dos essenciais, muitos outros metais estão presentes nos organismos e podem apresentar função catalisadora, ser farmacologicamente ativos ou até mesmo tóxicos, a depender das características do organismo e do elemento.

O estudo de Albuquerque *et al.* (2024) revelou que a exposição crônica a metais afeta negativamente o desenvolvimento e a fisiologia de girinos de *Physalaemus cuvieri*, induzindo diferenças de massa, comprimento e causando malformações. Cadmus *et al.* (2023), em seu teste de bioacumulação de Zn por algas perifíticas, revelaram que, quando cronicamente expostas ao metal, essas algas apresentam grande potencial de bioacumulação de Zn, o que sugere um risco trófico de contaminação para os consumidores primários dessas algas. Benvindo-Souza *et al.* (2025) demonstraram que a exposição à poluição rodoviária induziu em rãs *Dendropsophus minutus*, coletadas na beira de uma rodovia no Cerrado brasileiro, danos genotóxicos e mutagênicos significativos, alterações no perfil leucocitário e comprometimentos histopatológicos no fígado e nas gônadas, refletindo o estresse ambiental decorrente do escoamento de contaminantes oriundos do tráfego.

Ainda que algumas espécies metálicas possam ser oriundas de fontes naturais, como o próprio solo, ou de outras fontes antropogênicas, como atividades industriais, muitas delas podem ser provenientes do tráfego rodoviário (Belluta *et al.*, 2018;

Albuquerque *et al.*, 2024). Esses contaminantes são produtos da combustão de combustíveis fósseis e desgaste de componentes veiculares (freios, pneus, partes metálicas). Elementos como Cádmio (Cd), Chumbo (Pb), Cobre (Cu), Cobalto (Co), Cromo (Cr), Ni e Zn são os principais contaminantes metálicos oriundos dessa fonte. Os metais Al, Cu, Mn, Ni e Zn foram encontrados com valores acima dos máximos permitidos pelo Ministério da Saúde em infusões de macela (*Achyrocline satureioides*) coletada próximo a rodovias em Santa Catarina, Brasil (Galvan *et al.*, 2019). Ahmed *et al.* (2017) encontraram Pb em amostras de água coletadas em Bangladesh e atribuíram sua presença à influência das rodovias próximas na contaminação desses ambientes aquáticos. Benvindo-Souza *et al.* (2025) demonstraram contaminação superficial da água em áreas adjacentes à rodovia BR-060, no sudoeste do Brasil. Foram encontrados Al, Fe e Mn em níveis que excedem os limites regulatórios, além de concentrações elevadas de Mg, Silício (Si) e Dióxido de Silício (SiO₂), indicando uma significativa poluição inorgânica proveniente do escoamento rodoviário, com o desgaste de pneus como uma possível fonte de SiO₂.

A contaminação por sistemas agrícolas está relacionada ao uso de fertilizantes e irrigação, fonte de contaminantes como Ca, Mg, e K. Albuquerque *et al.* (2025) analisaram a concentração de metais em sistemas aquáticos no sul do Brasil associados à proximidade com rodovias e sistemas agrícolas, encontrando as concentrações de Al, Fe e Mn, com valores acima dos limites regulatórios, além da presença de outros metais em concentrações ambientalmente elevadas, possivelmente devido à proximidade com os sistemas agrícolas e a rodovia estudada.

Dessa forma, o presente estudo teve como objetivo avaliar a presença e concentração de elementos metálicos em mananciais hídricos com e sem influência de rodovias. Buscamos avaliar possíveis correlações entre as concentrações desses elementos e os diferentes volumes de tráfego, buscando uma maior compreensão da influência antrópica nos ecossistemas aquáticos através da operação das rodovias. Os resultados poderão servir para o planejamento de medidas mitigadoras do impacto causado pela implementação viária.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

- Avaliar a presença e concentração de elementos metálicos em mananciais hídricos com e sem influência de rodovias.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estimar o potencial de contaminação de mananciais hídricos por metais oriundos de rodovias;
- Avaliar o potencial de contaminação de mananciais hídricos entorno de rodovias com diferentes volumes de tráfego;
- Comparar as concentrações com limites estabelecidos pela legislação.

3 MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado na região norte do Estado do Rio Grande do Sul, no sul do Brasil. A região está inserida na parte sul do bioma Mata Atlântica, que, atualmente, apresenta alto grau de fragmentação, com remanescentes florestais característicos de Floresta Ombrófila Mista. A região do estudo caracteriza-se pelo clima subtropical úmido, com suaves variações orológicas que oscilam entre 687 e 783 m sob o nível do mar. A amplitude térmica encontra-se na faixa de variação de temperatura média entre 13,2°C (mínimas) e 22°C (máximas) durante o ano. As chuvas são bem distribuídas, com média de 1.787,8 mm por ano. A umidade relativa do ar média é de 72% (Alvares *et al.*, 2013). A região possui ainda formação edáfica e geológica basáltica, com predominância de Latossolos Vermelhos Aluminoférricos típicos (Streck *et al.*, 2018).

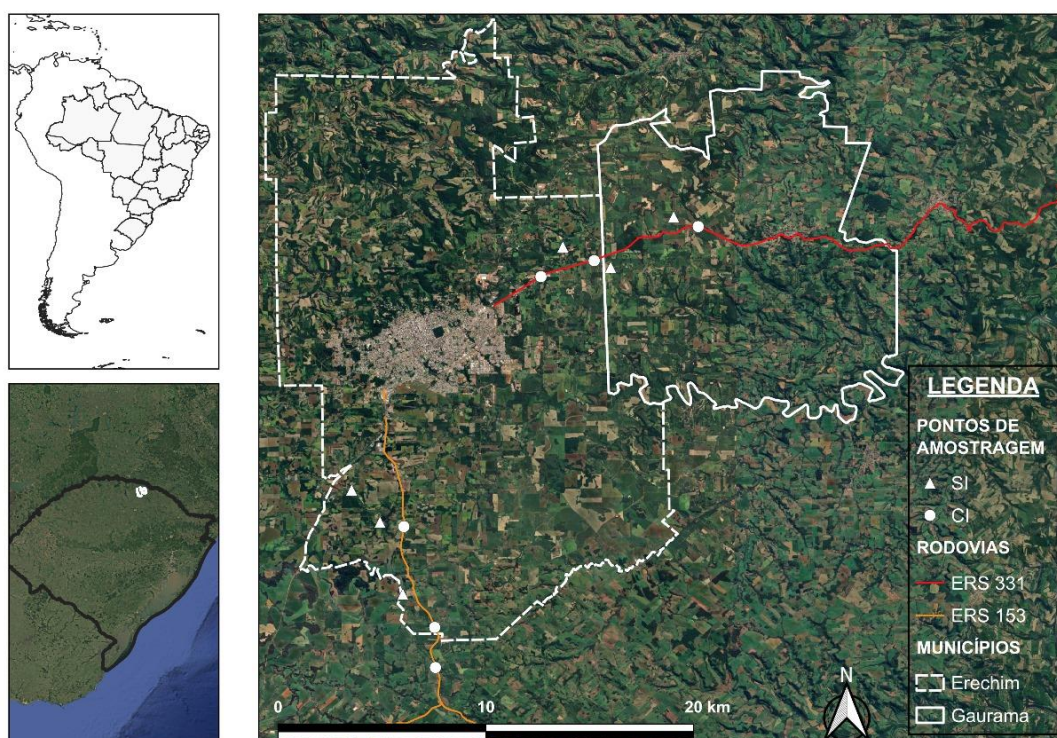
Foram coletadas amostras de água no entorno das rodovias RS135 e RS331. As duas rodovias possuem estrutura de pistas simples e pavimentadas, com acostamentos de cerca de dois metros (RS135) e de 80 centímetros (RS331) (Deffaci *et al.*, 2016; Albuquerque *et al.*, 2025). A RS135 localiza-se no trecho entre os municípios de Erechim (27°38'30"S 52°16'07"W) e Sertão (27°59'12"S 52°15'25"W). Essa rodovia possui volume de tráfego considerado alto (aproximadamente 4.853 veículos por dia), limite de velocidade que varia entre 80 e 100km/h e a paisagem do entorno é composta por pequenos remanescentes florestais localizados em matriz agropecuária (Albuquerque *et al.*, 2025). A RS331 liga os municípios de Erechim e Gaurama (27°35'19"S 52°05'42"W). A rodovia possui volume de tráfego considerado baixo (menos de mil veículos por dia), limite de velocidade de 80km/h e a paisagem do entorno apresenta pequenos fragmentos florestais e predomínio de matriz agrícola (Deffaci *et al.*, 2016). A seleção dessas rodovias justifica-se pela semelhança que elas apresentam em relação à composição da paisagem do entorno, características climáticas e geológicas e pelas diferenças entre os volumes de tráfego.

3.2 COLETA E ANÁLISE DAS AMOSTRAS DE ÁGUA

Amostras de água foram coletadas em ambientes no entorno das rodovias com (CI) e sem influência (SI) do escoamento de águas superficiais das rodovias. Nos corpos hídricos com influência foram selecionados três pontos amostrais, localizados entre 5 e 15 metros da rodovia, caracterizados como corpos hídricos lânticos com recebimento de

água via escoamento superficial proveniente da rodovia e dos sistemas agrícolas no entorno. Nos corpos hídricos sem influência do escoamento de águas superficiais das rodovias, mas que podem receber influência dos sistemas agrícolas próximos, foram selecionados três pontos amostrais, distantes entre 500 e 1500 metros da rodovia (Figura 1).

Figura 1: Mapa da área de estudo com destaque para as duas rodovias e os pontos de amostragem na Mata Atlântica no sul do Brasil. Pontos “SI” referem-se às áreas sem influência da rodovia; pontos “CI” referem-se às áreas com influência da rodovia.



Fonte: Bagnolo, 2025.

Foram realizadas duas repetições (agosto e setembro de 2025) com 12 amostras coletadas em cada repetição (6 em cada rodovia), totalizando 24 amostras. As amostras foram acondicionadas em tubos de falcon de 50 ml e encaminhadas à central analítica da Universidade Federal da Fronteira Sul, Campus Erechim. Foram analisadas as concentrações de 24 elementos metálicos: Prata (Ag), Alumínio (Al), Arsênio (As), Bário (Ba), Berílio (Be), Cádmio (Cd), Cobalto (Co), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Gálio (Ga), Mercúrio (Hg), Lítio (Li), Manganês (Mn), Molibdênio (Mo), Níquel (Ni), Chumbo (Pb), Estrôncio (Sr), Vanádio (V), Zinco (Zn), Sódio (Na), Potássio (K), Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg).

A quantificação dos metais (Ag, Al, As, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Ga, Hg, Li, Mn, Mo, Ni, Pb, Sr, V e Zn) foi realizada em um Espectrofotômetro de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES, modelo ICPE 9820, Shimadzu), utilizando argônio (Air Liquide, pureza > 99,999%) como gás de arraste e de geração do plasma. As amostras foram previamente filtradas em filtros de seringa de Nylon (Chromastore, 0,45 μm x 25 mm). O equipamento foi calibrado utilizando soluções com concentrações variando de 10 a 200 $\mu\text{g/L}$, preparadas a partir da solução padrão multielementar (Specsol, $10,00 \pm 0,05 \text{ mg/L}$). O limite de detecção (LD) foi calculado de acordo com as recomendações da IUPAC e do MAPA (2011) ($\text{LD} = 3 \cdot \sigma$), sendo σ o desvio padrão entre 7 medidas do padrão mínimo (10 $\mu\text{g/L}$).

Os teores de sódio e potássio foram determinados simultaneamente em um fotômetro de chama (Digimed, DM-64-4E), utilizando uma chama de ar/GLP. O equipamento foi calibrado utilizando soluções com concentrações variando de 1 a 10 mg/L , preparadas a partir das soluções padrão monoelementares (Na 1000 mg/L TraceCERT@ Supelco e K 1000 mg/L TraceCERT@ Supelco). Devido à alta concentração, os teores de cálcio e magnésio das amostras foram determinados em um Espectrofotômetro de Absorção Atômica (GBC Scientific Equipment, SavantAA), com lâmpadas de cátodo oco de cálcio (Atomax) e de magnésio (Atomax) operando nos comprimentos de onda de 422,7 nm e 285,2 nm, respectivamente. Ambas as análises foram realizadas em uma chama de ar/acetileno (Acetileno, Air Liquide, 99,8%). O equipamento foi calibrado utilizando soluções com concentrações variando de 1 a 10 mg/L (para o cálcio) e de 0,1 a 0,5 mg/L (para o magnésio), preparadas a partir das soluções padrão monoelementares (Ca 1000 mg/L TraceCERT@ Supelco e Mg 1000 mg/L TraceCERT@ Supelco, respectivamente). Para eliminar interferências, adicionou-se SrCl_2 em solução ácida nos padrões e nas amostras para uma concentração final de 0,05% de Sr e 0,1 M HCl.

3.3 TRATAMENTO DOS DADOS

Foram submetidos às análises estatísticas os elementos que apresentaram concentrações acima do limite de detecção (>LDO). Foi realizada a comparação entre as concentrações registradas nos pontos com e sem influência da rodovia, geral e por rodovia (RS135 e RS331); entre os pontos com influência da rodovia nas duas rodovias; e entre os pontos sem influência da rodovia nas duas rodovias.

A normalidade dos dados foi avaliada por meio do teste Shapiro-Wilk e a homogeneidade das variâncias pelo teste de Levene. As comparações foram feitas por meio de análise de variâncias (One-way ANOVA). Quando o valor foi menor que limite de detecção foi atribuído valor “0” para a concentração dos elementos. As análises foram rodadas no programa PAST 5 - Paleontological Statistics (Hammer *et al.*, 2001). As concentrações registradas foram comparadas com limites determinados pela legislação vigente como ambientalmente seguro para águas lênticas do tipo II (BRASIL, 2005).

4 RESULTADOS

As análises das amostras de água coletadas nos dois períodos amostrais (agosto e setembro de 2025) ao longo das rodovias RS135 e RS331 permitiram uma avaliação comparativa entre as áreas com e sem influência das rodovias. Dos 24 elementos analisados, 14 elementos apresentaram resultados cujos valores se encontraram acima do limite de detecção (>LD; Tabela 2). Quando consideradas as duas rodovias, todos os 14 elementos analisados apresentaram concentração média mais alta nas áreas sob influência direta do escoamento superficial proveniente das rodovias do que nas áreas sem influência da rodovia. Destaca-se ainda que 13 dos 14 elementos tiveram concentrações absolutas maiores em pontos com influência da rodovia (Tabela 1). Ainda, Alumínio (Al) e Ferro (Fe) mostraram concentrações médias com mais que o dobro na área com influência do que na área sem influência de rodovia.

Tabela 1: Concentrações dos elementos metálicos por ponto e período amostral em áreas com (CI) e sem (SI) influência nas rodovias RS135 e RS331, na Mata Atlântica sul no Brasil. A1 = Amostragem 1, agosto de 2025; A2 = amostragem 2, setembro de 2025. LAS = Limite Ambientalmente Seguro para águas lânticas do tipo II (BRASIL, 2005). Em negrito estão as concentrações acima do limite.

Ponto	Al (µg/L)		Ba (µg/L)		Cu (µg/L)		Fe (µg/L)		Ga (µg/L)		Li (µg/L)		Mn (µg/L)	
CI	A1	A2	A1	A2	A1	A2	A1	A2	A1	A2	A1	A2	A1	A2
P1CI135	0	969	66	13	0	4,4	0	885	0	3	1,69	0,39	16,6	3,03
P2CI135	0	4,73	15,7	44	0	0	0	0,94	1,37	0	0,256	1,54	0,98	12,88
P3CI135	191	12,4	4,5	15	0	0	172	20,7	0	0	0,269	0,34	15	1,04
Média 135	196,19		26,37		0,73		179,77		0,73		0,75		8,26	
P1CI331	0	8,95	24,6	28	0	0,9	13	21,4	0	0	0,448	0,39	0,11	0,72
P2CI331	0	141	54,3	47	0	1,8	0	157	2,12	0	0,335	0,42	652,5	4,53
P3CI331	27,4	42,3	15,6	9,2	2,69	5,2	79,4	360	1,64	0	0	0	3,35	29,08
Média 331	36,61		29,78		1,77		105,13		0,63		0,27		115,05	
Média CI	116,35		27,99		1,25		142,41		0,68		0,51		61,65	
SI	A1	A2	A1	A2	A1	A2	A1	A2	A1	A2	A1	A2	A1	A2
P1SI135	0	2,55	14,6	38	0	0	118	0	1,6	0	0,66	0,8	0,18	311,6
P2SI135	1,35	396	12,7	14	0	1,5	0	217	0	0	0	0,26	0,52	13,88
P3SI135	0	21,5	9,9	16	0	0	0	53,4	0	0	0,392	0,43	2,88	1,25
Média 135	70,23		17,53		0,25		64,73		0,27		0,42		55,05	
P1SI331	0	107	13,3	22	0	1,4	3,47	125	0	0	0	0,23	92,1	1,51
P2SI331	0	3,77	51,5	26	0	0	0	9,23	0	0	0,439	0,48	296	1,87
P3SI331	5,98	16,7	18	9,4	0	2,4	2,35	34,4	1,32	0	0	0,5	0	10,43
Média 331	22,24		23,37		0,63		29,08		0,22		0,27		66,99	
Média SI	46,24		20,49		0,44		46,86		0,24		0,35		61,02	
LAS	100 µg/L		700 µg/L		9 µg/L		300 µg/L		-		2.500 µg/L		100 µg/L	

Tabela 1 continuação.

Ponto	Sr (µg/L)		V (µg/L)		Zn (µg/L)		Na (mg/L)		K (mg/L)		Ca (mg/L)		Mg (mg/L)	
CI	A1	A2	A1	A2	A1	A2	A1	A2	A1	A2	A1	A2	A1	A2
P1CI135	27,1	19	0	3,4	6,88	0	1,92	1,57	0,78	1,98	2,62	4,83	1,64	2,6
P2CI135	23,5	20	0	0	0	1,5	1,52	1,74	0,30	0,44	5,41	1,69	2,69	1,52
P3CI135	5,6	23	0,84	0	0	0	1,76	1,45	0,18	0,22	2,28	4,73	0,72	2,69
Média 135	19,70		0,71		1,40		1,66		0,65		3,60		1,98	
P1CI331	32,5	31	0,35	0	0	3,9	1,92	1,78	1,72	1,17	5,09	4,51	2,52	2,33
P2CI331	66,1	54	0,41	0	0	0	2,83	2,71	2,49	3,07	9,45	7,51	4,76	4,04
P3CI331	60	48	3,17	1	0	0	3,15	2,58	1,59	1,01	10,6	7,19	4,38	3,63
Média 331	48,60		0,82		0,65		2,50		1,85		7,39		3,61	
Média CI	34,01		0,77		1,03		2,08		1,25		5,49		2,79	
SI	A1	A2	A1	A2	A1	A2	A1	A2	A1	A2	A1	A2	A1	A2
P1SI135	17,6	38	0,36	0	0	0	2,35	2,19	0,78	0,98	3,10	5,29	1,36	2,93
P2SI135	13,6	14	0	0	0	0	0,73	0,81	0,99	0,92	1,28	1,78	0,72	0,97
P3SI135	19,6	17	0,44	0	0	0,6	1,96	1,27	1,17	0,83	4,10	2,54	2,08	1,74
Média 135	19,97		0,13		0,10		1,55		0,95		3,02		1,63	
P1SI331	28,8	24	0	0	0	0	2,17	2	0,65	1,66	6,01	4,62	2,71	2,52
P2SI331	58,8	59	0	0	0	0	3,15	2,41	1,50	2,33	6,05	5,7	3,01	3,11
P3SI331	27,2	17	0	0	0	0	1,10	1,16	1,02	0,7	3,30	1,99	1,44	1,11
Média 331	35,80		0,00		0,00		2,00		1,31		4,61		2,32	
Média SI	27,92		0,07		0,05		1,78		1,13		3,81		1,98	
LAS	-		100 µg/L		180 µg/L		-		-		-		-	

Fonte: Ribeiro, 2025.

A análise por rodovia manteve o mesmo padrão. Na rodovia RS135, 13 dos 14 elementos analisados exibiram concentrações médias mais elevadas nas áreas próximas à rodovia. A única exceção foi o Estrôncio (Sr), que apresentou concentração média ligeiramente superior nas áreas sem influência da rodovia. Na rodovia RS331 também foram observadas concentrações médias superiores em 13 dos 14 elementos nas proximidades da rodovia. Neste caso, o Lítio (Li) foi o único elemento com média mais elevada nas áreas sem influência rodoviária, também com valores muito próximos.

Houve diferença significativa na concentração de Vanádio (V) entre as áreas com e sem influência da rodovia, considerando as duas rodovias juntas, com maior concentração na área com influência da rodovia. Além disso, Ca e Mg apresentaram valores perto da significância, também com maior concentração na área com influência da rodovia (Tabela 2).

Tabela 2: Resultados das comparações por análise de variâncias (One-way ANOVA) entre as concentrações registradas nos pontos com (CI) e sem influência (SI) da rodovia, geral (CI x SI) e por rodovia (CI x SI; RS135 e RS331); entre os pontos com influência nas duas rodovias rodovia (CIRS135 x CIRS331); e entre os pontos sem influência da rodovia nas duas rodovias (SIRS135 x SIRS331), na Mata Atlântica no sul do Brasil. Em negrito estão as análises com diferenças significativas.

Elemento	CI x SI	CI x SI RS135	CI x SI RS331	CIRS135 x CIRS331	SIRS135 x SIRS331
Al (µg/L)	$F_{1,22}=0,60$ $P=0,42$	$F_{1,10}=0,57$ $P=0,47$	$F_{1,10}=0,26$ $P=0,61$	$F_{1,10}=1,01$ $P=0,33$	$F_{1,10}=0,50$ $P=0,49$
Ba (µg/L)	$F_{1,22}=1,21$ $P=0,28$	$F_{1,10}=0,66$ $P=0,42$	$F_{1,10}=0,44$ $P=0,52$	$F_{1,10}=0,08$ $P=0,78$	$F_{1,10}=0,63$ $P=0,44$
Cu (µg/L)	$F_{1,22}=1,87$ $P=0,18$	$F_{1,10}=0,39$ $P=0,54$	$F_{1,10}=1,56$ $P=0,24$	$F_{1,10}=0,91$ $P=0,36$	$F_{1,10}=0,64$ $P=0,44$
Fe (µg/L)	$F_{1,22}=1,52$ $P=0,22$	$F_{1,10}=0,60$ $P=0,45$	$F_{1,10}=1,62$ $P=0,23$	$F_{1,10}=0,23$ $P=0,63$	$F_{1,10}=0,75$ $P=0,40$
Ga (µg/L)	$F_{1,22}=1,54$ $P=0,22$	$F_{1,10}=0,65$ $P=0,43$	$F_{1,10}=0,74$ $P=0,39$	$F_{1,10}=0,02$ $P=0,82$	$F_{1,10}=0,01$ $P=0,89$
Li (µg/L)	$F_{1,22}=0,82$ $P=0,37$	$F_{1,10}=1,17$ $P=0,30$	$F_{1,10}=0,01$ $P=0,96$	$F_{1,10}=2,79$ $P=0,12$	$F_{1,10}=0,98$ $P=0,34$
Mn (µg/L)	$F_{1,22}=0,98$ $P=0,99$	$F_{1,10}=0,82$ $P=0,38$	$F_{1,10}=0,16$ $P=0,69$	$F_{1,10}=0,90$ $P=0,34$	$F_{1,10}=0,02$ $P=0,86$
Sr (µg/L)	$F_{1,22}=0,70$ $P=0,40$	$F_{1,10}=0,06$ $P=0,95$	$F_{1,10}=1,73$ $P=0,21$	$F_{1,10}=18,70$ $P<0,01$	$F_{1,10}=3,51$ $P=0,08$
V (µg/L)	$F_{1,22}=3,83$ $P=0,04$	-	-	$F_{1,10}=0,02$ $P=0,87$	-
Zn (µg/L)	$F_{1,22}=2,37$ $P=0,13$	$F_{1,10}=1,31$ $P=0,27$	-	$F_{1,10}=0,33$ $P=0,57$	-
Na (mg/L)	$F_{1,22}=1,21$ $P=0,27$	$F_{1,10}=0,12$ $P=0,72$	$F_{1,10}=1,64$ $P=0,22$	$F_{1,10}=13,04$ $P<0,01$	$F_{1,10}=1,08$ $P=0,32$
K (mg/L)	$F_{1,22}=0,15$ $P=0,70$	$F_{1,10}=1,07$ $P=0,32$	$F_{1,10}=1,62$ $P=0,23$	$F_{1,10}=7,74$ $P=0,01$	$F_{1,10}=1,80$ $P=0,20$
Ca (mg/L)	$F_{1,22}=3,20$ $P=0,08$	$F_{1,10}=0,42$ $P=0,52$	$F_{1,10}=5,52$ $P=0,04$	$F_{1,10}=10,65$ $P<0,01$	$F_{1,10}=3,06$ $P=0,11$
Mg (mg/L)	$F_{1,22}=3,62$ $P=0,06$	$F_{1,10}=0,54$ $P=0,47$	$F_{1,10}=5,93$ $P=0,03$	$F_{1,10}=9,75$ $P=0,01$	$F_{1,10}=2,08$ $P=0,17$

Fonte: Ribeiro, 2025.

Quando analisadas separadamente, a rodovia RS135 não apresentou diferenças significativas para nenhum dos elementos entre as áreas com e sem influência da rodovia. Na rodovia RS331 foram observadas diferenças significativas para os elementos Ca e Mg entre as áreas com e sem influência da rodovia, com concentrações mais elevadas nos pontos com influência da rodovia (Tabela 1).

A comparação entre as áreas com influência das duas rodovias revelou diferenças importantes. Cinco elementos (Sr, Na, K, Ca e Mg) apresentaram concentrações significativamente maiores nas proximidades da RS331 em relação à RS135. Já a comparação entre as áreas sem influência direta das duas rodovias não demonstrou diferenças significativas para nenhum dos elementos analisados (Tabela 2).

Três elementos tiveram concentrações maiores que o estabelecido como ambientalmente seguro pela resolução CONAMA n. 357 de 17/03/2005. O Alumínio (Al) teve concentração média em três pontos amostrais com influência da rodovia maior que o estabelecido. Além disso, também ocorreu concentração maior em dois pontos sem influência da rodovia. O Ferro (Fe) teve dois pontos amostrais com influência da rodovia com as concentrações que excederam o limite estabelecido. O Manganês (Mn) teve um ponto amostral com influência e outro sem influência com valores maiores que o estabelecido (Tabela 1).

5 DISCUSSÃO

Os resultados obtidos revelaram que, de maneira geral, as concentrações dos elementos analisados foram mais elevadas nas áreas sob influência do escoamento superficial das rodovias. Este padrão reforça o papel das rodovias como agente de aporte de contaminantes metálicos para os corpos hídricos adjacentes. Todos os 14 elementos analisados apresentaram média de concentração mais elevada nas áreas com influência rodoviária quando consideradas as duas vias conjuntamente. Destaca-se que a maioria dos pontos próximos às rodovias apresentou concentrações absolutas maiores do que nos pontos distantes.

A maior concentração de V nos pontos com influência da rodovia pode estar associada ao fato de ser um elemento derivado da combustão de combustíveis fósseis e utilizado como liga metálica em componentes automotivos (ATSDR, 2012; Beauchemin *et al.*, 2021). Esse elemento possui alto potencial de bioacumulação em tecidos (Beine; Dahms-Verster; Greenfield, 2022) podendo causar problemas metabólicos e de malformações em organismos aquáticos a ele expostos (Santos *et al.*, 2021).

Na rodovia RS331 foram observadas diferenças significativas para Ca e Mg, ambos com maiores concentrações nas áreas sob influência da rodovia. Este resultado é particularmente interessante, tendo em vista que a RS331 possui volume de tráfego considerado baixo, o que pode sugerir uma diferença nos tipos de veículos que transitam por cada rodovia. O Ca e o Mg são encontrados em pó de freio originado nas rodas dos veículos, resultado do desgaste dos discos e pastilhas de freio (Sommer *et al.*, 2018; Córdoba *et al.*, 2025), na composição de pneus (Christou *et al.*, 2025) e também são usados na fabricação do cimento (carbonato de cálcio (CaCO_3); dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)), utilizado no concreto que recobre as rodovias (Sommer *et al.*, 2018; Skorbiłowicz; Skorbiłowicz, 2019). Bărbulescu; Hosen, (2025) e Mount *et al.* (2016) demonstraram que os íons Ca^{2+} (mais especificamente Cloreto de Cálcio (CaCl_2)) e Mg^{2+} (sais de magnésio (MgCl_2 , MgSO_4 e MgCO_3)) foram agudamente tóxicos para *Ceriodaphnia dubia*, evidenciando os riscos relacionados ao desgaste da pavimentação rodoviária e dos componentes veiculares.

A comparação entre as áreas com influência das duas rodovias revelou um resultado contraintuitivo: cinco elementos (Sr, Na, K, Ca, Mg) apresentaram concentrações significativamente maiores nas proximidades da RS331, rodovia com

menor volume de tráfego. Este padrão sugere que fatores ambientais adicionais além do volume de tráfego, como diferenças no uso da terra no entorno, variações na dinâmica hidrológica local e uma heterogeneidade geológica e edáfica, exercem papel determinante e podem estar influenciando as concentrações desses elementos de forma mais pronunciada na RS331.

As concentrações de Al, Fe e Mn superiores aos limites estabelecidos pela resolução CONAMA n. 357 de 17/03/2005 para águas lênticas do tipo II nas áreas com influência rodoviária evidenciam a capacidade das rodovias de sobrecarregarem sistemas naturais com elementos metálicos. Os três elementos estão presentes naturalmente na composição edáfica da área de estudo (Streck *et al.*, 2018) e sua concentração é influenciada tanto por processos naturais, como o intemperismo de rochas, como por ação antrópica (Marx; Kamber, 2010). Mesmo ocorrendo de forma natural, esses elementos podem estar associados ao desgaste de discos e pastilhas de freio, podendo também ser oriundos do desgaste de alguns tipos de pneus (Grigoratos; Martini, 2015; Sommer *et al.*, 2018; Córdoba *et al.*, 2025). O rastreamento dessa variedade de fontes é importante, pois, com a crescente popularização dos veículos que utilizam motores elétricos, torna-se indispensável a identificação e reconhecimento de fontes de poluição rodoviária não relacionadas exclusivamente à emissão por escapamentos.

Benvindo-Souza *et al.* (2025) e Albuquerque *et al.* (2025) também encontraram em seus estudos os mesmos três elementos em concentrações acima dos limites regulatórios em amostras de água coletadas próximo a rodovias no Brasil, reforçando a influência que as mesmas exercem na contaminação de corpos d'água adjacentes por esses elementos. O estudo de Albuquerque *et al.* (2025) foi realizado na região sul do Brasil e o de Benvindo-Souza *et al.* (2025) na região sudeste, evidenciando ainda que essas concentrações elevadas não se limitam a apenas uma região, podendo ocorrer em mais porções do território nacional.

O Fe pode se originar no desgaste (principalmente abrasivo) de componentes do motor que são expelidos pelos escapamentos (Dziubak; Dziubak, 2022). O Fe ocorre tanto em forma metálica quanto como óxidos de ferro, com formação de fases secundárias como magnetita (Fe_3O_4) e hematita (Fe_2O_3) devido ao aumento de temperatura desses componentes durante eventos de frenagem, influenciando suas propriedades físico-químicas (Córdoba *et al.*, 2025). Mesmo sendo um metal essencial, o Fe é considerado

tóxico para a biota em concentrações elevadas (Benvindo-Souza *et al.*, 2025), sendo capaz de causar estresse oxidativo (Romano *et al.*, 2021). A intoxicação por Al já foi documentada como causadora de malformações intestinais, hemorragias e alterações no perfil leucocitário de girinos de *P. cuvieri* (Albuquerque *et al.*, 2024). A exposição a concentrações elevadas pode também causar danos genotóxicos e mutagênicos em organismos aquáticos (Benvindo-Souza *et al.*, 2025; Galindo *et al.*, 2010). Ambos os metais podem adquirir características extremamente tóxicas para a biota a depender do pH da água em que estão inseridos (menores valores de pH aumentam a toxicidade) e de sua concentração (Tembo, 2017).

Assim como o Fe, o Mn é um metal essencial, mas pode tornar-se tóxico em concentrações elevadas, causando comprometimento do sistema nervoso central, do sistema imunológico e do metabolismo de organismos aquáticos. Além disso, sua toxicidade, em peixes, foi documentada como sendo inversamente proporcional à salinidade da água, indicando uma maior fragilidade de ambientes de água doce a esse metal (Niemiec; Wiśniowska-Kielian, 2015). O monitoramento da concentração desses elementos em corpos d'água que estão sob influência de rodovias é importante para a manutenção das condições ambientais propícias à vida nos ecossistemas próximos a elas.

A presença de contaminantes metálicos em ambientes e águas próximas a rodovias na Mata Atlântica subtropical é particularmente preocupante. A região possui clima subtropical úmido com precipitações abundantes, facilitando o transporte de contaminantes via escoamento superficial e infiltração em aquíferos. A biodiversidade excepcionalmente elevada da Mata Atlântica, associada a seus ambientes aquáticos lênticos e lóticos, torna esses ecossistemas especialmente vulneráveis a perturbações causadas por metais dissolvidos e particulados derivados do tráfego rodoviário.

6 CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo avaliar a presença e concentração de elementos metálicos em mananciais hídricos com (CI) e sem (SI) influência de rodovias, analisando comparativamente as rodovias RS-135 (alto tráfego) e RS-331 (baixo tráfego) em uma região de Mata Atlântica no sul do Brasil. Os resultados mostram que as rodovias atuam como fontes de aporte de contaminantes.

Um resultado contraintuitivo surgiu na comparação entre as rodovias. A RS-331, de baixo tráfego, apresentou concentrações significativamente maiores de cinco elementos (Sr, Na, K, Ca e Mg) em suas áreas CI quando comparada às áreas CI da RS-135, de alto tráfego. Na RS-331, Ca e Mg também foram significativamente maiores nas áreas CI do que SI. Este padrão sugere que o volume de tráfego, isoladamente, não é o único fator que determina o nível de contaminação. Fatores ambientais locais, como o uso do solo no entorno, a geologia, a dinâmica hidrológica e o desgaste do pavimento exercem uma influência complexa.

Conclui-se que rodovias podem promover o aumento na concentração de elementos metálicos nas águas superficiais, inclusive acima do legalmente permitido. Isto é agravado se considerarmos que a vulnerabilidade dos ecossistemas aquáticos da Mata Atlântica a essa poluição é acentuada pelo clima chuvoso da região, que facilita o transporte desses contaminantes. Para futuros estudos sugere-se a amostragem e aferição conjuntamente da água e do solo dos pontos amostrais para um estabelecimento mais claro das relações entre a presença de elementos metálicos e suas fontes naturais e antropogênicas.

7 REFERÊNCIAS

- AHMED, F.; FAKHRUDDIN, A. N. M.; IMAM, M. T.; KHAN, N.; ABDULLAH, A. T. M.; KHAN, T. A.; RAHMAN, M. M.; UDDIN, M. N. Assessment of roadside surface water quality of Savar, Dhaka, Bangladesh using GIS and multivariate statistical techniques. **Applied Water Science**, vol. 7, n. 7, p. 3511–3525, 2017. <https://doi.org/10.1007/s13201-017-0619-0>.
- ALBUQUERQUE, V. J.; FOLADOR, A.; MÜLLER, C.; POMPERMAIER, A.; HARTMANN, M.; HARTMANN, P. A. How do different concentrations of aluminum and zinc affect the survival, body size, morphology and immune system of *Physalaemus cuvieri* (Fitzinger, 1826) tadpole? **Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A**, v. 87, n. 8, p. 342–356, 2024. <https://doi.org/10.1080/15287394.2024.2311828>.
- ALBUQUERQUE, V. J.; MÜLLER, C.; HARTMANN, M.; HARTMANN, P. A. Concentration of metals in water around roads: a case study in Southern Brazil. **Discover Environment**, vol. 3, n. 1, p. 8, 2025. <https://doi.org/10.1007/s44274-025-00191-0>.
- ALJAZZAR, T.; KOCHER, B. Monitoring of Contaminant Input into Roadside Soil from Road Runoff and Airborne Deposition. **Transportation Research Procedia**. Elsevier B.V., vol. 14, p. 2714–2723, 2016 <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.451>.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, vol. 22, n. 6, p. 711–728, 2013. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.
- BĂRBULESCU, A.; HOSEN, K. Cement Industry Pollution and Its Impact on the Environment and Population Health: A Review. **Toxics**, v. 13, n. 7, 2025. <https://doi.org/10.3390/toxics13070587>.
- BEAUCHEMIN, S.; LEVESQUE, C.; WISEMAN, C. L. S.; RASMUSSEN, P. E. Quantification and Characterization of Metals in Ultrafine Road Dust Particles. **Atmosphere**, v. 12, n. 12, p. 1564, 2021. <https://doi.org/10.3390/atmos12121564>.
- BEINE, K.; DAHMS-VERSTER, S.; GREENFIELD, R. An integrated biomarker assessment of biochemical responses in a freshwater fish species after vanadium pentoxide (V₂O₅) exposure. **Fish Physiology and Biochemistry**, v. 48, n. 5, p. 1221–1233, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10695-022-01113-0>.

BELLUTA, I.; COELHO, J. C.; JESUS, S. A. de; CARVALHO, L. R. de; WONDRAK, M. H. P.; CASTRO, G. R. de; DOYAMA, J. T. Stormwater runoff of rodovias e áreas urbanas: Fonte principal de contaminação por metais no córrego da cascata – Botucatu (SP). **Geosciences**, v. 39, n. 2, p. 543–558, 2020. <https://doi.org/10.5016/geociencias.v39i2.13925>.

BELLUTA, I.; TOSHIMI DOYAMA, J.; CARLOS COELHO, J.; ALEXANDRE DE JESUS, S.; HENRIQUE PEREIRA WONDRAK, M.; RAQUEL DE CARVALHO, L.; ROCHA DE CASTRO, G. Contaminação por espécies metálicas em solos associados às Rodovias: Botucatu-SP. **Geosciences**, v. 37, n. 2, p. 347–359, 2018. <https://doi.org/10.5016/geociencias.v37i2.12089>.

BENVINDO-SOUZA, M.; ARAÚJO DOS SANTOS, C. G.; ALVES DE ASSIS, R.; BORGES, R. E.; RAQUEL DE SOUZA SANTOS, L.; SALLA, R. F.; LUIZ CARDOSO BAILÃO, E. F.; MENDONÇA DO PRADO, V. H. The impact of pollution from road runoff on lesser treefrogs, *Dendropsophus minutus* (Anura: Hylidae). **Environmental Research**, v 271, p. 121-144, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.121144>.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2005.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). Guia de validação e controle de qualidade analítica: fármacos em produtos para alimentação e medicamentos veterinários / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. – Brasília: Mapa/ACS, 72 p, 2011

CADMUS, P.; FRIEBERTSHAUSER, R. J.; RHEIN, N.; BRINKMAN, S. F.; CLEMENTS, W. H. Subcellular accumulation and depuration of zinc in periphytic algae during episodic and continuous exposures. **Archives of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 84, n. 2, p. 188–198, 2023. <https://doi.org/10.1007/s00244-022-00971-2>.

COFFIN, A. W.; OUREN, D. S.; BETTEZ, N. D.; BORDA-DE-ÁGUA, L.; DANIELS, A. E.; GRILO, C.; JAEGER, J. A. G.; NAVARRO, L. M.; PREISLER, H. K.; RAUSCHERT, E. S. J. The ecology of rural roads: Effects, management, and research. **Issues in Ecology**, n. 23, p. 1–34, 2021.

CÓRDOBA, P.; ESCORCIA, P.; MORENO, N.; QUEROL, X. Speciation and mobility of metals from vehicular non-exhaust particulate matter. **Journal of Hazardous Materials**, vol. 499, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.140076>.

CHRISTOU, A.; GIECHASKIEL, B.; OLOFSSON, U.; GRIGORATOS, T. Review of Health Effects of Automotive Brake and Tyre Wear Particles. **Toxics**, v. 13, nº 4, 2025. <https://doi.org/10.3390/toxics13040301>.

DEFFACI, A. C.; DA SILVA, V. P.; HARTMANN, M. T.; HARTMANN, P. A. DIVERSIDADE DE AVES, MAMÍFEROS E RÉPTEIS ATROPELADOS EM REGIÃO DE FLORESTA SUBTROPICAL NO SUL DO BRASIL. **Ciência e Natura**, v. 38, n. 3, p. 1205, 2016. <https://doi.org/10.5902/2179460x22020>.

DIAS, M. C. O.; PEREIRA, M. C. B.; DIAS, P. L. F.; VIRGÍNIO. **Manual de impactos ambientais: orientações básicas sobre aspectos ambientais de atividades produtivas**. 2. ed. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, 2008.

DUARTE, R. P. S. **Avaliação do cádmio (Cd), chumbo (Pb), níquel (Ni) e zinco (Zn) em solos e plantas às margens de uma rodovia de tráfego intenso de veículos**. 2003. Universidade Estadual Paulista (UNESP), Botucatu - SP, 2003.

DZIUBAK, T.; DZIUBAK, S. D. A Study on the Effect of Inlet Air Pollution on the Engine Component Wear and Operation. **MDPI**, vol. 15, n. 3, 2022. <https://doi.org/10.3390/en15031182>.

ENVIRONMENTAL ASSESSMENT SOURCEBOOK. VOL. 2: SECTORAL GUIDELINES, v. 2. Washington, DC: World Bank, 1991.

FORMAN, R. T. T.; SPERLING, D.; BISSONETE, J. A.; CLEVINGER, A. P.; CUTSHALL, C. D.; DALE, V. H.; FAHRIG, L.; FRANCE, R.; GOLDMAN, C. R.; HEANUE, K.; JONES, J. A.; SWANSON, F. J.; TURRENTINE, T.; WINTER, T. C. **Road Ecology: Science and Solutions**. Washington, DC: Island Press, 2003.

GALINDO, B. A.; TROILO, G.; CÓLUS, I. M. S.; MARTINEZ, C. B. R.; SOFIA, S. H. Genotoxic effects of aluminum on the neotropical fish prochilodus lineatus. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 212, n. 1-4, p. 419-428, 2010. <https://doi.org/10.1007/s11270-010-0357-5>.

GALVAN, N. S.; CAMPOS, M. L.; MIQUELLUTI, D. J.; SILVA, A. de S. da. Influência do tráfego de veículos no teor de alumínio e metais pesados em infusão de macela (*Achyrocline satureioides* Lam DC.). **Nativa**, v. 7, n. 6, p. 702–707, 2019. <https://doi.org/10.31413/nativa.v7i6.7746>.

GRIGORATOS, T.; MARTINI, G. Brake wear particle emissions: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 22, n. 4, p. 2491–2504, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3696-8>.

HAMMER, D. A. T.; RYAN, P. D.; HAMMER, Ø.; HARPER, D. A. T. Past: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. **Palaeontologia Electronica**, v. 4, n. 1, p. 178, 2001.

KARLSON, M.; MÖRTBERG, U.; BALFORS, B. Road ecology in environmental impact assessment. **Environmental impact assessment review**, v. 48, p. 10-19, 2014.

MARET, W. The metals in the biological periodic system of the elements: Concepts and conjectures. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 17, n. 1, p. 1–8, 2016. <https://doi.org/10.3390/ijms17010066>.

MARX, S. K.; KAMBER, B. S. Trace-element systematics of sediments in the Murray-Darling Basin, Australia: Sediment provenance and palaeoclimate implications of fine scale chemical heterogeneity. **Applied Geochemistry**, vol. 25, n 8, p. 1221–1237, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2010.05.007>.

MEIRA, I. A rodovia estadual GO-060 e sua influência na economia regional do Oeste goiano. **Ateliê Geográfico**, v. 15, n. 2, p. 236–253, 2021. <https://doi.org/10.5216/ag.v15i2.70532>.

MOUNT, D. R.; ERICKSON, R. J.; HIGHLAND, T. L.; HOCKETT, J. R.; HOFF, D. J.; JENSON, C. T.; NORBERG-KING, T. J.; PETERSON, K. N.; POLASKE, Z. M.; WISNIEWSKI, S. The acute toxicity of major ion salts to *Ceriodaphnia dubia*: I. influence of background water chemistry. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 35, n. 12, p. 3039–3057, 2016. <https://doi.org/10.1002/etc.3487>.

NIEMIEC, M.; WIŚNIEWSKA-KIELIAN, B. Accumulation of manganese in selected links of food chains in aquatic ecosystems. **Journal of Elementology**, v. 20, n. 4, p. 945–956, 2015. <https://doi.org/10.5601/jelem.2015.20.1.808>.

REE, R. van der; SMITH, D. J.; GRILO, C. **Handbook of Road Ecology**. Canada: Wiley, 2015.

ROMANO, N.; KUMAR, V.; SINHA, A. K. Implications of excessive water iron to fish health and some mitigation strategies. **Responsible Seafood Advocate**, 2021.

SÁNCHEZ, L. E. **Avaliação de impacto ambiental: conceitos e métodos**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

SANTOS, J.; BARRETO, Â.; ALMEIDA, C.; AZEVEDO, C.; DOMINGUES, I.; AMORIM, M. J. B.; MARIA, V. L. Toxicity of boron and vanadium nanoparticles on Danio rerio embryos – Phenotypical, biochemical, and behavioral alterations. **Aquatic Toxicology**, v. 238, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2021.105930>

SILVA, E. P. da. **Acúmulo e carreamento de metais pesados e sólidos em superfícies asfálticas**. 2014. Universidade Federal de Goiás, Goiânia - GO, 2014.

SKORBIŁOWICZ, M.; SKORBIŁOWICZ, E. Content of calcium, magnesium, sodium and potassium in the street dust from the area of Białystok (Poland). **Journal of Ecological Engineering**, v. 20, n. 10, p. 125–131, 2019. <https://doi.org/10.12911/22998993/113145>.

SOMMER, F.; DIETZE, V.; BAUM, A.; SAUER, J.; GILGE, S.; MASCHOWSKI, C.; GIERÉ, R. Tire abrasion as a major source of microplastics in the environment. **Aerosol and Air Quality Research**, v. 18, n. 8, p. 2014–2028, 2018. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.03.0099>.

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**. 3. ed. Porto Alegre, RS: Emater/RS-Ascar, 2018. ISBN 978-85-98842-20-2.

TEMBO, R. N. The Effects of Some Metals in Acidified Waters on Aquatic Organisms. **Oceanography & Fisheries Open access Journal**, v. 4, 2017. <https://doi.org/10.19080/OFOAJ.2017.04.555645>.

U.S. Department of Health and Human Services. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. **Toxicological Profile for Vanadium**. Atlanta: ATSDR, 255 p., 2012.