

Monitoramento em Tempo Real de Emissões de Sulfeto de Hidrogênio (H₂S) no entorno de uma Estação de Tratamento de Esgoto em Curitiba, Brasil – Avaliação do Impacto na Saúde da População do Entorno

Proponente: Prof. Dr. Ricardo H M Godoi

Data: setembro 2025

Instituição Proponente: Universidade Federal do Paraná (UFPR), Departamento de Engenharia Ambiental

Período: 24 meses

Resumo

A urbanização rápida e a expansão de estações de tratamento de esgoto (ETEs) em cidades em crescimento intensificaram preocupações com a poluição do ar, particularmente das emissões de sulfeto de hidrogênio (H₂S) geradas durante a decomposição anaeróbia de matéria orgânica. Como um odorante chave e toxina, o H₂S representa riscos tanto para a qualidade ambiental quanto para a saúde pública em áreas densamente povoadas. Em Curitiba, Brasil, onde a infraestrutura de saneamento é crítica, mas frequentemente ignora emissões fugitivas, estudos prévios com amostradores passivos detectaram níveis de H₂S de até 32 µg/m³ próximos a ETEs, com picos no verão impulsionados por temperaturas elevadas que aceleram a atividade microbiana. Essas concentrações excedem as diretrizes da OMS, ligando exposições crônicas a irritações respiratórias, efeitos neurológicos e maior vulnerabilidade entre crianças e idosos. No entanto, o monitoramento tradicional carece de resolução temporal, falhando em capturar variações diurnas ou influências meteorológicas na dispersão, essenciais para avaliações precisas de risco e formulação de políticas em gestão de saúde pública. Este estudo aborda a lacuna no monitoramento em tempo real de H₂S ao redor da ETE B de Curitiba, uma fonte significativa de emissões que impacta comunidades próximas. Aqui propomos implantar sensores compactos Cairsens H₂S para monitoramento contínuo, 24/7, por um ano em três locais estratégicos, integrando dados meteorológicos para modelar dispersão e riscos à saúde. Essa abordagem avança além dos métodos de amostragem integrada, permitindo detecção de alta resolução (1 ppb) de picos e padrões, revelando correlações com fatores como vento e temperatura que foram subestimados anteriormente. Ela se baseia em inovações de sensoriamento por drones, adaptando-as para aplicações urbanas estacionárias e de baixo custo para quantificar exposições crônicas contra concentrações de referência da USEPA. Em um contexto mais amplo, os achados informarão estratégias de mitigação, como coberturas em tanques anaeróbios ou alertas comunitários, alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU para cidades resilientes e saúde universal.

Introdução

O crescimento populacional e a industrialização acelerada nas áreas urbanas têm gerado impactos ambientais significativos, incluindo a poluição atmosférica oriunda de fontes como estações de tratamento de esgoto (ETEs). Em particular, o sulfeto de hidrogênio (H_2S) é um poluente gasoso produzido durante a decomposição anaeróbia da matéria orgânica em ETEs, caracterizado por seu odor forte de "ovo podre" detectável em concentrações baixas (a partir de 0,01-0,03 ppm) [1]. Como especialista em química da atmosfera, ressalto que o H_2S é um composto volátil e reativo, que pode se oxidar na atmosfera para formar dióxido de enxofre (SO_2) e, subsequentemente, ácido sulfúrico (H_2SO_4), contribuindo para a acidificação ambiental e a formação de aerossóis secundários [2]. Esses processos químicos não apenas alteram a composição atmosférica local, mas também exacerbam problemas como a chuva ácida, afetando ecossistemas aquáticos e terrestres próximos às ETEs.

Em termos de saúde populacional, o H_2S representa um risco significativo, especialmente em comunidades urbanas densas como as de Curitiba, Brasil. Exposições crônicas a concentrações acima de $1-5 \mu g/m^3$ podem causar irritação ocular, nasal e respiratória, fadiga, dores de cabeça e, em níveis mais elevados (acima de $100 \mu g/m^3$), problemas neurológicos, como perda de consciência ou até óbito por asfixia [3]. Estudos epidemiológicos indicam que populações expostas a odores de ETEs relatam maior incidência de sintomas respiratórios e estresse psicológico, com impactos desproporcionais em crianças, idosos e indivíduos com condições preexistentes como asma [4]. No contexto brasileiro, onde o saneamento básico ainda é deficiente em muitas regiões, as ETEs são essenciais para mitigar a poluição hídrica, mas geram emissões fugitivas de H_2S que afetam a qualidade do ar no entorno, frequentemente ignoradas por falta de monitoramento contínuo [1].

A dissertação de Anderson Marlon Grasel (2014) destacou a presença de H_2S em duas ETEs em Curitiba (A e B), com concentrações variando de $0,14$ a $32 \mu g/m^3$, maiores no verão devido a temperaturas elevadas que aceleram a decomposição anaeróbia [1]. Esses achados revelam uma acumulação interna em residências próximas, sugerindo infiltração domiciliar e exposição prolongada. No entanto, o método utilizado – amostradores passivos analisados por espectrofotometria – limita a resolução temporal, capturando médias integradas em campanhas sazonais, sem dados em tempo real para picos diurnos ou eventos meteorológicos. Como especialista em saúde populacional, enfatizo a necessidade de monitoramento contínuo para avaliar riscos crônicos, pois exposições intermitentes a H_2S podem levar a sensibilização olfativa e efeitos cumulativos no sistema respiratório, conforme guidelines da Organização Mundial da Saúde (OMS), que recomendam limites de $150 \mu g/m^3$ para 24 horas e $20 \mu g/m^3$ para exposições anuais [3].

Avanços tecnológicos, como os sensores eletroquímicos descritos no artigo de Baglioli e Godoi (2023), demonstram o potencial de sistemas compactos e de baixo custo para monitoramento dinâmico de poluentes gasosos [2]. Embora focado em emissões

ferroviárias, o estudo utilizou sensores semelhantes aos Cairsens da Envea, que operam por amperometria para detectar gases como SO₂, NO₂ e O₃ em tempo real, com precisão comparável a equipamentos de referência. Adaptando essa tecnologia para H₂S, propomos o uso de sensores Cairsens H₂S, que medem concentrações de 0-20 ppm com resolução de 1 ppb e taxa de amostragem de 1 minuto, permitindo monitoramento 24/7 [5]. Essa abordagem supera limitações dos métodos passivos, capturando variações diárias influenciadas por fatores como vento, temperatura e umidade, essenciais para modelar dispersão atmosférica.

Este projeto foca na ETE B de Curitiba, identificada na dissertação de Grasel como uma fonte significativa de H₂S, com concentrações médias elevadas próximas a residências [1]. Colocando sensores em três pontos estratégicos ao redor da estação, avaliaremos o impacto na população do entorno, estimada em milhares de habitantes em bairros densos. Como especialista, argumento que dados em tempo real permitirão correlações com variáveis meteorológicas e episódios de saúde pública, auxiliando na formulação de políticas de mitigação, como coberturas em tanques anaeróbios ou zoneamento urbano. Além disso, integrando química atmosférica com epidemiologia, o estudo contribuirá para entender como o H₂S interage com outros poluentes (e.g., formação de SO₂ via oxidação por ozônio), ampliando o risco cardiovascular em populações urbanas [2, 3]. Em resumo, este monitoramento inovador é crucial para proteger a saúde pública em contextos de desenvolvimento sustentável, alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU para cidades resilientes e saúde universal.

Objetivo Geral

Monitorar em tempo real as concentrações de H₂S ao redor da ETE B em Curitiba, utilizando sensores Cairsens Envea, para avaliar o impacto ambiental e na saúde da população vizinha durante um período de 1 ano.

Objetivos Específicos

1. Instalar e calibrar sensores Cairsens H₂S em três pontos estratégicos ao redor da ETE B, considerando direção predominante dos ventos e proximidade a residências.
2. Coletar dados contínuos de concentrações de H₂S (24/7) e correlacioná-los com variáveis meteorológicas (temperatura, umidade, velocidade do vento) para identificar padrões sazonais e diurnos.
3. Avaliar os riscos à saúde populacional, modelando exposições crônicas e comparando com limites da OMS, focando em efeitos respiratórios e neurológicos.
4. Propor medidas de mitigação baseadas nos dados, como melhorias na ETE ou alertas comunitários para picos de H₂S.

Metodologia de Amostragem

Seleção do Local e Pontos de Monitoramento

O estudo será conduzido na ETE B em Curitiba, conforme descrito na dissertação de Grasel [1], que processa esgoto anaeróbico e emite H₂S fugitivo. Três pontos serão selecionados com base em modelagem preliminar de dispersão (usando software como AERMOD): (1) Ponto 1: 50-100 m a sotavento da ETE, próximo a residências densas; (2) Ponto 2: 200-300 m perpendicular à direção dos ventos predominantes (sul-sudeste em Curitiba); (3) Ponto 3: Ponto de controle a 500 m a barlavento, para fundo ambiental. Essa configuração captura gradientes de concentração e impactos locais [2].

Equipamentos e Tecnologia

Utilizaremos sensores Cairsens H₂S da Envea, baseados em tecnologia amperométrica com três eletrodos (trabalho, contador e referência), medindo H₂S de 0-20 ppm com precisão de $\pm 5\%$ e resolução de 1 ppb [5]. Esses sensores são compactos (dimensões 10x5x5 cm, peso <200g), alimentados por bateria solar ou rede, e transmitem dados via GSM para uma plataforma em nuvem. Adaptados do conceito de "sniffing" no artigo de Baglioli e Godoi [2], eles serão instalados em postes a 2-3 m de altura para simular exposição humana. Calibração inicial e mensal será feita com gases padrão (concentrações conhecidas de H₂S) e comparação com analisador de referência (e.g., espectrofotômetro UV-Vis, como em [1]).

Procedimentos de Amostragem e Análise

Os sensores operarão 24/7 por 1 ano (início previsto: janeiro 2026), registrando dados a cada minuto. Dados meteorológicos serão obtidos de estação local (INMET) ou sensores integrados (temperatura, umidade, vento). Análise estatística usará software R ou Python para calcular médias, desvios, picos e correlações (e.g., regressão linear entre H₂S e temperatura) [6]. Modelagem de risco à saúde seguirá guidelines da USEPA [7], calculando doses de exposição crônica ($C \times t$) e comparando com RfC (concentração de referência) de 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para H₂S. Inquéritos comunitários (n=200) avaliarão sintomas auto-relatados, correlacionando com dados de H₂S.

Legislação Brasileira Atual sobre Concentrações de H₂S

No contexto deste projeto de pesquisa, que visa monitorar emissões de H₂S em tempo real no entorno de uma ETE em Curitiba, é essencial contextualizar as normas legais vigentes para garantir que os dados coletados sejam comparados com padrões regulatórios nacionais e internacionais. A legislação brasileira aborda o H₂S

principalmente nos âmbitos ambiental, ocupacional e setorial, com ênfase na proteção à saúde pública e ao meio ambiente. Embora não haja limites específicos exclusivos para emissões de ETEs, as normas gerais aplicam-se indiretamente, considerando o H₂S como poluente odorante e tóxico. A seguir, detalham-se as principais regulamentações atualizadas até setembro de 2025, baseadas em fontes oficiais como CONAMA, Ministério do Trabalho e ANP.

Regulamentações Ambientais

As resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) estabelecem padrões para qualidade do ar e emissões, aplicáveis a fontes como ETEs, que geram H₂S via processos anaeróbios.

Resolução CONAMA nº 491/2018: Atualiza os padrões nacionais de qualidade do ar, focando em poluentes como SO₂, PM e NO_x, mas regulando indiretamente o H₂S como composto sulfurado volátil. Não define limites específicos para H₂S ambiental, mas exige que emissões não ultrapassem concentrações que afetem a saúde pública ou causem odores incômodos (referência a ~0,005 ppm para detecção olfativa, alinhado a normas estaduais como as do Paraná via IAP/SEMAD). Emissões de ETEs devem ser controladas para evitar impactos em áreas residenciais, com monitoramento obrigatório em licenças ambientais [8].

Resolução CONAMA nº 382/2006: Define limites de emissão para fontes fixas, incluindo indústrias e estações de tratamento. Para compostos sulfurados como H₂S, os limites variam por processo (ex.: <500 mg/Nm³ em emissões gasosas de refinarias ou estações semelhantes), com exigência de tecnologias de abatimento (e.g., biofiltros) em casos de odores persistentes. Para ETEs, aplica-se a fontes pontuais anaeróbias, exigindo relatórios de conformidade [9].

Essas normas são complementadas por diretrizes estaduais, como a Diretriz Técnica nº 04/2019 da FEPAM (atualizada em 2025), que orienta o licenciamento de ETEs no Rio Grande do Sul, mas serve como referência para o Paraná, enfatizando controle de gases tóxicos como H₂S para minimizar riscos à população vizinha [10].

Regulamentações Ocupacionais e de Saúde Pública

Embora o foco do projeto seja ambiental, as normas ocupacionais são relevantes para trabalhadores da ETE e podem guiar avaliações de exposição populacional.

Norma Regulamentadora NR-15 (Portaria nº 3.214/1978, atualizada): Estabelece limites de tolerância para agentes químicos, incluindo H₂S. No Anexo 11, o limite é de 8 ppm (11 mg/m³) como concentração média ponderada (CMP) para jornadas de 48 horas semanais, baseado em valores da ACGIH de 1976. Exposições acima caracterizam insalubridade, com adicionais salariais. Nota: Limites internacionais mais recentes (ACGIH 2025: 1 ppm TWA, 5 ppm STEL) sugerem necessidade de atualização [11].

NR-33 (Espaços Confinados): Exige monitoramento de H₂S em ambientes confinados, com alarmes a 10-20 ppm e evacuação imediata, aplicável a tanques de ETEs [12].

Para saúde pública, o projeto alinhar-se-á aos guidelines da OMS (2000, confirmados em revisões até 2025), que recomendam <150 µg/m³ (24h) e <20 µg/m³ (anual) para H₂S, e à RfC da USEPA (2 µg/m³ para exposição crônica), como citado na metodologia [3,7].

Regulamentações Setoriais e Atualizações Recentes

Resolução ANP nº 41/2014 (atualizada): Limita H₂S em gás natural a 10 mg/m³, relevante para biogás de ETEs. Para poços e processos com H₂S >100 ppm, exige planos de gerenciamento [13].

Lei nº 14.948/2024 (Marco Legal do Hidrogênio): Controla H₂S como impureza em produção de hidrogênio, indiretamente aplicável a processos de biogás em ETEs [14].

Em 2025, não há atualizações significativas nos limites nacionais para H₂S em ETEs, mas resoluções como SEDEST nº 02/2025 e CID/COPAM (MG) reforçam métodos de amostragem e monitoramento, alinhando-se à proposta de sensores em tempo real [15,16]. Este projeto contribuirá para evidenciar lacunas regulatórias, propondo integrações com dados epidemiológicos para futuras revisões, promovendo sustentabilidade urbana conforme ODS 11 e 3.

Implicações para o Projeto

Os dados de monitoramento serão comparados com esses limites para avaliar conformidade e riscos, com modelagem de dispersão (AERMOD) incorporando variáveis meteorológicas. Recomendações incluirão atualizações normativas baseadas em evidências locais, como limites específicos para ETEs urbanas.

Previsão dos Resultados a Serem Obtidos

Esperamos concentrações médias de H₂S variando de 5-25 µg/m³ nos pontos próximos, com picos >50 µg/m³ no verão, corroborando Grasel [1], devido a maior decomposição anaeróbia em temperaturas >25°C. Correlações positivas com temperatura ($r>0.7$) e negativas com velocidade do vento indicarão dispersão limitada, levando a acumulação local. No ponto de controle, níveis <5 µg/m³ confirmarão a ETE como fonte principal. Em termos de saúde, modelagens preverão riscos elevados para 20-30% da população exposta cronicamente >10 µg/m³, com maior incidência de irritações respiratórias, similar a estudos em ETEs [4]. Resultados incluirão mapas de dispersão, gráficos temporais e recomendações para mitigação (e.g., biofiltros na ETE), contribuindo para políticas de saúde pública em Curitiba.

Orçamento

Compra dos sensores	R\$ 35.000,0
Compra de estação meteorológica	R\$ 10.000,0
Transmissão de dados	R\$ 3.000,0
Valor administração Funpar	R\$ 28.000,0
Transporte/deslocamentos	R\$ 2.000,0
Consumíveis Laboratório	R\$ 30.800,0
Bolsa de Iniciação Científica	R\$ 26.400,00
bolsa de mestrado	R\$ 55.200,0
pro labore professor	R\$ 36.000,0
	R\$ 200.000,0

Referências

1. Grasel, A.M. (2014). *Determinação de Sulfeto de Hidrogênio nas Proximidades de Estações de Tratamento de Esgoto em Curitiba-PR, Brasil*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná.
2. Baglioli, F., & Godoi, R.H.M. (2023). Sniffing Drones: A Promising Solution for Measuring Railroad Emissions in Urban Environments. *Atmosphere*, 14(5), 865. <https://doi.org/10.3390/atmos14050865>
3. World Health Organization (WHO). (2000). *Air Quality Guidelines for Europe*. WHO Regional Publications, European Series, No. 91.
4. Stranger, M., et al. (2008). Characterization of indoor air quality in primary schools in Antwerp, Belgium. *Indoor Air*, 18, 454–463.
5. Envea. (2023). *Cairsens H₂S & CH₄S Technical Specifications*. Disponível em: <https://envea.global/product/cairsens-h%E2%82%82s-ch%E2%82%84s/>
6. Vuolo, J.H. (1996). *Fundamentos da Teoria de Erros*. Edgard Blücher Ltda.
7. United States Environmental Protection Agency (USEPA). (2003). *Toxicological Review of Hydrogen Sulfide*. EPA-635/R-03/005.
8. CONAMA. (2018). Resolução nº 491. Disponível em: mma.gov.br.
9. CONAMA. (2006). Resolução nº 382. Disponível em: mma.gov.br.
10. FEPAM. (2025). Diretriz Técnica nº 04/2019 (rev.). Disponível em: fepam.rs.gov.br.
11. Ministério do Trabalho. (1978). NR-15 (atualizada 2025). Disponível em: gov.br/trabalho.
12. Ministério do Trabalho. (2006). NR-33 (atualizada). Disponível em: gov.br/trabalho.
13. ANP. (2014). Resolução nº 41 (atualizada). Disponível em: gov.br/anp.
14. Brasil. (2024). Lei nº 14.948. Disponível em: planalto.gov.br.
15. SEDEST. (2025). Resolução nº 02. Disponível em: sedest.pr.gov.br.
16. SEMAD. (2025). CID/COPAM PA/Nº 0003/1984 (rev.). Disponível em: meioambiente.mg.gov.br.