

RepoAir: Repositório de Dados para Monitoramento em Tempo Real da Qualidade do Ar em Ambientes Externos

Thiago I. A. Souza¹, Jairo I. C. Brito¹,
Bruno V. Bertoncini¹, Danielo G. Gomes²

¹Universidade Federal do Ceará
Núcleo de Pesquisa em Transportes e Meio Ambiente (TRAMA)

²Universidade Federal do Ceará
Grupo de Redes, Engenharia de Software e Sistemas (GREAT)
Fortaleza – CE – Brasil

thiagoiachiley@ufc.br, jairoivo.brito@det.ufc.br,
bruviber@det.ufc.br, danielo@ufc.br

Abstract. Air pollution remains one of the leading threats to global health and ecosystems, particularly in densely populated urban areas. Addressing the high cost of traditional monitoring stations, here we present RepoAir, a scalable, open-source platform for collecting, storing, analyzing, and visualizing outdoor air quality data. Built upon a network of low-cost sensors and integrated with cloud services, RepoAir supports real-time environmental monitoring and decision-making. This paper describes the system architecture and features, such as secure authentication, user management, multi-device visualization, and exportable analytics. We validate its functionality with real data from Fortaleza, Brazil, showing that the system can detect relevant pollution events, including smoke from wildfires.

Resumo. A poluição do ar continua sendo uma das principais ameaças à saúde global e aos ecossistemas, especialmente em áreas urbanas densamente povoadas. Para enfrentar o alto custo das estações tradicionais de monitoramento, este artigo apresenta o RepoAir: um repositório escalável e de código aberto para coleta, armazenamento, análise e visualização de dados sobre a qualidade do ar de ambientes externos. Baseado em uma rede de sensores de baixo custo e integrado a serviços em nuvem, o RepoAir oferece suporte ao monitoramento ambiental em tempo real e à tomada de decisões. Aqui descrevemos a arquitetura do sistema e suas funcionalidades, como autenticação segura, gerenciamento de usuários, visualização em múltiplos dispositivos e exportação de dados analíticos. Validamos sua funcionalidade com dados reais coletados na cidade de Fortaleza-CE, demonstrando que o sistema é capaz de identificar eventos relevantes de poluição, como fumaça de queimadas.

1. Introdução

A poluição atmosférica é um dos maiores desafios globais para a saúde pública e ambiental, afetando milhões de pessoas em áreas urbanas e rurais [WHO 2022b]. Diversas fontes naturais e antropogênicas emitem partículas e gases que, em altas

concentrações, comprometem a qualidade do ar tanto em ambientes internos quanto externos [WHO 2021]. Quando os níveis desses poluentes ultrapassam os limites estabelecidos por diretrizes de qualidade do ar, como os da Organização Mundial da Saúde, passam a representar risco direto à saúde humana [WHO 2022a]. No Brasil, o CONAMA define poluição atmosférica como a presença de concentrações prejudiciais de poluentes, especialmente quando agravadas por condições meteorológicas que dificultam sua dispersão.

As estimativas mostradas na Figura 1 apontam para uma média anual de aproximadamente 270 mortes naturais de 2010 a 2019, na cidade de Fortaleza-CE. Durante o mesmo período, a concentração média anual de material particulado com diâmetro igual ou inferior a 2,5 micrômetros (PM_{2,5}) foi de 9 µg/m³, quase o dobro das diretrizes atuais da OMS baseadas na saúde [WHO 2022b, WHO 2021].

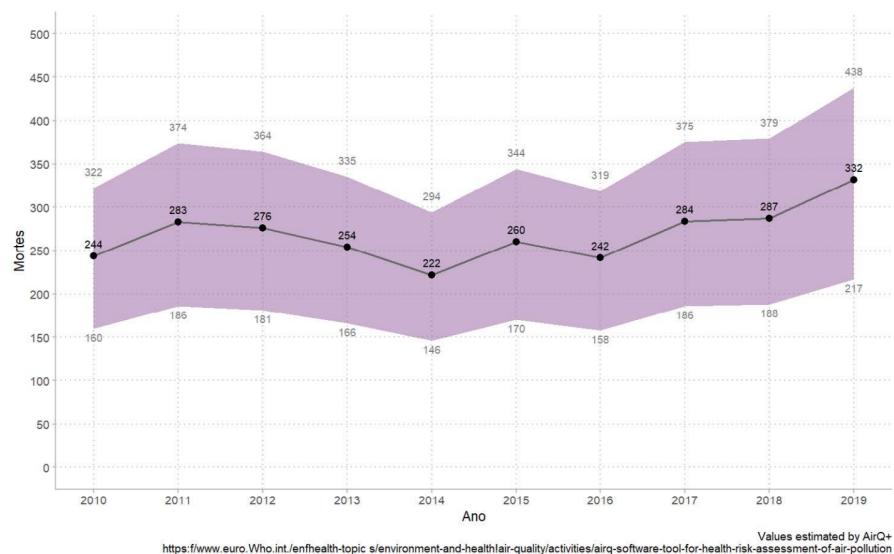


Figura 1. Estimativa de mortes prematuras decorrentes da exposição ao PM_{2,5} na cidade de Fortaleza-CE.

Entre os principais emissores estão o setor de transportes, a indústria e as queimadas. Particularmente, o transporte baseado na queima de combustíveis fósseis tem se destacado como uma fonte crescente de emissão de poluentes nos centros urbanos [Wallington et al. 2022]. Para compreender e mitigar os efeitos da poluição, é essencial monitorar continuamente a qualidade do ar, identificar tendências e subsidiar políticas públicas efetivas.

Contudo, o alto custo e a baixa cobertura espacial das estações automáticas tradicionais limitam sua aplicação em larga escala. Assim, surgem algumas perguntas de partida: (i) é possível construir uma infraestrutura digital acessível e escalável para monitorar a qualidade do ar em tempo real em áreas urbanas? (ii) quais parâmetros devem ser priorizados? (iii) como garantir usabilidade e capacidade analítica frente ao crescente volume de dados gerados por sensores urbanos? Nossa hipótese basal é que, ao combinar sensores de baixo custo com plataformas digitais abertas, é possível criar uma solução eficiente para monitoramento ambiental urbano, capaz de fornecer dados relevantes à gestão pública e à sociedade.

Aqui apresentamos o RepoAir, um repositório digital para organizar, analisar e disponibilizar dados de qualidade do ar em ambientes externos. O objetivo é oferecer uma solução computacional que responda aos desafios da coleta, gerenciamento e interpretação de dados em tempo real, oriundos de sensores distribuídos em diferentes pontos de uma cidade.

Reforçamos que, embora existam iniciativas similares [Devarakonda et al. 2013, Twahirwa et al. 2021], muitas ainda não integram parâmetros essenciais de qualidade do ar ou não conseguem lidar com a complexidade dos dados gerados por sensores urbanos em tempo real [Behr et al. 2021, Kelly et al. 2023]. O RepoAir busca superar essas limitações.

2. Material e Método

Nesta seção, descrevemos o desenvolvimento do RepoAir, partindo desde a descrição da rede de sensores utilizada até os serviços de autenticação de usuários (*Authentication*), assim como o de banco de dados (*Firestore* da Google).

2.1. Monitores da Qualidade do Ar

O MoQA (Monitor da Qualidade do Ar) é um hardware de baixo custo desenvolvido pelo Núcleo de Pesquisa em Transportes e Meio Ambiente (TRAMA) da Universidade Federal do Ceará para monitorar a qualidade do ar de ambientes externos¹. Trata-se de uma rede com 30 nós monitores distribuídos próximos a áreas escolares, corredores de tráfego, centros comerciais, equipamentos de saúde, espaços públicos e áreas industriais da cidade de Fortaleza-CE (vide Figura 2). Tais dispositivos possuem sensores capazes de aferir parâmetros meteorológicos e de poluentes. Em relação aos meteorológicos, são capazes de monitorar a temperatura externa (ambiente), temperatura interna (dentro de sua própria infraestrutura), a pressão e a umidade. Já em relação aos poluentes, é possível aferir material particulado (*Particulate Matter*, PM) de dimensões de até 1, 2.5 e 10 micrões, e concentração de gases, como o monóxido de carbono (CO), o dióxido de carbono (CO₂), o dióxido de nitrogênio (NO₂), o gás amoníaco (NH₃) e compostos orgânicos voláteis (TVOCS). Esses dispositivos aferem as concentrações desses parâmetros e as enviam para a *Firestore*, uma plataforma de nuvem da Google, utilizando os serviços de Autenticação e de Banco de Dados. Os dados armazenados em tal banco estão no formato de *Java Script Object* (JSON), e cada inscrição corresponde a um documento em uma coleção de dados no banco não relacional do *Firestore*. Dessa forma, quando um dispositivo realiza uma aferição, são enviados 26 campos do JSON, com um tamanho total de 281 bytes. A seleção de tais parâmetros é fundamentada em três critérios principais: relevância para a saúde pública; viabilidade técnica, considerando a precisão e estabilidade das leituras obtidas pelos monitores MoQA; e aplicabilidade no contexto local levando em conta demandas de órgãos ambientais e políticas públicas de controle da poluição atmosférica.

2.2. Visão geral do RepoAir

A Figura 3 ilustra uma visão geral do RepoAir, destacando o fluxo de comunicação com autenticação, desde o sensoriamento nos monitores de qualidade do ar, passando pelo

¹https://youtu.be/KyhA3OlivfM?si=zJ_wmRUiFEqddQ4h

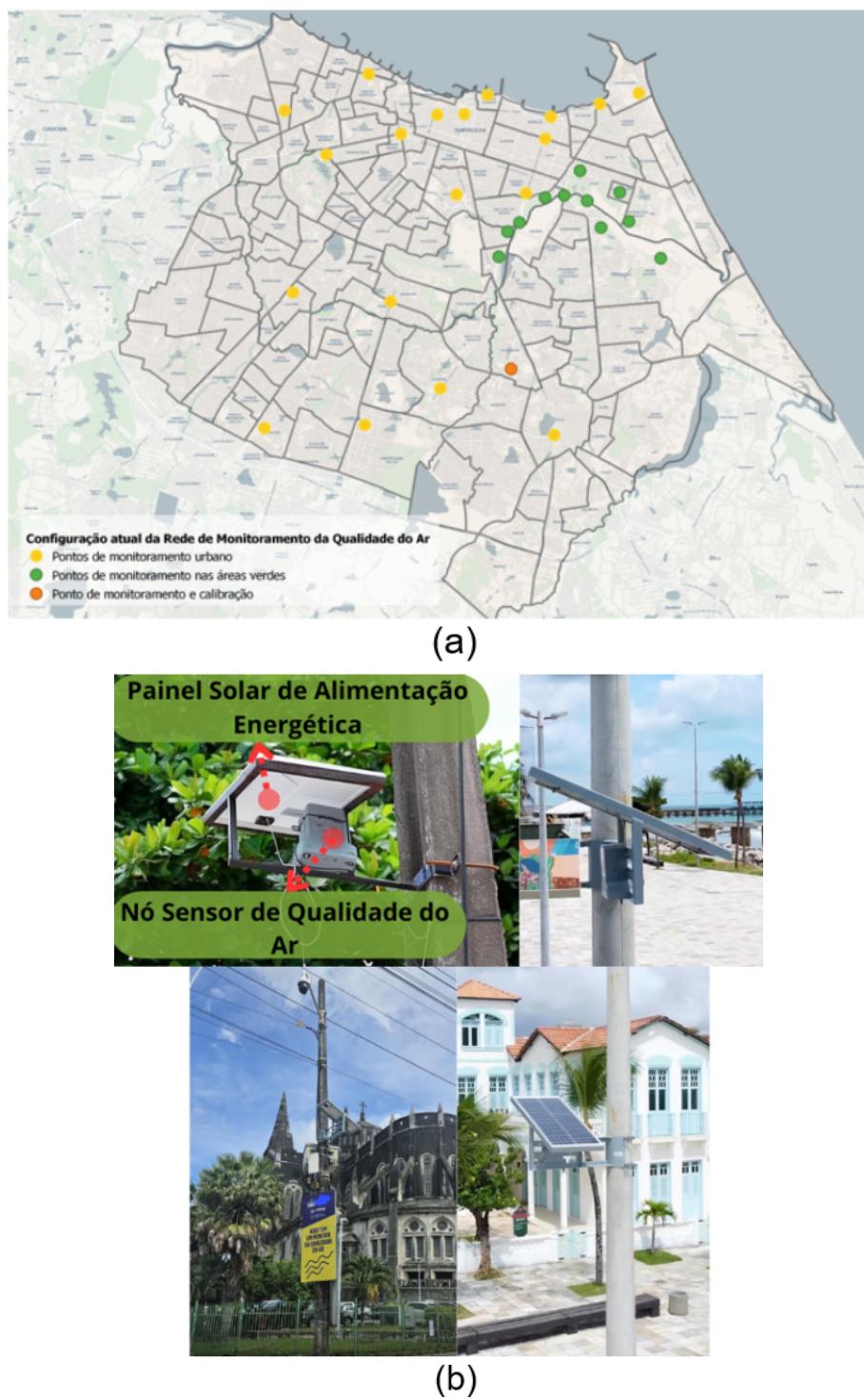


Figura 2. (a) Monitores da qualidade do ar distribuídos em diversos bairros da cidade de Fortaleza/CE; (b) Exemplos dos monitores.

serviço de repositório do *Firebase*, até o painel de visualização dos dados. A transmissão de dados ocorre a cada 30 segundos por unidade MoQA, totalizando cerca de 2.880 registros por dispositivo diariamente.



Figura 3. Visão Geral do RepoAir.

Para integrar o *Firebase*, criamos um arquivo no formato *JavaScript Object Notation* (JSON) contendo as configurações necessárias, tais como *apiKey*, *authDomain*, *projectId*, *storageBucket*, *messagingSenderId*, *appId* e *measurementId*, todas disponíveis no console do *Google Cloud*. Finalmente, para facilitar a configuração global do RepoAir, um arquivo *main.js* realiza a importação de módulos e bibliotecas necessárias, inicializa o *Firebase* e estabelece uma aplicação *Vue* integrada com o *Firebase* para autenticação de usuários, utilizando o *Firestore* como banco de dados. A aplicação é configurada para lidar com mudanças no estado de autenticação do usuário.

2.3. Autenticação

Para controlar a visualização dos dados, foi utilizado o serviço de Autenticação de usuários do *Firebase*, a partir da plataforma oficial da *Google*, com *e-mail* e uma senha padrão para os novos usuários. Ao realizar esse processo de cadastro de um usuário no serviço de autenticação, é gerado um UID (*User ID*).

Por conseguinte, com o objetivo de gerenciar as permissões dos usuários, foi criada uma coleção, usando o serviço de banco de dados *Firestore* do *Google Firebase*, denominada "users", a qual possui como documentos os identificadores dos usuários e suas permissões. Nesta coleção, cada documento possui o UID do usuário e suas respectivas permissões, indicadas por um campo boolean, que determina se o usuário é um administrador ou não.

A integração dessas permissões com o sistema de roteamento no *Vue.js* pode ser observada no arquivo *router/index.js*. Nesse código, são definidas rotas que requerem autenticação e, em alguns casos, privilégios de administrador. O acesso a essas rotas é controlado dinamicamente com base nas permissões do usuário, consultadas na coleção "users" durante a navegação.

3. Avaliações Experimentais do *RepoAir*

Implementamos sete rotas distintas, cada uma associada a URLs específicas configuradas pelos componentes programados. Para cada rota, criaram-se versões adaptadas tanto para telas de computadores quanto para dispositivos móveis. A Figura 4 mostra um exemplo de visualização para a versão *mobile*.

Dessa forma, as rotas desenvolvidas (*Dashboard*, Mapa, Exportação de Dados, Página Inicial, Página não encontrada, e Perfil de usuário) e os arquivos gerados para exportação, como as imagens dos gráficos e arquivos .csv, configuraram uma ferramenta para verificar o estado de transmissão dos dispositivos.

Os resultados apresentados evidenciam diversos aspectos favoráveis da aplicação desenvolvida. A interface se destaca pela sua versatilidade, adaptando-se tanto para *desktop* quanto para dispositivos móveis, garantindo uma experiência de usuário responsiva.

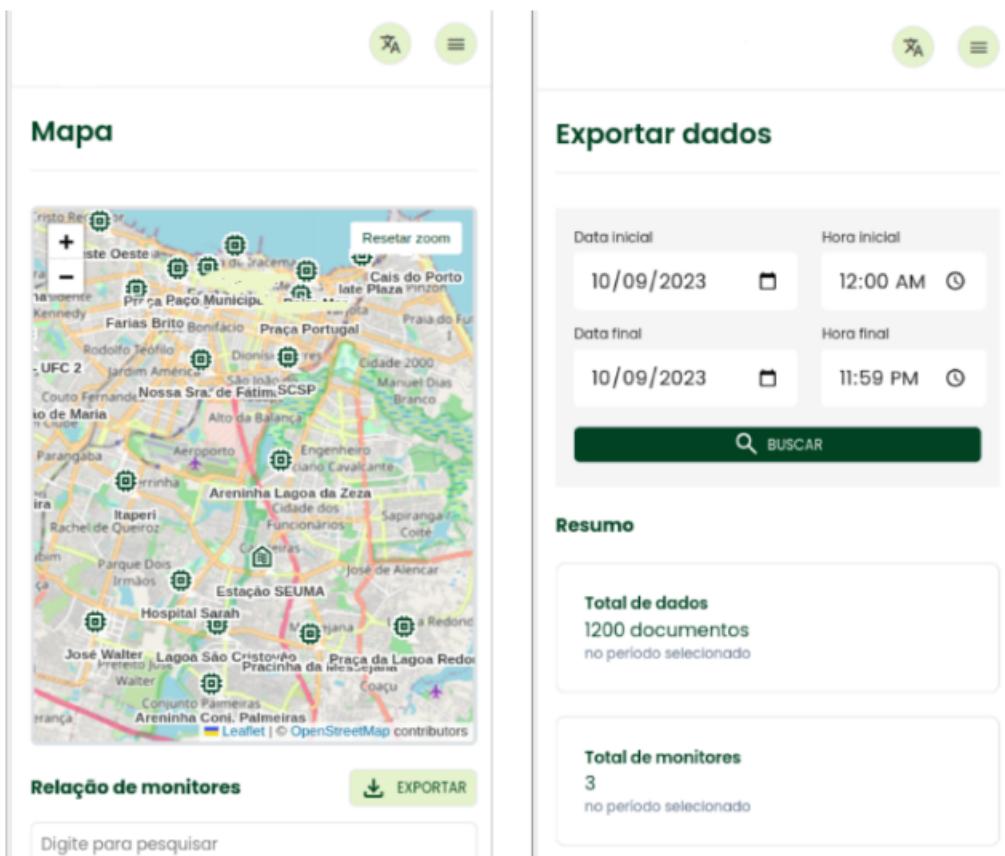


Figura 4. Rotas principais - mobile.

Além disso, a disponibilidade das versões em português brasileiro e inglês amplia o alcance da plataforma.

A segurança do sistema também foi uma prioridade, com a implementação de autenticação de usuários que protege o banco de dados. Apenas usuários autorizados têm acesso ao sistema, e suas permissões são validadas constantemente a cada mudança de rota dentro da página.

Além disso, o RepoAir exibe dados referentes aos últimos cinco minutos por padrão. Sempre que um usuário acessa a plataforma, o sistema captura a hora, minuto e segundo atuais e apresenta as informações correspondentes ao período imediatamente anterior. No entanto, esse intervalo de tempo pode ser configurado pelo usuário, permitindo a visualização de dados de até 24 horas anteriores. Ademais, cada unidade MoQa realiza a transmissão de dados em médias de 30 segundos, ocorrendo duas vezes por minuto, garantindo uma atualização frequente e precisa das medições ambientais.

A plataforma também conta com mapas nas rotas de *Dashboard* e Mapa, que auxiliam na visualização das áreas monitoradas, permitindo identificar discrepâncias na reprodução dos dados e informações detalhadas sobre os pontos de coleta. Além disso, a inclusão de gráficos que representam erros detectados, parâmetros meteorológicos e níveis de poluição simplifica a interpretação dos dados complexos, tornando mais acessível a compreensão dos padrões e tendências.

Outra funcionalidade essencial para os pesquisadores é a possibilidade de exportar os dados em formato CSV, um formato amplamente utilizado em ferramentas de análise de dados, proporcionando liberdade para diferentes abordagens de pesquisa. Além disso, a aplicação permite que cada usuário personalize seu perfil, podendo alterar seu nome e senha de forma segura.

Por fim, a Figura 5 ilustra um exemplo de gráfico gerado pela plataforma que remete a um período em que a rede de monitoramento passava por uma manutenção, resultando na operação de apenas um monitor, localizado no bairro Vila Velha, no extremo oposto da cidade. Por essa razão, a figura apresentada no estudo refere-se exclusivamente a esse monitor específico. Os dados exibem o monitoramento contínuo das 24 horas do dia em que ocorreu um incêndio numa região de reserva, caracterizada como área verde da cidade, evidenciando a magnitude dos valores registrados mesmo a grande distância do local do evento. Esse fato ressalta o impacto significativo do RepoAir na detecção de incêndio, alinhando-se com a proposta do estudo ao demonstrar a abrangência da dispersão dos poluentes na cidade.

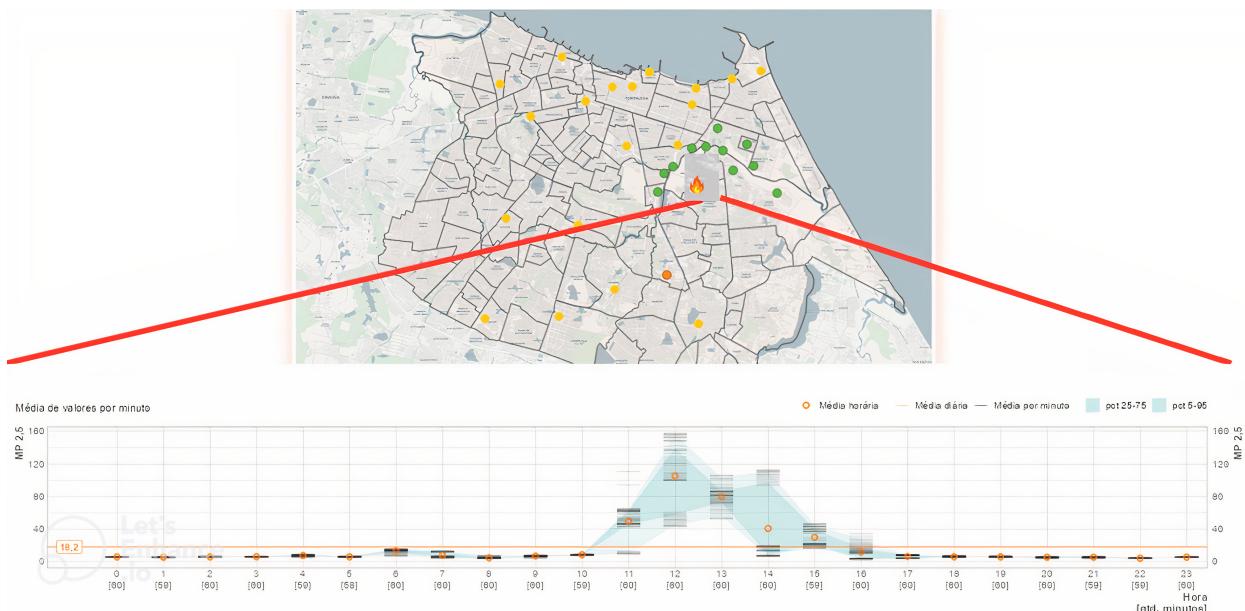


Figura 5. Detecção de incêndio em tempo real.

4. Conclusão

A contribuição do RepoAir reside em sua abordagem inovadora para lidar com questões de qualidade do ar. Ao propiciar monitoramento de dados da qualidade do ar externo em tempo real, o RepoAir proporciona uma compreensão abrangente dos padrões ambientais e suas implicações. Esta pesquisa oferece uma estrutura robusta que pode ser adaptada e aprimorada, melhorando, em última análise, a saúde pública e subsidiando decisões políticas relacionadas à poluição atmosférica.

Para trabalhos futuros, sugere-se a implementação de visualizações avançadas para melhorar a experiência do usuário na análise dos dados, oferecendo abordagens estatísticas mais refinadas, com destaque para a integração de modelos estatísticos e de *machine learning*, como regressão multivariada, redes neurais recorrentes e modelos de

séries temporais, visando à previsão de concentrações de poluentes. Outro avanço planejado é o desenvolvimento de mecanismos automáticos de alerta, que serão acionados quando os valores medidos ultrapassarem limites críticos definidos por diretrizes ambientais, permitindo respostas mais rápidas por parte de gestores e da população. Além disso, o desenvolvimento de rotas de consulta pública permitirá um acesso seguro e escalável aos dados de qualidade do ar. Por fim, poderíamos potencialmente servir como um sistema de alerta precoce para redução da qualidade do ar e fumaça em áreas de alto risco, onde a exposição a poluentes pode colocar vidas em risco e prejudicar a saúde das pessoas, desde idosos a até mesmo comprometer o desenvolvimento infantil.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Danielo G. Gomes agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de produtividade (processo 311845/2022-3).

Referências

- Behr, A., Cascalho, J., Guerra, H., Costa, A., Parente, M., Botelho, A., Vicari, R., and Mendes, A. (2021). Re-mar: Repository of marine learning objects. In *Anais do XII Workshop de Computação Aplicada à Gestão do Meio Ambiente e Recursos Naturais (WCAMA)*, pages 1–10. XLI Congresso da Sociedade Brasileira de Computação.
- Devarakonda, S., Sevusu, P., Liu, H., Liu, R., Iftode, L., and Nath, B. (2013). Real-time air quality monitoring through mobile sensing in metropolitan areas. In *Proceedings of the 2nd ACM SIGKDD International Workshop on Urban Computing*, page 1–8.
- Kelly, C., Fawkes, J., Habermehl, R., Monticelli, D. F., and Zimmerman, N. (2023). Plume dashboard: A free and open-source mobile air quality monitoring dashboard. *Environmental Modelling and Software*, 160:105600.
- Twahirwa, E., Rwigema, J., and Datta, R. (2021). Design and deployment of vehicular internet of things for smart city applications. *Sustainability*, 14:176.
- Wallington, T. J., James E. Anderson, R. H. D., and Winkler, S. L. (2022). Vehicle emissions and urban air quality: 60 years of progress. *Atmosphere*, 13:1–19.
- WHO (2021). Who global air quality guidelines: Particulate matter (pm2.5 and pm10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Technical report, World Health Organization.
- WHO (2022a). Billions of people still breathe unhealthy air: New who data. Technical report, World Health Organization.
- WHO (2022b). Chapter 2. air pollution, compendium of who and other un guidance on health and environment. Technical report, World Health Organization.