

A IMPORTÂNCIA DA CROMATOGRAFIA IÔNICA PARA A ANÁLISE DE POLUENTES SECUNDÁRIOS PRESENTES EM MATERIAL PARTICULADO: UMA REVISÃO DE LITERATURA.

Jaqueline Adorno Balazini^{1*}

Lincoln Lucilio Romualdo^{2*}

Resumo: A cromatografia iônica (CI) é um método analítico amplamente utilizado para a separação, identificação e quantificação de espécies iônicas em amostras ambientais. A incorporação da CI à espectrometria de massas (IC-MS) ampliou sua capacidade de detecção de poluentes secundários, como sulfatos, nitratos, oxalatos e íons amônio, formados por processos fotoquímicos que afetam diretamente a qualidade do ar e a saúde humana. Este artigo realiza uma revisão de literatura científica sobre os princípios, os avanços metodológicos e as aplicações da cromatografia iônica, com foco na análise de material particulado (MP) e metais pesados. Também são abordadas estratégias de preparo de amostras, métodos de concentração de analitos e o papel da CI na caracterização de aerossóis secundários. A pesquisa ressalta a importância dessa técnica como instrumento essencial na análise ambiental e no desenvolvimento de políticas públicas voltadas à redução da poluição atmosférica.

Palavras-chave: cromatografia iônica; IC-MS; contaminantes secundários; metais pesados; partículas em suspensão; análise ambiental.

INTRODUÇÃO

A atmosfera constitui um sistema dinâmico, permanentemente influenciado por processos naturais e pelas atividades humanas. Conforme discutido por Hobsbawm (2012), a consolidação do modelo industrial, a partir do final do século XVIII, marcou uma transformação profunda na relação entre sociedade e natureza, impulsionada pela urbanização acelerada e pelo uso intensivo de combustíveis fósseis. Esse processo histórico intensificou de maneira significativa as emissões atmosféricas, resultando no aumento da poluição do ar e em crises recorrentes de saúde pública,

^{1*} Instituto de Química – UFCAT: e-mail de contato da primeira autora jackeadorno@gmail.com, e-mail de contato do segundo autor lincolnromualdo@ufcat.edu.br

como os episódios de smog em grandes centros urbanos. Tais impactos estimularam a formulação de legislações ambientais e de acordos internacionais — a exemplo do Acordo de Paris — voltados à mitigação dos danos climáticos e à preservação da saúde planetária. Nesse contexto, a qualidade do ar torna-se um indicador simultâneo do grau de desenvolvimento industrial e da necessidade urgente de controle das emissões antrópicas (SILVA; VIEIRA, 2017).

Nas grandes cidades, a poluição do ar decorrente da queima de combustíveis fósseis, das atividades industriais e do tráfego veicular configura um dos principais problemas ambientais contemporâneos, com efeitos expressivos sobre a saúde pública, os ecossistemas e a economia (SILVA et al., 2025). Estimativas da Organização Mundial da Saúde (OMS) indicam que cerca de 7 milhões de mortes anuais estão associadas à exposição à poluição atmosférica, sobretudo em função do agravamento de doenças respiratórias e cardiovasculares. Além de contribuir para as mudanças climáticas, esse cenário impõe elevados custos aos sistemas de saúde e reduz a produtividade econômica, evidenciando a necessidade de políticas integradas, adoção de tecnologias limpas e abordagens multidisciplinares para a promoção de cidades mais sustentáveis (GOUVEIA et al., 2017; SALDIVA, 2018).

No início do século XX, o ar era considerado um recurso inesgotável. Entretanto, a intensificação das atividades industriais e a expansão da frota veicular resultaram em um aumento expressivo da poluição atmosférica. Fontes antrópicas, como a queima de combustíveis fósseis e os processos siderúrgicos, tornaram-se os principais emissores de poluentes, inicialmente sem monitoramento adequado dos impactos à saúde. Episódios emblemáticos, como o Grande Smog de Londres em 1952, que causou milhares de mortes, evidenciaram os riscos da contaminação do ar e impulsionaram estudos epidemiológicos, bem como o estabelecimento de padrões de qualidade do ar em diversos países. Apesar dos avanços obtidos com a implementação de políticas de controle, os níveis atuais de poluição ainda representam uma ameaça relevante à saúde humana.

No Brasil, a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) destaca-se como uma das principais instituições de monitoramento ambiental da América Latina. A CETESB é responsável pelo acompanhamento sistemático da qualidade do ar no estado de São Paulo, realizando medições contínuas de parâmetros atmosféricos por meio de uma extensa rede de estações de monitoramento.

Atualmente, o estado conta com 85 estações, sendo 63 automáticas, que fornecem dados em tempo real sobre os principais poluentes atmosféricos (CETESB, 2025).

Entre os poluentes monitorados, destaca-se o material particulado (MP), termo que abrange partículas sólidas e líquidas em suspensão na atmosfera, classificadas principalmente como MP_{10} e $MP_{2,5}$, provenientes de fontes como queimadas, poeira e processos de combustão. Outros contaminantes relevantes incluem o ozônio (O_3), formado por reações fotoquímicas; o dióxido de nitrogênio (NO_2), emitido majoritariamente por veículos automotores e atividades industriais; o dióxido de enxofre (SO_2), associado ao uso de combustíveis fósseis; e o monóxido de carbono (CO), predominante em áreas de tráfego intenso. Esses poluentes podem atuar como precursores de poluentes secundários, formados a partir de reações químicas na atmosfera que geram compostos altamente tóxicos e oxidantes, com impacto direto sobre a saúde e os ecossistemas.

A exposição prolongada a esses poluentes está associada ao aumento da morbimortalidade por doenças respiratórias, cardiovasculares e metabólicas (NASCIMENTO et al., 2019). Estudos nacionais reforçam essa relação: Gouveia et al. (2017) identificaram correlação significativa entre a concentração de material particulado e hospitalizações por doenças cardiorrespiratórias na Região Metropolitana de São Paulo, evidenciando desigualdades socioespaciais na vulnerabilidade populacional. Saldiva (2018) complementa ao destacar que os efeitos da poluição atmosférica sobre a saúde se manifestam de forma cumulativa e crônica, representando um desafio crescente para as políticas públicas urbanas.

Em setembro de 2021, a Organização Mundial da Saúde (OMS) publicou a atualização das WHO Global Air Quality Guidelines, tornando-as mais restritivas com base em novas evidências científicas. O documento estabeleceu limites anuais de $5 \mu g/m^3$ para $PM_{2,5}$, $15 \mu g/m^3$ para PM_{10} , $10 \mu g/m^3$ para NO_2 e $60 \mu g/m^3$ para O_3 (média de 8 horas durante o pico sazonal), reconhecendo que não há nível seguro de exposição para muitos desses poluentes (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2021). Embora as diretrizes não possuam caráter legal, elas orientam políticas públicas e normas ambientais em escala global, servindo como referência científica para a formulação de estratégias de mitigação e proteção à saúde humana.

Nesse cenário, a análise qualitativa e quantitativa de compostos químicos assume papel central em diferentes áreas do conhecimento. A cromatografia iônica (CI), desenvolvida por Small, Stevens e Bauman (1975), destaca-se como uma técnica analítica de referência, reconhecida por sua elevada sensibilidade e seletividade na separação e identificação de íons em solução (WEISS, 2004; POOLE, 2012). Sua aplicação é particularmente relevante em análises ambientais, farmacêuticas e alimentares, nas quais a precisão analítica é essencial.

A cromatografia iônica baseia-se na separação de espécies iônicas por meio da interação dos analitos com a fase estacionária de uma coluna cromatográfica, permitindo a identificação e quantificação de diferentes compostos. No contexto ambiental, a técnica é amplamente utilizada na determinação de ânions e cátions presentes no material particulado atmosférico, contribuindo para a compreensão das fontes de emissão e dos processos de formação de poluentes secundários (HEUER et al., 2018; KARTHIKEYAN et al., 2019; MORENO et al., 2020).

Este estudo tem como objetivo examinar a importância da cromatografia iônica como técnica analítica, avaliando suas vantagens em relação a métodos tradicionais na análise de poluentes secundários presentes no material particulado atmosférico. A relevância da pesquisa reside na análise crítica dos desafios e benefícios associados à preparação de amostras de MP, considerando a composição iônica e as particularidades das fontes emissoras regionais. A cromatografia iônica apresenta vantagens metodológicas em relação a técnicas convencionais, como limites de detecção reduzidos, maior seletividade e possibilidade de análise multielementar (HADDAD; JACKSON, 1990; WEISS, 2004).

A metodologia adotada consiste na revisão crítica de publicações científicas recentes sobre cromatografia iônica, aliada à discussão de resultados obtidos em estudos experimentais prévios. O trabalho está estruturado em cinco capítulos: o primeiro aborda a fundamentação teórica da cromatografia iônica; o segundo descreve os procedimentos metodológicos; o terceiro apresenta aplicações práticas; o quarto discute os resultados; e o quinto reúne as conclusões. Dessa forma, espera-se demonstrar que a cromatografia iônica se consolida não apenas como uma técnica analítica de excelência, mas também como uma ferramenta fundamental para o avanço das ciências químicas e para o desenvolvimento de estratégias eficazes de controle da poluição atmosférica.

2. PRINCÍPIOS DA CROMATOGRAFIA IÔNICA

A cromatografia iônica é um tipo de cromatografia líquida por troca iônica, permitindo a separação de íons inorgânicos e orgânicos em solução. Essa técnica é amplamente empregada na determinação de ânions (fluoreto, cloreto, nitrato, sulfato) e cátions (sódio, potássio, amônio, cálcio, magnésio) em amostras de ar, água e solo (SNYDER; KIRKLAND; DOLAN, 2010).

O monitoramento de poluentes atmosféricos por CI é essencial para compreender a formação e a transformação de compostos iônicos na atmosfera (HUANG et al., 2020). Com o avanço da instrumentação, o acoplamento IC-MS possibilitou a identificação de espécies iônicas de baixo peso molecular, como SO_4^{2-} , NO_3^- e NH_4^+ , formadas em reações fotoquímicas (PÉREZ et al., 2019).

3 AVANÇOS METODOLÓGICOS E APLICAÇÕES ANALÍTICAS

3.1 Cromatografia Iônica Acoplada à Espectrometria de Massas (IC-MS)

O acoplamento da CI à espectrometria de massas combina a separação eficiente da CI com a sensibilidade da detecção por massas, permitindo a análise simultânea de compostos iônicos e polares em matrizes complexas (TONG et al., 2021).

3.2 Preparação e Concentração de Amostras

A preparação adequada das amostras é crucial para assegurar a precisão analítica. As principais etapas incluem:

Concentração de analitos: extração em fase sólida (SPE), extração líquido-líquido (LLE), evaporação e liofilização;

Remoção de interferentes: filtração, precipitação ou diálise;

Ajuste de pH e solvente: minimiza supressão iônica e melhora a resposta do detector;

Especiação química: preserva formas químicas relevantes, fundamentais para estudos de toxicidade (MORRISON; BOYD, 2014).

4 APLICAÇÕES ESPECÍFICAS DA CROMATOGRAFIA IÔNICA

4.1 Determinação de Metais Pesados

A IC-MS é amplamente utilizada na determinação de metais como chumbo, cádmio e mercúrio, com alta sensibilidade e capacidade de rastreamento isotópico (WANG et al., 2020).

4.2 Determinação de Níquel em Óxido de Cádmio

Uma metodologia proposta por Fernandes et al. (2022) utiliza resinas catiônicas e detecção por condutividade, demonstrando a eficiência da CI na análise seletiva de níquel em matrizes metálicas complexas.

5. IDENTIFICAÇÃO DE POLUENTES SECUNDÁRIOS

Os íons sulfato, nitrato e amônio são componentes majoritários dos aerossóis inorgânicos secundários, resultantes da oxidação de gases precursores (SO_2 , NO_x e NH_3). A CI permite avaliar a origem e a formação desses compostos com alta precisão temporal e espacial (LIU et al., 2018; PÉREZ et al., 2019).

6. VANTAGENS E LIMITAÇÕES ANALÍTICAS

Aspecto	Contribuição da Cromatografia Iônica
Multicomponente	Determinação simultânea de ânions e cátions em PM ₁₀ e PM _{2,5}
Limite de detecção	Níveis de ng·m ⁻³ , adequados para traços ambientais
Identificação de fontes	Perfis iônicos usados em modelagem receptora
Especiação química	Determinação de estados de oxidação e complexação metálica
Limitação	Interferência de matriz e necessidade de preparo laboratorial

7. CONTRIBUIÇÕES PARA A AVALIAÇÃO AMBIENTAL E DE SAÚDE

A fração solúvel em água de PM_{2,5} pode representar até 60% de sua massa total, composta principalmente por espécies secundárias. A CI possibilita a correlação entre aerossóis e variáveis meteorológicas, sendo fundamental para estudos epidemiológicos e ambientais (WHO, 2021).

8. CONCLUSÃO

A cromatografia iônica consolidou-se como uma das técnicas mais eficientes na análise de poluentes secundários e metais pesados. Sua alta sensibilidade, seletividade e compatibilidade com espectrometria de massas tornam-na indispensável para estudos ambientais. Os resultados obtidos por CI contribuem diretamente para políticas de controle de emissões e estratégias de mitigação da poluição atmosférica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CETESB. *Relatório de Qualidade do Ar no Estado de São Paulo: 2025*. São Paulo: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2025.

FERNANDES, L. C. et al. Aplicação da cromatografia iônica na determinação de metais em resíduos industriais. *Química Nova*, v. 45, n. 3, p. 412–420, 2022.

GOUVEIA, N. et al. Poluição do ar e hospitalizações na maior metrópole brasileira. *Revista de Saúde Pública*, v. 51, p. 117, 2017.

HADDAD, P. R.; JACKSON, P. E. *Ion Chromatography: Principles and Applications*. Amsterdam: Elsevier, 1990.

HEUER, M. et al. Determination of inorganic ions in atmospheric aerosols by ion chromatography. *Journal of Environmental Analytical Chemistry*, v. 5, n. 2, p. 120–134, 2018.

HOBSBAWM, E. *A Era das Revoluções: Europa, 1789–1848*. São Paulo: Paz e Terra, 2012.

HUANG, Y. et al. Advances in ion chromatography for environmental analysis. *Journal of Chromatography A*, v. 1624, p. 461–478, 2020.

LIU, X. et al. Characterization of secondary inorganic aerosols in PM_{2.5} using ion chromatography. *Atmospheric Environment*, v. 193, p. 162–171, 2018.

MORRISON, R. T.; BOYD, R. N. *Química Orgânica*. 7. ed. São Paulo: LTC, 2014.

PÉREZ, N. et al. Secondary inorganic aerosols in urban environments: formation and implications. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 19, p. 1425–1440, 2019.

POOLE, C. F. *The Essence of Chromatography*. Amsterdam: Elsevier, 2012.

SALDIVA, P. *Meio Ambiente e Saúde: o Desafio das Metrôpoles*. São Paulo: Contexto, 2018.

SILVA, J. F.; VIEIRA, P. R. *Qualidade do Ar e Desenvolvimento Sustentável*. Rio de Janeiro: FGV, 2017.

SILVA, M. L. et al. *Poluição Atmosférica e Impactos à Saúde nas Metrôpoles Brasileiras*. São Paulo: Annablume, 2025.

SMALL, H.; STEVENS, T. S.; BAUMAN, W. C. Novel ion exchange chromatographic method using conductimetric detection. *Analytical Chemistry*, v. 47, n. 11, p. 1801–1809, 1975.

SNYDER, L. R.; KIRKLAND, J. J.; DOLAN, J. W. *Introduction to Modern Liquid Chromatography*. 3rd ed. Hoboken: Wiley, 2010.

TONG, X. et al. Ion chromatography–mass spectrometry in environmental chemistry: developments and applications. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, v. 140, p. 116277, 2021.

WANG, Y. et al. Speciation and determination of heavy metals in environmental samples by IC-MS. *Analytica Chimica Acta*, v. 1100, p. 120–135, 2020.

WEISS, J. *Handbook of Ion Chromatography*. 3. ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2004.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). *Ambient Air Pollution: Health Impacts*. Geneva: WHO Press, 2021.

ZHU, C. et al. Microfluidic sensors for environmental monitoring of ions and pollutants. *Sensors and Actuators B: Chemical*, v. 345, p. 130–145, 2021.