



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO
Instituto de Biociências

**Poluição Atmosférica, Black Carbon e Mudanças Climáticas: Desafios para a
Implementação de Políticas Públicas de Mitigação no Brasil**

Fabiana Barbosa da Silva

Rio de Janeiro
2025

Fabiana Barbosa da Silva

Poluição Atmosférica, Black Carbon e Mudanças Climáticas: Desafios para a
Implementação de Políticas Públicas de Mitigação no Brasil

Monografia do Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao Instituto de Biociências da Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos à obtenção do título de Bacharel em Ciências Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Fonseca de Andrade

Coorientadora: Prof.^a Me. Hedinene Silva da Costa

Rio de Janeiro

2025

Catálogo informatizado pelo(a) autor(a)

d581 da Silva, Fabiana Barbosa
/ Fabiana Barbosa da Silva. -- Rio de Janeiro :
UNIRIO, 2025.
51
Orientador: Daniel Fonseca de Andrade.
Coorientador: Hedinene Silva da Costa.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -
1. Poluição atmosférica. 2. Black carbon. 3. Mudanças
climáticas. I. de Andrade, Daniel Fonseca , orient. II. da
Costa, Hedinene Silva , coorient. III. Título.

Fabiana Barbosa da Silva

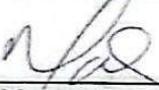
Poluição Atmosférica, Black Carbon e Mudanças Climáticas: Desafios para a
Implementação de Políticas Públicas de Mitigação No Brasil

Monografia do Trabalho de Conclusão de Curso
apresentada ao Instituto de Biociências da
Universidade Federal do Estado do Rio de
Janeiro, como parte dos requisitos à obtenção
do título de Bacharel em Ciências Ambientais.

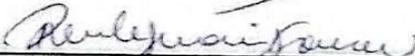
Aprovada em 01/07/2025.



(Prof. Dr. Daniel Fonseca de Andrade, UNIRIO)



(Prof.ª Dr.ª Maylta Brandão dos Anjos, UNIRIO)



(Prof.ª Dr.ª Renata Amorim Almeida Fonseca, UNIRIO)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha avó paterna Tercília (in memoriam), por ter sido a primeira pessoa a me incentivar nos estudos e acreditar nos meus sonhos. E a minha tia Silvia (in memoriam), que continuou a me apoiar quando minha avó se foi.

Ao meu marido Ercílio e meu filho Bruno, pelo suporte fundamental que me deram durante todo o curso, para que eu pudesse transformar esse sonho em realidade

A todos os animais que passaram pela minha vida, todos fazem parte desta conquista de alguma forma. Em especial aos meus atuais filhos do coração: Nicole, Lua, Princesa, Mohamed, Jade, Agnes, Herói, Sebastian e Menininha.

Ao meu orientador Daniel Fonseca de Andrade e a minha coorientadora Hedinene Silva da Costa, por terem aceitado a minha proposta e terem me ajudado na realização.

A todos os colegas que de alguma forma me ajudaram nessa trajetória acadêmica, me impulsionando a acreditar mais na minha capacidade.

“Porque se chamavam homens
Também se chamavam sonhos
E sonhos não envelhecem”.
("Clube da Esquina nº 2", 1972)

RESUMO

O presente estudo analisa como a poluição atmosférica e as partículas de black carbon (BC) se relacionam com as mudanças climáticas, destacando os principais desafios para a aplicação de políticas públicas de mitigação no Brasil. A pesquisa foi realizada por meio de uma revisão bibliográfica e análise de documentos, utilizando uma abordagem qualitativa. O estudo identifica as principais fontes de emissão de BC no país, os efeitos dessas partículas no clima e as leis ambientais voltadas a mitigação da poluição atmosférica em vigor. Os resultados mostram que, mesmo com a existência de normas como a Política Nacional de Qualidade do Ar, ainda há dificuldades econômicas, políticas e operacionais que impedem a eficácia das medidas adotadas. O trabalho reforça a importância de políticas mais integradas e de maior coordenação entre instituições para enfrentar os impactos da poluição do ar e contribuir com medidas mais eficazes no combate às mudanças climáticas no Brasil.

Palavras-chave: poluição atmosférica, black carbon, mudanças climáticas, políticas públicas, Brasil.

ABSTRACT

This study analyzes how air pollution and black carbon (BC) particles are related to climate change, highlighting the main challenges for the implementation of mitigation public policies in Brazil. The research was conducted through a literature review and document analysis, using a qualitative approach. The study identifies the main sources of BC emissions in the country, the effects of these particles on the climate, and the environmental laws currently in force aimed at reducing air pollution. The results show that, despite the existence of regulations such as the National Air Quality Policy, economic, political, and operational obstacles still hinder the effectiveness of the adopted measures. The study emphasizes the importance of more integrated policies and stronger institutional coordination to address the impacts of air pollution and contribute to more effective climate change mitigation efforts in Brazil.

Keywords: air pollution, black carbon, climate change, public policies, Brazil.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Comparação do tamanho do PM _{2,5} com fio de cabelo e grão de areia ... | 19 |
| Figura 2 - (a) Imagem de alta resolução de microscopia eletrônica de transmissão (TEM) de uma esférula de BC (b) Imagem (TEM) de uma partícula típica de fuligem recém-emitidas, que são agregados de esférulas de BC | 20 |
| Figura 3 - Global BC Emissões globais de BC por categorias de fonte e região..... | 21 |
| Figura 4 - Estimativas do forçamento radiativo em relação a 1750..... | 24 |
| Figura 5 - (a) nuvem não perturbada e (b) nuvem poluída | 26 |
| Figura 6 - Panorama do Monitoramento da Qualidade do Ar no Brasil | 40 |
| Figura 7 - Panorama do monitoramento de Material Particulado MP ₁₀ e MP _{2,5} no Brasil | 42 |

LISTA DE QUADROS E TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Portaria, Política Nacional Ambiental e Resoluções sobre o controle da poluição atmosférica..... | 28 |
| Tabela 2 - Padrões de Qualidade do Ar (Resolução CONAMA nº 03/1990) | 30 |
| Quadro 1- Anexo I da Resolução 491/2018. | 31 |
| Quadro 2 - Anexo I da Resolução 506/2024. | 34 |
| Quadro 3 - Anexo II da Resolução 506/2024 | 35 |
| Quadro 4 - Número de estações em cada Região e Estado | 41 |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 12 |
| 1.1 OBJETIVOS..... | 13 |
| 2 METODOLOGIA | 15 |
| 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 17 |
| 3.1 POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA | 17 |
| 3.2 CARACTERÍSTICAS DO <i>BLACK CARBON</i> (BC)..... | 19 |
| 3.3 INFLUÊNCIAS DO BC NAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS..... | 23 |
| 3.4 MAPEAMENTO DAS POLÍTICAS PÚBLICAS DE MITIGAÇÃO DA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA..... | 26 |
| 3.4.1 Do Passado ao Presente: A Construção das Políticas de Controle da Poluição Atmosférica..... | 26 |
| 3.4.2 A Política Nacional de Qualidade do Ar (PNQA) | 31 |
| 3.4.3 Resolução CONAMA Nº 506/2024 | 33 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES | 37 |
| 5 CONCLUSÃO | 43 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 45 |

1 INTRODUÇÃO

A poluição atmosférica se destaca como um dos principais agentes das mudanças climáticas globais, desempenhando um papel crucial no aquecimento da atmosfera e na alteração dos padrões climáticos (IPCC, 2021). A principal causa deste fenômeno é a liberação de gases de efeito estufa pelas atividades antropogênicas. Além desses, as partículas de aerossóis atmosféricos, inicialmente consideradas como elementos de menor interesse no contexto das mudanças climáticas no primeiro relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) de 1990, têm sido alvo de bastante interesse nas discussões científicas atuais.

Um tipo específico de partícula de aerossol conhecido como *black carbon (BC)* tem se destacado, pois sua interação com os gases de efeito estufa influencia diretamente o aquecimento e o equilíbrio radiativo da atmosfera (Jacobson, 2001), apesar de ainda haver grande incerteza sobre a mensuração precisa de seus efeitos (Schroeder et al., 2020). O termo BC é amplamente utilizado na literatura científica internacional para designar partículas carbonáceas formadas por combustão incompleta (Bond et al., 2013).

A poluição do ar e as mudanças climáticas estão profundamente interligadas. A escolha do tema reflete a urgência na abordagem deste problema de magnitude global. O ano de 2024 foi o mais quente já registrado, conforme divulgado pelo Copernicus Climate Change Service (C3S) e pela Organização Meteorológica Mundial (WMO) através do relatório "Estado do Clima Europeu 2024" (ESOTC 2024), ultrapassando 1,5°C os níveis pré-industriais (C3S, 2024).

A poluição do ar no Brasil é regulada por um conjunto de normas e diretrizes que integram a legislação ambiental. O objetivo do trabalho é efetuar uma análise crítica com o propósito de identificar as principais barreiras econômicas, políticas e operacionais que dificultam o avanço das políticas de mitigação nas emissões de poluentes antropogênicos que intensificam as mudanças climáticas, como o BC no âmbito brasileiro.

O presente trabalho está organizado em cinco capítulos: O primeiro capítulo corresponde à introdução, na qual são apresentados o tema da pesquisa, a formulação do problema, os objetivos, bem como a justificativa para a realização do estudo.

O segundo capítulo descreve a metodologia, detalhando os procedimentos adotados para a condução da pesquisa, incluindo o delineamento metodológico, as técnicas de coleta e análise de dados, e as abordagens empregadas para garantir a confiabilidade dos resultados.

No terceiro capítulo, é apresentada a revisão bibliográfica. É neste capítulo que são inseridos os principais conceitos teóricos necessários para o desenvolvimento e compreensão deste trabalho. Inicialmente, foi abordada a poluição atmosférica, com ênfase no BC e suas principais fontes no Brasil. Em seguida são detalhadas as influências que o BC exerce nas mudanças climáticas. E por último é realizado um mapeamento do conjunto de normas e diretrizes que integram a legislação ambiental voltadas para mitigação da poluição atmosférica existentes no Brasil.

No quarto capítulo, encontra-se os resultados e discussões, obtidos com a pesquisa realizada. Nessa seção, os dados obtidos são analisados criticamente e comparados com estudos previamente publicados na área, a fim de contextualizar os achados e verificar sua coerência com o conhecimento científico existente.

No capítulo cinco chegamos à conclusão deste estudo, que buscou efetuar uma análise crítica das políticas públicas de mitigação da poluição atmosférica no Brasil, revelando as principais barreiras econômicas, políticas e operacionais que dificultam seu avanço, destacando as partículas de BC e as influências que elas exercem nas mudanças climáticas. O trabalho se encerra com as Referências Bibliográficas, que reúnem as fontes utilizadas ao longo da pesquisa.

1.1 OBJETIVOS

Geral:

- Efetuar uma análise crítica das políticas públicas de mitigação da poluição atmosférica, com destaque para as partículas de BC, dada a sua influência nas mudanças climáticas.

Específicos:

- Levantar a literatura científica sobre poluição atmosférica, partículas de BC e suas principais fontes no Brasil.

- Identificar os principais impactos das partículas de BC nas mudanças climáticas.
- Mapear as Políticas Públicas voltadas para mitigação da Poluição Atmosférica no Brasil.

2 METODOLOGIA

Este estudo foi desenvolvido por meio de uma revisão bibliográfica, através de uma pesquisa de natureza documental e abordagem qualitativa, com o objetivo de analisar a interação entre a poluição atmosférica, com ênfase no BC, as mudanças climáticas e os desafios associados à implementação de políticas públicas de mitigação no Brasil.

De acordo com Gil (2008, p.50),

A pesquisa bibliográfica é desenvolvida a partir de material já elaborado, constituído principalmente de livros e artigos científicos. A principal vantagem da pesquisa bibliográfica reside no fato de permitir ao investigador a cobertura de uma gama de fenômenos muito mais ampla do que aquela que poderia pesquisar diretamente.

A fundamentação teórica foi construída a partir de fontes disponíveis em bases de dados científicas reconhecidas, como o Google Acadêmico e a SciELO, além de documentos técnicos e relatórios emitidos por instituições nacionais e internacionais de prestígio na área ambiental. Entre essas instituições destacam-se o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA), a União Europeia de Geociências (EGU), a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) e a Organização das Nações Unidas (ONU), entre outras.

Para a seleção do material bibliográfico, foram empregados descritores temáticos específicos, tais como: “Poluição atmosférica”, “Black Carbon”, “Mudanças climáticas”, “Políticas públicas”, “Aerossóis atmosféricos”, “Legislação Ambiental Brasileira” e “Política Nacional de Qualidade do Ar”. Foram analisados, ao todo, 73 documentos e a seleção de fontes considerou, prioritariamente, publicações acadêmicas e documentos técnicos divulgados entre os anos de 2000 e 2024, refletindo o estado atual do conhecimento sobre o tema.

No entanto, também foram incluídos documentos anteriores a esse período, considerados relevantes para a contextualização histórica e normativa do problema. Que foi o caso das legislações brasileiras a partir de 1976, que sinalizam os primeiros esforços institucionais no campo ambiental. Esses materiais foram utilizados para ilustrar a evolução do debate e os fundamentos das abordagens mais recentes.

Além da revisão da literatura científica, foi realizada uma análise documental da legislação brasileira relacionada à poluição atmosférica e à qualidade do ar,

incluindo normas, diretrizes e marcos legais, como a Política Nacional de Qualidade do Ar. A análise documental constituiu o principal instrumento para a geração de dados neste estudo. Esse processo foi conduzido com rigor metodológico, alinhado à compreensão de que a qualidade da pesquisa depende de uma postura reflexiva diante das fontes utilizadas. Por isso, manteve-se um olhar crítico durante toda a análise dos documentos, avaliando o conteúdo e o contexto de cada um (Cellard, 2008).

Os resultados foram redigidos a partir desta análise, permitindo a identificação de lacunas e desafios na implementação dessas políticas públicas e possibilitando uma compreensão abrangente do tema. Ao optar por uma revisão bibliográfica, este estudo assume o compromisso de servir como base para futuras pesquisas e para o fortalecimento de estratégias institucionais no enfrentamento da poluição atmosférica.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

A atmosfera é composta por uma combinação de gases que, ao longo de milhões de anos, alcançou um equilíbrio fundamental para a manutenção da vida na Terra (Guitarrara, 2025). No entanto, as atividades antropogênicas geram emissões que alteram a concentração desses gases, provocando mudanças significativas no clima e no equilíbrio atmosférico. A poluição atmosférica é um dos principais desafios ambientais mundiais (WRI, 2019).

Poluente atmosférico é qualquer substância presente no ar que, devido à sua concentração, o torne inadequado ou prejudicial à saúde, afetando o bem-estar público, a fauna, flora e colocando em risco a segurança e o uso da propriedade, além de interferir nas atividades da população (CETESB, 2024). Segundo o Ministério do Meio Ambiente (Brasil, 2025), a qualidade do ar é resultado da interação de um conjunto complexo de fatores, entre os quais se destacam a quantidade de emissões, a topografia e o resultado das condições meteorológicas da região, que promovem ou dificultam a dispersão de poluentes.

Como há uma grande diversidade de substâncias, a classificação dos poluentes de acordo com a origem é dividida em duas categorias: poluentes primários e poluentes secundários, os primários são emitidos diretamente da sua fonte de emissão e os secundários são formados na atmosfera por meio de reações químicas entre os componentes primários e os naturais existentes na atmosfera (CETESB, 2024).

O nível de poluição atmosférica é determinado pela quantidade de substâncias poluentes no ar. São exemplos de poluentes atmosféricos: Aldeídos (RCHO), Dióxido de Enxofre (SO₂), Dióxido de Nitrogênio (NO₂), Hidrocarbonetos (HC), Material Particulado (PM), Monóxido de Carbono (CO) e Poluentes climáticos de Vida Curta (PCVC)/(SLCPs) (Brasil, 2025).

As fontes de poluição atmosféricas podem ser fixas ou móveis. As fontes fixas de poluição atmosférica são aquelas localizadas em pontos específicos, como chaminés de indústrias, permitindo avaliação direta na fonte. Já as fontes móveis referem-se a emissões provenientes de fontes em movimento, como veículos automotores, trens, aviões e embarcações marítimas (Brasil, 2025).

A Organização Mundial da Saúde (OMS) começou a recomendar padrões internacionais de qualidade do ar em 1987 e, posteriormente, diretrizes globais em 2005 (OPAS, 2021). Além disso, a OMS tem elaborado estudos e relatórios para auxiliar gestores públicos no monitoramento e controle da poluição atmosférica em suas localidades (WHO, 2017).

A OMS recomenda que os governos considerem suas particularidades locais ao formular políticas de qualidade do ar, analisando fatores como localização geográfica, clima, contexto econômico, social e político, além da capacidade de gestão ambiental do país (WHO, 2005). Os valores de referência sugeridos pela OMS devem servir como orientação, pois cada nação deve definir seus próprios padrões conforme suas especificidades.

No entanto, se estes padrões forem inadequados, podem comprometer a saúde pública. Assim, há uma linha tênue entre as diretrizes recomendadas e os padrões efetivamente adotados por cada país. De acordo com a Organização das Nações Unidas (2024), 99% da população mundial respira ar que excede os limites de qualidade do ar estabelecidos pela organização.

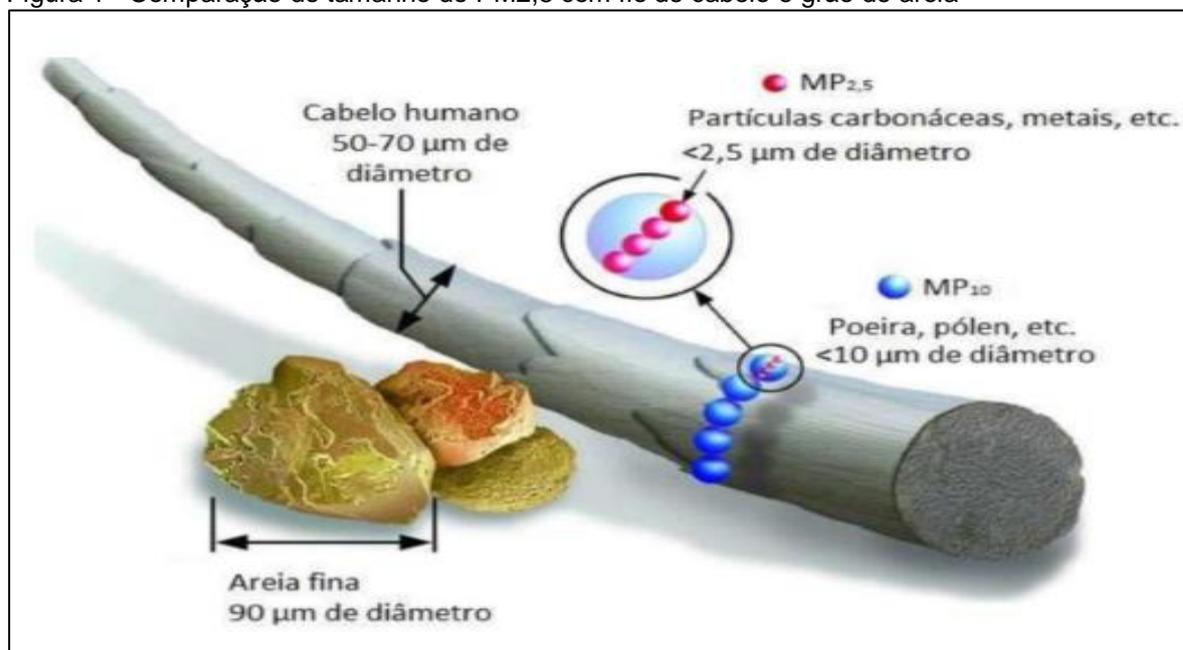
Porém esses problemas não se limitam à saúde humana. O ar atmosférico tem a função essencial de sustentar a vida dos seres vivos. Para isso, é necessário que sua composição biológica esteja em conformidade com determinados padrões de qualidade, se sua pureza for seriamente afetada, sua função ecológica será comprometida

Com o desenvolvimento das indústrias e da sociedade, os seres humanos se tornaram grandes emissores de poluentes antropogênicos, dentre os quais dos aerossóis atmosféricos. De acordo com Seinfeld e Pandis (2006), os aerossóis atmosféricos são formados por um conjunto de partículas sólidas ou líquidas em suspensão na atmosfera, que possuem uma diversidade de tamanhos, formas, composições químicas e propriedades físicas. Podem possuir origem natural ou antropogênica.

Estas partículas possuem tamanhos que variam de poucos nanômetros a centenas de micrômetros de diâmetro. As partículas que possuem diâmetros maiores que $2.5\mu\text{m}$ denominados de partículas grossas, são exemplos os aerossóis marinhos, poeira de solo, emissões vulcânicas e partículas biogênicas. Os que possuem diâmetros menores que $2.5\mu\text{m}$ são denominados de partículas finas, que são o caso da maioria destas partículas, incluindo o BC, que é um aerossol antropogênico (US-

EPA, 2012). Geralmente, as partículas originadas dessas emissões possuem diâmetro inferior a $1\ \mu\text{m}$ (Figura 1).

Figura 1 - Comparação do tamanho do PM_{2,5} com fio de cabelo e grão de areia



Fonte: (US-EPA,2024).

Os aerossóis atmosféricos possuem um ciclo de vida pequeno. (Seinfeld & Pandis, 2006). Partículas de aerossóis como o BC são poluentes climáticos de vida curta (PCVC)/(SLCPs), por serem substâncias que permanecem na atmosfera por um período relativamente curto, no caso do BC variando de alguns dias a semanas (CCAC, 2019). Apesar desse tempo reduzido, eles exercem um impacto significativo no aquecimento global ao longo de sua existência.

Muitos desses poluentes não apenas influenciam as mudanças climáticas, mas também contribuem para a degradação da qualidade do ar (CCAC, 2022). De acordo com Bond et al. (2013), após serem lançadas na atmosfera, as partículas de aerossóis interagem com o ambiente através de vários processos físico-químicos. Estes processos são de total importância, pois afetam as propriedades óticas e de nucleação de nuvens do aerossol, causando alterações no equilíbrio radiativo da Terra, nos padrões de temperatura, de precipitação e formação de nuvens.

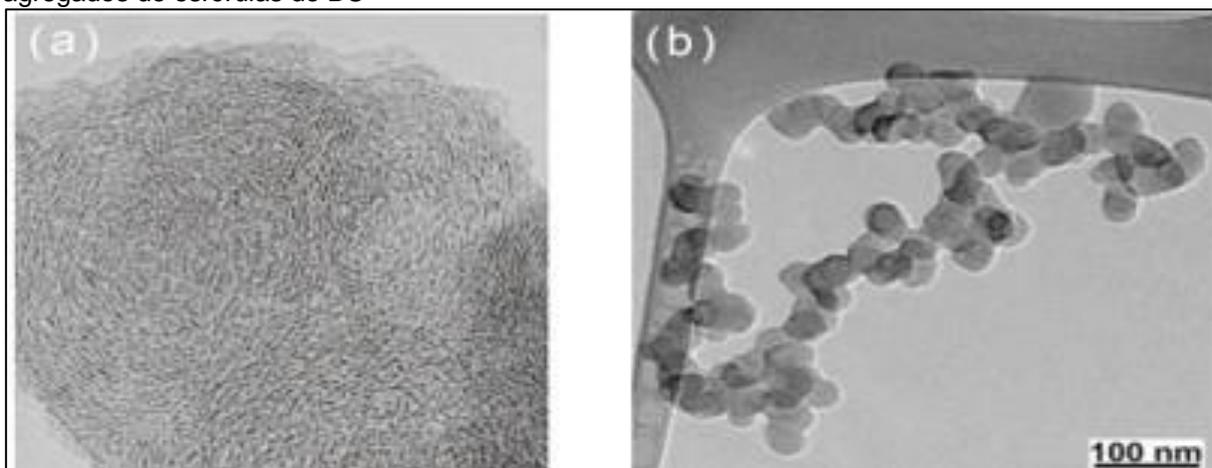
3.2 CARACTERÍSTICAS DO *BLACK CARBON* (BC)

O BC, geralmente é descrito na literatura científica como uma partícula de aerossol composto por material carbonáceo e produzido pela queima incompleta de combustíveis fósseis e biomassa (Petzold et al., 2013). Ele é formado principalmente em chamas que são lançadas diretamente para a atmosfera e possuem uma combinação única de propriedades físicas e químicas. As partículas de aerossol de BC estão predominantemente presentes na fração fina do material particulado (PM_{2,5}) (US-EPA, 2024).

O BC se diferencia de outras formas de carbono presentes nos aerossóis atmosféricos devido a um conjunto singular de propriedades físicas. Ele possui alta capacidade de absorção de luz visível. Além disso, é refratário, mantendo sua estrutura mesmo em temperaturas extremamente elevadas, com ponto de vaporização superior a 3500 K. Também se caracteriza por sua insolubilidade em água, solventes orgânicos como metanol e acetona, e demais componentes dos aerossóis atmosféricos. (Bond et al., 2013).

Estruturalmente, o BC é formado por pequenas esférulas, com dimensões variando de 0,001 a 0,005 micrômetros (μm), que se agrupam para formar partículas maiores, que variam entre 0,1 e 1 micrômetros (μm) (Ramanathan e Carmichael, 2008). Essas partículas possuem a capacidade de se aglomerar e formar estruturas maiores, conhecidas como agregados (Figura, 2).

Figura 2 - (a) Imagem de alta resolução de microscopia eletrônica de transmissão (TEM) de uma esférula de BC (b) Imagem (TEM) de uma partícula típica de fuligem recém-emitidas, que são agregados de esférulas de BC



Fonte: EPA (2012).

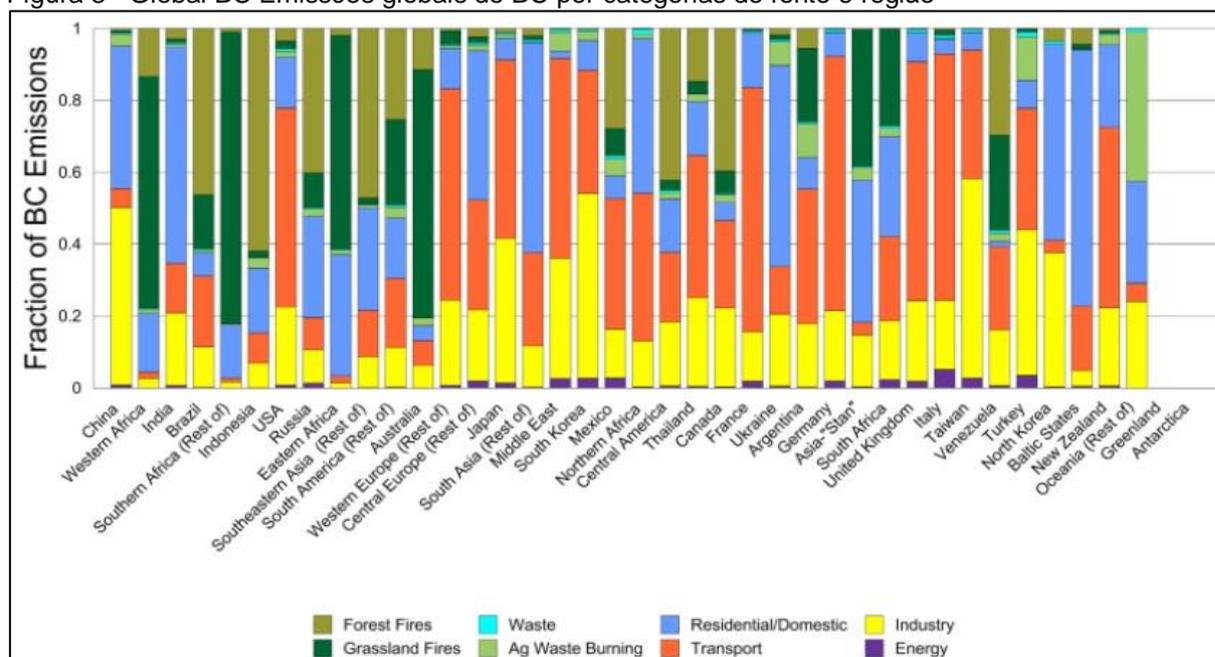
As partículas nessa faixa de tamanho possuem dimensões próximas aos comprimentos de onda emitidos pelo sol, o que as torna particularmente eficientes em

dispersar ou absorver essas radiações (Schafer et al., 2022). O BC possui baixa reatividade química no ambiente atmosférico, sendo removido principalmente por meio de processos de deposição seja úmida ou seca. Normalmente, o BC está presente em partículas de aerossóis que incorporam diferentes substâncias, muitas das quais são emitidas simultaneamente a partir das mesmas fontes.

As principais fontes de emissão de BC podem ser reunidas em poucas categorias, como motores a diesel, indústria, combustível sólido residencial e queima a céu aberto, principalmente de florestas e savanas. As emissões de carbono negro por outros tipos de combustão dependem da região (US-EPA, 2012).

O Brasil com sua grande extensão territorial, diversidade de ecossistemas e características socioeconômicas, enfrenta particularidades que tornam o enfrentamento da poluição atmosférica bastante complexo (Simoni et al., 2021). As principais fontes de emissão de BC no Brasil são: a queima de biomassa, os transportes e a indústria. Para os autores, cada uma delas possui características, próprias que influenciam a distribuição espacial e os impactos das emissões no país. A Figura 3 apresenta as emissões de BC em oito setores, abrangendo 38 regiões e países, incluindo o Brasil.

Figura 3 - Global BC Emissões globais de BC por categorias de fonte e região



Fonte: EPA (2012).

A queima de biomassa é uma das principais responsáveis por essas emissões no país, provenientes principalmente de queimadas que ocorrem em regiões como a

Amazônia e o Cerrado. Entende-se por queimada o processo de combustão de biomassa, que pode ser desencadeado tanto por causas naturais quanto antropogênicas (Andreae, 2019). Essa prática acontece tanto de forma planejada, na limpeza de áreas para uso agrícola, mas principalmente de forma desordenada, em queimadas ilegais e desmatamento.

O Brasil registrou recordes de temperatura e eventos climáticos extremos em 2023, impactando diretamente a qualidade do ar em diversas regiões, segundo o relatório *State of the Climate in Latin America and the Caribbean 2023*, publicado pela Organização Meteorológica Mundial (WMO). O sistema MapBiomas Alerta identificou a perda de aproximadamente 1 milhão de hectares por queimadas no mesmo ano, com maior incidência nos biomas Amazônia e Cerrado.

De acordo com Morais et al. (2022), sobre medições de longo prazo da profundidade óptica do aerossol (AOD) e da (AOD) de absorção (AAOD), que estimam a fração e a sazonalidade das contribuições de BC em sítios da Amazônia brasileira por sensoriamento remoto, foi constatado que os locais com maiores taxas de conversão de floresta para agricultura possuem os maiores valores de AOD e AAOD total, em qualquer estação do ano. Concluindo-se que este resultado está relacionado à atividade de desmatamento.

Outro grande causador de poluição atmosférica no Brasil é o setor de transporte, principalmente em áreas urbanas. É importante ressaltar que o transporte rodoviário foi o principal meio de locomoção urbana em 2018, representando aproximadamente 63% dos deslocamentos em cidades com mais de um milhão de habitantes (ANTP, 2020).

Nas regiões metropolitanas como São Paulo e Rio de Janeiro, devido ao tráfego intenso de veículos, as emissões são bastante elevadas. A maior parte dessas emissões se deve à grande quantidade de veículos movidos a diesel, principalmente no setor de transporte rodoviário que em sua maioria opera com veículos antigos e que não recebem uma manutenção adequada (CETESB, 2020).

Outro grande problema é a pequena adesão às tecnologias limpas. Segundo Souza e Ribeiro (2021), essas emissões urbanas de BC possuem efeitos diretos no aumento das temperaturas urbanas e na saúde pública, afetando principalmente as populações mais vulneráveis. A emissão de poluentes pelo transporte rodoviário é influenciada por diversos fatores, como o tipo de tecnologia utilizada nos veículos, a

gestão do tráfego urbano, o planejamento do uso do solo e as políticas de transporte adotadas (CETESB, 2020).

O setor industrial também contribui de forma significativa no que diz respeito a poluição atmosférica e emissões de BC, porém em uma escala menor que as outras duas fontes (Lamarque et al., 2010). A poluição do ar gerada pelas atividades industriais e pela produção de energia tem origem em fontes estacionárias. Essas fontes são caracterizadas como qualquer estrutura, equipamento ou processo fixo que libera poluentes na atmosfera, seja por emissões diretas ou dispersas (Brasil, 2006).

As indústrias geram uma grande quantidade de emissões, causando uma redução da qualidade do ar tanto em áreas industriais como metropolitanas (Simoni, 2021). Essas emissões são geradas principalmente pelas indústrias siderúrgicas, cimenteiras e pelas usinas termelétricas (que têm seu uso intensificado em períodos de seca). No setor industrial, o controle preventivo da poluição do ar ocorre por meio do licenciamento ambiental, que estabelece limites de emissão e considera a qualidade do ar da região, e o cumprimento dessas licenças envolvem fiscalização e monitoramento contínuo ou periódico das emissões (Brasil, 1981).

3.3 INFLUÊNCIAS DO BC NAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

O clima exerce um papel essencial no controle dos ciclos naturais dos elementos químicos na biosfera. Mudanças nas condições climáticas impactam diretamente os mecanismos físicos, químicos e biológicos que são sensíveis à variação de temperatura e disponibilidade hídrica (IPCC, 2019).

O BC exerce diversas influências sobre o sistema climático terrestre, tanto de maneira direta, ao modificar o balanço de radiação, quanto de forma indireta, ao afetar a formação de nuvens e o ciclo hidrológico (IPCC, 2023). Embora constitua apenas uma pequena fração do material particulado atmosférico, sua capacidade de absorver radiação solar e alterar processos microfísicos de nuvens lhe confere um papel de destaque no aquecimento global e nas dinâmicas climáticas regionais.

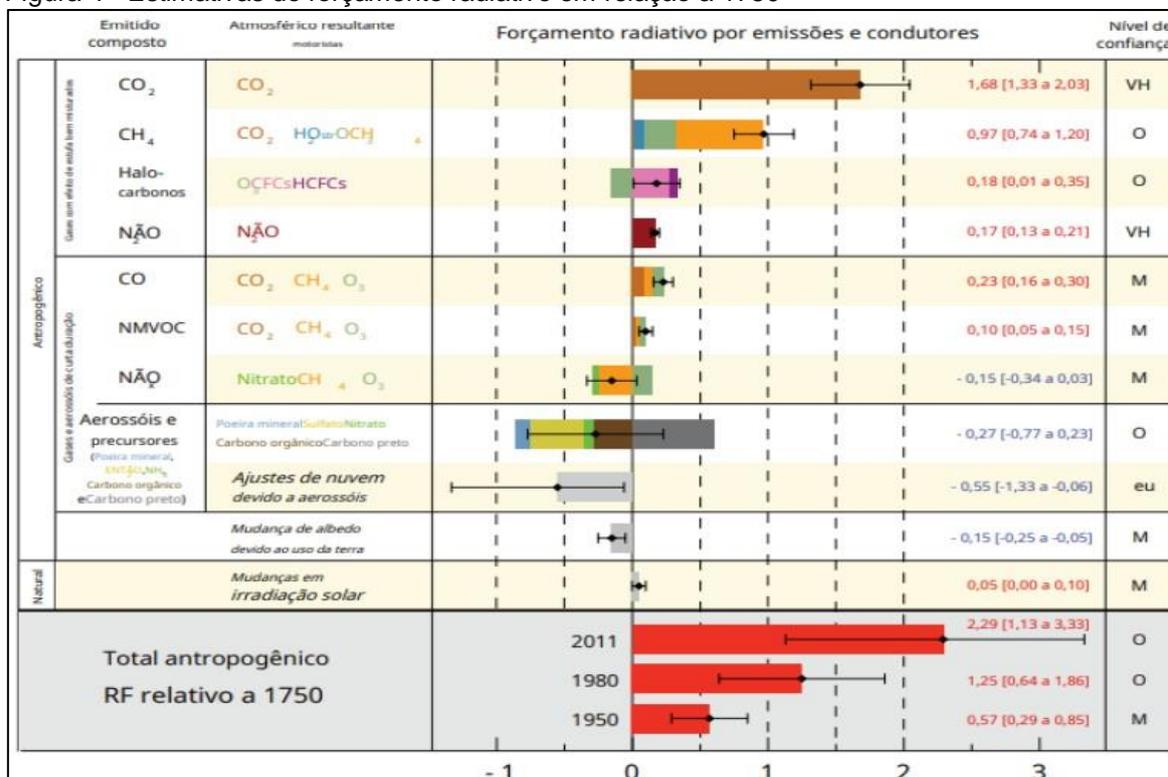
Além disso, ele interage com o gelo, acelerando o seu derretimento e impactando significativamente o equilíbrio climático em regiões frias (Bond et al., 2013). No entanto, considerando que o Brasil não apresenta essa configuração climática, essas interações não foram abordadas nesse estudo.

Ao contrário dos aerossóis de sulfatos, que exercem um efeito de resfriamento ao aumentar a refletividade da atmosfera, e refletir a luz solar de volta ao espaço, os aerossóis de BC contribuem para o aquecimento atmosférico de forma direta, ao absorver a radiação solar e produzir um forçamento radiativo positivo direto (Bond et al., 2013).

O forçamento radiativo é uma medida de como um poluente afeta o equilíbrio entre a radiação solar de entrada e a radiação infravermelha de saída, geralmente calculado como uma mudança relativa às condições pré-industriais definidas em 1750. Esse processo, além de aquecer a atmosfera, modifica os gradientes de temperatura, influenciando a circulação atmosférica (US-EPA, 2012).

Segundo o 5º Relatório de Avaliação do IPCC (Figura 4), o forçamento radiativo direto do BC na atmosfera é de $+0,6 \text{ W/m}^2$, com RF positivo levando a um aquecimento e RF negativo a um resfriamento. Apesar de constituir uma fração minoritária do material particulado ($\text{PM}_{2,5}$) atmosférico, o BC é reconhecido como um poderoso absorvedor de radiação.

Figura 4 - Estimativas do forçamento radiativo em relação a 1750



Fonte: IPCC (2013).

Alguns modelos climáticos demonstram que os impactos das emissões de BC no aquecimento global são comparados ao de outros poluentes atmosféricos de longo prazo, como o dióxido de carbono (CO_2), quando considerado em uma escala temporal de décadas (Bond et al., 2013). Além disso, o BC reduz a quantidade de radiação que atinge a superfície terrestre, influenciando processos como a evaporação, a transpiração e a geração de energia solar (US-EPA, 2012).

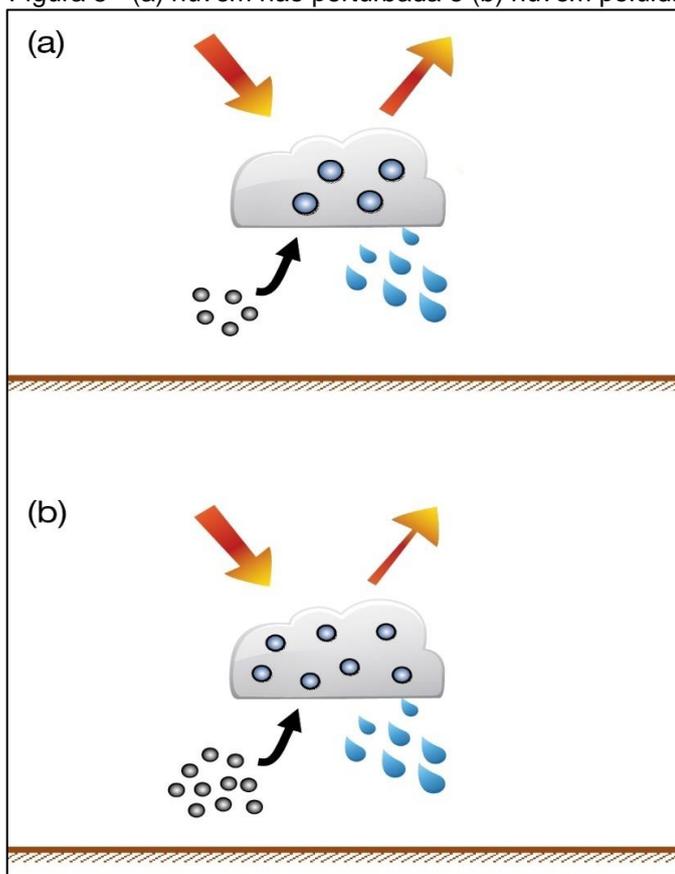
Estudos indicam que o BC gerado por queimadas contribui para o aquecimento localizado da atmosfera, o que pode interferir na dinâmica de ventos e no transporte de umidade (Artaxo et al., 2013). A produtividade agrícola pode ser reduzida em áreas com grandes concentrações de BC, já que menos radiação estaria disponível para a fotossíntese (HOLANDA, 2013).

De forma indireta, os aerossóis de BC contribuem para mudanças no balanço energético da Terra, ao modificar as propriedades ópticas e microfísicas das nuvens (IPCC, 2013). Ele afeta sua capacidade de refletir ou absorver radiação, influenciando a formação de nuvens e o ciclo hidrológico, causando secas em algumas áreas e chuvas intensas em outras.

De acordo com Artaxo et al. (2003), para que uma gotícula de nuvem se forme, são necessários dois elementos essenciais: vapor de água e um núcleo de condensação de nuvens (NCN). Esse núcleo é uma pequena partícula de aerossol, geralmente com dimensões entre 1 e 15 micrômetros, ao redor da qual o vapor de água se condensa, originando a gotícula microscópica. Com o tempo, essa gotícula aumenta de tamanho por meio de diversos processos físicos até atingir um ponto crítico e precipitar em forma de chuva.

A presença de partículas de BC pode alterar o tamanho, a quantidade e a distribuição das gotículas de água (Figura 5). Quando uma nuvem está poluída, com grandes concentrações de BC, ela torna-se mais brilhante, mais refletiva (aumentando seu albedo, que significa elevar a capacidade de reflexão da luz solar por parte das nuvens), gera gotículas menores e em maior quantidade, porém menos propensas a precipitar, pois as gotículas menores têm maior dificuldade para se combinar e formar gotas de chuva (Ramanathan et al., 2001). Essas interações, apesar de serem bem documentadas, ainda apresentam incertezas significativas devido à complexidade dos processos envolvidos e às variáveis climáticas regionais (Bond et al., 2013).

Figura 5 - (a) nuvem não perturbada e (b) nuvem poluída



Fonte: Adaptada, IPCC (2013).

O ciclo hidrológico é afetado de várias maneiras pelo BC, direta ou indiretamente, através de modificações nos padrões de precipitação e de suas interações com a radiação solar (Ramanathan et al., 2001). No contexto brasileiro, as emissões de BC provenientes de queimadas na Amazônia têm efeitos significativos nos fluxos de umidade da região. Segundo estudos de Artaxo et al. (2013) o BC possui a capacidade de reduzir a formação de nuvens rasas e intensificar a formação de nuvens profundas, o que pode levar a mudanças nos regimes de chuvas, aumentando assim a frequência de eventos extremos, como chuvas intensas seguidas por períodos de seca prolongada.

3.4 MAPEAMENTO DAS POLÍTICAS PÚBLICAS DE MITIGAÇÃO DA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

3.4.1 Do Passado ao Presente: A Construção das Políticas de Controle da Poluição Atmosférica

A partir da Revolução Industrial, as atividades humanas têm provocado transformações no meio ambiente não apenas para a garantia da sobrevivência, mas também para atender a interesses econômicos. Tanto a superfície terrestre, quanto a atmosfera vêm passando por diversas alterações. As primeiras discussões sobre questões ambientais surgiram nesse período, mas, nas últimas décadas, o debate entre desenvolvimento econômico e preservação ambiental tem impulsionado a busca por soluções equilibradas (Lopes, 2010).

Segundo Goldemberg e Barbosa (2004), diversos acontecimentos levaram as sociedades industriais e suas lideranças políticas a repensarem a questão ambiental, resultando na criação de legislações específicas para sua proteção. A preocupação com a questão ambiental ganhou força a partir de meados do século XX, embora a industrialização dos países capitalistas tenha começado no século XVIII (Goldemberg; Barbosa, 2004).

No Brasil, já na década de 1960, surgiram os primeiros dispositivos legais com uma preocupação mais concreta com a proteção ambiental. Em São Paulo, foi criada a autarquia Fomento Estadual de Saneamento Básico (FESB), que incluía o Centro Tecnológico de Saneamento Básico (CETESB), inicialmente voltado para o saneamento ambiental, sendo hoje referência no monitoramento da poluição atmosférica (CETESB, 2018).

Na década de 1970, as questões ambientais começaram a ser debatidas com maior frequência e profundidade, ganhando maior destaque em nível global. Entre essas questões, a poluição atmosférica ocupa um papel central, pois os poluentes no ar estão diretamente ligados a diversos fenômenos ambientais, cujos impactos se intensificam à medida que suas concentrações aumentam na atmosfera.

Neste mesmo período, em 1972, foi realizada a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano, em Estocolmo, Suécia. Esse evento reuniu chefes de Estado para debater o direito universal a um ambiente saudável e sustentável (United Nations, 1972). No Brasil, como reflexo dessa conferência, foi criado o Decreto Federal nº 73.030, de 30 de outubro de 1973, instituindo a Secretaria Especial do Meio Ambiente (SEMA) (Pott Estrela, 2017). Esse órgão passou a desempenhar um papel fundamental na discussão das questões ambientais junto à sociedade (Rios; Araújo, 2005).

No caso da poluição atmosférica, a regulamentação no Brasil é relativamente recente e ainda enfrenta desafios, como defasagem das normas e fiscalização

limitada (Simoni et al., 2021). O Brasil passou por intenso processo de industrialização e urbanização a partir da metade do século XX, e apesar do conhecimento dos efeitos da poluição atmosférica sobre o meio ambiente, a preocupação com o tema só começou a se expressar em 1976, quando o Ministério do Interior publicou a Portaria MINTER nº 231, de 27 de abril de 1976, que visava a estabelecer padrões nacionais de qualidade do ar. (São Paulo, 2010). Conforme tabela I abaixo:

Tabela 1 - Portaria, Política Nacional Ambiental e Resoluções sobre o controle da poluição atmosférica

| Ano | Legislação | Descrição |
|------|--|--|
| 1976 | Portaria MINTER nº231 | Primeira legislação federal a abordar a poluição atmosférica no Brasil. |
| 1981 | Política Nacional do Meio Ambiente Lei nº6938/1981 | Criou o CONAMA, órgão responsável por estabelecer normas e padrões ambientais, incluindo o controle da poluição do ar. |
| 1986 | Resolução CONAMA nº 18 | Instituiu o Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE), visando reduzir as emissões de poluentes por veículos automotores. |
| 1989 | Resolução CONAMA nº005/1989 | Estabeleceu o Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar (PRONAR), definindo diretrizes para a gestão da qualidade do ar no país. |
| 1990 | Resolução CONAMA nº003/1990 | Dispôs sobre os padrões de qualidade do ar previstos no PRONAR. |
| 2006 | Resolução CONAMA nº 382 26/12/2006 | Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. |
| 2018 | Resolução CONAMA nº 491/2018 | Atualizou os padrões nacionais de qualidade do ar, visando à proteção da saúde pública. |
| 2024 | Lei nº 14.850 | Instituiu a Política Nacional de Qualidade do Ar. |
| 2024 | Resolução CONAMA nº 506/2024 | Estabeleceu novos padrões nacionais de qualidade do ar, com valores mais restritivos. |

Fonte: Elaboração pela autora (2025).

Em 1981, a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA) criou o CONAMA (BRASIL,1981), responsável por estabelecer normas e padrões ambientais, incluindo o controle da poluição do ar. Embora alguns padrões estaduais de qualidade do ar já tivessem sido estabelecidos antes, como no caso de São Paulo em 1976 (SÃO PAULO, 1976; CETESB, 2017).

Um marco nacional sobre os reais impactos da poluição do ar ocorreu na década de 1980, quando a cidade de Cubatão em São Paulo ganhou destaque mundial, sendo chamada de "Vale da morte", e classificada como a mais poluída do planeta, segundo a revista Ciência Hoje (1982). Estudos comprovaram a ocorrência de chuva ácida e prejuízos significativos à fauna e à flora (CETESB, 2018).

A cidade de Cubatão tornou-se um exemplo dos graves impactos da má gestão ambiental no Brasil, sendo frequentemente comparada a episódios históricos mundiais de poluição atmosférica, como o *smog* que atingiu Londres em 1952, causando 1600 mortes. Esses eventos extremos reforçaram a necessidade de uma governança ambiental mais eficaz e estimularam a criação de estruturas voltadas ao controle da poluição. Nesse sentido, um marco importante foi a criação da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) em 1970, uma das primeiras agências de proteção ambiental que tinha como um dos objetivos o monitoramento e a avaliação da qualidade do ar.

No Brasil, iniciativas similares começaram a ser desenvolvidas nas décadas seguintes. Em 1986, foi criado o Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE), com a intenção de mitigar as emissões do setor de transporte por meio da inclusão de padrões mais rigorosos de emissão e o investimento na melhoria da qualidade dos combustíveis, por meio de várias fases de implementação (Brasil, 1986).

Em 1989, foi instituído o Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar (PRONAR), com estratégias para reduzir a poluição atmosférica, como limites de emissão de poluentes e criação de uma rede nacional de monitoramento da qualidade do ar (Brasil, 1989). A Resolução CONAMA nº 003/90 estabeleceu os padrões de qualidade do ar definidos pelo PRONAR, que fixou limites para os seguintes poluentes: Partículas Totais em Suspensão, Dióxido de Enxofre, Monóxido de Carbono, Ozônio, Fumaça, Partículas Inaláveis e Dióxido de Nitrogênio (Brasil, 1990), conforme tabela 2, abaixo:

Tabela 2 - Padrões de Qualidade do Ar (Resolução CONAMA nº 03/1990)

| Poluente Atmosférico | Período de Referência | Padrão Primário | Padrão Secundário |
|--|------------------------------|--|--|
| Partículas Inaláveis (PI / PM10) | 24 horas | 150 µg/m ³ | 150 µg/m ³ |
| Partículas Inaláveis (PI / PM10) | Média anual | 50 µg/m ³ | 50 µg/m ³ |
| Dióxido de Enxofre (SO ₂) | 24 horas | 365 µg/m ³ | 100 µg/m ³ |
| Dióxido de Enxofre (SO ₂) | Média anual | 80 µg/m ³ | 40 µg/m ³ |
| Dióxido de Nitrogênio (NO ₂) | 1 hora | 320 µg/m ³ | 190 µg/m ³ |
| Dióxido de Nitrogênio (NO ₂) | Média anual | 100 µg/m ³ | 100 µg/m ³ |
| Ozônio (O ₃) | 1 hora | 160 µg/m ³ | 160 µg/m ³ |
| Fumaça | 24 horas | 150 µg/m ³ | 100 µg/m ³ |
| Fumaça | Média anual | 60 µg/m ³ | 40 µg/m ³ |
| Monóxido de Carbono (CO) | 8 horas | 10.000 µg/m ³ (≈ 9 ppm) | 10.000 µg/m ³ (≈ 9 ppm) |
| Monóxido de Carbono (CO) | 1 hora | 40.000 µg/m ³ (≈ 35 ppm) | 40.000 µg/m ³ (≈ 35 ppm) |
| Partículas Totais em Suspensão | 24 horas | 240 µg/m ³ | 150 µg/m ³ |
| Partículas Totais em Suspensão | Média anual | 80 µg/m ³ | 60 µg/m ³ |

Fonte: Adaptado pela autora de BRASIL, 1990 (adaptação em 2025).

A Resolução CONAMA nº 382/2006 representou um marco importante ao estabelecer limites máximos de emissão para poluentes atmosféricos provenientes de fontes fixas, como indústrias e usinas termelétricas. Essa medida buscou fortalecer o controle sobre setores responsáveis por grande parte das emissões locais, contribuindo para a padronização dos critérios de licenciamento ambiental e a mitigação dos impactos à saúde pública e ao meio ambiente (Brasil, 2006).

Após 28 anos a Resolução CONAMA nº 03/1990 (Brasil,1990) foi revogada pela primeira vez pela Resolução nº 491/2018, (Brasil,2018), que alterou os padrões nacionais de qualidade do ar e introduziu o monitoramento do material particulado fino (PM 2,5). Essa evolução normativa culmina na consolidação da Política Nacional de Qualidade do Ar, tratada a seguir.

Quadro 1- Anexo I da Resolução 491/2018.

| Poluente Atmosférico | Período de Referência | PI-1 | PI-2 | PI-3 | PF | |
|---|-----------------------|-------------------|------------------|-------------------|-------------------|-----|
| | | µg/m ³ | µ/m ³ | µg/m ³ | µg/m ³ | ppm |
| Material Particulado - MP10 | 24 horas | 120 | 100 | 75 | 50 | - |
| | Anual ¹ | 40 | 35 | 30 | 20 | - |
| Material Particulado - MP2.5 | 24 horas | 60 | 50 | 37 | 25 | - |
| | Anual ¹ | 20 | 17 | 15 | 10 | - |
| Dióxido de Enxofre - SO2 | 24 horas | 125 | 50 | 30 | 20 | - |
| | Anual ¹ | 40 | 30 | 20 | - | - |
| Dióxido de Nitrogênio - NO2 | 1 hora ² | 260 | 240 | 220 | 200 | - |
| | Anual ¹ | 60 | 50 | 45 | 40 | - |
| Ozônio - O3 | 8 horas ³ | 140 | 130 | 120 | 100 | - |
| Fumaça | 24 horas | 120 | 100 | 75 | 50 | - |
| | Anual ¹ | 40 | 35 | 30 | 20 | - |
| Monóxido de Carbono - CO | 8 horas ³ | - | - | - | - | 9 |
| Partículas Totais em Suspensão - PTS | 24 horas | - | - | - | 240 | - |
| | Anual ⁴ | - | - | - | 80 | - |
| Chumbo - Pb5 | Anual ¹ | - | - | - | 0.5 | - |
| 1 - média aritmética anual | | | | | | |
| 2 - média horária | | | | | | |
| 3 - máxima média móvel obtida no dia | | | | | | |
| 4 - média geométrica anual | | | | | | |
| 5 - medido nas partículas totais em suspensão | | | | | | |

Fonte: Diário Oficial da União (Brasil, 2018).

3.4.2 A Política Nacional de Qualidade do Ar (PNQA)

A Política Nacional de Qualidade do Ar (PNQA) foi instituída como um desdobramento do compromisso do Brasil com a promoção de um ambiente equilibrado, conforme estabelecido pela Constituição Federal de 1988 (Brasil, 1988). A PNQA tem como principal objetivo assegurar que os níveis de poluição atmosférica sejam mantidos em padrões que não prejudiquem a saúde, o meio ambiente e o desenvolvimento sustentável (Brasil, 2024). É marco regulatório no Brasil, estabelecendo as diretrizes e ferramentas para o monitoramento e controle da poluição atmosférica. Foi decretada e sancionada no dia 02 de maio de 2024.

A PNQA estabelece princípios, objetivos e instrumentos para a gestão da qualidade do ar em todo o território nacional. Essa legislação é aplicável tanto a pessoas físicas quanto jurídicas, públicas ou privadas, que sejam responsáveis pela emissão de poluentes atmosféricos, controle da poluição e gestão da qualidade do ar.

Para garantir a sua efetividade, são definidos conceitos essenciais, como gestão da qualidade do ar, padrões de qualidade e controle de emissões.

Os princípios norteadores da PNQA incluem a proteção da saúde pública e a conservação ambiental, com ênfase na prevenção e precaução contra danos à qualidade do ar. Outro princípio relevante é o da responsabilidade compartilhada, que estimula a cooperação entre governo, setor privado e sociedade civil para promover a gestão sustentável da qualidade do ar. Também são destacados o princípio do poluidor-pagador, que responsabiliza os emissores pelos custos da poluição, e a transparência, garantindo acesso público às informações (Brasil, 2024).

Como objetivos principais da PNQA, podemos destacar a promoção de tecnologias limpas, o aprimoramento do monitoramento da qualidade do ar e o fornecimento de informações atualizadas para a sociedade. Essa medida fortalece a gestão da qualidade do ar dentro dos órgãos e entidades do Sistema Nacional do Meio Ambiente (Sisnama) (Brasil, 1981).

Os instrumentos que compõem a implementação e o funcionamento da PNQA incluem o estabelecimento de limites máximos de emissão e padrões de qualidade do ar, além do monitoramento contínuo e a elaboração de inventários de emissões atmosféricas. O Sistema Nacional de Gestão da Qualidade do Ar (MonitorAr), visa integrar e disseminar informações sobre a qualidade do ar no Brasil. Os padrões nacionais de qualidade do ar que integrarão a PNQA, serão estabelecidos pela União, por meio do CONAMA.

A União, por meio do Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, será responsável pela elaboração do Plano Nacional de Gestão da Qualidade do Ar, instrumento com vigência por prazo indeterminado e perspectiva de duração de 20 (vinte) anos, devendo ser atualizado a cada 4 (quatro) anos. Adicionalmente, os órgãos ambientais estaduais e do Distrito Federal deverão elaborar, no prazo máximo de 2 (dois) anos após a publicação do respectivo inventário de emissões de poluentes atmosféricos, seus próprios Planos Estaduais ou Distrital de Gestão da Qualidade do Ar.

As estações de monitoramento da qualidade do ar possuem papel fundamental na obtenção de dados para a gestão ambiental e para o licenciamento de atividades potencialmente poluidoras. A União, por meio do Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, tem o papel de fomentar e capacitar tecnicamente os órgãos

responsáveis, além de elaborar e manter atualizado um Guia Técnico para a avaliação e monitoramento da qualidade do ar em conjunto com os órgãos estaduais e distritais.

Os Estados e o Distrito Federal ficam com a responsabilidade de coordenar ações de monitoramento local, como o Programa de Inspeção e Manutenção de Veículos, além de integrar os dados ao MonitorAr, para que assim sejam garantidos a transparência e a acessibilidade das informações. Também devem elaborar anualmente um Relatório de Avaliação da Qualidade do Ar, que deve ser público e redigido de forma clara e acessível.

Conforme a Lei, para que sejam definidos limites máximos de emissão para fontes de poluição atmosférica, devem ser considerados vários fatores. Primeiramente, os limites de emissão devem ser definidos com base nas melhores práticas e tecnologias disponíveis, acessíveis e já desenvolvidas em escala que permita sua aplicação prática e a viabilidade técnica, econômica e financeira das tecnologias disponíveis.

A PNQA também prevê incentivos financeiros para a redução das emissões atmosféricas e para o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis. Por fim, a implementação da PNQA deve respeitar os limites orçamentários estabelecidos pela Lei de Responsabilidade Fiscal. Os estados e o Distrito Federal precisam atender às exigências de planejamento e monitoramento para acessar recursos federais destinados à melhoria da qualidade do ar.

3.4.3 Resolução CONAMA Nº 506/2024

Em cumprimento ao art. 6º da Lei nº 14.850/2024, o CONAMA publicou, em 5 de julho de 2024, a Resolução nº 506/2024, que estabelece novos padrões nacionais de qualidade do ar e orienta sua aplicação. Essa resolução trouxe mudanças importantes para a gestão da qualidade do ar no Brasil, atualizando os padrões nacionais de acordo com as diretrizes da Organização Mundial da Saúde (OMS) de 2021 (OPAS, 2021).

O principal objetivo desta Resolução é proteger a saúde pública e o meio ambiente por meio de um cronograma de cinco etapas progressivas para a adoção de Padrões de Qualidade do Ar Intermediários (PI), conforme quadro I.

Quadro 2 - Anexo I da Resolução 506/2024.

PADRÕES DE QUALIDADE DO AR

| Poluente Atmosférico | Período de Referência | PI-1 | PI-2 | PI-3 | PI-4 | PF | |
|---|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| | | µg/m³ | µg/m³ | µg/m³ | µg/m³ | µg/m³ | ppm |
| Material Particulado - MP10 | 24 horas | 120 | 100 | 75 | 50 | 45 | - |
| | Anual ¹ | 40 | 35 | 30 | 20 | 15 | - |
| Material Particulado - MP2,5 | 24 horas | 60 | 50 | 37 | 25 | 15 | - |
| | Anual ¹ | 20 | 17 | 15 | 10 | 5 | - |
| Dióxido de Enxofre - SO ₂ | 24 horas | 125 | 50 | 40 | 40 | 40 | - |
| | Anual ¹ | 40 | 30 | 20 | 20 | 20 | - |
| Dióxido de Nitrogênio - NO ₂ | 1 hora ² | 260 | 240 | 220 | 200 | 200 | - |
| | Anual ¹ | 60 | 50 | 45 | 40 | 10 | - |
| Ozônio - O ₃ | 8 horas ³ | 140 | 130 | 120 | 100 | 100 | - |
| Fumaça | 24 horas | 120 | 100 | 75 | 50 | 45 | - |
| | Anual ¹ | 40 | 35 | 30 | 20 | 15 | - |
| Monóxido de Carbono - CO | 8 horas ³ | - | - | - | - | - | 9 |
| Partículas Totais em Suspensão - PTS | 24 horas | - | - | - | - | 240 | - |
| | Anual ⁴ | - | - | - | - | 80 | - |
| Chumbo - Pb ⁵ | Anual ¹ | - | - | - | - | 0,5 | - |
| 1 - média aritmética anual | | | | | | | |
| 2 - máxima média horária obtida no dia | | | | | | | |
| 3 - máxima média móvel obtida no dia | | | | | | | |
| 4 - média geométrica anual | | | | | | | |
| 5 - medido nas partículas totais em suspensão | | | | | | | |

Fonte: Diário Oficial da União de 27 de julho de 2024 (Brasil, 2024).

A primeira etapa, que compreende os padrões de qualidade do ar intermediários PI-1, começaram a vigorar em dezembro de 2024, PI-2 entraram em vigor em 1º de janeiro de 2025, PI-3 entrarão em vigor em 1º de janeiro de 2033 e PI-4 entrarão em vigor em 1º de janeiro de 2044, sendo possível a antecipação ou prorrogação. Os Padrões Finais (PF) que se alinham aos valores recomendados pela OMS ainda não possuem data definida.

Foram fornecidos os Índices de qualidade do ar e a equação para o cálculo do índice, conforme quadro I e II (Brasil, 2024). O índice de qualidade do ar é uma ferramenta matemática criada para facilitar o sistema de divulgação da qualidade do ar e foi desenvolvido usando como pilar uma vasta experiência realizada no EUA (CETESB, 2025).

Quadro 3 - Anexo II da Resolução 506/2024

| Qualidade | Índice | MP ₁₀ | MP _{2.5} | O ₃ | CO | NO ₂ | SO ₂ |
|-----------|--------|----------------------|----------------------|----------------------|-------|----------------------|----------------------|
| | | (µg/m ³) | (µg/m ³) | (µg/m ³) | (ppm) | (µg/m ³) | (µg/m ³) |
| | | 24h | 24h | 8h | 8h | 1h | 24h |
| N1 - Boa | 0 - 40 | 0 - 45 | 0 - 15 | 0 - 100 | 0 - 9 | 0 - 200 | 0 - 40 |

Equação 1 - Cálculo do Índice de Qualidade do Ar

$$IQAr = I_{ini} + \frac{I_{fin} - I_{ini}}{C_{fin} - C_{ini}} \times (C - C_{ini})$$

Onde:

I_{ini} = valor do índice que corresponde à concentração inicial da faixa.

I_{fin} = valor do índice que corresponde à concentração final da faixa.

C_{ini} = concentração inicial da faixa onde se localiza a concentração medida.

C_{fin} = concentração final da faixa onde se localiza a concentração medida.

C = concentração medida do poluente.

Fonte: Diário Oficial da União de 27 de julho de 2024. (Brasil, 2024).

A resolução também exige o uso de métodos técnicos rigorosos para o monitoramento da qualidade do ar, seguindo o Guia Técnico para o Monitoramento e a Avaliação da Qualidade do Ar, a fim de garantir dados confiáveis para embasar decisões.

Outro ponto relevante é que a resolução amplia a autonomia dos órgãos ambientais, permitindo que estabeleçam critérios específicos para o licenciamento e a aplicação de padrões de qualidade do ar, considerando as características das fontes poluidoras. O monitoramento contínuo e a avaliação desses padrões são obrigatórios, com relatórios consolidados pelo Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, que verificará a evolução da qualidade do ar, a aplicação das medidas de controle e o cumprimento das metas estabelecidas.

As políticas públicas de mitigação da poluição atmosférica desempenham um papel estratégico na redução dos impactos ambientais e na promoção da qualidade de vida da população. Segundo Bucci (2006), a política pública envolve uma ação estratégica que considera tanto as necessidades quanto às possibilidades de atuação dentro de um contexto institucional específico, projetando essas ações para o futuro.

As políticas públicas são ações governamentais fundamentadas nos princípios da legalidade e da eficiência, com o objetivo de alcançar metas dentro de um período determinado. Neste contexto, as políticas públicas devem considerar não apenas as necessidades ambientais, mas também as possibilidades institucionais de atuação, projetando ações eficazes para o futuro.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados da pesquisa confirmam que o BC é um dos principais agentes influenciadores das mudanças climáticas, e que afeta tanto a qualidade do ar quanto o clima. Esse poluente, resultante da combustão incompleta de materiais orgânicos e fósseis, contribui significativamente para o aquecimento global por absorver radiação solar e aquecer a atmosfera. Estimativas indicam que ele é responsável por cerca de 15% do forçamento radiativo positivo causado por atividades humanas, sendo superado apenas pelo dióxido de carbono (CO₂) entre os poluentes climáticos de curta duração (Bond et al., 2013; IPCC, 2021).

Os resultados indicam que as regiões metropolitanas apresentam os maiores níveis de emissão, devido à concentração de atividades industriais e à grande quantidade de veículos, especialmente aqueles movidos a diesel. Porém o desmatamento e as queimadas na Amazônia também se destacam como fontes significativas desse poluente, sobretudo durante a estação seca, que repercutem na precipitação e no balanço radiativo da região.

Além disso, o *State of the Climate in Latin America and the Caribbean 2023* (WMO, 2023), aponta que o Brasil registrou recordes de temperatura e eventos extremos em 2023 e 2024, agravando a qualidade do ar em áreas urbanas e rurais. Já segundo o *MapBiomass Alerta*, o país perdeu cerca de 1 milhão de hectares para queimadas em 2023, concentradas principalmente na Amazônia e no Cerrado, o que contribui diretamente para o aumento de material particulado na atmosfera.

As medições de longo prazo da profundidade óptica do aerossol (AOD) e da (AOD) de absorção (AAOD), confirmam esta informação, indicando uma elevação da carga de aerossóis sobre a Amazônia durante os períodos de seca, coincidentes com o aumento das queimadas (Morais et al., 2022). Esses dados revelam uma complexa interação entre as fontes urbanas e florestais de emissão e evidenciam a necessidade de políticas públicas integradas para lidar com múltiplas origens do problema.

A análise histórica das políticas públicas demonstrou avanços significativos na regulamentação da qualidade do ar desde a década de 1970. Como a criação do CONAMA em 1981, do PROCONVE em 1986, do PRONAR 1989 e mais recentemente em 2024 a PNQA.

No que se refere a PNQA, aconteceram vetos importantes, como por exemplo o parágrafo único do Art. 6º relativo à permissão dos Estados e do Distrito Federal de

adotar padrões de qualidade do ar mais rígidos do que os nacionais. A justificativa presidencial para esse veto foi baseada na necessidade de segurança jurídica e na separação de poderes (Brasil, 2024).

Vetar a possibilidade de padrões mais restritivos nos níveis estaduais ou municipais ignora a diversidade ambiental, econômica e social do Brasil. São Paulo, por exemplo, enfrentam problemas específicos que exigem medidas mais rígidas do que aquelas aplicáveis a todo o país. Ao impedir essa flexibilidade, o veto pode dificultar respostas rápidas e eficazes a problemas locais.

O artigo 9º também foi vetado, ele autorizava o estabelecimento de limites de emissão mais restritivos pelos estados, DF e municípios que os definidos pelo CONAMA, com a justificativa de garantir maior padronização (Brasil, 2024). Nos Estados Unidos, o *Clean Air Act* (CAA) permite que os Estados implementem padrões mais rigorosos do que os federais, desde que aprovados pela Agência de Proteção Ambiental (US-EPA, 2025). Por exemplo, a Califórnia possui limites de emissão mais rígidos para veículos automotores devido à sua grave poluição atmosférica (CARB, 2022). Enquanto a PNQA centraliza o poder normativo, o CAA incentiva a adaptação às condições locais, o que permite maior eficácia em áreas de alta vulnerabilidade ambiental.

Foram excluídos também os incisos I e II do Art. 11º, que fixavam prazos para elaboração de inventários de emissões atmosféricas. Segundo a justificativa, essa medida viola o princípio da separação de poderes, pois o Legislativo não pode impor prazos ao Executivo (Brasil, 2024). A justificativa é válida juridicamente, mas prejudica a urgência necessária para melhorar o monitoramento da qualidade do ar. A ausência de prazos claros pode resultar em atrasos consideráveis na elaboração de inventários, que são essenciais para o planejamento e controle das emissões.

Além disso, o parágrafo único do Art. 12º e o § 2º do Art. 15º foram vetados porque determinavam que o Executivo regulamentasse metodologias e tecnologias específicas. Esses dispositivos foram considerados inconstitucionais por invadirem a competência administrativa e discricionária do Executivo, infringindo o princípio da separação de poderes (Brasil, 2024). Encarregar ao Executivo exclusivamente essa responsabilidade pode atrasar a adoção de tecnologias mais modernas.

Quanto à Resolução Nº 506/2024, que atualiza a PNQA e representa um avanço para a gestão ambiental no Brasil, especialmente ao nivelar os padrões de qualidade do ar com as diretrizes da Organização Mundial da Saúde (OMS) de 2021,

alguns aspectos merecem uma análise crítica, especialmente quando comparados a políticas de outros países com maior eficiência na redução da poluição atmosférica.

Adotar padrões baseados nos valores-guia da OMS é positivo, pois introduz os Padrões Intermediários (PI-1 a PI-4). No entanto, o cronograma de implementação, com um prazo final de mais de 20 anos, é um ponto preocupante (Brasil, 2024). A primeira etapa deve ser concluída até 31 de dezembro de 2024, enquanto as etapas seguintes estão previstas para 1º de janeiro de 2025, 2033 e 2044. Porém a data para a introdução dos padrões finais não foi definida.

A falta de metas mais ambiciosas a curto prazo pode atrasar os benefícios esperados. A China, historicamente associada a altos níveis de poluição, implementou um plano de ação nacional que reduziu os níveis de partículas finas (PM_{2,5}) em grandes cidades como Pequim em menos de uma década. Isso só foi possível por meio de prazos curtos (5 a 10 anos), metas claras e investimentos maciços em monitoramento, energias limpas e fechamento de indústrias poluentes (EPIC, 2025). O Brasil possui ainda grandes desafios neste quesito, como infraestrutura insuficiente para monitoramento, falta de fiscalização e financiamento limitado (Vormittag et al., 2021).

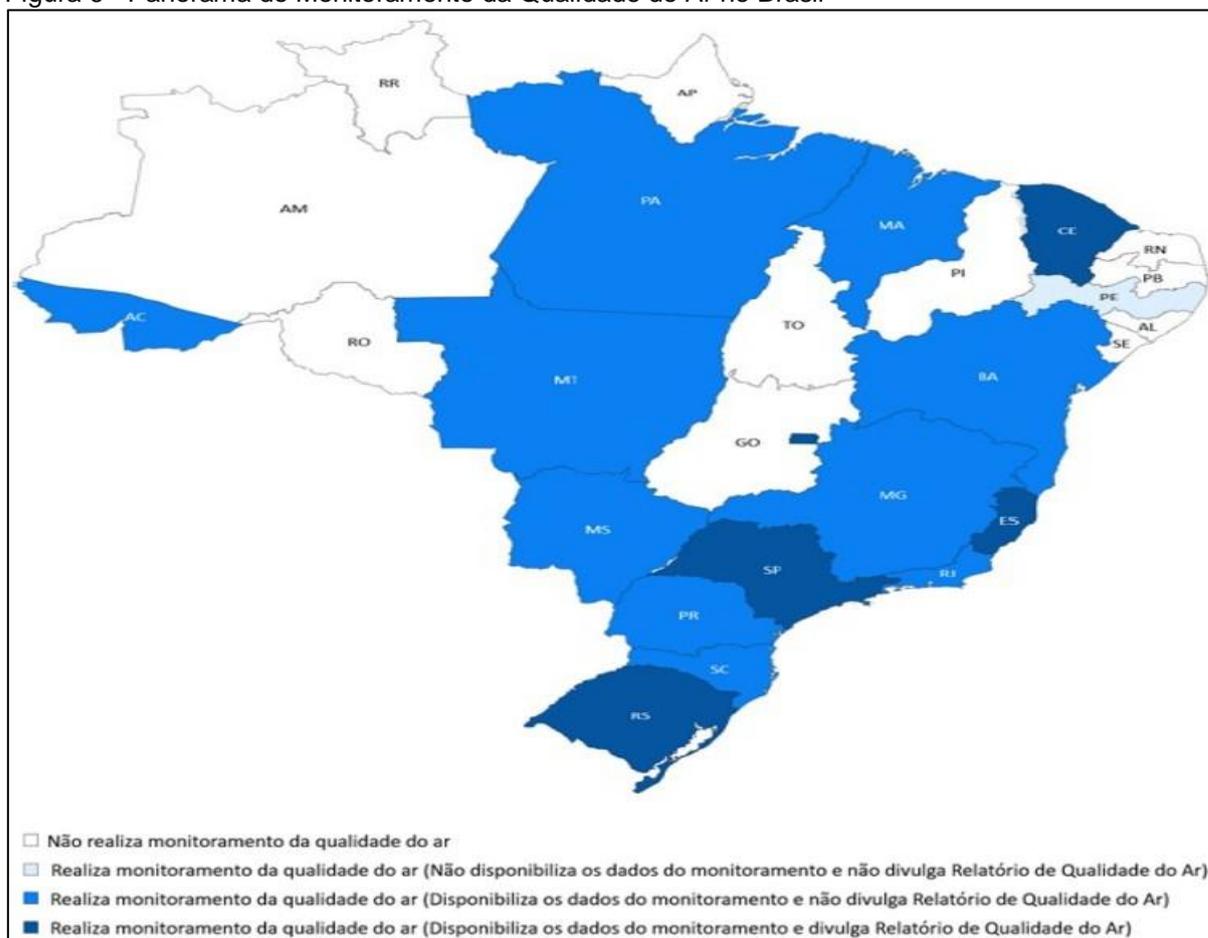
Segundo a US-EPA (2012), atualmente apenas alguns países possuem redes bem estruturadas para monitoramento ambiental de PM_{2,5}. A maior parte dos dados globais sobre BC são provenientes dos Estados Unidos, Canadá, Europa e China, sendo, em sua maioria, obtidos por meio de técnicas de medição térmica, que são as mais utilizadas. O BC, embora seja um dos principais componentes do PM_{2,5}, ainda é pouco monitorado no Brasil, com apenas quatro estações no estado de São Paulo (Vormittag et al., 2021).

As medidas de controle das emissões diretas de PM_{2,5} também influenciam a liberação de BC e outros componentes. No entanto, há incertezas sobre a composição das emissões de PM_{2,5} provenientes de diversas fontes, assim como sobre a eficiência de tecnologias específicas na redução desses constituintes. Isso significa que, em muitos setores, não se sabe ao certo se a diminuição de PM_{2,5} resultará em uma redução proporcional ou preferencial de BC em relação a outros compostos. Pesquisas em andamento buscam esclarecer essa questão (Xie et al., 2025).

A fiscalização no Brasil ainda é muito falha, e poucos estados (Figura 6) mantêm redes de monitoramento eficazes (Simoni et al., 2021). A insuficiência de infraestrutura para o monitoramento efetivo da qualidade do ar é um ponto crítico,

atualmente somente 16 estados brasileiros possuem um sistema de monitoramento da qualidade do ar (Brasil, 2023). A ausência de um sistema robusto de monitoramento enfraquece a transparência e a capacidade de responsabilização.

Figura 6 - Panorama do Monitoramento da Qualidade do Ar no Brasil



Fonte: Relatório Anual da Qualidade do Ar 2023 (Brasil, 2023).

Segundo Vormittag et al. (2021) Outro problema é que muitas estações de monitoramento são geridas por empresas privadas, focadas no cumprimento de exigências para licenciamento ambiental, sem priorizar os impactos na saúde pública. Isso compromete a efetividade das políticas de controle da poluição, afetando especialmente as comunidades próximas às fontes poluidoras. Um exemplo é o Centro –Oeste, que só possui 12 estações de monitoramento (Quadro IV), número insuficiente para cobrir adequadamente a extensão territorial e os focos de emissão predominantes da região. As queimadas são justamente as que mais impactam essas áreas, estando frequentemente associadas ao desmatamento (Vormittag et al., 2021).

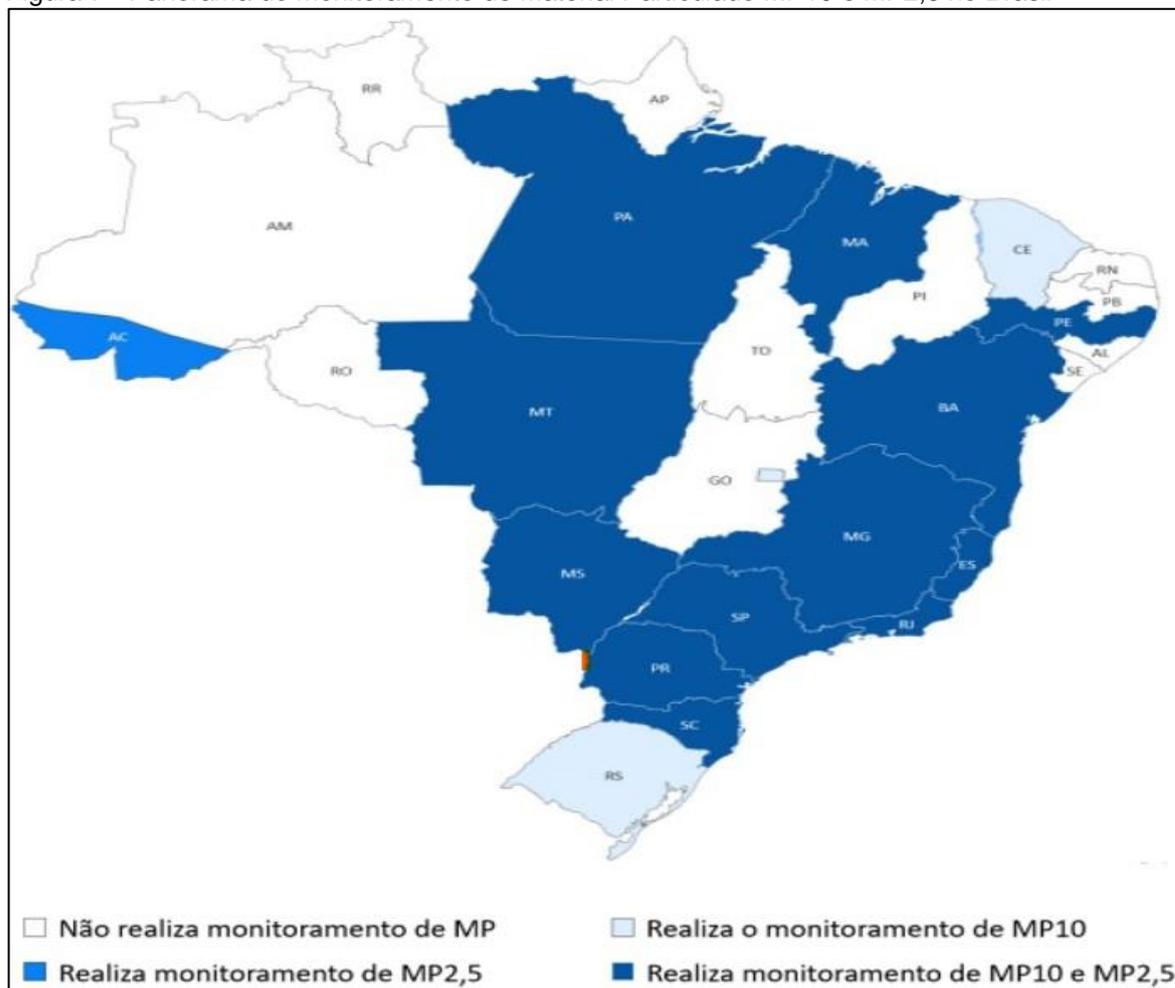
Quadro 4 - Número de estações em cada Região e Estado

| UF | Nº estações |
|---------------------|-------------|
| DF | 5 |
| MS | 3 |
| MT | 4 |
| Centro-Oeste | 12 |
| BA | 14 |
| CE | 1 |
| MA | 7 |
| PE | 5 |
| Nordeste | 27 |
| AC | 33 |
| PA | 3 |
| Norte | 36 |
| ES | 9 |
| MG | 57 |
| RJ | 140 |
| SP | 77 |
| Sudeste | 283 |
| PR | 15 |
| RS | 19 |
| SC | 3 |
| Sul | 37 |

Fonte: Relatório Anual da Qualidade do Ar 2023 (Brasil, 2023).

As estações de monitoramento brasileiras são responsáveis por acompanhar 26 tipos de poluentes atmosféricos, incluindo diferentes classes de material particulado, como MP10 e MP2,5, no qual estão inclusas as partículas de BC. Apesar de sua relevância para a saúde pública e para a mitigação das mudanças climáticas, o MP2,5 passou a ser regulado em nível nacional apenas com a publicação da Resolução CONAMA nº 491/2018. Ainda assim, dos 16 Estados que monitoram a qualidade do ar, apenas 13 realizam a medição simultânea de MP10 e MP2,5 (Figura 7). O Distrito Federal e o Rio Grande do Sul monitoram apenas MP10, enquanto o Acre monitora exclusivamente MP2,5. Essa distribuição desigual, associada à disparidade técnica entre os estados, revela uma das principais barreiras para o controle efetivo da poluição por material particulado fino, como o BC.

Figura 7 - Panorama do monitoramento de Material Particulado MP10 e MP2,5 no Brasil



Fonte: Relatório Anual da Qualidade do Ar 2023 (Brasil, 2023).

No que diz respeito ao cumprimento de acordos internacionais, apenas 10% das NDCs (Contribuições Nacionalmente Determinadas) incluem ações específicas para reduzir as emissões de BC, e o Brasil não está incluso (CCAC, 2024). As NDCs definem os compromissos de cada país para alcançar as metas do Acordo de Paris, detalhando estratégias para a redução de gases de efeito estufa (GEE) e buscando limitar o aquecimento global a menos de 2°C, preferencialmente 1,5°C. Esses compromissos devem ser revisados e atualizados a cada cinco anos. (WRI, 2014).

Outro ponto preocupante é de como é tratada questão do financiamento das ações previstas na Política Nacional de Qualidade do Ar (PNQAr). Apesar de apontar que os Estados, municípios e distrito federal podem receber recursos do orçamento geral da União consignados ao Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, desde que sejam cumpridas as exigências previstas, a PNQA não prevê a criação de um fundo próprio ou específico para o seu financiamento.

5 CONCLUSÃO

O presente estudo teve o objetivo de é efetuar uma análise crítica com o propósito de identificar os principais desafios econômicos, políticos e operacionais que dificultam o avanço das políticas públicas brasileiras de mitigação nas emissões de poluentes atmosféricos, com ênfase no BC.

Um meio ambiente ecologicamente equilibrado é um direito garantido pelo artigo 225 da Constituição Federal de 1988 (Brasil, 1988). No entanto, apesar dos avanços legais e das normas infraconstitucionais que se seguiram, o Brasil enfrenta um aumento preocupante da poluição atmosférica, intensificado pelas queimadas e pelos impactos das mudanças climáticas globais. Tais fatores revelam uma lacuna entre o arcabouço jurídico existente e a efetividade das ações implementadas na prática.

A Lei 14.850/2024 não assegura um modelo de financiamento sustentável dedicado para a PNQA. A implementação eficaz da política depende de investimentos contínuos e estruturais, sobretudo em um país com enormes desigualdades de capacidade institucional e técnica entre os entes federativos. A criação de um fundo específico, com regras claras de governança e fontes de receita definidas seriam medidas essenciais para transformar as diretrizes da PNQA em ações concretas e duradouras.

A ausência de um sistema robusto de monitoramento é outro ponto a ser superado, pois isto acaba enfraquecendo a transparência e a capacidade de responsabilização, dificultando a articulação entre os diferentes níveis de governo e a participação da sociedade civil no acompanhamento das metas.

Os padrões mais rigorosos de qualidade do ar e o fortalecimento das ferramentas de gestão ambiental estabelecidos pela resolução CONAMA 506, são avanços importantes. Porém, essas medidas ainda são recentes e seus efeitos não puderam ser completamente avaliados. O impacto real dessas iniciativas dependerá de um monitoramento contínuo e de possíveis ajustes nos prazos para garantir que os objetivos de proteção ambiental sejam atingidos.

Nesse cenário, a adoção de abordagens integradas surge como uma estratégia eficaz para enfrentar os desafios ambientais. Isso porque medidas voltadas à melhoria da qualidade do ar podem, simultaneamente, contribuir para a mitigação dos efeitos das mudanças climáticas, uma vez que compartilham fontes emissoras e soluções

técnicas. No contexto brasileiro, políticas públicas com enfoque integrado podem otimizar os esforços de redução das emissões de BC e de outros poluentes atmosféricos de vida curta.

Entretanto, o Brasil ainda não possui um inventário nacional específico para poluentes climáticos de vida curta, como o BC, o que compromete a formulação de políticas públicas direcionadas. A inclusão desses poluentes nos inventários nacionais, aliada à definição de metas específicas, representa um passo crucial para a incorporação efetiva dessas emissões no planejamento climático de curto prazo.

A análise revelou que as ações existentes de mitigação têm se concentrado no controle do PM 2,5, do qual o BC é apenas um componente. Essa abordagem limita o desenvolvimento de soluções mais específicas e reduz o aproveitamento do potencial de mitigação climática que o controle do BC pode proporcionar.

Apesar desses desafios, existem diversas oportunidades para o fortalecimento da governança ambiental e o aprimoramento da gestão da poluição atmosférica no Brasil. Um exemplo promissor é o da CETESB, que opera uma das redes mais avançadas de monitoramento da qualidade do ar no Brasil, com cobertura ampla no Estado de São Paulo. Essa rede é composta por estações automáticas e manuais que coletam e processam dados de forma sistemática e precisa.

Além disso, campanhas de conscientização podem ampliar o apoio público a políticas públicas ambientais robustas e sustentáveis. O engajamento da sociedade é essencial para fortalecer a implementação dessas políticas, promovendo uma cultura de responsabilidade compartilhada em relação à qualidade do ar e aos impactos das mudanças climáticas.

Espera-se que este trabalho contribua para o aprofundamento da compreensão sobre a complexidade da poluição atmosférica e seus desdobramentos climáticos, servindo de subsídio para estudantes, pesquisadores e instituições comprometidas com a formulação de políticas públicas mais eficazes, integradas e ambientalmente justas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDREAE, M. O. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning – an updated assessment. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 19, p. 8523–8546, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5194/acp-19-8523-2019>. Acesso em: 2 maio 2025.

ANTP (Associação Nacional de Transportes Públicos). Sistema de Informações da Mobilidade Urbana da Associação Nacional de Transportes Público – SIMOB/ANTP, 2020.

ARTAXO, P.; DIAS, M.; ANDREAE, M. O mecanismo da floresta para fazer chover. *Scientific American Brasil*, v. 1, p. 38-45, 2003.

ARTAXO, Paulo et al. Atmospheric aerosols in Amazonia and land use change: from natural biogenic to biomass burning conditions. *Faraday Discussions*, v. 165, p. 203–235, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1039/c3fd00052d>. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24601004/>. Acesso em: 1 jun. 2025.

BOND, T. C. et al. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 118, n. 11, p. 5380-5552, 2013. DOI: 10.1002/jgrd.50171.

BRASIL. Constituição da República Federativa do Brasil de 1988. Brasília, DF: Presidência da República, [2024]. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm. Acesso em: 10 maio 2025.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 018, de 6 de maio de 1986. Institui o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE). *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 6 maio 1986. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?id=41&option=com_sisconama&task=arquivo.download. Acesso em: 22 mar. 2025.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 03, de 28 de junho de 1990. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR. *Diário Oficial da União*, Brasília, 22 ago. 1990. Disponível em: https://www.ibram.df.gov.br/images/resol_03.pdf. Acesso em: 01 mar. 2025.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 05, de 15 de junho de 1989. Dispõe sobre a criação do Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar – PRONAR. *Diário Oficial da União*, Brasília, 19 jun. 1989. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/MMA/RE0005-150689.PDF>. Acesso em: 01 mar. 2025.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 382, de 26 de dezembro de 2006. Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=510. Acesso em: 01 mar. 2025.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 491, de 19 de novembro de 2018. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. *Diário Oficial da União: seção 1*, Brasília, DF, 20 nov. 2018. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-n-491-de-19-de-novembro-de-2018-51058603>. Acesso em: 01 mar. 2025.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 506, de 5 de julho de 2024. Estabelece padrões nacionais de qualidade do ar e fornece diretrizes para sua aplicação. *Diário Oficial da União*, seção 1, Brasília, DF, p. 133, 9 jul. 2024. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?id=827&option=com_sisconama&task=arquivo.download. Acesso em: 8 mar. 2025.

BRASIL. Lei n. 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 2 set. 1981. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm. Acesso em: 5 jan. 2025.

BRASIL. Lei n. 14.850, de 2 de maio de 2024. Institui a Política Nacional de Qualidade do Ar e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 3 maio 2024. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/L14850.htm. Acesso em: 5 jan. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Fontes Fixas. Brasília, DF: MMA, [s.d.]. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/qualidade-do-ar/fontes-fixas.html>. Acesso em: 10 maio 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Poluentes atmosféricos. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/qualidade-do-ar/poluentes-atmosf%C3%A9ricos.html>. Acesso em: 10 abr. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Qualidade do ar. Brasília, DF: MMA, [s.d.]. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/meio-ambiente-urbano-recursos-hidricos-qualidade-ambiental/qualidade-do-ar>. Acesso em: 1 jun. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Relatório anual da qualidade do ar 2023. Brasília: MMA, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/meio-ambiente-urbano-recursos-hidricos-qualidade-ambiental/qualidade-do-ar/relatorio-anual-2023/relatorio-anual-da-qualidade-do-ar-2023.pdf>. Acesso em: 1 jun. 2025.

BUCCI, Maria Paula Dallari (ORG.). Políticas Públicas: reflexões sobre o conceito jurídico. São Paulo: Saraiva, 2006.

CALIFORNIA AIR RESOURCES BOARD. 2022 Progress Report: California's Sustainable Communities and Climate Protection Act. Sacramento, CA: CARB, 2022. Disponível em: <https://ww2.arb.ca.gov>. Acesso em: 1 jun. 2025.

CELLARD, A. A Análise Documental. In: POUPART, J. et al. (Orgs.). *A pesquisa qualitativa: enfoques epistemológicos e metodológicos*. Petrópolis, RJ: Vozes, 2008.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Agência Ambiental Paulista surgiu na hora certa. 2018. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/blog/2018/03/29/agencia-ambiental-paulista-surgiu-na-hora-certa/>. Acesso em: 01 mar. 2025.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Histórico da Gestão da Qualidade do Ar no Estado de São Paulo. São Paulo, 2017. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br>. Acesso em: 01 mar. 2025.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Emissão veicular. 2020. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/transporte-sustentavel/>.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. *Poluentes do ar*. São Paulo, 2024. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/poluentes/>. Acesso em: 16 fev. 2025.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. *Padrões de Qualidade do Ar*. São Paulo. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/padroes-de-qualidade-do-ar/>. Acesso em: 11 fev. 2025.

CIÊNCIA HOJE. *Cubatão: o Vale da Morte*. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência, v. 1, n. 4, p. 6–9, 1982. Disponível em: https://cienciahoje.periodicos.capes.gov.br/storage/acervo/ch/ch_294.pdf. Acesso em: 22 maio 2025.

CLIMATE AND CLEAN AIR COALITION (CCAC). *Aproveitando os benefícios do não-CO₂: poluentes e qualidade do ar na NDC 3.0: orientações sobre a inclusão de carbono negro e outros poluentes atmosféricos nas NDCs*. Convocada pelo PNUMA, 2024.

CLIMATE AND CLEAN AIR COALITION (CCAC). *Including non-CO₂ pollutants in nationally determined contributions (NDCs)*. 2022. Disponível em: <https://www.ccacoalition.org/resources/including-non-co2-pollutants-nationally-determined-contributions-ndcs>. Acesso em: 15 fev. 2025.

CLIMATE AND CLEAN AIR COALITION (CCAC). *LAC Full Assessment*. 2019. Acesso em: 08 mar. 2025.

COPERNICUS CLIMATE CHANGE SERVICE. *European State of the Climate 2024*. Disponível em: <https://climate.copernicus.eu/esotc/2024>. Acesso em: 27 abr. 2025.

GIL, Antonio Carlos. *Métodos e técnicas de pesquisa social*. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GOLDEMBERG, J.; BARBOSA, L. M. A legislação ambiental no Brasil e em São Paulo. *Revista Eco 21*, Rio de Janeiro, n. 96, nov. 2004. Disponível em: https://ambientes.ambientebrasil.com.br/gestao/artigos/a_legislacao_ambiental_no_brasil_e_em_sao_paulo.html. Acesso em: 22 mar. 2025.

GUITARRARA, Paloma. O que é atmosfera? *Brasil Escola*, 2025. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/o-que-e/geografia/o-que-e-atmosfera.htm>. Acesso em: 08 mar. 2025.

HOLANDA, Bruna A. et al. Black carbon pollution and its role in cloud formation and climate interactions. *Faraday Discussions*, v. 165, p. 437-452, 2013. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2013/fd/c3fd00052d>. Acesso em: 22 mar. 2025.

HOLANDA, B. A. et al. Influx of African biomass burning aerosol during the Amazonian dry season through layered transatlantic transport of black carbon-rich smoke. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 20, n. 8, p. 4757–4785, 2020. Disponível em: <https://acp.copernicus.org/articles/20/4757/2020/>. Acesso em: 22 mar. 2025.

INSTITUTO DE POLÍTICA DE ENERGIA DA UNIVERSIDADE DE CHICAGO (EPIC). Como a China conseguiu cortar pela metade a poluição do ar em 7 anos. Disponível em: <https://www.brasilagro.com.br/conteudo/como-a-china-conseguiu-cortar-pela-metade-a-poluicao-do-ar-em-7-anos.html>. Acesso em: 2 mar. 2025.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: global and sectoral aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>. Acesso em: 10 maio 2025.

INSTITUTO MAPBIOMAS. Relatório Anual de Alertas de Queimadas – 2023. São Paulo: MapBiomias, 2024. Disponível em: <https://alerta.mapbiomas.org>. Acesso em: 07 jun. 2025.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>. Acesso em: 22 mar. 2025.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>. Acesso em: 15 fev. 2025.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Geneva, Switzerland: IPCC, 2023. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 22 mar. 2025.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial*

ecosystems. Genebra: IPCC, 2019. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/srccl/>. Acesso em: 10 maio 2025.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate Change: The IPCC Scientific Assessment. Report prepared for IPCC by Working Group I*. Edited by J.T. Houghton, G.J. Jenkins, and J.J. Ephraums. Cambridge: Cambridge University Press, 1990. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ipcc_far_wg_i_full_report.pdf. Acesso em: 15 fev. 2025.

JACOBSON, M. Z. Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols. *Nature*, v. 409, p. 695-697, 2001.

LAMARQUE, J.-F. et al. Emissões antropogênicas e de queima de biomassa em grade histórica (1850–2000) de gases reativos e aerossóis: metodologia e aplicação. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 10, p. 7017–7039, 2010. DOI: <https://doi.org/10.5194/acp-10-7017-2010>.

LOPES, J. C. *Impactos ambientais da Revolução Industrial e desafios atuais*. São Paulo: Editora Ambiental, 2010.

MORAIS, F. G. et al. Relação entre uso da terra e variabilidade espacial de aerossóis atmosféricos de carbono marrom e carbono preto na Amazônia. *Atmosphere*, v. 13, n. 8, p. 1328, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/atmos13081328>. Acesso em: 22 mar. 2025.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. OMS: 99% da população mundial respira ar "tóxico". *ONU News*, 4 mar. 2024. Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2024/03/1828507>. Acesso em: 16 fev. 2025.

ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DA SAÚDE. *Diretrizes globais de qualidade do ar da OMS: partículas inaláveis (MP_{2,5} e MP₁₀), ozônio, dióxido de nitrogênio, dióxido de enxofre e monóxido de carbono. Resumo executivo*. Washington, D.C.: OPAS, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.37774/9789275724613>. Acesso em: 16 fev. 2025.

PETZOLD, Andreas et al. Recomendações para relatar medições de carbono preto. *Química e Física Atmosférica*, v. 13, n. 16, p. 8365-8379, 2013.

POTT ESTRELA, M. A institucionalização das políticas ambientais no Brasil: A criação da SEMA e os primeiros desafios. *Revista de Política Ambiental*, v. 22, n. 1, p. 78-93, 2017.

RAMANATHAN, V.; CARMICHAEL, G. Global and regional climate changes due to black carbon. *Nature Geoscience*, v. 1, n. 4, p. 221-227, 2008.

RAMANATHAN, V.; CRUTZEN, P. J.; KIEHL, J. T.; ROSENFELD, D. Aerosols, climate, and the hydrological cycle. *Science*, v. 294, n. 5549, p. 2119–2124, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.1064034>.

RIOS, A.; ARAÚJO, G. A criação da Secretaria do Meio Ambiente no Brasil: Análise e impactos. *Revista Brasileira de Política Ambiental*, v. 12, n. 3, p. 45-62, 2005.

SÃO PAULO. Decreto nº 8.468, de 8 de setembro de 1976. Disponível em: <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/1976/decreto-8468-08.09.1976.html>. Acesso em: 8 mar. 2025.

SÃO PAULO. Ministério Público. Centro de Apoio Operacional – Meio Ambiente e Urbanismo. *Histórico da Legislação de Qualidade do Ar no Brasil*. São Paulo: MPSP, 2010. Disponível em: https://www.mpsp.mp.br/portal/page/portal/cao_urbanismo_e_meio_ambiente/biblioteca_virtual/bv_informativos_tecnicos/anexo6.pdf. Acesso em: 22 maio 2025.

SCHAFER, M.; KACZMAREK, K.; MÜLLER, T. et al. Impact of particle size, refractive index, and shape on the determination of the particle scattering coefficient – an optical closure study evaluating different nephelometer angular truncation and illumination corrections. *Atmospheric Measurement Techniques*, v. 15, n. 8, p. 3161-3182, 2022. Disponível em: <https://amt.copernicus.org/articles/15/3161/2022/>. Acesso em: 15 fev. 2025.

SCHROEDER, W.; KISSEL, A.; MOORE, R.; LI, X.; ELPLEDGE, S. Aerosols and their role in climate and air quality. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 20, p. 9765-9787, 2020.

SEINFELD, John H.; PANDIS, Spyros N. *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. 2. ed. Hoboken: Wiley, 2006.

SIMONI, W. et al. *O estado da qualidade do ar no Brasil*. São Paulo: WRI Brasil, 2021. Disponível em: <https://www.wribrasil.org.br/publicacoes/o-estado-da-qualidade-do-ar-no-brasil>. Acesso em: 20 jan. 2025.

SOUZA, J. F.; LIMA, A. R. Impacto das emissões de carbono negro provenientes de queimadas na Amazônia e do transporte rodoviário no derretimento das geleiras andinas e no ciclo hidrológico regional. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 51, n. 2, p. 123-135, 2021.

VORMITTAG, Evangelina da Motta PA de Araújo et al. Análise do monitoramento da qualidade do ar no Brasil. *Estudos Avançados*, v. 35, n. 102, p. 7-30, 2021.

UNITED NATIONS. *Report of the United Nations Conference on the Human Environment, Stockholm, 5-16 June 1972*. New York: United Nations, 1972. Disponível em: <https://digitallibrary.un.org/record/523249>. Acesso em: 15 jan. 2025.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Report to Congress on Black Carbon*. March 2012. Department of the Interior, Environment, and Related Agencies Appropriations Act, 2010. Washington, D.C.: United States Environmental Protection Agency, 2012. Disponível em: <https://www.epa.gov>. Acesso em: 15 jan. 2025.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). História da EPA: Lei do Ar Limpo de 1970/1977. Disponível em: <https://www.epa.gov/history/epa-history-clean-air-act-19701977>. Acesso em: 20 jan. 2025.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). *Particulate Matter (PM) Basics*. 2024. Disponível em: <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics>. Acesso em: 16 fev. 2015.

WRI BRASIL. O que são Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs) e porque são importantes. 12 ago. 2014. Disponível em: <https://www.wribrasil.org.br/noticias/o-que-sao-contribuicoes-nacionalmente-determinadas-ndcs-e-por-que-sao-importantes>. Acesso em: 15 fev. 2025.

WHO (World Health Organization). *Air quality guidelines: Global Update 2005*. 2006. Disponível em: https://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/outdoorair_aqg/en/. Acesso em: 15 fev. 2025.

WHO (World Health Organization). *Evolution of WHO Air Quality Guidelines: Past, Present, and Future*. BN 9789289052306, 2017. Disponível em: https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0019/331660/Evolution-airquality.pdf. Acesso em: 15 fev. 2025.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). *State of the climate in Latin America and the Caribbean 2023*. Genebra: WMO, 2024. Disponível em: <https://library.wmo.int/records/item/68891-state-of-the-climate-in-latin-america-and-the-caribbean-2023>. Acesso em: 07 jun. 2025.

WORLD RESOURCES INSTITUTE (WRI). 5 under-recognized impacts of air pollution. 2019. Disponível em: <https://www.wri.org/insights/5-under-recognized-impacts-air-pollution>. Acesso em: 16 fev. 2025.

XIE, Y.; ZENG, L.; HU, S. et al. "Long-term trends of black carbon levels, sources, and radiative effects from 2013 to 2022 in Beijing, China". *npj Clean Air*, v. 1, art. 10, 2025.