



SÃO PAULO
GOVERNO DO ESTADO

ESCOLA TÉCNICA DE PRAIA GRANDE

ENSINO MÉDIO INTEGRADO EM QUÍMICA

ANNA JULIAH SILVA SANTOS

CARLOS EDUARDO MEDEIROS DE SOUZA

TAMARA CANDIDO MENDES

YASMIM BASSANI MISSALI

**O PAPEL DO CARBONO NEGRO NAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E NO
AQUECIMENTO GLOBAL**

PRAIA GRANDE

2024

ANNA JULIAH SILVA SANTOS

CARLOS EDUARDO MEDEIROS DE SOUZA

TAMARA CANDIDO MENDES

YASMIM BASSANI MISSALI

**O PAPEL DO CARBONO NEGRO NAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E NO
AQUECIMENTO GLOBAL**

Trabalho de Conclusão de Curso dos
Técnicos em Química da Escola Técnica de
Praia Grande como requisito para obtenção
do título de Técnico em Química.

Orientadoras: Prof^a. Irinete F. da Silveira e
Prof^a. Thais L. Miranda.

PRAIA GRANDE

2024

RESUMO

O aumento da temperatura média global, a elevação dos níveis oceânicos devido ao derretimento das calotas polares e o aumento de internações por complicações de doenças respiratória, como a bronquite e a bronquiolite, são alguns dos efeitos do aumento da concentração de aerossóis carbonáceos, como o carbono negro na atmosfera. Nesse viés, o presente trabalho tem por objetivo realizar uma análise temporal das consequências das emissões descontroladas desse material. Além disso foram utilizados dados provenientes da CETESB para realizar correlações entre os resultados obtidos com seus efeitos à saúde da população, bem como com eventos que deixaram alguma marca expressiva nessa linha temporal.

Palavras-chave: Concentração; Aerossóis Carbonáceos; Carbono Negro; CETESB.

ABSTRACT

The increase in the global average temperature, the rise in ocean levels due to the melting of the polar ice caps and the increase in hospitalizations due to complications of respiratory diseases, such as bronchitis and bronchiolitis, are some of the effects of the increase in the concentration of carbonaceous aerosols, such as black carbon in the atmosphere. In this sense, the present work aims to carry out a temporal analysis of the consequences of uncontrolled emissions of this material. In addition, data from CETESB were used to make correlations between the results obtained and their effects on the health of the population, as well as with events that left a significant mark on this imeline.

Keywords: Concentration; Carbonaceous Aerosols; Black Carbon; CETESB.

LISTAS DE ABREVIATÖES

BC – *Black Carbon* (Carbono Negro)

FMC - Fumaça

IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change* (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas)

C.Org. - Carbono Orgânico

C.E. - Carbono Elementar

PM 2.5/10 - *Particulate Matter 2.5/10* (Material Particulado 2.5/10)

MP – Material Particulado

nm – Nanômetro

µm – Micrômetro

OMS - Organização Mundial da Saúde

PQAR - Padrões de Qualidade do Ar

PTS - Partículas Totais em Suspensão

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Estruturas secundária e primária do negro de carbono.

FIGURA 2 – Processos e distribuição do carbono negro no sistema climático.

FIGURA 3 – Processos e distribuição do carbono negro no sistema climático.

FIGURA 4 – Formação das moléculas do Carbono Negro.

FIGURA 5 – Materiais inalados.

FIGURA 6 – Monções regionais.

FIGURA 7 – Queimadas pelo Brasil.

FIGURA 8 – Mapa de queimadas em 2021.

FIGURA 9 – Fatores do uso da terra da Amazônia.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3. Procedimento metodológico	4
3.1. Área de estudo	4
3.2. Base de dados	4
4. REFERENCIAL TEÓRICO	5
4.1. Carbono negro	5
4.2. Fontes de Emissão.....	6
4.3. Impactos do Carbono Negro	8
4.4. Poluentes Atmosféricos	9
4.5. Parâmetros meteorológicos	9
4.6. Efeitos do Carbono Negro na temperatura local e regional	10
4.7. Material particulado	11
4.8. Partículas inaláveis (MP _{2,5})	11
4.9. Partículas grossas (MP ₁₀)	11
4.10. Aerossóis	12
4.11. Processos de formação das partículas	13
4.12. Dinâmica de circulação	14
4.13. Absorção de Radiação Solar	15
4.14. Deposição do Carbono Negro	16
4.15. Impactos do Carbono Negro na saúde	16
4.16. Padrões de Qualidade do Ar	17
4.17. Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas - IPCC	20
4.18. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB).....	21
4.19. O papel do Carbono Negro nas políticas climáticas	22

4.20.	Alteração no regime de chuvas e na estação de seca	23
4.21.	A Amazônia	23
4.22.	Comparação entre diferentes regiões amazônicas	25
4.23.	Interações de nuvens e precipitações	27
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....		29
REFERÊNCIAS		30

INTRODUÇÃO

Carbono Negro (BC) é o termo utilizado para se referir a uma partícula de carbono derivada da combustão incompleta de combustíveis fósseis e biomassa, que é emitido diretamente para a atmosfera. Ele está abordado em diferentes terminologias dependendo dos processos de estudo e métodos de análise, sendo identificado como carbono negro, fuligem, carbono elementar, carvão mineral e carvão vegetal. O carbono negro (BC) em si também é um problema atual, tanto em escala regional quanto global, tem origem primária e é emitido principalmente por fontes de combustão antropogênica, incluindo queimadas, emissões industriais, transporte rodoviário e aquecimento doméstico (QUEROL et al., 2013; SANDRINI et al., 2014). A principal forma para distinguir um BC é sua tonalidade negra, o que o diferencia de outros materiais carbonosos, além de sua capacidade de absorção solar, que contribui significativamente para o aquecimento. Esse aquecimento pode intensificar o efeito estufa e contribuir para o aumento das temperaturas globais.

O carbono negro é emitido em uma variedade de processos de combustão e é encontrado em todo o sistema terrestre. Ele tem um papel único e importante no sistema climático da Terra porque absorve radiação solar, influencia processos de nuvens e altera o derretimento da cobertura de neve e gelo. As concentrações respondem rapidamente às reduções nas emissões porque o carbono negro é rapidamente removido da atmosfera por deposição. Assim, as reduções nas emissões de carbono negro representam uma estratégia potencial de mitigação que poderia reduzir a força climática global de atividades antropogênicas no curto prazo e diminuir a taxa associada de mudanças climáticas. Dentro deste contexto, é imprescindível apontar a influência do clima na qualidade do ar, uma vez que já é comprovada a ação dos períodos secos e chuvosos nos padrões de poluição, em face de um aumento significativo do número de queimadas durante a estação de estiagem (ARAGÃO et al., 2018; SHRIVASTAVA et al., 2019).

O carbono negro é um poluente atmosférico emitido sob a forma de partículas muito pequenas (esferas com um diâmetro médio entre 0,00001 mm e 0,0005 mm) que resulta da queima de combustíveis fósseis, como o carvão, o petróleo e seus derivados (por exemplo, a gasolina e o gásóleo), e o gás natural. (FIALHO, P. 2024) Além de que a redução da capacidade de armazenamento de carbono das florestas

pode resultar em uma maior concentração de CO₂ na atmosfera, agravando o efeito estufa e acelerando o aquecimento global. Esse ciclo negativo pode levar a um agravamento das mudanças climáticas, afetando não apenas a Amazônia, mas também os padrões climáticos em todo o planeta. A degradação das florestas amazônicas também afeta outros aspectos dos ecossistemas. A perda de vegetação compromete a biodiversidade, reduzindo habitats para muitas espécies e afetando os ciclos biológicos locais. Além disso, a diminuição da cobertura florestal pode impactar o ciclo hidrológico da região, afetando a disponibilidade de água e alterando os padrões de precipitação. Na região da Amazônia brasileira, a poluição atmosférica prevalente não está relacionada àquelas dos grandes centros urbanos do Brasil, e sim ao ciclo das queimadas, o qual é comumente observado em períodos de estiagem, quando uma densa camada de fumaça proveniente da queima de biomassa se dispersa sobre a Amazônia brasileira, cobrindo principalmente as macrorregiões Norte e Centro-Oeste do país (CLAEYS et al., 2010; SHRIVASTAVA et al., 2019; SOTOGARCÍA, et al., 2011; ALVES, et al., 2011; FREITAS, et al. 2009).

1. OBJETIVOS

Analisar a emissão de carbono negro e sua influência no clima e na temperatura com base nas queimadas da Amazônia entre os anos de 2012 a 2022.

1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar e comparar a presença de carbono negro durante uma década, com fundamento das queimadas ocorridas.
- Associar a causa às queimadas os resultados com temperatura e climas atuais, a fim de relacionar previsões futuras na qualidade do ar.

2. Procedimento metodológico

Pesquisa Bibliográfica: Realizamos uma extensa pesquisa bibliográfica, contendo trinta e dois sites e portais acadêmicos confiáveis (citados abaixo).

2.1 Área de estudo

Devido a crescente presença de focos de incêndio no território nacional com destaque para as regiões do Pantanal, da Amazônia e mais recentemente do interior de São Paulo, entende-se que a poluição atmosférica e suas consequências estejam presentes no cotidiano da população de todo o Brasil.

Através desse princípio, estabeleceu-se a escala de crescimento desses focos de incêndio e seus respectivos impactos climáticos em diferentes regiões do território brasileiro.

2.2 Base de dados

- Portal de Periódicos da CAPES, indexa as mais variadas e relevantes fontes de pesquisa científica do mundo.
- Google acadêmico, ferramenta de pesquisa de publicações científicas que apresenta resultados em trabalhos acadêmicos, literatura escolar, periódicos de universidades, capítulos de livros e artigos variados.
- SCieLO (*Scientific Electronic Library Online*), biblioteca eletrônica que abrange uma coleção selecionada de periódicos científicos brasileiros.

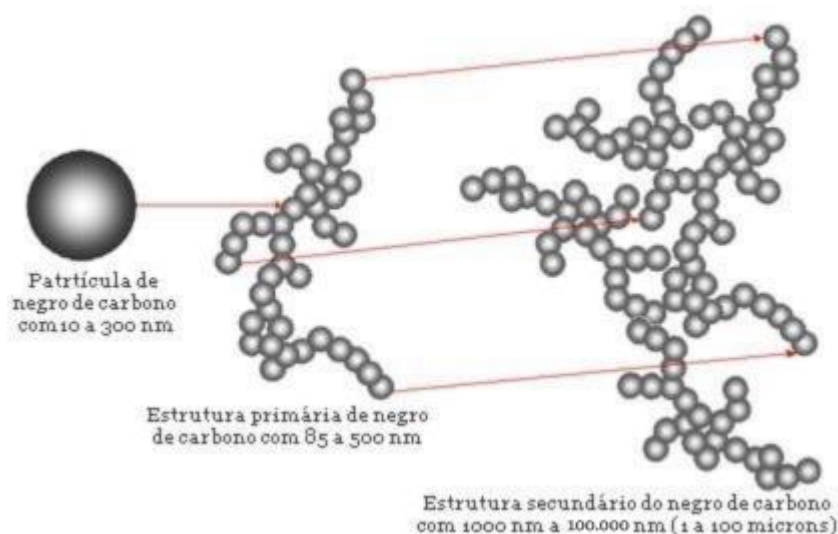
3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Carbono negro

O termo carbono negro (BC) não se refere a um composto químico específico ou a um grupo de compostos com características bem definidas. Contudo, é uma expressão genérica usada para descrever um contínuo de espécies de carbono reduzido, altamente condensado, remanescente da combustão incompleta de uma variedade de combustíveis fósseis e de biomassa. (Elmqvist et. al. 2004; Lima, 2004; Elmqvist, 2007). É composto por partículas de carbono puro com alta capacidade de absorção de radiação solar, a principal característica física dessas partículas é seu pequeno diâmetro, geralmente menor que 2,5 micrômetros, o que as torna parte do material particulado fino (*Particulate Matter 2.5* ou PM 2.5). As partículas de PM 2.5 têm uma grande mobilidade no ar e podem penetrar profundamente no sistema respiratório humano (Pöschl, 2005).

Várias terminologias têm sido utilizadas para definir esse resíduo altamente condensado. Dependendo do processo estudado ou métodos de análises aplicados, inclui termos como fuligem, carbono elementar, carbono negro, carvão mineral e carvão vegetal, entre outros. (Schmidt, 2000; Lima, 2004).

Figura 1 - Estruturas secundária e primária do negro de carbono



Fonte: CAETANO, Mário.

Sua estrutura é similar ao grafite e é emitido diretamente para a atmosfera em processos de combustão (WANG, 2019), desta forma, possui apenas fontes primárias de emissão.

Os combustíveis baseados em carbono que produzem estes tipos de partículas podem ser separados em: i) materiais sólidos tais como carvão mineral, carvão vegetal, madeira, grama e folhas; ii) materiais fluidos tais como petróleo, gasolina, diesel e iii) materiais gasosos (Elmqvist, 2007).

Segundo Bond et al. (2013), a emissão de carbono negro está diretamente associada à queima incompleta de combustíveis em processos industriais, veículos automotores, e na queima de biomassa para aquecimento e geração de energia em países em desenvolvimento. A característica mais crítica do carbono negro é sua capacidade de absorver até 1 milhão de vezes mais radiação solar do que outros componentes do material particulado (Ramanathan & Carmichael, 2008).

Embora as características do BC sejam extremamente variadas, as partículas geralmente possuem uma estrutura tridimensional, composta de lâminas aromáticas planares e sobrepostas, de forma que o aumento da aromaticidade é diretamente proporcional à elevação das resistências térmica e química, o que nos leva a compreender a razão de materiais mais condensados como a fuligem e o grafite, serem resistentes em temperaturas iguais ou em alguns casos, superiores a 375°C (Masiello, 2004; Koelmans et. al., 2006).

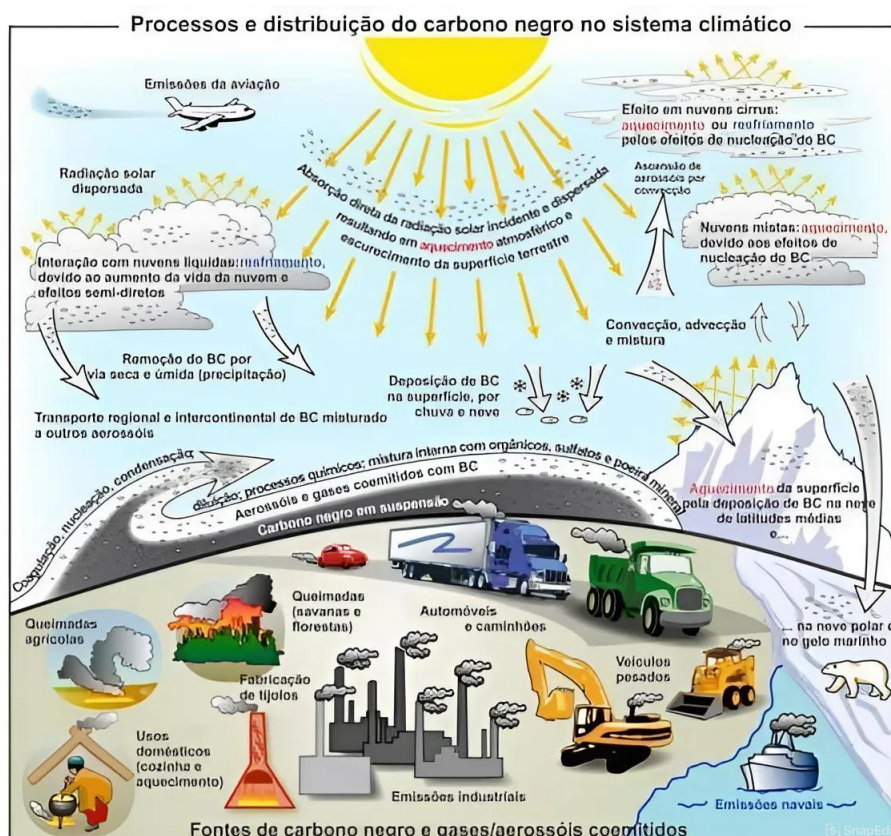
3.2 Fontes de Emissão

As principais fontes de emissão de carbono negro incluem (i) a queima de combustíveis fósseis em motores a diesel e indústrias, (ii) a queima de biomassa para aquecimento e cocção em áreas rurais e (iii) incêndios florestais (Bond et al., 2013). A queima de combustíveis fósseis é responsável por uma parcela significativa das emissões globais, especialmente em áreas urbanas e industriais, onde há uma grande concentração de veículos e indústrias. Por outro lado, em regiões menos desenvolvidas, a queima de biomassa para o preparo de alimentos e para aquecimento doméstico é a maior fonte de carbono negro (Ramanathan & Carmichael, 2008).

De acordo com uma análise feita por Pöschl (2005), os processos de combustão incompleta liberam não apenas carbono negro, mas também outros poluentes, como monóxido de carbono (CO) e compostos orgânicos voláteis, o que agrava ainda mais a qualidade do ar.

O carbono negro é um poluente atmosférico de grande relevância tanto para o aquecimento global quanto para a saúde pública. Suas propriedades de absorção de luz e sua capacidade de afetar o sistema respiratório humano fazem dele um dos principais alvos das políticas de redução de emissões de poluentes. Estratégias eficazes para reduzir suas emissões são fundamentais para mitigar os impactos das mudanças climáticas e melhorar a qualidade de vida, especialmente em regiões urbanas e áreas de baixo desenvolvimento econômico.

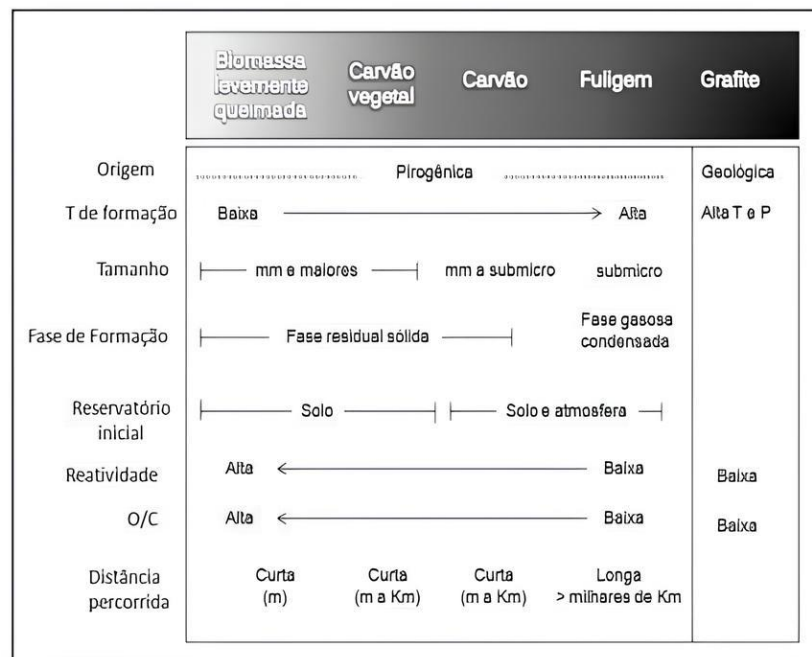
Figura 2 – Processos e distribuição do carbono negro no sistema climático



Fonte: Bond et al. (2013). Modificado.

O processo de formação e consequente emissão de BC para atmosfera é influenciado por diversos parâmetros, como por exemplo o tipo de combustível e a relação entre carbono e oxigênio neste, a temperatura da chama e o tempo de residência do combustível no processo. O tipo de combustível afeta a emissão de BC pois quanto mais voláteis estiverem presentes no processo de queima, maior a formação de BC. Do mesmo modo, o aumento da temperatura da chama gera um aumento da estabilidade da combustão, o que faz o combustível queimar mais rápido. O aumento do tempo de residência do combustível no processo diminui a formação de BC, uma vez que garante uma queima mais eficiente (Ni et al., 2014).

Figura 3 – Relação entre o contínuo de produtos de combustão



Fonte: Figura adaptada de Lima, 2004; Masiello, 2004; Elmquist, 2007. Modificado.

3.3 Impactos do Carbono Negro

O carbono negro exerce um papel fundamental no aquecimento global de curto prazo. Ele atua ao absorver a radiação solar diretamente, aquecendo a atmosfera e, ao ser depositado em superfícies cobertas de neve ou gelo, diminui o albedo (capacidade de uma superfície refletir luz solar), acelerando o derretimento dessas superfícies. Esse processo foi bem documentado por Ramanathan e Carmichael

(2008), que demonstraram que o carbono negro contribui de forma significativa para o aquecimento em regiões polares, especialmente no Ártico, onde o derretimento acelerado do gelo tem sido observado.

Além disso, o carbono negro pode influenciar os padrões de precipitação, uma vez que sua presença na atmosfera pode alterar a formação de nuvens, reduzindo a quantidade de radiação solar refletida de volta ao espaço (Bond et al., 2013). Isso tem impactos diretos sobre os ecossistemas locais e sobre a distribuição de chuvas em regiões já vulneráveis, como o Sudeste Brasileiro.

3.4 Poluentes Atmosféricos

Considera-se poluente qualquer substância presente no ar e que, pela sua concentração, possa torná-lo impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde, causando inconveniente ao bem-estar público, danos aos materiais, à fauna e à flora ou prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade (CETESB).

Os poluentes atmosféricos podem ser divididos em duas formas: poluentes primários e poluentes secundários.

- Poluentes primários: são substâncias liberadas na atmosfera, podendo ser geradas tanto por atividade humana, quanto de forma natural e que causam impacto ambiental ou à saúde na forma em que se é emitida.
- Poluentes secundários: são aqueles que não são emitidos diretamente na atmosfera, e que resultam de reações entre os poluentes primários e outros componentes do ambiente.

3.5 Parâmetros meteorológicos

Os parâmetros meteorológicos são medições dedicadas a entender como o carbono negro afeta o clima e a atmosfera. Segundo o IPCC (2021) "O carbono negro influencia parâmetros meteorológicos como a temperatura do ar e padrões de precipitação, afetando diretamente o clima regional e global."

Começando pelo principal parâmetro, a temperatura do ar é extremamente afetada através do efeito de aquecimento radiativo. Quando partículas de BC são depositadas na atmosfera, elas absorvem a radiação solar e transformam essa energia em calor, elevando a temperatura local e regional. Um estudo recente de Wang et al. (2024) destaca que "a presença de carbono negro na atmosfera pode elevar as temperaturas superficiais de até 2°C, contribuindo para mudanças significativas no padrão climático". Esse aquecimento não só altera a temperatura local, mas também pode ter efeitos em escala global, afetando a circulação atmosférica e os padrões de vento.

Além da temperatura, o BC também influencia a umidade relativa do ar. A umidade da superfície está ligada com às mudanças na precipitação e pode afetar a temperatura local. Em alguns casos, a umidade do solo pode diminuir em algumas regiões, levando a condições mais secas, o que pode aumentar a capacidade de gerar mais incêndios florestais e, conseqüentemente, à emissão de carbono negro, como um ciclo.

Partículas de BC têm um grande impacto na formação e dinâmica das nuvens. "O carbono negro influencia a formação e as propriedades das nuvens, alterando sua refletividade e potencial de precipitação." (IPCC, 2021). Estudos recentes sugerem que o carbono negro pode modificar as características das nuvens, tornando-as menos reflexivas e mais propensas a produzir chuvas mais intensas, o que pode resultar em alterações no regime de chuvas e na estação seca na Amazônia.

3.6 Efeitos do Carbono Negro na temperatura local e regional

É perceptível que assim como o carbono negro afeta superfícies, também aquece de maneira significativa a atmosfera. As partículas de carbono negro absorvem radiação solar, assim elevando a temperatura da camada atmosférica superior. Este aquecimento atmosférico pode alterar o padrão das correntes de ar e dos sistemas de alta e baixa pressão. Como resultado, podem ocorrer mudanças relevantes nos padrões climáticos regionais. De acordo com o IPCC (2018) "O carbono negro é um dos poluentes climáticos de vida curta que contribui para o aquecimento global e tem impactos significativos nas temperaturas regionais." Esses impactos podem influenciar a distribuição das precipitações, aumentando a frequência e a intensidade de eventos climáticos extremos, como ondas de calor e tempestades. Outro efeito importante do carbono negro é a sua contribuição para a alteração do

ciclo hidrológico. O aquecimento regional pode modificar o ciclo da água, quando partículas de carbono negro são liberadas na atmosfera, a presença delas pode alterar as propriedades das nuvens, assim afetando a evaporação e a formação das próprias. Além disso, a fácil absorção de radiação solar, uma das principais características do BC, gera um aquecimento exacerbado, alterando os padrões de temperatura. Esse aquecimento gerado pode também ter impactos indiretos, como a mudança na vegetação e nos ecossistemas. As alterações na temperatura e nos padrões de precipitação podem levar a mudanças na distribuição de espécies e na saúde dos ecossistemas, afetando a biodiversidade e a capacidade das florestas de funcionar como sumidouros de carbono.

3.7 Material particulado

Dentre os poluentes atmosféricos mais conhecidos, o material particulado (MP), é o mais estudado atualmente devido suas características físicas e químicas.

Segundo a determinação sobre os poluentes atmosféricos da CETESB, material particulado é uma mistura complexa de sólidos com diâmetro reduzido. Sua emissão se dá tanto para fontes naturais como ações antropogênicas, como queima de combustíveis fósseis, queima de biomassa vegetal, emissões de amônia na agricultura.

Os estudos realizados pela OECD- organização para cooperação e desenvolvimento econômico, expõe em uma pesquisa realizada em 2012: Perspectivas Ambientais para 2050, mostra que as projeções para a poluição atmosférica são graves e sem intervenção humana e implementação de medidas de mitigação, a tendência para qualidade do ar será um agravamento de nível global.

Doenças cardiorrespiratórias agravadas pela poluição por material particulado (PM) serão a principal causa de morte relacionada ao meio ambiente mundialmente, superando as mortes por malária, poluição indoor, consumo de água insalubre e falta saneamento básico (OECD, 2011).

3.8 Partículas inaláveis (MP_{2,5})

Os MP 2,5 são uma variação do material particulado, sendo uma partícula mais fina, caracterizada pelo seu tamanho de 2,5 micrômetros (μm).

Essas partículas são ainda menores que as partículas MP₁₀, o que significa que podem ser facilmente inaladas e penetrar ainda mais profundamente no sistema respiratório humano (CETESB, 2023). Sua composição pode variar entre poeira, fuligem, compostos orgânicos, sua origem sendo processos que resultam de combustão.

3.9 Partículas grossas (MP₁₀)

Os MP 10 são uma variação do material particulado, sendo uma partícula mais fina, caracterizada pelo seu tamanho de 10 micrômetros (μm).

Pode ser originada de várias formas como cinzas, partículas de carbono emissão veicular, queima de biomassa e combustíveis fósseis (BRITO; SODRÉ;2019).

3.10 Aerossóis

A atmosfera terrestre apresenta um grande número de pequenas partículas sólidas e líquidas as quais diferem em tamanho, forma e composição. O aerossol é definido como um sistema disperso que contém partículas sólidas e/ou líquidas em suspensão num meio gasoso e é correntemente referido como a material particulado sólido ou líquido, fina, em suspensão na atmosfera (Seinfeld, 2019).

As propriedades principais do aerossol são: a baixa velocidade de sedimentação; nos movimentos de partículas, as forças de inércia são desprezíveis em relação às forças viscosas; o movimento Browniano é significativo; a área superficial é grande em comparação com o seu volume.

Geralmente os aerossóis são considerados como as partículas atmosféricas com diâmetros que abrangem desde os poucos nanômetros (nm) às dezenas de micrômetros (μm), e uma vez emitidas para a atmosfera podem sofrer alterações de tamanho e composição devido a vários processos, como, coagulação com outras partículas, reações químicas e a condensação de vapor de água podendo vir a formar nevoeiro, smog ou gotas de nuvens. A formação de nuvens não seria possível sem a ocorrência de partículas atmosféricas, sendo estas assim essenciais nos processos climáticos. As partículas que intervêm na formação de nevoeiro ou gotas de nuvens na presença de vapor de água sobressaturado chamam-se núcleos de condensação de nuvens (Seinfeld, 2019).

Elas absorvem e espalham a radiação solar e influenciam significativamente a precipitação; por fornecerem núcleos de condensação de nuvens, os aerossóis constituem um ingrediente essencial para a formação e desenvolvimento de nuvens (Shrivastava et al., 2019).

As partículas atmosféricas são originadas a partir de fontes naturais, como as libertadas pela atividade vulcânica industrial. Agricultura a partir de atividades antropogênicas como a atividade transportes. Este tipo de poluente pode ser emitido diretamente (aerossol primário) ou formado na atmosfera por processos de conversão gás partícula (aerossol secundário). A combustão e outros processos com elevadas temperaturas são responsáveis pela emissão de partículas finas, enquanto as partículas grossas são principalmente emitidas por processos mecânicos como ressuspensão de poeiras do solo ou o spray marinho.

As partículas são eventualmente removidas da atmosfera por dois mecanismos: deposição à superfície da terra sob influência, principalmente, da força gravitacional (deposição seca ou sedimentação) e incorporação nas gotas de chuva, quer durante a precipitação entre a base das nuvens e o solo, quer durante a formação das nuvens e posterior precipitação, (deposição úmida) (Seinfeld, 2019).

A investigação sobre aerossóis intensificou-se nas últimas décadas devido à sua interação com o ambiente, prestando-se especial atenção às partículas emitidas por fontes antropogênicas, as quais compõem uma significativa fração do aerossol atmosférico.

As emissões antropogênicas que levam direta ou indiretamente à formação de aerossóis aumentaram substancialmente ao longo do século passado e causam efeitos adversos na saúde humana e no ambiente, nomeadamente na visibilidade e na perturbação no balanço de radiação solar do planeta (Seinfeld, 2019).

3.11 Processos de formação das partículas

A nucleação é uma etapa no processo de formação de partículas, sendo o primeiro passo na transição de uma fase metastável para uma fase estável. A nucleação pode ser classificada em dois principais mecanismos nucleação homogênea e nucleação heterogênea. A homogênea ocorre quando as partículas se formam a partir de um meio homogêneo, sem a influência de superfícies ou impurezas.

Nesse caso, a nucleação é energeticamente desfavorável, pois requer a superação de uma barreira de energia associada à formação de um núcleo que deve ser maior que o raio crítico. Este raio crítico é determinado pela relação entre a energia de formação da partícula e a energia de superfície, dada pela equação de GibbsThomson. A nucleação heterogênea ocorre em presença de superfícies ou impurezas que atuam como centros de nucleação. Neste caso, a barreira de energia para a formação do núcleo é reduzida, pois a interface entre a nova fase e o substrato pode facilitar a agregação de moléculas ou átomos, promovendo a nucleação a temperaturas e pressões mais baixas em comparação com a homogênea.

A nucleação é influenciada por diversos fatores, incluindo temperatura, pressão, concentração de soluto e a presença de agentes nucleantes. Em sistemas supersaturados, por exemplo, a densidade de núcleos aumenta, o que pode acelerar a formação de partículas. Em contrastes, a nucleação em condições sub-saturadas pode ser significativamente mais lenta

A etapa de crescimento é um processo subsequente à nucleação na formação de partículas, desempenhando um papel crucial na determinação das propriedades finais do material. Essa fase envolve a agregação de moléculas, átomos ou íons que se organizam em torno dos núcleos previamente formados, resultando em partículas maiores e mais estáveis. O crescimento das partículas pode ser entendido através de dois principais mecanismos: crescimento por difusão e crescimento por colisão.

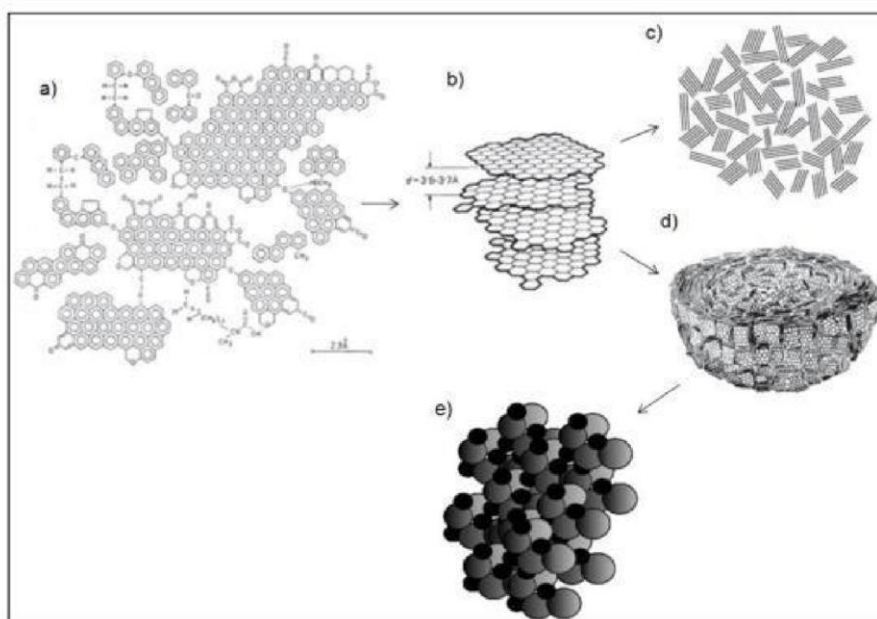
Crescimento por Difusão: Nesse mecanismo, os átomos ou moléculas se movem através de um meio (líquido ou gás) até alcançarem a superfície do núcleo. A difusão pode ocorrer de várias formas, como:

Difusão em fase gasosa: Átomos ou moléculas se movem no espaço intersticial, colidindo com a superfície da partícula em crescimento.

Difusão em fase líquida: No caso de sistemas líquidos, as espécies se movem por movimento Browniano até se adsorverem à superfície do núcleo.

Crescimento por Colisão: Este mecanismo ocorre quando partículas já formadas colidem e se agregam. A taxa de crescimento depende de fatores como a viscosidade do meio e a energia cinética das partículas.

Figura 4 – Formação das moléculas do Carbono Negro



Fonte: Schmidt, 2000; Preston & Schmidt, 2006; Elmquist, 2007.

3.12 Dinâmica de circulação

A dinâmica de circulação do carbono negro é um aspecto de grande importância para entender seu impacto nas mudanças climáticas, especialmente em regiões tropicais como a Amazônia. Existem três pontos principais dessa dinâmica, sendo elas: emissão, transporte e deposição. Como já mencionado, o carbono negro é uma forma de material particulado emitido pela queima incompleta de combustíveis fósseis, biomassa e outros materiais orgânicos. Devido ao seu tamanho e propriedades físicas, o BC pode permanecer em suspensão no ar por períodos que variam de dias a meses, transportado por correntes de vento. Durante esse tempo, ele pode ser transportado por longas distâncias, dependendo das condições meteorológicas e da dinâmica atmosférica. E por fim, eventualmente se depositando em alguma superfície.

3.13 Absorção de Radiação Solar

O carbono negro possui uma característica de absorver radiação solar com uma grande facilidade. Assim que o BC é emitido na atmosfera, ele pode permanecer em suspensão por semanas há meses, antes de ser depositado no solo ou na superfície dos oceanos. E quando finalmente depositado em alguma superfície, as partículas de carbono negro absorvem a radiação solar, aquecendo o ar circundante e afetando os padrões de circulação atmosférica (Bond et al. 2013). Quando essa radiação solar é

absorvida, ela é convertida de energia radiante em calor. Esse processo altera a temperatura atmosférica e pode modificar os padrões climáticos regionais. A absorção de radiação solar pelo carbono negro é uma das principais razões para o seu impacto no aquecimento global. Estudos recentes destacam a importância da absorção de radiação solar pelo carbono negro e seu efeito no balanço energético da Terra.

Segundo o estudo de Zhang et al. (2023), “o carbono negro tem um potencial de aquecimento global muito mais elevado do que o dióxido de carbono, devido à sua alta eficiência em absorver a radiação solar e transferir essa energia para a atmosfera” (Zhang et al., 2023). Este efeito é particularmente notável nas regiões com cobertura de nuvens, onde o carbono negro pode intensificar o aquecimento ao reduzir o albedo da superfície. Portanto, a absorção de radiação solar pelo carbono negro é um fator crucial para o entendimento dos impactos climáticos e ambientais deste poluente. A sua capacidade de modificar o equilíbrio energético da Terra destaca a necessidade urgente de políticas e estratégias para reduzir suas emissões e mitigar seus efeitos adversos sobre o clima global.

3.14 Deposição do Carbono Negro

A deposição de carbono negro é um processo crítico que influencia o clima e os ecossistemas, especialmente nas regiões tropicais e subtropicais. Sua deposição sobre superfícies como neve e gelo pode alterar significativamente a refletância dessas superfícies, exacerbando o aquecimento global. Quando o carbono negro é depositado sobre a superfície de neve ou gelo, ele reduz o albedo — a capacidade da superfície de refletir a luz solar de volta para o espaço. Com um albedo menor, mais radiação solar é absorvida, resultando em um aumento da temperatura da superfície e, conseqüentemente, um derretimento mais acelerado do gelo. Esse fenômeno tem implicações diretas para o nível do mar e para a estabilidade das camadas de gelo polar, além de impactar a distribuição dos recursos hídricos em regiões afetadas. A importância da deposição de carbono negro para o clima global é reforçada por estudos recentes. Segundo um estudo publicado em 2023 por Zhang et al., “A deposição de carbono negro em áreas árticas tem contribuído significativamente para o aumento da taxa de derretimento do gelo, agravando os efeitos das mudanças climáticas e potencialmente acelerando o impacto do aquecimento global em escalas regionais e globais” (Zhang et al., 2023). Este estudo destaca a necessidade urgente de reduzir as emissões de carbono negro para mitigar os efeitos adversos sobre o

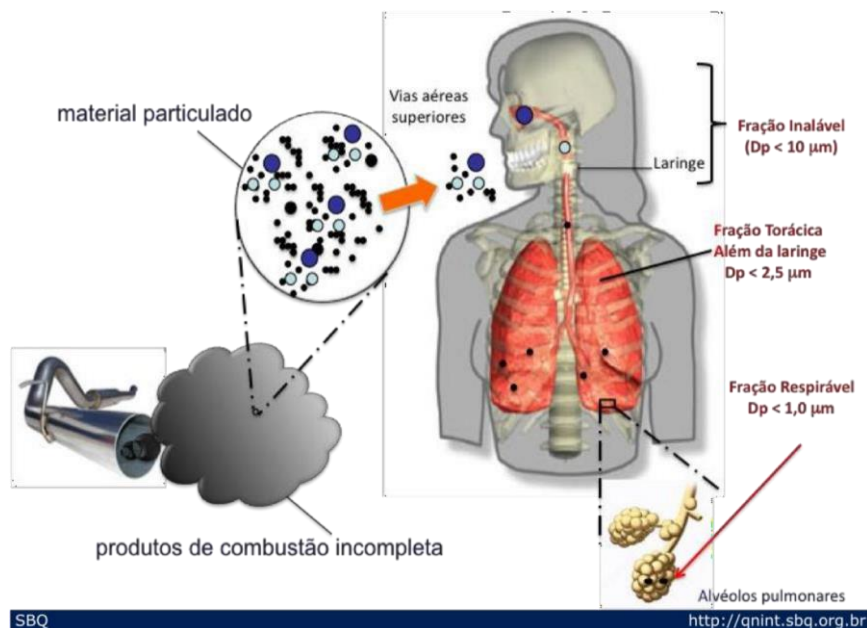
clima. Além de seu impacto no albedo, a deposição de carbono negro também afeta a química atmosférica e a qualidade do ar. A presença de carbono negro em grandes concentrações pode influenciar a formação de nuvens e alterar padrões de precipitação. Isso ocorre porque o carbono negro atua como um núcleo de condensação para a formação de nuvens, o que pode modificar a quantidade e a distribuição de precipitação, alterando ciclos hidrológicos regionais e globais.

3.15 Impactos do Carbono Negro na saúde

Do ponto de vista da saúde pública, a exposição ao carbono negro está associada a uma série de doenças respiratórias e cardiovasculares (Janssen et al., 2011). Por serem partículas finas, elas podem ser inaladas profundamente nos pulmões, causando inflamação e piorando condições preexistentes, como asma e bronquite (Pope III & Dockery, 2006). Além disso, a exposição prolongada a altos níveis de carbono negro foi correlacionada com o aumento do risco de doenças cardiovasculares e câncer de pulmão (Janssen et al., 2011). Além do risco de câncer decorrente destas emissões, estudos recentes sugerem que a exposição à fumaça de diesel pode agravar a reação do corpo a alérgenos comuns, provocando um aumento significativo na resposta imunológica (SILVERMAN, 2018).

As partículas de Carbono Negro estão cada vez mais agravantes em relação à saúde humana, a poluição por carbono negro se tornou um problema ambiental global que afeta negativamente a saúde pública, a qualidade do ar urbano, a agricultura, reduz a visibilidade e causa mudanças climáticas globais (da Silva Jr., CR; Lemos, BRL; Pinto, JP; Amador, IR; Solci, MC; J. Braz. 2019). Por serem tão pequenas, estas partículas entram com facilidade no nosso sistema respiratório chegando até aos alvéolos pulmonares, e são responsáveis por um acréscimo dos problemas respiratórios. (Fialho, P. 2024).

Figura 5 – Materiais inalados



Fonte: Sociedade Brasileira de Química.

3.16 Padrões de Qualidade do Ar

Os padrões de qualidade do ar (PQAr) são diretrizes estabelecidas pela Organização Mundial da Saúde (OMS) em 2005, que variam conforme a abordagem adotada para equilibrar riscos à saúde, viabilidade técnica, considerações econômicas e fatores políticos e sociais. Essa variação depende do nível de desenvolvimento e da capacidade nacional de gerenciar a qualidade do ar. As diretrizes da OMS reconhecem a heterogeneidade nas circunstâncias locais, incentivando os governos a considerar esses fatores antes de adotar os valores propostos como padrões nacionais.

No Brasil, os padrões de qualidade do ar são definidos pela Resolução CONAMA nº 491/2018, que revogou a Resolução CONAMA nº 3/1990. Essa resolução estabelece que o padrão de qualidade do ar é um instrumento de gestão que determina o valor de concentração de um poluente específico na atmosfera, associado a um intervalo de tempo de exposição, visando preservar o meio ambiente e a saúde da população.

Classificação dos Padrões de Qualidade do Ar

1. Padrões de Qualidade do Ar Intermediários (PI): Valores temporários a serem cumpridos em etapas.
2. Padrão de Qualidade do Ar Final (PF): Valores guia definidos pela OMS em 2005.

Aplicação dos Padrões

A Resolução CONAMA nº 491/2018, em seu artigo 4º, detalha a aplicação dos padrões de qualidade do ar:

- Art. 4º: Os padrões serão adotados sequencialmente em quatro etapas.
- 1º: A primeira etapa entra em vigor com os Padrões de Qualidade do Ar Intermediários PI-1.
- 2º: Para os poluentes Monóxido de Carbono (CO), Partículas Totais em Suspensão (PTS) e Chumbo (Pb), será adotado o padrão de qualidade final a partir da publicação da Resolução.
- 3º: Os Padrões Intermediários e Final (PI-2, PI-3 e PF) serão adotados de forma subsequente, considerando os Planos de Controle de Emissões Atmosféricas e os Relatórios de Avaliação da Qualidade do Ar elaborados pelos órgãos ambientais.
- 4º: Se não for possível a migração para o padrão subsequente, prevalecerá o padrão já adotado.
- 5º: O órgão ambiental competente estabelecerá critérios para o licenciamento ambiental, conforme o padrão de qualidade do ar adotado localmente.

Parâmetros Regulamentados

Os parâmetros regulamentados pela legislação ambiental incluem:

- Partículas Totais em Suspensão (PTS)
- Fumaça
- Partículas Inaláveis (MP10 e MP2,5)

- Dióxido de Enxofre (SO_2)
- Monóxido de Carbono (CO)
- Ozônio (O_3)
- Dióxido de Nitrogênio (NO_2)
- Chumbo (Pb)

A resolução também estabelece critérios para episódios agudos de poluição do ar. A declaração dos estados de Atenção, Alerta e Emergência requer a consideração dos níveis de concentração atingidos e condições meteorológicas desfavoráveis à dispersão dos poluentes.

3.17 Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas - IPCC

Figura 6 - Monções regionais



Fonte: IPCC – sexto relatório de avaliação

- Monção Sul-Americana (SAM)

Existem projeções de aumento da seca agrícola e ecológica para meados do século 21, para 2 °C da temperatura global nível de aquecimento e acima (alta

confiança). Prevê-se que a intensidade e a frequência das precipitações extremas e das inundações pluviais aumentem (média confiança) para um nível de aquecimento global de 2°C e superior. Aumentos em um ou mais aspectos entre seca, aridez e clima de incêndio (alta confiança) afetarão uma ampla variedade de setores, incluindo agricultura, silvicultura, saúde e ecossistemas. Na Amazônia, o número de dias por ano com temperaturas máximas superiores a 35°C aumentaria em mais de 150 dias até ao final do século XXI no cenário SSP5-8.5, embora se espere que aumente em menos de 60 dias no cenário SSP1-2.6 (alta confiança).

- Norte da América do Sul (NSA)

A intensidade e frequência de precipitação extrema e prevê-se que as cheias pluviais aumentem (média confiança) para 2°C de nível de aquecimento global e acima. Existe uma grande confiança num aumento dominante no número de dias secos e a frequência da seca.

- Nordeste da América do Sul (NES)

A intensidade e frequência de precipitação extrema e prevê-se que as cheias pluviais aumentem (média confiança) para 2°C de nível de aquecimento global e acima. Existe uma grande confiança num aumento dominante na duração da seca.

- Sudeste da América do Sul (SES)

Aumentos na precipitação média e extrema são observados desde a década de 1960 (alta confiança). Essas mudanças incluem variabilidade interna, bem como forçamentos externos, como aumentos de gases de efeito estufa e aerossóis e destruição da camada de ozônio. Prevê-se que a intensidade e a frequência das precipitações extremas e das inundações pluviais aumentem (média confiança) para 2°C de nível de aquecimento global e acima.

3.18 Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB)

De acordo com o relatório da CETESB sobre a evolução das concentrações de Carbono Orgânico e Carbono Elementar no MP2,5 na atmosfera de São Paulo, observa-se que as médias anuais de MP2,5 apresentaram tendência de queda ao

longo dos anos, a partir de 2010, o que não foi observado no caso das concentrações de carbono, que se mantiveram num patamar mais constante,

O comportamento sazonal do C.Org. C.E. é semelhante ao do MP2,5 ou seja, ocorreu um aumento das médias mensais no período do inverno coincidindo com o período geralmente mais desfavorável à dispersão de poluentes primários no município de São Paulo, entretanto a máxima média mensal do C.Org. foi no início da primavera.

O conjunto total dos dados medidos no período de 2009 a 2012 e 2015 e 2016 mostrou correlação moderada entre as concentrações de MP2,5 e C.E. e forte correlação entre MP2,5 e carbono orgânico. De maneira geral, há uma forte correlação entre C.Org. e C.E., indicando que as fontes de poluição de ambos são similares.

Maiores razões C.Org/C.E. foram observadas na primavera, seguida do inverno, outono e as menores razões obtidas no verão. Os valores de C.Org. em São Paulo foram, de maneira geral, da mesma ordem de grandeza dos obtidos em cidades dos EUA e da União Europeia. Os teores de C.E. foram, em geral, maiores que os medidos nessas outras cidades.

3.19 O papel do Carbono Negro nas políticas climáticas

A criação de políticas climáticas tem o intuito de mitigar e encontrar soluções sustentáveis para as grandes emissões de gases poluentes; do efeito estufa no planeta e planejar um futuro melhor para a humanidade, porém não é observada uma melhora nesse âmbito sustentável.

As políticas climáticas globais têm se concentrado amplamente em mitigar as emissões de gases de efeito estufa, como o dióxido de carbono (CO_2), devido ao seu protagonismo no aquecimento global e nas mudanças climáticas. No entanto, nas últimas décadas, o carbono negro emergiu como um poluente atmosférico de relevância crescente. Embora sua vida útil na atmosfera seja curta, seus impactos climáticos e de saúde pública são relevantes, e merecem receber atenção incorporar essa variante do carbono nas políticas de mitigação se mostra uma ação necessária para o combate ao aquecimento global.

Por ser um tópico recente as políticas climáticas ainda estão começando a reconhecer a necessidade de lidar com este poluente classificado como “de curta duração”, organizações como o IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças

Climáticas) mencionam o carbono no relatório de 2018 sobre a limitação do aquecimento global a 1,5 C° “Trajetórias modeladas que limitam o aquecimento global a 1,5°C sem ou com *overshoot* limitado envolvem reduções profundas nas emissões de metano e **carbono negro** (35% ou mais de ambos até 2050 em relação a 2010) [...] As emissões não-CO2 podem ser reduzidas como resultado de amplas medidas de mitigação no setor de energia. Além disso, medidas específicas de mitigação de emissões não-CO2 podem reduzir o óxido nitroso e o metano provenientes da agricultura, o metano do setor de resíduos, algumas fontes de **carbono negro** e os hidrofluorcarbonos. Alta demanda de bioenergia pode aumentar as emissões de óxido nitroso em algumas trajetórias de 1,5°C, destacando a importância de abordagens de manejo adequadas. A melhoria da qualidade do ar resultante das reduções projetadas em muitas emissões não-CO2 proporcionam benefícios diretos e imediatos à saúde da população em todas as trajetórias de 1,5°C modeladas (alta confiança)”. As soluções são discutidas, de acordo com o relatório a medidas sustentáveis no setor energético reduzem as emissões, o que se conecta com a característica de emissão do BC resultada da queima de combustíveis fósseis utilizados como fonte de energia.

3.20 Alteração no regime de chuvas e na estação de seca

O clima da Amazônia é classificado como equatorial úmido, caracterizando-se por temperaturas elevadas durante todo o ano e uma grande quantidade de chuvas. No entanto, devido ao aumento das queimadas na região amazônica, elas têm incentivado um aumento extremamente preocupante na concentração de Carbono Negro nas superfícies territoriais da Amazônia, destacando que o poluente é um grande aliado na questão do aquecimento global. Essa elevação nos níveis de carbono negro não apenas diminui a quantidade de chuvas, mas também traz secas prolongadas para a região. Um estudo recente de Silva et al. (2023) revelou que "a presença elevada de carbono negro na atmosfera da Amazônia contribui para a diminuição da umidade do solo e altera a distribuição espacial e temporal das chuvas, agravando a intensidade e a duração das secas". Isso significa que, com mais carbono negro na atmosfera, as chuvas podem se tornar mais irregulares e as estações secas podem se prolongar.

Essas mudanças têm um impacto direto na vegetação da região, a redução das chuvas durante a estação úmida e o aumento da duração das secas podem prejudicar

a saúde das florestas, reduzindo sua capacidade de absorver carbono e mantendo um ciclo de degradação que só aumenta as mudanças climáticas.

3.21 A Amazônia

A Amazônia tem sido o bioma no Brasil com o maior número de incêndios ativos nas últimas duas décadas, tendo em média quase duas vezes mais incêndios ativos do que o bioma Cerrado. As ignições na Amazônia são, de fato, causadas principalmente pelos extensos processos de conversão florestal e manutenção agrícola. Os incêndios são usados para remover a biomassa restante após o desmatamento, um processo conhecido como corte e queima. Nesse processo, as cinzas ajudam a fertilizar o solo em preparação para o novo uso agrícola. Após a consolidação das áreas agrícolas, os agricultores podem continuar a usar o fogo durante a estação seca para renovação da vegetação e controle de ervas daninhas. Devido à baixa adoção de práticas de manejo do fogo na região, tanto os incêndios associados ao desmatamento quanto as práticas agrícolas podem ocasionalmente escapar para campos e florestas adjacentes e causar incêndios florestais.

Figura 7 – Queimadas pelo Brasil

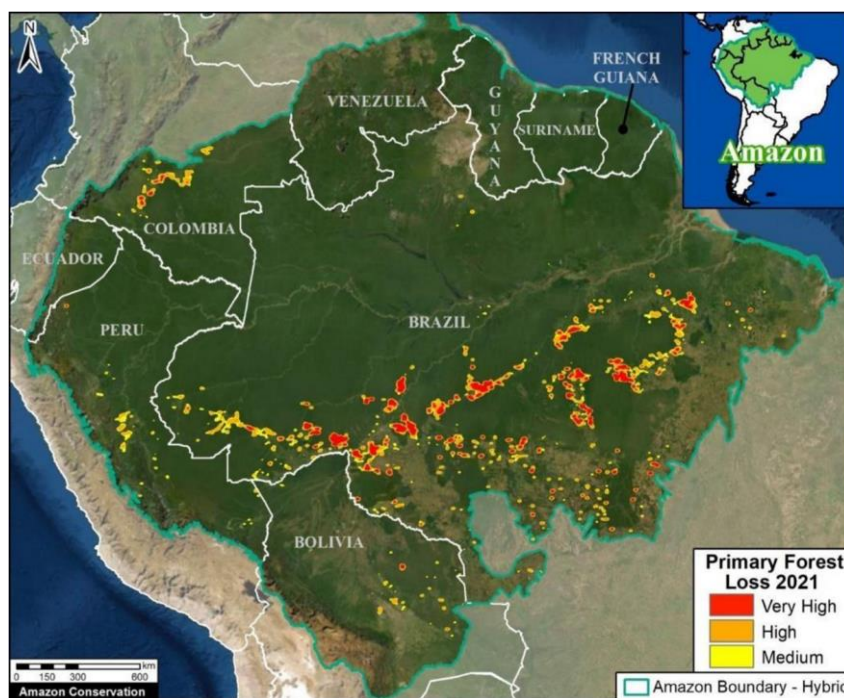


Fonte: NASA (2019)

Os locais dos incêndios, mostrados em laranja, foram sobrepostos em imagens noturnas adquiridas pelo VIIRS. Nesses dados, cidades e vilas aparecem em branco; áreas florestais aparecem em preto; e o Cerrado aparecem em cinza. As detecções

de incêndios nos estados do Pará e Amazonas estão concentradas em faixas ao longo das rodovias BR-163 e BR-230.

Figura 8 - Mapa de queimadas em 2021



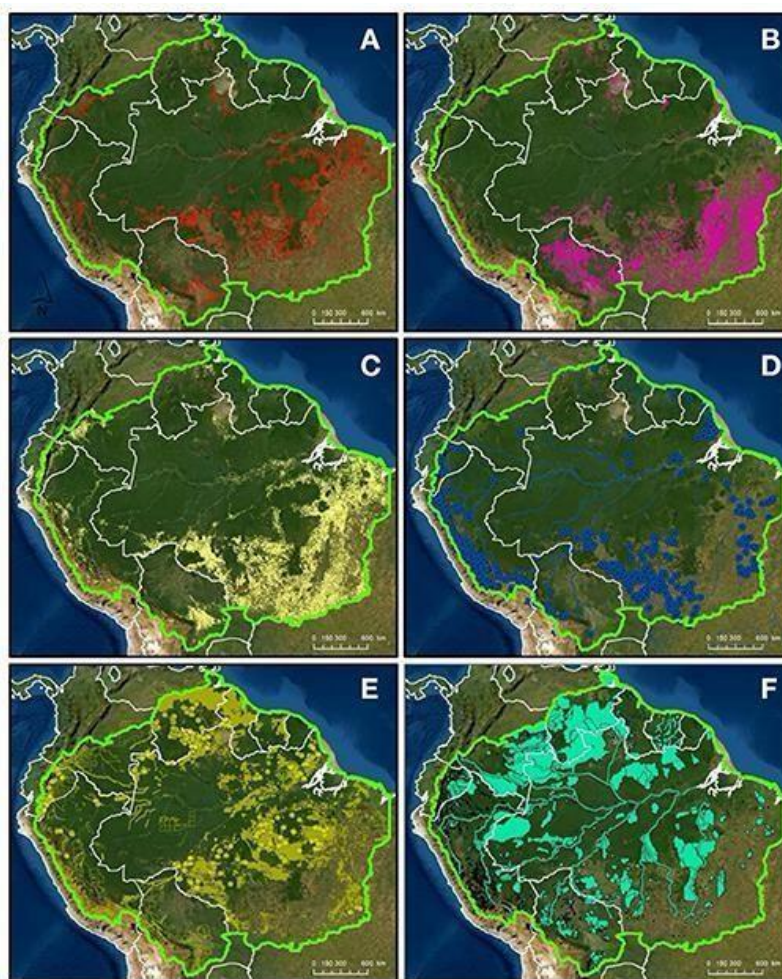
Fonte: Hansen/UMD/Google/USGS/NASA, MAAP.

3.22. Comparação entre diferentes regiões amazônicas

A crise de incêndios de 2019 na Amazônia dominou as notícias globais e desencadeou questões fundamentais sobre as possíveis causas por trás dela. Foi realizada uma investigação aprofundada dos impulsionadores das anomalias de incêndios ativos no bioma Amazônia brasileira. Uma série temporal de 2003-2019 de incêndios ativos, desmatamento e déficit hídrico e avaliamos os potenciais impulsionadores da ocorrência de incêndios ativos em 2019, na escala do bioma, nível estadual e nível local. Os resultados revelaram contagens mensais de incêndios anormalmente altas em 2019 para os estados do Acre, Amazonas e Roraima. Esses estados também diferiram dos outros por exibirem neste ano níveis extremos de desmatamento. As áreas em 2019 com ocorrência de incêndios ativos significativamente maior do que a média em todo o bioma tiveram, em média, três vezes mais incêndios ativos nos três anos anteriores, seis vezes mais desmatamento em 2019 e cinco vezes mais desmatamento nos cinco anos anteriores.

Aproximadamente um terço dos incêndios ativos anuais de 2003 a 2019 ocorreram a até 1 km de áreas desmatadas no mesmo ano, e um terço das áreas desmatadas em um determinado ano estavam localizadas a até 500 m de áreas desmatadas no ano anterior. Essas descobertas fornecem informações críticas para dar suporte a decisões estratégicas para políticas de prevenção de incêndios e ações de combate à incêndios. (TAMBARUSSI, et. Al. 2020).

Figura 9 – Fatores do uso da terra da Amazônia



Fonte: (ARAGÃO et. Al.). Fatores sociais e econômicos do uso da terra na Amazônia: **(A)** perda florestal 2001–2019 (Hansen et al., 2013) (sombreamento vermelho), **(B)** incêndios 2001–2019 (sombreamento rosa), **(C)** áreas agrícolas e pecuárias (MAPBIOMAS, 2020) (sombreamento amarelo), **(D)** energia hidrelétrica e reservatórios (pontos azuis), **(E)** áreas de extração de petróleo e mineração (sombreamento amarelo e pontos) e **(F)** áreas de pesca e caça (sombreamento azulclaro).

Desde 2003, os sensores MODIS nos satélites Aqua e Terra da NASA fazem observações diárias de anomalias térmicas (geralmente incêndios) ao redor do mundo. O mapa de detecção de incêndios nesta página é baseado em dados do *Fire*

Information for Resource Management System (FIRMS), um produto desenvolvido pela Universidade de Maryland e pelo Programa de Ciências Aplicadas da NASA. O FIRMS fornece informações sobre incêndios quase em tempo real para gerentes de recursos naturais e pesquisadores. Observe que cada ponto no mapa não corresponde necessariamente a um incêndio no solo. As detecções ativas de incêndios representam o centro de uma área de 1 quilômetro quadrado com uma ou mais anomalias térmicas. Às vezes, um incêndio contínuo pode ser registrado como múltiplas anomalias dispostas em uma linha, representando uma frente de incêndio.

3.22 Interações de nuvens e precipitações

O carbono negro influencia a formação e a dinâmica das nuvens de várias maneiras. Primeiramente, partículas de carbono negro presentes na atmosfera podem atuar como núcleos de condensação de nuvens (CCN). Esses núcleos são essenciais para a formação de nuvens, pois fornecem superfícies sobre as quais o vapor d'água pode condensar.

A presença de carbono negro pode alterar a quantidade e o tamanho das gotas de água nas nuvens, modificando suas propriedades e, conseqüentemente, sua capacidade de precipitar. Além disso, o carbono negro pode impactar a estrutura das nuvens ao absorver radiação solar e aquecer o ar circundante. Esse aquecimento pode alterar o perfil térmico da atmosfera, influenciando a estabilidade e o desenvolvimento das nuvens.

O efeito do carbono negro sobre as nuvens é evidenciado por uma série de estudos recentes. Por exemplo, um estudo de Smith et al. (2023) revela que “o carbono negro pode reduzir a formação de nuvens baixas e aumentar a quantidade de nuvens altas e espessas, alterando a dinâmica das precipitações” (Smith et al., 2023). Essas alterações na formação e estrutura das nuvens têm um impacto direto nas precipitações.

A presença de carbono negro pode modificar a distribuição espacial e temporal das chuvas. Em regiões como a Amazônia, onde a precipitação é crucial para a manutenção dos ecossistemas, as mudanças nos padrões de precipitação causadas pelo carbono negro podem ter consequências severas para o ciclo hidrológico e a biodiversidade. Por exemplo, uma redução na cobertura de nuvens e nas

precipitações pode levar a períodos de seca mais prolongados e intensos, afetando a vegetação e os recursos hídricos. Além disso, a interação entre carbono negro e nuvens pode afetar a eficiência da precipitação. As nuvens carregadas com carbono negro podem ter uma capacidade alterada para gerar precipitações, levando a uma distribuição desigual da água na superfície. Isso pode exacerbar eventos climáticos extremos, como chuvas intensas e secas prolongadas, que têm implicações significativas para a gestão de recursos hídricos e a agricultura. Portanto, as interações entre carbono negro, nuvens e precipitações são fundamentais para entender os impactos climáticos e ambientais desse poluente.

A modificação na formação e dinâmica das nuvens, bem como nas precipitações, ressalta a necessidade de uma abordagem integrada para mitigar os efeitos do carbono negro e proteger o equilíbrio climático global.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS

O presente estudo teve como objetivo examinar os efeitos do carbono negro, também conhecido como fuligem, tanto nas mudanças climáticas globais quanto na saúde pública, especialmente em relação ao aumento das internações por doenças respiratórias. Derivado da queima incompleta de combustíveis fósseis, biomassa e outros materiais orgânicos, o carbono negro é um dos poluentes atmosféricos mais nocivos, afetando o meio ambiente e a saúde humana.

As análises demonstraram que o carbono negro desempenha um papel crucial no aumento das temperaturas globais. Sua alta capacidade de absorver a luz solar e aquecer o ar ao seu redor — um fenômeno conhecido como "aquecimento radiativo" — contribui significativamente para o aquecimento da atmosfera. Além disso, o carbono negro pode alterar a composição das nuvens e influenciar os padrões de precipitação, amplificando os efeitos das mudanças climáticas. Sua presença em regiões remotas, como as áreas polares, acelera o derretimento de calotas de gelo e glaciares, resultando no aumento do nível do mar e na modificação dos ecossistemas.

No contexto da saúde pública, o estudo revelou uma associação direta entre o carbono negro e o aumento das doenças respiratórias. A inalação dessas partículas finas provoca inflamações pulmonares, agrava condições preexistentes como asma e

bronquite, e pode levar ao desenvolvimento de doenças mais graves, como enfisema pulmonar e câncer de pulmão. O impacto da exposição ao carbono negro é particularmente severo em áreas urbanas e industriais, onde as concentrações desse poluente são elevadas, causando um aumento significativo nas internações hospitalares e na mortalidade precoce relacionada a doenças respiratórias.

Portanto, é crucial implementar medidas mais eficazes para reduzir a emissão de carbono negro. Isso inclui políticas de controle de emissões nas indústrias e nos meios de transportes, além da promoção de tecnologias limpas e combustíveis alternativos mais sustentáveis. A conscientização sobre os efeitos nocivos da poluição do ar e a criação de políticas públicas de saúde e ambientais são essenciais para mitigar os impactos na saúde humana e no clima global.

Este estudo destaca a necessidade de uma abordagem integrada que envolva saúde pública, climatologia e políticas ambientais, com o objetivo de proteger tanto o meio ambiente quanto a qualidade de vida das populações afetadas pela poluição do ar. O combate ao carbono negro deve ser uma prioridade global para promover a sustentabilidade ambiental e melhorar a saúde humana.

Por fim, novas pesquisas são fundamentais para aprofundar o entendimento dos efeitos do carbono negro e suas interações com outros poluentes, além de desenvolver soluções tecnológicas e estratégias eficazes para sua mitigação afim de combater as queimadas. A transição para uma sociedade com menor impacto ambiental dependerá de ações coletivas, tanto em nível local quanto global.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, M. R., et al. **Circulação atmosférica e o transporte de carbono negro em regiões tropicais.** *Jornal de Geociências*, v. 28, n. 3, p. 153-167, 2022.

ARAGÃO, Luiz E. O. C. et al. **Carbono e além: a biogeoquímica do clima em uma Amazônia em rápida mudança.** *Frontiers in Forests and Global Change*, v. 4, 2021. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/ffgc.2021.618401/full>. Acesso em: 01 out. 2024.

Carbono negro: o que é e quais seus impactos? – eCycle. Recuperado de https://www.ecycle.com.br/carbono-negro/?utm_source=perplexity. Acesso em 17 set. 2024.

CASTRO, J. L., et al. **Impacto da deposição de carbono negro sobre a qualidade do solo e da água em áreas urbanas.** *Ambiente & Sociedade*, v. 25, n. 3, p. 67-82, 2022.

ALMEIDA, M. R., et al. **Circulação atmosférica e o transporte de carbono negro em regiões tropicais.** *Jornal de Geociências*, v. 28, n. 3, p. 153-167, 2022.

ARAGÃO, Luiz E. O. C. et al. **Carbono e além: a biogeoquímica do clima em uma Amazônia em rápida mudança.** *Frontiers in Forests and Global Change*, v. 4, 2021. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/ffgc.2021.618401/full>. Acesso em: 01 out. 2024.

ASA. **Informações sobre incêndios para sistema de gerenciamento de recursos (FIRMS).** Acesso em: 23 ago. 2019. Disponível em: <https://earthdata.nasa.gov/>.

Carbono negro: o que é e quais seus impactos? – eCycle. Recuperado de https://www.ecycle.com.br/carbono-negro/?utm_source=perplexity. Acesso em 17 set. 2024.

CASTRO, J. L., et al. **Impacto da deposição de carbono negro sobre a qualidade do solo e da água em áreas urbanas**. Ambiente & Sociedade, v. 25, n. 3, p. 67-82, 2022.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Padrões de qualidade do ar**. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/padroes-de-qualidadedoar/>. Acesso em: 1 out. 2024.

COSTA, F. J., et al. **Absorção de radiação solar por partículas de carbono negro e seus efeitos climáticos**. Ciência e Ambiente, v. 33, n. 1, p. 77-89, 2024.

FIALHO, P. [s.l.: s.n.]. Disponível em [https://repositorio.uac.pt/bitstream/10400.3/7014/1/C%c3%80ciencia_2024MAR24 .pdf](https://repositorio.uac.pt/bitstream/10400.3/7014/1/C%c3%80ciencia_2024MAR24.pdf). Acesso em: 10 set. 2024.

FERREIRA, M. B., et al. **O efeito do carbono negro sobre a temperatura local e regional: Uma análise para o Brasil**. Revista Brasileira de Física Atmosférica, v. 29, n. 4, p. 178-192, 2024.

FERREIRA, P. A., et al. **Efeitos da dinâmica de circulação atmosférica na dispersão de aerossóis de carbono negro**. Revista Brasileira de Climatologia, v. 21, n. 2, p. 45-58, 2021.

GOMES, P. C., et al. **Deposição de carbono negro em ecossistemas urbanos e rurais no Brasil**. Revista Brasileira de Geografia, v. 12, n. 4, p. 89-102, 2021.

Hansen, MC, Potapov, PV, Moore, R., Hancher, M., Turubanova, SA, Tyukavina, A., et al. (2013). **Mapas globais de alta resolução da mudança da cobertura florestal do século XXI**. Science 342, 850–853. doi: 10.1126/science.1244693.

IPCC. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, 2021**. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>. Acesso em: 30 set. 2024.

LIMA, A. B., et al. **Efeito do carbono negro na radiação solar e aquecimento global**. Revista Brasileira de Física Atmosférica, v. 32, n. 4, p. 112-126, 2023.

MARTINS, J. S., et al. **Impacto do carbono negro na formação de nuvens e padrões de precipitação**. Revista Brasileira de Climatologia, v. 19, n. 2, p. 132-146, 2023.

MAUAD, Cristiane Ribeiro. **Variações Geocronológicas de Carbono Negro e HPAs na Baía de Guanabara como Indicadores de Fontes de Combustão**. 2010. Tese de Doutorado. PUC-Rio. Acesso em 18 de ago. Disponível em: https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/16588/16588_3.PDF.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Padrões de qualidade do ar**. Disponível em: <http://antigo.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/qualidade-do-ar/padroes-dequalidadedo-ar.html>. Acesso em: 1 out. 2024.

MOREIRA, C. S., et al. **Variabilidade dos parâmetros meteorológicos e suas consequências para a concentração de poluentes atmosféricos**. Atmosfera, v. 34, n. 1, p. 95-108, 2022.

NASA. **Uptick in Amazon fire activity in 2019**. Earth Observatory, 26 ago. 2019. Disponível em: <https://earthobservatory.nasa.gov/images/145464/uptick-inamazonfire-activity-in-2019>. Acesso em: 01 out. 2024.

OLIVEIRA, T. F., et al. **Modificações no ciclo hidrológico devido à presença de carbono negro na atmosfera**. Geografia e Ambiente, v. 30, n. 2, p. 103-115, 2023.

PEREIRA, C. J., et al. **Impactos do carbono negro no aquecimento local e regional**. Journal of Climate Dynamics, v. 60, n. 5, p. 1445-1460, 2023.

SANTOS, M. H., et al. **Influência das partículas de carbono negro na microfísica das nuvens e na precipitação**. Journal of Atmospheric Sciences, v. 81, n. 3, p. 879892, 2022.

SHRIVASTAVA, M., et al. (2017). **Avanços recentes na compreensão do aerossol orgânico secundário: implicações para a força climática global**. Rev. Geophys.

55, 509–559. doi: 10.1002/2016RG000540

SILVA, A. B.; MOREIRA, F. A.; COUTO, C. L. **Impactos do Carbono Negro no Regime de Chuvas e Estações Secas na Amazônia**. Revista Brasileira de Climatologia, v. 27, p. 115-132, 2023.

SILVA, A. F., et al. **Influência dos parâmetros meteorológicos na dispersão de carbono negro na atmosfera urbana**. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 39, n. 2, p. 215-227, 2023.

SOUZA, R. T., et al. **Efeitos do carbono negro no regime de chuvas e na estação seca no Brasil**. Estudos de Clima, v. 45, n. 3, p. 214-229, 2022.

TAMBARUSSI, Ricardo A. et al. **Fire-Driven Forest Degradation in Amazonian Protected Areas: Assessing the Effects of Disturbances**. Land, v. 9, n. 12, p. 516, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-445X/9/12/516>. Acesso em: 01 out. 2024.

UNIVERSITY OF MARYLAND. **MODIS Active Fire Products e Burned Area Products**. Acesso em: 23 ago. 2019. Disponível em: <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/fires/>.

VAN MARLE, M. J. E. et al. **Dinâmica do fogo e do desmatamento na Amazônia (1973-2014)**. Global Biogeochemical Cycles, v. 31, n. 1, p. 24-38, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/2016GB005428>.

ZHANG, Y.; LI, J.; WANG, X. **Effects of Black Carbon on Regional Temperature Variations**. Journal of Climate Dynamics, v. 38, p. 255-273, 2024.