



GASES DE EFEITO ESTUFA E POLUIÇÃO DO AR: SEMELHANÇAS E DIFERENCIAIS

ARTIGO ORIGINAL

LIMA, Leandro Jose Barbosa¹, HAMZAGIC, Miroslava²

LIMA, Leandro Jose Barbosa. HAMZAGIC, Miroslava. **Gases de efeito estufa e poluição do ar: semelhanças e diferenciais**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 07, Ed. 09, Vol. 06, pp. 102-144. Setembro de 2022. ISSN:2448-0959, Link de acesso: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/meio-ambiente/gases-de-efeito-estufa>, DOI: 10.32749/nucleodoconhecimento.com.br/meio-ambiente/gases-de-efeito-estufa

RESUMO

A Poluição do Ar causa cerca de 4,2 milhões de mortes por ano, enquanto os Gases de Efeito Estufa (GEE) provocam o aquecimento global e as mudanças climáticas. Nesse contexto, o presente artigo tem como questão norteadora: qual a relação entre a Poluição do Ar e os Gases de Efeito Estufa? O objetivo deste estudo foi entender a relação entre a Poluição do Ar e os Gases de Efeito Estufa (GEE). Este foi um estudo exploratório, documental e de revisão de literatura baseado em materiais publicados com o uso de ferramentas estatísticas. Como conclusão, o material publicado apresenta o que os GEE e a Poluição do Ar têm em comum, quais são os diferenciais e as perspectivas para o futuro destes.

Palavras-chave: Transição Energética, Poluição do Ar, Gases de Efeito Estufa, Mortes, Pegada de Carbono.

1. INTRODUÇÃO

Existem muitas perspectivas diferentes a serem adotadas quando se olha para a transição energética. É importante focar no seu propósito principal: prevenir o aumento da temperatura da terra e consequentemente gerar mudanças climáticas, que afetam vidas das mais diversas formas, como: eventos de desastres naturais,



desertificação, produção de alimentos, inundações, extinção de espécies, entre outros efeitos (HAINES, 2020).

Os Gases de Efeito Estufa, GEE, são formados por moléculas que podem reter a radiação solar infravermelha refletida da superfície da terra por longos períodos de tempo fazendo com que a temperatura da terra aumente, alguns gases têm um efeito de reflexão maior do que outros, ou podem apenas permanecer na atmosfera por mais, pois os GEE têm potenciais diferentes e, para simplificar, existem multiplicadores que podem ser aplicados para convertê-lo em Dióxido de Carbono Equivalente, ou CO₂e. O Dióxido de Carbono foi escolhido para representar o grupo não pelo seu efeito de aquecimento global, mas por ser o mais abundante (BABARINDE e ADIO, 2020).

A flutuação na temperatura da Terra tem sido normal ao longo dos anos, e antes da humanidade a temperatura da Terra era extremamente alta, mas com o passar das eras, o carbono que estava presente na atmosfera foi coletado, absorvido e armazenado no subsolo. As atividades antrópicas, principalmente após a primeira revolução industrial, trouxeram esse carbono de volta à atmosfera, a fim de gerar progresso para a humanidade. Isso aconteceu por meio de inovações como navios a vapor, automóveis, aquecimento doméstico, indústrias com maior produtividade e assim por diante. Mesmo antes da revolução industrial, o uso do fogo com carvão possibilitava o aquecimento das casas e o preparo dos alimentos. Em resumo, os GEE foram emitidos para promover o progresso com a tecnologia disponível (WHO, 2021a).

Os GEE não são o único efeito desse progresso. O GEE pode estar realmente associado à poluição do ar, que também resulta no progresso da humanidade. A Poluição do Ar é conhecida por causar cerca de 7 milhões de mortes todos os anos, com cerca de 4,2 milhões relacionadas apenas à Poluição do Ar Exterior, o foco principal deste estudo. A poluição do ar, como os GEE, provém de produtos químicos e partículas na atmosfera e estes são devidos a razões naturais ou



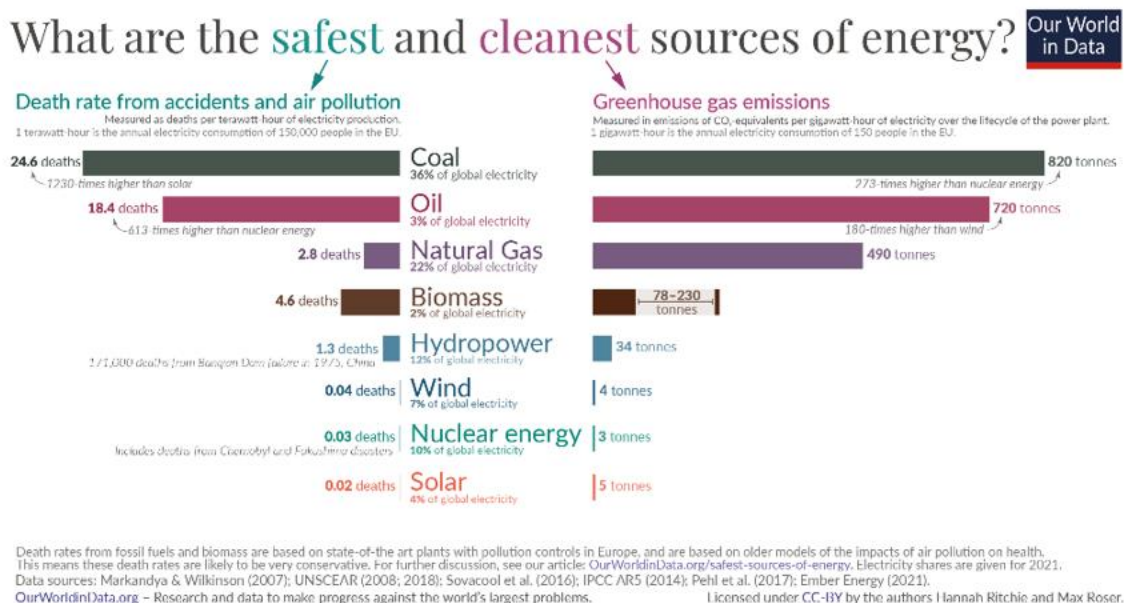
antropogênicas. As fontes naturais de poluição do ar são erupções vulcânicas, incêndios florestais e alérgenos; os poluentes antropogênicos estão mais relacionados ao uso de energia e agricultura, do próprio GEE, poluição e Poluentes Tóxicos (WHO, 2021a). Também é importante destacar que o aumento da temperatura intensifica alguns tipos de poluição do ar: este estudo pretende demonstrar as semelhanças e diferenciações entre esses dois atores no ambiente global.

Nesse contexto, o presente artigo tem como questão norteadora: qual a relação entre a Poluição do Ar e os Gases de Efeito Estufa? O objetivo deste estudo foi entender a relação entre a Poluição do Ar e os Gases de Efeito Estufa (GEE).

2. REVISÃO DA LITERATURA

A geração de eletricidade é um dos principais contribuintes para a poluição do ar e GEE. O Gráfico 1 mostra mortes mais diretamente relacionadas à Poluição do Ar e acidentes em Terawatts-hora à esquerda e Toneladas de CO₂ liberadas em Gigawatt-hora à direita (RITCHIE, 2020).

Gráfico 1. Comparação do impacto das metas de segurança entre a poluição do ar e as emissões de GEE para cada fonte de energia, como exemplo



Fonte: Ritchie (2020).

2.1.1 POLUIÇÃO DO AR

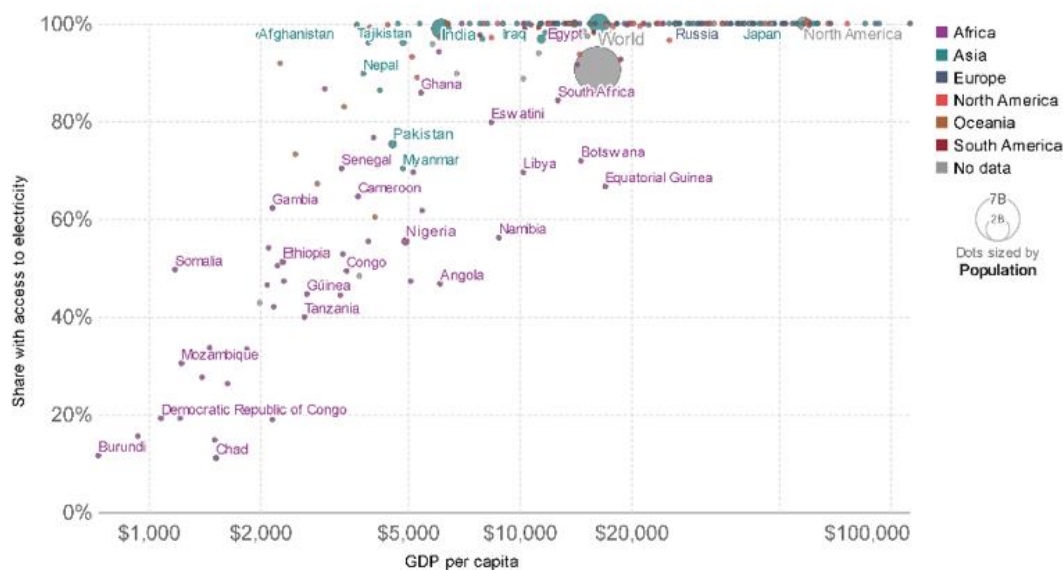
Qualquer coisa que altere a condição natural do ar é um poluidor potencial de partículas a produtos químicos. O poluente pode ser de fontes naturais ou artificiais, e a poluição pode ser interna, dentro de residências ou externa, proveniente do meio ambiente (UNITED NATIONS, s.d.).

Segundo a OMS (2021a), apenas a poluição do ar interior causa cerca de 3,2 milhões de mortes todos os anos (cerca de 0,1% do total exposto), principalmente porque o grupo afetado depende de um tipo de combustível/energia não avançado para cozinhar ou aquecer, o que inclui o tradicional uso de biomassa ou outros combustíveis: isso afeta principalmente famílias no limite da pobreza. Este grupo é responsável por 2,4 bilhões de pessoas que atualmente não fazem parte do grupo dos afortunados, que podem utilizar um tipo de energia moderna e mais segura, fonte que é um elo fundamental com GEE e Transição Energética (UNITED

NATIONS, 2007). Um aspecto que alguns países afirmam manter operando fontes de eletricidade menos poluentes para fornecer acesso à eletricidade para toda a população, o que não parece ser igualitário como pode ser observado no Gráfico 2, o que é de certa forma uma meta de segurança.

A consciência em torno dos efeitos da poluição começou a ser notada conforme relatado inicialmente por Rachel Carson no livro *Silent Spring*, sobre o impacto dos agrotóxicos, publicado em 1962, que desencadeou um importante movimento ambientalista. Cerca de 14 mil cientistas e outros profissionais nos Estados Unidos se uniram pela proteção ambiental, o que posteriormente levou à criação do *National Environmental Act*, precursor da *US Environmental Protection Agency* (EPA) em 1970 (LEWIS, 1985).

Gráfico 2. Percentual da população com acesso à eletricidade, Dados Globais 2020

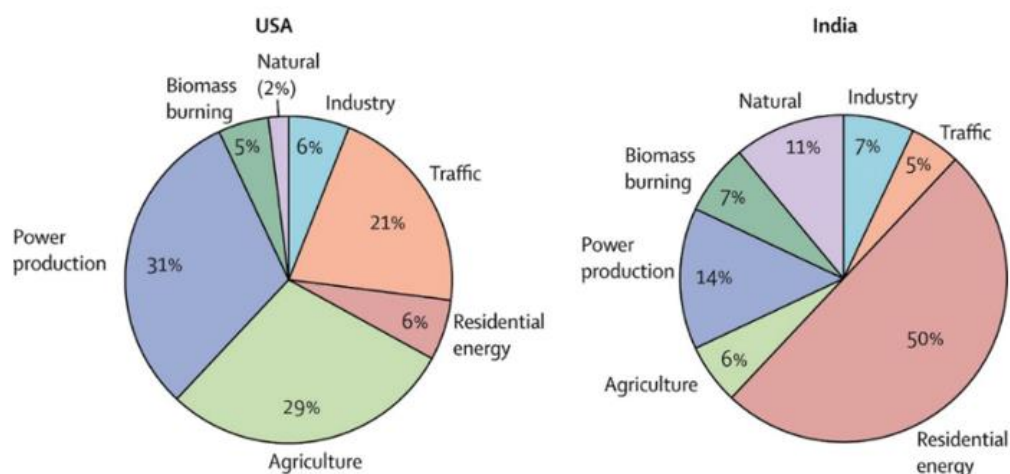


Fonte: Roser (2020).

Conforme demonstrado no Gráfico 3, e observado anteriormente no Gráfico 2, em geral, as mortes por poluição do ar em ambientes externos ou internos mudam de

país para país, portanto, da natureza da fonte de poluição do ar, mas a relação qualitativa entre Poluição do Ar e GEE pode ser confirmado.

Gráfico 3. Fontes de fatalidades devido à poluição do ar nos EUA e na Índia, 2018

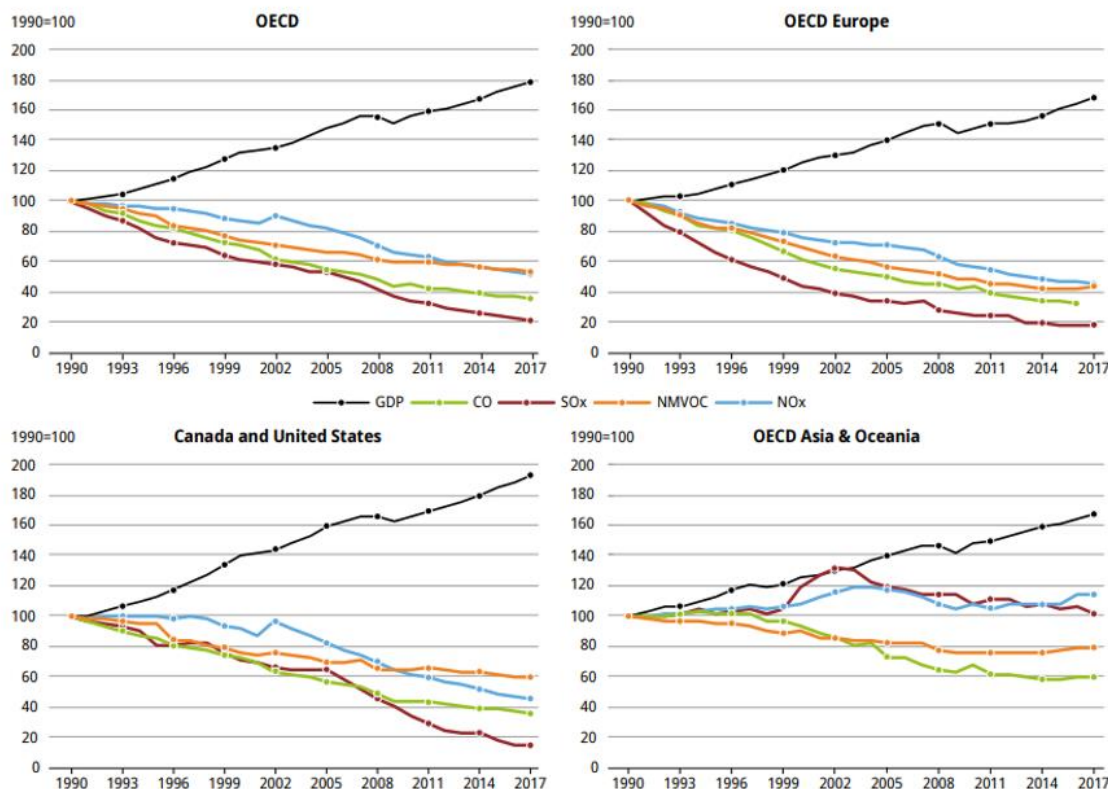


Fonte: Haines (2020).

Poluentes comuns da qualidade do ar externo incluem monóxido de carbono, chumbo, dióxido de nitrogênio, ozônio, matéria particulada (grosseira ou PM₁₀, fina ou PM_{2,5} e ultrafina ou PM_{0,1}) e dióxido de enxofre (WHO, 2021b; GOODKIND *et al.*, 2019).

A Figura 1 ilustra em 4 Gráficos como o Produto Interno Bruto dos países da OCDE (Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico) desvinculou seu crescimento econômico dos principais poluentes, a partir de iniciativas de redução desses poluentes do ar. No canto superior esquerdo, OCDE, podem ser observados os dados dos 37 países, enquanto os outros 3 Gráficos são tendências mais específicas regionais. Fica clara a diferença do efeito nas políticas de alguns países/áreas em relação a outros ao observar a diferença do PIB para os poluentes atmosféricos em 2017.

Figura 1. PIB vs Poluentes



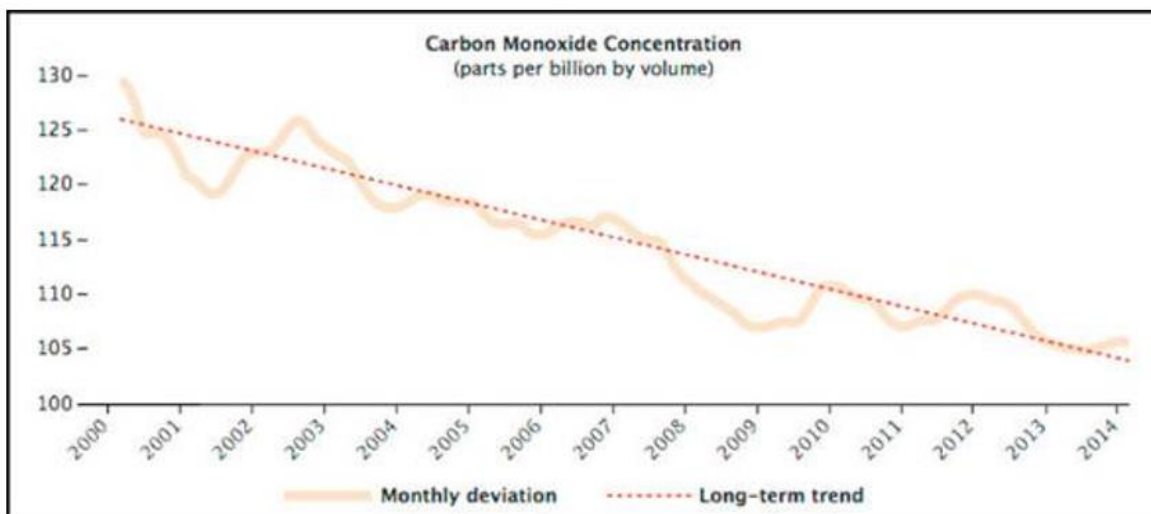
Fonte: OCDE (2020).

2.1.1.1 MONÓXIDO DE CARBONO (CO)

O Monóxido de Carbono é um resíduo proveniente principalmente do uso de combustíveis fósseis (transporte), bem como da queima de outros materiais, como o uso tradicional de biomassa, principalmente o que poderia ser chamado de queima incompleta. A possível produção natural de Monóxido de Carbono é através de incêndios florestais e erupções vulcânicas. O CO pode levar a confusão, sonolência e morte, dependendo da concentração (EPA, 2022d; EUROPEAN COMMISSION, 2022). O Gráfico 4 demonstra uma queda na Concentração de Monóxido de Carbono Globalmente. São medições do sensor *Measurements of Pollution in the Troposphere* (MOPITT) do satélite Terra, lançado em 1999. Segundo Voiland (2015) o declínio do CO foi notado principalmente no Hemisfério Norte,

evidente na Figura 2, e embora o CO não seja um GEE, sua presença está associada ao Dióxido de Carbono e ao Metano, pois é formado com o uso de combustíveis fósseis.

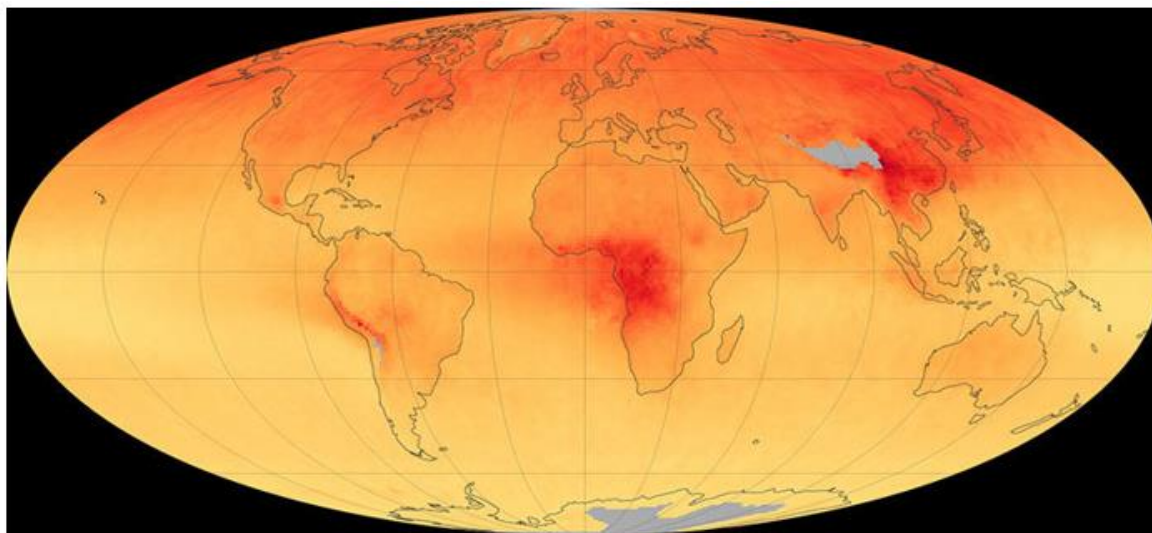
Gráfico 4. Concentração de Monóxido de Carbono (partes por bilhão por volume)



Fonte: Voiland (2015).

A redução de sua concentração está relacionada à inovação tecnológica e regulamentações, pois motores e usinas se tornaram mais sofisticados ao longo dos anos e países com tecnologias mais desenvolvidas obtiveram melhores resultados na redução de Monóxido de Carbono, exceto aqueles que também poderiam ser impactados por incêndios florestais, principalmente incêndios florestais (VOILAND, 2015).

Figura 2. Imagem do sensor MOPITT em 2014

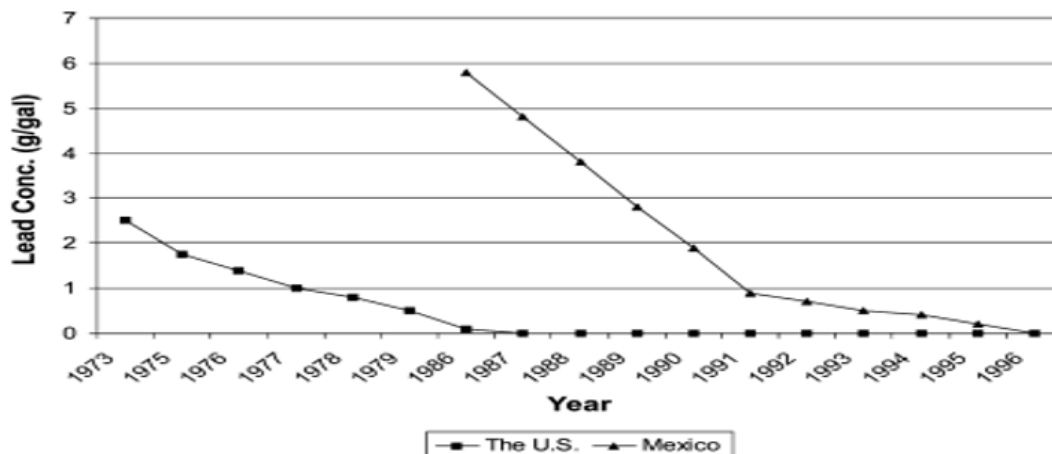


Fonte: Voiland (2015).

2.1.2 CHUMBO (PB)

A exposição ao chumbo também tem suas fontes em atividades antropogênicas, como o uso de tintas com chumbo, combustíveis, soldagem e soldagem, materiais, mineração e cosméticos. Seus efeitos na saúde incluem anemia, câncer, crescimento retardado, QI reduzido e hiperatividade, comportamento, problemas de aprendizagem, como diminuição da função renal, efeitos cardiovasculares e problemas reprodutivos (WHO REGIONAL OFFICE FOR EUROPE, 2001). A indústria de óleo e gás tem desenvolvido combustíveis mais eficientes e o uso de chumbo para aumentar a octanagem do combustível parou, como mostra o Gráfico 5.

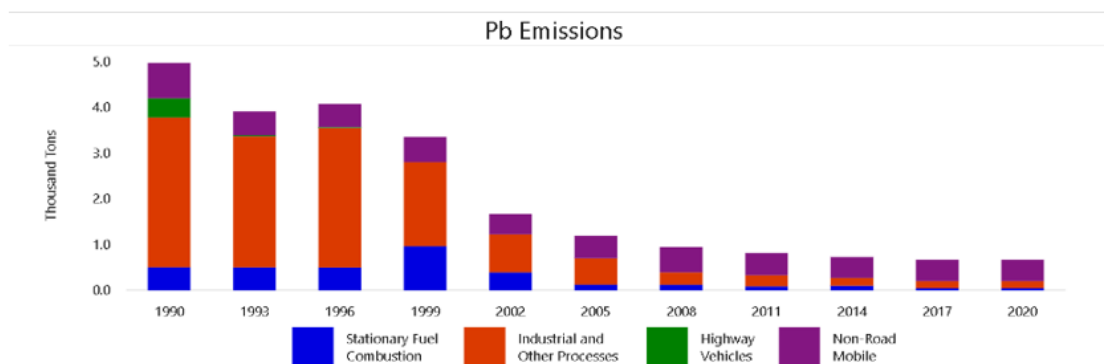
Gráfico 5. Comparação entre a concentração de Chumbo na gasolina nos EUA e no México



Fonte: Bravo *et al.* (2006).

Conforme demonstrado nos Gráficos 6 e 7 a legislação, o controle e a evolução tecnológica têm se mostrado capazes de reduzir os níveis de Chumbo (Pb) no ar, nos Estados Unidos.

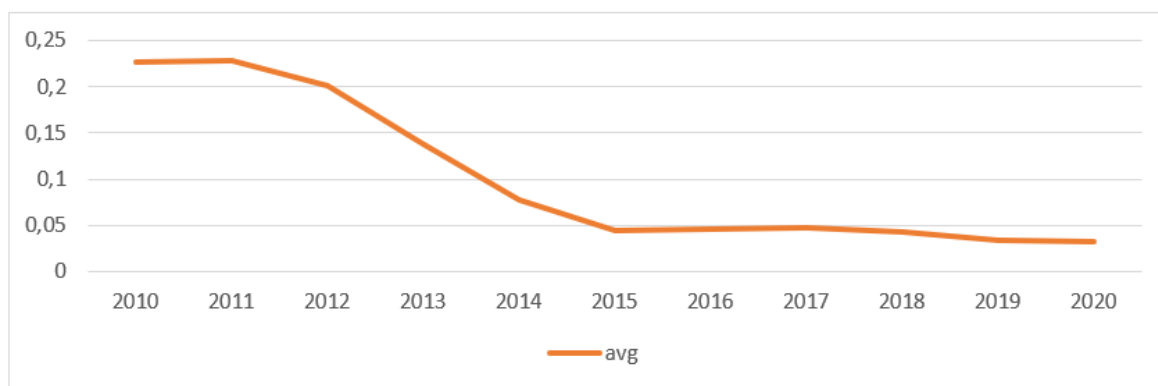
Gráfico 6. Emissões de chumbo nos Estados Unidos, em milhares de toneladas por fonte



Fonte: EPA (2020).

Como é possível confirmar no Gráfico 7, que apresenta a média dos Estados Unidos de dez anos: 2010 a 2020.

Gráfico 7. Média Nacional dos EUA, Chumbo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), como Poluente do Ar, de 2010 a 2020



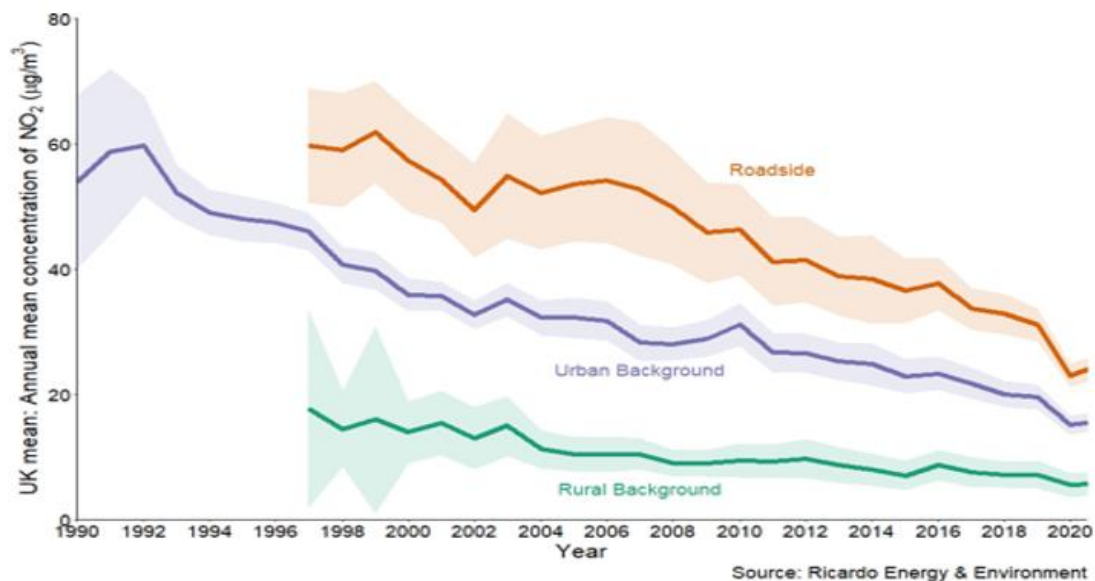
Fonte: Adaptado da EPA (2020).

2.1.3 DIÓXIDO DE NITROGÊNIO E ÓXIDO NÍTRICO (NO_2 / NO)

Também está principalmente relacionado à queima de combustíveis fósseis em temperaturas mais altas. O Dióxido de Nitrogênio (NO_2) e o Óxido Nítrico (NO), ambos referidos como NO_x , pioram as doenças respiratórias e reduzem as funções pulmonares, causando sintomas respiratórios como dificuldade para respirar, o que também aumenta a suscetibilidade a infecções respiratórias. Em sua interação com outros poluentes atmosféricos, pode agravar os efeitos e gerar chuva ácida e é um precursor na formação do ozônio, um dos principais poluentes, componente da poluição (EPA, 2022b; AMERICAN LUNG ASSOCIATION, 2020).

O sucesso geral da redução no Reino Unido, as emissões de NO_x estão mais relacionadas à redução do uso de usinas a carvão e carros a diesel, que mesmo com melhorias na tecnologia e reduções nas emissões de NO_x ao longo dos anos ainda são as principais fontes urbanas dessas emissões (GOV.UK, 2022).

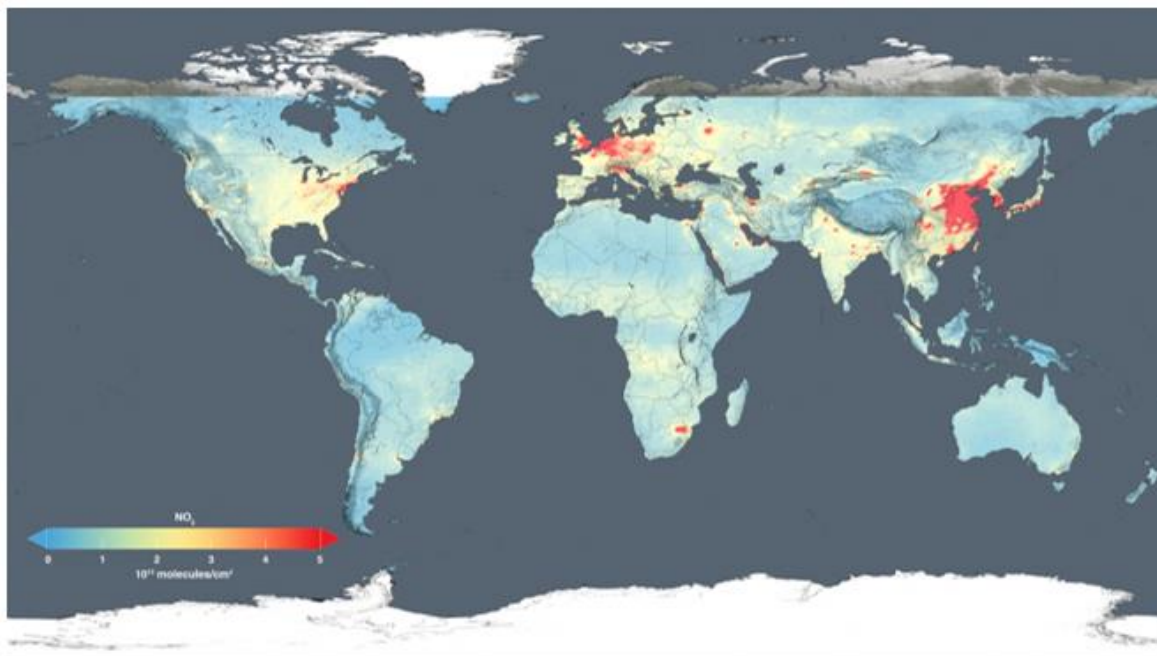
Gráfico 8. Média do Teor de Dióxido de Nitrogênio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), Reino Unido 1990 a 2021



Fonte: GOV.UK (2022), *apud* Ricardo Energy & Environment.

A Figura 3 mostra observações de satélite sobre os níveis de Dióxido de Nitrogênio ao longo de 2014. Essas imagens revisam que a área estabeleceu restrições a essas emissões ou ao uso de combustíveis que liberam esses tipos de poluentes e mostraram avanços na Qualidade do Ar (NASA, 2015).

Figura 3. Concentração de Dióxido de Nitrogênio no Mundo em 2014

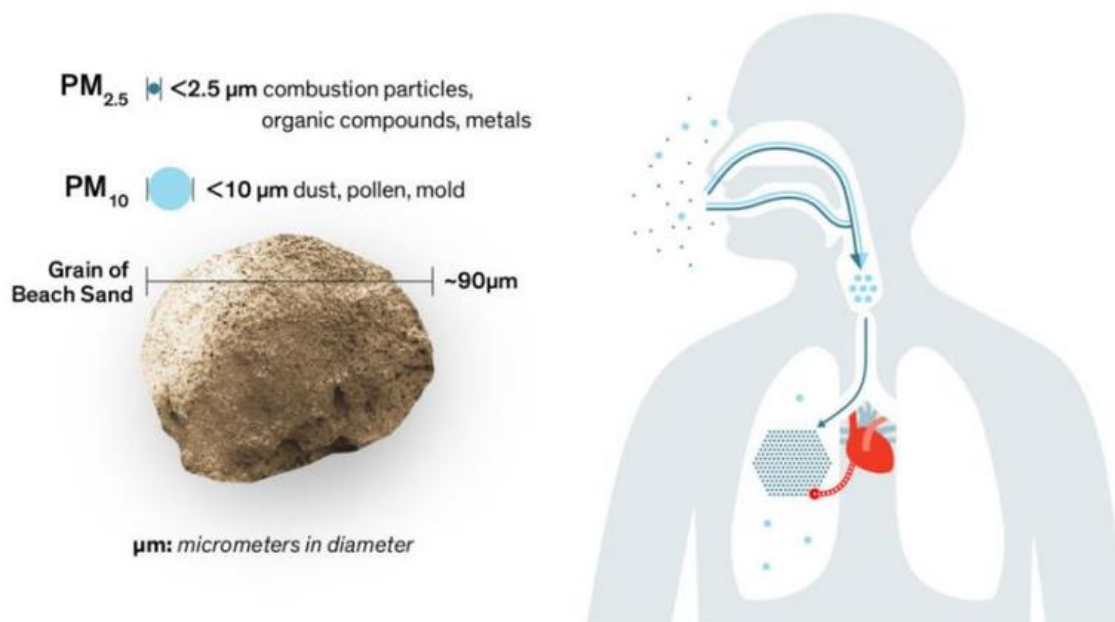


Fonte: NASA (2015).[/caption]

2.1.4 FULIGEM OU MATERIAL PARTICULADO (PM10, PM2,5 PM0,1)

PM é uma mistura de partículas sólidas e líquidas encontradas no ar. Pode ser de origem urbana e não urbana. O PM10, ou seja, 10 micrômetros e menores (partículas inaláveis), o PM2,5, ou seja, 2,5 micrômetros e menores (4 vezes menor que o PM10) e o PM0,1, ou seja, 0,1 micrômetro ou menor, podem ter sua origem em diversas fontes, incluindo pólvora de canteiros de obras, estradas não pavimentadas, incêndios e uso de combustíveis fósseis. Essas partículas inaladas podem causar danos aos pulmões e outros órgãos ao entrarem na corrente sanguínea (EPA, 2022e; WHO, 2021b). A Figura 4 exemplifica as comparações de tamanho entre as partículas e alguns itens conhecidos como cabelo humano ou areia de praia.

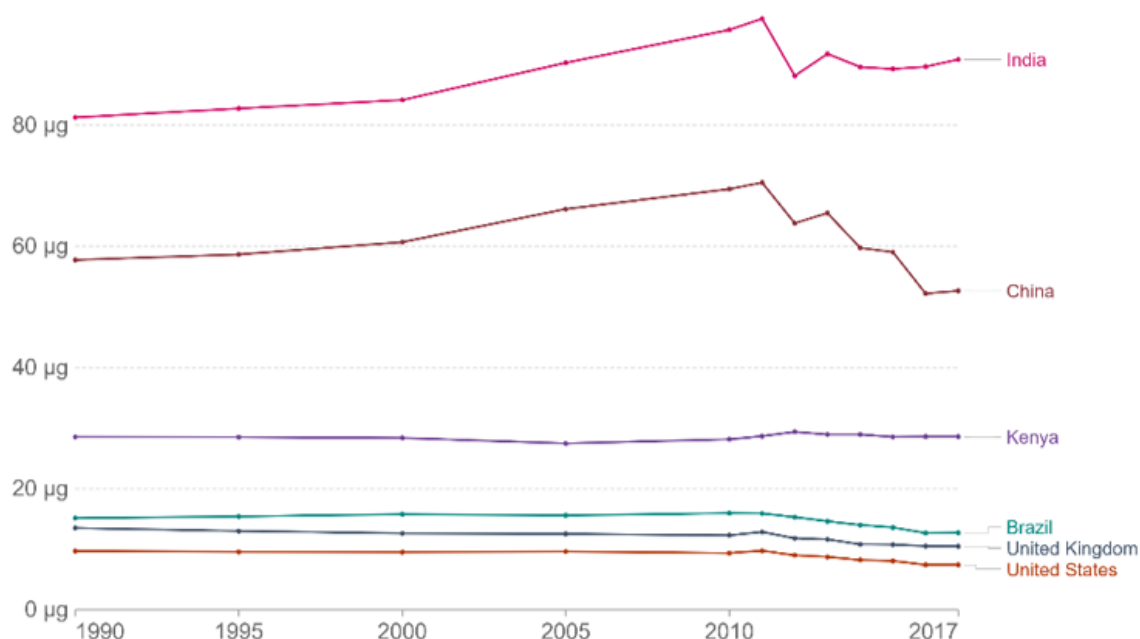
Figura 4. Comparação de tamanho de PM10 e PM2,5 para areia e cabelo humano



Fonte: *University of Chicago* (2022).

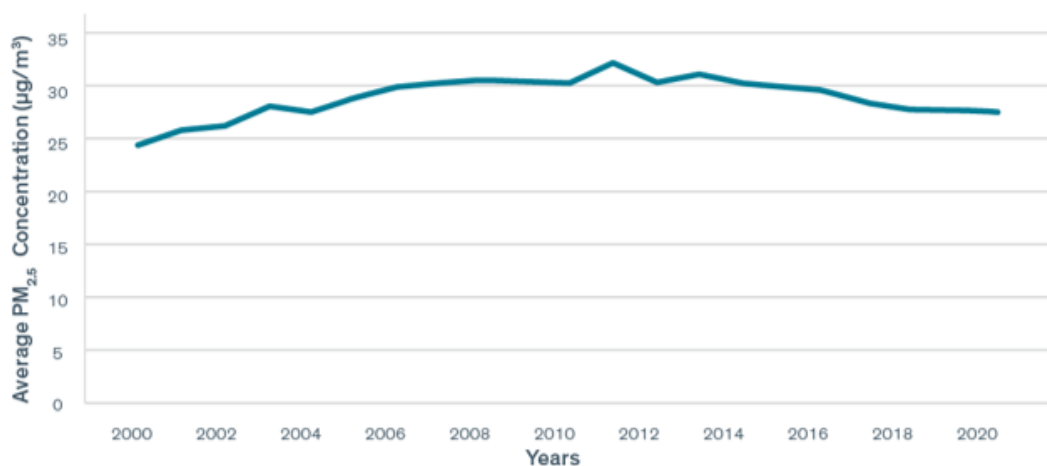
O Gráfico 9 expressa o comportamento do PM_{2,5} ao longo dos anos. Observa-se neste gráfico uma certa estabilidade, ou uma pequena queda, na concentração na maioria dos países ao longo dos anos na concentração de PM_{2,5}. O gráfico 10 mostra essa tendência em uma única linha para facilitar a observação. De acordo com a *University of Chicago* (2022), cerca de 60% da concentração de PM_{2,5} são provenientes do uso de combustíveis fósseis, 22% são de fontes naturais e 18% são de outras atividades humanas (UNIVERSITY OF CHICAGO, 2022).

Gráfico 9. Exposição à poluição do ar (PM_{2,5}) de 1990 a 2017 expressa em µg/m³



Fonte: Ritchie e Roser (2022).

Gráfico 10. Poluição do Ar PM_{2,5} (µg/m³), Média Global, de 2000 a 2020

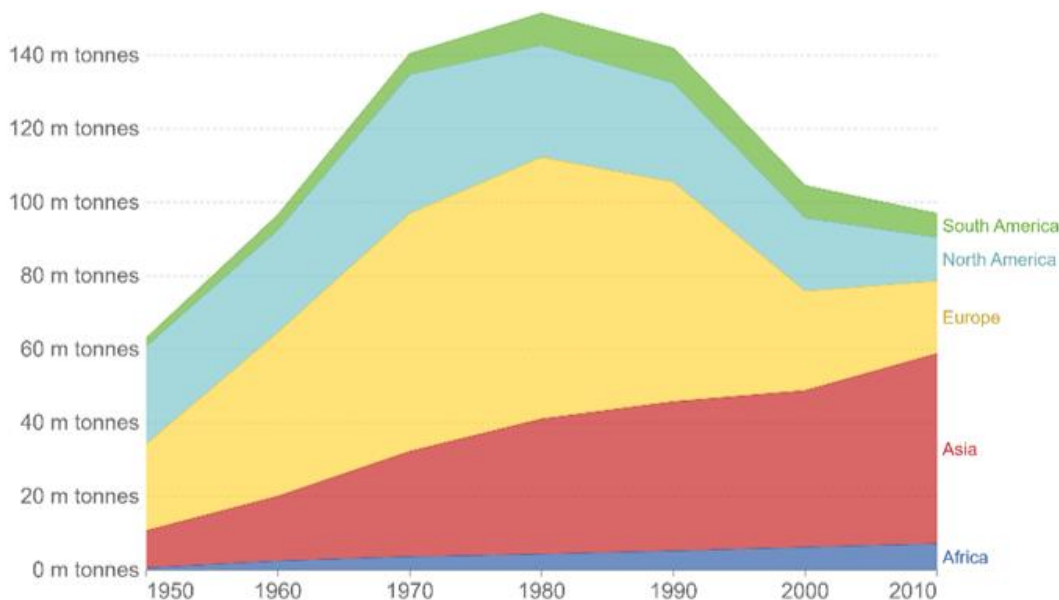


Fonte: University of Chicago (2022).

2.1.5 DIÓXIDO DE ENXOFRE (SO_x/SO_2)

O dióxido de enxofre também é resultante da combustão de combustíveis fósseis, erupções vulcânicas e alguns processos industriais. Afeta a saúde humana por meio de doenças respiratórias e também pode reduzir a taxa de crescimento das plantas e contribuir para a formação de chuva ácida (EPA, 2022d). O Gráfico 11 demonstra as emissões de Dióxido de Enxofre por região do Mundo de 1950 a 2010 onde por volta de 1980 pode-se observar a mudança no comportamento da curva conforme a consciência dos impactos ambientais e de saúde ficou mais clara, a exceção foi na Ásia onde uma mudança nestes economias dos países levaram a um aumento do nível de emissões.

Gráfico 11. Emissões de dióxido de enxofre por regiões do mundo de 1950 a 2010 em milhões de toneladas

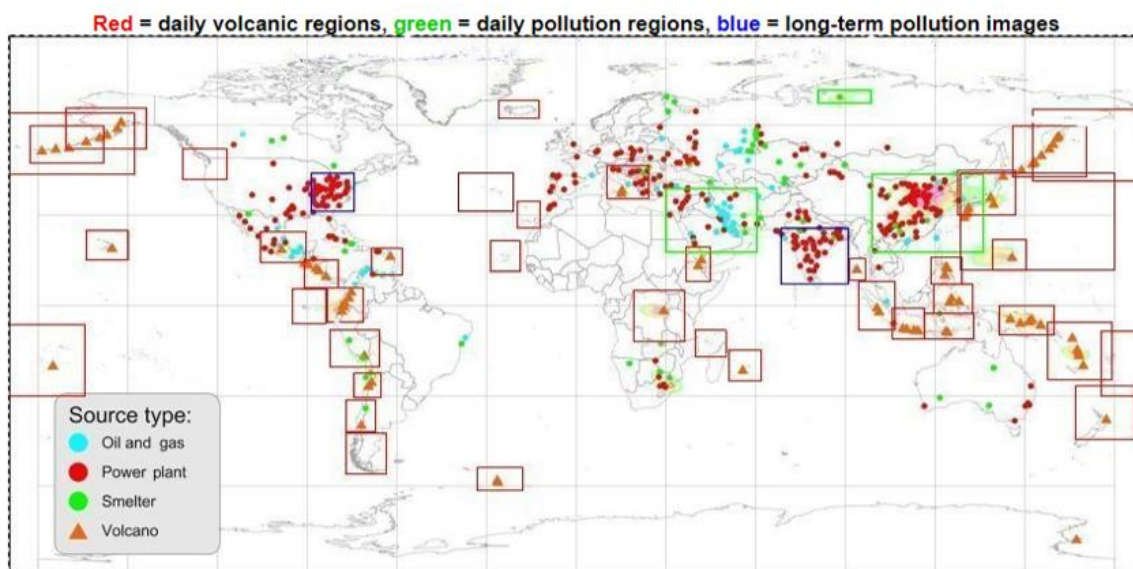


Fonte: Ritchie e Roser (2022).

Com base nas imagens da Figura 5, e cruzando com o Gráfico 11, é possível entender as origens e por que está crescendo em algumas áreas, o que comprova

a ligação com o uso de combustíveis fósseis para energia como a maioria e nas atividades de fundição, outra conexão com GEE. Também é possível fazer referência à Figura 3 e as localizações das usinas para a concentração de Dióxido de Nitrogênio.

Figura 5. Fontes Globais de Dióxido de Enxofre, Petróleo e Gás (círculo azul), Usinas Elétricas (círculo vermelho), Fundição (Círculo Verde) e erupção vulcânica (Triângulo Laranja), dados de satélite



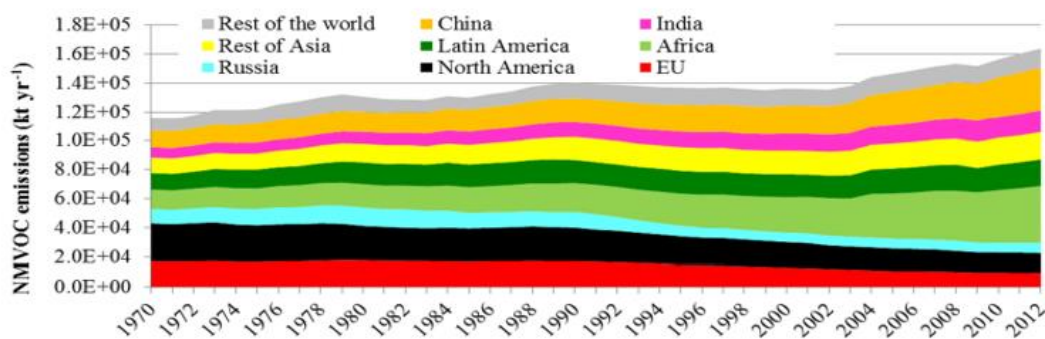
Fonte: NASA (2019).

2.1.6 COMPOSTOS ORGÂNICOS VOLÁTEIS NÃO METANO (NMVOC)

Os NMVOCs são emitidos por diversos tipos de produtos e processos, como tintas, vernizes, ceras, solventes, combustíveis, pesticidas, e isso varia de acordo com as características desses produtos, o que torna suas emissões geograficamente dependentes. Sua emissão também está associada ao uso de combustíveis fósseis, alimentos, processo de ferro e papel, queima de processos agrícolas. Pode causar irritação nos olhos e no sistema respiratório, alguns tipos de câncer em humanos e

animais, dores de cabeça e danos ao fígado, rins e sistema nervoso central (HUANG *et al.*, 2017). O metano é um tipo de COV, mas é menos reativo (WHO, 2021b).

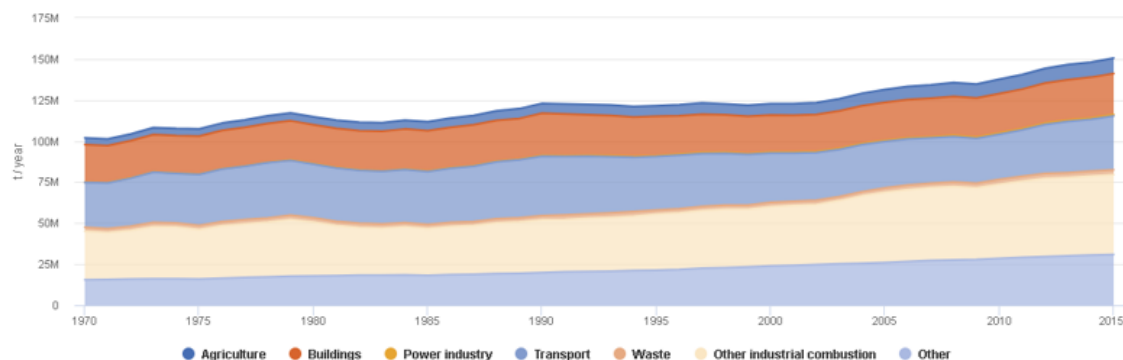
Gráfico 12. Emissões Antrópicas Globais de NMVOC



Fonte: Huang *et al.* (2017).

O Gráfico 12 demonstra uma redução na Europa e América do Norte, que está relacionada principalmente à implementação de políticas relacionadas a combustíveis que afetaram a poluição residencial e de transporte, o que inclui o uso de combustíveis mais limpos. África, Índia e China são os maiores emissores de NMVOC WW, e isso se deve principalmente a fatores residenciais, principalmente o uso de biomassa (HUANG *et al.*, 2017).

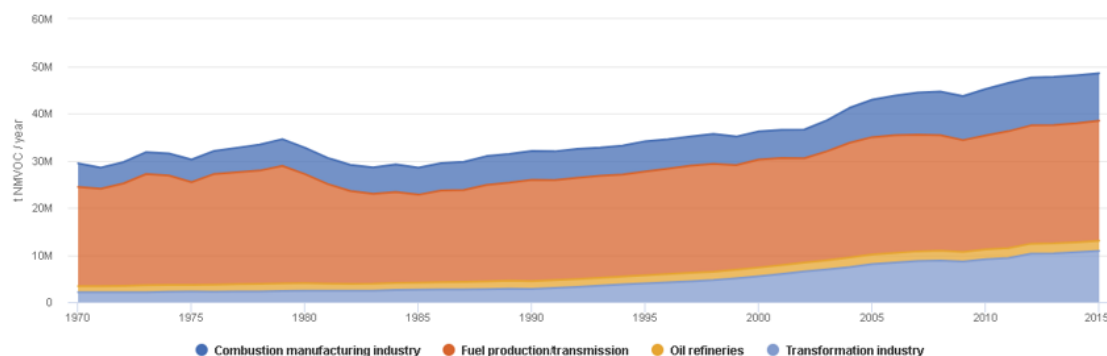
Gráfico 13. NMVOC por Setor



Fonte: *European Commission* (2022).

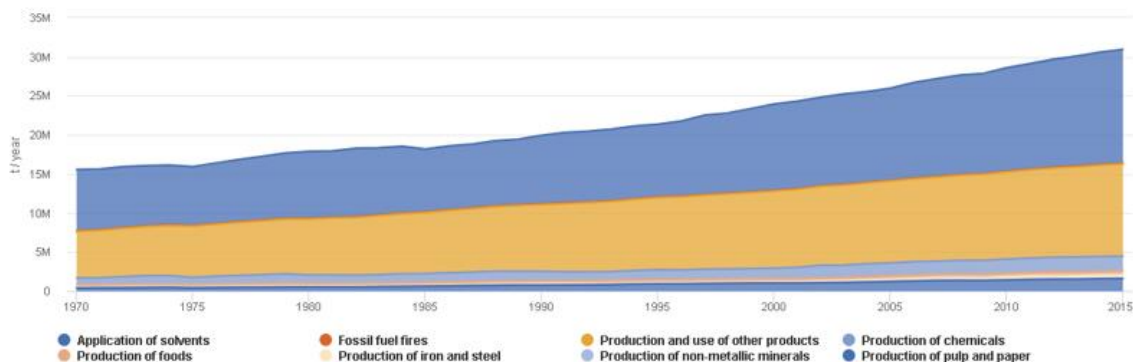
Pelas Figuras 13, 14 e 15 é possível observar que a maior parte do aumento das emissões de NMVOC é proveniente da Indústria de Transformação, Aplicação de Solventes e 'Produção e uso de outros produtos', mas o maior contribuinte em número absoluto é a Indústria de Combustíveis Produção/transmissão.

Gráfico 14. NMVOC sobre Outras Combustões Industriais



Fonte: *European Commission* (2022).

Gráfico 15. NMVOC sobre Outros

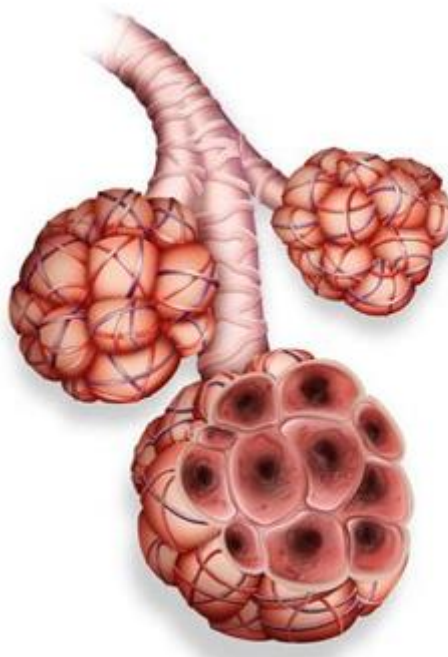


Fonte: *European Commission* (2022).

2.1.7 NÍVEL DO SOLO OZÔNIO (GLO) OU TROPOSFÉRICO

Esta não é uma emissão direta no ar, mas torna-se um Poluente do Ar, pela combinação de Nitrogênio e Compostos Orgânicos Voláteis (VOC) – GLO é o principal componente do (Fumaça e Neblina). Esses dois elementos reagem quimicamente na presença da luz solar gerando o Ozônio (uma reação fotoquímica), em dias mais quentes, os níveis de GLO aumentam. O ozônio pode agravar doenças pulmonares, causar falta de ar e outras doenças respiratórias, como pode ser visto na Figura 6 (EPA, 2022c; EPA 2022f).

Figura 6. Efeito do ozônio na musculatura das vias aéreas com ar aprisionado

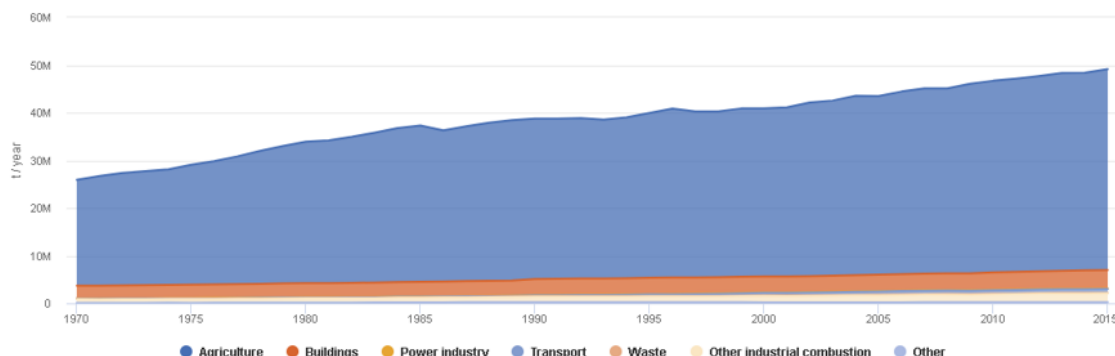


Fonte: EPA (2022).

2.1.8 AMÔNIA (NH₃)

Isso normalmente deriva de resíduos, processo de tratamento de resíduos, aquicultura, operação de alimentação animal concentrada, aplicação de esterco, fertilizantes, agricultura, fontes industriais e outros processos naturais – é resultado da decomposição bacteriana de material orgânico. Esta é uma causa normal de mortandade de peixes, e em humanos pode causar mortes psicológicas, comportamentais, morfológicas e até mesmo (EPA, 2022a).

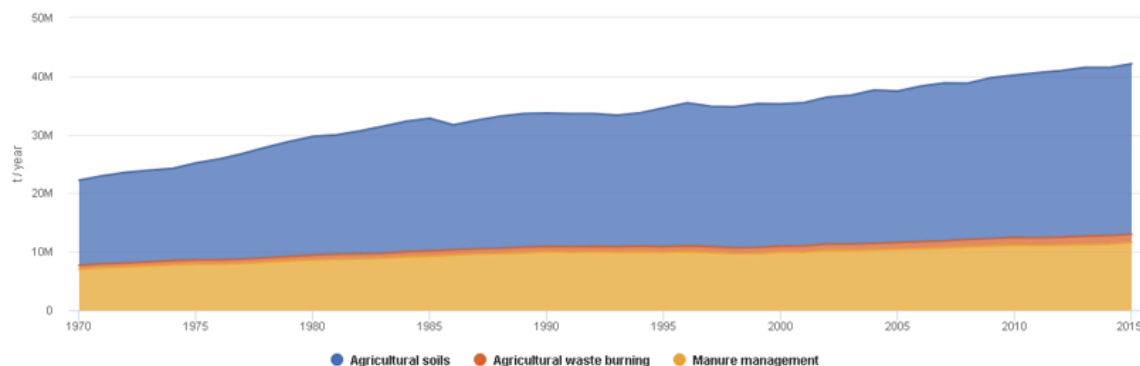
Gráfico 16. Emissões globais de amônia



Fonte: *European Commission* (2022).

A maior parte das emissões de Amônia vem do setor de Agricultura, conforme Gráfico 16, e especificamente devido ao tratamento do solo e manejo de esterco, conforme Gráfico 17.

Gráfico 17. Emissões globais de amônia, setor agropecuário



Fonte: *European Commission* (2022).

2.1.9 IMPACTO NA SAÚDE E SEGURANÇA DE POLUENTES DO AR

Como parece, a poluição do ar penetra no corpo humano principalmente pelo sistema respiratório e afeta os pulmões, o coração e o cérebro. O tamanho do poluente pode ser 30 vezes menor que o diâmetro de um cabelo ou partícula de areia. Dentro dos pulmões ou veias pode criar inflamações que levariam ao aumento



da pressão arterial ou câncer (efeito estocástico de longo prazo devido a danos constantes nos tecidos ou devido a produtos químicos) (WHO, 2018). A Tabela 1 representa a porcentagem de óbitos relacionados a determinada condição que poderia ser atribuída à Poluição do Ar.

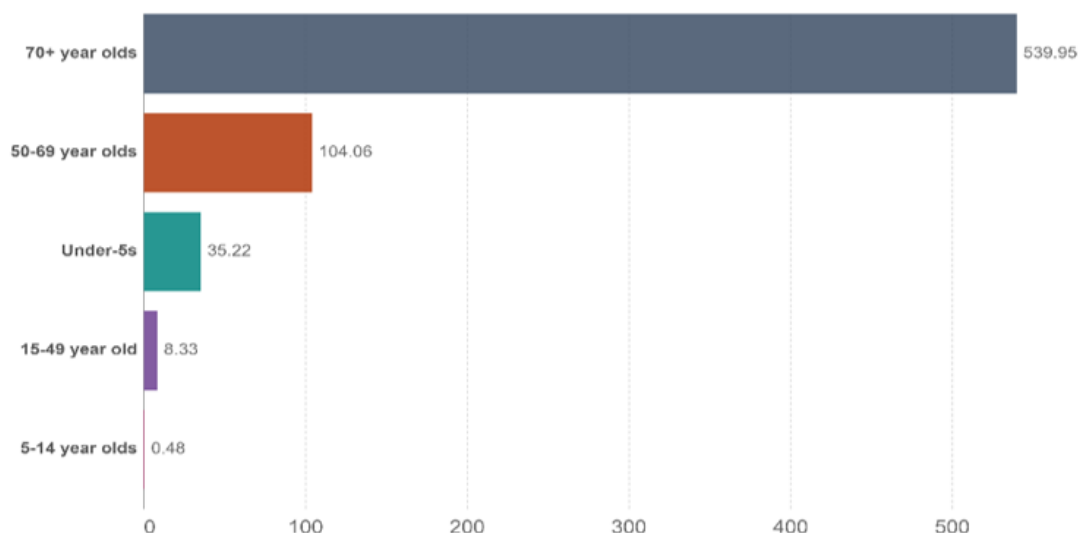
Tabela 1. O impacto dos poluentes atmosféricos na saúde

Doença	Impacto global estimado (% de mortes)
Derrame	~30%
Doença Respiratória Crônica	
Câncer de pulmão	
Ataque cardíaco	~25%
Total de mortes WW	~11.65%

Fonte: Adaptado de United Nations (s.d.) e de Ritchie e Roser (2022).

É importante destacar que cada poluente atmosférico tem um grau diferente de causar impacto na saúde humana e sua concentração também impactaria o efeito no indivíduo eventualmente exposto a ele. Essas exposições são cumulativas ao longo dos anos, também chamadas de 'efeitos estocásticos', e isso pode ser observado no Gráfico 18, pois a maior taxa de mortalidade ocorre nas idades mais avançadas, exceto por menores, que também são mais suscetíveis ao efeito não estocástico, mas ao efeito agudo representado por alguns poluentes atmosféricos (SEXTON e RYAN, 1988).

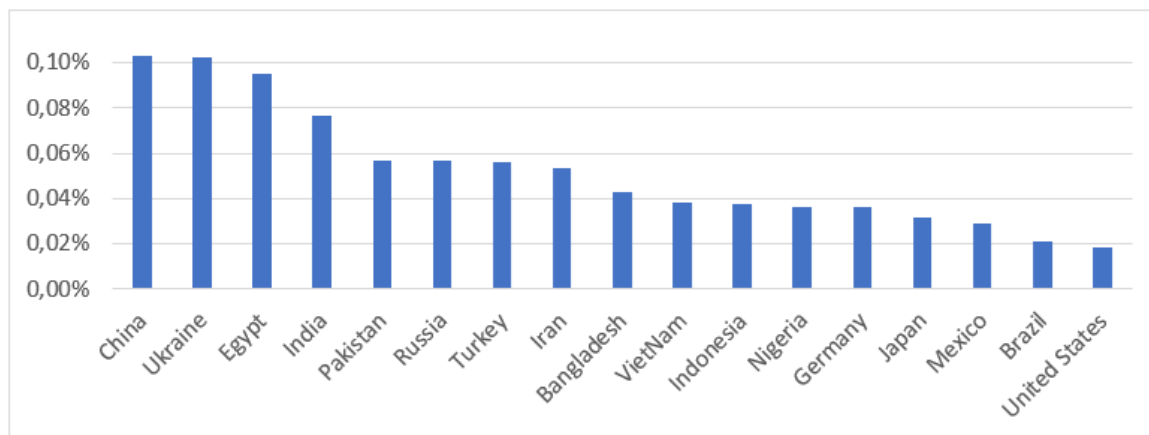
Gráfico 18. Taxas de mortes por poluição do ar ao ar livre por idade, por 100 mil indivíduos, Mundo, 2019



Fonte: Ritchie e Roser (2022).

O Gráfico 19 de 2016, usa a relação de Pareto para demonstrar a taxa de número de mortes relacionadas à Poluição do Ar por País, do conjunto de dados mais de 52% das mortes ocorreram na China e na Índia (3.456.780 pessoas em 2016). Na Ucrânia, por exemplo, a poluição vem das zonas industriais e de transporte, principalmente por NO₂, e a poluição está mais concentrada nessas 5 áreas industriais. Em 2016, a Ucrânia estava dando os primeiros passos para os padrões da União Europeia de controle da poluição do ar. A meteorologia tem grande impacto na concentração de poluentes no ar (SAVENETS, 2020).

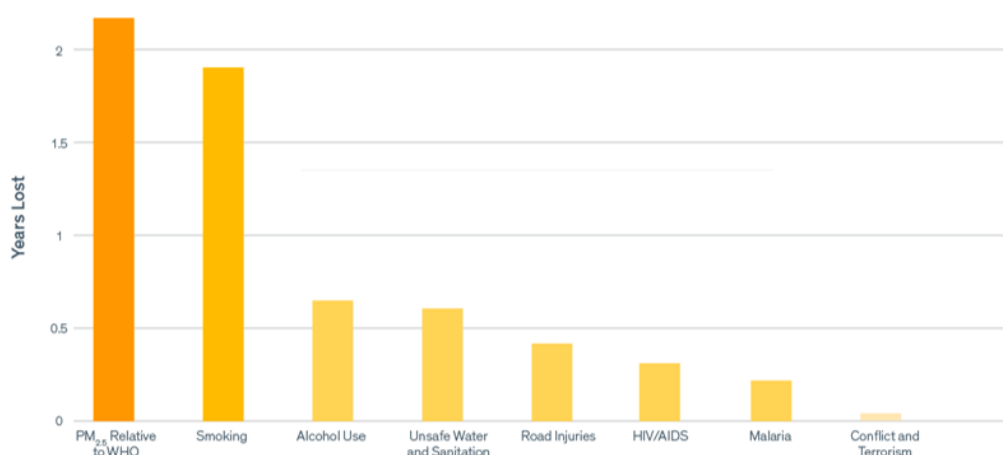
Gráfico 19. Número de mortes por Poluição do Ar Exterior/habitante, entre os 80% dos países com mais mortes causadas por Poluição do Ar Exterior em 2016



Fonte: adaptado de Ritchie e Roser (2022).

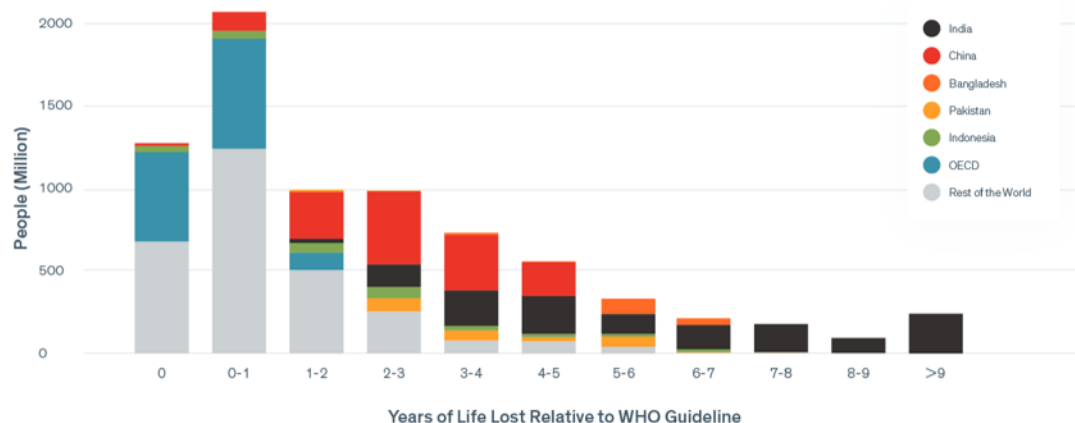
Considerando o poluente do ar, a concentração e o impacto da climatologia nas mortes por poluição do ar, os Gráficos 20 e 21 expressam o impacto específico do Poluente do Ar PM2.5 em relação a outros fatores de risco e às geografias (UNIVERSITY OF CHICAGO, 2022).

Gráfico 20. Impacto na Expectativa de Vida de PM2.5 e Causa/Risco de Morte Não Associados, Global



Fonte: University of Chicago (2022).

Gráfico 21. Impacto na Expectativa de Vida de PM2.5 e Causa/Risco de Morte Não Associados – Global



Impacto na Expectativa de Vida de PM2.5 e Causa Não Associada Risco de Morte, Global. Fonte: *University of Chicago (2022)*.

2.1.10 MEDIDAS DE CONTROLE

Houve um bom progresso geral na redução de Poluentes Atmosféricos nos EUA, conforme observado na Tabela 2, e isso também se reflete no Gráfico 22, onde mesmo com a alta atividade industrial e o desenvolvimento econômico indicado Consumo de Energia, Produto Interno Bruto (PIB), Milhas percorridas pelo veículo e população. Verifica-se uma diminuição das emissões agregadas dos Poluentes Atmosféricos mais comuns, apesar do elevado volume de GEE. Um indicador importante aqui é o *Vehicle Miles Travelled*, que representaria um impacto na Poluição no transporte em alguns países, mas as políticas de emissão, combustível e evolução da tecnologia veicular dão uma contribuição importante.



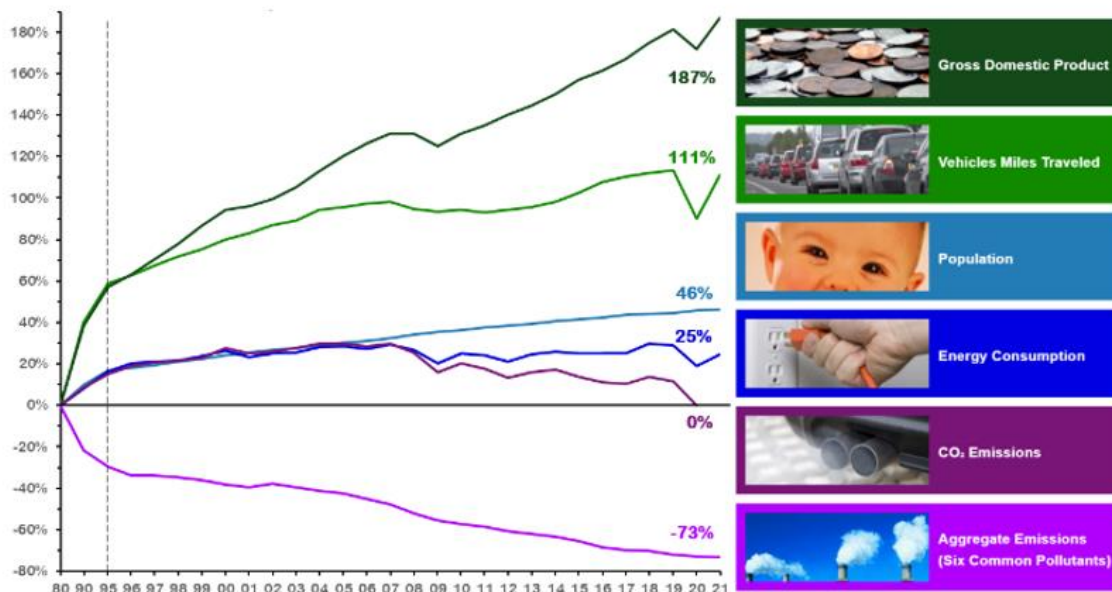
Tabela 2. Alteração percentual na qualidade do ar, apenas nos EUA

	1980 vs 2021	1990 vs 2021	2000 vs 2021	2010 vs 2021
Carbon Monoxide	-87	-79	-65	-26
Lead	-98	-98	-93	-85
Nitrogen Dioxide (annual)	-67	-61	-53	-29
Nitrogen Dioxide (1- hour)	-64	-54	-40	-22
Ozone (8-hour)	-29	-21	-16	-5
PM ₁₀ (24-hour)	---	-32	-36	-5
PM _{2.5} (annual)	---	---	-37	-14
PM _{2.5} (24-hour)	---	---	-33	-2
Sulfur Dioxide (1-hour)	-94	-91	-85	-74

Fonte: EPA (2020).

A maioria dos poluentes atmosféricos está relacionada com combustíveis fósseis como carvão, petróleo, gasóleo, gasolina ou gás natural, mas o nível de poluentes de cada um difere no tipo e no volume, conforme o Gráfico 25.

Gráfico 22. Comparação das Áreas de Crescimento e Emissões, 1980-2021



Fonte: EPA (2022).

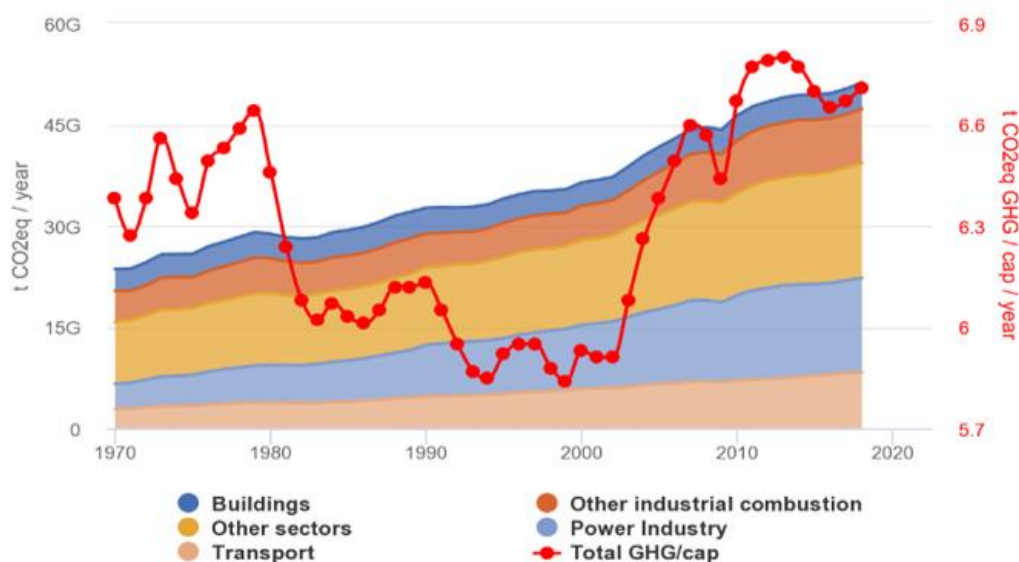
2.2 GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE)

Os gases de efeito estufa são gases que têm o potencial de reter o calor do sol na Terra, levando ao aquecimento global: cada gás tem um potencial diferente com base em seu tempo na atmosfera e na capacidade de retenção de calor. Alguns dos Gases de Efeito Estufa (GEE) são o Dióxido de Carbono (CO₂), o Metano (CH₄), o Óxido Nitroso (N₂O), o CFC-12 e o HCFC-22 (F-Gases). Com base em cada potencial de GEE existe um multiplicador, e esse multiplicador pode ser usado para adicioná-los ao Dióxido de Carbono Equivalente (CO₂e) (LIMA e HAMZAGIC, 2022).

Mesmo que alguns GEE sejam emitidos por fontes naturais. A preocupação com o nível das emissões vem de diversos setores econômicos, como edificações, indústria de energia, transporte, outros setores da economia e outras combustões industriais, conforme mostra o Gráfico 23. Outros setores, como agricultura e indústria de energia são os que mais contribui para as emissões de GEE, cerca de

60% das mesmas, seguidas pelos transportes e outras indústrias de combustão com 16% cada e os edifícios são os últimos com 8% das emissões globais (EUROPEAN COMMISSION, 2022).

Gráfico 23. Emissões globais de GEE em CO₂e por setor



Fonte: *European Commission* (2022).

Mesmo considerando o potencial de GEE o GEE mais impactante é o CO₂, conforme expresso na Tabela 3, e o setor que mais contribui para isso é o de Energia seguido de Transporte.

Tabela 3. Emissões globais de GEE em 2018 por setor em CO₂e (toneladas por ano)

Setor	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	F-Gases	Todos os GEE de 2018 (t CO ₂ e/ano)	%
Edifícios	3,487,852,530	307,493,588	78,764,744	-	3.874.110.862	8%
Outros Ind. Comb.	7,987,677,506	36,168,931	33,358,487	-	8.057.204.924	16%



Outros Setores	4,193,254,299	8,999,971,287	2,571,268,358	1,233,296,007	16.997.789.950	33 %
Indústria de Energia	13,905,060,784	11,499,407	83,469,597	-	14.000.029.788	27 %
Transporte	8,142,335,550	27,454,121	100,652,203	-	8.270.441.874	16 %
Total	37,716,180,669	9,382,587,334	2,867,513,389	1,233,296,007	51.199.577.398	
%	74%	18%	6%	2%		

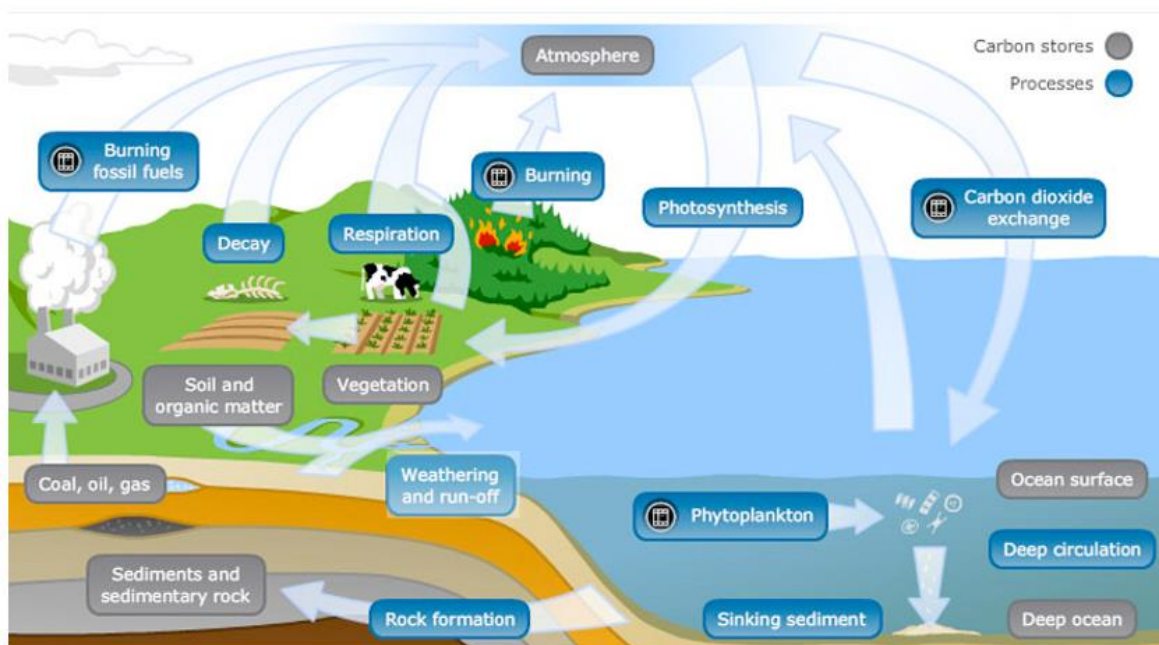
Fonte: Adaptado da European Commission (2022).

2.2.1 DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂)

O Dióxido de Carbono é um gás comum encontrado na natureza, mas seus níveis na atmosfera aumentaram nos últimos séculos devido a atividades antrópicas, principalmente a queima de biomassa e combustíveis fósseis para produção de energia, como nas indústrias siderúrgica e cimenteira. É o GEE mais abundante no planeta. O ciclo do dióxido de carbono também é afetado quando a capacidade de absorvê-lo é reduzida, seja pelo oceano ou pela floresta (THE UNIVERSITY OF WAIKATO, 2008).

O maior mecanismo de absorção de dióxido de carbono ocorre nos oceanos, onde milhões de fitoplâncton produzem fotossíntese e convertem o CO₂ em O₂, armazenando permanentemente esse CO₂ no fundo dos oceanos ao finalizar seu ciclo de vida na natureza. A Figura 7 mostra o armazenamento de carbono em cinza e os processos de carbono em azul. A cinza observa-se a atmosfera, o solo e a matéria orgânica, o carvão, o petróleo, o gás (combustíveis fósseis), a superfície oceânica e o fundo oceânico como depositário do CO₂. O processo em azul inclui a queima de combustíveis fósseis ou matéria orgânica que converte o CO₂ de seu estado sólido para a atmosfera, a respiração de humanos e animais que libera absorve o O₂ e libera CO₂ e o processo de fotossíntese que converte o CO₂ em O₂ sobre florestas, plantas e fitoplâncton (THE UNIVERSITY OF WAIKATO, 2008).

Figura 7. Ciclo do Carbono

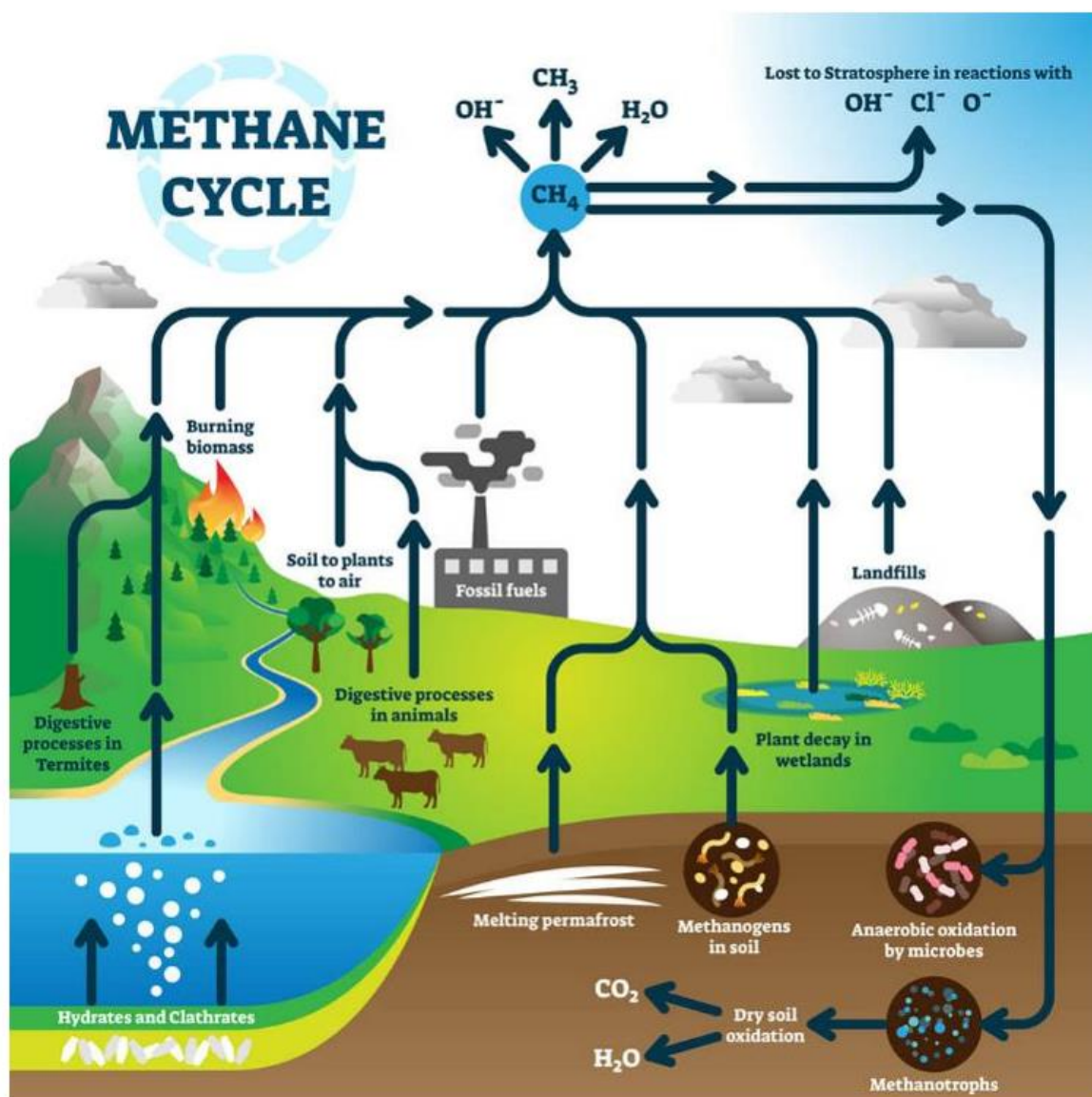


Fonte: *The University of Waikato* (2008).

2.2.2 METANO (CH₄)

O Metano tem um potencial 28 vezes maior, do Relatório de Avaliação nº 5 (AR5), de causar aquecimento global quando comparado ao Dióxido de Carbono, e é o segundo na cadeia de emissão. É emitido principalmente pela indústria agrícola globalmente, principalmente pela cultura do arroz (cerca de 20% das emissões globais), e somando-se a isso existem alguns pântanos naturais, cupins, animais selvagens e esterco animal (outros 25% das emissões globais). Outra indústria que tem alto impacto nas emissões de metano é a indústria do gás natural (de 5 a 10% das emissões globais). Esses processos são observáveis na Figura 8 onde a metanogênese da matéria orgânica é transformada anaerobicamente por bactérias em CO₂ e CH₄ (Metano) (THOMAS; KUMAR e KUMAR, 2020).

Figura 8. Ciclo do Metano



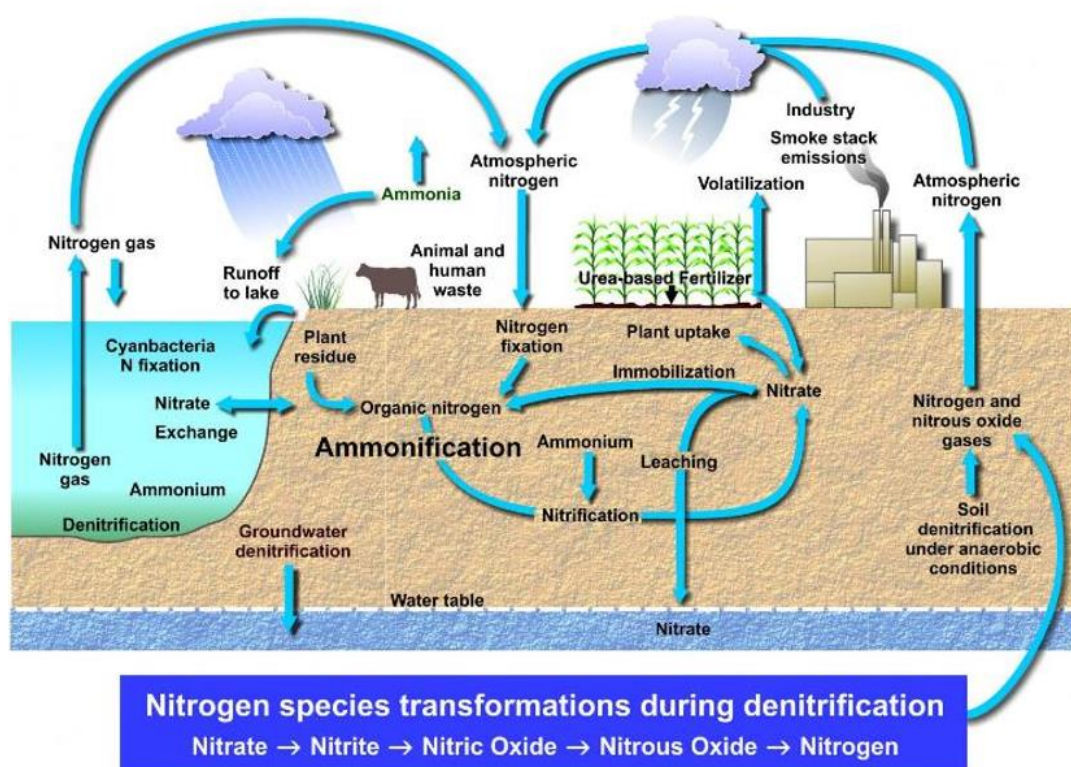
Fonte: Khanna (2022).

2.2.3 ÓXIDO NITROSO (N_2O)

O Óxido Nitroso tinha um Potencial de Aquecimento Global de 298. Tem suas principais fontes na agricultura, queima de combustível fóssil, gerenciamento de águas residuais e processos industriais, além do ciclo natural regular do nitrogênio na natureza na proporção de 40% antropogênico e 60% natural. Esse ciclo pode

ser observado na Figura 9. Das fontes antrópicas, a maior parte é proveniente da agricultura, quase 74% (dos Estados Unidos 2017, por exemplo) no processo de fertilizantes (o que também está impactando a indústria, principalmente) ou queima de alguns resíduos agrícolas. Na combustão do combustível depende dos aditivos do combustível e do maquinário, enquanto do lado dos resíduos é utilizado e lançado em estações de tratamento de água (EPA, 2022d).

Figura 9. Ciclo do Nitrogênio



Fonte: University of Nebraska – Lincoln (2022).

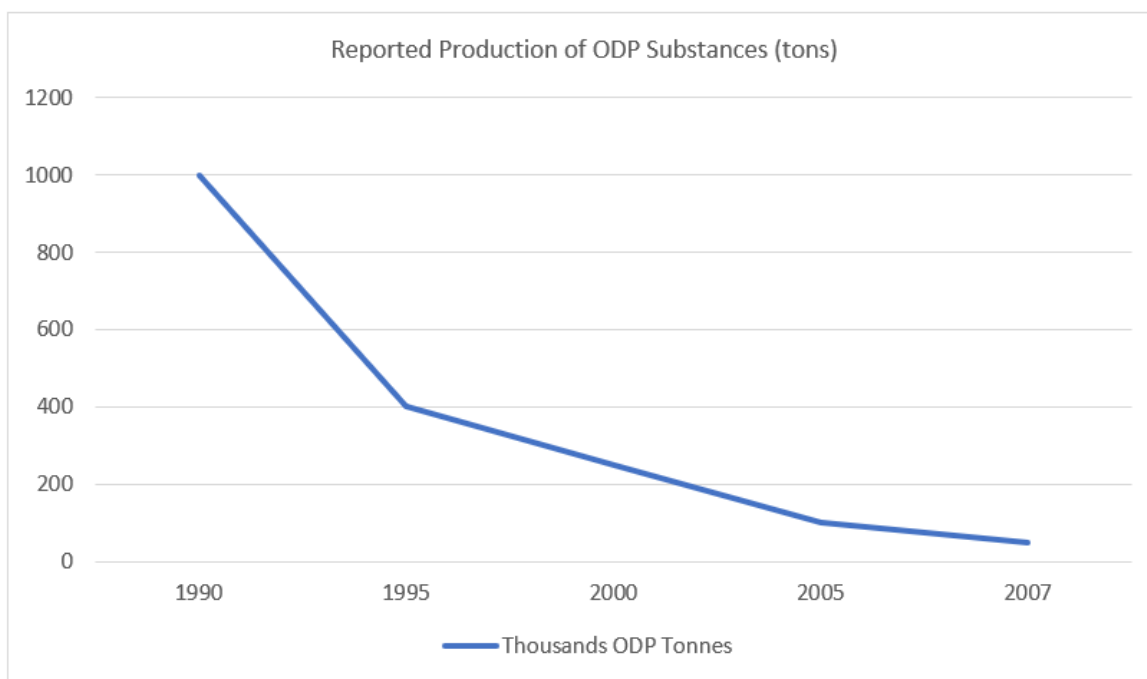
2.2.4 GASES F

Por F-Gases devem ser considerados, como exemplos, os Clorofluorcarbonos (CFC), hidrofluorcarbonos (HFCs) e hidroclorofluorcarbonos (HCFC). Esses gases contribuem para o Efeito Estufa (GH) e contribuem para danos ao ozônio na alta

atmosfera, por isso chamados de Substâncias Destruidoras de Ozônio (PDO), que aumentam a exposição humana aos raios ultravioleta (UVB). Cerca de 84% dela são resultado de fontes antropogênicas, e o restante dos 16% são naturais. A maior parte da produção e importação de CFC e HCFC são proibidas na maioria dos lugares, como mostra o Gráfico 24. Seu potencial de GH pode chegar a 14.000 dependendo da substância. Estes são normalmente refrigerantes (THE OZONE HOLE, 2022; MINNESOTA POLLUTION CONTROL AGENCY; UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME, 2012).

O Protocolo de Montreal foi um protocolo de acordo global para proteger a camada de ozônio, interrompendo a produção de substâncias que poderiam danificar a camada de ozônio estratosférico.

Gráfico 24. Decréscimo de ODP Produção WW (valores aproximados da fonte original)



Fonte: adaptado de *The Ozone Hole* (2022).



3. METODOLOGIA

Quanto à sua natureza, trata-se de pesquisa aplicada, pois pretende identificar correlações entre GEE e Poluição do Ar. Considerando seus objetivos, esta é uma pesquisa explicativa, pois visa explicar essas relações e impactos na saúde e segurança humana. Segundo protocolos técnicos a pesquisa é documental, pois utiliza todo tipo de fontes disponíveis para coleta de dados e pesquisa experimental quando as informações são testadas por meio de modelos estatísticos, o que define seu estilo de abordagem quantitativa.

A parte da pesquisa documental utilizou 45 fontes de informação para entender e, por meio disso, traduzir esse conhecimento. O estudo usou 67% das informações de sites de agências e universidades reconhecidas, como Nações Unidas, Organização Mundial da Saúde, *University of Chicago*, *Our World in Data*, etc., além de 37% de artigos de periódicos, livros e relatórios públicos. Cerca de 80% das informações foram publicadas entre 2017 e 2022; Mais de 90% das informações são de fontes internacionais.

Os principais temas pesquisados foram as Emissões, que incluem Poluentes Atmosféricos e GEE (32), Saúde (7), Energia (5) e Demografia (1).

Quanto aos objetivos, esta foi uma pesquisa exploratória que buscava meios para entender a relação entre essas duas variáveis por meio de diferentes fontes e entender as perspectivas para o futuro.

Para o modelo de regressão, apenas os seguintes países foram considerados devido à falta de fonte de dados para o consumo de carvão: Argélia, Argentina, Austrália, Áustria, Azerbaijão, Bangladesh, Bielorrússia, Bélgica, Brasil, Bulgária, Canadá, Chile, China, Colômbia, Croácia, Chipre, República Tcheca, Dinamarca, Equador, Egito, Estônia, Finlândia, França, Alemanha, Grécia, Hungria, Islândia, Índia, Indonésia, Irã, Iraque, Irlanda, Israel, Itália, Japão, Cazaquistão, Kuwait,

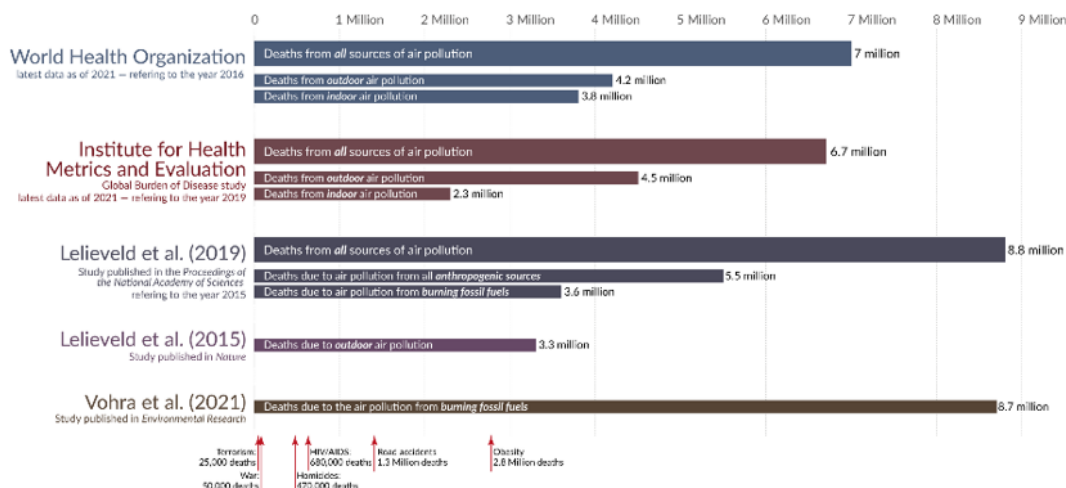


Letônia, Lituânia, Luxemburgo, Malásia, México, Marrocos, Holanda, Nova Zelândia, Macedônia do Norte, Noruega, Omã, Paquistão, Peru, Filipinas, Polônia, Portugal, Catar, Romênia, Rússia, Arábia Saudita, Cingapura, Eslováquia, Eslovênia, África do Sul, Coreia do Sul, Espanha, Sri Lanka, Suécia, Suíça, Tailândia, Trinidad e Tobago, Turquia, Turcomenistão, Ucrânia, Emirados Árabes Unidos, Reino Unido, Estados Unidos, Uzbequistão, Venezuela e Vietnã.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Segundo Rose (2020), Figura 10, os dados da OMS (2021b) não são únicos sobre mortes por Poluição do Ar, embora essa tenha sido a referência para este trabalho, que não é a mais alta, tem uma boa média com outros números reconhecidos de outras publicações.

Figura 10. Número de mortes por poluição do ar de diferentes fontes



Fonte: Roser (2020).

Embora a Poluição do Ar e os Gases de Efeito Estufa acrescentem estatísticas de registro de mortes diferentes, da OMS (2021a) 7 milhões de mortes todos os anos por Poluição do Ar (interna, 3,8 milhões e externa, 4,2 milhões) e de (ZHAO *et al.*,



2021) cerca de 5 milhões de pessoas morrem todos os anos devido às mudanças climáticas. Como pode ser observado na Tabela 19 e na Tabela 20, a maioria dos dois tipos de emissão está relacionada a processos de combustão, mas há um ponto de inflexão em que ambas começam a se separar.

Tabela 19. Algumas fontes de GEE

GEE	Fonte
Dióxido de carbono (CO ₂)	Combustão de Combustíveis Fósseis, Uso Tradicional de Biomassa, Processos Industriais, Vulcão, Incêndios Florestais,
Metano(CH ₄)	Agricultura, Uso Tradicional de Biomassa, Decomposição de Material Orgânico, Resíduos, Esterco, Cupins, Animais Silvestres, Combustíveis Fósseis
Óxido nitroso (N ₂ O)	Agricultura, Combustíveis fósseis, resíduos, Fertilizantes
CFC e HCFC (F-Gases)	Refrigeração

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 20. Algumas fontes de poluição do ar

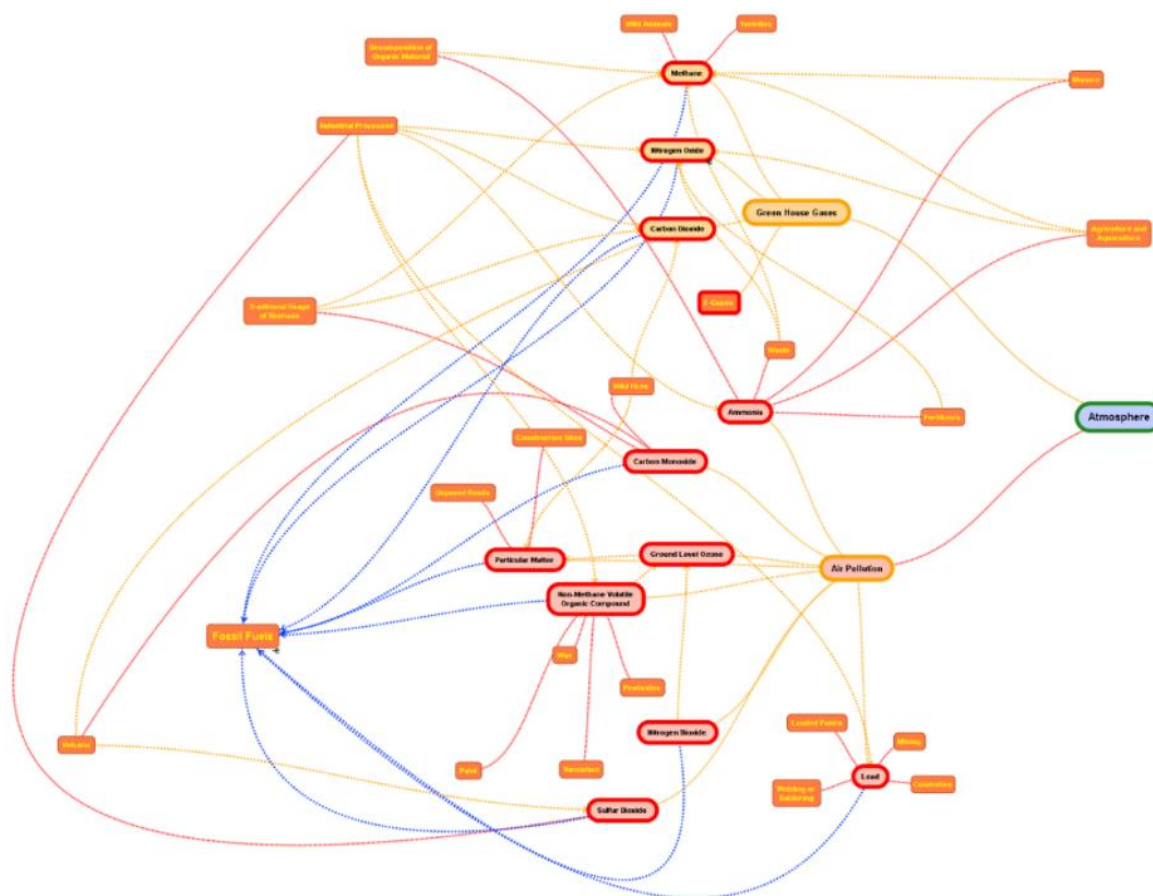
Poluente do ar	Fonte
Monóxido de Carbono (CO)	Combustão de combustível fóssil, uso tradicional de biomassa, vulcão, incêndio florestal
Chumbo (Pb)	Combustão de Combustíveis contendo chumbo e outros componentes químicos, Processos Industriais, Cosméticos, Mineração, Tinta com Chumbo, Soldagem e Soldagem
Dióxido de nitrogênio (NO _x /NO ₂)	Combustão de Combustíveis Fósseis em alta temperatura, principalmente diesel e carvão, Processo industrial, resíduos
Matéria Particular	Estradas não pavimentadas, canteiros de obras, incêndios florestais, combustíveis fósseis
Dióxido de enxofre (SO _x /SO ₂)	Processos Industriais, Vulcão, Combustíveis Fósseis
Compostos Orgânicos Voláteis (VOC)	Tintas, Ceras, Vernizes, Combustíveis Fósseis, Pesticidas, Processos Industriais,
Ozônio no nível do solo (GLO)	Matéria Particular, VOC, Dióxido de Nitrogênio

Amônia (NH ₃)	Resíduos, Fertilizantes, Processos Industriais, Decomposição de matéria orgânica, Adubos, Aquicultura e Agricultura
---------------------------	---

Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 11 mostra parcialmente as complexas relações entre poluentes (vermelho), fontes (laranja), gases de efeito estufa (vermelho) e a atmosfera (verde), com base nas conexões, tanto os combustíveis fósseis quanto os processos industriais parecem ser os que mais contribuem para os GEE e Poluição do Ar.

Figura 11. Mapa Mental com relações entre GEE, Poluente do Ar e Fontes

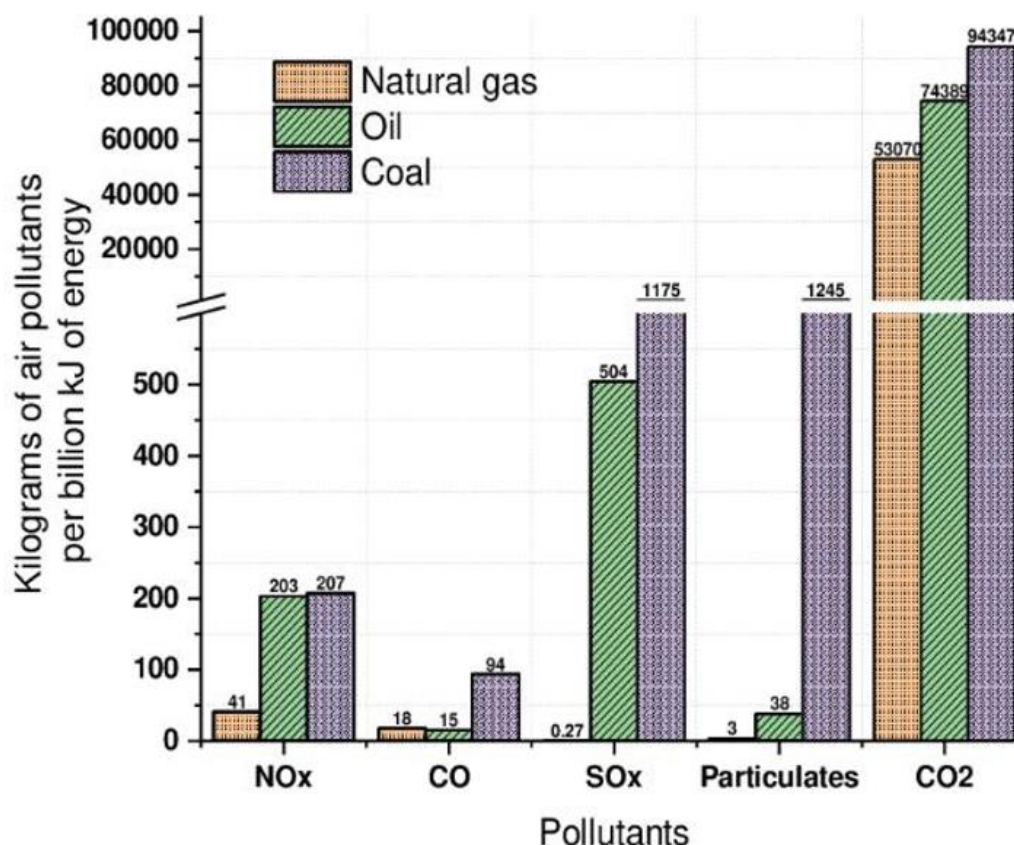


Fonte: Elaborado pelo autor.

Embora as tabelas mostrem que os combustíveis fósseis são os que mais contribuem para a poluição do ar, a maior diferença está no tipo de combustível

utilizado, enquanto o Petróleo e o Carvão têm altas concentrações de poluentes, o Gás Natural, ou mesmo o Biometano, proveniente do Biogás, têm concentrações muito mais baixas na Poluentes e quase 44% menos emissões de CO₂ do que o Carvão e 30% menos emissões de CO₂ do que o Petróleo, uma das razões para este se chamar 'Combustível de Transição', conforme Gráfico 25.

Gráfico 25. Poluentes e CO₂ de alguns Combustíveis Fósseis



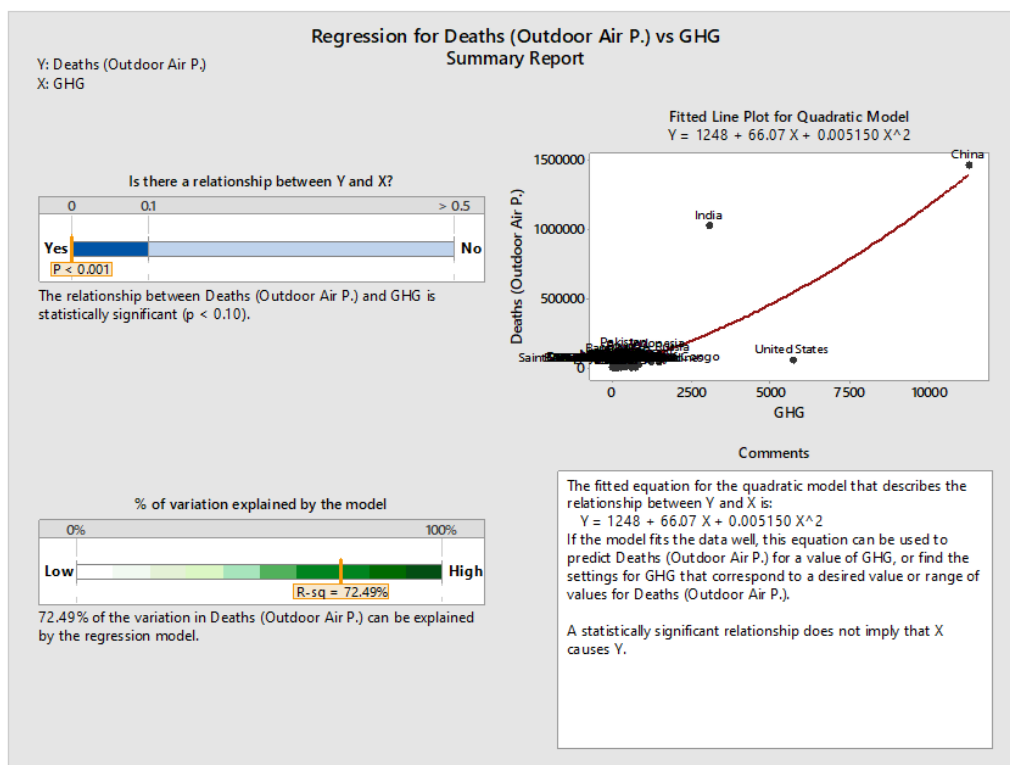
Fonte: Qyyum *et al.* (2019).

Outra perspectiva sobre isso é a relação entre mortes por poluição do ar externo e emissões de GEE. Com base nos dados deste estudo baseado nos dados de (RITCHIE e ROSER, 2022), a regressão mostra uma relação estatisticamente

significativa entre Mortes por Poluição do Ar Externo (Y) e emissões de GEE (X). Alguns aspectos importantes deste estudo de regressão são:

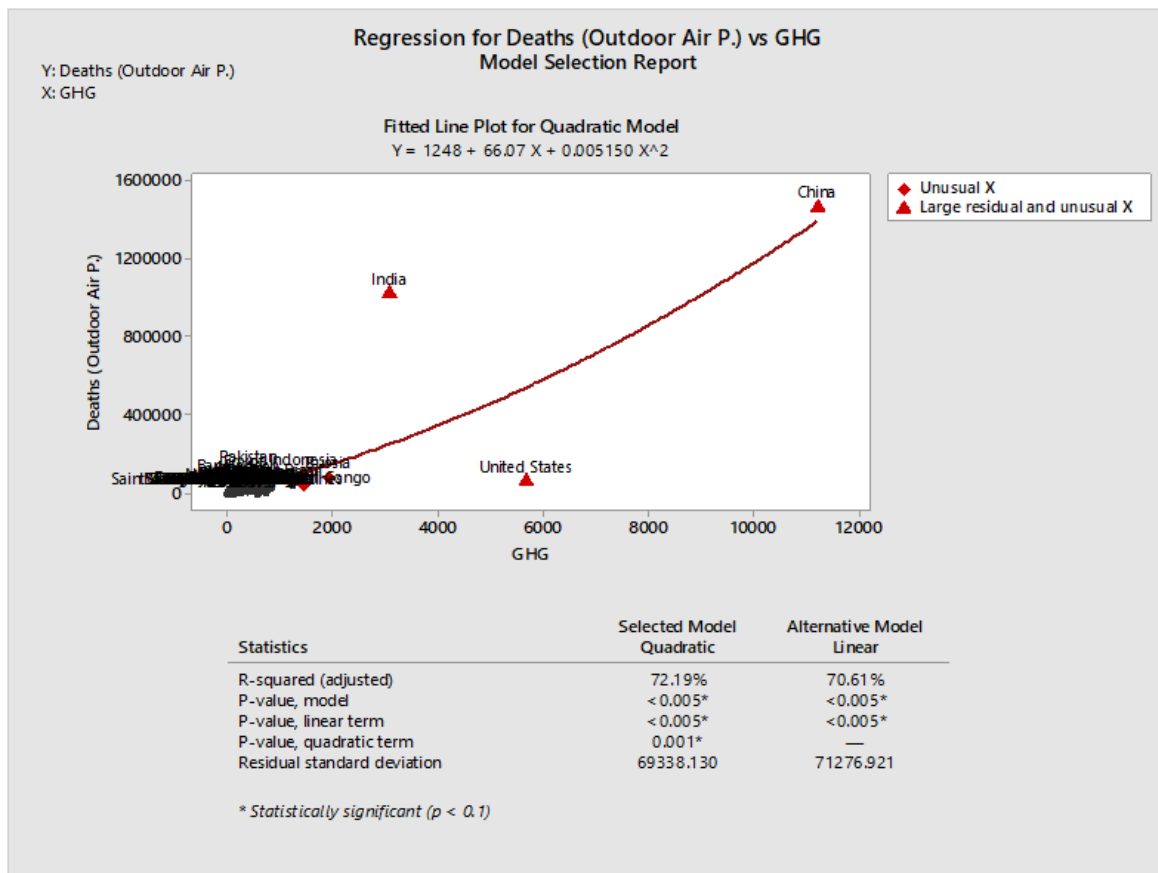
1. Especialmente nos gráficos 12 e 13, a regressão considera 183 países, ao contrário do método deste estudo global que considera apenas 77 países,
2. existem grandes aglomerados, o que significa que existem outros fatores que afetam nosso Y,
3. No topo do cluster, destacam-se 3 países com altas emissões de GEE: China, Índia e EUA, que têm diferentes realidades em Poluição do Ar,
4. Se considerarmos as equações da Figura 13, pode não ser aplicável a algumas áreas, pois a constante da equação pode levar a um número incompatível com a população.

Figura 12. Estudo de regressão direta entre Mortes por Poluição do Ar Exterior e Emissões de GEE, Resumo



Fonte: elaborado pelo autor utilizando Minitab® com dados de Ritchie e Roser (2022).

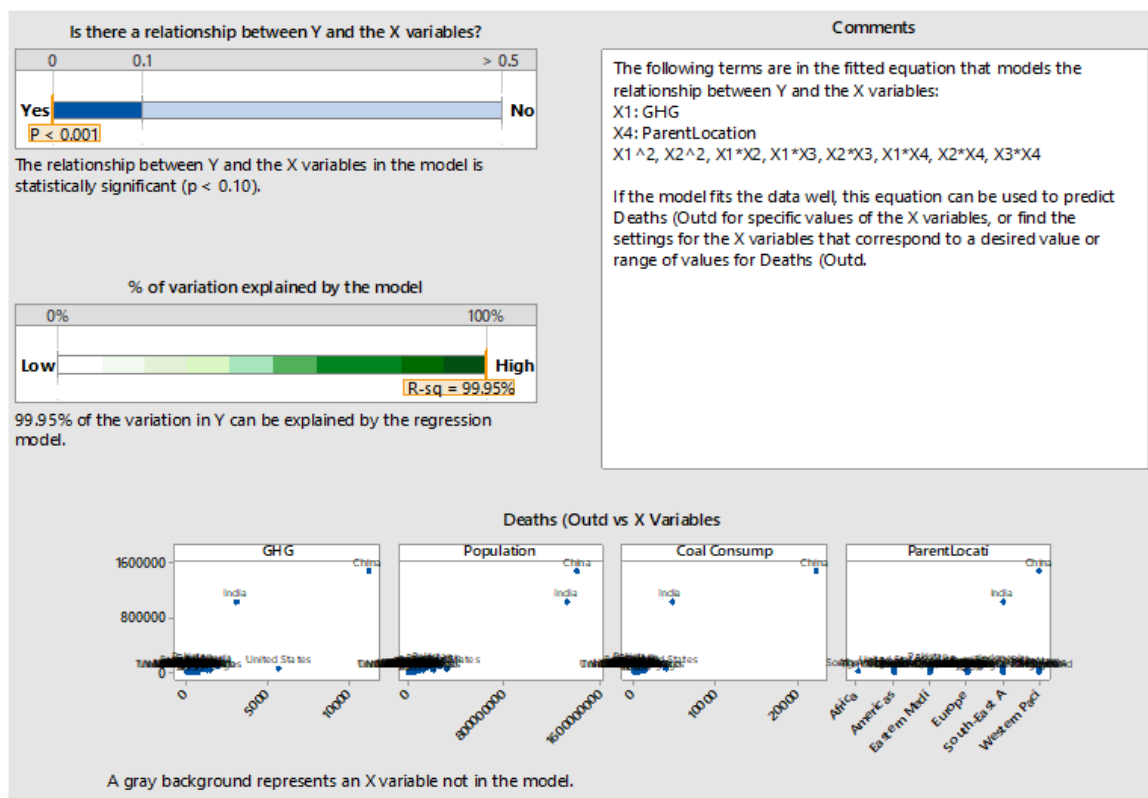
Figura 13. Estudo de regressão direta entre Mortes por Poluição do Ar Exterior e Emissões de GEE, Modelo



Fonte: elaborado pelo autor utilizando Minitab® com dados de Ritchie e Roser (2022).

Na tentativa de reduzir os efeitos destacados nas Figuras 12 e 13, outras variáveis X foram adicionadas às emissões de GEE: localização da matriz, população e Consumo de Carvão, conforme Figuras 14, 15 e 16.

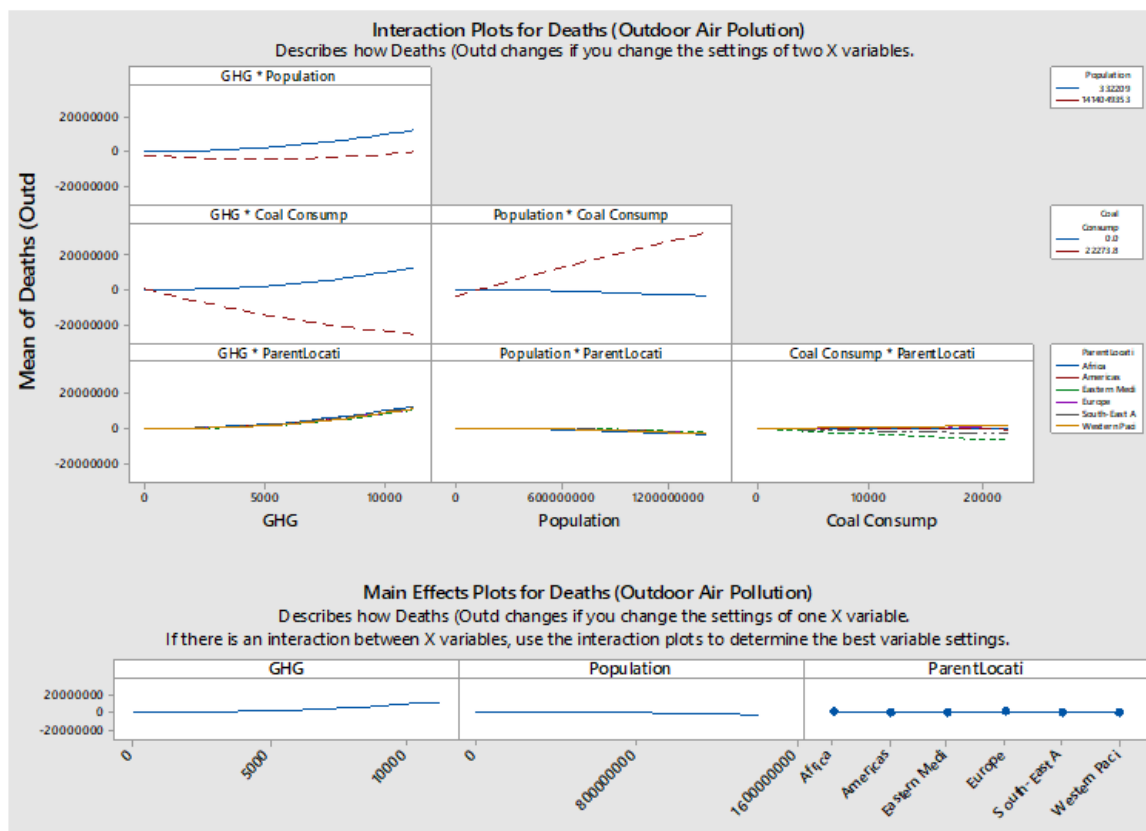
Figura 14. Regressão Múltipla entre Óbitos por Poluição do Ar Exterior e Variáveis, dados de 2016



Fonte: elaborado pelo autor utilizando Minitab® com dados de Ritchie e Roser (2022).

Cada uma das variáveis (X) utilizadas para o estudo apresentou um tipo diferente de comportamento frente à média de mortes relacionadas à poluição do ar exterior, em alguns casos uma relação negativa, conforme observado na Figura 15.

Figura 15. Os Gráficos de Interação e de Efeito Principal das variáveis testadas



Fonte: elaborado pelo autor utilizando Minitab® com dados de Ritchie e Roser (2022).

Da mesma forma que se observou que GEE e Poluição do Ar podem estar dissociados em alguns locais dependendo das políticas implementadas localmente, tipo de combustível fóssil mais utilizado, Gráfico 25, a relação entre Mortes por Poluição do Ar Exterior é dependente da região e precisa ser futuramente agrupados em outras categorias para construir um modelo melhor.

Figura 16. Equações por localização principal (região) resultantes da análise de regressão

		X1: GHG X2: Population X3: Coal Consumption X4: ParentLocation
ParentLocation		Final Equations
Africa	Deaths (Outdoo	= 42436 + 97009 GHG + 229179 GHG*GHG - 102040 Population*Population - 209629 GHG*Population - 587057 GHG*Coal Consumption - TWh + 730845 Population*Coal Consumption - TWh + 0.0 Population + 0.0 Coal Consumption - TWh
Americas	Deaths (Outdoo	= 16278 - 105206 GHG + 229179 GHG*GHG - 102040 Population*Population - 209629 GHG*Population - 587057 GHG*Coal Consumption - TWh + 730845 Population*Coal Consumption - TWh + 197126 Population - 50834 Coal Consumption - TWh
Eastern Meditterane	Deaths (Outdoo	= -115130 - 173523 GHG + 229179 GHG*GHG - 102040 Population*Population - 209629 GHG*Population - 587057 GHG*Coal Consumption - TWh + 730845 Population*Coal Consumption - TWh + 310618 Population - 796855 Coal Consumption - TWh
Europe	Deaths (Outdoo	= 43973 - 116506 GHG + 229179 GHG*GHG - 102040 Population*Population - 209629 GHG*Population - 587057 GHG*Coal Consumption - TWh + 730845 Population*Coal Consumption - TWh + 159275 Population + 135519 Coal Consumption - TWh
South-East Asia	Deaths (Outdoo	= 4943 + 21336 GHG + 229179 GHG*GHG - 102040 Population*Population - 209629 GHG*Population - 587057 GHG*Coal Consumption - TWh + 730845 Population*Coal Consumption - TWh + 203837 Population - 296028 Coal Consumption - TWh
Western Pacific	Deaths (Outdoo	= 33627 - 114544 GHG + 229179 GHG*GHG - 102040 Population*Population - 209629 GHG*Population - 587057 GHG*Coal Consumption - TWh + 730845 Population*Coal Consumption - TWh + 102676 Population + 166654 Coal Consumption - TWh

Fonte: elaborado pelo autor utilizando Minitab® com dados de Ritchie e Roser (2022).

A Figura 16 mostra alguns exemplos de equações que podem ser usadas para estimar as mortes devido à Poluição do Ar Exterior, com base nas emissões de GEE, População e Consumo de Carvão.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve como objetivo compreender a relação entre Poluição do Ar e Gases de Efeito Estufa (GEE), tendo como questão norteadora: qual a relação entre Poluição do Ar e Gases de Efeito Estufa?

Sendo possível constatar, após o desenvolvimento desta pesquisa, que a Poluição do Ar e os GEE estão intrinsecamente ligados através das mais de suas fontes comuns, portanto, embora a literatura revele 2 estatísticas separadas, existem ligações invisíveis, conforme demonstrado na Figura 11. Outra observação



importante de O Gráfico 22 está relacionado com a intensidade dessa relação, pois com a implementação de novas tecnologias e políticas de prevenção da Poluição do Ar a relação entre GEE e Poluição do Ar pode se tornar mais fraca, fenômeno que começou na década de 70 com o crescimento da consciência da Poluição do Ar.

A disponibilidade de energia mais avançada e limpa apoiará a redução das mortes por poluição do ar, interna ou externa. A Poluição do Ar interna está mais relacionada ao uso de fontes de energia menos avançadas, que geram mais Poluentes do Ar em maior concentração, e a Poluição do Ar Exterior é impactada pela forma e volume que alguns combustíveis fósseis são convertidos em energia, por isso os investimentos em energias renováveis e eficiência são fundamentais, mas não a única alternativa.

O foco atual em GNL, Biometano e Gás Natural deve manter seu ritmo de crescimento devido ao seu impacto ~40% menos intensivo nas emissões de CO₂, significativamente menos Poluição do Ar e o potencial de integração com outras tecnologias como o hidrogênio. Essas usinas (em operação, em construção ou em conversão de outro combustível fóssil para Gás Natural ou similar) devem contemplar planos tangíveis para tecnologias como Captura e Armazenamento Subterrâneo de Carbono (CCUS) ou Captura e Armazenamento de Carbono (CCS) e estar preparadas para operar com Hidrogênio verde em qualquer proporção.

Este estudo também apresenta equações, Figura 13 e 16, que não são absolutas, mas têm a intenção de mostrar uma relação entre GEE e Mortes por Poluição do Ar Exterior, fornecendo uma nova ferramenta para estimativas baseadas em um impacto de segurança que pode ajudar no desenvolvimento de projetos com foco na redução de emissões de GEE. Embora as equações, da Figura 16, tenham foco regional. É importante destacar que cada país teria sua própria realidade e um estudo de regressão mais específico deveria ser feito para resultados mais precisos, dadas as diferentes ações que estão sendo realizadas no controle da poluição do



ar. Outro aspecto importante a esclarecer é que essas mortes estimadas não devem ser adicionadas a um número já contabilizado de mortes por emissões de GEE (ZHAO *et al.*, 2021).

Para concluir, a revisão da literatura e os dados apresentados, neste estudo, suportam que existe uma relação entre GEE e Mortes por Poluição do Ar, e que quando há vontade de mudança, o uso de Tecnologias e Políticas pode fazer a diferença para fazer essa relação é mais fraca. A redução global global de poluentes atmosféricos, seguida pelo trabalho que o mundo tem feito para reduzir os produtos que destroem o ozônio, mostra isso e é encorajador para a meta global de zero líquido para GEE.

BIBLIOGRAFIA

AMERICAN LUNG ASSOCIATION. Nitrogen Dioxide. **American Lung Association**, 2020. Available in: <https://www.lung.org/clean-air/outdoors/what-makes-air-unhealthy/nitrogen-dioxide#:~:text=What%20Is%20Nitrogen%20Dioxide%3F,are%20burned%20at%20high%20temperatures>. Access in: 28 jul. 2022.

BABARINDE, F.; ADIO, M. A. A Review of Carbon Capture and Sequestration Technology. **Journal of Energy Technology and Environment**, p. 1-11, 2020. Available in: DOI:10.37933/nipes.e/2.2020.1. Access in: 19 set. 2022.

BRAVO, A. H. *et al.* The potential impact of gasoline additives on air quality in developing countries. **Clean Technologies and Environmental Policy**, p. 174-181, August 2006. Available in: DOI 10.1007/s10098-005-0016-5. Access in: 19 set. 2022.

EUROPEAN COMMISSION. Country Fact Sheet. EDGAR - Emissions Database for Global Atmospheric Research. **European Commission**, 2022. Available in: <https://edgar.jrc.ec.europa.eu/country_profile>. Access in: 9 aug. 2022.

GOV.UK. National Statistics: Air quality statistics in the UK, 1987 to 2021 - Nitrogen dioxide (NO₂). **Department for Environment Food & Rural Affairs**, 2022 Available in: <https://www.gov.uk/government/statistics/air-quality-statistics/nitrogen-dioxide>. Access in: 3 aug. 2022.



GOODKIND, A. L. *et al.* Fine-scale damage estimates of particulate matter air pollution reveal opportunities for location-specific mitigation of emissions. **PNAS**, Pasadena, v. 116, n. 18, p. 8775–8780, April 2019. Available in: <https://doi.org/10.1073/pnas.1816102116>. Access in: 4 aug. 2022

HAINES, A. Good Health in the Anthropocene Epoch: Potential for Transformative Solutions. In: AL-DELAIMY, W.; RAMANATHAN, V.; SÁNCHEZ SORONDO, M. **Health of Planet and Our Responsibility**. Cap. Chapter 24, p. 311-322. London: Springer, Cham, 2020.

HUANG, G. *et al.* Speciation of anthropogenic emissions of non-methane volatile organic compounds: a global gridded data set for 1970–2012. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 17, p. 7683–7701, June 2017. Available in: <https://doi.org/10.5194/acp-17-7683-2017>. Access in: 3 aug. 2022.

KHANNA, K. How Methanogenic Archaea Contribute to Climate Change. **American Society for Microbiology**, 2022. Available in: <https://asm.org/Articles/2022/May/How-Methanogenic-Archaea-Contribute-to-Climate-Cha>. Access in: 11 aug. 2022.

LIMA, L. J. B.; HAMZAGIC, M. Strategies for the Energy Transition: Literature Review. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, v. 8, n. 6, p. 96-120, June 2022. Available in: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/environmental-engineering-en/energy-transition>. Access in: 4 aug. 2022.

LEWIS, J. The Birth of EPA. **US Environmental Protection Agency**, 1985. Available in: <https://archive.epa.gov/epa/aboutepa/birth-epa.html>. Access in: 4 aug. 2022.

MINNESOTA POLLUTION CONTROL AGENCY. Chlorofluorocarbons (CFCs) and hydrofluorocarbons (HFCs). **Minnesota Pollution Control Agency**, s.d. Available in: <https://www.pca.state.mn.us/air/chlorofluorocarbons-cfcs-and-hydrofluorocarbons-hfcs>. Access in: 11 aug. 2022.

NASA. New NASA Satellite Maps Show Human Fingerprint on Global Air Qualit. **NASA.gov**, 2015. Available in: <https://www.nasa.gov/press-release/new-nasa-satellite-maps-show-human-fingerprint-on-global-air-quality/>. Access in: 6 aug. 2022.

NASA. Global Sulfur Dioxide Monitoring Home Page. **Atmospheric Chemistry and Dynamics Laboratory**, 2019. Available in: <https://so2.gsfc.nasa.gov/>. Access in: 6 aug. 2022.



ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT - OECD. **Environment at a Glance 2020**. OECD Publishing: Paris, p. 1-68, 2020.

QYYUM, M. A. *et al.* Performance enhancement of offshore lng processes by introducing optimal mixed refrigerant self-cooling recuperator. **International Conference on Applied Energy**, p. 712-749, 2019. Available in: https://www.researchgate.net/profile/Muhammad-Abdul-Qyyum/publication/344489774_PERFORMANCE_ENHANCEMENT_OF_OFFSHORE_LNG_PROCESSES_BY_INTRODUCING_OPTIMAL_MIXED_REFRIGERANT_SELF-COOLING_RECUPERATOR/links/5f7c28a792851c14bcb16e16/PERFORMANCE-ENHANCEMENT-OF-OFFSHORE-LNG-PROCESSES-BY-INTRODUCING-OPTIMAL-MIXED-REFRIGERANT-SELF-COOLING-RECUPERATOR.pdf. Access in: 28 jul. 2022.

RITCHIE, H. What are the safest and cleanest sources of energy? **Our World in Data**, 2020. Available in: <https://ourworldindata.org/safest-sources-of-energy>. Access in: 3 aug. 2022.

RITCHIE, H.; ROSER, M. Air Pollution. **Our World in Data**, 2022. Available in: <https://ourworldindata.org/air-pollution>. Access in: 27 jul. 2022.

ROSER, M. The world's energy problem. **Our World in Data**, 2020. Available in: <https://ourworldindata.org/worlds-energy-problem>. Access in: 3 aug. 2022.

SAVENETS, M. Air pollution in Ukraine: a view from the Sentinel-5P satellite. **IDÓJÁRÁS: Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service**, Kyiv, v. 125, n. 2, p. 271-290, April 2020. Available in: DOI:10.28974/idojaras.2021.2.6. Access in: 27 jul. 2022.

SEXTON, K.; RYAN, P. B. Assessment of Human Exposure to Air Pollution: Methods, Measurements, and Models. **National Library of Medicine**, 1988. Available in: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK218147/#:~:text=The%20concentration%20of%20a%20specific,%2C%20micrograms%20per%20cubic%20meter)). Access in: 27 jul. 2022.

THE OZONE HOLE. CFCs. **The Ozone Hole**, 2022. Available in: <http://www.theozonehole.org/cfc.htm>. Access in: 11 aug. 2022.

THE UNIVERSITY OF WAIKATO. Article: Carbon Cycle. **Science Learning Hub**, 2008. Available in: <https://www.sciencelearn.org.nz/resources/1569-carbon-cycle>. Access in: 11 aug. 2022.



THOMAS, J.; KUMAR, A.; KUMAR, A. Agricultural Methane Emissions: Consequences and Mitigations. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, vol. 9, n. 2, p. 729-732, 2020. Available in: DOI: <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.902.089>. Access in: 11 aug. 2022.

UNITED NATIONS. **Business Action For Energy**: Working for Sustainable Solutions - Air Pollution. United Nations. p. 2. 2007.

UNITED NATIONS. The Air We Share. **United Nations**, s.d. Available in: <https://www.un.org/en/observances/clean-air-day>. Access in: 27 jul. 2022.

UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME. **25 Years Montreal Protocol**. United Nations: New York, p. 32, 2012.

UNIVERSITY OF CHICAGO. Particulate air pollution is the single greatest threat to human health globally. Pollution Facts, **University Of Chicago**, 2022. Available in: <https://aqli.epic.uchicago.edu/pollution-facts/>. Access in: 6 aug. 2022.

UNIVERSITY OF NEBRASKA – LINCOLN. Nitrogen Dynamics. **Institute of Agriculture and Natural Resources**, 2022. Available in: <https://water.unl.edu/article/animal-manure-management/nitrogen-dynamics>. Access in: 11 aug. 2022.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. Our Nation's Air: Trends Through 2020. **U.S. Environmental Protection Agency (EPA)**, 2020. Available in: <https://gispub.epa.gov/air/trendsreport/2021/>. Access in: 4 aug. 2022.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. Ammonia. CADDIS Volume 2. **U.S. Environmental Protection Agency (EPA)**, 2022a. Available in: <https://www.epa.gov/caddis-vol2/ammonia>. Access in: 27 jul. 2022.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. Emisiones de óxido nitroso. **Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos**, 2022b. Available in: <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/emisiones-de-oxido-nitroso#N2O%20references>. Access in: 11 aug. 2022.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. Health Effects of Ozone Pollution. Ground-level Ozone Pollution. **U.S. Environmental Protection Agency (EPA)**, 2022c. Available in: <https://www.epa.gov/ground-level-ozone-pollution/health-effects-ozone-pollution>. Access in: 27 jul. 2022.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. National Air Quality: Status and Trends of Key Air Pollutants. **U.S. Environmental Protection Agency (EPA)**, 2022d. Available in: <https://www.epa.gov/air-trends>. Access in: 27 jul. 2022.



UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. Particulate Matter (PM) Basics. Particulate Matter (PM) Pollution. **U.S. Environmental Protection Agency (EPA)**, 2022e. Available in: <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics#PM>. Access in: 27 jul. 2022.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. Volatile Organic Compounds' Impact on Indoor Air Quality. Indoor Air Quality (IAQ). **U.S. Environmental Protection Agency (EPA)**, 2022f. Available in: <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/volatile-organic-compounds-impact-indoor-air-quality>. Access in: 27 jul. 2022.

VOILAND, A. Fourteen years of carbon monoxide from MOPITT. **NASA's Earth Observatory**, 2015. Available in: <https://climate.nasa.gov/news/2291/fourteen-years-of-carbon-monoxide-from-mopitt/>. Access in: 03 aug. 2022.

WORLD HEALTH ORGANIZATION - WHO. WHO: Breathe Life - How air pollution impacts your body. **YouTube**, 2018. Available in: <https://www.youtube.com/watch?v=GVBey1jSG9Y>. Access in: 27 jul. 2022.

WORLD HEALTH ORGANIZATION - WHO. Air pollution. **World Health Organization**, 2021a. Available in: https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_1. Access in: 27 jul. 2022.

WORLD HEALTH ORGANIZATION - WHO. **WHO global air quality guidelines**. Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization. Geneva, p. 300, 2021b. (ISBN 978-92-4-003422-8).

WHO REGIONAL OFFICE FOR EUROPE. Lead. In: EUROPE, W. R. O. F. **Air Quality Guidelines**. 2. ed. Cap. 6.7, p. 1-17. Copenhagen: [s.n.], 2001.

ZHAO, Q. *et al.* Global, regional, and national burden of mortality associated with non-optimal ambient temperatures from 2000 to 2019: a three-stage modelling study. **Lancet Planet Health**, vol. 05, n. 07, 2021. Available in: doi: 10.1016/S2542-5196(21)00081-4. Access in: 27 jul. 2022.

Enviado: Agosto de 2022.

Aprovado: Setembro de 2022.



¹ Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade de Taubaté (UNITAU), MBA em Gestão Empresarial pela Fundação Getúlio Vargas (FGV), MBA em Gerenciamento de Projetos pela Fundação de fomento ao CEFET/RJ, Especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho pela Universidade Candido Mendes (UCAM), Especialista em Engenharia de Petróleo pela Universidade Estácio de Sá (UNESA), Graduado em Engenharia de Petróleo pela Universidade Estácio de Sá (UNESA) e Graduado em Tecnologia Mecânica com ênfase em Automação Industrial pelo CEFET/RJ, e Supervisor de Radioproteção certificado pela CNEN. ORCID: 0000-0002-6647-3914.

² Orientadora. Graduada em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade de Taubaté, UNITAU, com pós-graduação em Gestão de Marketing e Engenharia de Segurança do Trabalho pela Escola Politécnica de Pernambuco. Mestra em Gestão do Desenvolvimento Regional pela UNITAU e Doutora em Engenharia de Produção pela Escola Politécnica da USP. ORCID: 0000-0001-8082-5763.