

POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA: CAUSAS, CONSEQUÊNCIAS SOCIOECONÔMICAS E SOLUÇÕES SUSTENTÁVEIS COM ÊNFASE EM BIOCOMBUSTÍVEIS

Alessandra Vieira Dácio¹, Beatriz Silva Amud Souto¹, Elias Kahllyl da Silva Moraes¹, Raduan Lima Rodrigues¹, Clairon Lima Pinheiro¹

¹Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, Brasil (avd.eng17@uea.edu.br)

A poluição atmosférica causada principalmente por combustíveis fósseis é um grave desafio à saúde e ao meio ambiente. Este trabalho revisa a literatura sobre poluentes e suas consequências, como doenças respiratórias e o aquecimento global, destacando os biocombustíveis como solução sustentável. Além disso, ressalta a importância de políticas públicas, tecnologias limpas e conscientização para reduzir emissões e promover uma transição que assegure um futuro mais saudável e sustentável para as próximas gerações.

Palavras-chave: Poluentes; saúde; meio ambiente; tecnologia.

INTRODUÇÃO

Define-se poluição atmosférica como a presença no ar de substâncias ou compostos que, em quantidades e concentrações capazes de modificar o seu equilíbrio, são prejudiciais ao ambiente, aos humanos e a outros seres vivos em geral, podendo também ocasionar a degradação de riquezas culturais, de meios de lazer e de recursos naturais (Drumm *et al.*, 2014; Torres *et al.*, 2020).

Os principais poluentes atmosféricos incluem o material particulado (MP), ozônio (O₃), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x) e compostos orgânicos voláteis (COV), sendo provenientes de diferentes fontes. O material particulado, como o PM₁₀ e o PM_{2.5}, consiste em pequenas partículas suspensas no ar que podem ser sólidas ou líquidas, originadas de processos como a queima de combustíveis fósseis, emissões industriais e a ressuspensão de poeira (Torres *et al.*, 2020).

O ozônio, por sua vez, é um poluente secundário formado por reações químicas entre óxidos de nitrogênio (NO_x) e Compostos Orgânicos Voláteis (COV) na presença de luz solar. Ele se acumula principalmente na troposfera, sendo um importante indicador de poluentes fotoquímicos. Já o monóxido de carbono é um gás incolor e inodoro, gerado pela combustão incompleta de carbono em veículos automotores, usinas térmicas e na queima de biomassa (Torres *et al.*, 2020; Lima *et al.*, 2024).

Os óxidos de nitrogênio, como o NO e o NO₂, são liberados pela queima de combustíveis em altas temperaturas, principalmente em motores de combustão e indústrias. E as fontes dos compostos orgânicos voláteis, por fim, incluem materiais sintéticos e naturais, como solventes, tintas, combustíveis e produtos de limpeza, além de móveis e roupas limpas a seco. Eles são liberados pela

combustão em processos industriais, transportes e refinarias, além de serem emitidos naturalmente por plantas (Kolichski; Castilho; Kwano, 2023).

A nível global, a poluição atmosférica se apresenta atualmente como um dos maiores problemas enfrentados pela sociedade tanto de nações desenvolvidas, quanto de países que ainda se encontram em desenvolvimento. Essa situação é problemática uma vez que nas últimas décadas os efeitos negativos da presença de substâncias nocivas têm sido cada vez mais severos em cidades, comunidades e no próprio meio ambiente (Drumm *et al.*, 2014).

Dentre as consequências geradas ao meio ambiente e à humanidade, cita-se como principais questões as alterações ambientais, a exemplo da acidificação de corpos hídricos, os impactos florestais e o aquecimento global, e os malefícios à qualidade de vida das pessoas em virtude do surgimento de problemas respiratórios e circulatórios. Além do mais, esses poluentes também estão associados a fenômenos como a chuva ácida, que prejudica ecossistemas inteiros e acelera a degradação de construções e monumentos históricos (Torres *et al.*, 2020; Moreira *et al.*, 2015).

Além disso, o ozônio na troposfera pode gerar perda de produtividade e redução no crescimento das plantações, afetando diretamente a produção agrícola. Isso resulta em prejuízos financeiros e ameaça à segurança alimentar, uma vez que a queda na produção pode comprometer o abastecimento de alimentos e a estabilidade do setor agrícola (Lima *et al.*, 2024).

MATERIAL E MÉTODOS



A pesquisa foi conduzida por meio de um processo exploratório, de natureza qualitativa, com uso de recursos telemáticos e ênfase na revisão bibliográfica.

Para tanto, a pesquisa de referências utilizou diversas plataformas acadêmicas e fontes confiáveis, bem como a escolha de palavras-chave: poluição atmosférica, impactos da qualidade do ar na saúde humana, gases do efeito estufa, entre outros. Em seguida, estas foram aplicadas em bases de artigos científicos, como *Google Scholar*, SciELO, ScienceDirect e Springer para encontrar artigos técnicos e revisões científicas.

Também foram consultados relatórios de instituições como a Amnesty International e a International Energy Agency, além de publicações técnicas e sites especializados, como TecMundo e Agência Brasil, garantindo uma análise diversificada. Por fim, a metodologia bibliométrica do estudo orientou a busca e seleção de trabalhos que abordassem soluções para a mitigação da poluição atmosférica e dos seus efeitos, com foco nas tecnologias aplicadas à substituição dos combustíveis fósseis.

Problemas econômicos gerados pela poluição do ar

A situação da poluição atmosférica não é algo novo, mas é uma situação em constante estado de mudança e que contribui com a ocorrência de doenças que podem levar à morte, implicando também perdas econômicas à sociedade, o que vem crescendo na mesma velocidade que os níveis de poluição (IHME, 2024).

Conforme dados da UNEP (2022), a poluição do ar mata cerca de 6,7 milhões de pessoas por ano, e conseqüentemente, gera impactos econômicos proporcionais a esse alto número. Nesse contexto, Miraglia e Gouveia (2014), estudo em que foi analisado o impacto econômico da poluição do ar em Regiões Metropolitanas de Agreste, Aracaju, Baixada Santista, Belém, Belo Horizonte, Campina Grande, Campinas, entre outros centros urbanos, aplicando-se a metodologia DALY (*Disability Adjustment Life Years*), pôde-se observar que cerca de 2% do orçamento do Ministério da Saúde.

Os autores ainda destacam que essa proporção é significativa, levando-se em consideração que se avaliou apenas um parcela do território brasileiro e que os gastos com internações, medicamentos e redução da produtividade econômica não foram considerados, observando-se que o impacto obtido foi subestimado (Miraglia; Gouveia, 2014).

Em fevereiro de 2020, o Greenpeace divulgou um relatório destacando que a poluição do ar causa um prejuízo econômico de US\$2,9 trilhões anuais, o que representa cerca de 3,3% do PIB global. Esse impacto é resultado não apenas das mortes prematuras, mas também da exposição à PM2,5 gerada pela queima de

combustíveis fósseis, que é responsável por cerca de 1,8 bilhão de dias de afastamento do trabalho devido a doenças relacionadas à poluição, resultando em uma perda econômica de cerca de US\$ 101 bilhões por ano (Farrow; Miller; Myllyvirta, 2020).

Tabela 1 - Gastos mundiais com as consequências da poluição atmosférica

Poluente	Impacto	Estimativa Central
NO2	Custo Total para a Economia	US\$351 bilhões
	% do PIB	0.4%
O3	Custo Total para a Economia	US\$380 bilhões
	% do PIB	0.4%
PM2.5	Custo Total para a Economia	US\$2.2 trilhões
	% do PIB	2.5%
	Ausências no Trabalho (dias)	1,755,200,000
Custo global de todos os poluentes	Custo Total para a Economia	US\$2.9 trilhões
	% do PIB	3.3%

Fonte: Farrow; Miller; Myllyvirta (2020).

Impactos ambientais e na saúde humana

A poluição atmosférica tem impactos significativos tanto no meio ambiente quanto na saúde humana. No ambiente, os poluentes atmosféricos, como gases tóxicos e materiais particulados contribuem para o aquecimento global, de modo que são comuns os efeitos negativos da intensificação da concentração desses compostos na atmosfera. Um dos graves episódios relacionados à poluição atmosférica foi relatado em 1952, em Londres, em que ocorreu o fenômeno da inversão térmica, com a estagnação de quantidades perigosas de poluentes sobre a cidade durante 3 dias. Como consequência, houve um aumento de cerca de 4 mil mortes em relação à média da época (Corá; Leirião; Miraglia, 2020; Dapper *et al.*, 2016).

Como mais de metade da população do mundo vive nos grandes centros urbanos, a presença desses gases nas cidades tem uma influência ainda mais negativa na saúde da população. Nesse sentido, a poluição do ar é



uma das principais causas de doenças respiratórias e cardiovasculares, de modo que, no Brasil, estima-se que a poluição atmosférica seja responsável por cerca de 20 mil mortes por ano, afetando principalmente crianças e idosos, e indivíduos que já apresentam problemas respiratórios crônicos, ou seja, os mais vulneráveis aos efeitos desses poluentes. Além disso, a poluição do ar tem sido relacionada a um aumento nas hospitalizações por doenças respiratórias e cardiovasculares, especialmente nos centros mais povoados, onde a concentração de poluentes é maior (Corá; Leirião; Miraglia, 2020; Dapper *et al.*, 2016; Fajersztajn; Veras; Saldiva, 2016).

Nesse contexto, ao avaliar os impactos da poluição do ar em Vitória, capital do Espírito Santo no Brasil, no período entre os anos de 2001 e 2006, Freitas *et al.* (2016) constataram a relação entre as internações por doenças respiratórias em crianças e adultos com os poluentes analisados, separados entre PM10 - material particulado menor que 10 μ , dióxido de enxofre - SO₂ e ozônio - O₃. No estudo, observou-se que houve forte correlação entre a ocorrência de doenças respiratórias totais, ou seja, em adultos e crianças e PM10, ao passo que a presença de ozônio no ambiente relacionou-se fortemente com a mortalidade por doenças cardiovasculares.

No Brasil, um grande problema associado à poluição atmosférica está relacionado à fumaça gerada por incêndios em biomas como a Amazônia e o Cerrado. Como apresentado em Brown *et al.* (2019), uma das alterações marcantes no bioma amazônico é justamente a presença de fumaça que vem aumentando nos últimos anos, apresentando implicações na saúde humana em comunidades locais e em todo o ecossistema da região. Nesse contexto, o nível é tão elevado que, segundo reportagens recentes do jornal O Globo, nuvens de fumaça das queimadas tanto do Pantanal quanto da Amazônia alcançaram ao menos 10 estados, afetando cidades no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina (Altino; Dias, 2024).

A poluição do ar desempenha um papel importante no aumento dos níveis de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, como o dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxidos de nitrogênio (NO_x). Esses gases amplificam o efeito estufa, provocando o aquecimento global, o que, por sua vez, desencadeia mudanças climáticas com impactos ambientais severos, como o derretimento de geleiras, a elevação do nível dos oceanos e a intensificação de eventos climáticos extremos (Fiore; Leibensperger, 2015).

Além das doenças respiratórias associadas à poluição do ar, há evidências de uma relação entre a poluição atmosférica e a propagação da COVID-19, conforme indicado por Setti *et al.* (2020). O estudo sugere que as partículas de material particulado presentes no ar podem atuar como veículos para o vírus SARS-CoV-

2, um tipo de coronavírus que causa a doença conhecida como COVID-19, auxiliando na estabilização dos vírus e prolongando sua permanência no ambiente. Esse fenômeno pode ter contribuído para a rápida disseminação da COVID-19, especialmente em regiões com altas concentrações de poluentes, como no norte da Itália.

Impactos da poluição do ar na saúde e necessidade de ações mitigadoras

A poluição do ar representa uma causa significativa de mortes em todo o mundo, com 8,1 milhões de óbitos registrados em 2021. Seu impacto é grave em doenças respiratórias e cardiovasculares, contribuindo para 30% das mortes por infecções respiratórias inferiores, 28% dos óbitos relacionados a doenças cardíacas isquêmicas e 48% das mortes por doenças pulmonares obstrutivas crônicas. A exposição prolongada a partículas finas e outros poluentes compromete severamente a saúde humana, exacerbando condições preexistentes e elevando a mortalidade em diversas regiões globais (IHME, 2024).

Países do sul da Ásia, África e Oriente Médio carregam o maior peso das doenças relacionadas à poluição do ar, devido ao rápido crescimento populacional, industrialização e uso de combustíveis sólidos, que contribuem para os altos níveis de poluição. Estudos do Health Effects Institute, realizados na Europa, Canadá e Estados Unidos, revelaram que até mesmo em áreas com níveis muito baixos de PM_{2.5} (4 μ g/m³ ou menos), ainda ocorrem efeitos adversos à saúde. Atualmente, 99% da população mundial vive em áreas com níveis de poluição atmosférica acima do recomendado, tornando esse problema uma preocupação de saúde pública global que requer soluções urgentes (IHME, 2024).

Dentre as substâncias e compostos responsáveis por poluir a atmosfera, gases e material particulado provenientes principalmente de fontes antrópicas, como a queima em motores de veículos a combustão, atividades industriais e a queima de resíduos sólidos. Assim, são liberados por essas ações gases poluentes como o Dióxido de Carbono (CO₂) e Metano, os quais são prejudiciais à saúde humana e têm influência direta nas alterações climáticas e na temperatura mundial (Moreira *et al.*, 2015; Torres *et al.*, 2020).

A redução dos níveis de poluição atmosférica é crucial para mitigar seus impactos. Estudos sugerem que manter os níveis de poluentes dentro dos limites estabelecidos pela OMS poderia reduzir em até 7% os óbitos anuais relacionados à poluição do ar. No Brasil, especificamente no estado de São Paulo, estima-se que mais de 100 mortes e 250 internações anuais poderiam ser evitadas com a melhoria da qualidade do ar (Wikuats *et al.*, 2023).



Origens e fontes da poluição atmosférica

A poluição atmosférica, embora observada desde a antiguidade, passou a ter proporções alarmantes com a Revolução Industrial, quando o uso intensivo de combustíveis fósseis em motores de combustão interna, a expansão da indústria de siderurgia e a utilização de veículos automotores acarretaram no aumento drástico das emissões de poluentes. Sem um controle inicial sobre esses processos, regiões como o Vale do Meuse, Donora e Londres sofreram graves episódios de poluição no início do século XX, resultando em aumentos significativos de doenças e mortes. Posteriormente, esses eventos estimularam estudos sobre a poluição do ar e levaram à criação de padrões de qualidade para proteger a saúde pública (Cançado *et al.*, 2006; Dapper *et al.*, 2016).

Com o avanço da industrialização e o uso intensificado de carvão e outros combustíveis fósseis, a poluição do ar se consolidou como um problema global significativo, com impactos profundos na saúde humana (Tabela 2), afetando também o meio ambiente, a economia, diminuindo a qualidade do ar que respiramos, poluindo recursos hídricos através da deposição de poluentes, degradando o solo e prejudicando a flora e fauna (Who, 2021; Bahrami *et al.*, 2018).

Tabela 2 - Principais poluentes atmosféricos: fontes e problemas acarretados.

Poluente	Origem	Problemas na saúde
MP	Combustíveis fósseis; agricultura	Irritação das mucosas; Inflamação pulmonar
O ₃	Combustíveis fósseis; volatilização de combustíveis; agricultura e pecuária	Irritação de mucosas; lesão das vias aéreas;
SO ₂	Vulcões; combustíveis fósseis;	Irritação de mucosas e das vias aéreas;
CO	Combustão incompleta em veículos e indústrias	Interfere no transporte de oxigênio no sangue, causando hipóxia e problemas cardíacos
NO _x	Queima de combustíveis em altas temperaturas	Irritação do sistema respiratório
COV	Combustão em processos industriais,	Irritação nas vias respiratórias, aumenta o risco de

transportes e refinarias

câncer e prejudica os pulmões, o sistema nervoso central, os rins e o fígado.

Fonte: Kolicheski; Castilho; Kwano (2023); Lima *et al.* (2024); Torres *et al.* (2020).

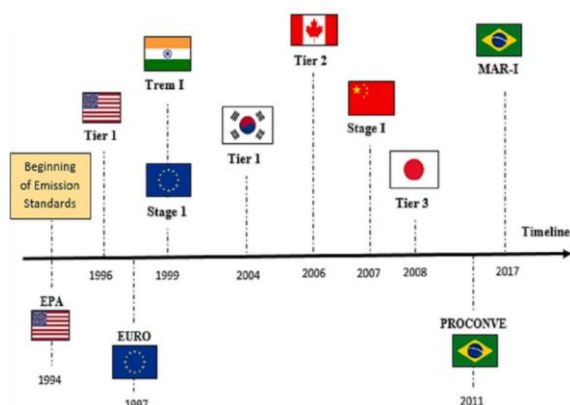
As fontes de poluição do ar podem ser tanto naturais quanto antropogênicas. Entre as fontes naturais, destacam-se erupções vulcânicas e queimadas acidentais de biomassa, como incêndios florestais. No entanto, as atividades humanas, especialmente a queima de combustíveis fósseis em motores a combustão e indústrias, são as maiores responsáveis pela poluição atmosférica. Poluentes como dióxido de enxofre, óxidos de nitrogênio e partículas finas prejudicam gravemente a saúde, causando doenças respiratórias e cardiovasculares. Embora políticas de controle da poluição estejam em vigor em muitos países, o equilíbrio entre desenvolvimento econômico e preservação ambiental continua sendo um grande desafio (Afghan; Patidar, 2020; Couto; Corte; Araujo, 2018; Cançado *et al.*, 2006).

Soluções para resolver o problema

Uma vez que um dos principais fatores da poluição atmosférica está relacionado às atividades em que há uso de motores ou equipamentos movidos a combustão interna, acarretando no aumento da emissão dos gases do efeito estufa, algumas das ações e tecnologias para mitigar o problema estão ligados justamente à redução das emissões dessas atividades (Silveira *et al.*, 2021; Silveira *et al.*, 2022).

Neste escopo, observa-se que a atividade agrícola é uma das principais fontes de emissão de gases do efeito estufa a nível global (Vetter *et al.*, 2017; Silveira *et al.*, 2021), uma vez que são muito utilizados tratores e outros equipamentos movidos à combustão. Assim, um dos aspectos apontados recai sobre a ação governamental dos países, a exemplo dos programas de regulação de emissões por máquinas agrícolas, como o PROCONVE no Brasil, Tier3 no Japão, Stage5 na União Europeia, entre outros mostrados na Figura 1 (Schlosser *et al.*, 2020; Silveira *et al.*, 2022).

Figura 1 - Primeiros programas de regulação de emissões por máquinas agrícolas.



Fonte: Silveira *et al.* (2021).

A execução de políticas públicas que funcionam tem sido uma estratégia-chave. Estudos sobre o efeito de políticas em cidades chinesas mostram que a adoção de regulamentação mais severa para as emissões industriais e veiculares, combinadas com incentivos econômicos e penalidades, faz acelerar a transição para tecnologias mais limpas (Qian *et al.*, 2021).

Desse modo, ao definirem padrões de emissão cada vez mais rígidos, esses programas regulatórios têm trazido avanços às máquinas industriais, como o desenvolvimento de tecnologias de pós-tratamento de gases de escape, melhorando o controle de emissão de gases poluentes (Silveira *et al.*, 2022).

Assim, como apresentado em Dallmann e Shao (2020) e em Silveira *et al.* (2022), pode-se dividir essas estratégias de pós-tratamento em primário e secundário, conforme as limitações de emissão definida para cada classe de equipamento. As medidas de prevenção primária incluem a adoção de combustíveis alternativos em substituição aos combustíveis fósseis. E as medidas secundárias consistem na implementação de novas abordagens tecnológicas criadas para controlar os poluentes emitidos por motores a diesel.

Dentre as medidas primárias, observa-se que os biocombustíveis utilizados em substituição total ou parcial aos combustíveis fósseis são derivados de biomassa renovável, e que podem ser aplicados em motores de combustão interna ou outra forma de geração de energia. No Brasil, o biodiesel usado provém de óleos vegetais ou de gordura animal (Tavares, 2022).

A maior vantagem desses biocombustíveis diz respeito justamente à menor emissão de agentes poluentes da atmosfera em relação aos combustíveis tradicionais. Em termos numéricos, o biodiesel tem a vantagem de emitir cerca de 48% menos monóxido de carbono (CO), 47 % menos material particulado (MP) e 67% menos hidrocarbonetos quando comparado ao diesel convencional (Pinheiro, 2020).

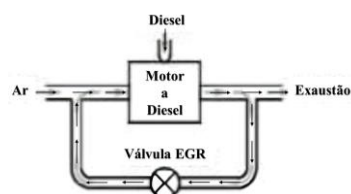
Por sua vez, no que diz respeito às medidas secundárias, observa-se que pode haver controle da emissão dos poluentes através de modificações e tecnologias aplicadas aos cilindros de motores e no pós-tratamento de gases da exaustão. Assim, pode-se obter melhores resultados de emissões através de novos sistemas de injeção de combustível ou por meio de novas geometria nos cilindros, produzindo uma mistura de ar e combustível mais homogênea (Dallmann; Menos, 2016).

Desse modo, as principais introduções aplicadas em máquinas agrícolas são: Redução Catalítica Seletiva (SCR - *Selective Catalytic Reduction*) e Recirculação de Gases de Escape (EGR - *Exhaust Gas Recirculation*) para controle de emissão de NO_x; Filtro de Partículas de Diesel (DPF - *Diesel Particulate Filter*) para controle de material particulado; e os sistemas de injeção eletrônica de combustível, responsáveis por reduzir significativamente os gases emitidos (Krogerus *et al.*, 2016); Silveira *et al.*, 2022).

Em relação aos Sistemas de Redução Catalítica Seletiva, observa-se que ele é caracterizado por transformar os NO_x emitidos em N₂ e vapor de água. Para isso, aplica-se um catalisador com uma solução de água e ureia para aumentar a eficiência da combustão. A amônia presente na ureia, quando em contato com os gases de exaustão no conversor catalítico, ativa a reação química e reduz o nível de NO_x emitidos (Guan *et al.*, 2014).

Por sua vez, observa-se que a técnica da Recirculação de Gases de Escape tem a sua operação caracterizada pela recirculação dos gases de escape para dentro do motor, através de uma válvula específica para este sistema, conforme mostrado na figura 2.

Figura 2 - Recirculação dos gases de escape.



Fonte: Nagargoje; Kolhe; Ragit (2016).

Assim, esses gases reintroduzidos no sistema são aspirados para a câmara de combustão pelos cilindros, de modo que o volume do cilindro ocupado pelos gases de escape faz com que haja o resfriamento do volume de oxigênio presente nos óxidos de nitrogênio. Com a consequente diminuição de oxigênio apto para o processo, a combustão passa a ocorrer a temperaturas menores, reduzindo a emissão de NO_x e outros poluentes (Nagargoje; Kolhe; Ragit, 2016).

Paralelamente, o investimento em energias renováveis aparece como uma solução. A substituição de



combustíveis fósseis por energias limpas, como solar e eólica, e o uso de biocombustíveis, podem ter um potencial para reduzir, drasticamente, as emissões de poluentes atmosféricos, evitando até 4 milhões de mortes, anualmente, até 2030 (Gielen *et al.*, 2019).

Os Biocombustíveis

Atualmente, apesar da crescente preocupação com os efeitos e as consequências do uso dos combustíveis derivados de petróleo no clima e na poluição atmosférica, o mundo permanece dependente do uso dessa fonte de energia para as mais diversas atividades e nos mais diversos setores (Vidal, 2019).

Nesse contexto, por apresentarem baixo teor de enxofre e compostos aromáticos, observa-se que os biocombustíveis surgem como uma opção promissora na produção de energia sustentável, auxiliando significativamente na redução da emissão de gases que contribuem para os problemas de poluição atmosférica, a exemplo do efeito estufa. Assim, para incentivar o seu uso, planos de energia renovável com metas obrigatórias vêm sendo aplicadas em diversos países (Duarte *et al.*, 2022; González-González *et al.*, 2018).

Associado a isso, conforme apresentado por Vidal (2019), no que diz respeito ao uso dos combustíveis verdes, ou biocombustíveis, o Brasil ocupa o papel de destaque no cenário mundial, especialmente quando observamos o etanol produzido a partir da cana-de-açúcar, e o biodiesel derivado de óleos vegetais e de gorduras animais. Por sua vez, a nível mundial, os principais mercados, além do Brasil, em que há maior utilização dos biocombustíveis são: a União Europeia, os Estados Unidos, a China, a Argentina e a Indonésia.

Ao longo das últimas quatro décadas, apesar das discussões sobre as emissões de gases de efeito estufa (GEE), as emissões atmosféricas não apresentaram redução significativa. Desde 1990, elas aumentam a uma taxa de 2% ao ano, principalmente devido à industrialização crescente dos países em desenvolvimento, o que torna impossível a redução sem a participação desses países. O Acordo de Paris, firmado em 2015 durante a COP 21, se destaca por envolver todos os países da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança Climática (UNFCCC), com responsabilidades legais nas Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs). No setor de transporte, Brasil e EUA comprometeram-se a aumentar a utilização de biocombustíveis, com políticas públicas voltadas para atrair investimentos e inovação tecnológica, visando a redução das emissões associadas aos combustíveis fósseis (FAZZI, 2020).

A Lei nº 11.097/2005, promulgada em 13 de janeiro de 2005, marcou a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira, definindo-o como biocombustível derivado de biomassa renovável,

capaz de substituir total ou parcialmente combustíveis fósseis. A lei também atribuiu à ANP a responsabilidade de regular, contratar e fiscalizar as atividades relacionadas à indústria do biodiesel, alterando marcos legais anteriores, como as leis do Petróleo, de Penalidades e da CIDE (ANP, 2024)

Em 2004, o governo lançou o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB), visando incluir o biodiesel na matriz energética brasileira com foco na inclusão social e no desenvolvimento regional. O programa estabeleceu a base normativa para produção e comercialização do biodiesel, incluindo um modelo tributário e mecanismos como o Selo Combustível Social (atual Selo Biocombustível Social), para integrar a agricultura familiar. Suas diretrizes priorizaram inclusão social, aproveitamento regional de oleaginosas, segurança de abastecimento, qualidade do produto e competitividade em relação ao diesel fóssil (ANP, 2024)

O biodiesel, inserido na matriz energética brasileira, possui, atualmente, três usos principais:

1. Atendimento à mistura obrigatória (mandato) de biodiesel ao óleo diesel fóssil;
2. Realização de mistura voluntária ao óleo diesel fóssil; e
3. Uso experimental.

Dados de uso dos combustíveis verdes

Dentre as alternativas aos combustíveis fósseis, recentemente tem ganhado notoriedade o bioquerosene, Biocombustíveis de Aviação Sustentável (SAF), sendo uma alternativa promissora para reduzir as emissões de gases de efeito estufa no setor de aviação, com o Brasil possuindo grande potencial devido à sua abundante biomassa, como o bagaço de cana e resíduos agrícolas. Essa solução está alinhada com as metas da Associação Internacional de Transporte Aéreo (IATA) de reduzir as emissões líquidas da aviação em 50% até 2050 (Milanez *et al.*, 2021).

Atualmente, o uso do SAF na indústria aérea ainda está em estágios iniciais, mas está crescendo de forma significativa. Em 2023, a produção de SAF atingiu 600 milhões de litros, representando cerca de 3% de todos os combustíveis renováveis produzidos globalmente (IATA, 2023).

Além disso, a DHL utilizou biodiesel em uma de suas iniciativas mais recentes, com uma frota de 18 caminhões movidos por HVO100 (óleo vegetal hidrogenado), um tipo de diesel renovável, para atender os eventos da Fórmula 1 na temporada de 2023. Esses caminhões ajudam a reduzir as emissões de carbono em pelo menos 60% em comparação com o combustível convencional. Eles são capazes de transportar até 40 toneladas e percorrer até 3.500 km por tanque de 1.000 litros. Esse projeto faz parte do



compromisso da DHL e da Fórmula 1 em reduzir a pegada de carbono e alcançar a neutralidade de emissões até 2030 (Biofuels international, 2023).

Programas de incentivo

Os programas de incentivo aos biocombustíveis têm importância fundamental para o desenvolvimento sustentável, pois promovem uma transição energética capaz de mitigar os impactos ambientais do uso de combustíveis fósseis. Esses programas estão alinhados com os objetivos globais de redução das emissões de gases de efeito estufa, combatendo as mudanças climáticas e fortalecendo a economia verde. Além disso, ao estimular a produção e o consumo de fontes renováveis, como o etanol e o biodiesel, geram oportunidades econômicas, sobretudo em áreas rurais, incentivando o agronegócio sustentável e promovendo inclusão social (MME, 2024).

Pesquisas apontam que os biocombustíveis apresentam menor impacto ambiental em seu ciclo de vida quando comparados aos combustíveis fósseis, contribuindo significativamente para a neutralização de carbono e a redução da dependência de petróleo em cenários globais de crise energética. Essas iniciativas também promovem o avanço científico e tecnológico, dado que tecnologias mais eficientes são desenvolvidas para melhorar a conversão da biomassa em energia renovável (Milanez *et al.*, 2021).

Essa abordagem integrada, além de diversificar a matriz energética, possibilita que os países em desenvolvimento, como o Brasil, assumam papel de liderança no fornecimento de energia limpa ao mercado global, ao mesmo tempo em que enfrentam desafios como o equilíbrio entre a produção de alimentos e energia (Cardoso *et al.*, 2020).

Programas de incentivo ao uso de biocombustíveis no Brasil, como o RenovaBio e o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB), têm desempenhado um papel central na transição energética e na mitigação das emissões de gases de efeito estufa. O RenovaBio, por exemplo, introduziu os Créditos de Descarbonização (CBIOS), que são negociados na bolsa brasileira e vinculados à produção e comercialização de biocombustíveis. Em 2023, o programa contribuiu para evitar a emissão de cerca de 37 milhões de toneladas de CO₂ equivalente, alinhando-se às metas climáticas do Brasil e promovendo uma matriz energética mais limpa e diversificada (MME, 2024).

O PNPB, por sua vez, atua na mistura obrigatória de biodiesel ao diesel fóssil, atualmente em 14% (B14), com previsão de aumento para 15% (B15) em 2025. Esse avanço visa reduzir emissões e a dependência de combustíveis fósseis, além de gerar impactos positivos na economia nacional, como uma economia estimada de R\$7,2 bilhões com a importação de diesel e a

inclusão de agricultores familiares na cadeia produtiva. As mudanças recentes no Selo Biocombustível Social fortaleceram ainda mais a participação da agricultura familiar e a promoção de uma economia resiliente, especialmente nas regiões Norte e Nordeste do país (MME, 2024; Séca, 2020).

Essas iniciativas têm gerado efeitos positivos em diversas áreas. Por exemplo, o RenovaBio incentiva tanto os produtores quanto os distribuidores de biocombustíveis ao criar um mercado de CBIOS, que monetiza os esforços de descarbonização e promove a competitividade desses combustíveis. Ao mesmo tempo, o PNPB fomenta a produção nacional de biodiesel, consolidando o papel estratégico do Brasil na transição energética global (Séca, 2020; MME, 2024).

Nos Estados Unidos foi criado o Renewable Fuel Standard (RFS) no qual foi estabelecido pela Lei de Energia de 2005 e ampliado pela Lei de Independência e Segurança Energética de 2007. O programa exige que os produtores de combustível nos Estados Unidos usem quantidades mínimas de combustíveis renováveis, incluindo etanol e biodiesel, em sua produção. Esse programa também define metas anuais de mistura de biocombustíveis nos combustíveis convencionais e estimula a inovação no setor, com o incentivo à pesquisa de biocombustíveis de segunda e terceira geração (EPA, 2024).

Além disso, o International Bioenergy Partnership (IBEP) é uma iniciativa internacional que visa promover o uso sustentável da bioenergia, incluindo biocombustíveis, com foco em políticas públicas, troca de informações e boas práticas entre os países. Embora o IBEP seja uma colaboração entre diversos países e organizações, ele tem um enfoque específico na bioenergia como uma solução sustentável para questões energéticas e ambientais globais. Desempenha um papel importante no avanço da bioenergia como uma solução global para a crise climática. Ele oferece uma plataforma para a cooperação internacional, ajudando os países a atingir suas metas de redução de emissões de gases de efeito estufa e a transitar para fontes de energia renovável (FAO, 2024).

Esses resultados são respaldados por uma análise regulatória e econômica detalhada, que demonstra a viabilidade técnica e os benefícios ambientais e sociais dessas políticas. No entanto, desafios como a dependência de preços de mercado e o impacto de crises externas, como a pandemia de COVID-19, continuam a influenciar a efetividade e a expansão dessas políticas (Séca, 2020; MME, 2024).

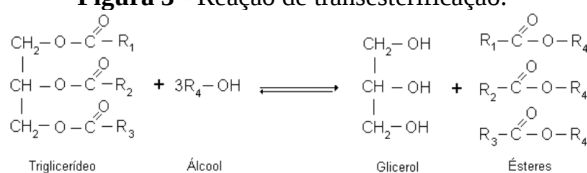
Processos de produção

No que diz respeito à produção, dentre os métodos aplicados para a obtenção do biodiesel, a técnica mais

comumente aplicada é a reação de transesterificação, uma vez que essa prática ainda é o mais econômico e o de maior rendimento, apesar dos avanços técnico-científicos no ramo ocorrido nas últimas décadas (Duarte *et al*, 2022; Ong *et al*, 2021).

A transesterificação (Figura 3) consiste na reação química em que os óleos e gorduras reagem, na presença de um catalisador, com o álcool, usualmente metanol ou etanol, gerando como produto ésteres (biodiesel) e glicerol (Duarte *et al*, 2022).

Figura 3 - Reação de transesterificação.



Fonte: Araújo (2008).

Esse processo de obtenção do biodiesel sofre efeitos de variações ocasionadas por alguns fatores. Dentre os principais, Araújo (2008) e Cardoso *et al* (2020) citam como principais o tipo de álcool usado, as proporções álcool-gordura, o tipo específico e a quantidade de catalisador, o tempo de agitação da mistura, a temperatura e o tempo para que a reação se processe.

Além disso, observa-se que a transesterificação pode se realizar em meio ácido e em meio básico. Entretanto, o processo ocorre mais rapidamente quando na presença de um catalisador básico, além de apresentar menores problemas de corrosão de equipamentos quando se dá no processo alcalino. Assim, as substâncias mais eficientes e utilizadas são o hidróxido de potássio (KOH) e o hidróxido de sódio (NaOH) (Cardoso *et al*, 2020).

Em relação ao álcool utilizado, Araújo (2008) destaca que apenas álcoois simples, como metanol, etanol, propanol butanol e álcool amílico podem ser utilizados, sendo os dois primeiros os mais comumente aplicados no processo de obtenção do biodiesel. Entretanto, observa-se que ao metanol cabe às vantagens econômicas, uma vez que, quando comparado ao etanol, ele é mais barato, é isento de água e possui uma maior polaridade, o que facilita a separação entre ésteres (biodiesel) e o glicerol.

Apesar disso, cuidados devem ser tomados durante a utilização do metanol, uma vez que esta substância é facilmente absorvida pela pele e gera efeitos neurotóxicos, como a cegueira permanente (Cardoso *et al*, 2020).

Como apresentado por Encarnação (2008), outra possibilidade de produção biodiesel consiste na esterificação, a qual consiste na obtenção de ésteres, partindo-se dos reagentes álcool e ácido graxo, em substituição aos triglicerídeos, com obtenção da água como subproduto. Como benefícios, a esterificação

apresenta a possibilidade de matérias primas de baixo valor associados, borras ácidas, óleos com elevado índice de acidez e não forma glicerol.

CONCLUSÃO

A poluição atmosférica representa um dos desafios mais críticos enfrentados pela sociedade contemporânea, impactando severamente a saúde humana, o meio ambiente e a economia global. A crescente dependência de combustíveis fósseis, impulsionada pela industrialização e pelo aumento da mobilidade urbana, tem promovido a emissão de poluentes que agravam problemas respiratórios, cardiovasculares e climáticos. A evidência acumulada na literatura demonstra a urgência de medidas eficazes para mitigar esses efeitos nocivos.

Neste contexto, os biocombustíveis emergem como uma alternativa viável e sustentável. Sua capacidade de reduzir as emissões de gases poluentes e sua proveniência renovável representam uma oportunidade significativa para a transição energética necessária em todo o mundo. Políticas públicas que incentivem a produção e o uso de biocombustíveis, como o RenovaBio e o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel no Brasil, são fundamentais para promover essa transformação.

Ademais, é essencial que os países, especialmente aqueles em desenvolvimento, integrem estratégias que equilibrem crescimento econômico e preservação ambiental. A adoção de tecnologias limpas e a implementação de regulamentações rigorosas são passos cruciais para alcançar um futuro mais sustentável. Com a colaboração entre governos, indústrias e sociedade civil, é possível não apenas mitigar os impactos da poluição atmosférica, mas também promover um desenvolvimento que respeite o meio ambiente e assegure a saúde das futuras gerações. Portanto, a transição dos combustíveis fósseis para biocombustíveis não deve ser vista apenas como uma necessidade, mas como um imperativo moral e ambiental que pode reverter o quadro alarmante da poluição atmosférica global.

REFERÊNCIAS

- AFGHAN, F. R.; PATIDAR, S. K. Health impacts assessment due to PM2.5, PM10 and NO2 exposure in National Capital Territory (NCT) Delhi. **Pollution**, v. 6, n. 1, p. 115–126, 2020.
- ALTINO, L.; DIAS, P. Fumaça de queimadas na Amazônia e no Pantanal chega ao Rio, São Paulo e a mais oito estados. O Globo, 19 de agosto de 2024. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/brasil/noticia/2024/08/19/fumaca-de-queimadas-na-amazonia-e-no-pantanal-chega-ao-rio-sao-paulo-e-a-mais-oito-estados.ghtml>. Acesso em: 24 set. 2024.



AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS: ANP, 2024. Disponível em: <https://www.anp.gov.br>. Acesso em 27/11/2024.

ARDOIN, Nicole M.; BOWERS, Alison W.; GAILLARD, Estelle. **Environmental education outcomes for conservation: A systematic review**. Biological conservation, v. 241, p. 108224, 2020.

ARAÚJO, G. S. **Produção de biodiesel a partir de óleo de coco (Cocos nucifera L.)**. 2008. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2008.

BAHRAMI ASL, F.; LEILI, M.; VAZIRI, Y; ARIAN, S. S.; CRISTALDI, A.; CONTI, G. O.; FERRANTE, M. Health impacts quantification of ambient air pollutants using AirQ model approach in Hamadan, Iran. **Environmental Research**, v. 161, n. October 2017, p. 114– 121, 2018.

BIOFUELS INTERNATIONAL. **DHL launches first truck fleet powered by biofuel at Formula 1 events**. 2023. Disponível em: <https://biofuels-news.com/news/dhl-launches-first-truck-fleet-powered-by-biofuel-at-formula-1-events/>. Acesso em: 9 dez. 2024.

BROWN, I. F.; DUARTE, A. F.; TORRES, M.; ASCORRA, C.; RIOJA-BALLIVIÁN, J. F. R. G.; REIS, V.; MELO, W. F.; SILVA, S.; ACHO, C. Monitoramento de fumaça em tempo real mediante sensores de baixo custo instalados na Amazônia Sul-Occidental. **Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, São José dos Campos, p. 2658-2661, 2019.

BUI, M. et al. Carbon capture and storage (CCS): the way forward. **Energy & Environmental Science**, v. 11, n. 5, p. 1062-1176, 2018.

CANÇADO, J. E. D.; BRAGA, A.; PEREIRA, L. A. A.; ARBEX, M. A.; SALDIVA, P. H. N.; SANTOS, U. P. Repercussões clínicas da exposição à poluição atmosférica. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, v. 32, n. 4, p. 322-332, 2006.

CARDOSO, T. S. SANTOS, R. A.; COSTA, R. T. T.; AVIZ, E.. O.; ARAÚJO, J. F.; SILVA, A. P.; FREITAS, M. C. C.; CORREIA, L. M. Uma revisão da utilização de catalisadores heterogêneos para a produção de biodiesel. **Brazilian Applied Science Review**, v. 4, n. 1, p. 240-276, 2020. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BASR/article/view/6859/7042>. Acesso em: 27 nov. 2024.

CETESB. Relatório de emissões veiculares no estado de São Paulo. 2020. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/wp-content/uploads/sites/6/2022/03/Relatorio-Emissoes-Veiculares-2020.pdf>. Acesso em: 17 de set. 2024;.

CORÁ, B.; LEIRIÃO, L. F. L.; MIRAGLIA, S. G. E. K. Impact of Air Pollution on Public Health in High Industrialized Municipalities in the State of São Paulo. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, Rio de Janeiro, v. 55, n. 4, p. 498–509, 2020.

COUTO, M. M.; CORTE, F. D.; ARAUJO, E. L. Estudo sobre a poluição atmosférica na cidade de João Monlevade, Minas Gerais. **FACIG**, n. 4, 2018.

DALLMANN, T.; MENON, A. Technology pathways for diesel engines used in non-road vehicles and equipment. **The International Council on Clean Transportation (ICCT)**, 2016.

DALLMANN, T.; SHAO, Z. Evaluation of emission-control scenarios for agricultural tractors and construction equipment in India. **The International Council on Clean Transportation (ICCT)**, 2016.

DAPPER, S. N.; SPOHR, C.; ZANINI, R. R. Poluição do ar como fator de risco para a saúde: uma revisão sistemática no estado de São Paulo. **Estudos Avançados**, v.30, n.86, p.83-97, 2016.

DRUMM, F. C.; GERHARDT, A. E.; FERNANDES, G. D.; CHAGAS, P.; SUCOLOTTI, M. S.; KEMERICH, P. D. C.. Poluição atmosférica proveniente da queima de combustíveis derivados do petróleo em veículos automotores. **REGET**, v.18, n.1, p.66-78, 2014.

DUARTE, V. H. VALENTINI, M. H. K.; SANTOS, G. B.; NADALETTI, W. C.; VIEIRA, B. Biocombustíveis: uma revisão sobre o panorama histórico, produção e aplicações do biodiesel. **Meio Ambiente (Brasil)**, v. 4, n. 2, 2022. Disponível em: <https://www.meioambientebrasil.com.br/index.php/MABR-A/article/view/185>. Acesso em: 27 nov, 2024.

Estado de São Paulo. **Automóveis são a principal fonte de emissão de gases poluentes**. Summit Mobilidade, 16 de fevereiro de 2023. Disponível em: <https://summitmobilidade.estadao.com.br/ir-e-vir-no-mundo/automoveis-sao-a-principal-fonte-de-emissao-de-gases-poluentes/>. Acesso em: 17 set. 2024.

ENCARNAÇÃO, A. P. G. **Geração de biodiesel pelos processos de transesterificação e hidroesterificação, uma avaliação econômica**. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p. 164, 2008.

EPA -U.S. Environmental Protection Agency. **Overview of the Renewable Fuel Standard program**. Disponível em: <https://www.epa.gov/renewable-fuel-standard-program/overview-renewable-fuel-standard-program>. Acesso em: 11 nov. 2024.

FAJERSZTAJN, L.; VERAS, M.; SALDIVA, P. H. N. Como as cidades podem favorecer ou dificultar a promoção da saúde de seus moradores?. **Estudos Avançados**, v. 30, n. 86, p. 07-27, 2016.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. "Home Page." **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. Disponível em: <https://www.fao.org>. Acesso em: 11 nov. 2024.

FARROW, A.; MILLER, K. A.; MYLLYVIRTA, L. Toxic air: the price of fossil fuels. Seoul: **Greenpeace Southeast Asia**, p. 9, 2020. Disponível em: <https://www.greenpeace.org/static/planet4-southeastasia-stateless/2020/02/21b480fa-toxic-air-report-110220.pdf>. Acesso em: 6 nov.. 2024.

FAZZI, Luiz Ricardo et al. A regulação de biocombustíveis no Brasil e nos EUA no contexto da mitigação das mudanças climáticas e do correlato Acordo de Paris. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 9, n. esp, p. 104-119, 2020. Disponível em:



<https://doi.org/10.19177/rgsa.v9e02020104-119>. Acesso em: 27 nov. 2024.

Fiore, AM, Naik, V., & Leibensperger, EM (2015). Qualidade do ar e conexões climáticas. **Journal of the Air & Waste Management Association**, 65 (6), 645–685.

FREITAS, C. U.; LEON, A. P.; JUGER, W.; GOUVEIA, N. Poluição do ar e impactos na saúde em Vitória, Espírito Santo. **Revista de Saúde Pública**, São Paulo, v.50, n.4, 2016.

FREITAS, Stefani Gabrieli Dias et al. Produção de biodiesel a partir do óleo de soja, milho, girassol e canola por transesterificação: uma revisão sistemática. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 5, p. e33411527167-e33411527167, 2022.

GILES-CORTI, Billie et al. What next? Expanding our view of city planning and global health, and implementing and monitoring evidence-informed policy. **The Lancet global health**, v. 10, n. 6, p. e919-e926, 2022.

GIELEN, D. et al. The role of renewable energy in the global energy transformation. **Energy Strategy Reviews**, v. 24, p. 38-50, 2019.

GONZÁLEZ-GONZÁLEZ, L. M.; CORREA, D. F.; RYAN, S.; JENSEN, P. D.; STEVEN, P.; SCHENK, P. M. Integrated biodiesel and biogas production from microalgae: Towards a sustainable closed loop through nutrient recycling. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 1137-1148, 2018. Acesso em: 27 nov. 2024.

GUIMARÃES, P. R. B.; BERGER, R.; PEREZ, F. L.; PIRES, P. T. R. **Estudo Sobre As Relações Entre As Doenças Respiratórias E A Poluição Atmosférica E Variáveis Climáticas, Na Cidade De Curitiba, Paraná, Brasil**. Tese apresentada ao Curso de Pós graduação em Engenharia Florestal, UFP- CURITIBA, 2011.

GUAN, B.; ZHAN, R.; LIN, HE.; HUANG, Z. Review of state of the art technologies of selective catalytic reduction of NOx from diesel engine exhaust. **Applied Thermal Engineering**. Elsevier Ltd, 2014.

GUO, X.; WU, H.; CHEN, D.; YE, Z.; SHEN, Y.; LIU, J.; CHENG, S. Estimation and prediction of pollutant emissions from agricultural and construction diesel machinery in the BeijingTianjin-Hebei (BTH) region, China. **Environmental Pollution**, v. 260, 2020.

IATA. SAF Production to Triple in 2024 but More Opportunities for Diversification Needed. **International Air Transport Association**. 2023. Disponível em: <https://www.iata.org/en/pressroom/2023-releases/2023-12-06-02/>. Acesso em: 9 nov. 2024.

IHME - INSTITUTE FOR HEALTH METRICS AND EVALUATION. **State of Global Air 2024 Report**. Special Report, 2024. Disponível em: <https://www.healthdata.org/sites/default/files/2024-06/soga-2024-report.pdf>. Acesso em: 16 set. 2024.

KOLICHESKI, M. B.; CASTILHO, J. A.; KAWANO, M. Tanques de armazenamento de combustíveis: critérios de projeto visando a redução de emissões de compostos orgânicos voláteis (COV). **Revista Gestão E Desenvolvimento**, v. 20, n. 1, p. 54 - 76, 2023.

KROGERUS, T. R.; HYVÖNEN, M. P.; HUHTALA, K. J. A survey of analysis, modeling, and diagnostics of diesel fuel injection systems. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, v. 138, n. 8, p. 081501, 2016.

LIMA, R. C.; MARIANO, G. L.; DA COSTA, F. L. N.; CARVALHO, M. N. Uso de sistema de modelagem atmosférica na identificação de possíveis fontes de poluição. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 20, n. 3, 2024.

MARTINS, A. P. G.; RIBEIRO, A. O.; FERREIRA, M. L.; MARTINS, M. A. G.; NEGRI, EM M.; SCAPIN, M. A.; OLIVEIRA, A.; SAIKI, M.; SALDIVA, P. H. N.; LAFORTEZZA, R. Infraestrutura verde para monitorar e minimizar os impactos da poluição atmosférica. **Estudos Avançados**, v. 35, p. 31-57, 2021.

MENDES, A.; COSTA, S.; FERREIRA, J.; LEITÃO, J.; TORRES, P.; SILVEIRA, C.; RELVAS, H.; LOPES, M.; MONTEIRO, A.; ROEBELING, P.; MIRANDA, A. I.; TEIXEIRA, J. P.. Impactos da poluição atmosférica na Saúde: perspectivas do projeto FUTURAR. **Boletim Epidemiológico Observações**, v.6, n.9, p.11-46-50, 2017.

MILANEZ, A. Y.; MAIA, G. B. S.; GUIMARÃES, D. D.; FERREIRA, C. L. A. Biocombustíveis de Aviação no Brasil: uma agenda de sustentabilidade. **Revista BNDES**, v. 28, n. 56, p. 361-398, 2021.

MIRAGLIA, S. G. E. K.; GOUVEIA, N.. Custos da poluição atmosférica nas regiões metropolitanas brasileiras. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 19, p. 4141-4147, 2014.

Ministério de Minas e Energia (MME). **Políticas públicas de incentivo à bioenergia**. Disponível em: gov.br. Acesso em: 10 dez. 2024.

MOREIRA, J. K. R.; LIMA, A. C. M.; CARDOSO, B. A.; VINAGRE, M. V. A. Avaliação da Qualidade do Ar Através de Parâmetros Biológicos e Visuais nos Bairros de São Brás, Nazaré e Cidade Velha, Belém (PA). **Educação Ambiental em Ação**, v.53, p.1-16, 2015.

NAGARGOJE, G.A.; KOLHE, K. P.; RAGIT, S.S. Effect of exhaust gas recirculation (EGR) on C.I. engine performance and emission - A review. **Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR)**, v. 3, n. 6, p. 14-18, 2016.

ONG, H. C., TIONG, Y. W., GOH, B. H. H., GAN, Y. Y., MOFIJUR, M., FATTAH, I. M. R., CHONG, C. T., ALAM, M. A., LEE, H. V., SILITONGA, A. S., Recent advances in biodiesel production from agricultural products and microalgae using ionic liquids: Opportunities and challenges. **Energy Conversion and Management**, v. 228, p. 113647, 2021.

OPAS; OMS. Organização Pan-Americana de Saúde e Organização Mundial da Saúde. Nove em cada dez pessoas em todo o mundo respiram ar poluído, 2019.

PINHEIRO, M. B. C. **Previsão da produção de fontes renováveis e não renováveis selecionadas da matriz energética brasileira**. 2020. Dissertação (Mestrado em Agronomia Rural) - Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, p. 78. 2020.



QIAN, Haoqi et al. Air pollution reduction and climate co-benefits in China's industries. **Nature Sustainability**, v. 4, n. 5, p. 417-425, 2021.

SÉCA, Cátia Sofia Carvalho. Produção e utilização de biocombustíveis no Brasil: desafios e perspectivas. 2020.

SETTI, L.; PASSARINI, F.; GENNARO, G.; GILIO, A. Di.; PALMISANI, J.; BUONO, P.; FORNARI, G.; PERRONE, M. G.; PIAZZALUNGA, A.; BARBIERI, P.; RIZZO, E.; MIANI, A. **Potential role of particulate matter in the spreading of COVID-19 in Northern Italy: first observational study based on initial epidemic diffusion.** **BMJ Open**, v. 10, 2020.

SILVEIRA, F.; MACHADO, F. M.; FARIASS, M. S.; SCHLOSSER, J. F. Fuel consumption by agricultural machinery: a review of pollutant emission control technologies. **Ciência Rural**, v. 53, n. 5, p. e20220029, 2022.

SILVEIRA, F.; RUPPENTHAL, J. E.; LERMEN, F. H.; MACHADO, F. M.; AMARAL, F. G. Technologies used in agricultural machinery engines that contribute to the reduction of atmospheric emissions: A patent analysis in Brazil. **World Patent Information**, v. 64, p. 102023, 2021.

SCHLOSSER, J. F.; FARIAS, M. S.; BERTOLLO, G. M.; RUSSINI, A.; HERZOG, D.; CASALI, L. Agricultural tractor engines from the perspective of Agriculture 4.0. **Revista Ciência Agronômica**, v. 51, n. spe, p. e20207716, 2020.

TAVARES, M. S. **Desempenho de trator agrícola em função das proporções de mistura e tipo de biodiesel.** Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista. Jaboticabal, p. 65. 2022.

TORRES, L. M.; PINHEIRO, C. D. P. S.; AZEVEDO, S. D.; RODRIGUES, P. R. S.; SANDIM, D. P. R. Poluição atmosférica em cidades brasileiras: uma breve revisão dos impactos na saúde pública e meio ambiente. **Naturae**, v. 2, n. 1, p. 23-33, 2020.

UNEP - UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Relatório Anual, 2022.** Disponível em: <https://www.unep.org/annualreport/>. Acesso em: 16 set. 2024.

VETTER, S. H. SAPTOKA, T. B.; HILIER, J.; STIRLING, C. M.; MACDIARMID, J. I.; ALEKSANDROWICZ, L.; GREEN, R.; JOY, E.; J. M.; DANGOUR, A., D. **Greenhouse gas emissions from agricultural food production to supply Indian diets: Implications for climate change mitigation.** **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 237, p. 234-241, 2017.

VIDAL, F. Produção e uso de biocombustíveis no Brasil. Fortaleza: BNB, **Caderno Setorial ETENE**, n. 79, 2019.

WIKUATS, C. F. H.; NOGUEIRA, T.; SQUIZZATO, R.; FREITAS, E. D.; ANDRADE, M. F. Health Risk Assessment of Exposure to air pollutants exceeding the New WHO Air Quality Guidelines (AQGs) in São Paulo, Brazil. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 20, n. 9, 2023.

WHO. **WHO Global Air Quality Guidelines. Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide.** 2021.