LUMEN ET VIRTUS
ISSN: 2177-2789

ANÁLISE DE EMISSÕES DE POEIRA EM OPERAÇÕES DE MINERAÇÃO: REGULAMENTAÇÃO AMBIENTAL, RISCO ENVOLVIDOS E TECNOLOGIAS DE CONTROLE

ANALYSIS OF DUST EMISSIONS IN MINING OPERATIONS: ENVIRONMENTAL REGULATION, INVOLVED RISKS AND CONTROL TECHNOLOGIES

ANÁLISIS DE EMISIONES DE POLVO EN OPERACIONES MINERAS: REGULACIÓN AMBIENTAL, RIESGOS INVOLUCRADOS Y TECNOLOGÍAS DE CONTROL

https://doi.org/10.56238/levv17n63-051

Data de submissão: 20/07/2026 **Data de publicação:** 20/08/2026

Leonardo Martins Agripino
Engenharia de Minas
Instituição: Universidade Presidente Antônio Carlos (UNIPAC)
E-mail: Leonardo_agripino@yahoo.com.br

Gabriel Gomes Silva
Doutor em Geotecnia
Instituição: Universidade Federal de Catalão (UFCAT)
E-mail: gabriel_gomes@ufcat.edu.br

RESUMO

O Material Particulado (MP) emitido na forma de poeira fugitiva em estradas não pavimentadas é um dos principais contaminantes do ar na mineração a céu aberto. Impulsionada pelo intenso tráfego de veículos de carga, essa emissão compromete a saúde ocupacional e das comunidades vizinhas, reduz a visibilidade nas vias, gera perdas financeiras e afeta a Licença Social para Operar (LSO), em um cenário de legislações ambientais (padrões PM_{10} e $PM_{2,5}$) cada vez mais rígidas. Este artigo apresenta uma síntese dos mecanismos de formação de poeira e discute suas implicações para a segurança e a conformidade regulatória. Por meio de uma revisão comparativa das técnicas de supressão aplicadas ao contexto minerário, o estudo analisa a eficiência da água, isolada ou associada a agentes químicos, como biopolímeros, bem como os impactos ambientais associados. Os resultados confirmam que a água é o supressor mais utilizado na mineração e evidenciam que a incorporação de agentes químicos eleva a eficiência no controle de emissões. Além disso, uma análise dos principais componentes dos supressores revela que, apesar de muitas formulações comerciais serem apresentadas como "verdes" ou "sustentáveis", o termo "polímero" abrange uma ampla gama de substâncias químicas, algumas das quais podem causar impactos ambientais significativos e, eventualmente, afetar a LSO.

Palavras-chave: Poeira. Mineração. Estradas. Supressores. Biopolímeros. LSO.

ABSTRACT

Particulate Matter (PM) emitted as fugitive dust on unpaved roads is one of the main air contaminants in open-pit mining. Driven by intense traffic of cargo vehicles, this emission compromises

occupational and neighboring community health, reduces visibility on roads, generates financial losses, and affects the Social License to Operate (SLO), in a scenario of increasingly stringent environmental legislation (PM_{10} and $PM_{2,5}$ standards). This article presents a synthesis of dust formation mechanisms and discusses their implications for safety and regulatory compliance. Through a comparative review of suppression techniques applied to the mining context, the study analyzes the efficiency of water, used alone or combined with chemical agents, such as biopolymers, as well as the associated environmental impacts. The results confirm that water is the most widely used suppressant in mining and show that the incorporation of chemical agents increases efficiency in emission control. Furthermore, an analysis of the main components of suppressants reveals that, despite many commercial formulations being presented as "green" or "sustainable", the term "polymer" encompasses a wide range of chemical substances, some of which may cause significant environmental impacts and potentially affect the SLO.

Keywords: Dust. Mining. Roads. Suppressants. Biopolymers. SLO.

RESUMEN

El Material Particulado (MP) emitido como polvo fugitivo en caminos sin pavimentar es uno de los principales contaminantes del aire en la minería a cielo abierto. Impulsada por el intenso tráfico de vehículos de carga, esta emisión compromete la salud ocupacional y de las comunidades vecinas, reduce la visibilidad en las vías, genera pérdidas financieras y afecta la Licencia Social para Operar (LSO), en un escenario de legislaciones ambientales (estándares PM_{10} y $PM_{2,5}$) cada vez más rigurosas. Este artículo presenta una síntesis de los mecanismos de formación del polvo y discute sus implicaciones para la seguridad y el cumplimiento regulatorio. A través de una revisión comparativa de las técnicas de supresión aplicadas al contexto minero, el estudio analiza la eficiencia del agua, utilizada aisladamente o asociada a agentes químicos, como biopolímeros, así como los impactos ambientales asociados. Los resultados confirman que el agua es el supresor más utilizado en la minería y evidencian que la incorporación de agentes químicos eleva la eficiencia en el control de emisiones. Además, un análisis de los componentes principales de los supresores revela que, a pesar de que muchas formulaciones comerciales se presentan como "verdes" o "sostenibles", el término "polímero" abarca una amplia gama de sustancias químicas, algunas de las cuales pueden causar impactos ambientales significativos y, potencialmente, afectar la LSO.

Palabras clave: Polvo. Minería. Caminos. Supresores. Biopolímeros. LSO.

1 INTRODUÇÃO

A mineração e o processamento mineral são atividades industriais essenciais para a sociedade atual (Ali *et al.*, 2017), e a água é um recurso crítico para a cadeia produtiva, além de atuar como supressor natural de poeira. A geração de poeira constitui um processo intrínseco ao manuseio de materiais ao longo de toda a cadeia produtiva da mineração, desde a extração, o beneficiamento e a movimentação até o embarque. Essa poeira é gerada principalmente pela movimentação de grandes veículos durante as operações de transporte de minério (Gonzalez *et al.*, 2019). A poeira em suspensão pode acarretar consequências adversas, tais como: perda de produto, contaminação do ar, impactos à saúde e aumento dos riscos nas operações devido à redução da visibilidade (Le Vern *et al.*, 2022).

Água é utilizada em larga escala para reduzir a emissão de poeira nas estradas da indústria da mineração. A principal estratégia para controlar a emissão de poeira consiste no uso de jatos de água (aspersão), aplicados por caminhões-pipa. Essa abordagem apresenta algumas desvantagens, incluindo congestionamento nas vias de circulação, risco de acidentes envolvendo equipamentos móveis de grande porte, dificuldade em garantir a aplicação uniforme da água e altos custos operacionais associados (Horta, 2016). Conforme a água evapora, novas aplicações são necessárias para manter a eficiência de supressão, o que pode comprometer o seu uso sustentável (Nylen; Sheehan, 2021). Soluções inovadoras, como a utilização de biopolímeros, vêm ganhando espaço no dia a dia das operações de mineração devido a sua eficiência, economia e baixo impacto ambiental (Nazareno *et al.*, 2018).

O objetivo deste artigo é apresentar um panorama das emissões de poeira provenientes de vias não pavimentadas na indústria da mineração, resumindo o processo de formação e emissão. Em seguida, serão abordados os impactos na cadeia produtiva, tais como: redução da velocidade das operações de transporte, aumento do risco de acidentes, legislação aplicável e danos à saúde dos trabalhadores. Também serão abordadas as técnicas mais recentes utilizadas no controle e na supressão com uma breve discussão sobre os aspectos ambientais associados.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 FORMAÇÃO DE POEIRA EM ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS

Estradas não pavimentadas são consideradas fontes primárias de emissão de poeira (Le Vern *et al.*, 2022), do tipo não proveniente de gases de exaustão (*Non-Exhaust Emissions - NEE*). Esse tipo de fonte é subestimado ou até negligenciado nos inventários de fontes de emissão. Elas incluem partículas provenientes do desgaste da via, bem como aquelas previamente suspensas e posteriormente depositadas na estrada (Rienda; Alves, 2021).

A poeira oriunda de vias não pavimentadas pode apresentar uma ampla distribuição granulométrica, abrangendo desde partículas grossas até frações respiráveis. Entre essas, as partículas inaláveis com diâmetro inferior a 10 micrômetros, representadas como PM_{10}, são as de maior interesse.

As emissões de poeira em vias não pavimentadas variam em função da fração de silte (partículas com diâmetro inferior a 75 micrômetros) (U.S. EPA, 2006). Três principais fenômenos físicos são responsáveis pela geração da poeira fugitiva oriunda de vias não pavimentadas: (1) Interação mecânica das rodas dos veículos; (2) tensões cisalhantes e transporte de partículas pela ação de correntes de ar turbulentas decorrentes do movimento dos veículos; e (3) bombardeamento por salto (Denby *et al.*, 2018; U.S. EPA, 2020).

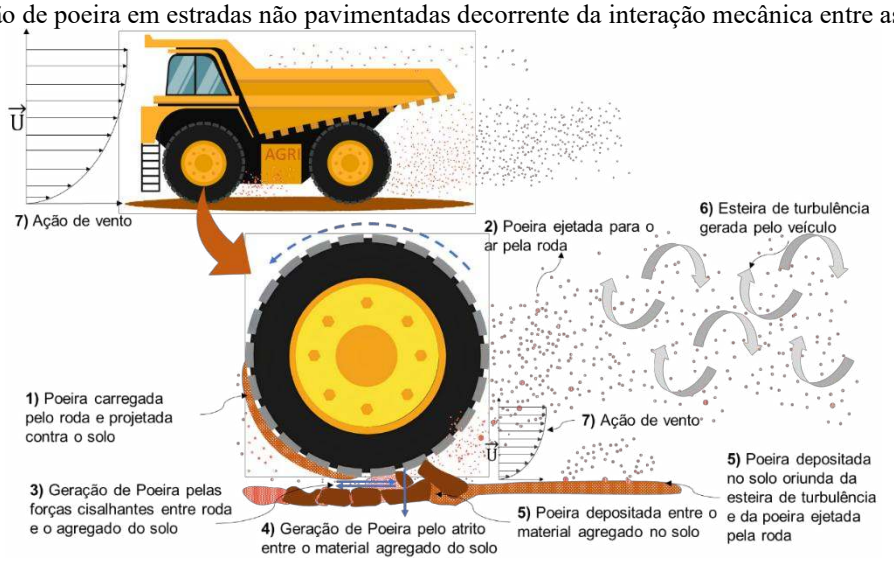
Veículos, ao trafegarem por uma via não pavimentada, geram interação mecânica entre as rodas e o solo. Partículas de poeira são arrastadas pela roda e projetadas contra o solo (Figura 1.1) e também são ejetadas para o ar (W*heel Jetting*) (Figura 1.2) (Gérardin; Midoux, 2016), formando a poeira fugitiva. Há também a interação do pneu com o solo, por meio de forças de cisalhamento horizontais (Figura 1.3), que causam o desmonte e a moagem dos agregados do solo, dando origem a partículas menores, que estarão disponíveis para serem suspensas na atmosfera. Dentre as partículas lançadas na atmosfera pelos mecanismos mencionados acima, as de maior diâmetro não conseguem se manter em suspensão por longos períodos e retornam ao solo. Com isso, atingem outras partículas e agregados, provocando a formação de novas partículas menores, que são, por sua vez, lançadas novamente na atmosfera. Esse fenômeno é descrito como bombardeamento por salto (*Saltation Bombardment*), e foi primeiramente descrito por Bagnold (1941).

A formação de poeira decorrente da pressão exercida pela roda sobre a via, que desmonta e tritura o agregado, é demonstrada na Figura 1.4. Há também a poeira localizada entre o agregado depositado no solo (Figura 1.5) durante o processo de construção da via e realimentada pela poeira fugitiva de fontes próximas e pela própria dinâmica dos veículos (Yoo *et al.*, 2024).

A superfície da via é atingida por correntes turbulentas de ar oriundas da esteira de turbulência (Figura 1.6), resultantes da passagem do veículo e da ação dos ventos atmosféricos (Figura 1.7). A velocidade do veículo exerce forte influência sobre a quantidade de poeira gerada, devido ao aumento da turbulência (Barnes; Connor, 2014; Kacer *et al.*, 2024).

Essas fortes correntes de ar turbulentas continuam atuando mesmo após a passagem do veículo (U.S. EPA, 2020) e são responsáveis por movimentar o MP da superfície da via. Parte da poeira formada pelos processos descritos acima é então carregada pela roda do veículo, reiniciando o processo conforme ilustrado na Figura 1. Observando esse ciclo, podemos concluir que a formação de poeira em vias não pavimentadas é um processo contínuo e progressivo (Addo *et al.*, 2004; Barnes; Connor, 2014) e depende da disponibilidade de reservatórios de MP no leito da via, abastecidos continuamente pelos mecanismos descritos acima.

Figura 1. Geração de poeira em estradas não pavimentadas decorrente da interação mecânica entre as rodas e o solo.



Fonte: Adaptado de Barnes e Connor (2014).

A emissão de poeira de estradas não pavimentadas é influenciada por diversos fatores: carga de material particulado disponível no leito da via, macro textura da via, umidade, estado de conservação, compactação, densidade de tráfego, composição do solo, número de rodas dos veículos e velocidade de deslocamento (Fussell *et al.*, 2022; Le Vern *et al.*, 2022).

Solos com grande quantidade de material agregado, embora retenham e armazenem mais poeira, tornam-na menos disponível para ressuspensão, reduzindo as emissões. A ressuspensão de poeira é desprezível quando a superfície da estrada está úmida e após eventos de chuva, de modo que a carga de poeira se recupera mais rapidamente em climas quentes e secos do que em climas mais úmidos. A água também pode reagir com a poeira da via, formando uma camada de textura firme e compacta, que requer intensidade de vento elevada para iniciar a suspensão das partículas (Rienda; Alves, 2021).

2.2 POEIRA E LEGISLAÇÃO

A Organização Mundial da Saúde (OMS), em maio de 2015, endossou uma resolução que tratava da necessidade de os estados e a própria OMS intensificarem os esforços para proteger a população dos riscos relacionados à poluição atmosférica. Em 2018, ocorreu a primeira conferência da OMS sobre Poluição do Ar e Saúde. Na mesma direção da OMS, a Assembleia das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEA) adotou três resoluções sobre o tema nos últimos anos, destacando os efeitos na saúde decorrentes de todas as formas de poluição do ar, incluindo a poeira e as tempestades de areia (Velasco; Jarosińska, 2022). A OMS é responsável por emitir Diretrizes para a Qualidade do Ar (*Air Quality Guidelines* - AQG), cuja primeira edição foi publicada em 1987. A AQG serve como meta global a ser perseguida pelos governos, com o objetivo de melhorar a qualidade de vida das pessoas ao reduzir a poluição do ar.

A regulação da poluição do ar nos EUA teve um marco importante na década de 1970, com o *Clean Air Act* (CAA), que estabeleceu níveis máximos de poluentes, incluindo o MP, para fontes móveis e estacionárias. Nesse período, também foi criada a *Environmental Protection Agency* (EPA), órgão governamental americano responsável pela implementação do CAA e pelo cumprimento do programa de controle da poluição atmosférica. O CAA de 1970, com suas revisões e emendas, constitui a base do programa federal de controle da poluição atmosférica dos Estados Unidos (Hu, 2022).

Por meio do CAA, a EPA estabeleceu os National Ambient Air Quality Standards (NAAQS), com o objetivo de definir padrões de qualidade do ar, visando reduzir a exposição a poluentes atmosféricos nocivos, como partículas com diâmetro aerodinâmico inferior ou igual a 2,5 micrômetros ($PM_{2,5}$), ozônio (O_3), dióxido de nitrogênio (NO_2), dióxido de enxofre (SO_2) e monóxido de carbono (CO) (U.S. EPA, 2013).

Na União Europeia (UE), diversos poluentes, incluindo o MP, devem cumprir normas regulamentadoras. Alguns países-membros da União Europeia possuem normas específicas mais restritivas do que as estabelecidas pela OMS. Em dezembro de 2024, entrou em vigor a nova diretiva sobre Qualidade do Ar, 2024/2881/UE. Na Tabela 1 estão sumarizados os valores para MP para serem atingidos até 2030, considerando diferentes órgãos:

Tabela 1. Diretrizes para os limites máximos de poluentes do tipo MP.

Poluente	Tempo Médio	EU 2024/2881 (2024)		Diretrizes 2005 (AQGs)	Diretrizes 2021 (AQGs)
		Limites até 2026	Limites até 2030		
$PM_{2,5}$ ($\mu g/m^3$)	Anual 24 horas	25 -	10 25	10 25	5 15
PM_{10} ($\mu g/m^3$)	Anual 24 horas	40 50	20 45	20 50	15 45

Fonte: Adaptado de WHO (2006, 2021) e European Parliament (2024).

Os padrões brasileiros de qualidade do ar, assim como os dos Estados Unidos, dividem-se em duas categorias. Os Padrões Primários estabelecem limites para salvaguardar tanto a saúde humana quanto o meio ambiente, protegendo os grupos mais vulneráveis, incluindo crianças, idosos e pessoas com asma. Os Padrões Secundários têm como objetivo garantir o bem-estar coletivo e evitar prejuízos à fauna, à flora e ao patrimônio material.

A Lei Federal nº 6.938/1981, de 31 de agosto de 1981 (Brasil, 1981), institui a Política Nacional do Meio Ambiente, que estabelece princípios gerais para a proteção ambiental, equivalente ao CAA dos Estados Unidos. A partir dessa lei, foram criados o Sistema Nacional de Meio Ambiente (SIANAMA) e o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). O CONAMA é o órgão que estabelece diretrizes, padrões nacionais, regras e regulamentos acerca do meio ambiente, incluindo parâmetros limites de qualidade do ar.

O CONAMA, por meio de sua Resolução nº 05/1989, de 15 de junho de 1989 (CONAMA, 1989), instituiu o Programa Nacional de Controle de Qualidade do Ar (PRONAR). O PRONAR é responsável por assegurar o cumprimento dos padrões de qualidade do ar estabelecidos pelas resoluções do CONAMA.

A Resolução CONAMA nº 491/2018, de 19 de novembro de 2018 (CONAMA, 2018), atualiza os padrões para as partículas PM_{10} e $PM_{2,5}$, com limites anuais e de curto prazo. Essa resolução, além de exigir a divulgação de informações sobre a qualidade do ar à população, estabelece também o compromisso de reduzir gradualmente os padrões em quatro etapas, de acordo com as recomendações da OMS.

A Resolução CONAMA nº 506/2024, de 05 de julho de 2024, define novos limites de concentração de poluentes atmosféricos, substituindo os parâmetros da resolução anterior. E introduz prazos específicos para a implementação dos Padrões Intermediários (PI-1 a PI-4) e dos Padrões Finais (PF), conforme a Tabela 2. Os PF entrarão em vigor em data a ser definida por resolução futura do CONAMA (CONAMA, 2024).

Tabela 2. Tabela de transição dos níveis de poluentes atmosféricos.

Poluente Atmosférico	Período de Referência	PI-1 Início	PI-2 2025	PI-3 2033	PI-4 2044	PF
Material Particulado - PM_{10} (mg/m^3)	Anual	40	35	30	20	15
	24 horas	120	100	75	50	45
Material Particulado - $PM_{2,5}$ (mg/m^3)	Anual	20	17	15	10	5
	24 horas	60	50	37	25	15
Partículas Totais em Suspensão (PTS) (mg/m^3)	Anual	-	-	-	-	80
	24 horas	-	-	-	-	240

Fonte: Adaptado de CONAMA (2024).

A relação entre as regras da Agência Nacional de Mineração (ANM) e o controle da qualidade do ar em áreas de mineração é de complementaridade. A ANM foca na regulação da atividade minerária em si, enquanto os órgãos ambientais estabelecem e fiscalizam os padrões de qualidade do ar. Apesar de a ANM não definir os limites de emissão de poluentes no ar, a NRM12 (Normas Regulamentadoras de Mineração) estabelece os requisitos mínimos de segurança para o tráfego de veículos, o trânsito de equipamentos móveis e a circulação de pessoas nas áreas de mineração (DNPM, 2001). Seu foco primordial é a prevenção de acidentes, como colisões, atropelamentos e capotamentos, o que, na prática, implica necessariamente o controle e a supressão de poeira, conforme será discutido mais adiante no texto.

2.3 POEIRA E O IMPACTO NA SAÚDE

A dispersão de poeira na indústria de mineração pode contaminar solos e cursos d'água. Além disso, a poluição atmosférica decorrente dessas emissões pode causar prejuízos à saúde da população

residente nas proximidades das mineradoras (Watson *et al.*, 2000). Todas essas externalidades podem levar, inclusive, a perda da LSO, impactando severamente as operações das mineradoras.

O Banco Mundial estima que os gastos globais com os danos à saúde causados pela poluição atmosférica giram em torno de seis bilhões de dólares, cerca de 5% do PIB (Produto Interno Bruto) global, e a OMS estima sete milhões de mortes por ano decorrentes da exposição ao MP (Maluf, 2024). Segundo a WHO (2016), a poluição do ar é a maior ameaça ambiental, à saúde e ao bem-estar em escala global, e todas as populações são afetadas em diferentes níveis.

Devido à grande área de contato entre a superfície do sistema respiratório e a atmosfera terrestre, a qualidade do ar interfere diretamente na saúde respiratória. Uma quantidade significativa dos poluentes inalados atinge o sistema circulatório pelos pulmões e pode causar complicações em diversos órgãos (Arbex *et al.*, 2012).

As partículas são tipicamente representadas pelas iniciais PM (*Particulate Matter*), seguidas de um índice que indica o diâmetro aerodinâmico em micrômetros (µm): PMx. As de maior interesse para a pesquisa são as que possuem diâmetro menor ou igual a 10 µm (PM_{10}) (WHO, 2021). Os principais sistemas afetados pelo MP são os sistemas respiratório e cardiovascular. Na Tabela 3, são apresentadas as frações de particulados, as fontes, as principais áreas que afetam o corpo humano e os impactos na saúde.

Tabela 3. Material particulado e áreas de ação no sistema respiratório.

Poluentes	Fontes	Penetração no sistema respiratório	Fisiopatologia
PTS	- Fontes antropogênicas: poeira das ruas e estradas, atividades agrícolas e de construção. - Fontes naturais: sal marinho, pólen, esporos, fungos e cinzas vulcânicas.	- Nariz, garganta.	- Diminui a atividade mucociliar e dos macrófagos. Produz irritação nas vias respiratórias. Causa estresse oxidativo e, em consequência, inflamação pulmonar e sistêmica. A exposição crônica produz remodelamento brônquico e Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica (DPOC). Pode ser cancerígeno.
PM_{10}		- Traqueia, brônquios, Bronquíolos.	
$PM_{2,5}$	- Queima de combustíveis fósseis e de biomassa, usinas termoelétricas.	- Alvéolos pulmonares.	
$PM_{0,1}$		- Alvéolos, tecido pulmonar, corrente sanguínea.	

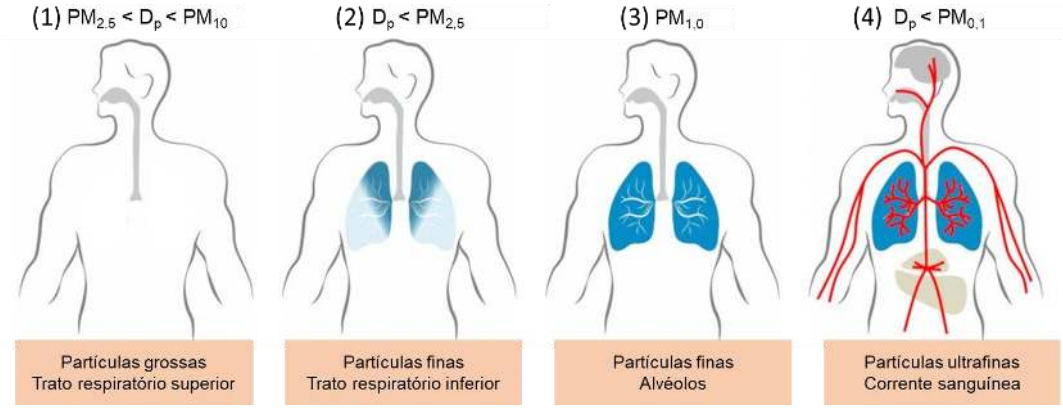
Fonte: Adaptado de Brito *et al.* (2018).

O MP com diâmetro maior que 10 µm fica quase totalmente retido na mucosa nasal e na garganta. Partículas PM_{10} , também chamadas de Partículas Inaláveis, entram no corpo humano pela boca e pelo nariz, passando pelas vias respiratórias superiores, e podem progredir para as vias respiratórias inferiores, onde se alojam nos pulmões (Figuras 2.1 e 2.2). Já o material particulado fino ($PM_{2,5}$) é capaz de passar pelas vias superiores e penetrar nas vias respiratórias inferiores, para além da faringe, podendo atingir os alvéolos pulmonares (Figuras 2.2 e 2.3).

O termo $PM_{0,1}$ refere-se a partículas de tamanho ultrarreduzido, com diâmetro inferior a 1 µm (nanopartículas), que apresentam comportamento semelhante ao das moléculas gasosas. Essa

característica lhes confere facilidade para penetrar nos alvéolos por difusão (Movimento Browniano) podendo progredir para o tecido celular e a corrente sanguínea (Arbex *et al.*, 2012; Kim *et al.*, 2015), conforme ilustrado da Figura 2.4.

Figura 2. Tamanho das partículas e a penetração no Sistema Respiratório.



Fonte: Adaptado de Vincent (2025).

Além dos impactos na saúde humana, a poeira pode se depositar sobre a vegetação, comprometendo o desenvolvimento e a saúde da flora. A fauna também sofre os efeitos da exposição a esses particulados, podendo apresentar impactos fisiológicos e comportamentais (Rehman *et al.*, 2021).

2.4 POEIRA E O IMPACTO NAS OPERAÇÕES DE MINERAÇÃO

Além dos impactos na saúde, o MP, na forma de poeira fugitiva pode causar a diminuição da visibilidade nas vias não pavimentadas (Figura 3).

Figura 3. Poeira em suspensão.



Fonte: Imagem gerada por IA.

Esse fenômeno é frequentemente apontado como fator de risco para o tráfego de veículos. Entretanto, poucos estudos investigam a relação entre os níveis de poeira e a ocorrência de acidentes decorrentes da baixa visibilidade (Bhattachan *et al.*, 2019). A redução da visibilidade nas vias, além de

aumentar o risco de incidentes relacionados ao tráfego de equipamentos móveis, pode causar interrupções preventivas nas operações de transporte de minério (Parvej *et al.*, 2021; Le Vern *et al.*, 2022).

Além da falta de visibilidade, a perda de aderência dos pneus com estrada e a consequente redução da eficiência de frenagem impacta as operações de mineração. Esses fenômenos ocorrem principalmente devido ao "efeito lubrificante" exercido pelo particulado fino entre as rodas e a superfície da via (Hichri *et al.*, 2018). Estudos mostram que acidentes veiculares em estradas não pavimentadas são muito mais frequentes após a primeira chuva de um longo período de estiagem. A degradação das condições de aderência resulta da mistura da poeira acumulada com a umidade da chuva, criando uma camada lubrificante que aumenta o risco de acidentes.

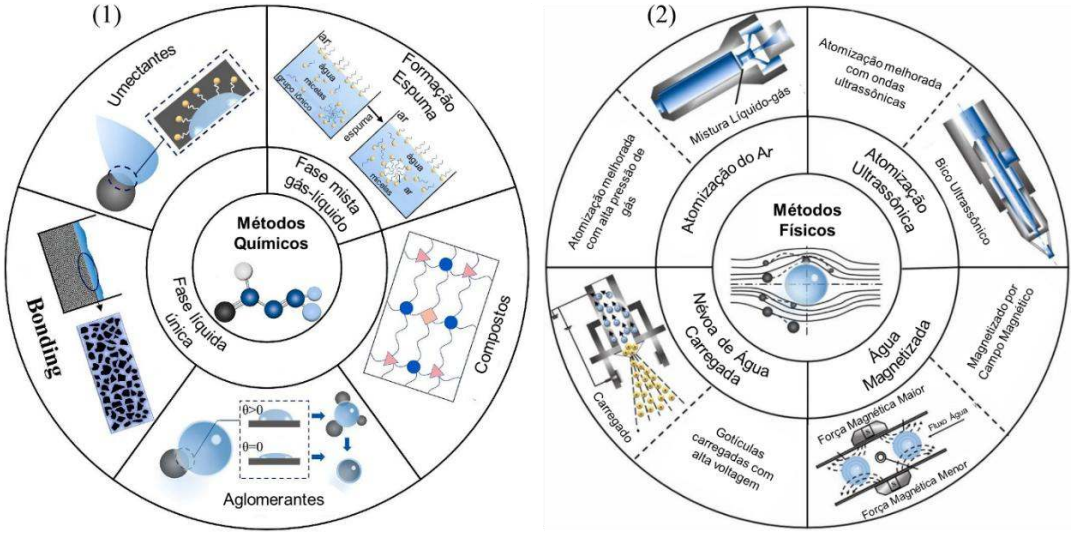
2.5 TÉCNICAS DE CONTROLE E SUPRESSÃO DE POEIRA

Os supressores de poeira atuam na superfície do solo por meio de diferentes mecanismos físico-químicos, impedindo o desprendimento e o transporte de partículas pelo vento. A supressão de poeira é influenciada por duas propriedades principais: hidrofobicidade e molhabilidade. A hidrofobicidade pode ser entendida como a repelência do solo (ou das partículas de poeira) à água, o que dificulta o molhamento do material. A molhabilidade é a capacidade de um líquido aderir e se espalhar sobre uma superfície (Zheng *et al.*, 2024).

A maioria das poeiras possuem comportamento hidrofóbicas e, para facilitar sua supressão, é necessário reduzir sua hidrofobicidade por meio de agentes químicos ou aumentar a molhabilidade da água. As propriedades físico-químicas da água podem ser modificadas para aumentar sua eficiência de supressão (Zhang *et al.*, 2022). Existem dois grupos de métodos para aumentar a eficiência do uso da água: métodos físicos e métodos químicos (Figura 4).

Os métodos químicos sugerem a adição de agentes químicos à água para aumentar a eficiência de supressão. Dentre eles, o método de fase única é o mais comum. Segundo Zhang *et al.* (2022), os supressores que usam métodos químicos são classificados pelos seus mecanismos de ação (Figura 4.1): supressores do tipo umectante (*wetting*), ligante ou coesivo (*bonding*), aglomerante (*coagulating*), compostos (*compounding*) e formadores de espuma (*foaming*).

Figura 4. Métodos químicos e físicos de supressão de poeira.



Fonte: Adaptado de Zhang *et al.* (2022).

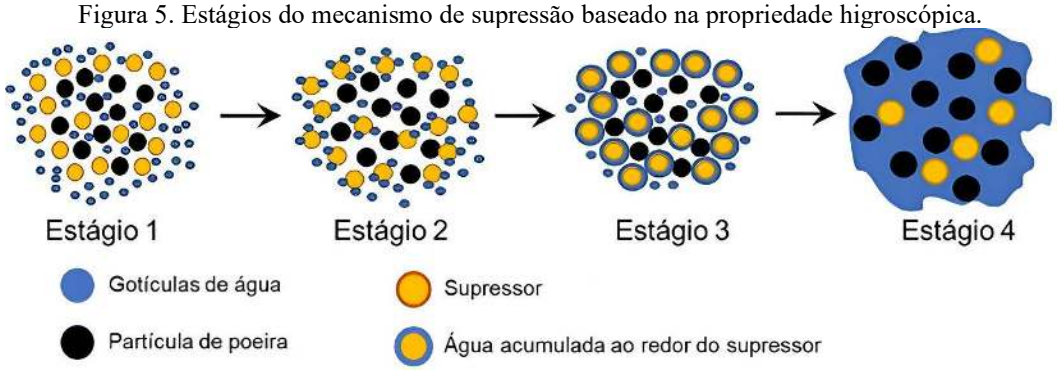
2.5.1 Supressores umectantes

O mecanismo de *wetting* (aumento da molhabilidade) é um dos mais importantes para aumentar a eficiência de supressão (Zhang *et al.*, 2022), pois pode atuar em conjunto com a higroscopicidade. Higroscopicidade é a propriedade de uma substância de adsorver ou absorver água da atmosfera circundante. Algumas dessas substâncias apresentam a propriedade físico-química chamada deliquescência, caracterizada pela capacidade de absorver umidade até se dissolverem por completo, formando uma solução aquosa.

O mecanismo de higroscopia (Figura 5) é composto por quatro estágios: (1) O supressor (substância higroscópica) é aspergido ou misturado às partículas de poeira em ambiente úmido; (2) o supressor adsorve umidade, e moléculas de água se acumulam em torno dele; (3) a camada externa do supressor é dissolvida na água adsorvida; e (4) o supressor é quase totalmente dissolvido na água que contém as partículas de poeira (Parvej *et al.*, 2021).

Supressores umectantes combinam uma substância higroscópica com um surfactante (tensoativo). Tensoativos são compostos anfipáticos que possuem uma fração polar (hidrofílica) e outra apolar (hidrofóbica), podendo interagir com substâncias polares e apolares, promovendo a interação entre os meios (Oliveira; Dias, 2017). A principal função dos agentes umectantes é reduzir a tensão superficial da solução supressora, aumentando a penetração e a mobilidade do fluido, facilitando a captura de partículas hidrofóbicas (Zhang *et al.*, 2022).

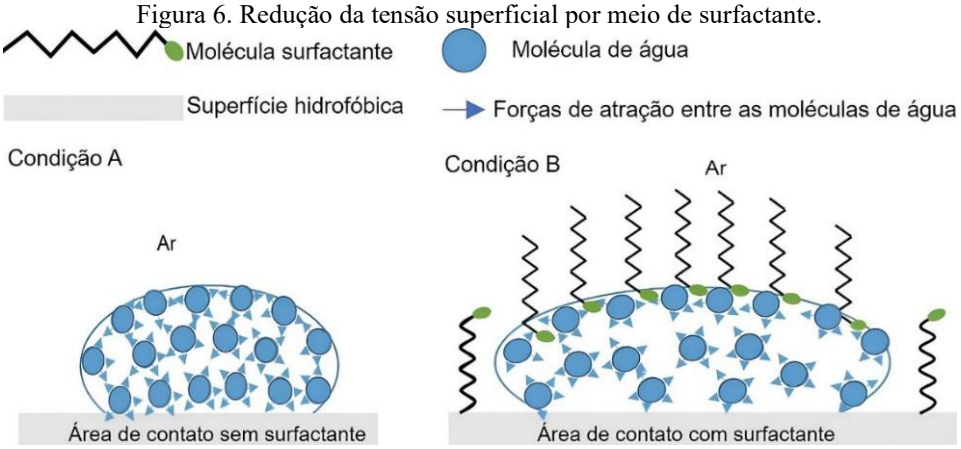
Figura 5. Estágios do mecanismo de supressão baseado na propriedade higroscópica.



Fonte: Adaptado de Parvej *et al.* (2021).

Na Figura 6, apresenta-se o esquema da redução da tensão superficial em uma gota de água repousada sobre uma superfície hidrofóbica. Na condição A, a molécula de água está sem ação do surfactante. Na condição B, há ação de um agente surfactante, de modo que as moléculas surfactantes estão conectadas à superfície da molécula, resultando em uma tensão superficial menor e, assim, aumentando a área de contato com a superfície hidrofóbica.

Figura 6. Redução da tensão superficial por meio de surfactante.



Fonte: Adaptado de Li, S. *et al.* (2021).

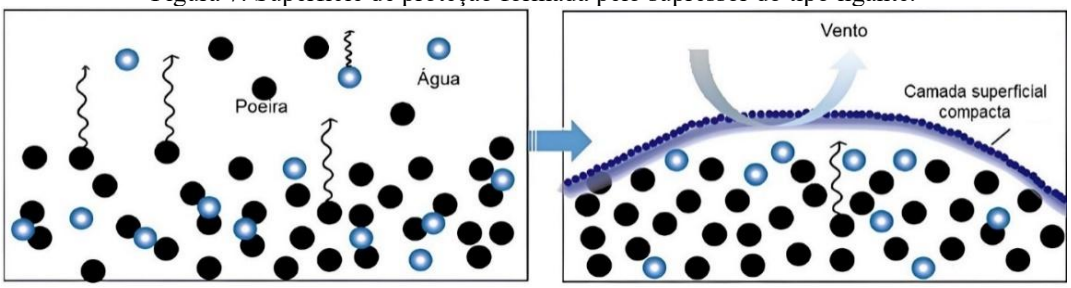
A redução da tensão superficial do fluido ocorre até o limite de saturação e, após esse limite, a adição de surfactante provoca a formação de micelas (Concentração Micelar Crítica - CMC). Além desse limite, a adição de surfactante não reduzirá a tensão superficial. A desvantagem desse tipo de supressor é o curto tempo de umectação, o que favorece a emissão de poeira secundária (Li, S. *et al.*, 2021). Poeira secundária é a poeira previamente depositada no solo que, com o cessamento do efeito do supressor, volta a ser suspensa no ar.

2.5.2 Supressores ligantes/coesivos

O mecanismo de ação dos supressores de poeira coesivos baseia-se na formação de uma camada resistente na superfície das partículas de poeira. Essa camada é formada pela viscosidade do agente

supressor, o que dificulta a ressuspensão e a dispersão da poeira devido a perturbações no solo (Dong *et al.*, 2023). O mecanismo de ação é ilustrado na Figura 7.

Figura 7. Superfície de proteção formada pelo supressor do tipo ligante.



Fonte: Adaptado de Dong *et al.* (2023).

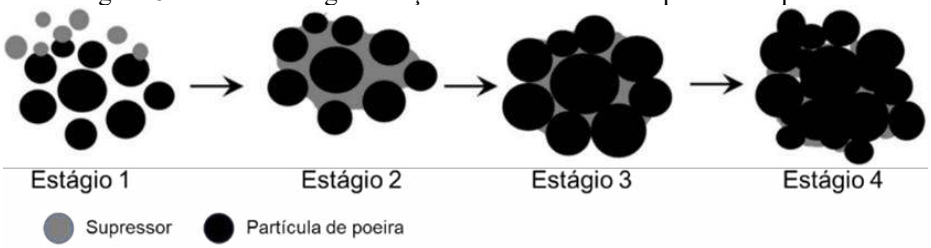
Esse tipo de supressor pode ser dividido em duas categorias: orgânicos e inorgânicos. Os orgânicos têm se tornado foco de pesquisa nos últimos tempos devido às suas propriedades adesivas superiores às dos inorgânicos. O ponto negativo é que a camada de proteção se rompe com facilidade sob esforços e impactos (Zhang *et al.*, 2022).

2.5.3 Supressores aglomerantes

Supressores aglomerantes usam o princípio da aglomeração, no qual agentes ligantes (sais inorgânicos ou resinas) são misturados à poeira, introduzindo forças adesivas que levam à aglomeração das partículas, aumentando a massa dos aglomerados e favorecendo a deposição por gravidade (Zhang *et al.*, 2022).

O processo de supressão ocorre em quatro estágios (Figura 8): (1) O agente supressor é aplicado na superfície; (2) o supressor inicia a formação de pontes adesivas entre as partículas; (3) as pontes adesivas se solidificam entre as partículas; e (4) o aglomerado de partículas cresce, aumentando a massa e depositando-se no solo por gravidade, suprimindo a poeira (Parvej *et al.*, 2021).

Figura 8. Processo de aglomeração como método de supressão de poeira.



Fonte: Adaptado de Parvej *et al.* (2021).

Supressores de poeira umectantes e aglomerantes são usados principalmente para tratar a poeira dinâmica (gerada, por exemplo, pela descarga de minério). No entanto, apresentam baixa retenção de água e baixa capacidade de cimentação, sendo necessário pulverizar várias vezes para evitar a poeira secundária (Dong *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2023).

2.5.4 Supressores compostos

Supressores compostos podem combinar mecanismos de umectação, de ligação e de aglomeração. Esses produtos podem formar uma camada superficial rígida sobre a superfície a ser protegida. São usados principalmente no tratamento estático de poeira, como em pátios de armazenamento de material granular. Supressores de poeira ligantes e compostos são mais adequados para poeira estática, como superfícies de estradas e silos de armazenamento de carvão. No entanto, há poucas aplicações desses supressores de poeira em campo, pois o custo de preparação é elevado e o processo é relativamente complexo (Dong *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2023).

Os métodos físicos aumentam a eficiência da supressão da água sem a adição de agentes químicos, com as principais vantagens de aspectos ambientais, baixo custo e simplicidade de implantação. Os métodos mais comuns são: atomização do ar, atomização ultrassônica, magnetização da água e névoa de água eletrostaticamente carregada, conforme ilustrado na Figura 4.2 (Li, D. *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2022).

2.5.5 Vantagens e desvantagens

Os sistemas de aspersão de água (*spray*) são os mais viáveis economicamente e os mais utilizados para o controle e a supressão de poeira (Liao *et al.*, 2019) ainda que a sua eficiência de supressão seja baixa se não for utilizado um método de aumento de desempenho (Li, D. *et al.*, 2021). A superioridade dos aditivos químicos em relação à água pura é evidente em termos de eficiência, durabilidade e economia de recursos.

Em termos de eficiência, os supressores químicos demonstram consistentemente uma eficácia de supressão muito superior à da água. Estudos reportam eficiências que podem alcançar 85-90% (Silva, 2021) e, em condições de laboratório, até 97-98% (Addo; Sanders; Chenard, 2004). As formulações mais avançadas, que combinam biopolímeros e surfactantes, podem alcançar eficiências de até 99% (Parvej *et al.*, 2021).

Em termos de redução do consumo de água, a principal vantagem operacional é a drástica diminuição da frequência de aplicação. Enquanto a água pode exigir múltiplas aplicações diárias, um único tratamento com um supressor químico pode manter sua eficácia por dias, semanas ou até meses, dependendo do produto e das condições locais. Estudos de caso práticos demonstram reduções no consumo de água de até 85% e na necessidade de operação de caminhões-pipa de até 77% (Panebianco; Buschiazzo, 2022).

Embora o custo inicial de aquisição dos aditivos seja superior ao da água, a análise do custo total de propriedade frequentemente revela uma vantagem econômica. As economias geradas pela redução massiva no consumo de água, de combustível para caminhões, de horas de mão de obra e de

custos de manutenção de estradas e veículos podem resultar em um custo operacional geral menor (Oliveira; Dias, 2017).

2.6 ASPECTOS AMBIENTAIS ASSOCIADOS AO USO DE SUPRESSORES

A crescente preocupação com a degradação ambiental torna indispensável a avaliação dos impactos gerados pelos agentes químicos supressores de poeira, uma vez que seu uso deve estar coerente com o objetivo de promover melhores condições ambientais. A seguir, são discutidos aspectos dos supressores sob essa perspectiva.

Embora muitos supressores modernos à base de polímeros sejam comercializados como "verdes" ou "sustentáveis", o termo "polímero" abrange uma ampla gama de substâncias químicas, algumas das quais podem causar impactos ambientais significativos. Portanto, a avaliação criteriosa de cada componente é necessária.

Uma formulação muito comum em supressores à base de polímeros combina substâncias naturais e sintéticas e é composta por três componentes principais: taninos, propanotriol (glicerol) e poliacrilamida (PAM). Os dois primeiros são amplamente reconhecidos como produtos ecologicamente corretos e de muito baixo impacto ambiental (Yan *et al.*, 2025). O PAM apresenta status ambiental controverso, uma vez que sua biodegradação ocorre apenas sob condições específicas, podendo persistir no ambiente e liberar monômeros de acrilamida (AM) tóxicos (Cheng *et al.*, 2024). A Tabela 4 apresenta uma visão comparativa das diferentes tecnologias de supressão, com base nas informações discutidas anteriormente.

Tabela 4. Análise comparativa das diferentes tecnologias de supressão de poeira.

Tecnologia Agente	Mecanismo de Ação Principal	Eficiência de Supressão	Redução consumo de Água	Duração do Efeito	Custo de aplicação	Perfil Ambiental
Água Pura	Aglomeração por umidade	Baixa a Moderada	N/A	Horas	Médio a Alto	Baixo impacto
Sais Higroscópicos	Retenção de umidade	Moderada a Alta	Alta	Dias a Semanas	Médio	Potencial de corrosão e contaminação salina
Surfactantes	Redução da tensão superficial	Moderada (potencializa outros)	Moderada a Alta	Horas a Dias	Médio	Varia com a formulação
Polímeros Sintéticos	Aglutinação / Formação de filme	Alta a Muito Alta	Muito Alta (>85%)	Semanas a Meses	Alto	Varia, pode ter baixa biodegradabilidade
Biopolímeros	Aglutinação / Formação de filme	Alta	Muito Alta (>85%)	Semanas a Meses	Médio a Alto	Alta biodegradabilidade, baixo impacto
Espumas	Encapsulamento	Alta	Muito Alta	Efeito localizado e imediato	Médio	Geralmente baixo impacto
Agentes Enzimáticos	Biocimentação	Muito Alta	Muito Alta	Meses a Anos	Alto	Baixo impacto, processo natural

Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

Hu *et al.* (2020) sintetizaram um supressor de poeira líquido à base de amido por meio do enxerto de ácido poliacrílico em amido de batata, seguido da reticulação do copolímero enxertado com gelatina. O supressor demonstrou excelente degradação, confirmado pela perda de massa de 82% após 60 dias. As taxas de supressão de poeira alcançaram 57% para $PM_{2,5}$ e 56% para PM_{10} em campo. Em comparação com a aspersão de água, a supressão total de poeira foi superior em 25% e 33%, respectivamente.

Li *et al.* (2020) utilizaram papel descartado como matéria-prima para a extração de celulose e a posterior síntese de um supressor à base de carboximetilcelulose sódica, obtido por copolimerização por enxertia com álcool polivinílico e N-vinilpirrolidona. Os experimentos demonstraram que o produto possui alta resistência superficial e uma taxa de supressão de poeira de aproximadamente 88% a uma velocidade do vento de 15 m/s, além de apresentar importantes características biodegradáveis.

Kunz *et al.* (2022) avaliaram a toxicidade aquática de 27 supressores de poeira comerciais (incluindo 13 bioprodutos) aplicados em estradas não pavimentadas, utilizando trutas arco-íris como organismo de teste. A toxicidade variou em mais de 1.000 vezes entre os produtos, com valores de concentração letal de 50% (LC50, 96 h) entre 1,7 mg/L e mais de 16.000 mg/L, sem correlação clara com a classificação química dos produtos. Testes complementares com mexilhões, camarões, caramujos e larvas de anfíbios confirmaram a truta como organismo representativo adequado para esses grupos. O estudo destaca a escassez de informações ambientais sobre esses produtos amplamente utilizados em mais de 14 milhões de km de estradas não pavimentadas no mundo, e constitui um dos primeiros estudos comparativos de toxicidade de supressores de poeira para organismos aquáticos.

Sieger *et al.* (2023) testaram biopolímeros de proteína e de polissacarídeo (proteína de trigo, proteína de fava, goma xantana, amido de milho e carboximetilcelulose) como supressores de poeira de baixo impacto ambiental em solos de minas. Os resultados demonstraram que as frações tratadas reduziram a perda de solo por erosão eólica para valores entre 0,86 e 423,9 g/m², em contraste com o solo de controle não tratado, que registrou uma perda de massa de 2.645 g/m² para areias médias e de 26.177 g/m² para areias de sílica fina. Da mesma forma ocorrendo para o solo do tipo areia de sílica. O estudo comprovou que as proteínas exigem concentrações e dosagem significativamente maiores (0,75% a 1,25%) que os polissacarídeos para alcançar taxas similares de consolidação estrutural.

Freer *et al.* (2022) avaliaram supressores a base de subprodutos do processamento de alimentos (vinhaça de chicória, licor de maceração de milho, xarope de decantação e melaço de palatinose) em laboratório e em campo (mina a céu aberto). Os resultados mostraram redução efetiva das emissões de poeira, porém a chuva causou lixiviação dos materiais, reduzindo sua concentração na superfície e comprometendo a eficiência ao longo do tempo. Concluíram que os subprodutos são alternativas ambientalmente seguras para supressão de poeira a curto prazo em áreas de mineração.

Xu *et al.* (2025) avaliaram a eficácia de um supressor de poeira composto, desenvolvido a partir de hidroxietilcelulose, glicerol, etoxilato de isotridecanol e água purificada, no controle de poeira em canteiros de obras. Foi identificado a diluição de 10x como ideal, elevando a resistência à compressão do solo em 118,1 kPa. A resistência aumentou com o tempo de cura, atingindo um pico aos 28 dias, acompanhada de melhora na coesão e no ângulo de atrito interno. A dureza superficial do solo passou de 25,0 para 57,3 HA e, em testes de erosão eólica, a perda de massa foi de apenas 9,36% em 20 minutos, superando redes de proteção que falharam completamente em 6 minutos. Concluiu-se que a formulação é eficiente e econômica para gestão ambiental em canteiros de obras.

Na Tabela 5, são sumarizados os agentes supressores, tipo de solo e substratos, indicadores geotécnicos e mecânicos, alterações químicas no escoamento (r*unoff*), ecotoxicidade e impacto ambiental das seis pesquisas mencionadas anteriormente.

Tabela 5. Comparação entre agentes supressores de poeira e seus impactos.

Fonte:	Agente Supressor	Tipo de Solo & Substrato	Indicadores Geotécnicos & Mecânicos	Alterações Químicas no Escoamento	Ecotoxicidade & Impacto Biológico Adverso
Xu et al., 2025	Composto solúvel (Hidróxietilcelulose + Glicerol + Isotridecanol).	*Gray Paddy Soil* (argilo-arenoso, pH 6,5 a 7,0).	UCS elevado a 118,1 kPa na diluição de 10x; perda de massa de 9,36% com vento grau 11.	Nula elevação de SST; parâmetros físico-químicos mantidos estáveis.	Biodegradável; nula fitotoxicidade para as culturas nativas da região agrícola.
Freer et al., 2022	Subproduto industrial (Melaço purificado de palatinose).	Areia média-grossa. D_{50}=0,65mm.	UCS elevada de 11 kPa para 7.535 kPa (concentração de 4%).	Elevada demanda bioquímica de oxigênio (DBO) se carreado diretamente.	Totalmente biodegradável e de baixíssima toxicidade aguda por via oral.
Sieger et al., 2023	Biopolímeros naturais enxertados (Goma Xantana e Amido de Milho).	Areia de granulometria média e sílica de granulometria fina.	Aumentos da força de penetração em todos os solos. Redução da erosão em todos os solos.	Arrasta traços solúveis inofensivos em pequenos episódios de chuva.	Excelente biocompatibilidade edáfica; propicia revegetação de taludes.
Kunz et al., 2022	Triagem de 27 supressores comerciais (13 de base biológica).	Ensaio em corpos de água adjacentes a rodovias tratadas.	Parâmetros geotécnicos dependentes do tipo comercial (dispersão ampla).	Ampla variação físico-química; ausência de fototoxicidade induzida por UV.	CL_{50} de 1,7 mg/L (altamente tóxico) a >16.000 mg/L (atóxico) em trutas. Grande variação de toxicidade encontrada.
Li et al., 2020	Carboximetilcelulose (CMC de papel de descarte enxertada com PVA/NVP).	Finas de carvão e solos estéreis de minas superficiais.	Dureza superficial de 98 HA; 88% de eficácia contra deflação de ventos de 15 m/s.	Parâmetros físico-químicos controlados; solubilização mineral parcial benéfica.	Livre de toxinas; biodegradação total em 20 dias sob sepultamento ativo.
Hu et al., 2020	Amido alcalino de batata enxertado com ácido poliacrílico e gelatina.	Particulados finos de carvão vegetal provenientes de pátios ferroviários.	Densa película superficial resiliente; redução de 57% de $PM_{2.5}$ e 56% de PM_{10}.	COT temporariamente elevado devido à rápida biodegradação da fração de amido.	Degradação de 52% em 30 dias e de 82% em 60 dias no solo ativo.

Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

3 CONCLUSÃO

A indústria de mineração emite MP na forma de poeira, principalmente por meio de vias não pavimentadas, utilizadas por equipamentos de grande porte para a movimentação de material. Devido ao tráfego intenso e contínuo de veículos, a geração de poeira é constante, o que resulta em alta disponibilidade de MP na superfície da via não pavimentada para entrar em suspensão na atmosfera.

Uma vez em suspensão, a poeira pode ser transportada por correntes de vento para áreas ao redor e sob a influência da mineração, causando múltiplos impactos negativos. Políticas públicas e regulamentos ambientais cada vez mais rigorosos destacam a importância de desenvolver e aplicar tecnologias para aumentar a eficiência da supressão com uso de água, de forma a atender aos padrões de emissão de poluentes em forma de poeira.

O Brasil possui uma resolução do CONAMA que permite às empresas gerir a emissão de MP em suas operações. Cabe salientar que a grande maioria das resoluções trata da qualidade do ar, que afeta a sociedade, a fauna e a flora. Para isso, usam níveis médios de concentração de MP na atmosfera, medidos nas áreas de influência da mineração, e não limites de emissão medidos diretamente na fonte geradora, como seria o caso de vias não pavimentadas.

A água apesar de sua baixa eficiência, é utilizada em larga escala como agente de supressão em ambientes de mineração, especialmente devido à sua disponibilidade e custo relativamente baixo. Apesar disso, em regiões com sazonalidade extrema do clima, como ocorre no norte do Brasil, a época em que o manejo da poeira é mais necessário coincide com a de escassez de recursos hídricos.

Em casos como o citado acima, pode-se aumentar a eficiência da água como agente supressor de poeira e racionalizar seu consumo com a adição de agentes químicos, como biopolímeros, formando uma solução aquosa. A racionalização do consumo de água, com o emprego de novas tecnologias, pode ser utilizada para obter incentivos junto a órgãos governamentais para a redução das tarifas hídricas e para sustentar os pedidos de licenças para operar. Entretanto, como discutido anteriormente, a simples adição de agentes químicos à água não garante aumento da eficiência de supressão. Além dos diversos métodos físicos e químicos de supressão que podem ser empregados, é preciso considerar os aspectos ambientais.

Os dados compilados nesse trabalho sobre o impacto dos agentes supressores no meio ambiente sugerem que a substituição de formulações químicas convencionais por alternativas biopoliméricas ou biogeotécnicas mitiga os riscos de toxicidade aquática e de contaminação por lixiviação de águas subterrâneas. Em contrapartida, os resultados apresentados por Kunz; Little e Barandino (2022) chamam a atenção para a variabilidade da toxicidade observada entre os produtos testados (incluindo 13 bioprodutos), e para a ausência de relação entre essa toxicidade e a categoria química indicada nos supressores testados. Apesar das recentes publicações, a literatura específica sobre os impactos

ambientais dos agentes químicos supressores ainda é escassa, especialmente sobre as formulações com polímeros e biopolímeros.

Nesse sentido, para garantir o sucesso das intervenções de controle de particulados, o projeto de engenharia deve selecionar o tipo de supressor de poeira, ajustar as taxas de aplicação e de diluição à mineralogia específica do solo local, instalar barreiras vegetadas para a contenção de sedimentos provenientes do escoamento pluvial e monitorar periodicamente a dureza mecânica da superfície.

REFERÊNCIAS

ADDO, J. Q.; SANDERS, T. G.; CHENARD, M. Road Dust Suppression: Effect on Maintenance Stability, Safety and the Environment Phases 1-3. Colorado State University. USA: 2024, p. 73. 2004. (MPC-04-156). Disponível em: https://www.ugpti.org/resources/reports/details.php?id=492&program=mpc. Acesso em: 12 ago. 2025.

ALI, S. H.; GIURCO, D.; ARNDT, N. et al. Mineral supply for sustainable development requires resource governance. Nature, v. 543, n. 7645, p. 367-372, 2017. DOI: 10.1038/nature21359.

ARBEX, M. A.; SANTOS, U. d. P.; MARTINS, L. C. et al. Air pollution and the respiratory system. Jornal Brasileiro de Pneumologia, v. 38, p. 643-655, 2012. DOI: https://doi.org/10.1590/S1806-37132012000500015.

BAGNOLD, R. A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes. Dordrecht: Springer Netherlands, 1941. 978-94-009-5684-1 978-94-009-5682-7. Disponível em: http://link.springer.com/10.1007/978-94-009-5682-7.

BARNES, D.; CONNOR, B. Managing Dust on Unpaved Roads and Airports. Alaska University Transportation Center. Alaska: 31 out. 2014. 2014. (NE/AUTC 14.14 and ADOT&PF 4000096). Disponível em: https://scholarworks.alaska.edu/handle/11122/8813. Acesso em: 12 ago. 2025.

BHATTACHAN, A.; OKIN, G. S.; ZHANG, J. et al. Characterizing the Role of Wind and Dust in Traffic Accidents in California. Geohealth, v. 3, n. 10, p. 328-336, 2019. DOI: 10.1029/2019GH000212.

BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Diário Oficial da União: seção Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm.

BRITO, P. H. F. d.; ARAÚJO, R. d. S.; MARINHO, G. Composição Química Do Material Particulado Atmosférico: Uma Revisão da Literatura. HOLOS, v. 4, p. 62-74, 2018. DOI: 10.15628/holos.2018.4648.

CHENG, Y. C.; WANG, C. P.; LIU, K. Y. et al. Towards sustainable management of polyacrylamide in soil-water environment: Occurrence, degradation, and risk. Sci Total Environ, v. 926, p. 171587, 2024. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.171587.

CONAMA, C. N. d. M. A. Resolução nº 05/1989, de 15 de junho de 1989. Brasil: Diário Oficial da União. 1989. p. Disponível em: https://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/MMA/RE0005-150689.PDF. Acesso em: 29 set. 2025.

CONAMA, C. N. d. M. A. Resolução nº 506, de 5 de julho de 2024. Brasil: Diário Ofical da união. 2024. 133 p. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/atos-normativos-sistema. Acesso em: 10 nov. 2024.

DENBY, B. R.; KUPIAINEN, K. J.; GUSTAFSSON, M. Chapter 9 - Review of Road Dust Emissions. In: AMATO, F. (Ed.). Non-Exhaust Emissions: Academic Press, 2018. p. 183-203. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128117705000091.

DNPM, D. N. d. P. M. Portaria nº 237, de 24 de outubro de 2001. Brasil: Diário Oficial da União. 2001. p. Disponível em: https://www.dnpm-pe.gov.br/Legisla/nrm_00.php. Acesso em: 22 ago. 2025.

DONG, H.; YU, H.; XU, R. et al. Review and prospects of mining chemical dust suppressant: classification and mechanisms. Environmental Science and Pollution Research, v. 30, n. 1, p. 18-35, 2023. DOI: 10.1007/s11356-022-23840-w.

EUROPEAN PARLIAMENT, C. o. T. E. Ambient air quality and cleaner air for Europe. DIRECTIVE (EU) 2024/2881 seção 23 out. 2024, Disponível em: https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/2881/oj/eng.

FREER, J.; LÜBECK, M.; SIEGER, J. L. et al. Effectiveness of Food Processing By-Products as Dust Suppressants for Exposed Mine Soils: Results from Laboratory Experiments and Field Trials. Applied Sciences, v. 12, n. 22, 2022. DOI: 10.3390/app122211551.

FUSSELL, J. C.; FRANKLIN, M.; GREEN, D. C. et al. A Review of Road Traffic-Derived Non-Exhaust Particles: Emissions, Physicochemical Characteristics, Health Risks, and Mitigation Measures. Environ Sci Technol, v. 56, n. 11, p. 6813-6835, 2022. DOI: 10.1021/acs.est.2c01072.

GÉRARDIN, F.; MIDOUX, N. Attenuation of road dust emissions caused by industrial vehicle traffic. Atmospheric Environment, v. 127, p. 46-54, 2016. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2015.12.006.

GONZALEZ, A.; AITKEN, D.; HEITZER, C. et al. Reducing mine water use in arid areas through the use of a byproduct road dust suppressant. Journal of Cleaner Production, v. 230, p. 46-54, 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.05.088.

HICHRI, Y.; CEREZO, V.; DO, M. T. et al. Effect of particles' characteristics and road surface's texture on the tire/road friction. Surface Topography: Metrology and Properties, v. 6, n. 3, p. 034014, 2018. DOI: 10.1088/2051-672X/aad063.

HORTA, S. L. L. Aspersão fixa: tecnologia eficiente gera redução de custos no controle de poeira. Revista Minérios & Minerales, 2016. https://revistaminerios.com.br/aspersao-fixa-tecnologia-eficiente-gera-reducao-de-custos-no-controle-de-poeira/

HU, S. The Clean Air Act 101. 2022. Disponível em: https://www.nrdc.org/stories/clean-air-act-101.

HU, Y.; SHI, L.; SHAN, Z. et al. Efficient removal of atmospheric dust by a suppressant made of potato starch, polyacrylic acid and gelatin. Environmental Chemistry Letters, v. 18, n. 5, p. 1701-1711, 2020. DOI: 10.1007/s10311-020-01025-6.

KACER, J.; ALTMAIER, R.; CWIERTNY, D. M. et al. Unpaved road particulate matter emission rates and vehicle-induced transient plume characteristics. Environmental Science: Atmosphere, v. 4, n. 9, p. 1042-1050, 2024. DOI: 10.1039/d4ea00055b.

KIM, K.-H.; KABIR, E.; KABIR, S. A review on the human health impact of airborne particulate matter. Environment International, v. 74, p. 136-143, 2015. DOI: 10.1016/j.envint.2014.10.005.

KUNZ, B. K.; LITTLE, E. E.; BARANDINO, V. L. Aquatic Toxicity of Chemical Road Dust Suppressants to Freshwater Organisms. Arch Environ Contam Toxicol, v. 82, n. 2, p. 294-305, 2022. DOI: 10.1007/s00244-020-00806-y.

LE VERN, M.; RAZAKAMANANTSOA, A.; MURZYN, F. et al. Effects of soil surface degradation and vehicle momentum on dust emissions and visibility reduction from unpaved roads. Transportation Geotechnics, v. 37, p. 20, 2022. DOI: 10.1016/j.trgeo.2022.100842.

LI, D.; CHEN, J.; ZHANG, Y. et al. Dust emissions from urban roads using the AP-42 and TRAKER methods: A case study. Atmospheric Pollution Research, v. 12, n. 5, 2021. DOI: 10.1016/j.apr.2021.03.014.

LI, S.; ZHAO, B.; LIN, H. et al. Review and prospects of surfactant-enhanced spray dust suppression: Mechanisms and effectiveness. Process Safety and Environmental Protection, v. 154, p. 410-424, 2021. DOI: 10.1016/j.psep.2021.08.037.

LI, S.; ZHOU, G.; LIU, Z. et al. Synthesis and performance characteristics of a new ecofriendly crust-dust suppressant extracted from waste paper for surface mines. Journal of Cleaner Production, v. 258, 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120620.

LIAO, R.; WYPYCH, P.; PAN, R. et al. Dust Suppression Efficiency of Spraying Systems - A Review. 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/353559598.

MALUF, A. Padrões Nacionais de Qualidade do Ar Texto Aprovado CTQA e validado pela CTAJe e Mudança do Clima. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, 2024. https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/noticias/conama-aprova-prazos-para-novos-padroes-de-qualidade-do-ar/copy_of_ApresentaonoConamaAdalbertoMaluf.pdf/view

NAZARENO, G. C.; SILVA, L. A. d.; BARROS, A. J. d. et al. Estudo de Caso - Poeira nas Operações de Mina: Alta Eficiência
no Controle de Particulados Através do Uso de Supressor Natural. Observatorio de La Economía Latinoamericana, https://www.eumed.net/rev/oel/2018/10/controle-particulados-supressornatural.htmlDisponível em: https://www.eumed.net/rev/oel/2018/10/controle-particulados-supressornatural.html. Acesso em: 20 mai. 2025.

NYLEN, J.; SHEEHAN, M. The impact of moisture on lead concentrate powder dust emissions in ship-loading operations. Powder Technology, v. 394, p. 353-362, 2021. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.08.069.

OLIVEIRA, F. L. d.; DIAS, S. d. C. Surfactantes sintéticos e biossurfactantes: vantagens e desvantagens. Química Nova na Escola, v. 39, n. 3, 2017. DOI: 10.21577/0104-8899.20160079.

PANEBIANCO, J. E.; BUSCHIAZZO, F. A. R. F. D. E. Influence of friction velocity and saltation intensity on the particle-size distribution of dust (PM32) emitted from an agricultural soil. Earth Surface Processes and Landforms, p. 1176-1187, 2022. DOI: 10.1002/esp.5541.

PARVEJ, S.; NAIK, D. L.; SAJID, H. U. et al. Fugitive Dust Suppression in Unpaved Roads: State of the Art Research Review. Sustainability, v. 13, n. 4, p. 22, 2021. DOI: 10.3390/SU13042399.

REHMAN, G.; KHATTAK, I.; HAMAYUN, M. et al. Impacts of mining on local fauna of wildlife in District Mardan & District Mohmand Khyber Pakhtunkhwa Pakistan. Brazilian Journal of Biology, v. 84, p. e251733, 2021. DOI: 10.1590/1519-6984.251733.

RIENDA, I. C.; ALVES, C. A. Road dust resuspension: A review. Atmospheric Research, v. 261, 2021. DOI: 10.1016/j.atmosres.2021.105740.

SIEGER, J. L.; LOTTERMOSER, B. G.; FREER, J. Effectiveness of Protein and Polysaccharide Biopolymers as Dust Suppressants on Mine Soils: Results from Wind Tunnel and Penetrometer Testing. Applied Sciences, v. 13, n. 7, 2023. DOI: 10.3390/app13074158.

SILVA, A. J. C. d. Desenvolvimento e aplicação de um túnel de vento de secagem para minérios. Orientador: MESQUITA, A. L. A. 2021. 100 f. Dissertação (Dissertação) - Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, Universidade Federal do Pará, Tucuruí - PA. Disponível em: https://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/16405. Acesso em: 21 jun. 2025

U.S. EPA, U. S. E. P. A. 13.2.2 Unpaved Roads. Washington, DC: Office of Air and Radiation. 2006. 15 p. Disponível em: https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-fifth-edition-volume-i-chapter-13-miscellaneous-0.

U.S. EPA, U. S. E. P. A. 13.2.5 Industrial Wind Erosion. Washington, DC: Office of Air and Radiation. 2020. 1-15 p. Disponível em: https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-fifth-edition-volume-i-chapter-13-miscellaneous-0.

U.S. EPA, U. S. E. P. A. Summary of the Clean Air Act. Summary of the Clean Air Act, 2013. Overviews and Factsheets. https://www.epa.gov/laws-regulations/summary-clean-air-act files/133/summary-clean-air-act.html

VELASCO, R. P.; JAROSIŃSKA, D. Update of the WHO global air quality guidelines: Systematic reviews – An introduction. Environment International, v. 170, p. 107556, 2022. DOI: 10.1016/j.envint.2022.107556.

VINCENT, D. Airborne particulate matter and their health effects. França, 2025. Disponível em: https://www.encyclopedie-environnement.org/en/health/airborne-particulate-health-effects-2/. Acesso em: 22/06/2025.

WATSON, J.; CHOW, J.; PACE, T. G. Fugitive dust emissions. In: Air Pollution Engineering Manual. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2000. p. 117-135. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/235341819_Fugitive_dust_emissions.

WHO, W. H. O. Air quality guidelines, global update 2005. Europe, UK: WHO Regional Office for Europe, 2006. 493 p. 9789289021920. Disponível em: http://who.int/publications/i/item/WHO-SDE-PHE-OEH-06.02.

WHO, W. H. O. Ambient Air Pollution: A Global Assessment of Exposure and Burden of Disease. Working Papers, 2016. https://ideas.repec.org//p/ess/wpaper/id11368.html

WHO, W. H. O. Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM2.5 and PM10), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide. 1st. ed. Geneva: World Health Organization, 2021. 1 p. 978-92-4-003422-8. Disponível em: https://iris.who.int/handle/10665/345329.

XU, Y.; LIU, M.; MA, B. et al. Experimental Study on the Effects of Environmentally Friendly Composite Dust Suppressant on Soil Properties. Applied Sciences, v. 15, n. 6, 2025. DOI: 10.3390/app15062998.

YAN, J.; YANG, F.; ZHANG, W. et al. Characterization of road dust and formulation of a molasses-based dust suppressant for heavy-duty haul roads in open-pit coal mine. Atmospheric Pollution Research, v. 16, n. 9, 2025. DOI: 10.1016/j.apr.2025.102589.

YOO, H.; CHO, J.; HONG, S. et al. Characteristics of Suspended Road Dust According to Vehicle Driving Patterns in an Urban Area and PM10 Content in Silt. Atmosphere, v. 15, n. 1, p. 5, 2024. DOI: 10.3390/atmos15010005.

ZHANG, Q.; FAN, L.; WANG, H. et al. A review of physical and chemical methods to improve the performance of water for dust reduction. Process Safety and Environmental Protection, v. 166, p. 86-98, 2022. DOI: 10.1016/j.psep.2022.07.065.

ZHANG, X.; ZHANG, C.; LI, W. et al. Dust emission efficiency of compacted soils as a function of amount of abrader and soil texture. Geoderma, v. 435, 2023. DOI: 10.1016/j.geoderma.2023.116503.

ZHENG, C.; QIAN, S.; JIANG, B. et al. Experimental Investigation on Bituminite Dust Suppression Characteristics of a Bonding-Wetting Composite Dust Suppressant. ACS Omega, v. 9, n. 33, p. 35990-35998, 2024. DOI: 10.1021/acsomega.4c06012.