

CHUVA ÁCIDA NAS FLORESTAS: MITIGAÇÃO DE DANOS E MEDIDAS PALIATIVAS SOCIOINDUSTRIAIS

ACID RAIN IN FORESTS: DAMAGE MITIGATION AND SOCIO-INDUSTRIAL PALLIATIVE MEASURES

LLUVIA ÁCIDA EN LOS BOSQUES: MITIGACIÓN DE DAÑOS Y MEDIDAS PALIATIVAS SOCIOINDUSTRIALES

Jessé Nascimento¹
Priscila Dayane Fernandes²
Flavio Tajima³

Resumo

O presente trabalho analisa a chuva ácida, com foco na mitigação de danos e em medidas paliativas socio industriais, passíveis de serem adotadas na proteção dos ecossistemas contra os efeitos nocivos da acidificação antropogênica. A problemática consiste em identificar as ações e ferramentas que podem ser adotadas pela indústria, pelos governos e pela sociedade para mitigar os efeitos da chuva ácida nas florestas a níveis aceitáveis e seguros, em caráter provisório, até que os combustíveis fósseis sejam substituídos por uma matriz energética limpa. Essa questão se mostra relevante, pois, embora a intensidade da acidificação dos solos no planeta tenha diminuído devido a esforços no controle da poluição, essa precipitação anômala ainda é recorrente nos noticiários em regiões industriais. O objetivo central da pesquisa consiste em identificar meios, técnicas e/ou recursos para inibir satisfatoriamente os danos causados pela precipitação ácida na natureza, em caráter paliativo, até que a indústria substitua definitivamente os combustíveis fósseis por fontes limpas e renováveis de energia. A pesquisa foi conduzida por meio dos seguintes procedimentos: uma pesquisa mista, quantitativa e qualitativa, para a obtenção das informações necessárias, com uso da técnica de pesquisa bibliográfica, por meio de um levantamento documental acadêmico. Conclui-se que já existem ferramentas disponíveis no planeta para a mitigação dos efeitos danosos da chuva ácida a níveis que cumpram a meta de segurança a que a pesquisa se destina. No entanto, essas ferramentas não têm sido utilizadas em sua plenitude em todas as frentes de combate à acidificação por poluentes atmosféricos.

Palavras-chave: mitigação; deposição ácida; combustíveis fósseis; chuva ácida.

Abstract

This study analyzes acid rain, focusing on damage mitigation and socio-industrial palliative measures that can be adopted to protect ecosystems from the harmful effects of anthropogenic acidification. The issue lies in identifying actions and tools that industries, governments, and society can implement to mitigate the effects of acid rain in forests to acceptable and safe levels, temporarily, until fossil fuels are replaced by a clean energy matrix. This topic is relevant because, although soil acidification intensity has decreased globally due to pollution control efforts, this anomalous precipitation still frequently appears in news reports from industrial regions. The main objective of the research is to identify means, techniques, and/or resources to satisfactorily inhibit the damage caused by acid precipitation in nature, in a palliative manner, until industries definitively replace fossil fuels with clean and renewable energy sources. The research was conducted through the following procedures: a mixed-method approach, both quantitative and qualitative, to gather the necessary information, using bibliographic research techniques through academic document review. It is concluded that tools are already available worldwide to mitigate the harmful effects of acid rain to levels that meet the safety goals of this study. However, these tools have not been fully utilized across all fronts in the fight against acidification caused by atmospheric pollutants.

Keywords: mitigation; acid deposition; fossil fuels; acid rain.

¹ Bacharelado em Química no Centro Universitário Internacional UNINTER.

² Professora no Centro Universitário Internacional UNINTER.

³ Professora no Centro Universitário Internacional UNINTER.

Resumen

El presente estudio analiza la lluvia ácida, con énfasis en la mitigación de daños y en medidas paliativas socioindustriales que pueden adoptarse para proteger los ecosistemas de los efectos nocivos de la acidificación antropogénica. El problema consiste en identificar acciones y herramientas que puedan ser implementadas por la industria, los gobiernos y la sociedad para mitigar los efectos de la lluvia ácida en los bosques a niveles aceptables y seguros, de manera provisional, hasta que los combustibles fósiles sean reemplazados por una matriz energética limpia. Esta cuestión es relevante, ya que, aunque la intensidad de la acidificación de los suelos ha disminuido en el planeta gracias a los esfuerzos de control de la contaminación, esta precipitación anómala sigue apareciendo con frecuencia en los noticieros de regiones industriales. El objetivo principal de la investigación es identificar medios, técnicas y/o recursos para inhibir de manera satisfactoria los daños causados por la precipitación ácida en la naturaleza, de forma paliativa, hasta que la industria sustituya definitivamente los combustibles fósiles por fuentes de energía limpias y renovables. La investigación se llevó a cabo mediante los siguientes procedimientos: un enfoque mixto, cuantitativo y cualitativo, para obtener la información necesaria, utilizando técnicas de investigación bibliográfica mediante revisión documental académica. Se concluye que ya existen herramientas disponibles en el planeta para mitigar los efectos dañinos de la lluvia ácida a niveles que cumplen con los objetivos de seguridad propuestos por esta investigación. Sin embargo, estas herramientas no se han utilizado plenamente en todos los frentes de combate contra la acidificación por contaminantes atmosféricos.

Palabras clave: mitigación; deposición ácida; combustibles fósiles; lluvia ácida.

1 Introdução

A chuva ácida pode causar degradação severa dos ecossistemas florestais, resultando na morte da vegetação e na desertificação do solo. Também pode deixar lagos e rios totalmente sem vida. Além disso, pode causar problemas fatais de saúde em pessoas por meio da ingestão de metais pesados. Monumentos e prédios feitos de pedra calcária ou mármore sofrem corrosão, perdendo valor histórico e financeiro. A agricultura, a pesca e o turismo são prejudicados (Brena, 2009). Toda essa problemática precisa ser resolvida desde a sua raiz, mas, até hoje, nunca se conseguiu eliminar sua fonte: os combustíveis fósseis. Enquanto não se elimina a fonte principal da chuva ácida, torna-se necessário adotar medidas paliativas para mitigar seus impactos ambientais. Investiga-se a possibilidade de minimizar os impactos ambientais da chuva ácida a um nível seguro para as matas, lagos, rios e a saúde humana.

Diante desse cenário de impactos ambientais significativos, torna-se necessário investigar estratégias que possam mitigar os efeitos da chuva ácida, mesmo que de forma paliativa. Este estudo tem como objetivo identificar meios, técnicas e/ou recursos realmente eficazes para inibir satisfatoriamente a acidificação antropogênica das florestas, em caráter paliativo, até que, finalmente, a indústria alcance a substituição definitiva dos combustíveis fósseis por fontes limpas e renováveis como matriz energética. Para esse fim, a pesquisa foi conduzida de forma abrangente e rigorosa em livros, periódicos, sites de notícias, sites governamentais, teses e dissertações acadêmicas, sendo todas essas informações coletadas e organizadas em um artigo científico.

Para alcançar esse objetivo, foi adotada uma abordagem metodológica que permitisse

reunir e analisar informações relevantes sobre o tema. A metodologia adotada nesta pesquisa baseou-se em um levantamento bibliográfico, estruturado a partir de uma abordagem mista (quantitativa e qualitativa), justificando-se tanto pela inviabilidade da realização de pesquisa de campo, em razão da distância geográfica entre o autor e as áreas afetadas, quanto pela ampla disponibilidade de estudos e publicações já consolidados sobre o tema.

A fundamentação teórica da pesquisa apoia-se em obras que abordam os efeitos e as soluções para a chuva ácida. Esta pesquisa está fundamentada na obra de Baines (1993), um livro educativo que aborda os fenômenos da chuva ácida e seus impactos no meio ambiente e na sociedade. A obra também discute possíveis soluções e estratégias atenuantes, como o uso de tecnologias menos poluentes, a adoção de energias renováveis e a necessidade de políticas ambientais rigorosas. A pesquisa também está fundamentada na obra de Brena (2009), um livro que explora de forma aprofundada os impactos da chuva ácida nos ecossistemas florestais brasileiros. Muito bem referenciada em obras americanas, e baseada em estudos nacionais, a obra, além de detalhar os efeitos adversos, apresenta medidas para mitigar os danos causados pela chuva ácida, incluindo a redução das emissões de poluentes e a recuperação de áreas degradadas.

Com base nessa fundamentação, o presente artigo está estruturado em seis tópicos principais, conforme descrito a seguir. O tópico 1 trata do tema: “O que é chuva ácida”; o tópico 1.2 aborda: “A chuva e o limite de acidez tolerável”; o tópico 2 discute: “Esforço global no combate à chuva ácida e seus desafios”; o tópico 3 apresenta: “Locais críticos”; o tópico 4 trata de: “Mitigação das emissões poluentes nas fontes estacionárias”; o tópico 5 aborda: “Mitigação das emissões poluentes nas fontes móveis”; e o tópico 6 trata de: “A calagem como aliada na mitigação da chuva ácida”.

2 Metodologia

A pesquisa adotou uma abordagem mista, combinando métodos qualitativos e quantitativos, com o objetivo de realizar uma análise mais abrangente e aprofundada do fenômeno da chuva ácida. A abordagem qualitativa permitiu a interpretação crítica de estudos de caso, legislações ambientais e estratégias de mitigação descritas na literatura. Já a abordagem quantitativa foi utilizada para analisar dados numéricos disponíveis em relatórios técnicos e bases de dados institucionais, como índices de emissão de poluentes, níveis de pH e estatísticas de impacto ambiental.

As obras que fundamentaram esta pesquisa não foram selecionadas com base em um

critério voltado à definição detalhada do que é a chuva ácida e de como ela se forma, mas sim pela ênfase na problemática que se busca responder, sob a perspectiva da proteção ao meio ambiente e das técnicas capazes de minimizar os danos ambientais. Foram selecionadas para esta pesquisa obras publicadas entre 1993 e 2025. No entanto, as que detalham tecnologias mitigadoras de poluentes limitaram-se aos últimos 8 anos de publicação. Os termos de busca incluíram “chuva ácida”, “mitigação de poluentes”, “calagem florestal”, “calagem em lagos” e “conscientização ambiental”.

As principais bases de pesquisa foram Google Acadêmico e *Scielo*, que proveram fontes *on-line* específicas sobre chuva ácida, como Brena (2009), além de artigos de fontes governamentais como CETESB (2017) e CETESB (2021). Além disso, foram utilizadas obras físicas sob a temática da química ambiental e, mais especificamente, da chuva ácida, com destaque para Baines (1993). Para a seleção das obras, foram incluídos apenas textos com acesso completo, relacionados ao tema da pesquisa.

3 Revisão bibliográfica/estado da arte

A relação entre combustíveis fósseis e os danos às florestas começou a ser observada na década de 1950, quando cientistas europeus notaram que grandes áreas de florestas estavam enfraquecendo e morrendo, especialmente na Escandinávia. Pesquisas revelaram que a causa não eram pragas, mas sim a acidez incomum da chuva que caía sobre essas regiões. Estudos posteriores identificaram que a queima de carvão e petróleo em países industrializados, como Inglaterra e Alemanha, estava liberando grandes quantidades de dióxidos de enxofre e óxidos de nitrogênio na atmosfera, e que eram a causa da acidez da chuva. Esses poluentes viajavam centenas de quilômetros, causando a morte de florestas e de milhares de lagos nos países escandinavos. Essa descoberta foi um marco importante na compreensão dos efeitos da poluição ácida sobre os ecossistemas naturais (Brena, 2009).

3.1 Chuva ácida: definição

A denominação “chuva ácida” é uma simplificação dos diversos tipos de precipitações ácidas existentes. Convencionou-se que a expressão “deposição ácida” seria mais apropriada, por abranger outras formas de precipitação diferentes da chuva, como neve, neblina, granizo e deposição seca. Dependendo de alguns fatores, essas formas de precipitação ácida podem ser ainda mais danosas à natureza, aos materiais e à saúde humana do que a própria chuva ácida (Brena, 2009). O termo “deposição ácida” será utilizado, majoritariamente, ao longo deste trabalho.

A queima de combustíveis fósseis, como carvão e derivados do petróleo, gera, entre outros poluentes, dióxido de enxofre (SO_2) e óxidos de nitrogênio (NO_x). Esses óxidos reagem com o vapor d'água atmosférico, produzindo os ácidos sulfúrico (H_2SO_4) e nítrico (HNO_3). À precipitação dessa solução ácida dá-se o nome de chuva ácida (Baines, 1993). Dependendo do grau de acidez dessa precipitação, ela pode lixiviar metais tóxicos do solo, que serão absorvidos pelas raízes das plantas, podendo causar até a morte de florestas inteiras. Animais que se alimentam dessas plantas também são envenenados aos poucos, incluindo os seres humanos. Mesmo a carne de gado nos açougues pode estar contaminada. Em lagos e rios, a água torna-se imprópria para a sobrevivência da fauna aquática, tanto pela acidificação direta quanto pelo acúmulo de metais tóxicos. Esses metais podem ser ingeridos pelas pessoas diretamente, por meio do consumo da água, ou indiretamente, por meio da ingestão de peixes contaminados, causando sérios problemas de saúde. Os prejuízos estendem-se também aos materiais com quem essa chuva entra em contato, como concreto, metais, tintas, madeira, tecidos etc. (Brena, 2009).

As usinas termelétricas geralmente são as fontes estacionárias de combustão que mais liberam SO_2 na atmosfera, por utilizarem combustíveis fósseis ricos em enxofre, como carvão mineral, óleo combustível e óleo diesel, além de funcionarem 24 horas por dia. Logo em seguida, vêm os fornos e caldeiras das fábricas. Ambos liberam NO_x , mas em menor quantidade. Em relação ao NO_x , os maiores difusores são os escapamentos dos carros, seguidos da indústria, pois esses óxidos são subprodutos da queima de combustíveis fósseis, como a gasolina, o óleo e o gás natural (Brena, 2009).

3.1.1 A chuva e o limite de acidez tolerável

Até que ponto o pH dos solos, lagos e cursos d'água pode decrescer sem afetar a biota de um ecossistema é uma questão complexa de responder, pois cada ser vivo possui uma adaptação própria às variações de pH, com uma margem ideal propícia à sua sobrevivência e bem-estar. Alguns seres podem ter uma tolerância a variações maiores do que outros. O problema está no fato de que a sobrevivência de muitas espécies pode depender da sobrevivência de outras, que podem ser menos tolerantes. Um lago, sob condições naturais, possui pH ao redor de 6,5. Crustáceos, moluscos, insetos e plânctons são os primeiros a terem sua reprodução comprometida em um pH abaixo de 5,8. Caso a acidez fuja dessa margem de segurança, toda uma cadeia alimentar será afetada, mesmo que os seres do topo da cadeia sejam mais tolerantes (Baines, 1993).

A chuva isenta de contaminação ácida possui um pH em torno de 5,6, devido ao CO_2

atmosférico dissolvido. Boa parte dos autores denomina 'chuva ácida' aquela que apresenta pH abaixo de 5, quando há potencial para um desequilíbrio ambiental considerável. Se essa classificação for considerada, o pH da chuva não deveria decrescer mais que seis décimos de unidade. Assim, um pH acima de 5 seria uma boa meta de acidez da chuva a ser alcançada. Mas é importante deixar claro que, se a média aritmética do pH das precipitações de uma região está muito abaixo do pH 5,6, é muito provável que há algum outro ácido mais forte, diferente do CO₂, dissolvido na chuva. Em vista disso, o pH médio próximo de 5,6 é o ideal, com picos ocasionais de acidez próximos do pH 5 não apresentando grandes riscos (Spiro; Stigliani, 2009). Porém, outro fator a ser considerado para determinar um limite aceitável de acidez da chuva, visando à proteção das florestas, é a determinação da capacidade tamponante de cada solo.

A capacidade tamponante do solo é a propriedade que o solo possui de neutralizar a acidez da chuva, evitando variações no pH. Os carbonatos presentes em solos calcários são os minerais mais eficientes na neutralização, mas a matéria orgânica e a argila também desempenham um papel importante nessa função (Spiro; Stigliani, 2009). O cálculo da capacidade tamponante do solo é muito importante, pois é ele que determina quanto de carga ácida um solo pode neutralizar antes que o alumínio e outros metais tóxicos comecem a se dissolver, já que esses metais se dissolvem apenas em meio ácido.

3.1.2 Esforço global no combate à chuva ácida e seus desafios

Os cientistas avaliavam, na década de 1990, que o mundo como um todo precisava reduzir as emissões de NO_x e SO₂ em 80% ou 90% para que a acidificação das florestas fosse contida e fosse possível sua lenta restauração (Baines, 1993). Nas décadas de 1980, 1990 e 2000, apenas os Estados Unidos reduziram as emissões de SO₂ em aproximadamente 40% (Spiro; Stigliani, 2009). E o banco de dados da OCDE (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico) aponta que os países membros da organização reduziram em mais de 55% as emissões de NO_x entre 1990 e 2021 (OCDE, 2024). Logo, não se pode afirmar que os países industrializados têm sido inertes no combate aos contaminantes que são vetores da chuva ácida. A questão é se esse esforço será suficiente para aumentar o pH das precipitações a um nível seguro para as plantas, os animais e os seres humanos, ou se será suficiente apenas para desacelerar a acidificação do solo, tornando-a mais lenta, de forma que os danos apareçam somente nas próximas gerações.

Conforme Kotz *et al.* (2016), a demanda global por energia quase triplicou nas últimas quatro décadas, e a previsão é que essa demanda possa triplicar novamente nos próximos

cinquenta anos. E, em virtude do crescimento industrial e do aumento da população nos países em desenvolvimento, esses países, por falta de políticas ambientais, poluem mais do que os de primeiro mundo, emitindo 61% dos poluentes atmosféricos do planeta, segundo dados da (OCDE, 2024).

3.2 Geolocalização e impactos da deposição ácida.

A deposição ácida é um fenômeno limitado geograficamente. Isso significa que a intensidade dos danos que ela causa varia conforme a localização e depende de diversos fatores, como a quantidade de poluentes emitidos, as condições atmosféricas, a direção dos ventos, a altitude, a distância da origem dos poluentes, a capacidade tamponante do solo, entre outros. Por esse motivo, as metas de mitigação dos poluentes devem ser específicas para cada região, por meio de um estudo interdisciplinar rigoroso, com pesquisa amostral e análise estatística. O mapeamento das áreas mais propensas à acidificação é fundamental para a redução de danos. Para isso, conhecer a direção dos ventos predominantes em torno de cada fonte poluidora estacionária é essencial. O estudo da disseminação de poluentes é bastante complexo, e o uso de monitoramento atmosférico por satélite é indispensável (Brena, 2009).

Regiões montanhosas são muito mais propensas a sofrer com os prejuízos da deposição ácida. Nuvens ou neblina ácidas permanecem em contato frequente com as árvores nas montanhas, e esse contato é muito mais prolongado do que seria em uma breve chuva. Isso faz com que as folhas e o solo sejam banhados por essa solução ácida por muito mais tempo. Além disso, o solo em serras e montanhas costuma ser menos profundo, o que expõe as raízes mais facilmente a metais tóxicos lixiviados pelos ácidos. Brena (2009) afirma que a taxa anual de deposição ácida em regiões montanhosas pode ser até dez vezes maior do que em altitudes mais baixas. Isso explica por que as fotografias mais icônicas de florestas devastadas pela deposição ácida são imagens de florestas de altitude.

Locais que estão na direção dos ventos predominantes oriundos de regiões industrializadas e/ou com forte tráfego veicular são muito propensos a receber precipitação ácida (Spiro; Stigliani, 2009). Montanhas e serras situadas na rota desses ventos carregados de poluição têm muito mais probabilidade de serem atingidas pela deposição ácida. As montanhas dificultam a dispersão desses poluentes, tornando-os mais concentrados e, conseqüentemente, mais ácidos (Brena, 2009).

Os poluentes se dispersam mais facilmente na atmosfera quando são emitidos em áreas sem grandes obstáculos topográficos, como montanhas e serras. Em vales, boa parte desses

contaminantes permanecem como que ‘represados’, o que aumenta significativamente sua concentração e, portanto, seu potencial de danos às florestas. É importante que fontes poluidoras estacionárias não sejam estabelecidas nesses vales ou próximas a locais de elevada altitude, exceto sob a condição de que se submetam a metas mais rigorosas quanto aos limites de emissões poluentes, bem como a uma fiscalização mais rígida e frequente (Galvão, 1996).

A capacidade tamponante do solo também é um fator que determina o quão vulnerável será uma região aos efeitos da poluição ácida. Existem solos levemente ácidos, neutros e alcalinos. Os solos alcalinos, mais favoráveis às plantas, têm uma grande capacidade, embora limitada, de neutralizar precipitações ácidas. Já os solos levemente ácidos e neutros não possuem essa capacidade e, portanto, merecem atenção especial quanto à sua proteção (Brena, 2009).

3.3 Mitigação das emissões poluentes nas fontes estacionárias.

As Resoluções CONAMA 382/07 e 436/11 estabelecem limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos permitidos para cada fonte estacionária de poluentes no Brasil. Com o objetivo de cumprir as metas de emissão estabelecidas, a CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo) elaborou o Plano de Redução de Emissão de Fontes Estacionárias (PREFE), que tem como objetivo o planejamento de ações para o atendimento aos padrões de qualidade do ar no Estado de São Paulo. Esse documento apresenta um guia com as tecnologias e métodos atualmente conhecidos no mundo e considerados os mais eficazes no controle da emissão de poluentes.

Esse guia, chamado Melhor Tecnologia Prática Disponível (MTPD), tem como função orientar sobre as principais MTPDs que podem ser utilizadas pelos setores produtivos para o cumprimento das exigências relativas aos limites de emissão de poluentes. Ele contempla os poluentes material particulado (MP), óxido de enxofre (SO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x) e compostos orgânicos voláteis. Entretanto, o guia MTPD não abrange tecnologias inovadoras ou ainda em fase de testes, mas apenas aquelas que já estão sendo utilizadas com êxito nos Estados Unidos e na Europa.

As tecnologias MTPD vigentes no controle das emissões poluentes geralmente não se aplicam ao SO₂ e ao NO_x simultaneamente, principalmente devido a propriedades físico-químicas distintas desses óxidos. Caso a fonte poluidora precise combater esses dois contaminantes, provavelmente será necessário aplicar tecnologias diferentes para cada um. Além disso, em muitos casos, é preciso combinar duas tecnologias para aumentar a eficiência

do processo de redução de apenas um poluente, o que, obviamente, encarece ainda mais o processo. A primeira medida a ser ponderada para fontes de combustão é garantir que não haja entrada de ar em excesso ou em falta, buscando trabalhar com a quantidade adequada de ar para a queima mais completa possível (CETESB, 2017).

A formação de óxidos de nitrogênio ocorre basicamente por dois mecanismos: a presença de nitrogênio no combustível e a oxidação do nitrogênio atmosférico em altas temperaturas de combustão (NO_x térmico) (CETESB, 2017). O NO_x térmico resulta da reação, em temperaturas elevadas (acima de 900°C), entre o O_2 e o N_2 atmosféricos presentes no ar de combustão, sendo o principal contribuinte para a formação do NO_x . Portanto, a formação do NO_x térmico depende da temperatura da chama, mas também da concentração de oxigênio (Kotz *et al.*, 2016). Algumas tecnologias de redução do NO_x atuam sobre essas duas variáveis, diminuindo a temperatura de combustão e/ou controlando a disponibilidade de oxigênio, a fim de otimizar a queima do combustível e desfavorecer a formação do poluente.

O SO_2 é formado diretamente pela oxidação do enxofre presente no combustível, sendo o carvão o que mais contém esse contaminante (Manahan, 2013). Sua formação não depende da temperatura de queima nem do excesso de oxigênio. Logo, as tecnologias utilizadas para minimizar o NO_x não se aplicam, infelizmente, ao SO_2 . A dessulfurização nas refinarias, realizada antes da distribuição, é bastante eficiente para os derivados do petróleo, mas esse processo não isenta as fontes de combustão da responsabilidade de eliminar ainda mais o enxofre residual durante a queima ou na pós-queima, a fim de atender às metas nacionais ou internacionais de controle de poluentes.

Em relação ao carvão, mesmo após a dessulfurização, ele ainda é distribuído com alto teor de enxofre. O empreendedor deve encontrar o método mais otimizado possível para a eliminação do enxofre residual, tendo também a opção de adquirir um carvão com menor teor de enxofre (CETESB, 2017).

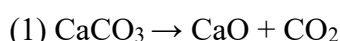
3.3.1 Mitigação do SO_2

Lavadores de gases: os gases de combustão são dissolvidos em um líquido (solução alcalina), e seus ácidos são neutralizados. O líquido resultante deve ser submetido a um processo de tratamento de águas residuais, e a matéria insolúvel é então recolhida por sedimentação ou filtração. Após a remoção do enxofre, os gases tratados são liberados na atmosfera com menor impacto ambiental (CETESB, 2017).

Lavador de gases tipo Venturi: utiliza o mesmo princípio básico dos lavadores de

gases comuns, com a diferença de que os gases são injetados na água em alta velocidade, atomizando o líquido e aumentando sua superfície de contato para maior eficiência na absorção. A eficiência desse processo é de cerca de 90% na remoção do SO₂ (CETESB, 2017).

Combustão em leito fluidizado (para combustível sólido): essa técnica é utilizada para a remoção de enxofre do carvão mineral durante a queima. O carvão granular é queimado em um leito de calcário ou dolomita, mantido em uma condição praticamente fluidica pela injeção de ar. O calor calcina o calcário, e a cal produzida absorve o SO₂ conforme as equações (1) e (2) a seguir (Manahan, 2013).



Essa técnica é versátil e pode desfavorecer o meio pelo qual o NO_x térmico se forma. O combustível é queimado a temperaturas entre 800 e 900 °C, que são significativamente mais baixas do que as dos fornos e caldeiras convencionais (1200–1500 °C). Como o NO_x térmico é formado a partir da reação do N₂ do ar com o O₂ em altas temperaturas, a menor temperatura reduz a formação do poluente (CETESB, 2017).

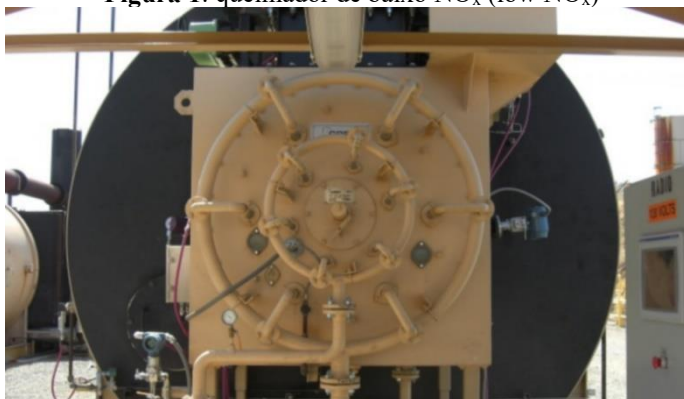
3.3.2 Mitigação do Nox

Pré-aquecimento do ar de combustão: por meio de trocadores de calor, o ar de combustão passa por um pré-aquecimento antes de ser inserido na câmara de combustão. Isso é feito aproveitando o calor residual dos gases de exaustão ou utilizando outra fonte de calor. Com o ar de combustão pré-aquecido, economiza-se combustível, e menos oxigênio será necessário, o que diminui a temperatura de queima e, conseqüentemente, reduz também o NO_x térmico. Esse sistema precisa ser bem ajustado para que o ar pré-aquecido não venha a aumentar ainda mais a temperatura de combustão (CETESB, 2017).

Queimador low NO_x: a tecnologia dos queimadores low NO_x reduz o NO_x térmico retardando parcialmente o processo de combustão, diminuindo a temperatura de queima que minimiza os picos térmicos responsáveis pela formação de NO_x. Isso é possível devido à sua geometria diferenciada que controla a proporção da mistura ar-combustível, criando condições para uma combustão mais limpa. Isso pode ser conseguido por meio do estagiamento da injeção de ar ou do estagiamento da injeção de combustível (CETESB, 2017).

A Figura 1 a seguir mostra uma caldeira industrial com tecnologia de queimador low NO_x.

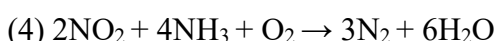
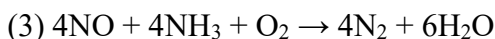
Figura 1: queimador de baixo NO_x (low NO_x)



Fonte: John Zink

Recirculação dos gases: trata-se de uma técnica eficaz quando uma grande porcentagem da emissão de NO_x é térmica. Parte dos gases de combustão, antes de serem eliminados, é reinjetada na chama (reciclada). A recirculação dos gases reduz as emissões de NO_x por dois mecanismos: o gás recirculado diminui a temperatura de combustão, suprimindo, assim, o mecanismo de formação de NO_x térmico e, em menor grau, reduz a formação de NO_x proveniente do combustível, devido à menor concentração de oxigênio na zona de chama. Dessa forma, a combustão ocorre com menos oxigênio e temperatura reduzida, limitando a formação de NO_x (térmico e não térmico). Essa tecnologia é normalmente utilizada em combinação com queimadores low NO_x para maior eficiência na mitigação do poluente (CETESB, 2017).

Redução Catalítica Seletiva (SCR): essa tecnologia é semelhante aos conversores catalíticos nos veículos. Trata-se de uma tecnologia amplamente utilizada na indústria para reduzir os óxidos de nitrogênio (NO_x) presentes nos gases de exaustão, especialmente em caldeiras, fornos industriais e motores de combustão. O processo envolve a reação do NO_x com um agente redutor (geralmente amônia), na presença de um catalisador, transformando esse poluente em nitrogênio (N₂) e vapor d'água (H₂O), de acordo com as reações químicas representadas pelas equações (3) e (4) mostradas a seguir.



Após a conversão do NO_x em N₂ e H₂O, os gases limpos são liberados para a atmosfera com menor impacto ambiental (CETESB, 2017).

Redução Não Catalítica Seletiva (SNCR): essa tecnologia é semelhante ao SCR, porém não utiliza catalizadores. O sistema SNCR injeta amônia ou ureia nos gases de combustão (em uma zona de temperatura específica) para promover a conversão do NO_x em N₂ e H₂O. Para otimizar a reação, a temperatura deve ser mantida entre 950°C e 1050°C (para solução de ureia) ou entre 850°C e 950°C (para hidróxido de amônia), dentro de um tempo de

residência adequado para efetivar a reação. Essa técnica se diferencia do SCR (Redução Catalítica Seletiva) justamente por não usar catalisador. Ela depende totalmente das condições de temperatura e das concentrações dos reagentes para transformar os óxidos de nitrogênio em nitrogênio molecular (N_2) e água (H_2O) (CETESB, 2017).

A melhor forma de otimizar as tecnologias MTPD citadas, para o cumprimento das metas de emissão de SO_2 e NO_x , é a combinação de dois ou mais sistemas para se obter uma eficácia satisfatória. Alguns desses sistemas, como os lavadores de gases, têm uma eficiência entre 70% e 90%. No entanto, os lavadores são utilizados apenas para a redução do SO_2 , sendo necessária a utilização de outra tecnologia para o NO_x . Algumas tecnologias para a remoção do NO_x têm uma eficiência de até 70%, e outras, de até 95% (quanto maior a eficiência, mais cara é a tecnologia). Mas, combinando uma tecnologia que reduz o NO_x durante a combustão com outra na pós-combustão, os índices de eficiência dos sistemas se complementam, possibilitando uma eliminação de mais de 90% desses gases ácidos (CETESB, 2017). Obviamente, a compra de combustíveis com baixo teor de enxofre e nitrogênio facilita o trabalho desses equipamentos.

Além desses equipamentos e técnicas citados, outras ações podem ajudar na redução da emissão de NO_x e SO_2 . Uma delas é a escolha de combustíveis com menor teor de poluentes, sempre que possível, como o gás natural, por exemplo, por apresentar reduzido teor de nitrogênio e concentração insignificante de enxofre. E, optar por carvão mineral, óleo combustível ou diesel com teores reduzidos de enxofre.

É também fundamental regular o ar de combustão, mantendo a proporção ideal ar/combustível para uma combustão completa, evitando desperdícios e reduzindo emissões. Também é importante instalar medidores de consumo de combustível em cada unidade de combustão, visando o monitoramento preciso e gestão eficiente da energia.

Por fim, a implementação de um Sistema de Gestão Ambiental (SGA) para a adequação ambiental contínua das instalações, incluindo treinamento periódico em boas práticas ambientais para os colaboradores (CETESB, 2017). Há outras tecnologias aplicadas no combate aos poluentes atmosféricos, mas as citadas acima são aquelas que se aplicam ao SO_2 e ao NO_x , provenientes dos gases de combustão de fábricas, termelétricas e refinarias de petróleo, que são as maiores fontes estacionárias desses poluentes. O êxito desses sistemas e de suas tecnologias depende de políticas ambientais estatais, com leis rígidas e fiscalização periódica, incluindo a aplicação de multas severas em caso de descumprimento das metas estabelecidas.

3.4 Mitigação das emissões poluentes nas fontes móveis.

Vários países europeus e os EUA, assim como o Brasil, possuem normas obrigatórias para a indústria automobilística, que deve fabricar veículos com limites predeterminados de emissão de poluentes atmosféricos. A fim de atender a essas determinações, a indústria tem otimizado a eficiência dos motores a combustão por meio de uma série de medidas para reduzir o consumo de combustível, além de desenvolver equipamentos pós-combustão para a limpeza dos gases de escapamento. Avanços tecnológicos, como a injeção eletrônica, motores menores com a mesma eficiência, veículos mais leves, catalisadores de redução seletiva (SCR) e modificações nos motores, como a recirculação dos gases de escape (EGR), além da melhoria na qualidade dos combustíveis, entre outras medidas, têm tornado os carros menos poluentes a cada ano (Kotz *et al.*, 2016).

Kotz *et al.* (2016) afirmam também que motores a combustão, desgastados pelo uso, liberam muito mais poluição do que quando eram novos, por não funcionarem com máxima eficiência. Assim, na prática, os avanços tecnológicos que limitam a emissão de poluentes em veículos a combustão dependem de um fator importante: carros relativamente novos e com a manutenção em dia. Isso porque, o desgaste natural de uso dos veículos faz com que a vida útil das peças chegue ao seu limite — inclusive aquelas responsáveis por eliminar os gases poluentes. Esse desgaste reduz a eficiência do motor e anula os avanços tecnológicos do veículo voltados para um ar mais limpo. O conversor catalítico, ou catalizador, um desses avanços tecnológicos, por exemplo, possui uma vida útil estimada, ao sair da fábrica, de aproximadamente 80.000 a 160.000 quilômetros, o que corresponde a 5 a 10 anos de uso do veículo. No Estado de São Paulo, segundo a CETESB, com base em dados de 2019, há mais de 6 milhões de veículos com mais de 10 anos de uso, o equivalente a aproximadamente 39% da frota total (CETESB, 2021).

Os conversores catalíticos têm uma eficiência de 90% na conversão de NO_x em CO_2 , N_2 e água. Esse equipamento, acoplado aos escapamentos dos veículos, é obrigatório em dezenas de países, inclusive no Brasil, desde 1997, em veículos novos. Porém, o bom funcionamento dos conversores catalíticos depende do reabastecimento do ARLA 32, uma solução de ureia na proporção aproximada de 32,5% em água desmineralizada, que deve ser reabastecido periodicamente (CETESB, 2021). No entanto, para evitar o custo extra com a aquisição do ARLA 32 em veículos dotados dessa tecnologia, muitos proprietários utilizam insumos fraudados, sem certificação. Além disso, quando o catalizador sofre avarias ou perde a sua vida útil, é comum que os proprietários continuem circulando com o dispositivo inutilizado, a fim de evitar sua

substituição, que possui um custo bastante elevado. Essas violações fazem com que os veículos emitam poluentes que excedem, em muito, os limites permitidos (CETESB, 2021).

Esse problema é enfrentado, obviamente, em todos os países onde o uso do conversor catalítico é obrigatório. Porém, em muitos países europeus, nos Estados Unidos e no Japão, por exemplo, existem leis rigorosas de controle da emissão de poluentes, que abrangem, não apenas as grandes fontes poluidoras, mas também os veículos, que são obrigados a se submeterem a testes nos escapamentos para medir os parâmetros de poluição a cada um ou dois anos.

No Brasil, o CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) criou, em 1986, o PROCONVE (Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores), com o intuito de reduzir a emissão de poluentes veiculares. Esse programa determina os limites de emissão de poluentes nos veículos a combustão e delega aos estados e municípios a criação de programas de inspeção veicular para fiscalizar o cumprimento desses limites. Porém, raramente foram realizados no Brasil programas de aferição de poluentes nos veículos, com exceção de algumas breves e limitadas campanhas educativas em São Paulo e no Rio de Janeiro (ANFAVEA, 2023).

Dessa forma, os veículos novos são os únicos que podem garantir o cumprimento dos regulamentos estabelecidos pelo Proconve no Brasil, ficando a cargo da consciência dos proprietários de carros usados a manutenção adequada de seus veículos, para minimizar a emissão de poluentes. Portanto, a fiscalização por parte do poder público, vinculando a inspeção ambiental dos escapamentos ao licenciamento dos veículos, e a renovação da frota veicular, são dois pontos-chave para a melhoria da qualidade do ar nas grandes metrópoles.

O Estado pode adotar algumas medidas para diminuir significativamente as emissões de poluentes atmosféricos decorrentes dos veículos nas cidades. A principal medida a se tomar é, sem dúvida, com respeito à inspeção ambiental veicular, que deve ser vinculada ao licenciamento dos veículos, com a aferição dos gases poluentes nos escapamentos. Caso os níveis de emissão ultrapassem os limites legais, o proprietário teria um prazo, sem prejuízos adicionais, para tomar as providências necessárias e retornar para uma nova inspeção.

Além disso, os governos podem incentivar a substituição de parte da frota veicular por carros elétricos e híbridos por meio da redução de impostos, estabelecendo uma meta para o número de veículos a serem substituídos.

Por fim, o investimento em um transporte público de qualidade, assim como em uma infraestrutura urbana segura e voltada ao tráfego de bicicletas, inevitavelmente reduziria o número de veículos em circulação nas cidades (CETESB, 2021).

3.5 A calagem como aliada na proteção das florestas

De acordo com Baines (1993), a chuva ácida que incide sobre um solo alcalino pode ser neutralizada por esse tipo de solo. Os solos alcalinos, originados de rochas como os calcários, funcionam como um tampão natural, neutralizando as precipitações ácidas. Mas, como todo tampão possui um limite em sua capacidade de tamponamento, a deposição ácida contínua nesse solo acarretará a saturação dessa capacidade, resultando em uma inevitável e súbita perturbação do equilíbrio químico, causando uma brusca acidificação. Essa perda da capacidade tamponante e a acidificação abrupta podem ocorrer após anos ou até décadas de deposição ácida, dependendo de cada tipo de solo e da carga de deposição (Spiro; Stigliani, 2009). Essa lentidão no processo retarda significativamente o aparecimento de danos visíveis à fauna e à flora, o que mascara o problema da acidificação do solo. O ambiente pode parecer inalterado por muito tempo e, quando os sintomas finalmente surgirem, a morte da floresta e da vida aquática pode ocorrer repentinamente, em um curto intervalo de tempo (Spiro; Stigliani, 2009).

A calagem de florestas na América do Norte e na Europa é uma prática ambiental bastante comum, utilizada tanto para recuperar o estado original de florestas acidificadas, quanto para prevenir sua acidificação. Seu objetivo é tamponar o pH do solo em determinado valor (pH 5,5–6,5), visando evitar a lixiviação de metais tóxicos como o alumínio presentes no solo (Manahan, 2013). Diferente da calagem agrícola, essa prática é voltada à correção ambiental em grande escala. Geralmente, utiliza-se calcário dolomítico ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) ou calcita pura (CaCO_3), com granulometrias distintas para solos e corpos d'água.

O primeiro passo consiste na avaliação e mapeamento de áreas acidificadas e/ou de alto risco, por meio de análises de solo e água, considerando fatores como pH e capacidade tamponante (Forestry Commission, 2015). Em seguida, é feito o planejamento logístico para a seleção do tipo de calcário, definição da granulometria, cálculo da quantidade por hectare e escolha do método de aplicação (Forestry Commission, 2015). Geralmente, na primeira calagem, utiliza-se cerca de 4 toneladas por hectare (Baines, 1993). Após a aplicação, o monitoramento dos parâmetros químicos do solo e da água, bem como a observação da recuperação da flora e fauna locais, devem ser contínuos (Helfrich, 2009). A calagem deve ser repetida em dosagens menores que a inicial, a cada 2 a 5 anos, conforme avaliações e testes (Baines, 1993).

Em relação aos rios, Baines (1993) afirma que, em algumas regiões da Europa, a cal é constantemente liberada na água corrente, mas isso requer o uso de equipamentos muito caros. Porém, o calcário pode ser aplicado na bacia hidrográfica do rio, pois boa parte da chuva que cai sobre toda a bacia escoar ou se infiltra até o leito. A calagem da bacia hidrográfica tem um custo

maior do que a de lagos, mas é um método mais apropriado para águas correntes (Helfrich, 2009).

Para a calagem de lagos e lagoas, a granulometria do calcário deve ser muito fina, com uma dose semelhante à aplicada no solo, podendo ser maior se o lago for muito profundo (Helfrich, 2009). A aplicação do calcário é quase sempre realizada por via aérea, com o uso de aeronaves apropriadas ou adaptadas, a fim de minimizar os impactos no solo, conforme mostra a figura 2 (Baines, 1993).

Figura 2: calagem por helicóptero em lago acidificado na Suécia.



Fonte: Movab AB

A calagem é uma ferramenta muito eficiente no combate aos efeitos da deposição ácida nas florestas. Entretanto, ela, por si só, é ineficaz a longo prazo se não for acompanhada por medidas que minimizem as emissões de NO_x e SO_2 . Caso a emissão desses gases não seja reduzida, o solo e os lagos jamais alcançarão seu estado original; a reaplicação da cal terá que ser frequente e permanente e, conseqüentemente, o custo será muito elevado (Baines, 1993).

Mesmo que a calagem seja um método eficiente na mitigação dos efeitos da chuva ácida, seu alvo são as raízes, e não as folhas. Logo, a cobertura das árvores fica à mercê da acidificação. Felizmente, as folhas são mais resistentes à deposição ácida do que as raízes. As folhas das plantas possuem uma camada protetora impermeável que as protege da deposição ácida, podendo suportar (dependendo da espécie) uma acidez com pH 3,2 (Abreu, 2005). Porém, as raízes não possuem proteção contra a absorção de metais tóxicos, que começam a se dissolver e a ser absorvidos pelas raízes em pH abaixo de 4,3 (Spiro; Stigliani, 2009). Portanto, a calagem protege as raízes, mas as folhas necessitam da mitigação direta dos poluentes atmosféricos.

Conclui-se, em relação à calagem de florestas e corpos d'água, que essa prática, embora útil, é uma medida extrema, que deve ser aplicada em florestas em estágio crítico ou avançado

de acidificação ou na proteção preventiva de reservas de alto valor ambiental e alto risco de acidificação. Para solos que estão em processo de acidificação, mas que ainda possuem grande parte do seu potencial de capacidade tamponante, a mitigação dos poluentes ácidos é a forma mais apropriada e econômica de evitar os danos ambientais causados pela acidificação.

4 Considerações finais

O maior obstáculo no combate aos poluentes atmosféricos acidificantes é o seu alto custo. No entanto, essa é uma conta que deve ser compartilhada por toda a sociedade, desde um complexo industrial altamente poluente até o simples escapamento de um carro ou uma motocicleta. Até que se encontre uma solução definitiva para o problema da poluição atmosférica causada pelos combustíveis fósseis, a mitigação dos gases precursores da chuva ácida será sempre uma luta constante e dispendiosa. Felizmente, nas últimas décadas, houve grandes avanços na conscientização governamental e no desenvolvimento de tecnologias pela indústria para a redução desses poluentes.

O presente trabalho conclui que já existem ferramentas disponíveis no planeta para a mitigação dos efeitos nocivos da chuva ácida a um nível tolerável e seguro para as florestas, seus habitantes e a saúde humana. Mas isso não significa que essas ferramentas estejam sendo plenamente utilizadas. A chuva ácida ainda está acidificando solos, lagos e cursos d'água em várias regiões do planeta, embora com menor intensidade do que há três décadas. E, mesmo que os danos sejam adiados, eles não poderão ser evitados, pois a acidificação do solo é cumulativa.

Em 1999 a população do planeta chegou a 6 bilhões de habitantes. Em 2011, alcançou 7 bilhões e, em 2022, atingiu 8 bilhões. Isso significa mais consumo de eletricidade, mais carros nas cidades, maior demanda por produtos industrializados e, conseqüentemente, mais poluição. Medidas paliativas jamais deveriam ser priorizadas na redução dos poluentes atmosféricos; o foco deve estar na resolução da raiz do problema, e esta já é bem conhecida: a substituição dos combustíveis fósseis por uma matriz energética limpa e renovável.

Referências

ABREU, M. Ocorrência de chuva ácida em unidades de conservação da natureza urbanas: estudo de caso no Parque Estadual da Pedra Branca. 140 f. 2005. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Ambi-ental) — Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

ANFAVEA. **O que é o Pro-conve?** São Paulo: Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores, 2023. Disponível em: <https://anfavea.com.br/site/o-que-e-o-proconve/>. Acesso em: 2 fev. 2025.

BAINES, J. **Chuva ácida**. 4. ed. São Paulo: Scipione, 1993.

BRENA, N. **A chuva ácida e os seus efeitos sobre as florestas**. 2. ed. São Paulo: Amazon Kindle, 2009.

CETESB. **Guia de melhor tecnologia prática dispo-nível (MTPD)**. São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente, 2017. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/28/2015/09/GUIA-PREFE-020517.pdf>. Acesso em: 1 abr. 2025.

CETESB. **Plano de controle de poluição veicular**. São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente, 2021. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/wp-content/uploads/sites/6/2021/01/PCPV-Plano-de-Control-de-Poluicao-Veicular-do-Estado-de-Sao-Paulo-2020-2022.pdf>. Acesso em: 3 fev. 2025.

FORESTRY COMMISSION. **Managing forests in acid sensitive water catchments**. Edinburgh: Forestry Commission, 2015. Disponível em: <https://www.confor.org.uk/media/246362/managing-forests-in-acid-sensitive-water-catchments.pdf>. Acesso em: 12 abr. 2025.

GALVÃO, P. Chuva ácida: estudo de campo no campus USP/SP. 107 f. 1996. **Dissertação** (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

HELFRICH, L. **Liming acidified lakes and ponds**. Virginia: Virginia Cooperative Extension, 2009. Disponível em: <https://extension.rwfm.tamu.edu/wp-content/uploads/sites/8/2013/09/Liming-Acidified-Lakes-and-Ponds.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2025.

KOTZ, J. C. *et al.* **Química geral: e reações químicas**. 9. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2016.

MANAHAN, S. E. **Química ambiental**. 9. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

OCDE. **Greenhouse gas emissions data: concepts and data availability**. Paris: Organização para a cooperação e desenvolvimento econômico, 2024. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1787/b3e6c074-en>. Acesso em: 24 abr. 2025.

SPIRO, T. G.; STIGLIANI, W. M. **Química ambiental**. 2. ed. São Paulo: Pearson, 2009.

Data de submissão: 30/07/2025

Data de aceite: 29/08/2025