Gestão de emissões atmosféricas

Gestão de emissões atmosféricas

Andréia Marega Luz

© 2017 por Editora e Distribuidora Educacional S.A.
Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta publicação poderá ser reproduzida ou transmitida de qualquer modo ou por qualquer outro meio, eletrônico ou mecânico, incluindo fotocópia, gravação ou qualquer outro tipo de sistema de armazenamento e transmissão de informação, sem prévia autorização, por escrito, da Editora e Distribuidora Educacional S.A.

Presidente
Rodrigo Galindo

Vice-Presidente Acadêmico de Graduação
Mário Ghio Júnior

Conselho Acadêmico
Alberto S. Santana
Ana Lucia Jankovic Barduchi
Camila Cardoso Rotella
Cristiane Lisandra Danna
Danielly Nunes Andrade Noé
Emanuel Santana
Grasiele Aparecida Lourenço
Lidiane Cristina Vivaldini Olo
Paulo Heraldo Costa do Valle
Thatiane Cristina dos Santos de Carvalho Ribeiro

Revisão Técnica
Gabriela Marcomini de Lima
Isabella Alice Gotti

Editorial
Adilson Braga Fontes
André Augusto de Andrade Ramos
Cristiane Lisandra Danna
Diogo Ribeiro Garcia
Emanuel Santana
Erick Silva Griep
Lidiane Cristina Vivaldini Olo

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Luz, Andréia Marega
L979g Gestão de emissões atmosféricas / Andréia Marega Luz.
– Londrina : Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2017.
192 p.

ISBN 978-85-522-0180-9

1. Ar. 2. Poluição industrial. I. Título.

CDD 363

2017
Editora e Distribuidora Educacional S.A.
Avenida Paris, 675 – Parque Residencial João Piza
CEP: 86041-100 — Londrina — PR
e-mail: editora.educacional@kroton.com.br
Homepage: http://www.kroton.com.br/

Sumário

Unidade 1 | Composição e estrutura da atmosfera 7

Seção 1.1 - Introdução e conceitos fundamentais 9
Seção 1.2 - Evolução da atmosfera terrestre 20
Seção 1.3 - Termodinâmica da atmosfera 33

Unidade 2 | Análise e controle de poluentes atmosféricos 49

Seção 2.1 - Indicadores de qualidade do ar e a legislação vigente 51
Seção 2.2 - Poluição do ar 66
Seção 2.3 - Controle ambiental das emissões atmosféricas 81

Unidade 3 | Transporte e monitoramento de poluentes atmosféricos 97

Seção 3.1 - Amostragem e monitoramento de poluentes atmosféricos 99
Seção 3.2 - Modelos de transporte atmosférico 113
Seção 3.3 - Sistemas de tratamento de poluentes atmosféricos 128

Unidade 4 | Principais repercussões da poluição atmosférica 145

Seção 4.1 - Efeitos gerais dos poluentes atmosféricos 147
Seção 4.2 - A poluição atmosférica e a saúde humana 160
Seção 4.3 - Efeitos da poluição atmosférica sobre o meio ambiente e materiais 174

Palavras do autor

As atividades humanas, como a agropecuária, o setor de transportes e a urbanização, causam grandes impactos ambientais, especialmente na atmosfera. A grande quantidade bem como a diversidade de gases lançados na atmosfera acarretam inúmeros problemas à saúde e ao meio ambiente e, por isso, têm sido foco de estudos em todo o mundo. Por isso, iremos trilhar juntos os caminhos para compreender a evolução da composição e da estrutura da atmosfera, os principais indicadores de qualidade do ar, bem como de que forma podemos minimizar os efeitos adversos de nossas ações sobre a atmosfera.

É imprescindível que você se dedique a esta disciplina. Dessa forma, alcançará com êxito as competências que serão trabalhadas no presente livro didático que podem ser resumidas em "conhecer a composição química da atmosfera e os padrões de qualidade do ar, os principais poluentes e seus efeitos, a dinâmica de transporte e dispersão dos poluentes, bem como o monitoramento e o controle das emissões atmosféricas".

Para auxiliá-lo nesse estudo, o conteúdo foi dividido em quatro unidades, nas quais iremos trabalhar os seguintes tópicos: na Unidade 1, iniciaremos o estudo abordando a evolução da composição e da estrutura da atmosfera, bem como os aspectos termodinâmicos da dispersão dos gases na atmosfera; na Unidade 2, aprofundaremos os estudos abordando temas como os indicadores de qualidade do ar, a poluição atmosférica e as medidas de controle das emissões atmosféricas; na Unidade 3, estudaremos os modelos de dispersão dos gases na atmosfera, além de aspectos técnico-científicos sobre o monitoramento das emissões atmosféricas; por fim, na Unidade 4, abordaremos as principais repercussões das emissões atmosféricas para a saúde humana, para o meio ambiente natural e para o meio ambiente artificial.

Então, você está preparado? Vamos começar?

Seja bem-vindo à disciplina de Gestão de Emissões Atmosféricas! Espero que você se sinta motivado para estudar esta área e que possa aproveitar os fundamentos e aplicabilidades que serão desenvolvidos ao longo deste livro didático, e são importantes para sua vida profissional.

Composição e estrutura da atmosfera

Convite ao estudo

Olá, aluno! Seja bem-vindo!

Você já ouviu ou leu algo relacionado à gestão de emissões atmosféricas? E sobre a poluição do ar e suas consequências para a saúde e para o meio ambiente?

Praticamente todos os dias nos deparamos com notícias relacionadas à poluição do ar, sobretudo nos grandes centros urbanos. Porém, a poluição do ar não se caracteriza apenas por uma poluição visível, identificada pelas mudanças na cor ou no odor do ar. Estamos expostos diariamente a inúmeros poluentes atmosféricos imperceptíveis que são nocivos à saúde humana e ao meio ambiente. Quando falamos em poluição atmosférica, identificamos duas causas: a poluição atmosférica natural, como o pólen, e a poluição atmosférica antropogênica, causada por emissões provenientes de atividades humanas, como os veículos automotores e emissões industriais. Enfocaremos ao longo do livro didático a poluição atmosférica antropogênica, iniciando, nesta Unidade 1, o estudo sobre alguns conceitos fundamentais para compreendermos a evolução da atmosfera terrestre, bem como a ocorrência de alguns processos termodinâmicos na atmosfera. Para guiar o seu estudo, imagine-se no seguinte contexto de aprendizagem: você acaba de ser contratado como profissional da área ambiental, por um instituto nacional-responsável por pesquisas na área de informações espaciais e emissões atmosféricas. O instituto realiza anualmente a elaboração de um estudo técnico-teórico para a divulgação de dados científicos sobre o comportamento dos gases na atmosfera, relacionados com as emissões atmosféricas e com dados de poluição do ar. Neste ano, você fará parte da

equipe responsável pela elaboração do estudo, bem como pela sua divulgação para a sociedade. Para nortear a sua pesquisa, responda às seguintes perguntas: Como ocorreu a origem e formação da atmosfera? Qual é a sua composição? Quais são as camadas da atmosfera? De que forma a atmosfera atua nos ciclos biogeoquímicos?

Para responder a essas e outras perguntas relacionadas ao tema desta primeira unidade, você aprenderá sobre a composição e a estrutura da atmosfera.

Vamos lá? Bons estudos!

Seção 1.1

Introdução e conceitos fundamentais

Diálogo aberto

Caro aluno,

As questões ambientais vêm sendo discutidas há tempos em encontros internacionais, onde países buscam estabelecer indicadores da qualidade ambiental, bem como firmar acordos para um desenvolvimento sustentável. Em um desses encontros, surgiu o termo "desenvolvimento sustentável", definido como a capacidade de aumentar e usufruir dos recursos naturais de forma que estejam disponíveis para as gerações futuras. Nesses encontros, dentre inúmeros temas relevantes, como a qualidade da água, a gestão dos resíduos sólidos e o saneamento básico, está também a preocupação com as emissões atmosféricas e com a poluição do ar. Essa preocupação advém sobretudo do setor de transportes, devido às emissões de veículos automotores, mas também das emissões atmosféricas industriais. Vale ressaltar que a preocupação vai além do que está sendo lançado na atmosfera, já que os gases sofrem reações químicas na atmosfera e podem assim gerar outros compostos nocivos à saúde humana e ao meio ambiente. Diante disso, é imprescindível o estudo da atmosfera e do comportamento dos gases, bem como sobre as formas de monitorar a qualidade do ar.

Por isso, vamos relembrar o contexto de aprendizagem desta unidade, que irá nortear a situação-problema desta primeira seção. Você é recém-contratado, como profissional da área ambiental, de um instituto nacional-responsável por pesquisas na área de informações espaciais e emissões atmosféricas. Esse instituto realiza anualmente a elaboração de um estudo técnico-teórico para a divulgação de dados científicos sobre o comportamento dos gases na atmosfera, relacionados com as emissões atmosféricas e com dados de poluição do ar. Neste ano, você fará parte da equipe responsável pela elaboração do estudo, bem como pela sua divulgação para a sociedade.

A primeira parte do estudo técnico-teórico deve abranger, de forma clara e didática, o surgimento da atmosfera terrestre, as suas camadas e a sua composição química. Para isso, reflita e responda às seguintes perguntas: Quais são os principais gases da atmosfera terrestre? Como

cada um deles está distribuído nas diferentes camadas da atmosfera? Quais são as principais fontes desses gases e suas funções?

Após responder a esses questionamentos, é importante que você já comece a produzir seu estudo, fazendo uma introdução com as informações levantadas nessa primeira etapa.

Não pode faltar

Para iniciarmos o nosso estudo sobre a gestão de emissões atmosféricas, vamos relembrar alguns conceitos fundamentais sobre a atmosfera. A atmosfera terrestre pode ser definida como uma massa de matéria gasosa constituída de diferentes substâncias em diferentes proporções. Porém, Branco e Murgel (2004) ressaltam que a atmosfera também possui uma porção sólida, constituída por poeira em suspensão, pólen, microrganismos etc. e, por uma porção líquida, composta de gotículas resultantes da condensação do vapor d'água, na forma de nuvens, neblinas e chuvas.

A porção sólida da atmosfera pode ser inorgânica, como grãos de terra e areia, ou orgânica, como grãos de pólen, esporos de fungos e bactérias. Essa porção sólida varia muito de um lugar para o outro e varia também de acordo com o momento, já que ventos e outros fenômenos naturais podem interferir em sua composição. A porção líquida é constituída basicamente por água no estado líquido ou como vapor de água e também é bastante variável de um lugar para o outro. Por exemplo, no deserto, a porção de vapor de água na atmosfera é praticamente nula, mas em uma região tropical úmida, como a Floresta Amazônica, essa porção é bem maior (cerca de 5%). Já a porção gasosa do ar é composta por diferentes gases em proporções distintas, conforme pode ser observado no Quadro 1.1.

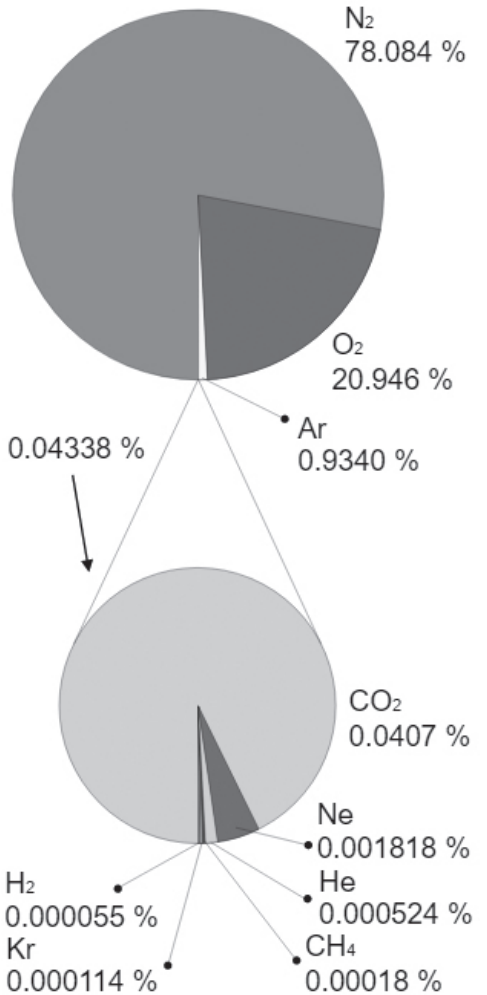
Quadro 1.1 | Gases da atmosfera

Gases	Proporção (%)
Nitrogênio	78
Oxigênio	21
Gases nobres (hélio, argônio, neônio, criptônio e xenônio)	0,93
Gás carbônico (CO_2)	0,03
Outros (metano, hidrogênio, óxido nitroso e ozônio)	0,04

Fonte: adaptada de Baird e Cann (2011).

Na Figura 1.1, é possível observar com maior clareza a proporção dos gases, sobretudo dos gases que estão em menores concentrações.

Figura 1.1 | Gases presentes na atmosfera



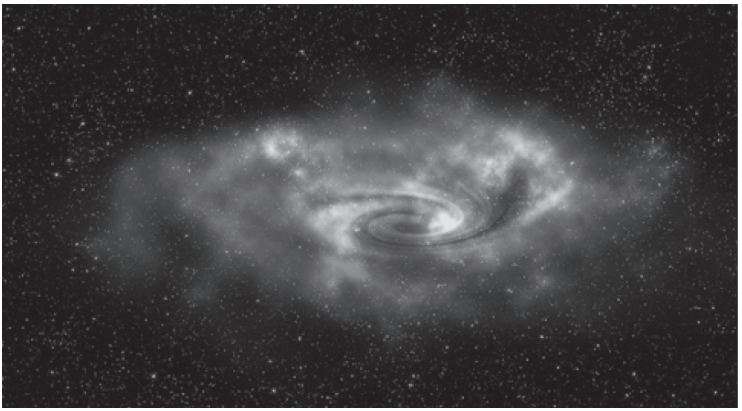
Fonte: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Atmosphere_gas_proportions.svg>. Acesso: 12 mar. 2017.

Vale ressaltar que essa composição é única em todo o Sistema Solar. Mas você deve estar se perguntando: como ocorreu a formação da atmosfera terrestre atual?

Para compreendermos a formação da atmosfera terrestre, é preciso

entender a formação do Sistema Solar. A teoria mais aceita é a proposta pelo filósofo Kant e pelo matemático Laplace, no século XVIII, conhecida como "Nebulosa Solar", que é uma nuvem de poeira e gás, conforme mostra a Figura 1.2.

Figura 1.2 | Nebulosa solar: nuvem de gás e poeira que deu origem ao Sistema Solar



Fonte: <http://hypescience.com/se-vivemos-em-um-multiverso-onde-esses-mundos-se-escondem/>. Acesso em: 13 mar. 2017.

Em um dado momento, devido à ação gravitacional, essa nuvem começou a sofrer contração, e, em seguida, um colapso. Ao final desse processo, a nebulosa solar assumiu uma forma discoide com movimento próprio de rotação, mais denso e com temperaturas elevadas no centro e baixas na periferia. Esse processo deu origem à formação do Sol, de Júpiter e de Saturno, conhecidos como "planetas gigantes" e com composição idêntica de hidrogênio e hélio. Partículas menores, provenientes desse colapso, começam a se agregar, dando origem aos planetas menores.

Mas e a atmosfera? Como ela surgiu? Em primeiro lugar, é importante dizer que só pode ter atmosfera um objeto que possua um campo gravitacional suficiente para retê-la, o que não é o caso de Mercúrio, da Lua e da maioria dos satélites, pois apresentam massa pequena. Existem três teorias para o surgimento dos primeiros gases atmosféricos, sendo elas: (1) a hipótese da atmosfera secundária ou da liberação de gases a partir do interior do planeta, que se formaram através de materiais voláteis da própria nuvem de poeira que foram posteriormente liberados devido ao aquecimento associado à evolução do planeta; (2) a hipótese da fonte externa, que diz que o planeta teria sido bombardeado de forma intensa por milhares de anos, por cometas e meteoritos ricos em substâncias voláteis; (3) a hipótese da atmosfera primária segundo a qual a atmosfera

se teria formado por captura hidrodinâmica do gás da nebulosa primitiva. Cabe ressaltar que há diferenças na composição e na espessura da atmosfera dos planetas de acordo com a origem da atmosfera.

Ramos e Leitão (1991) afirmam que a atmosfera terrestre é proveniente de uma atmosfera secundária, ou seja, formada a partir da liberação de gases (vapor de água, dióxido de carbono e nitrogênio) do seu interior, uma vez que a abundância dos diferentes elementos na Terra é significativamente menor do que no Sistema Solar. Mas será que ela sempre teve a mesma composição? No processo de formação do planeta Terra ocorriam queimas de componentes das rochas primitivas nas atividades vulcânicas, liberando assim uma quantidade muito grande de gás carbônico (CO_2).

Pesquise mais

Para entender melhor sobre a origem do Sistema Solar, do planeta Terra e da atmosfera terrestre, leia o artigo a seguir:

RAMOS, J. J. M.; LEITÃO, L. A atmosfera da Terra: sua origem, evolução e características actuais. **Boletim da Sociedade Portuguesa de Química**, Aveiro, n. 44/45, p. 53-65, jun./set. 1991. Disponível em: <http://www.spq.pt/magazines/BSPQ/569/article/3000525/pdf>. Acesso em: 20 mar. 2017.

Além disso, você pode assistir ao seguinte documentário:

DIEGO SILVA. Formação do planeta Terra. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=3XXuEHSKDDU>. Acesso em: 29 mar. 2017.

O vapor começou a condensar, dando início ao período de chuvas e originando os oceanos. O dióxido de carbono também foi se acumulando na atmosfera, porém, com o aparecimento de água no estado líquido, ele foi dissolvido, o que permitiu que reagisse com as rochas para formar os carbonatos das rochas sedimentares e recifes de corais, que são constituídos de carbonatos de cálcio. E o oxigênio, tão essencial à vida? Branco e Murgel (2004) relatam que o oxigênio, há cerca de 2 bilhões de anos, não existia na atmosfera terrestre. Ele só foi formado a partir da atividade fotossintética pelos primeiros microrganismos vegetais. Como o oxigênio é um subproduto do processo de fotossíntese e não tinha função até então, já que não existiam organismos aeróbios, esse gás se acumulou na atmosfera. Somente mais tarde, surgiram os organismos aeróbios, que desenvolveram um processo de respiração muito eficiente, utilizando o oxigênio e gerando como subproduto o gás carbônico.

Assimile

Não se esqueça, na atmosfera primitiva havia grandes concentrações de gás carbônico e pouco oxigênio. Já na atmosfera atual, há pouca concentração de gás carbônico e muita concentração de oxigênio.

Dessa forma, estabeleceu-se um ciclo entre a respiração aeróbia e a fotossíntese. Com o passar do tempo, surgiram vegetais mais complexos, diminuindo assim a concentração de gás carbônico na atmosfera, já que era utilizado para a fotossíntese. Além disso, a concentração de oxigênio, resultante da fotossíntese foi, de forma lenta, se acumulando na atmosfera até atingir os níveis atuais. Vale ressaltar que parte desse oxigênio sofreu transformação devido à radiação ultravioleta do Sol nas altas camadas da atmosfera, dando origem ao ozônio (O_3). O ozônio atua como uma barreira, filtrando e impedindo a penetração de quantidades excessivas de raios ultravioletas, que são nocivos à vida. Porém, a poluição do ar de origem antrópica tem destruído a camada de ozônio, deixando-nos desprotegidos. Mas não se preocupe com isso agora, pois será tema de outra seção.

Exemplificando

Os gases presentes na atmosfera terrestre podem ter diferentes origens, sendo que o oxigênio é resultante de atividades fotossintéticas de organismos autotróficos, em uma época que não existem seres aeróbios suficientes para consumirem o oxigênio através da respiração, logo este se acumulou na atmosfera, atingindo o nível atual de 21% da composição gasosa

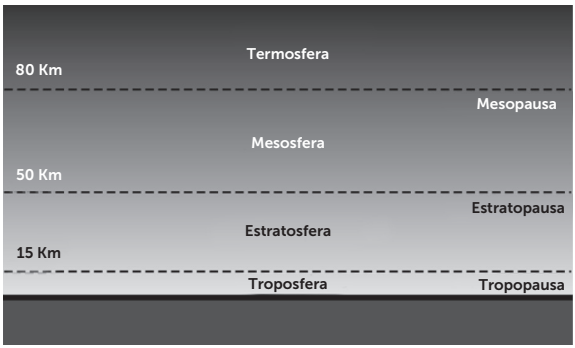
Reflita

Para você, considerando a quantidade de oxigênio e gás carbônico na atmosfera atual, a atmosfera sustenta a vida ou a vida sustenta a atmosfera?

Como podemos perceber, os seres vivos têm condições de modificar e transformar o planeta e, com o ser humano, não é diferente. As atividades antrópicas sempre interferiram na composição da atmosfera, sendo consolidadas com a Revolução Industrial, marco inicial dessa interferência, momento em que as primeiras emissões atmosféricas começaram e caracterizaram a poluição do ar. Porém, as emissões atmosféricas e seus efeitos serão estudados de forma mais aprofundada nas próximas seções. Por isso, para entender o processo de interferência e a poluição atmosférica, continuaremos nosso estudo sobre a atmosfera.

Abordamos até o momento a origem, a evolução e a composição da atmosfera. A atmosfera pode ser dividida em camadas, que estão relacionadas com propriedades físicas e químicas e com a mudança de temperatura e pressão de acordo com a altura. Rocha, Rosa e Cardoso (2009) descrevem as seguintes camadas, indicadas na Figura 1.3: (1) troposfera, sendo a primeira camada que se estende do nível do mar até 15 quilômetros de altitude, onde a temperatura diminui com o aumento da altitude e estão presentes os gases da atmosfera; (2) tropopausa, logo acima da troposfera, onde a temperatura é relativamente constante e separa a troposfera da estratosfera; (3) estratosfera, onde a temperatura se eleva com o aumento da altitude e há absorção da radiação ultravioleta pelas moléculas de ozônio; (4) estratopausa, onde a temperatura é constante e separa a estratosfera da mesosfera; (5) mesosfera, onde a temperatura volta a diminuir com o aumento da altitude; (6) mesopausa, também de temperatura constante e que separa a mesosfera da termosfera; e (7) termosfera, de temperatura elevada (cerca de 1200°C) devido à presença de espécies iônicas e atômicas.

Figura 1.3 | Camadas da atmosfera



Fonte: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Atmo_camadas.svg>. Acesso em: 14 mar. 2017.

Como podemos perceber, apenas a troposfera possui contato direto com a crosta terrestre e, por isso, é a região de estudos sobre a poluição do ar, já que nela ocorrem intensas movimentação e transformação dos componentes gasosos. Essa transformação dos componentes gasosos ocorre, pois a atmosfera é considerada um grande reator químico. O oxigênio é altamente reativo, assim como outros compostos, mesmo que em pequenas concentrações, atuando como reagente e/ou catalisadores. Além disso, a luz solar atua como fonte de energia para que ocorram as transformações químicas, que serão estudadas ao longo deste livro didático.

Para finalizar esta primeira seção, é importante estudarmos separadamente a química dos principais constituintes do ar, como o

oxigênio, o nitrogênio e o dióxido de carbono. Conforme já mencionado, o oxigênio, apesar de existir em grande quantidade na atmosfera, em sua maior parte existe sob a forma de compostos, sobretudo na crosta terrestre onde se encontra nos óxidos de silício e alumínio (silicatos). Sabe-se da importância do oxigênio para a sobrevivência dos organismos aeróbios, porém o oxigênio possui grande relevância industrialmente, na produção do aço (através da oxidação) e na preparação de óxido de etileno (usado para sintetizar compostos químicos). Além disso, a forma alotrópica do oxigênio, o ozônio mencionado anteriormente, forma a camada de ozônio e, por ser muito reativo, também é utilizado industrialmente.

Ramos e Leitão (1991) descrevem o nitrogênio como principal constituinte da atmosfera. Sendo pouco reativo, característica associada à sua fácil obtenção, é utilizado na indústria eletrônica e nos laboratórios de química como uma atmosfera protetora quando se constroem componentes ou se realizam reações que seriam negativamente afetadas pelo oxigênio atmosférico. Além disso, não podemos deixar de mencionar os compostos de nitrogênio muito usados como fertilizantes e como explosivos.

Por fim, devemos ressaltar a importância do dióxido de carbono na atmosfera como regulador térmico, já que é um gás do efeito estufa, capaz de reter radiação térmica. Porém, sua concentração na atmosfera tem aumentado nas últimas décadas devido à combustão dos combustíveis fósseis, o que tem gerado discussões internacionais sobre as mudanças climáticas. Mas isso será tema de outra seção de estudos.

Encerramos aqui a primeira seção de estudos da disciplina *Gestão de emissões atmosféricas*. A partir deste estudo, você estará apto a compreender melhor de que forma os gases atuam na atmosfera, como ocorre o processo de poluição atmosférica e como a termodinâmica está relacionada às transformações que ocorrem na atmosfera.

Sem medo de errar

As questões ambientais são amplamente discutidas em encontros internacionais, nos quais se busca estabelecer indicadores da qualidade ambiental, bem como firmar acordos para um desenvolvimento sustentável. Nesse contexto, nas últimas décadas diversos países buscam um acordo sobre a emissão de poluentes atmosféricos, que intensificam as alterações climáticas e causam prejuízos à saúde. A preocupação com as emissões atmosféricas advém, sobretudo, do setor de transportes, devido às emissões de veículos automotores, mas também das emissões atmosféricas industriais. Diante disso, é imprescindível o estudo da atmosfera e do comportamento dos gases, bem como das formas de monitorar a qualidade do ar.

Por isso, vamos relembrar nosso contexto de aprendizagem. Você acaba de ser contratado por um instituto nacional, responsável por pesquisas na área de informações espaciais e emissões atmosféricas. Esse instituto realiza anualmente a elaboração de um estudo técnico-teórico para a divulgação de dados científicos sobre o comportamento dos gases na atmosfera, relacionado com as emissões atmosféricas e com dados de poluição do ar. Neste ano, você fará parte da equipe responsável pela elaboração do estudo, bem como pela sua divulgação para a sociedade. Para isso, você deve se nortear pelas seguintes perguntas: Quais os principais gases da atmosfera terrestre? Como cada um deles está distribuído nas diferentes camadas da atmosfera? Quais as principais fontes desses gases e suas funções?

Os principais gases presentes na atmosfera terrestre são: o nitrogênio, cerca de 78%; o oxigênio, cerca de 21%; os gases nobres (hélio, argônio, neônio, criptônio e xenônio) cerca de 0,93%; o gás carbônico, com cerca de 0,03% e outros gases (metano, hidrogênio, óxido nitroso e ozônio), cerca de 0,04%. Esses gases se encontram na troposfera, que é a primeira camada que se estende do nível do mar até 16 quilômetros de altitude. Na estratosfera, a temperatura se eleva com o aumento da altitude e há a absorção da radiação ultravioleta pelas moléculas de ozônio (O_3). Na mesosfera, a temperatura volta a diminuir com o aumento da altitude e, na termosfera, a temperatura é elevada (cerca de 1200°C) devido à presença de espécies iônicas e atômicas. Os gases presentes na troposfera são indispensáveis para os seres vivos e, principalmente, para o homem, pois além de serem utilizados para processos metabólicos como respiração e fotossíntese (gás carbônico e oxigênio), mantêm a temperatura da Terra (gases do efeito estufa) e são utilizados também industrialmente, como o nitrogênio, para fabricação de fertilizantes e atmosferas artificiais estáveis, e o oxigênio, para fabricação do aço e produção do ozônio, utilizado também industrialmente.

É importante que esta primeira parte do estudo técnico-teórico abranja, de forma clara e didática, como surgiu a atmosfera terrestre, quais as suas camadas e qual a sua composição química, uma vez que ela será fundamental para a divulgação dos dados para a sociedade.

Avançando na prática

A evolução da atmosfera

Descrição da situação-problema

Diante das consequências da poluição do ar para a saúde humana, as Secretarias de Meio Ambiente e de Saúde de um grande centro

urbano resolveram contratar um grupo de pesquisadores para elaborar materiais didáticos sobre a atmosfera e a poluição do ar, que serão distribuídos gratuitamente para as escolas da rede municipal. O intuito é disseminar informações e conhecimentos sobre a importância da atmosfera e da preservação da qualidade do ar para a saúde humana e para o meio ambiente. Você, profissional da área ambiental, fará parte do grupo de pesquisadores contratados e deverá elaborar um dos capítulos do material didático, que irá abordar a evolução da atmosfera terrestre. Para nortear o seu trabalho, você deve responder às seguintes perguntas: Como era a atmosfera primitiva? Como ela foi formada? Como ocorreu a evolução da atmosfera primitiva para a atmosfera atual?

Resolução da situação-problema

A atmosfera terrestre é proveniente de uma atmosfera secundária, formada a partir da liberação de gases, principalmente vapor de água, dióxido de carbono e nitrogênio, do seu interior. O gás carbônico, proveniente de queimas de componentes das rochas primitivas nas atividades vulcânicas, lançou para a atmosfera uma quantidade muito grande de gás carbônico (CO^2). Com as mudanças na temperatura da atmosfera terrestre, o vapor de água se condensou, o que provocou longos períodos de chuvas e deu origem aos oceanos. O dióxido de carbono acumulado na atmosfera, porém, com o aparecimento de água no estado líquido, foi dissolvido e reagiu com as rochas para formar os carbonatos das rochas sedimentares e recifes de corais, que são constituídos de carbonatos de cálcio. Logo, não havia oxigênio na atmosfera primitiva. Porém, com a diminuição da temperatura na atmosfera terrestre e com o surgimento de organismos fotossintetizantes, o oxigênio começou a ser liberado para a atmosfera como subproduto do processo de fotossíntese. Como o oxigênio é um subproduto do processo de fotossíntese e não tinha função até então, já que não existiam organismos aeróbios, esse gás se acumulou na atmosfera. Somente mais tarde surgiram os organismos aeróbios, que desenvolveram um processo de respiração muito eficiente, utilizando o oxigênio e gerando como subproduto o gás carbônico. Dessa forma, estabeleceu-se um ciclo entre a respiração aeróbia e a fotossíntese. Com o passar do tempo, surgiram vegetais mais complexos, diminuindo assim a concentração de gás carbônico na atmosfera, já que era utilizado para a fotossíntese. Além disso, a concentração de oxigênio, resultante da fotossíntese foi, de forma lenta, se acumulando na atmosfera até atingir os níveis atuais.

Faça valer a pena

1. A atmosfera é uma camada de gases que envolve um corpo material. Essa atmosfera pode ser formada a partir de três hipóteses, sendo uma delas a da atmosfera secundária, em que há liberação dos gases provenientes do interior do planeta.
O processo de formação da atmosfera descrito acima explica a formação da atmosfera de qual astro?

a) Terra.
b) Sol.
c) Mercúrio.
d) Lua.
e) Plutão.

2. De acordo com a teoria proposta pelo filósofo Kant e pelo matemático Laplace, no século XVIII, para a origem do Sistema Solar, uma nuvem de poeira e gás, conhecida como _____, sofreu _____ devido à ação gravitacional. Ao final desse processo, a nebulosa solar assumiu uma forma discoide com movimento próprio de rotação, dando origem ao _____.
Os termos que preenchem corretamente as lacunas são:

a) Big Bang; expansão; planeta Terra.
b) Nebulosa solar; expansão; Sol.
c) Nebulosa solar; contração; Sol.
d) Nebulosa solar; contração; planeta Terra.
e) Big Bang; contração; planeta Terra.

3. A atmosfera primitiva era bastante diferente da atmosfera atual, visto que os gases em abundância eram o vapor de água, o dióxido de carbono e o nitrogênio. Já na atmosfera atual, a concentração de dióxido de carbono é muito pequena, além de existir em grande concentração o gás oxigênio, permitindo a existência de vida.
Sobre a diminuição da concentração de dióxido de carbono na atmosfera, assinale a alternativa correta:

a) Foi devido exclusivamente ao surgimento de organismos aeróbios.
b) Foi devido ao ciclo entre a respiração aeróbia e a fotossíntese.
c) Foi devido à fixação do dióxido de carbono em rochas calcárias.
d) Foi devido à fixação do dióxido de carbono na formação de recifes de corais.
e) Foi devido à dispersão do dióxido de carbono na atmosfera ao longo dos anos.

Seção 1.2

Evolução da atmosfera terrestre

Diálogo aberto

Caro aluno,

Nos últimos anos, quase que diariamente nos deparamos com notícias relacionadas às mudanças climáticas e à poluição do ar nos grandes centros urbanos. Diante disso, vem crescendo a preocupação da população acerca dos possíveis efeitos adversos à saúde causados pela exposição à poluição do ar. Também cresce a preocupação sobre os efeitos adversos da poluição do ar sobre o meio ambiente e de como o equilíbrio dos ecossistemas é afetado. Isso porque, conforme visto na Seção 1, a atmosfera é composta por gases essenciais à vida, mas que podem sofrer transformação devido às ações antrópicas. Por isso, além de conhecer os aspectos fundamentais sobre a atmosfera, sua origem e composição, é necessário aprender sobre a relação entre a atmosfera e o ciclo de elementos na natureza e compreender de que forma ocorrem as reações químicas na atmosfera, que formam novos compostos, nocivos ou não à saúde humana e ao meio ambiente. Portanto, é imprescindível o estudo da atmosfera e das reações que nela ocorrem.

Primeiramente, vamos relembrar o contexto de aprendizagem desta Unidade, que irá nortear a situação-problema desta segunda seção. Você é recém-contratado como profissional da área ambiental de um instituto nacional, responsável pela realização de pesquisas na área de informações espaciais e emissões atmosféricas que irá elaborar um estudo técnico-teórico para a divulgação de dados científicos sobre o comportamento dos gases na atmosfera, relacionando-o com as emissões atmosféricas e com dados de poluição do ar. Neste ano, você fará parte da equipe responsável pela elaboração do estudo, bem como pela sua divulgação para a sociedade. Portanto, agora que você já abordou esses aspectos fundamentais sobre a atmosfera terrestre, é preciso aprofundar o estudo a fim de propiciar aos leitores a compreensão da dinâmica da atmosfera, que constitui a segunda parte do estudo técnico-teórico que será divulgado para a sociedade. Para isso, você deve se embasar nas seguintes perguntas: De que forma a atmosfera terrestre interfere nos ciclos de alguns elementos da natureza,

como o nitrogênio, o oxigênio, o carbono e o enxofre? Qual é a relação desses gases com o efeito estufa e qual é a sua importância? Esses gases podem sofrer reações químicas com outros compostos lançados para a atmosfera? Como ocorrem essas reações e quais os produtos gerados?

Espero que você se sinta motivado a estudar os temas desta seção, de modo a refletir sobre as ações antrópicas e suas relações com a poluição atmosférica e as mudanças climáticas.

Preparado? Vamos começar?

Não pode faltar

Na Seção 1 desta primeira unidade, vimos aspectos fundamentais sobre a origem e formação da atmosfera terrestre, sua composição, além de aspectos importantes sobre alguns de seus gases constituintes. Agora, daremos continuidade ao nosso estudo abordando temas como os ciclos biogeoquímicos e a atmosfera, o efeito estufa e sua relação com a combustão e com a poluição do ar, e, por fim, estudaremos as reações fotoquímicas que ocorrem na atmosfera e que estão diretamente relacionadas com as emissões atmosféricas.

Relembrando a composição química da atmosfera, vimos que os gases que a compõem sofreram alterações em suas concentrações ao longo de sua evolução, além de transformações químicas, por exemplo, o oxigênio que deu origem ao ozônio. Com isso, podemos inferir que a atmosfera, assim a biosfera e a litosfera, é um reservatório importante na transformação de elementos químicos que podem sofrer transformações. Essas transformações são conhecidas como ciclos biogeoquímicos, que é a ciclagem de elementos na natureza. O conhecimento dos ciclos biogeoquímicos é importante para o estudo das emissões atmosféricas e seus efeitos, uma vez que é preciso conhecer sobre a sua emissão natural, processos de diluição, mecanismos de transformação e formação para estabelecer políticas de controle ambiental de um determinado composto químico. Mas, antes de abordarmos os ciclos dos elementos, vamos discutir alguns conceitos importantes para que você compreenda a relação da atmosfera com os ciclos.

Os compostos que existem na atmosfera possuem fontes diversas, podendo ser naturais, como os vulcões e a superfície do mar, ou antrópicas, como a queima de combustíveis fósseis. A fonte antrópica pode ainda ser pontual, quando é localizada, como uma chaminé,

ou difusa, quando se estende por uma área extensa, como os compostos pela superfície do mar. Além disso, os poluentes podem ser classificados como primários, quando chegam à atmosfera a partir de sua emissão direta, ou secundários, quando são provenientes de uma reação com outros compostos presentes na atmosfera.

Como podemos perceber, há diversas fontes que "alimentam" a atmosfera com diversos compostos. Porém, também há processos de consumo, por meio da precipitação e por ação do vento, que arrasta o composto em direção ao solo. Assim como os processos de emissão, a transformação e a saída de compostos da atmosfera envolvem reações químicas ou mudanças de fase, passando pelos vários ecossistemas terrestres, inclusive pelos seres vivos.

Por exemplo, no ciclo do carbono, os seres fotossintetizantes retiram gás carbônico (CO_2) da atmosfera para utilizar na produção de compostos orgânicos, processo chamado de "fotossíntese". O carbono é então adquirido pelos animais através da alimentação. Posteriormente, o carbono retorna à atmosfera através da respiração dos seres vivos, que liberam CO_2 e através da morte e decomposição dos animais e vegetais. Porém, outro mecanismo capaz de devolver o carbono para a atmosfera é a queima de combustíveis fósseis (gasolina, óleo diesel, gás natural) e a queima de florestas, já que o carbono armazenado na forma de compostos orgânicos é totalmente liberado para a atmosfera. Cabe ressaltar que os oceanos desempenham um papel importante no ciclo do carbono, uma vez que o dióxido de carbono se dissolve prontamente na água, tornando os oceanos repositórios importantes de CO_2. Com isso, conforme aumenta a concentração de CO_2 na atmosfera, a taxa de dissolução do CO_2 no oceano também aumenta, reduzindo assim a taxa de aumento de CO_2 na atmosfera abaixo da qual ela poderia estar na ausência da troca ar-água. Como podemos perceber, o homem interfere nesse ciclo ao adicionar grandes quantidades de gás carbônico na atmosfera, podendo provocar consideráveis variações no ecossistema global, tema que iremos abordar ainda nesta seção.

Outro exemplo é o ciclo do nitrogênio (N_2) que está presente naturalmente na atmosfera, porém, a forma do nitrogênio disponível e assimilável pelos seres vivos é como amônia (NH_3). A transformação do nitrogênio atmosférico (N_2) em amônia no solo ocorre através de três mecanismos: (1) pela ação de algumas bactérias presentes nas raízes de certas plantas, chamada de "fixação

biológica"; (2) através de relâmpagos e faíscas elétricas; (3) através da fixação industrial, realizada por indústrias de fertilizantes. No solo, pela fixação biológica, a amônia sofre diversas transformações, resultando em nitritos e nitratos, que também são disponíveis para as plantas. Além disso, a amônia também é utilizada por bactérias nitrificantes, mas pode ser transformada em nitrogênio (N_2) por bactérias desnitrificantes, sendo desprendido para a atmosfera. Como podemos observar, o homem também interfere nesse ciclo, através da fixação industrial, pois as atividades agrícolas introduzem no solo uma grande quantidade de nitrogênio, a partir de fertilizantes e adubos.

Além dos ciclos do carbono e do nitrogênio, elementos químicos que fazem parte da constituição dos seres vivos, merece destaque o ciclo do enxofre. O enxofre, além de ser demandado por plantas e animais por seguir várias vias químicas complexas, afeta o ciclo de outros elementos. Esse elemento químico existe em muitas formas reduzidas e oxidadas, sendo a forma mais oxidada o sulfato (SO_4^{2-}), e a forma mais reduzida o sulfeto de hidrogênio (H_2S), sendo esta a responsável pelo cheiro de "ovo podre", que possui vida curta na atmosfera. Mas como ocorre o ciclo desse elemento na natureza e de que maneira o homem interfere nesse ciclo? O enxofre está presente na forma de minerais de sulfato nas rochas, que, ao sofrerem intemperismo, liberam-no dissolvido na água e no solo. Na água e no solo, o enxofre assume a forma oxidada de sulfato, disponível para absorção pelas raízes dos vegetais e, posteriormente, para os animais por meio da cadeia alimentar. Na atmosfera, a concentração do enxofre é mínima, conforme vimos na Seção 1, e tem como fontes principais as atividades vulcânicas e as ações humanas. A queima de combustíveis fósseis libera para a atmosfera grandes quantidades de óxidos de enxofre (SO_2 e SO_3), que, ao se fundirem com as moléculas de água, produzem o ácido sulfúrico (H_2SO_4), gerando à chuva ácida, que estudaremos de forma mais aprofundada na Unidade 2.

Outro elemento que tem sido bastante estudado por ecólogos é o fósforo, pois os organismos necessitam desse elemento em grandes quantidades. Porém, diferentemente dos outros elementos, o ciclo do fósforo envolve somente o solo e compartimentos aquáticos do ecossistema. Ele não entra na atmosfera sob qualquer forma, por isso não será nosso objeto de estudo.

Para encerrarmos a primeira parte desta seção sobre os ciclos biogeoquímicos, é importante abordar o ciclo do oxigênio. Este pode ser encontrado na atmosfera sob forma combinada, como CO_2, NO_2, SO_2, ou na forma de oxigênio molecular (O_2), sendo esta a forma mais abundante (cerca de 21% da atmosfera). Conforme abordamos na Seção 1, a principal forma de produção de oxigênio é a fotossíntese, realizada pelas plantas e algas. Relembrando, a fotossíntese é o processo pelo qual os seres fotossintetizantes retiram CO_2 da atmosfera e, através da reação do CO_2 com a água, na presença de luz, produzem compostos orgânicos e liberam como subproduto o oxigênio. Mesmo que as plantas também consumam parte desse oxigênio no processo de respiração, os níveis de oxigênio na atmosfera atualmente não são alterados, visto que a quantidade produzida pela fotossíntese chega a ser 30 vezes maior do que a consumida na respiração. Portanto, a fotossíntese é a principal forma de reposição de oxigênio na atmosfera.

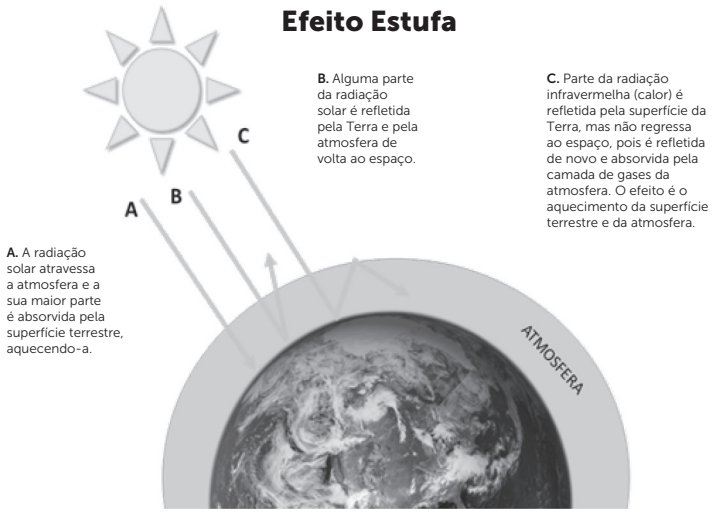
Pesquise mais

Aprofunde os seus estudos sobre os ciclos biogeoquímicos através da leitura do material "A importância da compreensão dos ciclos biogeoquímicos para o desenvolvimento sustentável", disponível em:

ROSA, R. S.; MESSIAS, R. A.; AMBROZINI, B. **A importância da compreensão dos ciclos biogeoquímicos para o desenvolvimento sustentável**. 2003. 53 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003. Disponível em: <http://www.iqsc.usp.br/iqsc/servidores/docentes/pessoal/mrezende/arquivos/EDUC-AMB-Ciclos-Biogeoquimicos.pdf>. Acesso em: 19 maio 2017.

Alguns dos elementos estudados até o momento, quando presentes na atmosfera terrestre na forma gasosa, sejam eles provenientes de fontes naturais ou antrópicas, como o vapor de água (H_2O), o gás carbônico (CO_2), o metano (CH_4), o óxido nitroso (N_2O) e o ozônio (O_3), são capazes de reter a radiação térmica na atmosfera. Essa radiação térmica fica retida na forma de calor, o que permite a existência de vida no planeta Terra. Esse fenômeno natural, conhecido como "efeito estufa", é essencial à sobrevivência dos seres vivos. Porém, como já mencionado, a queima de combustíveis fósseis aumenta a concentração dos gases e, consequentemente, a retenção da radiação térmica na atmosfera, elevando assim a sua temperatura, o que gera discussões acerca das mudanças climáticas.

Figura 1.4 | Efeito estufa



Fonte: elaborada pelo autor.

Vimos até agora que a queima de combustíveis fósseis lança para a atmosfera compostos químicos que interferem nos ciclos dos elementos na natureza. Diversas atividades humanas, desde o cozimento dos alimentos, o transporte em veículos movidos por motores à combustão, a produção industrial e até o preparo de terrenos para a agricultura, utilizam processos de combustão. Porém, é nos grandes centros urbanos que a queima de combustíveis fósseis é mais acentuada, visto que o aumento dos processos de combustão está intimamente relacionado à crescente demanda energética. Isso traz implicações ambientais imediatas e para um futuro próximo, sob a ótica da saúde pública e do meio ambiente. Vamos entender um pouco mais sobre a combustão.

Segundo Rocha, Rosa e Cardoso (2009), a combustão (Reação 1) é a queima de um material com o oxigênio do ar, processo que libera como produto gases e partículas. Muitas partículas são visíveis na forma de fumaça, outras são imperceptíveis. Já os gases são invisíveis, não têm cheiro, ou estão em baixas concentrações e não são detectáveis pelo odor. Para conhecer os gases liberados na combustão, é preciso conhecer a composição do que está sendo queimado ou utilizado como material combustível. Esse é o grande desafio, pois uma infinidade de compostos é queimada diariamente e desconhecemos

a diversidade dos gases que estão sendo formados no processo de combustão, tornando complexa a gestão de emissões atmosféricas.

(Reação 1)

$$Combustível + ar\ [O_2 e\ N_2] \rightarrow gases\,[p.\ ex.,\ NO + SO_2 + CO_2] + [partículas]$$

Exemplificando

A combustão libera gases e fumaça para a atmosfera, porém prever quais gases serão emitidos durante o processo de combustão só é possível quando se conhece o material combustível. Por exemplo, um material formado por carbono, hidrogênio e oxigênio, quando queimado, irá produzir dióxido de carbono e água como principais produtos. Caso exista enxofre na composição do material combustível, será formado dióxido de enxofre como produto.

Além disso, cabe ressaltar que os gases provenientes da combustão, ou até mesmo os gases naturalmente presentes na atmosfera, ainda podem sofrer reações químicas nesta, devido à colisão das moléculas dos reagentes, originando novos produtos. Nesse contexto, o principal motivo que favorece o choque das moléculas é a energia térmica. Além disso, na atmosfera há moléculas que são capazes de absorver fótons de luz, originando um tipo de reação denominada "reação fotoquímica"

(Reação 2) $NO_2 + hv\ (fóton\ de\ luz) \rightarrow NO + O$

A Reação 2 representa uma reação fotoquímica através do dióxido de nitrogênio (NO_2) e tem o fóton de luz também como reagente. Porém, na atmosfera encontramos diferentes combinações de óxidos de nitrogênio (NO_X), como o NO, NO_2, NO_3 e N_2O. O óxido de dinitrogênio (N_2O) possui fontes naturais, por meio de ação bacteriana e por reação entre N_2 e O_3 na atmosfera, e é um dos gases do efeito estufa. O óxido nítrico (NO) é produzido na natureza por ação de microrganismos, mas também é produzido por ação humana, pois é comum a todos os processos de combustão. Na atmosfera, o NO é oxidado por ozônio (O_3) (Reação 3) em processos fotoquímicos, formando o dióxido de nitrogênio (NO_2). O dióxido de nitrogênio em grandes quantidades é irritante e possui coloração avermelhada, sendo um dos principais poluentes secundários presentes na atmosfera das metrópoles. O NO_2, formado nessa etapa, na presença

de luz solar sobre reação oposta (Reação 4), provoca a dissociação do NO_2, regenerando NO e ozônio (Reações 4 e 5). Portanto, percebe-se que há formação e destruição de NO_2 e, com isso, temos que os níveis de ozônio (oxidante) tendem a permanecer a um nível baixo sob condições naturais sem poluição, seria o estado fotoestacionário. Porém, desde a Revolução Industrial se observa o aumento dos níveis de ozônio em regiões com poluição, fato relacionado aos compostos emitidos para a atmosfera.

(Reação 3) $NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2$

(Reação 4) $O + O_2 \rightarrow O_3$

(Reação 5) $NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2$

Como podemos perceber, nesse caso, o ozônio é oxidante e provoca reações químicas na atmosfera. Mas não é somente o ozônio que possui essa característica. Existem outros compostos oxidantes que possuem grande importância para a química da atmosfera, pois são modificadores da sua composição química, interferem na qualidade do ar, podem interferir no balanço térmico da atmosfera, além de atuar na limpeza desta, uma vez que a oxidação produz moléculas mais solúveis em água, facilitando a sua remoção pela água da chuva.

Assimile

A oxidação é uma reação importante para a dinâmica da atmosfera, visto que possui papel fundamental na limpeza da atmosfera, atuando como um detergente, com a função do solubilizar a sujeira para que seja removida pela água.

Anteriormente, vimos que o NO_2 é um dos principais poluentes secundários, pois não é emitido diretamente, mas provém de reações químicas da atmosfera. Os poluentes oriundos diretamente da fonte são chamados de "poluentes primários", como o dióxido de carbono. Porém, os óxidos de nitrogênio recebem atenção nas reações químicas. Os óxidos de nitrogênio e os oxidantes atmosféricos têm função especial na formação do "smog" fotoquímico, um fenômeno que ocorre principalmente em grandes centros urbanos. O termo provém do inglês e quer dizer "nuvem de fumaça". No inverno, quando as condições climáticas são pouco favoráveis à dispersão de

poluentes atmosféricos, há pouco vento e os dias são claros, com grande incidência solar. Essas condições desfavoráveis ocorrem durante o fenômeno atmosférico natural da inversão térmica. A camada atmosférica mais próxima do solo é normalmente mais quente e esfria na medida em que se afasta do solo. Porém, durante a inversão térmica, uma camada de ar mais frio (mais denso) está próximo ao solo e não consegue subir para as camadas mais altas da atmosfera, não havendo dispersão dos poluentes, o que favorece as reações fotoquímicas. Nessas condições, ocorre a quebra do estado estacionário, mencionado anteriormente. Portanto, os principais poluentes do smog fotoquímico são o dióxido de nitrogênio e o ozônio (Reações 2, 3, 4 e 5). Como resultado, temos uma camada de poeira, localizada próxima ao solo, observada nos grandes centros urbanos como demonstrado na Figura 1.5.

Figura 1.5 | Smog fotoquímico em centro urbano

Fonte: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/5b/AerialViewPhotochemicalSmogMexicoCity_2.jpg>. Acesso em: 25 mar. 2017.

Reflita

O smog fotoquímico traz, portanto, inúmeros problemas de saúde para a população, sobretudo problemas respiratórios, visto que os poluentes ficam concentrados próximo ao solo e não se dispersam. Para você, qual é a responsabilidade dos órgãos públicos sobre esse fato?

Encerramos aqui mais uma seção sobre o estudo da gestão de emissões atmosféricas. Estudamos aspectos importantes sobre a química da atmosfera e sobre as reações que nela ocorrem. Daremos continuidade, na Seção 3, ao estudo da atmosfera, abordando temas relacionados à termodinâmica da atmosfera. Até lá!

Sem medo de errar

Relembrando a situação-problema desta seção, você é um profissional de um instituto nacional responsável por realizar pesquisas na área de informações espaciais e emissões atmosféricas, e deve elaborar um estudo técnico-teórico para a divulgação de dados científicos sobre o comportamento dos gases na atmosfera. Você já realizou a primeira parte do estudo, na qual abordou alguns aspectos fundamentais sobre a atmosfera terrestre. Agora, nesta segunda parte, é preciso aprofundar o estudo a fim de propiciar aos leitores a compreensão da dinâmica da atmosfera. Para isso, você deve considerar as seguintes perguntas: De que forma a atmosfera terrestre interfere nos ciclos de alguns elementos na natureza, como o nitrogênio, o oxigênio, o carbono e o enxofre? Qual é a relação desses gases com o efeito estufa, e qual é a sua importância? Esses gases podem sofrer reações químicas com outros compostos lançados na atmosfera? Como ocorrem essas reações e quais são os produtos gerados?

A atmosfera é um dos reservatórios, assim como a biosfera e a litosfera, de elementos da natureza. Os elementos, como carbono, nitrogênio, enxofre, fósforo e oxigênio, são essenciais à sobrevivência dos seres vivos e fazem parte da sua constituição. Exceto o fósforo, todos os demais elementos possuem uma fase na atmosfera, que atua como grande reservatório natural, como o nitrogênio e o oxigênio. Porém, cabe ressaltar que as ações antrópicas emitem muitos desses compostos na atmosfera, interferindo na ciclagem de nutrientes. Alguns desses elementos quando presentes na atmosfera terrestre na forma gasosa, sejam eles provenientes de fontes naturais ou antrópicas, como o vapor de água (H_2O), o gás carbônico (CO_2), o metano (CH_4), o óxido nitroso (N_2O) e ozônio (O_3), são capazes de reter a radiação térmica na atmosfera. Essa radiação térmica fica retida na forma de calor, o que permite a existência de vida no planeta Terra. Esse fenômeno natural, conhecido como "efeito estufa", é essencial à sobrevivência dos seres vivos. Porém, como já mencionado, a

queima de combustíveis fósseis aumenta a concentração dos gases, e, consequentemente, a retenção da radiação térmica na atmosfera, elevando assim a sua temperatura, o que gera discussões acerca das mudanças climáticas.

Os poluentes podem ser classificados em primários, quando são lançados imediatamente pela fonte, como o dióxido de carbono, ou secundários, quando são formados por meio da reação química com outros gases presentes na atmosfera. O óxido nítrico (NO), produzido na natureza por ação de microrganismos e também por ação humana, sofre oxidação pelo ozônio (O_3) em processos fotoquímicos, que ocorrem na presença de luz, formando o dióxido de nitrogênio (NO_2). O dióxido de nitrogênio, em grandes quantidades, é irritante e possui coloração avermelhada, sendo um dos principais poluentes secundários presentes na atmosfera das metrópoles. O NO_2 na presença de luz solar sof re reação oposta provocando a dissociação do NO_2 e regenerando NO e ozônio. O NO_2 e o O_3 são os principais poluentes responsáveis pelo smog fotoquímico, que causa problemas respiratórios a milhares de pessoas nos grandes centros urbanos.

Lembre-se de que esta constitui a segunda parte do estudo técnico-teórico que será divulgado para a sociedade. Seja claro ao apresentar os conceitos, buscando sempre citar exemplos do cotidiano das pessoas e incentivando, de alguma forma, uma reflexão sobre as consequências das atividades humanas na atmosfera e para a qualidade do ar.

Avançando na prática

Efeito estufa: mocinho ou vilão?

Descrição da situação-problema

Diante das consequências da poluição do ar para a saúde humana, as Secretarias de Meio Ambiente e de Saúde de um grande centro urbano resolveram contratar um grupo de pesquisadores para elaborar materiais didáticos sobre a atmosfera e a poluição do ar, que serão distribuídos gratuitamente nas escolas da rede municipal. O intuito é disseminar informações e conhecimentos sobre a importância da atmosfera e da preservação da qualidade do ar para a saúde humana e para o meio ambiente. Você, profissional da área ambiental, fará parte do grupo de pesquisadores contratados e deverá elaborar um dos capítulos do material didático, que irá abordar a

origem, formação e evolução da atmosfera terrestre. Para nortear o seu trabalho, considere as seguintes perguntas: Qual é a relação das atividades antrópicas com o efeito estufa? Quais são os efeitos do aumento de gases do efeito estufa?

Resolução da situação-problema

Alguns gases presentes na atmosfera terrestre, como o vapor de água (H_2O), o gás carbônico (CO_2), o metano (CH_4), o óxido de dinitrogênio (N_2O) e ozônio (O_3), são capazes de reter a radiação térmica. Esses gases são conhecidos como "gases do efeito estufa". O efeito estufa é um fenômeno natural que garante a vida na Terra, pois os gases que retêm parte dos raios solares na atmosfera garantem a permanência do calor na atmosfera. Caso contrário, a superfície terrestre seria extremamente gelada. A outra parte dos raios solares que não fica retida nos gases é devolvida para o espaço. Porém, os gases do efeito estufa, fenômeno natural e essencial à vida, são emitidos para a atmosfera através da queima de combustíveis fósseis e do desmatamento, que aumentam a concentração de gases na atmosfera. Logo, quando há mais gases do efeito estufa na atmosfera, mais calor é retido. Isso tem gerado um alerta sobre os efeitos do aumento da temperatura na superfície da atmosfera, pois pode provocar o derretimento de calotas polares e consequente elevação do nível dos oceanos; maior incidência de fenômenos climáticos como furacões, tufões, ciclones; secas extremas e ondas de calor. Além disso, a biodiversidade também fica ameaçada, visto que inúmeros seres vivos são sensíveis às pequenas alterações de temperatura, o que pode levar à extinção de espécies e destruição de ecossistemas.

Faça valer a pena

1. O smog fotoquímico é um dos maiores problemas ambientais dos grandes centros urbanos e causa graves problemas respiratórios para a saúde da população. Trata-se de um fenômeno fotoquímico formado por uma nuvem de poeira que permanece próxima à superfície do solo.
O smog fotoquímico tem como principais poluentes:

a) O N_2O e o O_3.
b) O NO e o O_3.
c) O NO e o O_2.
d) O NO_2 e o O_3.
e) O NO_3 e o O_2.

2. A reação de NO na atmosfera se dá principalmente pela reação com o ozônio, formando o NO_2,
PORQUE
na presença de luz solar, ocorre a dissociação do NO_2, que se regenera em NO e ozônio.

Assinale a alternativa correta sobre a análise das assertivas.

a) As duas asserções são proposições verdadeiras, e a segunda é uma justificativa correta da primeira.
b) As duas asserções são proposições verdadeiras, mas a segunda não é uma justificativa correta da primeira.
c) A primeira asserção é uma proposição verdadeira, e a segunda, uma proposição falsa.
d) A primeira asserção é uma proposição falsa, e a segunda, uma proposição verdadeira.
e) Tanto a primeira quanto a segunda asserções são proposições falsas.

3. A atmosfera é um dos compartimentos dos elementos na natureza e, juntamente com a biosfera e a litosfera, tem um papel importante na ciclagem de nutrientes nos ecossistemas.
O elemento químico que não está presente na atmosfera sob qualquer forma é o:

a) Oxigênio.
b) Enxofre.
c) Nitrogênio.
d) Ozônio.
e) Fósforo.

Seção 1.3

Termodinâmica da atmosfera

Diálogo aberto

Caro aluno,

Estudamos, nas Seções 1 e 2, aspectos relacionados à origem e evolução da atmosfera terrestre, ao comportamento dos gases e às reações fotoquímicas que nela ocorrem. Agora, na última seção da Unidade 1, vamos aprender sobre a termodinâmica da atmosfera que, juntamente com os conceitos apresentados nas Seções 1 e 2, é um tema de grande relevância para a gestão das emissões atmosféricas, visto que seu conhecimento é imprescindível para gerir e controlar a emissão dos gases poluentes. Para alcançarmos os objetivos desta seção, iremos abordar as leis da termodinâmica e de que forma estas estão presentes e interferem na dinâmica da atmosfera, o que significa estabilidade e instabilidade atmosférica e, por fim, aprofundaremos o estudo discutindo o processo adiabático e o nível de condensação convectivo. Parecem temas distantes do seu cotidiano, mas na verdade estão muito próximos de nós, sobretudo quando assistimos ao noticiário. É comum nos noticiários escutarmos, durante a previsão do tempo, termos como "estabilidade atmosférica" e "umidade relativa do ar". A umidade relativa do ar, quando baixa, é sempre motivo de alerta nos noticiários por afetar diretamente a saúde humana. Por isso, o estudo da termodinâmica da atmosférica é de grande relevância para a sua formação profissional, sobretudo no que se refere à gestão das emissões atmosféricas.

Nesta última seção, lembre-se de que você deve finalizar a entrega do seu produto, que é o estudo técnico-teórico do comportamento dos gases na atmosfera. Para isso, vamos relembrar o nosso contexto de aprendizagem? Você foi contratado, como profissional da área ambiental, por um instituto nacional responsável por realizar pesquisas na área de informações espaciais e emissões atmosféricas. Esse instituto realiza anualmente a elaboração de um estudo técnico-teórico para a divulgação de dados científicos sobre o comportamento dos gases na atmosfera, relacionando-o com as emissões atmosféricas e com dados de poluição do ar de um determinado município ou região. Neste ano, você fará parte da equipe responsável pela elaboração do estudo, bem

como pela sua divulgação para a sociedade. Nas duas primeiras partes do estudo, você escreveu sobre a origem, estrutura e composição da atmosfera, além de abordar a importância da atmosfera na ciclagem de nutrientes e das principais reações fotoquímicas que ocorrem na atmosfera que podem alterar a sua composição química devido aos produtos gerados nessas reações. Agora, você deve finalizar o estudo técnico-teórico e, em seguida, disponibilizá-lo para a sociedade. Para isso, você irá abordar temas específicos e complexos sobre a termodinâmica da atmosfera e de que forma ela se relaciona com a poluição do ar. Portanto, considere as seguintes perguntas: Qual é a relação das leis da termodinâmica com a atmosfera? De que forma a termodinâmica interfere no comportamento dos gases na atmosfera? O que é estabilidade e instabilidade atmosférica e de que forma isso interfere na qualidade do ar? A partir dessas perguntas, você deverá considerar como ambiente de estudo um grande centro urbano, como São Paulo, Belo Horizonte, Curitiba, entre outros. Você poderá acessar os dados atmosféricos da cidade escolhida no site do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), na aba "Poluição do ar", para auxiliar na elaboração do estudo. Além disso, poderá coletar dados atmosféricos em estações meteorológicas disponíveis no site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Busque dados dos últimos 10 anos, relacionando os eventos de poluição do ar com a termodinâmica da atmosfera.

É importante que você compreenda muito bem os conceitos e temas que iremos estudar nesta seção, pois são de grande relevância para a compreensão da dispersão dos poluentes na atmosfera e, consequentemente, para uma adequada gestão de emissões atmosféricas. Vamos começar?

Não pode faltar

Na Seção 1, vimos que o ar é composto de nitrogênio, oxigênio, argônio, dióxido de carbono, hidrogênio, hélio, além de outros componentes em concentrações menores. Porém, além desses componentes, o ar atmosférico também contém uma quantidade de água, na forma de vapor. Essa quantidade ou teor de vapor de água, em condições normais de pressão e temperatura, varia entre praticamente 0% a 5%, de acordo com a temperatura, região, estação do ano etc., sendo proveniente da evaporação das águas dos corpos hídricos, como mares, rios e lagos, devido à radiação solar. Mas o que seriam essas condições normais? Antes de

respondermos a essa pergunta, vamos relembrar alguns conceitos importantes como pressão e temperatura.

A pressão é a relação entre a força aplicada sobre uma determinada superfície com a área dessa superfície. Trazendo esse conceito para o nosso estudo sobre a atmosfera, a pressão atmosférica representa o peso por unidade de área da coluna de ar que está acima da superfície terrestre. No nível do mar, por exemplo, o peso das moléculas de ar equivale a cerca de 1 kg a cada 1 cm^2, logo, adota-se que a pressão atmosférica é de 1 atm (ao nível do mar). Por isso, à medida que a altitude aumenta, a pressão diminui, visto que o peso da camada de moléculas de ar acima também diminui. Cabe ressaltar que a pressão atmosférica varia ao longo do dia e atinge dois momentos de máximo, (às 10h e às 22h) e dois momentos de mínimo (às 04h e às 16h), devido à ação gravitacional da Lua.

Outra grandeza importante para o nosso estudo é a temperatura, definida como o nível de calor de um ambiente que resulta da ação dos raios solares. Essa grandeza física tem influência direta sobre o vapor de água e, consequentemente, sobre o ar. Porém, para entendermos essa influência, é preciso relembrar o que é densidade. A densidade é definida pela relação entre a quantidade de massa de uma substância por unidade de volume. Isso é fácil de notar ao compararmos objetos de diferentes substâncias. Por exemplo, ao comparar um cubo de gelo com um cubo de metal, ambos com mesmo volume, iremos notar que o cubo de metal possui maior massa, logo, tem maior densidade.

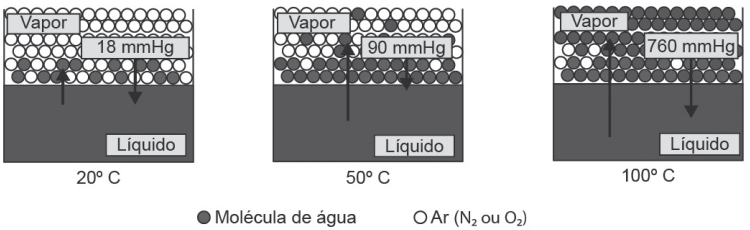
Trazendo esse conceito para o estudo da influência da temperatura sobre o vapor de água e sobre a pressão atmosférica, temos que o ar é mais denso do que o vapor de água. Portanto, uma massa de ar úmida (maior quantidade de vapor de água) exerce maior pressão do que uma massa de ar seco (menor quantidade de vapor de água) sobre a superfície terrestre. Além disso, você já deve ter ouvido falar sobre a inversão térmica, não é mesmo? A inversão térmica é um processo natural, no qual, nos dias mais frios e secos, uma camada de ar mais frio fica próxima à superfície terrestre e não consegue ascender por ser mais densa do que a camada de ar quente logo acima dela. Essa camada de ar frio aprisiona os poluentes atmosféricos, impedindo a sua dispersão e causando problemas respiratórios para a população, como pode ser observado na Figura 1.6. Porém, as emissões de poluentes de origem antrópica intensificam esse processo, ocasionando problemas respiratórios nos grandes centros urbanos.

Figura 1.6 | Inversão térmica: camada de ar frio com poluentes próximo à superfície terrestre

Fonte: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/de/Vista_parcial_de_Cubat%C3%A3o_SP_a_partir_da_Serra_do_Mar.jpg>. Acesso: 9 abr. 2017.

Agora que já relembramos os conceitos de pressão e temperatura, vamos continuar os nossos estudos. O vapor de água presente na atmosfera exerce uma pressão sobre a atmosfera terrestre chamada de "pressão de vapor". Essa pressão de vapor reflete a tendência da água de evaporar e, portanto, está diretamente relacionada à temperatura, conforme pode ser observado na Figura 1.7. Por exemplo, quando o ar resfria, ou seja, ocorre a diminuição da temperatura, acontece a condensação do vapor de água, isto é, a água passa do estado gasoso para o estado líquido. Nós podemos observar esse processo sobre os vidros dos carros, o orvalho que se forma de madrugada nas plantas, além da própria formação de nuvens. O movimento contrário é chamado de "evaporação", ou seja, quando a água passa do estado líquido para o estado gasoso, por meio do aumento da temperatura.

Figura 1.7 | Pressão de vapor de água na interface ar e água



Fonte: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9c/Press_o_de_vapor.gif>. Acesso em: 7 abr. 2017.

Vale relembrar que o vapor de água na atmosfera tem um papel relevante na regulação térmica da atmosfera por fazer parte dos gases responsáveis pelo efeito estufa, juntamente com o dióxido de carbono, o ozônio, o metano e o óxido nitroso. Estes são capazes de reter a radiação térmica na atmosfera. Essa radiação térmica fica retida na forma de calor, o que permite a existência de vida no planeta Terra. Além disso, o vapor de água faz parte do ciclo da água, sendo responsável pela formação das nuvens e pela precipitação das chuvas, processo por meio do qual a água retorna para os corpos hídricos (rios, lagos, mares etc.). Ao receber a ação do sol, a água evapora e, em condições ideais de temperatura e pressão, volta a condensar-se nas camadas mais altas da atmosfera, formando as nuvens, que se precipitam fechando o ciclo. As precipitações têm papel importante na limpeza da atmosfera, devido à dissolução de poluentes atmosféricos. Logo, regiões com baixo teor de vapor de água tendem a ter muitos poluentes concentrados na atmosfera.

Cabe ressaltar que constantemente há troca de moléculas de água na interface entre água e ar. Contudo, quando a taxa de evaporação e a taxa de condensação se igualam, temos um estado de equilíbrio dinâmico no qual, a pressão é chamada de "pressão de vapor de saturação". Esta pressão de vapor de saturação é importante para compreendermos o conceito de umidade relativa, que é a razão entre a pressão de vapor de água e a pressão de vapor de água saturada, expressa em porcentagem.

Reflita

Ao longo de um dia, a pressão de vapor saturado apresenta um máximo e mínimo nos mesmos horários em que a temperatura? Ao longo de um dia, a umidade relativa tem seu mínimo quando a temperatura é máxima ou mínima?

O Ministério da Saúde determina que a faixa de conforto para o homem varia de 30 a 70% de umidade relativa do ar. Sendo que quando a umidade do ar está acima de 70% há uma dificuldade de evaporação da água, logo temos a sensação de que o ambiente está abafado. Porém, abaixo de 30% a evaporação ocorre com muita facilidade, o que pode ocasionar problemas respiratórios. A umidade relativa do ar também afeta as plantas, visto que com a umidade baixa as plantas transpiram mais, ou seja, perdem mais água para a atmosfera, logo devem extrair mais água do solo. Isso tem grande relevância para a agricultura, que devido aos períodos de seca e baixa umidade deve prever a necessidade

de irrigação das plantações, a frequência das irrigações, o melhor horário e a quantidade de água necessária, considerando as necessidades de cada tipo de cultura.

Assimile

O teor de água na atmosfera é diferente da umidade relativa do ar. O teor de água representa a quantidade de água, em porcentagem, presente na composição química da atmosfera. Já a umidade relativa do ar representa a razão entre a pressão de vapor de água e a pressão de vapor de água saturada.

A termodinâmica da atmosfera estuda os fenômenos atmosféricos sob o ponto de vista da transformação da energia cinética (velocidade) das moléculas, da energia potencial (altitude) e da energia térmica (energia interna) de uma parcela de ar por processos de deslocamento (vertical) e por processo de aquecimento e/ou resfriamento. Mais adiante você irá entender os processos de deslocamento, aquecimento e/ou resfriamento de uma parcela de ar, quando estudarmos a estabilidade atmosférica. Relembrando, na termodinâmica há duas leis que regem os fenômenos de transformação ou transferência de energia. A primeira lei, conhecida como "Princípio da Conservação de Energia", diz que a energia não pode ser criada e nem destruída, ela apenas se transforma em outro tipo de energia ou em trabalho. Porém, nem toda a energia criada será transformada em outro tipo de energia ou trabalho, há perdas para o ambiente, a segunda lei trata disso. A segunda lei postula que as transformações ocorrem espontaneamente apenas em um sentido, sendo, portanto, irreversíveis. Para que o fluxo seja reversível, é necessária a realização de trabalho, porém, é impossível transformar todo o calor em trabalho.

Exemplificando

Você pode observar a aplicação das leis da termodinâmica ao ferver água em uma chaleira. À medida que a temperatura aumenta, as moléculas de água se agitam e passam do estado líquido para o gasoso, na forma de vapor. Você observa o vapor de água saindo pelo bico da chaleira, uma vez que as moléculas de vapor de água têm uma direção preferencial. Elas poderiam empurrar um pistão de uma pequena máquina a vapor, realizando trabalho, porém o vapor de água se dissipa no ar, fazendo com que as moléculas se movimentem de modo desordenado, aquecendo o ar mais frio e perdendo a sua energia útil.

Observamos a aplicação dessas leis na atmosfera, uma vez que a energia luminosa que entra na atmosfera é retida (transformada) na forma de calor por gases do efeito estufa. Outro exemplo são as placas fotovoltaicas ou painéis solares, que, por sua vez, transformam essa energia luminosa em energia elétrica. Em ambos os exemplos, notamos a irreversibilidade dos processos. Porém, essa irreversibilidade é o grande problema da poluição atmosférica, porque uma vez emitida para a atmosfera, não há como tornar o processo reversível. Além disso, no ambiente urbano, outro grande problema é a diversidade de poluentes presentes nos diferentes ambientes, o que torna a poluição atmosférica um parâmetro difícil de avaliar.

Agora que já aprendemos conceitos importantes sobre a termodinâmica da atmosfera, daremos continuidade ao nosso estudo, abordando as variáveis e processos que determinam a estabilidade e a instabilidade atmosférica. Existe uma camada, de aproximadamente 2 km, entre a superfície terrestre e a atmosfera, chamada "Camada Limite Atmosférica" (CLA) ou "Camada Limite Planetária" (CLP). Essa camada é influenciada pelas trocas de calor e vapor de água, que são induzidas pela evaporação, transpiração, transferência de calor e emissão de poluentes. Como podemos observar, é nessa camada que ocorrem os lançamentos de poluentes oriundos de atividades antrópicas e/ou naturais. Além disso, vimos que essa camada está sujeita a quatro variáveis, que são: (1) pressão atmosférica, (2) temperatura do ar, (3) densidade do ar e (4) umidade do ar. Essas variáveis estão relacionadas entre si através das leis da termodinâmica e influenciam diretamente a estabilidade/instabilidade da atmosfera.

As nuvens se formam quando uma massa de ar ascende e resfria, bem acima do solo, sendo formadas basicamente por gotículas de água na forma de vapor de água. As nuvens têm um papel importante na regulação do balanço de energia da Terra, uma vez que refletem e espalham a radiação solar, absorvendo a energia infravermelha. Além disso, não haveria precipitação sem nuvens. Santos et al. (2013) afirmam ainda que, para os especialistas, as nuvens também informam sobre processos atmosféricos, por exemplo, a estabilidade atmosférica. Acima da superfície do solo, há um deslocamento vertical das massas de ar, devido à diferença de densidade, como já mencionado nesta seção. Além do descolamento vertical, as massas de ar (parcelas de ar) passam por processos de aquecimento e resfriamento.

A parcela de ar tem capacidade de se expandir e contrair devido ao movimento das moléculas dos gases em seu interior. O ar e o calor externos, ou seja, fora dessa parcela de ar, não se misturam com o ar dentro da parcela. Dessa forma, temos um processo adiabático, que é caracterizado pela ausência de troca de calor e energia. Por isso, podemos afirmar que dentro de uma parcela de ar, o espaço ocupado pelos gases define a densidade do ar, a velocidade média com que elas se movimentam está diretamente relacionada à temperatura, e as colisões das moléculas contra a parede da parcela determinam a pressão interna do ar.

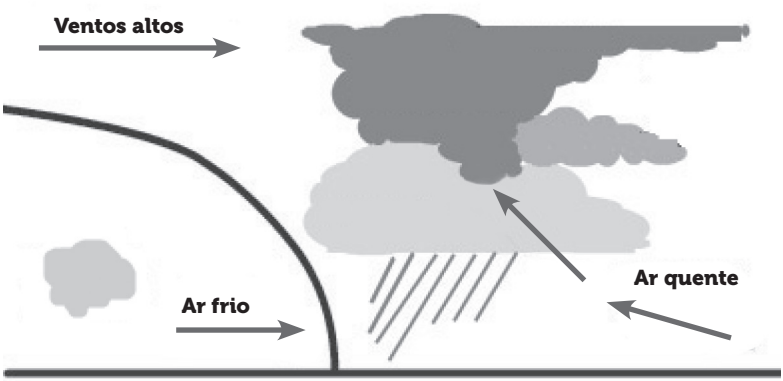
A pressão interna é igual à pressão do ar ambiente na superfície terrestre. Porém, quando uma parcela de ar ascende, a pressão do ar diminui (lembre-se de que a pressão atmosférica diminui com o aumento da altura). Logo, como a pressão fica mais baixa do lado de fora dessa parcela de ar, as moléculas dos gases no interior dela conseguem empurrar a parede da parcela para fora, expandindo-a. Entretanto, para se moverem e empurrarem a parede da parcela, as moléculas dos gases usam sua própria energia (lembre-se de que o calor externo à parcela não se mistura), gerando uma velocidade molecular média mais baixa e isso resulta em uma parcela de ar com temperatura mais baixa. Mas e se ela retornar à sua posição original, onde a pressão do ar é maior? Nesse caso, a parcela de ar será comprimida, pois a pressão maior aperta a parcela de ar até que ela atinja o seu volume original. Nessa compressão, a velocidade das moléculas aumenta e, consequentemente, aumenta a temperatura. Logo, uma parcela de ar em ascensão expande e resfria, e uma parcela de ar descendente comprime e aquece.

Nesse contexto, a palavra "estabilidade" nos remete a uma condição de equilíbrio, isso quer dizer que quando uma massa de ar é empurrada, ela consegue retornar à sua posição inicial. Porém, quando uma massa de ar não está em equilíbrio, não retornará à sua posição inicial após ser empurrada, mas irá se mover para longe. A estabilidade é determinada pela temperatura de uma parcela de ar, pois, como vimos anteriormente, uma parcela de ar fria é mais densa, logo, tende a retornar à sua posição inicial (estável), uma vez que resiste ao movimento de ascensão (movimento convectivo). Vale ressaltar que o movimento de ascensão por convecção pode ser afetado por barreiras físicas, como as montanhas, gerando turbulência na parcela de ar. Tanto os movimentos convectivos quanto as turbulências são

aumentadas quando o ar é instável, logo, os poluentes atmosféricos são melhores misturados ao ar limpo quando há instabilidade. Quando o ar é estável, como não há comunicação da parcela de ar com o ar externo, a parcela de ar inibe os movimentos convectivos e a turbulência, logo, não há mistura dos poluentes com o ar limpo, ou seja, dificulta-se a dispersão de poluentes.

Mas você deve estar se perguntando: o que ocorre com a parcela de ar ascendente, uma vez que esta se resfria com ascensão? As parcelas de ar que estudamos aqui são produzidas por convecção térmica pelo aquecimento da superfície. A parcela de ar ascendente, em algum momento da ascensão, atinge um nível em que se inicia a condensação do vapor de água presente nela, chamado "nível de condensação convectiva". Essa condensação libera calor latente (quantidade de calor que uma unidade de massa deve receber ou ceder para mudar de fase), fornecendo energia suficiente para alimentar tempestades ou modificações na circulação atmosférica, conforme pode ser observado na Figura 1.8.

Figura 1.8 | Formação de nuvens de tempestade pela ascensão de uma parcela de ar quente acima do nível de condensação convectiva



Fonte: adaptada de <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d5/Nuvens_Ffria.jpg>. Acesso em: 9 abr. 2017.

Pesquise mais

Para conhecer mais sobre a estabilidade atmosférica e a formação de nuvens, acesse a apostila desenvolvida pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). disponível em:

ZILIO, S. C.; BAGNATO, V. S. Termodinâmica do gás ideal. In: _____. **Mecânica, calor e ondas**. São Carlos: Fotônica/IFSC/USP, 2002. p. 265-273. Disponível em: <http://www.fotonica.ifsc.usp.br/ebook/book3/Capitulo14.pdf>. Acesso em: 7 abr. 2017.

Para finalizar o nosso estudo sobre a termodinâmica da atmosfera, é importante lembrar que as massas de ar podem ser secas ou úmidas e isso determina uma diferença no resfriamento das massas de ar durante o processo de ascensão. As parcelas de ar sofrem mudanças de temperatura com os movimentos verticais, chamadas "variações adiabáticas de temperatura". Essas variações adiabáticas podem ser determinadas a partir da taxa adiabática. Quando a parcela de ar é seca, essa taxa é denominada "taxa adiabática seca", sendo que, em média, a cada quilômetro a temperatura cai cerca de 6,5°C, mas pode variar de um lugar para o outro. A taxa adiabática seca também é utilizada para uma parcela de ar úmido não saturado. Porém, quando a parcela de ar úmido está saturada, o seu resfriamento pode causar condensação ao atingir o nível de condensação convectivo. Acima desse nível de condensação convectivo, devido à liberação do calor latente, a taxa de resfriamento diminui para cerca de 3°C por quilômetro e recebe o nome de "taxa adiabática úmida", sendo também variável de um lugar para o outro. Todas essas informações e variáveis são imprescindíveis para a correta gestão das emissões atmosféricas, uma vez que não é possível controlar e monitorar os poluentes quando não se conhece as massas de ar, sua composição e seu deslocamento. Por isso, a termodinâmica da atmosfera é de grande relevância para monitorar os poluentes atmosféricos.

Chegamos ao final do estudo sobre a termodinâmica da atmosfera e, também, ao final da nossa primeira unidade deste livro didático. As informações apresentadas ao longo dessas seções permitirão que você compreenda os conteúdos que serão trabalhados na Unidade 2, sobre a análise e o controle de poluentes atmosféricos. Bons estudos!

Sem medo de errar

A poluição do ar não é algo recente, porém, desde a Revolução Industrial tem sido motivo de preocupação para os governantes e para a população, devido à redução da qualidade de vida e aos efeitos sobre a saúde humana. Nesse contexto, conhecer a dinâmica da atmosfera e o comportamento dos gases e poluentes é imprescindível para a adequada

gestão das emissões atmosféricas, a fim de reduzir a poluição do ar. Vamos relembrar o contexto de aprendizagem que norteia a situação-problema desta seção. Você foi contratado por um instituto nacional de pesquisas espaciais e emissões atmosféricas. Como funcionário desse instituto e como profissional da área ambiental, você fará parte da equipe que irá elaborar um estudo técnico-teórico para a divulgação de dados científicos sobre o comportamento dos gases na atmosfera, relacionando-o com as emissões atmosféricas e com dados de poluição do ar. Você e sua equipe já realizaram duas etapas desse relatório, sendo a primeira sobre a origem, evolução e composição da atmosfera e a segunda sobre a dinâmica da atmosfera. Agora, chegamos à última entrega do estudo técnico-teórico do comportamento dos gases na atmosfera. Para finalizar o estudo, você deverá abordar temas relacionados à termodinâmica da atmosfera e de que forma ela se relaciona com a poluição do ar. Para isso, você deve considerar as seguintes perguntas norteadoras: Qual é a relação das leis da termodinâmica com a atmosfera? De que forma a termodinâmica interfere no comportamento dos gases na atmosfera? O que são estabilidade e instabilidade atmosférica e de que forma interferem na qualidade do ar? A partir dessas perguntas, você deverá considerar como ambiente de estudo um grande centro urbano, como São Paulo, Belo Horizonte, Curitiba, entre outros. É possível acessar os dados atmosféricos da cidade escolhida no site do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), na aba "Poluição do ar", para auxiliar na elaboração do estudo. Além disso, poderá coletar dados atmosféricos em estações meteorológicas disponíveis no site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Busque dados dos últimos 10 anos, relacionando-os aos eventos de poluição do ar com a termodinâmica da atmosfera.

A termodinâmica da atmosfera estuda os fenômenos atmosféricos sob o ponto de vista da transformação da energia cinética (velocidade), da energia potencial (altitude) e da energia térmica (energia interna) de uma parcela de ar por processos de deslocamento (vertical) e por processo de aquecimento e/ou resfriamento. A primeira lei, conhecida como "Princípio da Conservação de Energia", postula que a energia não pode ser criada e nem destruída, ela apenas se transforma em outro tipo de energia ou em trabalho. Porém, nem toda a energia criada será transformada em outro tipo de energia ou trabalho, há perdas para o ambiente, e a segunda lei trata disso. Esta postula que as transformações ocorrem espontaneamente apenas em um sentido, sendo, portanto, irreversíveis. Observamos a aplicação dessas leis na

atmosfera, por exemplo, com as placas fotovoltaicas ou painéis solares, que transformam a energia luminosa em energia elétrica, processo irreversível. Porém, essa irreversibilidade é o grande problema da poluição atmosférica, porque uma vez emitida para a atmosfera, não há como tornar o processo reversível. Sobre a estabilidade e a instabilidade atmosférica, é preciso lembrar aspectos relacionados ao vapor de água na atmosfera. Acima da superfície do solo, as massas ou parcelas de ar se deslocam verticalmente, devido à diferença de densidade, e, durante esse deslocamento, elas passam por processos de aquecimento e resfriamento. Uma parcela de ar tem capacidade de se expandir e contrair devido ao movimento das moléculas dos gases no seu interior. Quando uma parcela de ar é empurrada e consegue retornar à sua posição inicial, diz-se que ela é estável. Porém, quando uma massa de ar não está em equilíbrio, ela não retornará à sua posição inicial após ser empurrada. A estabilidade é determinada pela temperatura de uma parcela de ar, uma vez que uma parcela de ar fria é mais densa e, por isso, tende a retornar à sua posição inicial, pois resiste ao movimento de ascensão. Quando o ar é estável, como não há comunicação da parcela de ar com o ar externo, esta parcela de ar inibe os movimentos convectivos e a turbulência, logo, não há mistura dos poluentes com o ar limpo, ou seja, dificulta-se a dispersão de poluentes. Por isso, a dispersão de poluentes é melhor em parcelas de ar instáveis. Observamos esses fenômenos nos grandes centros urbanos, como São Paulo, Belo Horizonte, entre outros, sobretudo nos meses de inverno, quando é comum a ocorrência da inversão térmica. Relembrando que, independentemente da cidade escolhida, você deve analisar os dados meteorológicos e de poluição do ar e relacioná-los com a dispersão dos poluentes nos meses de inverno, nos quais, devido à inversão térmica, a massa de ar fria fica aprisionada na superfície do solo, impedindo a dispersão de poluentes. Além disso, você deverá abordar os eventos, durante o período de 10 anos de coleta de dados, em que as massas de ar ficaram instáveis, fator benéfico para a dispersão de poluentes.

É importante que você aborde os principais fundamentos dos processos termodinâmicos que possibilitam compreender o deslocamento das parcelas de ar e as variáveis favoráveis à dispersão dos poluentes. Lembre-se de que esta é a última parte do estudo técnico-teórico do comportamento dos gases na atmosfera e que, além disso, o estudo será disponibilizado para a população, logo, a linguagem deve ser clara e objetiva.

Avançando na prática

Vapor de água: regulador térmico da atmosfera

Descrição da situação-problema

No Brasil, sobretudo na região Sudeste, o outono e o inverno são caracterizados por serem estações secas, com temperaturas mais amenas, mas com grande índice de radiação solar. Essas condições fazem com que a umidade relativa do ar, que representa a quantidade de vapor de água na atmosfera, baixe, chegando a cerca de 10%, nível registrado no deserto do Saara. Segundo o Ministério da Saúde, a umidade relativa do ar considerada aceitável para a saúde humana é de cerca de 30%, mas o nível ideal é de 60%. Nesse contexto, imagine a seguinte situação: você é funcionário do Instituto Nacional de Meteorologia e Estatística (INMET) e foi convidado por um telejornal para explicar à população a importância do vapor de água na atmosfera, visto que o seu município entrou em estado de alerta devido à baixa umidade do ar. O jornalista irá fazer as seguintes perguntas durante a entrevista: Qual é a importância do vapor de água na atmosfera? Qual é o teor de vapor de água na atmosfera e o que influencia esse teor? Qual é a relação do teor de vapor de água na atmosfera com a temperatura e com a poluição?

Descrição da situação-problema

O vapor de água na atmosfera tem um papel relevante na sua egulação térmica, por fazer parte dos gases responsáveis pelo efeito estufa, com capacidade de reter a radiação térmica na forma de calor, ou seja, realizando a regulação térmica do planeta Terra. Além disso, o vapor de água tem um papel importante no ciclo da água, sendo responsável pela formação das nuvens e pela precipitação das chuvas, processo por meio do qual a água retorna para os corpos hídricos (rios, lagos, mares etc.). É importante esclarecer que o teor de vapor de água e a umidade relativa do ar são conceitos diferentes. O vapor de água presente na atmosfera exerce uma pressão sobre a atmosfera terrestre, chamada de "pressão de vapor", que reflete a tendência da água de evaporar. Quando a taxa de evaporação e a taxa de condensação se igualam, a pressão é chamada de "pressão de vapor de saturação". A umidade relativa do ar expressa a relação entre a pressão de vapor de água e a pressão de vapor de água saturada, sendo o índice que comumente vemos nos noticiários sobre o tempo. Já o teor de água

representa a quantidade de água (em %) presente na composição química da atmosfera, e varia entre 0% a 5%, de acordo com a temperatura, região, estação do ano etc. Em regiões desérticas, esse teor chega a quase 0%, pois a taxa de evaporação é alta, devido às altas temperaturas. Essas variáveis, como umidade do ar e temperatura, estão diretamente relacionadas com a dispersão de poluentes na atmosfera, uma vez que em dias mais frios e secos, forma-se uma camada de ar mais frio próximo à superfície terrestre, onde estão os poluentes atmosféricos. Essa camada de ar mais frio, por ser mais densa do que a camada de ar quente, não consegue subir, ficando aprisionada na superfície terrestre. Além disso, a baixa umidade reflete a ausência de precipitações, que são responsáveis pela dispersão de poluentes.

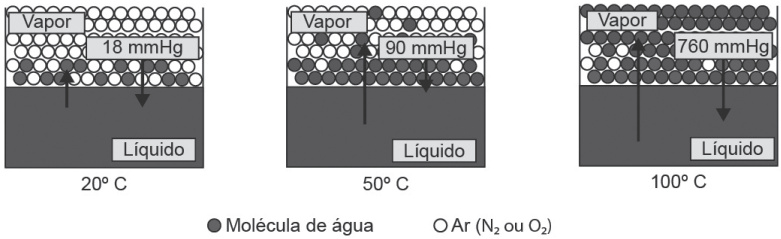
Faça valer a pena

1. O vapor de água presente na atmosfera exerce uma pressão sobre a atmosfera terrestre, chamada de "pressão de vapor". Essa pressão de vapor reflete a tendência da água de evaporar e, portanto, está diretamente relacionada à temperatura.
Partindo desse pressuposto, assinale V para as sentenças verdadeiras e F para as sentenças falsas:

( ) Com o aumento da temperatura, observa-se a condensação do vapor de água, processo que dá origem ao orvalho.
( ) O teor de vapor de água na atmosfera é de aproximadamente 70%, sendo variável ao longo do dia, devido às oscilações de temperatura.
( ) A pressão de vapor de água na interface ar e água é diretamente proporcional ao aumento da temperatura.
( ) A pressão de vapor de água é menor do que a pressão atmosférica.

a) F; F; V; F.
b) F; V; V; F.
c) V; V; F; F.
d) F; F; V; V.
e) V; V; F; V.

2. A figura a seguir apresenta três situações em que se observa a pressão de vapor de água na interface ar e água.



Fonte: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9c/Press_o_de_vapor.gif>. Acesso em: 7 abr. 2017.

Com base na figura e nos conceitos de pressão de vapor de água, pode-se afirmar que:

a) A temperatura aumenta devido ao aumento da pressão de vapor de água.
b) Com o aumento da temperatura, ocorre evaporação, logo, aumenta-se a pressão de vapor de água.
c) Em baixas temperaturas, não há troca de moléculas de água entre a interface ar e água.
d) Com o aumento da temperatura, há condensação do vapor de água, o que aumenta a pressão.
e) Em altas temperaturas, não há troca de moléculas de água entre a interface ar e água.

3. O "Princípio da Conservação de Energia" postula que a energia não pode ser criada e nem destruída, ela apenas se transforma em outro tipo de energia ou em trabalho
PORQUE
essa transformação ocorre espontaneamente apenas em um sentido, sendo, portanto, irreversível.
A respeito dessas asserções, assinale a opção correta:

a) As duas asserções são proposições verdadeiras, e a segunda é uma justificativa correta da primeira.
b) As duas asserções são proposições verdadeiras, mas a segunda não é uma justificativa correta da primeira.
c) A primeira asserção é uma proposição verdadeira, e a segunda, uma proposição falsa.
d) A primeira asserção é uma proposição falsa, e a segunda, uma proposição verdadeira.
e) Tanto a primeira quanto a segunda asserções são proposições falsas.

Referências

BAIRD, Colin; CANN, Michael. **Química ambiental**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2011.

BARBOSA, Henrique M. J. Vapor de água na atmosfera: do efeito estufa às mudanças climáticas. **Revista USP**, São Paulo, n. 103, p. 67-80, 2014.

BRANCO, Samuel Murgel; MURGEL, Eduardo. **Poluição do ar**. 2. ed. São Paulo: Moderna, 2004.

MOUVIER, Gérard. **A poluição atmosférica**. Lisboa: Manuel Barbosa e Filhos, Biblioteca Básica de Ciência e Cultura, 1995.

RAMOS, Joaquim J. Moura; LEITÃO, Luís. A atmosfera da Terra: sua origem, evolução e características actuais. **Boletim da Sociedade Portuguesa de Química**, Aveiro, n. 44/45, p. 53-65, jun./set. 1991. Disponível em: <http://www.spq.pt/magazines/BSPQ/569/article/3000525/pdf>. Acesso em: 20 mar. 2017.

ROCHA, Julio Cesar; ROSA, André Henrique; CARDOSO, Arnaldo Alves. **Introdução à química ambiental**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

ROSA, R. S.; MESSIAS, R. A.; AMBROZINI, B. **A importância da compreensão dos ciclos biogeoquímicos para o desenvolvimento sustentável**. 2003. 53 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003. Disponível em: <http://www.iqsc.usp.br/iqsc/servidores/docentes/pessoal/mrezende/arquivos/EDUC-AMB-Ciclos-Biogeoquimicos.pdf>. Acesso em: 19 maio 2017.

SANTOS, Ariane F. dos et al. **Estabilidade atmosférica e desenvolvimento de nuvens**. São José dos Campos: INPE, 2013.

SAVI, Arlindo Antônio; COLUCCI, Cesar Canesin. **Termodinâmica**. Maringá: Eduem, 2010. (Coleção Formação de Professores em Física - EAD, v. 10).

ZILIO, S. C.; BAGNATO, V. S. Termodinâmica do gás ideal. In: _____. **Mecânica, calor e ondas**. São Carlos: Fotônica/IFSC/USP, 2002. p. 265-273. Disponível em: <http://www.fotonica.ifsc.usp.br/ebook/book3/Capitulo14.pdf>. Acesso em: 7 abr. 2017.

Análise e controle de poluentes atmosféricos

Convite ao estudo

Caro aluno,

Você considera que no município onde reside há poluição do ar? Você consegue identificar as principais fontes emissoras? Para você, as principais fontes antropogênicas de poluição do ar são as indústrias ou os veículos automotores? Essas perguntas nos levam a refletir sobre as principais causas da poluição atmosférica nas cidades. No nosso país, até a década de 1980, a principal fonte de emissões atmosféricas eram as indústrias, que ainda se localizavam próximas às cidades ou até mesmo dentro do perímetro urbano. Porém, a partir da década de 1990, com o aumento da frota de veículos nas cidades e devido à migração das indústrias para o interior, os veículos automotores assumiram a primeira posição no ranking de emissões atmosféricas. Esses fatos estão diretamente relacionados à poluição do ar nas cidades e afetam diretamente a saúde da população e o meio ambiente local, sendo importante e necessário que a poluição seja monitorada e controlada. Na primeira unidade de estudo, abordamos conteúdos importantes sobre a composição e dinâmica da atmosfera terrestre, que são conteúdos fundamentais para continuarmos os nossos estudos. Agora, na Unidade 2, iremos abordar conteúdos pertinentes a aspectos legais relacionados aos indicadores de qualidade do ar nas cidades, que darão embasamento para realizar uma adequada gestão das emissões atmosféricas. Para guiar o seu estudo, imagine-se no seguinte contexto de aprendizagem: você é um agente ambiental de um município que possui a maior frota de veículos automotores do estado, além de contar com dois distritos industriais. O órgão ambiental municipal está preocupado com a qualidade do ar na cidade e solicita

que você, juntamente com outros profissionais, elabore um relatório técnico com os indicadores de qualidade do ar para análise quantitativa da poluição atmosférica. Para nortear o seu relatório, reflita sobre as seguintes perguntas: quais os aspectos históricos e legais relacionados à poluição do ar? Como foram elaborados e definidos os indicadores de qualidade do ar? Quais as contribuições da frota automotiva para as emissões atmosféricas? Como prever, calcular e gerir emissões atmosféricas futuras considerando o aumento populacional e, consequentemente, o aumento da frota de veículos em um município ou região? Para isso, busque informações no site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), na aba "Cidades". Além disso, busque informações junto à prefeitura sobre a existência de alguma legislação municipal sobre o tema.

Para que você reflita e responda corretamente a essas perguntas, é importante estudar com bastante atenção os conteúdos que serão abordados nesta Unidade, aprofundando o estudo com leituras complementares, anotando os pontos mais relevantes e buscando artigos científicos sobre o tema.

Vamos lá? Bons estudos!

Seção 2.1

Indicadores de qualidade do ar e a legislação vigente

Diálogo aberto

Nos grandes centros urbanos um sério problema ambiental vem afetando a saúde e a qualidade de vida da população e preocupando as autoridades: a poluição do ar. Perde-se qualidade de vida devido aos odores desagradáveis e devido à presença de fuligem e partículas no ar, sendo estas provenientes de veículos automotores. Além disso, conviver com a poluição do ar traz sérios problemas de saúde para a população, inclusive podendo levar a óbito. Diante disso, imagine-se na seguinte situação: você é um agente ambiental de um município que possui a maior frota de veículos automotores do estado, além de contar com dois distritos industriais. O órgão ambiental municipal está preocupado com a qualidade do ar na cidade e solicita que você, juntamente com outros profissionais, elabore um relatório técnico com indicadores de qualidade do ar para análise quantitativa da poluição atmosférica. Para a elaboração da primeira parte do relatório técnico, você e seus colegas de trabalho deverão realizar a coleta de dados sobre os principais indicadores de qualidade do ar, além de consultar a legislação vigente. Para realizar a coleta de dados, você deverá responder às seguintes perguntas: quais as principais legislações vigentes sobre a qualidade do ar? Quais os principais indicadores de qualidade do ar e suas características? Qual a relação dos veículos automotores com a qualidade do ar? Como estimar a emissão de poluentes por veículos automotores no município?

Esperamos que os temas desta seção motivem a sua reflexão acerca da poluição do ar nas grandes cidades, sobretudo a proveniente do aumento da frota de veículos automotores e de como os indicadores da qualidade do ar são imprescindíveis para monitorar e controlar a poluição.

Preparado? Vamos começar!

Não pode faltar

A poluição do ar não é um problema recente da sociedade moderna. Pode-se dizer que no momento em que o homem

descobriu o fogo, a poluição do ar teve início. No entanto, certamente não podemos comparar a poluição do homem primitivo com a atual. Porém, os nossos antepassados também tiveram problemas ao acender uma fogueira em uma caverna mal ventilada. Posteriormente, as atividades do campo contribuíram para a poluição do ar, devido às queimadas propositais para limpar a terra para cultivo. Além disso, ressalta-se o advento das indústrias próximas às cidades, durante a Revolução Industrial. Hoje, grande parte das atividades do dia a dia nas grandes cidades gera poluição do ar, como fazer um churrasco, dirigir um automóvel ou pintar uma casa. Essa poluição pode parecer insignificante quando comparada à poluição industrial. Porém, se pensarmos em uma metrópole, existem milhões de veículos para centenas de indústrias, dessa forma, podemos conferir a eles a mesma importância das fontes de maiores proporções. Além disso, atualmente as indústrias se localizam afastadas das cidades, enquanto que os veículos tendem a concentrar-se nas áreas de maior densidade populacional.

Portanto, as pessoas que vivem em grandes cidades convivem diariamente com a poluição do ar e sofrem os efeitos desse mal, como olhos irritados e lacrimejantes, os incômodos causados pelos odores desagradáveis, além da presença de fuligem dentro de casa. Infelizmente, essas pessoas já estão habituadas com esses problemas, porém, nem sempre elas se dão conta dos verdadeiros riscos para a saúde, que podem ser desde olhos irritados, problemas respiratórios ou até mesmo levar à morte. Podemos dizer que a poluição atmosférica é hoje um problema urbano, mas esse problema não é tratado com a devida importância e prioridade pelas autoridades governamentais, como acontece com outras questões, como o saneamento básico. A poluição atmosférica é um problema grave, uma vez que não podemos escolher o ar que respiramos ou tratá-lo antes de ser utilizado, como no caso da água. Além disso, podemos passar horas sem beber água, mas apenas alguns minutos sem respirar. Portanto, é fundamental que o ar seja de boa qualidade e que as soluções indicadas para o problema da poluição do ar sejam dinâmicas e abrangentes.

Assimile

A Política Nacional de Meio Ambiente, instituída pela Lei nº 6.938/1981, define poluição, no art. 3º inciso III, como a degradação da qualidade ambiental resultante de atividades que direta ou indiretamente: "a) prejudiquem a saúde, a segurança e o bem-estar da população; b) criem condições adversas às atividades sociais e econômicas; c) afetem desfavoravelmente a biota; d) afetem as condições estéticas ou sanitárias do meio ambiente; e) lancem matérias ou energia em desacordo com os padrões ambientais estabelecidos" (BRASIL, 1981).

Nesse sentido, o quanto é possível lançar de poluentes no ar, sem que isso seja prejudicial à saúde e ao meio ambiente? Para resolver essa questão, diversos estudos toxicológicos foram realizados com pessoas e animais e, por intermédio deles, foram determinados os vários níveis de exposição aos diferentes tipos de poluentes e seus respectivos efeitos sobre a saúde. Dessa forma, foram estabelecidos os padrões de qualidade do ar, representados pelas concentrações máximas de cada poluente que podem existir na atmosfera sem causar problemas à saúde das pessoas ou danos à flora, à fauna ou determinados materiais. Porém, antes de continuarmos o nosso estudo, é importante diferenciarmos alguns conceitos, como "indicadores", "índice", "parâmetros" e "padrões".

Os padrões, conforme dito anteriormente, são as concentrações máximas de cada poluente. Cabe ressaltar que o efeito de cada poluente depende basicamente da sua concentração, ou seja, da proporção em que ele se apresenta no ar que respiramos. Os padrões são expressos em $\mu g/m^3$ (micrograma por metro cúbico). Além disso, tão importante quanto a concentração é o tempo de exposição, definido como o período em que a pessoa fica respirando o ar que apresenta níveis de toxicidade. Isso porque podemos suportar níveis altos de um determinado poluente sem sofrer nenhum efeito. Entretanto, outros poluentes, mesmo com níveis mais baixos, podem causar sérias enfermidades. Por isso, os padrões de qualidade do ar são sempre concentrações máximas de poluentes suportáveis por um dado intervalo de tempo. Os parâmetros são propriedades que podem ser medidas ou observadas, como partículas totais em suspensão, monóxido de carbono, entre outros. Para cada parâmetro, há um padrão

estabelecido, ou seja, uma concentração máxima suportável.

Os indicadores são descritos por Vieira (2009) como o valor calculado a partir de parâmetros, fornecendo indicações sobre eles ou descrevendo o estado de um fenômeno ou situação. Já o índice é um conjunto de parâmetros ou de indicadores agregados ou ponderados que descrevem uma situação. Por exemplo, a emissão de monóxido de carbono pode ser um indicador da mudança climática, sendo que o seu padrão de emissão de acordo com legislação é de 10.000 (dez mil) microgramas por metro cúbico de ar (9 ppm). Logo, o monóxido de carbono é um parâmetro que pode ser medido ou observado. Para ser considerado índice, o monóxido de carbono deve ser observado em conjunto com outros parâmetros, como o ozônio e o dióxido de nitrogênio.

Você deve estar se perguntando sobre os aspectos referentes à escolha, ao uso e à seleção de indicadores. Vamos esclarecer alguns pontos sobre isso. Os indicadores servem como instrumento de gestão para a comunicação de informações técnicas e científicas para diferentes grupos de usuários. Por isso, os indicadores devem ser de simples compreensão para o público a fim de atender o seu principal objetivo, o de sinalizar para a sociedade os resultados de programas públicos de melhoria da qualidade ambiental. O uso de indicadores pode variar muito, não somente em escala, mas também por setor. Por exemplo, em escala global destacam-se os indicadores estabelecidos entre países para redução das emissões atmosféricas, e em escala local, os indicadores estabelecidos considerando as particularidades, o tamanho, o nível de industrialização e a cultura de uma determinada região.

Porém, o uso de indicadores apresenta limitações, visto que eles não descrevem as causas fundamentais que promoveram a melhoria. Por exemplo, as emissões de dióxido de carbono podem ser adotadas como indicadores da mudança climática. Porém, caso haja redução ou aumento nos níveis de emissões atmosféricas, os indicadores não fornecem informações sobre os benefícios ou malefícios dessa redução ou aumento e nem sobre a causa da redução. Mas como saber se o indicador é bom ou não e se ele atende ao que está sendo investigado? Vieira (2009) destaca que é possível avaliar um indicador por meio de uma

listagem de controle (checklist). Essa listagem permite avaliar se um indicador atende ao critério de eficácia, mas não diz se este é bom ou não. Essa listagem consiste em perguntas a serem respondidas considerando os objetivos do indicador escolhido. Por isso, a seleção de indicadores deve seguir critérios como pertinência, compreensão, clareza na classificação, identificação e disponibilidade de dados, acessibilidade de dados, limitação no número, confiabilidade, escala temporal e espacial, metas e apoios.

Exemplificando

Frequentemente, utilizamos indicadores em nosso dia a dia para diferentes situações, como a altura da onda do mar e a velocidade do vento, que indicam a tempestade e a pressão sanguínea na faixa normal de saúde, entre outros.

Agora que já compreendemos o uso e a seleção de indicadores e o que são padrões e parâmetros de qualidade do ar, vamos conhecer os aspectos legais referentes aos padrões de qualidade do ar e de emissões atmosféricas. Atualmente, existem diversas leis e resoluções que dispõem sobre a qualidade do ar, tanto para o controle de emissões de fontes fixas quanto para o controle de fontes móveis. Relembrando, as fontes fixas são as indústrias, usinas termoelétricas e mineradoras, e as fontes móveis são os veículos automotores.

Os parâmetros para a emissão de poluentes por fontes fixas foram inicialmente definidos pela Resolução do CONAMA nº 005/1989, que dispõe sobre o Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar (PRONAR). Esse programa estabelece padrões de qualidade e prevê a criação de um Inventário Nacional de Fontes e Emissões objetivando o desenvolvimento de metodologias que permitam o cadastramento e a estimativa das emissões. Já as Resoluções CONAMA nº 003/1990 e nº 008/1990 complementam o PRONAR ao estabelecerem limites para a concentração de determinados poluentes no ar, considerando as recomendações de compatibilidade com saúde e o bem-estar humanos, estabelecidos pela Organização Mundial da Saúde (OMS).

Ainda sobre a Resolução CONAMA nº 03/1990, estas traz dois conceitos importantes, que são os padrões primários e os

secundários de qualidade do ar. Os padrões primários referem-se às concentrações que, quando ultrapassadas, afetam a saúde da população. Já os padrões secundários referem-se às concentrações de poluentes abaixo das quais se prevê o mínimo efeito adverso para a população, para a fauna e flora, materiais e meio ambiente em geral. Nas resoluções CONAMA nº 03/1990 e nº 08/1990 são estabelecidas concentrações máximas para os seguintes parâmetros: partículas totais em suspensão (material particulado); fumaça (composta principalmente de dióxido de carbono – CO_2); partículas inaláveis; dióxido de enxofre; monóxido de carbono (CO); ozônio e dióxido de nitrogênio. Cabe ressaltar que a Resolução CONAMA 08/1990 define ainda os limites máximos de emissão para partículas totais e dióxido de enxofre (SO_2), consoante a classificação de usos pretendidos definidas pelo PRONAR.

Já em 2006, a Resolução CONAMA nº 382 atualizou os parâmetros para óleo pesado, gás natural e derivados de madeira. Essas resoluções representam um grande avanço para o controle da poluição do ar, visto que nas resoluções anteriores admitiam-se emissões maiores quando as condições atmosféricas fossem mais favoráveis, conceito estudado na Unidade 1.

Para as fontes móveis, como os veículos automotores, o estabelecimento de metas para a redução da emissão de poluentes teve início em 1986, por meio da Resolução CONAMA nº 18 que instituiu o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE), sendo os seguintes parâmetros adotados: monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_X), hidrocarbonetos não metano (NMHC), dióxido de enxofre (SO_2), aldeídos (RCHO) e material particulado (MP). Além disso, cabe ressaltar que em 1993 a Lei Federal nº 8.723 dispôs sobre a redução de emissão de poluentes por veículos automotores e delegou que o CONAMA atualizasse o estabelecimento de novas metas para o PROCONVE, surgindo outras resoluções CONAMA.

Pesquise mais

Você pode acompanhar as Resoluções CONAMA com novas metas de emissões para o PROCONVE a partir do link a seguir. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legipesq.cfm?tipo=3&numero=&ano=&texto=PROCONVE>. Acesso em: 16 jun. 2017.

O controle da emissão de gases e materiais particulados poluentes por veículos automotores está previsto também no Código de Trânsito Brasileiro, instituído pela Lei Federal nº 9.503/1997. Segundo o art. 104 dessa lei, os veículos em circulação serão avaliados, mediante inspeção obrigatória, sobre suas condições de segurança e controle de emissões de gases poluentes e de ruído.

Uma das atualizações das metas do PROCONVE que atende ao disposto no art. 104 do Código de Trânsito Brasileiro é a Resolução CONAMA nº 8/1993, que estabelece limites máximos de emissão de poluentes para os motores destinados a veículos pesados novos, nacionais e importados. Há também a Resolução CONAMA nº 16/1993, que ratifica os limites de emissão, os prazos e demais exigências contidas na Resolução CONAMA nº 18/1986.

O PROCONVE é um programa de eficácia no Brasil, visto que, a partir de 1993, quando foi empregado, o sistema de injeção eletrônica de combustíveis passou a emitir menos de um décimo de poluentes de seus similares fabricados na década de 1980. Atualmente, deve-se considerar a Resolução CONAMA nº 315/2002, que dispõe sobre a nova etapa do Programa de Controle de Emissões Veiculares – PROCONVE.

Pesquise mais

Você pode acompanhar a evolução das fases do PROCONVE, bem como os limites de emissão para cada fase, por meio do material disponível no link a seguir.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. PROCONVE: Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores. 2017. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/images/arquivo/80060/Arquivos/PROCONVE_atualizado%20em%2021nov13.pdf>. Acesso em: 16 jun. 2017.

Neste estudo, enfocaremos os padrões de emissões de poluentes e os indicadores de qualidade do ar estabelecidos para as fontes móveis, ou seja, para veículos automotores, sobretudo os veículos leves. Segundo o Relatório da Frota Circulante, elaborado pelo Sindipeças com dados até 2014, houve um aumento de 4,2% na frota de comerciais leves, em comparação com 2013, em todo o Brasil. Dos Estados brasileiros, destacam-se São Paulo e Minas Gerais com as maiores frotas, participando com 36,80% e 10,36%, respectivamente. De acordo com os dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a cidade de São Paulo é a que apresenta o maior número de

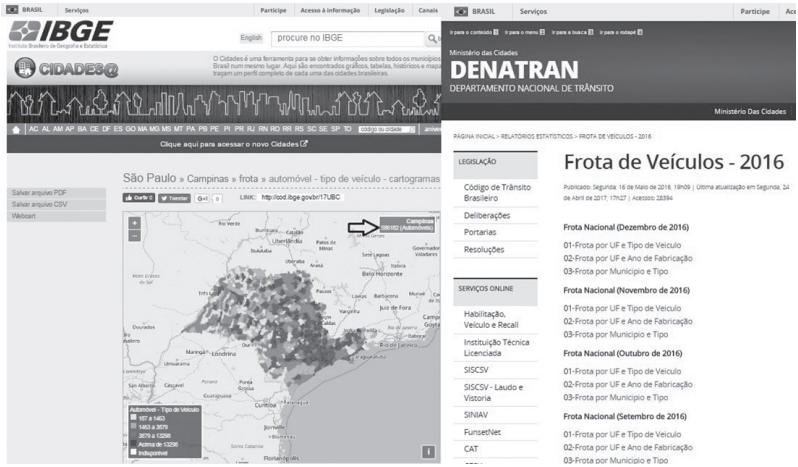
veículos leves em circulação, sendo 98.389 milhões de utilitários em 2015. Podemos acompanhar a evolução da frota de veículos no Brasil desde a década de 1980, a partir dos dados publicados, em 2013, no Inventário Nacional de Fontes e Emissões, onde observa-se que em 2012 o volume de veículos atingiu um número próximo a 49 milhões, sendo que destes, 57% correspondem a automóveis.

Reflita

Na cidade onde você reside, qual é a frota total de veículos? E a frota per capita? Os veículos em uso são de fabricação recente ou antiga? Como está a qualidade do ar na sua cidade?

Você consegue imaginar a quantidade de emissões de poluentes atmosféricos provenientes desses veículos diariamente? Quais as implicações dessas emissões? As resoluções citadas ao longo desta seção sobre as fontes móveis buscam justamente reduzir essas emissões por meio de padrões máximos de lançamentos. A frota de veículos, por categoria, município e ano, está disponível no site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e também no site do Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN), conforme pode ser observado na Figura 2.1.

Figura 2.1 | Frota de veículos: IBGE e DENATRAN



Fonte: <https://goo.gl/peYVtZ>; <https://goo.gl/KrR7Vl>. Acesso em: 16 jun. 2017.

A partir dessa informação e das resoluções citadas anteriormente, é possível estimar as emissões de escapamento da frota circulante em

um determinado ano-calendário, para cada poluente e ano de modelo do veículo, por meio da Equação 1. $E = Fe.Fr.lu$ (1)

Onde "E" é a taxa anual de emissão do poluente considerado (g/ano) que se deseja encontrar; "Fe" é o fator de emissão do poluente considerado, expresso em termos da massa de poluentes emitida por quilômetro percorrido ($g_{poluente}.km^{-1}$), sendo específico para o ano modelo de veículo considerado e dependente do tipo de combustível utilizado; "Fr" é a frota circulante de veículos do ano modelo considerado (número de veículos), e "lu" é a intensidade de uso do veículo do ano modelo considerado, expressa em termos de quilometragem anual percorrida (km/ano) e considerada a idade do veículo.

As informações sobre fator de emissão e intensidade de uso do veículo podem ser encontradas no Apêndice K do Relatório Emissões Veiculares no Estado de São Paulo, da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), conforme Quadro 2.1, e/ou no 1º Inventário de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários do Ministério do Meio Ambiente, de janeiro de 2011.

Quadro 2.1 | Fatores de emissão do CO para veículos novos, flex-gasolina

Tabela	Fe - Fatores de Emissão total (gCO/Km)
2012	0,267
2013	0,227
2014	0,229

Fonte: adaptado de CETESB (2014).

Por exemplo, deseja-se estimar as emissões de escapamento da frota circulante em 2015, para o poluente monóxido de carbono (CO), considerando o ano-modelo 2014 no município de Campinas (SP). Observando o Quadro 2.1, têm-se Fe = 0,229 gCO_2km^{-1} para o ano de 2014. Aqui iremos considerar uma média de 15000 quilômetros percorridos em um ano. A informação de Fr (Frota circulante) pode ser obtida no site do DENATRAN ou IBGE, que neste caso é de 586182 veículos. Logo, a equação ficaria:

$$E = Fe.Fr.lu$$

E = 0,229 $gCO_2.km^{-1}$ X 586182 X 15000 $km.ano^{-1}$

E = 2013535170 g de CO

Existem outras metodologias para calcular as emissões, sendo esta apenas uma delas, adotada pelo 1º Inventário de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários (Ministério do Meio Ambiente, 2011). Cabe ressaltar que esse cálculo deve ser realizado para cada poluente e considerando uma média de quilometragem percorrida anualmente, neste caso, 15000 quilômetros por ano. Porém, há cidades onde essa média é menor ou maior. Logo, cada situação deve ser analisada de forma específica considerando os dados e especificidades locais.

Pesquise mais

Você pode aprofundar o estudo sobre outras metodologias de estimativa de emissões de poluentes a partir do link a seguir.

LIMA, Gleiphyson Santana de et al. Metodologias para estimativa da emissão de poluentes pelo transporte rodoviário. **Revista Militar de Ciência e Tecnologia**, Rio de Janeiro, v. 31, p. 119-132, 3º trimestre de 2014. Disponível em: <http://rmct.ime.eb.br/arquivos/RMCT_3_tri_2014/RMCT_199_E2B_13.pdf>. Acesso em: 16 jun. 2017.

Chegamos ao final desta primeira seção sobre os indicadores e padrões de emissões atmosféricas. Ressaltamos, porém, que os valores de cada padrão para cada poluente devem ser pesquisados por você, considerando a situação a ser analisada, visto que os padrões são diferentes de acordo com os tipos de veículos e o ano de fabricação, considerando ainda a fase em que se encontra o PROCONVE. Por isso, é importante que você aprofunde os seus estudos sobre o que foi discutido nesta seção. Além disso, ressaltamos que os cálculos são indispensáveis para analisar as melhores metodologias de controle e monitoramento de emissões atmosféricas, temas que serão abordados nas próximas seções. Bons estudos!

Sem medo de errar

A poluição do ar é uma grande preocupação para os gestores públicos, sobretudo para os municipais, visto que interfere na saúde da população e, dessa forma, exerce uma pressão nos atendimentos públicos em unidades de saúde. Além disso, a poluição do ar pode afetar de forma adversa a fauna e a flora de uma determinada região. Assim, torna-se um desafio para os gestores públicos municipais realizar a gestão adequada das emissões atmosféricas, a fim de controlar a poluição atmosférica e garantir à população uma boa qualidade do

ar. Vamos relembrar o contexto de aprendizagem que irá nortear a situação-problema desta seção.

Você é um agente ambiental de um município que possui a maior frota de veículos automotores do estado, além de contar com dois distritos industriais. O órgão ambiental municipal está preocupado com a qualidade do ar na cidade e solicita que você, juntamente com outros profissionais, elabore um relatório técnico com indicadores de qualidade do ar para análise quantitativa da poluição atmosférica. Para a elaboração da primeira parte do relatório técnico, você e seus colegas de trabalho deverão realizar a coleta de dados sobre os principais indicadores de qualidade do ar, além de consultar a legislação vigente. Para realizar a coleta de dados, é preciso responder às seguintes perguntas: quais as principais legislações vigentes sobre a qualidade do ar? Quais os principais indicadores de qualidade do ar e suas características? Qual a relação dos veículos automotores com a qualidade do ar? Como estimar a emissão de poluentes por veículos automotores no município?

Os parâmetros para a emissão por fontes fixas, ou seja, os norteadores das emissões atmosféricas nos dois distritos industriais, são a Resolução do CONAMA nº 005/1989, que dispõe sobre o Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar (PRONAR), a Resolução CONAMA nº 05/1989, que prevê a criação de um Inventário Nacional de Fontes e Emissões, as Resoluções CONAMA nº 003/1990 e nº 008/1990, que complementam o PRONAR, visto que estabelecem limites para a concentração de determinados poluentes no ar, baseadas nas recomendações da Organização Mundial da Saúde (OMS), que considera os limites de concentração compatíveis com a saúde e o bem-estar humanos. Cabe ressaltar que a Resolução CONAMA nº 03/1990 difere os padrões primários, referentes às concentrações, que quando ultrapassadas, afetam a saúde da população, dos padrões secundários, que se referem às concentrações de poluentes abaixo das quais se prevê o mínimo efeito adverso para a população, para a fauna e flora, materiais e meio ambiente em geral. Nas resoluções CONAMA nº 03/1990 e nº 08/1990, são estabelecidas concentrações máximas para os seguintes parâmetros: partículas totais em suspensão (material particulado); fumaça (composta principalmente de dióxido de carbono – CO_2); partículas inaláveis; dióxido de enxofre; monóxido de carbono (CO); ozônio e dióxido de nitrogênio. Cabe ressaltar que a Resolução CONAMA 08/1990 define ainda os seguintes limites máximos de emissão

para partículas totais e dióxido de enxofre (SO_2), consoante a classificação de usos pretendidos definidas pelo PRONAR. Além disso, a Resolução CONAMA nº 382 estabelece limites máximos de emissão para vários tipos de combustíveis, entre os quais óleo pesado, gás natural e derivados de madeira, e de instalações, tais como usinas termelétricas, turbinas a gás, unidades de produção de vapor, fábricas de celulose e papel. Logo, ao analisar a legislação vigente, deve-se considerar as atividades industriais desenvolvidas nos distritos industriais implantados no município. Para as fontes móveis, como os veículos automotores, seguem-se os parâmetros estabelecidos na Resolução CONAMA nº 18/1986, que instituiu o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE), sendo eles: monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_X), hidrocarbonetos não metano (NMHC), dióxido de enxofre (SO_2), aldeídos (RCHO) e material particulado (MP). O controle da emissão de gases e materiais particulados poluentes por veículos automotores está previsto também no Código de Trânsito Brasileiro, instituído pela Lei Federal nº 9.503/1997. Além disso, deve-se considerar a Resolução CONAMA Nº 315/2002, que dispõe sobre a nova etapa do Programa de Controle de Emissões Veiculares (PROCONVE).

Cabe ressaltar que, atualmente, com a instalação das indústrias afastada dos centros urbanos e considerando que existem milhões de veículos para centenas de indústrias, podemos concluir que a principal causa da poluição do ar é a emissão de poluente por veículos automotores. Logo, a gestão de emissões atmosféricas deve ser voltada para a redução das emissões de poluentes por veículos, por meio do desenvolvimento de novos motores e novos combustíveis, mais limpos. Além disso, torna-se indispensável que os gestores municipais realizem a estimativa de emissão de poluentes de suas cidades, utilizando uma das metodologias disponíveis, sendo uma delas a equação apresentada no 1º Inventário de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários (MINISTÉRIO, 2011): $E = Fe.Fr.lu$

Avançando na prática

Inspeção veicular e qualidade do ar

Descrição da situação-problema

No final da década de 1980, o governo federal, preocupado com a qualidade do ar nas cidades brasileiras, instituiu em caráter nacional o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE), estabelecido pela Resolução CONAMA nº 18/1986, visando, entre outros objetivos, reduzir os níveis de emissão de poluentes por veículos automotores para atender aos padrões de qualidade do ar, especialmente nos centros urbanos. Já em 1993, a Resolução CONAMA nº 7/1993 definiu as diretrizes

básicas e padrões de emissão para o estabelecimento de Programas de Inspeção e Manutenção para Veículos Automotores em Uso-I/M. Considerando essas e outras legislações sobre as emissões atmosféricas por veículos automotores, imagine a seguinte situação: você é inspetor do Programa de Inspeção e Manutenção de Veículos em Uso-I/M na cidade de São Paulo e deverá realizar a inspeção de 10 (dez) veículos automotores, sendo todos do ano de 2010, com motores flex-gasolina. Considerando os dispositivos legais sobre o assunto, quais poluentes você deverá inspecionar nos veículos? Quais os limites máximos de emissão de poluentes do ar para esses veículos automotores? Em que fase se encontra da PROCONVE?

Resolução da situação-problema

Segundo a Resolução CONAMA nº 18/1986, são avaliados os seguintes parâmetros: monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_X), hidrocarbonetos não metano (NMHC), dióxido de enxofre (SO_2), aldeídos (RCHO) e material particulado (MP). Porém, na cidade de São Paulo, o Programa de Inspeção e Manutenção de Veículos em Uso - I/M mede nos veículos automotores os níveis de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2) e hidrocarbonetos (HC). Segundo a Resolução CONAMA nº 18/1986, para os veículos movidos à gasolina, fabricados a partir de 1997, a emissão de gases de escapamento por veículos automotores leves não deverá exceder os seguintes valores:

Quadro 2.2 | Parâmetros de emissões para veículos automotores

Parâmetro	Padrão-limite máximo – RC nº18/86	Padrão-limite máximo – RC nº315/02 (Fase L5-PROCONVE)
Monóxido de carbono	2 $g.km^{-1}$	2 $g.km^{-1}$
Hidrocarbonetos	0,3 $g.km^{-1}$	0,3 $g.km^{-1}$
Óxidos de nitrogênio	0,6 $g.km^{-1}$	0,3 $g.km^{-1}$
Monóxido de carbono em marcha lenta	0,5 %	0,5 %

Fonte: Resolução CONAMA nº 18/1986.

Logo, observa-se que os padrões podem ser diferentes considerando a fase do PROCONVE. Como os veículos a serem inspecionados são do ano de 2010, e estamos no ano de 2017, estamos na fase L-5. Observa-se uma redução nas emissões de óxidos de nitrogênio de 0,6 $g.km^{-1}$ para 0,12 $g.km^{-1}$ para os veículos leves do ciclo Otto.

Faça valer a pena

1. As Resoluções CONAMA nº 03/1990 e nº 08/1990 estabelecem limites para a concentração de determinados poluentes no ar, baseados nas recomendações da Organização Mundial da Saúde (OMS), considerando os limites de concentração compatíveis com a saúde e o bem-estar humanos.
Quais os parâmetros considerados nas Resoluções CONAMA nº 03/1990 e nº 08/1990 para fontes fixas?

a) Material particulado, partículas inaláveis, dióxido de enxofre, monóxido de carbono; ozônio e dióxido de nitrogênio.
b) Material particulado, fumaça, dióxido de enxofre, monóxido de carbono; ozônio e dióxido de nitrogênio.
c) Fumaça, partículas inaláveis, dióxido de enxofre, monóxido de carbono; ozônio e dióxido de nitrogênio.
d) Material particulado, fumaça, partículas inaláveis, dióxido de enxofre, monóxido de carbono; ozônio e dióxido de nitrogênio.
e) Fumaça, partículas inaláveis, monóxido de carbono; ozônio e dióxido de nitrogênio.

2. A poluição atmosférica é um problema grave atual, devido à sua complexidade de controle e redução. Porém, há dispositivos legais que buscam controlar as emissões atmosféricas, a partir de parâmetros e padrões de qualidade do ar. Os _____ são representados pelas concentrações máximas de cada poluente que podem existir na atmosfera sem causar problemas à saúde das pessoas ou danos à flora, à fauna ou a determinados materiais.
O termo que preenche corretamente a lacuna no texto é:

a) parâmetros.
b) índices.
c) padrões.
d) valores.
e) indicadores.

3. As emissões de escapamento da frota circulante em um determinado ano-calendário, para cada poluente e ano modelo de veículo podem ser estimadas a partir de uma equação geral, conforme observado a seguir:

$$E = Fe.Fr.lu$$

Na cidade de Araçatuba, em 2013, a frota de veículos era de 70110, e a média de quilometragem percorrida anualmente pela população era de 14000 quilômetros. O prefeito solicitou uma estimativa das emissões de monóxido de carbono para aquele ano, considerando o fator de emissão do monóxido de carbono como sendo 0,227 $g.km^{-1}$.

Considerando os dados apresentados em 2013, a frota de veículos de Araçatuba lançou para a atmosfera:

a) 222809580 gramas de CO.
b) 2228095800 gramas de CO.
c) 22280958 gramas de CO.
d) 2228095 gramas de CO.
e) 22280958000 gramas de CO.

Seção 2.2

Poluição do ar

Diálogo aberto

A poluição atmosférica tem sido motivo de preocupação nas agências de saúde, sobretudo para os gestores públicos, devido aos altos níveis de emissões atmosféricas e à ausência de avanços para redução dessas emissões. Isso porque a poluição do ar pode afetar a saúde da população mesmo abaixo dos níveis determinados na legislação vigente, devido à exposição diária a esses poluentes atmosféricos. As emissões atmosféricas responsáveis pela poluição do ar são oriundas de fontes fixas, como as indústrias, e de fontes móveis, como os veículos automotores. Por isso, a gestão das emissões atmosféricas deve abranger todas as fontes emissoras, considerando as características e especificidades de cada uma. Considerando então as preocupações dos órgãos de saúde e gestores públicos em relação à poluição do ar, imagine a seguinte situação: você é agente ambiental de um município que possui a maior frota de veículos automotores do estado, além de contar com dois distritos industriais. O órgão ambiental municipal está preocupado com a qualidade do ar na cidade e solicita que você, juntamente com outros profissionais, elabore um relatório técnico com indicadores de qualidade do ar para análise quantitativa da poluição atmosférica. Agora que você já coletou alguns dados relacionados à quantidade de veículos automotores e sua relação com a poluição atmosférica, bem como já relacionou os principais indicadores de qualidade do ar, você deverá elaborar a segunda parte do relatório técnico sobre como se dá o transporte desses poluentes na atmosfera. Para isso, responda às seguintes perguntas norteadoras: quais as principais fontes de emissões atmosféricas no município? Considerando as características da atmosfera do município (clima e tempo), de que forma os poluentes se dispersam na atmosfera? Quais os possíveis efeitos globais da dispersão de poluentes atmosféricos desse município?

Lembre-se de continuar os estudos considerando o mesmo município da situação-problema da Seção 2.1. Além disso, é importante que você considere os possíveis efeitos globais provenientes das fontes fixas e móveis do município em estudo.

Vamos lá? Bons estudos!

Não pode faltar

Discutimos, nas seções anteriores, que a poluição do ar não é um problema recente, visto que as ações antrópicas emitem gases para a atmosfera desde a descoberta do fogo. Porém, após a Revolução Industrial, as fontes de poluição se intensificaram com o advento das indústrias e, posteriormente, com o aumento de veículos automotores nas cidades. Hoje, sabe-se que a principal fonte poluidora são os veículos automotores. Iremos abordar nesta seção fundamentos importantes sobre as fontes de poluição, a dispersão de poluentes dessas fontes e os principais poluentes atmosféricos. Vamos começar?

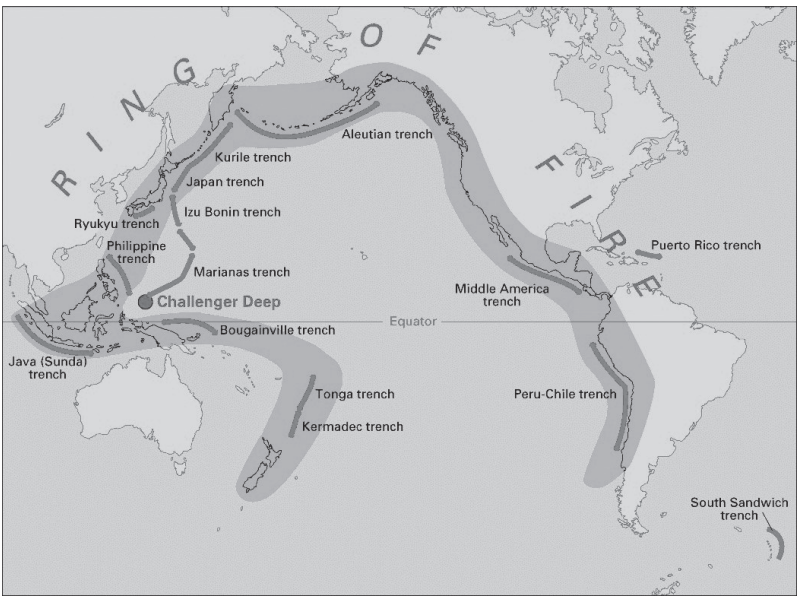
Primeiramente, é preciso compreender que a poluição do ar envolve três processos, sendo eles: (1) a emissão, (2) o transporte e (3) a imissão dos poluentes. A emissão constitui a liberação de gases poluentes para a atmosfera, que podem ser de diversas fontes, naturais e antrópicas, fixas ou móveis. O transporte está relacionado à diluição e modificação química ou física dos poluentes na atmosfera. E por fim a imissão, que está relacionada à deposição química ou seca dos poluentes. Ao logo desta seção, vamos abordar a emissão e o transporte, sendo que a deposição será discutida na Unidade 3, quando falarmos de modelos de dispersão de poluentes.

As emissões atmosféricas podem ser provenientes de fontes naturais e antrópicas. Cabe ressaltar que as fontes de poluição natural, de maneira geral, são de maior dimensão do que as fontes antropogênicas. Porém, a poluição de origem natural, por muitas vezes, é assimilada pela natureza a partir da degradação dos contaminantes, processo conhecido como "resiliência", que é a capacidade de restabelecer seu equilíbrio após ter sofrido um distúrbio. Por isso, é importante conhecer todas as fontes de emissões atmosféricas, bem como sua influência ou interferência na degradação da qualidade do ar.

São classificadas como fontes naturais de poluição, as atividades vulcânicas, os incêndios florestais, as tempestades de poeira, as atividades de animais e vegetais (pólen e metano) e os poluentes biogênicos, como os compostos orgânicos voláteis (COV) de fonte natural. Os vulcões estão presentes em todos os continentes, porém a sua distribuição está associada à dinâmica das placas tectônicas. Por isso, a maioria dos vulcões ativos estão no Oceano Pacífico, em uma região conhecida como "Círculo de Fogo" (Figura 2.2). Ressalta-se que apesar de muitas pessoas residirem próximas aos vulcões ativos, pouco se fala sobre a

sua contribuição para a poluição do ar, seja do ponto de vista ambiental ou da saúde humana. Burton, Sawyer e Granieri (2013) relatam que anualmente os vulcões emitem cerca de 540 milhões de toneladas de dióxido de carbono (CO_2) para a atmosfera. Das emissões atmosféricas emitidas pelas atividades vulcânicas, mais de 70% é vapor de água. No entanto, além do vapor de água e do CO_2, há liberação de outros gases e aerossóis, muitas vezes mais nocivos para a saúde, como o dióxido de enxofre (SO_2), ácido sulfúrico (H_2SO_4), sulfureto de hidrogênio (H_2S), cloreto de hidrogênio (HCl), fluoreto de hidrogênio (HF), rádon (Rn), arsênio (As), mercúrio (Hg), alumínio (Al), cádmio (Cd), chumbo (Pb), compostos orgânicos voláteis, entre outros. Essa diversidade de gases e aerossóis nos alerta sobre a necessidade de maiores estudos relacionados à poluição do ar por atividades vulcânicas, sobretudo nas proximidades dos vulcões ativos.

Figura 2.2 | Círculo de Fogo do Oceano Pacífico



Fonte: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/09/Pacific_Ring_of_Fire.png>. Acesso em: 16 jun. 2017.

Outra fonte de emissões atmosféricas de origem natural são os incêndios florestais. Os incêndios florestais de origem natural são causados pela combustão de um material combustível, como folhas secas, que em contato com o calor e na presença de oxigênio, entra em combustão. Vale lembrar que uma descarga elétrica pode ser o ponto de partida para um incêndio florestal. Como em qualquer processo de combustão, nos incêndios florestais há gases tóxicos lançados para a

atmosfera, conforme pode ser observado na Figura 2.3. Destaca-se que a queima da biomassa libera um elevado material particulado, monóxido e dióxido de carbono (CO e CO_2), metano (CH_4), hidrocarbonetos não metânicos (HCNM), óxidos de nitrogênio (NO_x), óxido nitroso (N_2O) e amoníaco (NH_3). Mesmo que os incêndios florestais ocorram com menor frequência e, geralmente em áreas mais afastadas dos centros urbanos, o seu impacto na qualidade do ar não deve ser desconsiderado. Dentre os seus impactos, podem-se elencar a contribuição para as alterações climáticas, episódios locais de poluição atmosférica, além de elevados níveis de ozônio. Deste, ressaltam-se a contribuição para a formação de O_3 troposférico e a destruição química do O_3 estratosférico como os principais impactos por emissões advindas dos incêndios florestais. Além disso, na troposfera, o CO, o CH_4, os HCNM e os NO_x reagem e, por isso, alteram as concentrações locais de oxidantes importantes, como o O_3 e o radical hidroxilo (OH^-). Diante disso, ao se estudar a poluição do ar de uma determinada região, é preciso considerar a frequência de incêndios florestais nela, uma vez que há risco para a saúde da população em geral, causada pela degradação da qualidade do ar e pela diminuição da visibilidade em estradas, e até mesmo nas cidades, dependendo da direção da dispersão de poluentes.

Figura 2.3 | Emissão de poluentes por incêndio florestal

Fonte: <https://pixabay.com/p-671555/?no_redirect>. Acesso: 16 jun. 2017.

Além dos incêndios florestais, as tempestades de areia são responsáveis por imensas quantidades de poeira na atmosfera, sendo importantes fontes de poluição do ar. Destaca-se também as emissões

oriundas da vegetação, como o pólen, liberado para reprodução, responsáveis por causar processos alérgicos. O solo também emite poluente, sobretudo N_2O oriundo da desnitrificação (ciclo do nitrogênio), NH_3 proveniente de processos aeróbicos, além de gases redutores, como CH_4, NO, H_2S, provenientes da fermentação anaeróbica em zonas úmidas, como pântanos. Há também lançamento de gases a partir dos oceanos, por meio de variações de temperatura na sua superfície, que alteram as concentrações de gases dissolvidos como CO, CO_2, CH_4, N_2O, CS_2 (dissulfeto de carbono) SCO, $ClCH_3$ (cloreto de metila) etc. Além disso, também há liberação de gás metano, produzido durante a digestão por animais ruminantes, sobretudo o boi. Pode parecer insignificante a contribuição dos ruminantes, porém, considerando que em 2016 o rebanho bovino brasileiro atingiu a marca de 215,2 milhões de cabeças, sendo que cada cabeça produz anualmente uma média de 60 quilos de metano, é possível imaginar as proporções mundiais de metano de origem animal.

Finalizando as emissões atmosféricas de origem natural, destacam-se os compostos orgânicos voláteis (COV), que são constituídos por carbono e hidrogênio que podem ser substituídos por outros átomos, como halogênios, oxigênio, enxofre, nitrogênio ou fósforo. Esses compostos apresentam elevada pressão de vapor, ou seja, em temperatura e pressão ambientes são facilmente vaporizados e, portanto, participam de reações fotoquímicas da atmosfera. Cabe ressaltar que os COV são emitidos tanto por fontes antropogênicas (queima de combustíveis fósseis) quanto por fontes naturais. As fontes naturais, chamadas "biogênicas", podem ser vulcões, vegetação, incêndios florestais, solos (ação microbiológica) e relâmpagos. Porém, destas, a vegetação é a principal fonte emissora de COV, com estimativas mundiais de 1,8 bilhões de toneladas de COV emitidos por ano na atmosfera, o que é em torno de 7 vezes mais que a emissão total de COV antropogênicos. Os principais constituintes dos COV emitidos pela vegetação são o isopreno e terpenos, além de outros constituintes da família dos alcenos, que podem reagir produzindo compostos ainda mais reativos, como O_3, NO_3 e o radical hidroxila (OH^-). Como são compostos altamente reativos na atmosfera, diversos fatores influenciam na dispersão destes, como estação do ano, temperatura, umidade, radiação solar, espécie vegetal, entre outros. Por isso, as florestas tropicais são as maiores emissoras de COV devido às condições favoráveis de temperatura e intensa radiação solar. Nos centros urbanos, os COV emitidos pela vegetação contribuem significativamente para o *smog* fotoquímico, abordado na Unidade 1 e que será aprofundado na Unidade 4.

As emissões atmosféricas de origem antrópica podem ser de fontes fixas, como indústrias e centrais termoelétricas, ou móveis, como navios, trens e veículos automotores, amplamente discutidos na seção anterior. Cabe ressaltar que os poluentes oriundos da combustão, que estudamos na Unidade 1, podem ser de fontes fixas (indústrias) ou móveis (veículos). Além disso, os compostos orgânicos voláteis, citados anteriormente, também podem ser de origem antrópica a partir da evaporação de produtos de petróleo. Outras atividades antrópicas também são responsáveis pela poluição atmosférica, como a aplicação aérea de inseticidas, as poeiras provenientes de ruas não pavimentadas e, ainda, grandes emissões de material particulado oriundo da construção civil, principalmente de demolição.

Em relação às emissões atmosféricas industriais, é preciso conhecer o processo industrial, visto que a quantidade e os tipos de poluentes emitidos dependem de fatores interdependentes da fabricação, como a matéria-prima e o combustível utilizados no processo, suas operações, a eficiência dos processos e o grau das medidas de controle contra a poluição. Portanto, ao se estudar a poluição do ar de uma determinada região, é imprescindível considerar todas as fontes emissoras, sejam elas naturais ou antropogênicas, sendo esta última de alta complexidade devido aos diferentes processos industriais e, consequentemente, diversos tipos de poluentes emitidos.

Porém, além de conhecer as fontes emissoras, é preciso conhecer como ocorre a dispersão desses poluentes na atmosfera. Os estudos sobre a contribuição de fontes já instaladas em uma determinada região, bem como os estudos sobre novos impactos a partir de novas fontes a serem instaladas, são realizados a partir da modelagem matemática, em que as concentrações de poluentes são simuladas para um determinado ponto no terreno. Porém, iremos aprofundar os estudos sobre esses modelos na Unidade 3 do livro didático.

Apresentaremos aqui alguns fundamentos sobre a dispersão de poluentes, que serão importantes e necessários para o estudo dos modelos matemáticos. Na Unidade 1, vimos que a dinâmica da atmosfera é um processo complexo e que está relacionado a diversos fatores meteorológicos, como movimentos atmosféricos, massas de ar, estabilidade atmosférica, entre outros. Por isso, estudar o comportamento ou dispersão de uma pluma (poluentes) na atmosfera também é um processo complexo. Uma vez lançados para a atmosfera, os poluentes passam a se comportar de acordo com os fatores meteorológicos locais que podem influir na dispersão de poluentes.

Lora (2000) descreve, de uma maneira geral, que ao sair de uma chaminé, o comportamento da pluma pode ser subdividido em dois componentes principais, (1) ascensão da pluma e (2) difusão e transporte da pluma. A ascensão de uma pluma depende das características dos poluentes que estão sendo emitidos, das dimensões da chaminé e dos parâmetros meteorológicos no instante da emissão. Após a emissão, no entanto, a pluma adquirirá um movimento transversal, acompanhado de difusão em torno de sua linha de centro. Podem-se observar processos distintos de ascensão, difusão e transporte na Figura 2.4.

Figura 2.4 | Processos distintos de ascensão e dispersão de poluentes

Fontes: <https://pixabay.com/p-2043666/?no_redirect>; <http://www.publicdomainpictures.net/view-image.php?image=142319&picture=fumo-da-fabrica>. Acesso em: 16 jun. 2017.

Nos estudos de dispersão de poluentes, consideram-se as seguintes características para uma pluma ideal: as partículas de maior peso caem sobre o solo, as partículas mais finais continuam a ascender até perderem energia e caírem sobre o solo, e restam as partículas que se comportam como gás e se adaptam ao processo de dispersão. Considerando esses fatores, existem seis tipos de plumas: (1) serpenteante; (2) cônico; (3) tubular; (4) fumegante; (5) antifumegante e (6) *trapping*. As características para ocorrência de cada tipo de pluma estão descritas no Quadro 2.3.

Quadro 2.3 | Tipos de plumas e suas características de ocorrência

Tipo de pluma	Características
Serpenteante	Atmosfera instável; ventos fracos; visível em dias ensolarados.
Cônico	Atmosfera quase neutra; ventos moderados; visível em dias ensolarados e nublados.
Tubular	Grande estabilidade atmosférica; visível no início da tarde e início do amanhecer.
Fumegante	Ocorre quando a pluma fica retida em uma camada de inversão térmica e não consegue atravessá-la (instável); típico nas primeiras horas após a saída do Sol, que provoca instabilidade junto ao solo.
Antifumegante	Ocorre quando a pluma fica retida em uma camada de inversão térmica, porém, possui energia suficiente para atravessá-la; típico de entardecer.
Trapping	Pluma entre duas camadas de inversão, ou condição neutra, ou levemente instável ou estável abaixo da inversão.

Fonte: adaptado de Lisboa (2007).

Pesquise mais

Não deixe de aprofundar os seus estudos sobre os tipos de plumas atmosféricas, acessando o capítulo VIII "Meteorologia e Dispersão Atmosférica" do livro *Controle da Poluição Atmosférica*, de Henrique de Melo Lisboa, disponível no link a seguir. Além disso, você encontrará também figuras que ilustram cada tipo de pluma atmosférica.

LISBOA, Henrique de Melo. **Meteorologia e Dispersão Atmosférica**. 2007. Disponível em: <http://repositorio.asces.edu.br/jspui/bitstream/123456789/418/11/Cap%208%20Meteorologia%20e%20dispers%C3%A3o%20atmosf%C3%A9rica.pdf>. Acesso em: 16 jun. 2017.

Além dos tipos de plumas e suas condições de ocorrência, há condições favoráveis e desfavoráveis à dispersão de poluentes. São condições que favorecem a dispersão de poluentes: chaminé alta, topografia plana, ventos e gradiente de temperatura instável. Já as condições desfavoráveis à dispersão de poluentes são: topografia acidentada, concentrações de fontes emissoras, edificações e inversão térmica. Por isso, ao estudar a poluição do ar no ambiente urbano, devem ser consideradas todas essas variáveis e condições. Além disso,

conforme mencionado na seção anterior, considerando que os veículos automotores são a principal fonte emissora de poluentes na atmosfera, é necessário desenvolver políticas públicas que incentivem o uso de transporte coletivo, além do desenvolvimento de novas tecnologias para veículos movidos a combustíveis renováveis e menos poluentes.

Reflita

Nos centros urbanos, as variáveis meteorológicas, relacionadas à termodinâmica da atmosfera, são influenciadas por fatores regionais como a presença de edificações e de relevo, que podem gerar caminhos preferenciais para o escoamento do ar. Quais outras variáveis, nos centros urbanos, podem influenciar na dispersão de poluentes atmosféricos?

Para finalizar o estudo desta seção, o Quadro 2.4 traz os principais poluentes, suas características e fontes emissoras. Observe que, com exceção do ozônio, de forma geral, os mesmos poluentes podem ser emitidos por fontes antropogênicas e naturais.

Quadro 2.4 | Principais poluentes e suas fontes

Poluente	Características	Fonte antropogênica	Fonte natural
Partículas totais em suspensão (PTS)	Partículas sólidas ou líquidas suspensas na forma de poeira, neblina, aerossol, fumaça, fuligem etc., inferiores a 100 micrometros	Indústrias, veículos automotores, queima de biomassa	Pólen, emissões marinhas e solo
Partículas inaláveis (PM10)	Partículas sólidas ou líquidas suspensas na forma de poeira, neblina, aerossol, fumaça, fuligem etc., inferiores a 10 micrometros	Indústrias, veículos automotores e formação secundária na atmosfera	Pólen, emissões marinhas e solo
Dióxido de enxofre (SO^2)	Gás incolor com forte odor, altamente solúvel; precursor da chuva ácida e de sulfatos (partícula inalável)	Combustão de combustíveis fósseis, queima do óleo combustível, refinaria de petróleo, veículos automotores a diesel	Vulcões e emissões de reações biológicas
Óxidos de nitrogênio (NOx)	Precursor de outros compostos tóxicos como HNO^3 e nitratos	Veículos automotores, indústrias, incineração e usinas termoelétricas	Processos biológicos no solo e relâmpagos
Monóxido de carbono (CO)	Gás incolor, inodoro e insípido	Combustão incompleta em geral, sobretudo em veículos automotores	Incêndios florestais e reações fotoquímicas
Ozônio (O^3)	Gás incolor e inodoro, constituinte do *smog*, muito ativo	Não é emitido diretamente na atmosfera, sendo produzido fotoquimicamente pela radiação solar sobre óxidos de nitrogênio e COV	–
Compostos orgânicos voláteis (COV)	Possuem alta pressão de vapor em condições normais de temperatura e pressão	Combustão industrial, evaporação de solventes, tratamento de esgoto, agricultura	Florestas

Fonte: adaptado de Branco e Murgel (2004).

Vale ressaltar que além desses poluentes mais comuns, muitos outros, como metais pesados, podem ser emitidos diariamente nas cidades e em seu entorno, considerando as características das indústrias instaladas, além de outras fontes naturais, conforme mencionado anteriormente. Portanto, observa-se a complexidade dos estudos referentes à poluição do ar, uma vez que além de conhecer todas as fontes emissoras e as características dos poluentes emitidos, é necessário conhecer as condições meteorológicas regionais. Hoje, a poluição do ar é um dos principais e mais preocupantes problemas ambientais nos centros urbanos. Além disso, cabe lembrar que os poluentes, sobretudo os gases do efeito estufa, podem apresentar efeito global, por exemplo, contribuindo para as mudanças climáticas. Os efeitos desses poluentes para a saúde humana, para o meio ambiente e para os materiais serão discutidos na Unidade 4 deste livro didático. Diante disso, é necessário que você aprofunde os seus conhecimentos acerca da dispersão de poluentes, bem como das características dos poluentes por meio de outras fontes de informações, como livros e artigos científicos relacionados à temática. Bons estudos!

Sem medo de errar

Atualmente, as cidades em todo o mundo enfrentam sérios problemas ambientais relacionados ao saneamento, como tratamento de água e esgoto e disposição final de resíduos sólidos, mas também provenientes da degradação da qualidade do ar. Desses problemas, destaca-se como um dos mais complexos de estudar, medir e controlar, a poluição do ar, devido à diversidade de poluentes lançados diariamente na atmosfera, a diversidade de fontes de emissão, além das reações fotoquímicas que ocorrem na atmosfera, produzindo poluentes ainda mais tóxicos. Diante disso, torna-se imprescindível o estudo de todas as variáveis envolvidas na poluição do ar de uma determinada região. Relembrando o contexto de aprendizagem, imagine a seguinte situação: você é agente ambiental de um município que possui a maior frota de veículos automotores do estado, além de contar com dois distritos industriais. O órgão ambiental municipal está preocupado com a qualidade do ar na cidade e solicita a elaboração de um relatório técnico com indicadores de qualidade do ar para análise quantitativa da poluição atmosférica. Agora que você já coletou alguns dados relacionados à quantidade de veículos automotores e sua relação com a poluição atmosférica, bem como já relacionou os principais indicadores de qualidade do ar, você deverá elaborar a segunda parte do relatório técnico sobre como se

dá o transporte desses poluentes na atmosfera. Para isso, responda às seguintes perguntas norteadoras: quais as principais fontes de emissões atmosféricas no município? De que forma os poluentes se dispersam na atmosfera, considerando as características da atmosfera do município (clima e tempo)? Quais os possíveis efeitos globais da dispersão de poluentes atmosféricos desse município? Lembre-se de continuar os estudos considerando o mesmo município da situação-problema da Seção 2.1.

As emissões atmosféricas que contribuem para a poluição do ar em um determinado município são de fontes fixas e móveis, de origem natural e antropogênica. Ressalta-se, porém, que cada região apresenta características distintas, tanto no que se refere às condições meteorológicas, como estabilidade atmosférica e movimentos das massas de ar, como características topográficas, edificações, quantidade e tipos de indústrias instaladas, quantidade de veículos automotores, entre outras. Por isso, para realizar o estudo é preciso considerar a proximidade com parques florestais que apresentam incidência de incêndios florestais, a proximidade de florestas tropicais, já que há liberação de poluentes, como compostos orgânicos voláteis. Além disso, ao fazer o estudo da poluição do ar em um determinado município, deve-se considerar os tipos de plumas atmosféricas provenientes das indústrias instaladas na região, já que podem ser de seis tipos, de acordo com as condições meteorológicas predominantes, sendo que as plumas serpenteantes ocorrem em atmosfera instável, com ventos fracos e são visíveis em dias ensolarados. As plumas cônicas ocorrem em atmosfera quase neutra, com ventos moderados e são visíveis em dias ensolarados e nublados. As plumas tubulares ocorrem em uma atmosfera com grande estabilidade e são visíveis no início da tarde e do amanhecer. As plumas fumegantes ocorrem quando a pluma fica retida em uma camada de inversão térmica e não consegue atravessá-la (instável), sendo típicas nas primeiras horas do dia, após a saída do Sol. As plumas antifumegantes também ocorrem quando a pluma fica retida em uma camada de inversão térmica, porém, esta possui energia suficiente para atravessá-la, sendo típicas no entardecer. Por fim, as plumas do tipo *trapping* ocorrem entre duas camadas de inversão, ou condição neutra, ou levemente instável ou estável abaixo da inversão. Os poluentes emitidos pelas fontes fixas e móveis, sejam de origem natural ou antropogênica, além de provocarem a degradação da qualidade do ar local, também podem ter efeitos globais, devido à dispersão desses poluentes na atmosfera, que podem ser carregados para áreas distantes de sua origem. Destacam-se,

nesse sentido, os gases do efeito estufa, sobretudo o metano e o dióxido de carbono, que, em altas concentrações, vem provocando alterações climáticas.

Apresentamos aqui, de uma maneira geral, as variáveis que devem ser consideradas para a elaboração do relatório. Você deve aprofundar os seus estudos sobre essas variáveis considerando o município escolhido na Seção 2.1, lembrando que você é o funcionário da prefeitura responsável pelo estudo. As informações referentes ao município escolhido podem ser obtidas no site do INMET e do INPE, bem como junto à própria prefeitura, como dados referentes às indústrias instaladas, presença de fontes naturais próximas à cidade, entre outras. É importante que você aprofunde o que foi apresentado nesta seção em artigos científicos relacionados a essa temática. Lembre-se de que você deverá entregar, nesta segunda seção, a segunda parte do relatório técnico com indicadores de qualidade do ar para análise quantitativa da poluição em determinado município ou região, e essas informações serão imprescindíveis para a sua elaboração. Bons estudos!

Avançando na prática

Poluição urbana e dispersão de poluentes

Descrição da situação-problema

A poluição do ar nos grandes centros urbanos é um desafio complexo a ser solucionado, considerando todos os tipos de fontes de emissões atmosféricas. A dispersão de poluentes nos grandes centros urbanos é influenciada por uma série de fatores, como estabilidade e instabilidade atmosférica, temperatura do ar, umidade do ar, entre outros. Nesse contexto, suponha que você é o Secretário de Meio Ambiente da Prefeitura de Cubatão, no estado de São Paulo, e realizou um projeto piloto com o intuito de auxiliar na dispersão de poluentes para melhorar a qualidade do ar. Primeiramente, você realizou um estudo sobre as características atmosféricas do local e fez um levantamento das fontes fixas de emissões atmosféricas. Sobre as fontes fixas, o que você considerou em relação à dispersão de poluentes na atmosfera? Quais os tipos de plumas de contaminação que são observadas nessas fontes fixas? Quais os principais poluentes tóxicos emitidos por essas fontes fixas na região?

Resolução da situação-problema

Em relação às emissões atmosféricas de fontes fixas, deve-se considerar, nesse caso, as indústrias instaladas em Cubatão, como

também a presença de centrais termoelétricas na região. Como sabemos, para conhecer os poluentes emitidos pelas indústrias, é preciso conhecer o processo industrial, visto que a quantidade e os tipos de poluentes emitidos dependem de fatores interdependentes da fabricação, como a matéria-prima e o combustível utilizados no processo, suas operações, a eficiência dos processos e o grau das medidas de controle contra a poluição. Uma rápida busca pela internet nos mostra que em Cubatão estão instaladas indústrias do setor petroquímico, do setor de produtos químicos, de pintura e solventes, de fabricação de fertilizantes, entre outras. Portanto, ao estudar a poluição do ar de Cubatão, é imprescindível obter dados sobre os processos de fabricação dessas indústrias para que os principais poluentes emitidos sejam quantificados e elencados. Além disso, é de extrema importância conhecer as características meteorológicas da região. Ressalta-se que a topografia da região é altamente complexa devido à presença da Serra da Mantiqueira a noroeste e da presença da Serra do Mar a sul e sudeste. Essa condição topográfica influi nas circulações das massas de ar regionais, interferindo na dispersão e no transporte de poluentes na região durante todo o ano. Uma vez que a dinâmica da atmosfera é um processo complexo que está relacionado a diversos fatores meteorológicos, como movimentos atmosféricos, massas de ar e estabilidade atmosférica, estudar o comportamento ou dispersão de uma pluma (poluentes) na atmosfera também é um processo complexo. Considerando esses fatores, existem seis tipos de plumas: (1) serpenteante; (2) cônico; (3) tubular; (4) fumegante; (5) antifumegante; (6) *trapping* que, por apresentarem características de ocorrência distintas, considerando os fatores meteorológicos e dos poluentes emitidos, todas podem ser encontradas na região de Cubatão. Por fim, devido às atividades industriais presentes na região, os seguintes poluentes (os mais comuns) são emitidos na cidade: partículas em suspensão (PTS), partículas inaláveis (PM10), dióxido de enxofre (SO^2), óxidos de nitrogênio (NOx), monóxido de carbono (CO), compostos orgânicos voláteis (COV). Porém, além destes, poluentes específicos de certos processos industriais, como metais pesados, estão presentes nessa região, sendo imprescindível conhecer quais são os processos industriais para saber os poluentes e as concentrações emitidas diariamente.

Faça valer a pena

1. As plumas atmosféricas são classificadas em seis tipos, considerando as características favoráveis à sua ocorrência. Associe os tipos de plumas, relacionados na primeira coluna, com as características de sua ocorrência, relacionadas na segunda coluna.

Primeira coluna
I. Serpenteante.
II. Cônico.
III. Tubular.
IV. Fumegante.
V. Antifumegante.
VI. Trapping.

Segunda coluna
1. Atmosfera instável e ventos fracos.
2. Pluma entre duas camadas de inversão.
3. Pluma retida em uma camada de inversão térmica, e não consegue atravessá-la.
4. Pluma retida em uma camada de inversão térmica, porém, há energia suficiente para atravessá-la.
5. Atmosfera quase neutra e ventos moderados.
6. Grande estabilidade atmosférica.
Assinale a alternativa que contém a sequência correta da associação entre o tipo de pluma e sua característica:

a) I – 1; II – 5; III – 6; IV – 3; V – 4; VI – 2.
b) I – 2; II – 5; III – 6; IV – 4; V – 3; VI – 1.
c) I – 5; II – 1; III – 6; IV – 3; V – 4; VI – 2.
d) I – 2; II – 5; III – 6; IV – 4; V – 1; VI – 3.
e) I – 5; II – 1; III – 6; IV – 2; V – 4; VI – 3.

2. Os compostos orgânicos voláteis (COV) são constituídos por ____ e _____ que podem ser substituídos por outros átomos, como halogênios, oxigênio, enxofre, nitrogênio ou fósforo. Esses compostos apresentam _____ pressão de vapor, ou seja, em temperatura e pressão normais são facilmente vaporizados e, portanto, participam de reações fotoquímicas da atmosfera.
Os termos que preenchem corretamente as lacunas do texto, são respectivamente:

a) carbono; enxofre; elevada.
b) hidrogênio; oxigênio; elevada.
c) carbono; hidrogênio; baixa.
d) carbono; hidrogênio; elevada.
e) carbono; enxofre; baixa.

3.

I. As indústrias lançam diariamente diversos poluentes para a atmosfera, em concentrações distintas, logo, é preciso conhecer o processo industrial

PORQUE

II. a quantidade e os tipos de poluentes emitidos estão relacionados a apenas um fator interdependente da fabricação, que é a matéria-prima utilizada no processo.

Considerando as características das emissões atmosféricas industriais descritas nas assertivas, assinale a opção correta:

a) As duas assertivas são proposições verdadeiras, e a segunda é uma justificativa correta da primeira.
b) As duas assertivas são proposições verdadeiras, mas a segunda não é uma justificativa correta da primeira.
c) A primeira assertiva é uma proposição verdadeira, e a segunda, uma proposição falsa.
d) A primeira assertiva é uma proposição falsa, e a segunda, uma proposição verdadeira.
e) Tanto a primeira quanto a segunda assertivas são proposições falsas.

Seção 2.3

Controle ambiental das emissões atmosféricas

Diálogo aberto

Atualmente, as cidades em todo o mundo enfrentam uma série de problemas ambientais que vão desde questões relacionadas ao saneamento ambiental até problemas com a degradação da qualidade do ar. Porém, dentre esses problemas, destaca-se a poluição do ar, uma vez que as emissões atmosféricas são diversas e não respeitam limites geográficos, não permitindo a sua delimitação. Associado a isso e com o aumento do número de indústrias e da frota de veículos em circulação nas cidades, cresce também a preocupação com a degradação da qualidade do ar e com a necessidade de monitorar e controlar as emissões atmosféricas. Sabe-se que diariamente as atividades antrópicas lançam para a atmosfera toneladas de resíduos, que podem ser gasosos ou particulados. Os resíduos gasosos apresentam maior dificuldade de controle, pois se solubilizam com os agentes químicos do ar. Já o material particulado, classificado de acordo com o seu diâmetro, apresenta maior facilidade de ser amostrado e, portanto, de ser monitorado e controlado. Existem atualmente equipamentos e tecnologias que possibilitam o monitoramento e o controle dos gases e materiais particulados emitidos para a atmosfera, sobretudo aqueles emitidos pelas atividades industriais, que serão o foco do nosso estudo nesta seção. Nesse contexto, imagine a seguinte situação: você é um agente ambiental de um município que possui a maior frota de veículos automotores do estado e, além disso, conta com dois distritos industriais. O órgão ambiental municipal está preocupado com a qualidade do ar na cidade e solicita que você, juntamente com outros profissionais, elabore um relatório técnico com indicadores de qualidade do ar para análise quantitativa da poluição atmosférica. Vocês já realizaram o levantamento dos principais indicadores da qualidade do ar e analisaram as características locais que determinam a dispersão de poluentes. Agora, para finalizar o relatório técnico solicitado pelo órgão ambiental, você e seus colegas de trabalho deverão propor medidas e técnicas de controle da poluição. Para isso, vocês deverão se embasar nas seguintes perguntas: quais as tecnologias de controle da poluição? Para os distritos industriais, quais os equipamentos antipoluição? Caso o município opte por instalar uma rede de monitoramento da poluição

do ar, quais são os tipos de rede e parâmetros? Qual seria o mais indicado para o município e por quê?

Lembre-se de que você deve buscar informações acerca das indústrias instaladas no município em estudo (deve ser o mesmo das seções anteriores), junto à prefeitura. Além disso, é importante que você busque em artigos científicos as novas tecnologias que estão sendo utilizadas para melhorar o controle e o monitoramento da qualidade do ar. Bons estudos!

Não pode faltar

Todos nós necessitamos respirar um ar com composição adequada e, para isso, é preciso uma vigilância contínua sobre as interferências sofridas pela atmosfera, como a dispersão dos poluentes e as reações fotoquímicas sofridas por eles. Estudamos, na Unidade 1, que o controle da qualidade do ar nas cidades é feito por meio de uma medida de parâmetros: partículas, hidrocarbonetos totais, oxidantes totais, óxidos de nitrogênio, monóxido de carbono e dióxido de enxofre. Existem outras substâncias que causam malefícios à vida em geral, por isso, esses são indicadores indiretos, porém, potenciais da alteração da composição do ar em uma região. As medidas indiretas, como os parâmetros, nos indicam que há um problema, mas não a fonte e nem a causa desse problema. Já as medidas diretas são aquelas relacionadas às emissões na fonte e, portanto, apresentam possibilidade de controle. Nesta seção iremos estudar a vigilância e o controle da poluição do ar, exercidos por meio de atividades de identificação e quantificação de substâncias poluentes, bem como sobre a instalação e operação de equipamentos antipoluidores nas fontes emissores.

Reflita

No município onde você reside, é possível enxergar emissões atmosféricas industriais? Nele há planejamento urbano industrial a fim de garantir que os poluentes não se concentrem no ambiente urbano?

O controle da poluição do ar, a fim de reduzir o impacto ambiental, é dividido em medidas indiretas e diretas. Algumas são de caráter geral, para todos os tipos de indústrias, outras são específicas, de acordo com o tipo de atividade desenvolvida. As medidas indiretas buscam eliminar, reduzir ou afastar os poluentes, a partir da substituição de matérias-primas e reagentes que gerem menos poluentes, a partir de alguma

mudança no processo industrial ou operação dentro da indústria, implantação de chaminés mais altas para reduzir a concentração de poluentes a nível do solo, entre outras. Já as medidas diretas são aquelas relacionadas à utilização de equipamentos de controle para reduzir a quantidade de poluentes emitidos. Esses equipamentos são classificados considerando o estado físico do poluente, uso ou não de água, entre outros. Porém, é preciso partir do princípio de que os equipamentos e dispositivos existentes para o controle da poluição não se aplicam a todo e qualquer tipo de poluente, além de não serem totalmente eficazes. Por isso, são necessárias medidas de zoneamento das atividades poluidoras por meio de planejamento urbano regional, que deve levar em conta o estabelecimento de áreas de proteção sanitária, a direção de ventos predominantes e outras características meteorológicas da região, que você estudou na Unidade 1.

Assimile

Assim como os equipamentos antipoluição são essenciais para reduzir a poluição do ar, o zoneamento das atividades poluidoras é imprescindível para garantir a qualidade do ar de uma determinada região. Por isso, é necessário que as ações relacionadas à gestão das emissões atmosféricas sejam implantadas de forma conjunta e em parceria com diversos setores industriais e gestores públicos.

Sobre os equipamentos antipoluição por fontes fixas, existem dois grupos básicos: os que controlam a emissão de material particulado e os que retêm gases e vapores. Cabe ressaltar que em cada um desses grupos existem várias alternativas representadas por inúmeros equipamentos, aplicáveis a diferentes casos. Por isso, é importante que se conheçam todos os equipamentos, seu princípio de funcionamento, suas vantagens e desvantagens, de forma que a escolha por um determinado dispositivo antipoluição seja adequada ao porte da indústria, aos recursos financeiros disponíveis, à mão de obra qualificada para operar o equipamento, à sua atividade e, sobretudo, aos poluentes gerados por essa atividade.

Quadro 2.5 | Principais equipamentos de controle da poluição do ar para material particulado

–			Vantagens	Desvantagens	Princípio de funcionamento
Equipamentos de controle de material particulado	Coletores secos	Coletores mecânicos inerciais e gravitacionais	Baixo custo; baixa perda de carga; resistência à corrosão e temperatura	Baixa eficiência para partículas pequenas (restritos a partículas maiores que 50 μm); requer grande espaço	Utilizam a deposição gravitacional das partículas carregadas pelo fluxo gasoso
		Coletores mecânicos centrífugos (ciclones)	Baixo custo; baixa perda de carga; resistência à corrosão e temperatura; simplicidade de projeto e manutenção	Baixa eficiência para partículas menores que 5 μm; excessivo desgaste por abrasão; possibilidade de entupimento (partículas menores, higroscópicas e/ou pegajosas)	A força centrífuga age sobre as partículas carregadas pelo fluxo de gás, empurrando-as na direção das paredes, sendo retiradas do fluxo gasoso
		Filtro de tecido (manga)	Alta eficiência (99,9%) de remoção; perda de carga não excessiva; resistente à corrosão	Requer muito espaço para tratar grande vazões; alto custo; baixa resistência a altas temperaturas; empastamento devido a poluentes condensáveis e pegajosos; possibilidade de entupimento	O fluxo gasoso é forçado através de um meio poroso (filtro), onde o material particulado é retido
		Precipitador eletrostático seco	Trata grandes vazões e altas temperaturas; alta eficiência de coleta para partículas pequenas; baixo custo de operação e manutenção	Custo inicial elevado; requer grande espaço físico	Remoção de material particulado do fluxo gasoso através de dois eletrodos. As moléculas gasosas passam por dois eletrodos, ficam ionizadas (carregadas) e são atraídas para um prato com carga oposta, onde serão removidas
	Colet	Torre de spray (pulverizadores)	Não gera fonte secundária de pó; necessita de pouco espaço; coleta gases e material particulado; trabalha em altas temperaturas e umidade; alta eficiência para remoção de material particulado fino	Alto custo de perda de carga; geração de resíduos úmidos; problemas de corrosão; opacidade da pluma de vapor; consumo de energia elétrica; acúmulo de sólidos; alto custo de operação; consumo e poluição de água	O gás é forçado através de uma aspersão de gotas (água) que colidem com o material particulado, aglomerando as partículas e tornando a coleta facilitada (gravitacional ou inercial)
		Lavadores com enchimento			
		Lavador ciclônico			
		Lavadores de leito móvel			
		Lavador Venturi			

Fonte: adaptado de Lisboa (2007).

Conforme observado no Quadro 2.5, para a remoção de partículas, são empregados tanto coletores secos quanto coletores úmidos. Nos coletores úmidos, chamados de "lavadores", o material particulado é forçado a atravessar uma camada de água, na forma de gotículas. Em seguida, o efluente líquido é recolhido e submetido a tratamento. Dentre os lavadores úmidos, destaca-se o lavador Venturi, que pode ser utilizado também como absorvedor, logo, permite o controle simultâneo de material particulado e de gases e vapores. Além disso, é bastante difundido devido à alta eficiência de coleta de poluentes, pela sua simplicidade operacional e por ser um sistema compacto.

Nos coletores secos, utiliza-se processo de filtração, por um meio filtrante constituído de material granuloso, fibras ou tecidos especiais e processo de deposição, em que as partículas são forçadas a depositar-se ou precipitar-se, através da redução da velocidade do fluxo, por processos especiais, eletrostáticos ou centrífugos. Dentre os coletores secos, destaca-se o filtro de tecido (manga). Porém, ressalta-se que a escolha do material filtrante (tecido) deve considerar a temperatura máxima que os diferentes tipos de tecidos suportam, se são resistentes a ácidos, à abrasão e à flexão. Alguns tipos de tecidos utilizados nesses filtros são: algodão, fibras de vidro, lã, teflon, entre outros.

Exemplificando

Dentre os equipamentos descritos, destacam-as os ciclones para usos em fornos de cimento, indústrias siderúrgicas e de fundições e indústrias químicas.

Quadro 2.6 | Principais equipamentos de controle da poluição do ar para gases e vapores

_		Vantagens	Desvantagens	Princípio de funcionamento
Equipamentos de controle de material particulado	Absorvedores	Baixa perda de carga; resistente à corrosão (fibras de vidro); alto coeficiente de troca de massa; custo inicial baixo; pouco espaço físico; útil para partículas e gases	Geração de efluentes líquidos e resíduos úmidos; depósito de material particulado; sensível à temperatura (fibra de vidro); alto custo de manutenção e operação	Remoção de poluentes de uma corrente gasosa por sua dissolução em um líquido (transferência de massa)
	Adsorvedores	Alta eficiência (entre 99 e 99,8%) até a sua completa saturação; os materiais sólidos podem ser regenerados e reutilizados; utilizados quando os compostos recuperados possuem valor comercial	Requer destilação e extração para recuperação do adsorvedor; diminuição da capacidade de adsorção ao longo do processo; alto custo; requer pré-filtragem; requer resfriamento do gás antes do processo	Captura de gases por superfícies ou poros de materiais sólidos (carvão ativado, sílica gel e alumina)

Equipamentos de controle de material particulado	Incineração de gás com chama direta	Transformação de um gás poluente em um gás menos poluente ou sem odor	Formação de poluentes secundários e formação de cinzas	Consiste em uma câmara de combustão onde os gases ou vapores a serem queimados entram em contato com os gases quentes provenientes da queima de um combustível auxiliar
	Incineradores de gás catalíticos	O catalisador aumenta a velocidade da reação e não é consumido no processo	Necessidade de câmara de pré-aquecimento; formação de cinzas	Consiste em uma câmara que contém o catalisador (metais e óxidos metálicos) em um suporte cerâmico que promoverá a oxidação do poluente

Fonte: adaptado de Lisboa (2007).

Dos equipamentos utilizados para controle da poluição de gases e vapores, destacam-se os adsorvedores, sendo a principal vantagem a possibilidade de reaproveitamento do adsorvedor. Além disso, o processo de adsorção é bastante apropriado para a remoção de gases e vapores em baixas concentrações, sobretudo de substâncias causadoras de odor. Em contrapartida, à medida que se avança no processo, há redução da capacidade de adsorção, uma vez que há preenchimento dos poros na superfície do material adsortivo. O principal material adsortivo utilizado é o carvão ativado, sendo também um dos mais antigos, devido à sua versatilidade, disponibilidade e custo acessível.

Pesquise mais

Aprofunde o estudo sobre cada um desses equipamentos, suas aplicações e princípios de funcionamento e veja a imagem de cada tipo de equipamento, através da leitura do Capítulo VII – "Metodologia de controle da poluição atmosférica", do livro *Controle da Poluição Atmosférica*, disponível no link a seguir.

LISBOA, Henrique de Melo. **Metodologia de controle da poluição atmosférica**. 2017. Disponível em: <http://repositorio.asces.edu.br/bitstream/123456789/418/10/Cap%207%20Metodologia%20de%20controle%20da%20polui%C3%A7%C3%A3o%20atmosf%C3%A9rica.pdf>. Acesso em: 16 jun. 2017.

Além dos equipamentos descritos, há ainda processos biológicos para o tratamento de gases e vapores. Esses processos consistem na transformação dos compostos orgânicos voláteis, sulfurados e nitrogenados, para uma fase líquida que será, então, degradada por meio da ação microbiana (bacteriana). A degradação microbiana consiste na

oxidação da matéria orgânica de forma parcial ou total, gerando como produtos finais água e gás carbônico. Esses processos têm aplicação em produtos biodegradáveis e que sejam relativamente solúveis em solução aquosa. São utilizadas como biodesodorização de gás mau odorante e tóxico, transformando-o em compostos inodoros e atóxicos.

Cabe ressaltar que não existe uma única tecnologia para controle da poluição do ar e nem podemos considerar uma como mais eficiente, já que cada caso deve ser analisado separadamente, de acordo com as características do processo em questão, como fonte emissora, natureza do contaminante, legislação, entre outros. Porém, é possível considerar alguns aspectos na escolha do melhor equipamento antipoluição, como as características do gás a ser tratado (temperatura, umidade, volatilidade, vazão, concentração, reatividade etc.), os custos de investimento/instalação, funcionamento e manutenção e a eficiência na remoção desses poluentes.

Finalizando o nosso estudo nesta seção, é preciso que conheçamos as redes de monitoramento da qualidade do ar. Existem dois tipos de rede de monitoramento, a manual e a automática. Na rede automática, os dados são registrados a cada minuto e enviados para uma estação central em tempo real. Já na rede manual, um técnico coloca o material a ser analisado em recipientes específicos que serão retirados após 24 horas e encaminhados para análise em laboratórios. Elas também se diferem quanto aos poluentes analisados, sendo que a rede manual possibilita a análise de partículas totais em suspensão e de partículas inaláveis, enquanto que a rede automática possibilita, além das partículas, a análise de dióxido de enxofre, dióxido de nitrogênio, monóxido de carbono e ozônio. Ressalta-se ainda que a rede automática também registra a velocidade e a direção dos ventos, a umidade do ar e a temperatura, que não são registradas nas redes manuais de monitoramento. Além das redes manuais e automáticas, existem ainda as redes móveis de controle da qualidade do ar, utilizadas quando há necessidade de medir a poluição em locais em que não existem estações de amostragem.

No estado de São Paulo, a qualidade do ar é monitorada pela Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental (CETESB) através de duas redes, uma manual e uma automática, que abrangem a região metropolitana de São Paulo, Cubatão e o interior do estado. A rede automática é composta por 25 estações fixas e por duas estações móveis. Os métodos utilizados para medição de cada parâmetro, bem como os tipos de amostradores serão abordados na próxima unidade deste livro didático.

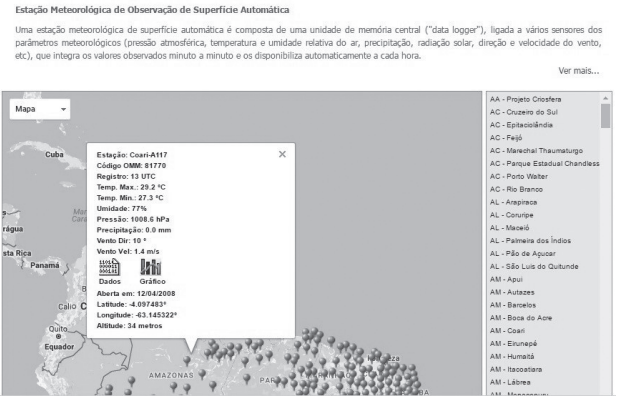
Você pode acompanhar a qualidade do ar em qualquer estado brasileiro a partir do site do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE - <http://meioambiente.cptec.inpe.br/?lang=pt>), em tempo real ou também obter informações de uma série temporal (determinado período). Observe na Figura 2.5 que é possível obter dados da qualidade do ar, das emissões de queimadas e de emissões urbano/industriais, considerando as taxas de emissões e os poluentes emitidos.

Figura 2.5 | Qualidade do ar: site do INPE

Fonte: <http://meioambiente.cptec.inpe.br/?lang=pt>. Acesso: 16 jun. 2017.

Além disso, no site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), é possível conhecer todas as estações automáticas, bem como ter acesso a cada uma delas, conforme mostra da Figura 2.6. Ao clicar sobre cada rede automática, abre-se uma janela com dados da rede e com dois ícones, sendo um de dados e outro de gráficos, que contêm dados meteorológicos da região disponíveis para download.

Figura 2.6 | Estações automáticas: site do INMET



Fonte: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesautomaticas>. Acesso: 16 jun. 2017.

Pesquise mais

Para conhecer mais sobre as redes automáticas, inclusive com imagens, acesse o material disponível no link a seguir.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Nota Técnica Nº. 001/2011/SEGER/LAIME/CSC/INMET**. 2017. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/css/content/topo_iframe/pdf/Nota_Tecnica-Rede_estacoes_INMET.pdf>. Acesso em: 16 jun. 2017.

Terminamos aqui o nosso estudo referente à Unidade 2 do livro didático. É importante que você acesse os links e arquivos disponibilizados para aprofundar os estudos referentes ao que abordamos em cada uma das seções. Além disso, você pode buscar artigos científicos sobre os diferentes equipamentos antipoluição utilizados pelas indústrias, de forma a conhecer suas aplicações para cada tipo específico de processo industrial. Bons estudos!

Sem medo de errar

A crescente preocupação com a problemática ambiental não é algo recente no mundo, sobretudo no que se refere à poluição do ar, visto que, anualmente, milhares de pessoas morrem vítimas de problemas respiratórios causados pela poluição do ar. Nesse contexto, ao longo do tempo, medidas e equipamentos de controle da poluição foram desenvolvidos e são amplamente utilizados por indústrias, a fim de cumprir com os requisitos legais, que buscam reduzir as emissões e assim garantir a qualidade do ar que respiramos.

Diante disso, imagine a seguinte situação: você é um agente ambiental de um município que possui a maior frota de veículos automotores do estado, além disso, conta com dois distritos industriais. O órgão ambiental municipal está preocupado com a qualidade do ar na cidade e solicita que você, juntamente com outros profissionais, elabore um relatório técnico com indicadores de qualidade do ar para análise quantitativa da poluição atmosférica. Vocês já realizaram o levantamento dos principais indicadores da qualidade do ar e analisaram as características locais que determinam a dispersão de poluentes. Agora, para finalizar o relatório técnico solicitado pelo órgão ambiental, você e seus colegas de trabalho deverão propor medidas e técnicas de controle da poluição. Para isso, vocês deverão se embasar nas seguintes perguntas: quais as tecnologias de controle da poluição?

Para os distritos industriais, quais os equipamentos antipoluição? Caso o município opte por instalar uma rede de monitoramento da poluição do ar, quais os tipos de rede e parâmetros? Qual seria o mais indicado para o município e por quê?

O controle da poluição do ar é dividido em medidas indiretas e diretas. As medidas indiretas, que são aquelas que buscam eliminar ou reduzir os poluentes, devem ser tomadas pelas próprias fontes emissoras, como a substituição de matérias-primas e reagentes que gerem menos poluentes, alguma mudança no processo industrial ou operação, implantação de chaminés mais altas para reduzir a concentração de poluentes no nível do solo, entre outras. Além disso, as indústrias podem adotar medidas diretas, relacionadas à utilização de equipamentos de controle para reduzir a quantidade de poluentes emitidos, como os coletores secos (filtros de tecido), coletores úmidos (lavadores), processos adsortivos e absortivos, entre outros. Porém, equipamentos e dispositivos existentes para o controle da poluição devem ser escolhidos considerando as características do poluente, os recursos financeiros disponíveis e a eficiência de remoção que se deseja alcançar. Logo, para responder a esse questionamento do relatório, é preciso que você conheça as principais indústrias instaladas no município escolhido como ambiente de estudo. Além disso, cabe aos gestores públicos, como as prefeituras, realizarem medidas de zoneamento das atividades poluidoras por meio de planejamento urbano regional, que irá considerar as áreas de proteção sanitária, a direção de ventos predominantes e outras características meteorológicas da região. O município e os órgãos ambientais podem ainda monitorar a qualidade do ar através das redes de monitoramento, que podem ser manuais ou automáticas. A rede manual é mais acessível devido ao baixo custo, porém, não traz informações em tempo real, requer um técnico para realizar a coleta da amostra e encaminhá-la para análise em laboratório e amostra poucos poluentes. Nesse caso, para escolher a melhor rede de monitoramento é preciso levar em consideração os recursos disponíveis, a presença de redes automáticas em regiões próximas ou vizinhas e até mesmo a adoção de redes móveis de monitoramento. Por isso, o último questionamento do relatório deve ser respondido considerando o município que definido como área de estudo, para que você tenha condições de avaliar todas as variáveis envolvidas na adoção de uma rede de monitoramento. Para isso, você também pode acessar os sites do INPE e do INMET, nos quais encontrará dados sobre as redes automáticas já instaladas,

bem como dados sobre a qualidade do ar e emissões atmosféricas em diferentes regiões do Brasil.

Lembre-se de que, para elaborar a última etapa do seu relatório, você deve considerar os conceitos e fundamentos aprendidos nas seções anteriores e na Unidade 1 referentes às características meteorológicas da região. Além disso, para que o seu relatório fique completo, ele deve conter a seguinte estrutura: introdução, classificação das estações de monitoramento, poluentes atmosféricos e parâmetros de qualidade do ar, caracterização do município, caracterização das estações de monitoramento, inventário das fontes poluidoras, resultados e discussão e conclusão. Bom trabalho!

Avançando na prática

Emissões atmosféricas do setor moveleiro

Descrição da situação-problema

A indústria moveleira é uma das que mais cresce no Brasil e, consequentemente, cresce também a geração de resíduos desse setor, no qual estão incluídos cavacos, maravalha e pó. A maravalha pode ser utilizada como biomassa para combustão e, assim, para geração de energia. Porém, a queima da biomassa libera poluentes atmosféricos, como partículas finas (PM), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_X) e compostos orgânicos voláteis, incluindo componentes tóxicos e cancerígenos, tais como hidrocarbonetos aromáticos policíclicos. Nesse contexto, cresce a preocupação com a poluição do ar advinda das emissões do setor moveleiro e das indústrias que utilizam biomassa da madeira para geração de energia. Suponha que você é contratado pela área ambiental de uma pequena indústria moveleira, com potência térmica nominal de 15 MW, que utiliza o próprio resíduo da maravalha como biomassa para geração de energia. Porém, até o momento, a indústria não possui nenhum equipamento de controle das emissões atmosféricas oriundas da queima dessa biomassa. Considerando os equipamentos existentes atualmente para o controle das emissões atmosféricas, qual você indicaria para a indústria? Justifique a escolha do equipamento. Além disso, a indústria pretende se adequar aos padrões de emissões estabelecidos pelo PRONAR, mas desconhece tais padrões. Considerando a legislação vigente sobre o assunto, quais os padrões estabelecidos para as emissões atmosféricas da combustão da madeira?

Resolução da situação-problema

A queima de biomassa libera para a atmosfera partículas finas (PM), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_X) e compostos orgânicos voláteis, ou seja, caracterizam-se por serem poluentes particulados e gasosos. Atualmente, alguns equipamentos de controle ambiental são extremamente eficientes para materiais particulados finos, como precipitadores eletrostáticos e filtros de manga. Porém, são ineficientes para controlar simultaneamente materiais particulados e gasosos. Por isso, a escolha do melhor equipamento deve se basear na eficiência de controle de um maior número de poluentes de forma simultânea, sobretudo por se tratar de uma pequena indústria, onde há limitação de recursos para compra de equipamentos. Diante disso, os lavadores Venturi, que controlam simultaneamente poluentes particulados e gasosos, podem ser a melhor escolha para essa indústria, também pela simplicidade operacional e por serem compactos. Sobre a legislação, a Resolução CONAMA nº 382/2006 estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. O Anexo IV dessa resolução traz os limites de emissão para poluentes atmosféricos provenientes da combustão de derivados da madeira por categoria de potência térmica nominal, expressa em megawatt (MW). Considerando a potência térmica nominal dessa indústria, que é de 15 MW, o limite de emissão de material particulado é de 520 mg/Nm^3 e de NO_X é 650 520 mg/Nm^3 v. Portanto, após a instalação dos lavadores Venturi, é necessário realizar o monitoramento das emissões, a fim de verificar se estas estão dentro dos limites estabelecidos na Resolução CONAMA nº 382/2006.

Faça valer a pena

1. O controle da poluição do ar, a fim de reduzir o impacto ambiental, é dividido em medidas indiretas e diretas. Algumas são de caráter geral, para todos os tipos de indústrias, outras são específicas, de acordo com o tipo de atividade desenvolvida.
Considerando apenas as medidas indiretas de controle da poluição do ar, assinale a alternativa correta:

a) Substituição de matéria-prima e instalação de equipamentos antipoluição.
b) Mudança no processo industrial e instalação de equipamentos antipoluição.
c) Substituição de matéria-prima e mudança no processo industrial.

d) Implantação de chaminé mais alta e instalação de equipamentos antipoluição.
e) Mudança na operação industrial e instalação de equipamentos antipoluição.

2. Os equipamentos antipoluição são divididos em dois grupos, considerando basicamente o estado físico do poluente e o uso ou não de água: os que controlam a emissão de material particulado e os que retêm gases e vapores. Considerando apenas os equipamentos antipoluição que controlam a emissão de material particulado, assinale a alternativa correta:

a) Coletores mecânicos centrífugos e filtro de tecido.
b) Lavador Venturi e adsorvedores.
c) Precipitadores eletrostáticos e incineradores catalíticos.
d) Coletores mecânicos e incineração de gás com chama direta.
e) Incineradores catalíticos e incineradores de gás com chama direta.

3. existem diversos equipamentos utilizados para controle da poluição de gases e vapores, destacando-se os adsorvedores. Nesse processo, há captura de gases nas superfícies ou nos poros de materiais sólidos, como o carvão ativado, a sílica gel e a alumina.
A principal vantagem do processo de adsorção de gases e vapores está relacionado ao/à:

a) Transformação dos poluentes tóxicos em poluentes menos tóxicos.
b) Diminuição da capacidade de adsorção ao longo do processo.
c) Baixo custo de implantação e operação.
d) Alta eficiência com gases em altas temperaturas.
e) Reaproveitamento do adsorvedor.

Referências

BAIRD, Colin; CANN, Michael. **Química ambiental**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2011.

BRANCO, Samuel Murgel; MURGEL, Eduardo. **Poluição do ar**. 2. ed. reform. São Paulo: Moderna, 2004.

BRASIL. **Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981**. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. 1981. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L6938.htm>. Acesso em: 16 jun. 2017.

_____. **Lei nº 8.723, de 28 de outubro de 1993**. Dispõe sobre a redução de emissão de poluentes por veículos automotores e dá outras providências. 1993. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L8723.htm>. Acesso: 16 jun. 2017.

_____. **Lei Federal nº 9.503, de 23 de setembro de 1997**. Institui o Código de Trânsito Brasileiro. 1997. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9503.htm>. Acesso em: 16 jun: 2017.

BURTON, M. R.; SAWYER, G. M.; GRANIERI, D. Deep carbon emissions from volcanoes. **Reviews in Mineralogy & Geochemistry**, Chantilly, v. 75, p. 323-354, 2013. Disponível em: <http://minsocam.org/MSA/RIM/RiMG075/RiMG075_Ch11.pdf>. Acesso em: 16 jun. 2017.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. **Emissões veiculares no estado de São Paulo 2014**. 2014. Disponível em: <http://veicular.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/35/2013/12/Relat%C3%B3rio-Emiss%C3%B5es-Veiculares_2014_VERS%C3%83O-DIGITAL.pdf>. Acesso em: 16 jun. 2017.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução nº 18, de 6 de maio de 1986**. Institui o Programa de Controle de poluição do ar por veículos automotores – PROCONVE. 1986. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res86/res1886.html>. Acesso em: 16 jun. 2017.

_____. **Resoluções nº 03, de 22 de agosto de 1990**. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR. 1990. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=100>. Acesso em: 16 jun. 2017.

_____. **Resolução nº 05, de 15 de junho de 1989**. Institui o Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar – PRONAR. 1989. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res89/res0589.html>. Acesso em: 16 jun. 2017.

_____. **Resolução nº 08, de 6 de dezembro de 1990**. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR. Complementa a RC nº 03/1990. 1990. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=105>. Acesso em: 16 jun. 2017.

_____. **Resolução nº 08, de 31 de dezembro de 1993**. Complementa a Resolução nº 18/1986, que institui, em caráter nacional, o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores - PROCONVE, estabelecendo limites máximos de emissão de

poluentes para os motores destinados a veículos pesados novos, nacionais e importados. 1993. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legislacao/CONAMA_RES_CONS_1993_008.pdf>. Acesso em: 16 jun. 2017.

_____. **Resolução nº 16, de 31 de dezembro de 1993**. Dispõe sobre a obrigatoriedade de licenciamento ambiental para as especificações, fabricação, comercialização, e distribuição de novos combustíveis, e dá outras providências. 1993. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legislacao/CONAMA_RES_CONS_1993_016.pdf>. Acesso em: 16 jun. 2017.

_____. **Resolução nº 315, de 20 de novembro de 2002**. Dispõe sobre a nova etapa do Programa de Controle de Emissões Veiculares-PROCONVE - Data da legislação: 29/10/2002 - Publicação DOU nº 224, de 20/11/2002, págs. 90-92. Status: Altera as Resoluções nº 18, de 1986, e nº 14, de 1995. Complementada pela Resolução nº 354, de 2004. 2002. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=337>. Acesso em: 16 jun. 2017.

_____. **Resolução nº 382, de 2 de janeiro de 2006**. Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas - Data da legislação: 26/12/2006 - Publicação DOU nº 1, de 02/01/2007, pág. 131. Status: Complementada pela Resolução nº 436, de 2011. 2006. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=520>. Acesso em: 16 jun. 2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO – DENATRAN. **Frota de veículos 2014**. 2016. Disponível em: <http://www.denatran.gov.br/index.php/estatistica/253-frota-2014>. Acesso em: 16 jun. 2017.

_____. **Frota de veículos 2016**. 2017. Disponível em: <http://www.denatran.gov.br/index.php/estatistica/261-frota-2016>. Acesso em: 16 jun. 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Cidades, 2017**. 2017. Disponível em: <http://cidades.ibge.gov.br/cartograma/mapa.php?lang=&coduf=35&codmun=350950&idtema=153&codv=V01&search=sao-paulo|campinas|sintese-das-informacoes-2015>. Acesso em: 16 jun. 2017.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Estação meteorológica de observação de superfície automática**. 2017. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesautomaticas>. Acesso em: 16 jun. 2017.

_____. **Nota Técnica Nº. 001/2011/SEGER/LAIME/CSC/INMET**. 2017. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/css/content/topo_iframe/pdf/Nota_Tecnica-Rede_estacoes_INMET.pdf>. Acesso em: 16 jun. 2017.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. **Qualidade do ar**. 2017. Disponível em: <http://meioambiente.cptec.inpe.br/?lang=pt>. Acesso em: 16 jun. 2017.

LIMA, Gleiphyson Santana de et al. Metodologias para estimativa da emissão de poluentes pelo transporte rodoviário. **Revista Militar de Ciência e Tecnologia**, Rio de Janeiro, v. 31, p. 119-132, 3º trimestre de 2014. Disponível em: <http://rmct.ime.eb.br/arquivos/RMCT_3_tri_2014/RMCT_199_E2B_13.pdf>. Acesso em: 16 jun. 2017.

LISBOA, Henrique de Melo. **Meteorologia e dispersão atmosférica**. 2007. Disponível em: <http://repositorio.asces.edu.br/bitstream/123456789/418/10/

Cap%207%20Metodologia%20de%20controle%20da%20polui%C3%A7%C3%A3o%20atmosf%C3%A9rica.pdf>. Acesso em: 16 jun. 2017.

_____. **Metodologia de controle da poluição atmosférica**. 2007. Disponível em: <http://repositorio.asces.edu.br/bitstream/123456789/418/10/Cap%207%20Metodologia%20de%20controle%20da%20polui%C3%A7%C3%A3o%20atmosf%C3%A9rica.pdf>. Acesso em: 16 jun. 2017.

LORA, E. E. S. **Prevenção e controle da poluição nos setores energético, industrial e de transporte**. ANEEL: Brasília, 2000.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **1º Inventário nacional de emissões por veículos automotores rodoviários 2011**. 2011. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/163/_publicacao/163_publicacao27072011055200.pdf>. Acesso em: 16 jun. 2017.

_____. **PROCONVE: Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores**. 2017. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/images/arquivo/80060/Arquivos/PROCONVE_atualizado%20em%2021nov13.pdf>. Acesso em: 16 jun. 2017.

SINDICATO NACIONAL DE INDÚSTRIAS DE COMPONENTES PARA VEÍCULOS AUTOMOTORES (SINDIPEÇAS). **Relatório da frota circulante 2015**. 2015. Disponível em: <http://carro100.com.br/indicadores-da-frota/relatorio-da-frota-circulante-de-2015/. Acesso em: 16 jun. 2017.

VIEIRA, Neise Ribeiro. **Poluição do ar**: indicadores ambientais. Rio de Janeiro: E-papers, 2009.

WIKIPEDIA. **Pacific ring of fire**. 2017. <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/09/Pacific_Ring_of_Fire.png>. Acesso em: 16 jun. 2017.

Transporte e monitoramento de poluentes atmosféricos

Convite ao estudo

Caro aluno,

ao longo das Unidades 1 e 2, discutimos aspectos importantes sobre as emissões atmosféricas e percebemos que a poluição do ar é um dos grandes desafios da atualidade, devido à dificuldade de se estabelecer um nexo causal entre as exposições e a ocorrência de danos e, consequentemente, realizar o monitoramento da qualidade do ar. Essa dificuldade está relacionada a uma série de vieses, por exemplo, a ausência de informações sobre o comportamento dos poluentes na atmosfera, a falta de conhecimentos sobre os diversos poluentes resultantes de transformações e reações na atmosfera, as múltiplas exposições a diferentes tipos de fontes de emissões, a falta de controle e monitoramento ambiental em muitas regiões, entre outros. No entanto, a Resolução Conama nº CONAMA nº 03/1990, já abordada na Unidade 2, traz os métodos de amostragem e análise de poluentes atmosféricos, que será tema de uma das seções desta unidade.

Na Unidade 1, estudamos conteúdos importantes sobre a composição e a dinâmica da atmosfera terrestre, e, na Unidade 2, estudamos os aspectos legais relacionados aos indicadores de qualidade do ar nas cidades e os principais equipamentos antipoluição utilizados nas indústrias. Agora, na Unidade 3, abordaremos os princípios e fundamentos dos amostradores de poluentes atmosféricos, os modelos de dispersão e os sistemas de tratamento de poluentes atmosféricos, tanto para ambientes internos quanto para ambientes externos. Para guiar o seu estudo, imagine-se no seguinte contexto de aprendizagem: você é um profissional da área ambiental recém-contratado por uma das

filiais de uma indústria do ramo de petróleo e gás, que acaba de ser implantada em um município paulista. Na sua filial, você será responsável pelo monitoramento das emissões atmosféricas e, por isso, deverá elaborar o plano de monitoramento e controle da poluição do ar desta indústria. O plano será elaborado em três partes, sendo elas: (1) a amostragem dos poluentes, (2) os modelos de transporte atmosférico e (3) sistemas de tratamento de poluentes atmosféricos. Para nortear o seu relatório, reflita sobre as seguintes perguntas: como escolher entre um amostrador ativo e passivo? Quais as principais características de cada tipo de amostrador, suas vantagens e desvantagens? Quais são os principais modelos de transporte atmosférico, suas limitações e aplicabilidade? Quais os sistemas de tratamento de poluentes utilizados em ambientes internos e externos? Quais suas limitações e vantagens?

Para que você reflita e responda corretamente a essas perguntas, é importante que você se dedique ao estudo desses conteúdos, sobretudo aprofundando o estudo em leituras complementares e artigos científicos que abordem o tema, uma vez que novas tecnologias estão sempre em desenvolvimento. Espero que você se sinta motivado a aprofundar os seus conhecimentos acerca do monitoramento da qualidade do ar. Pronto? Bons estudos!

Seção 3.1

Amostragem e monitoramento de poluentes atmosféricos

Diálogo aberto

Até o momento, discutimos pontos relevantes para a gestão das emissões atmosféricas, como a dinâmica dos gases na atmosfera, as transformações que os gases sofrem na atmosfera, como se dá o transporte de poluentes, quais os poluentes que são parametrizados pela legislação, bem como os principais equipamentos antipoluição. Não menos importante do que já foi abordado até o momento, esta seção irá tratar dos principais métodos de monitoramento da qualidade do ar e de que forma os poluentes presentes na atmosfera são quantificados, uma vez que o seu monitoramento é o ponto de partida para a tomada de decisões relativas ao controle das emissões.

Neste contexto, imagine a seguinte situação hipotética: você acaba de ser contratado por uma das filiais de uma indústria do ramo de petróleo e gás, na qual será responsável pelo monitoramento das emissões atmosféricas de uma refinaria. Por isso, você deverá elaborar o plano de monitoramento e controle da poluição do ar, que consiste em três partes, sendo elas: (1) a amostragem dos poluentes, (2) os modelos de transporte atmosférico e (3) os sistemas de tratamento de poluentes atmosféricos. Para elaborar a primeira parte do plano de monitoramento, você deverá fazer uma consulta sobre os tipos de amostradores que existem e a aplicabilidade de cada um deles. Para auxiliar na elaboração desta primeira etapa, responda às seguintes perguntas: como realizar a amostragem de poluentes atmosféricos provenientes de uma refinaria de petróleo? Quais os principais amostradores/analisadores para essa unidade industrial? O que são analisadores automáticos e sensores remotos? De que forma eles podem auxiliar no monitoramento da qualidade do ar na refinaria em que você trabalha?

Após a leitura desta seção, esperamos que você se sinta motivado a aprofundar os seus conhecimentos acerca dos métodos de monitoramento da qualidade do ar, buscando, para isso, artigos científicos que irão auxiliá-lo na elaboração da primeira entrega desta unidade. Pronto? Então, vamos lá!

Não pode faltar

É impossível imaginar a vida humana, com todo o progresso já alcançado e ainda em desenvolvimento, sem associarmos a esse progresso a intensa extração e utilização de recursos naturais, que provocam modificações nas condições ambientais, alterando o equilíbrio ecológico e colocando a saúde da população em risco. Dentre as modificações ambientais, está a degradação da qualidade do ar, sobretudo nos centros urbanos, que apresentam cada vez mais substâncias nocivas aos seres vivos. Por isso, monitorar a poluição atmosférica é uma das ferramentas que auxilia na tomada de decisões sobre a escolha das medidas de controle, tanto para fontes móveis quanto para fontes fixas.

Estudamos na Unidade 2, que o controle da qualidade do ar nas grandes cidades é realizado, de maneira geral, por meio de uma medida rotineira de seis parâmetros, sendo eles: partículas totais em suspensão, fumaça, partículas inaláveis, dióxido de enxofre, monóxido de carbono, ozônio e dióxido de nitrogênio. Para cada um destes parâmetros, existe uma metodologia de medição estabelecida pela Resolução CONAMA nº03/90, assim como cada parâmetro tem um significado na poluição do ar.

Porém, antes de iniciarmos os estudos sobre os princípios dos métodos de amostragem estabelecidos pela legislação brasileira, vamos abordar os fundamentos e características dos amostradores utilizados para monitorar a qualidade do ar. Os amostradores são divididos em amostradores passivos e ativos. Nos amostradores passivos, a amostragem ocorre naturalmente por difusão. O equipamento utilizado consiste em um tubo, um disco amostrador ou cartucho, contendo um suporte adsorvente ou absorvente que fica exposto aos poluentes atmosféricos. Após o período de amostragem, o tubo é levado para análise em laboratório. Os amostradores passivos são indicados para monitoramento da qualidade do ar em ambientes internos e tem como vantagens a não dependência de bomba ou outro equipamento de sucção que force o movimento de um volume de ar através dele, além de ser de baixo custo. Porém, ainda não existem amostradores passivos para alguns poluentes e os resultados medidos não são imediatos.

Nos amostradores ativos, de uma forma geral, um certo volume de ar é sugado por uma bomba e passa através de um coletor químico

ou físico por 24 horas. Em seguida, a coleta é realizada por adsorção, absorção, filtração, reação ou por uma combinação de dois ou mais destes processos. As principais vantagens dos amostradores ativos são: baixo custo, operação simples, confiabilidade e possibilidade de armazenar os dados. Porém, exigem a coleta e análise em laboratório. Atualmente, os amostradores passivos têm sido substituídos por analisadores automáticos, que iremos abordar mais adiante. Agora, vamos entender o princípio de funcionamento de cada método segundo a Resolução Conama n. 03/1990, conforme Quadro 3.1.

Assimile

Os amostradores passivos não necessitam de energia elétrica para funcionarem, enquanto que os amostradores ativos requerem uma fonte de energia para que seja feita a mediação de poluentes atmosféricos.

Quadro 3.1 | Métodos de amostragem para poluentes atmosféricos segundo a Resolução Conama n. 03/1990

Poluentes atmosféricos	Método de amostragem
Partículas totais em suspensão	Método de amostrador de grandes volumes
Fumaça	Método da refletância
Partículas inaláveis	Método de separação inercial/filtração
Dióxido de enxofre	Método de pararonasilina
Monóxido de carbono	Método do infravermelho não dispersivo
Ozônio	Método da quimioluminescência
Dióxido de nitrogênio	Método da quimioluminescência

Fonte: Conama (1990).

Apesar da legislação brasileira estabelecer métodos de amostragem para cada parâmetro, estes podem ser monitorados a partir de métodos equivalentes. Porém, Frondizi (2008) ressalta que apesar de faltarem informações mais detalhadas sobre os métodos equivalentes que são aceitáveis, recomenda-se verificar se o método equivalente é aprovado pelo Instituto Brasileiro de Meio Ambiente (Ibama). Dessa forma, evita-se que os dados coletados sejam contestados devido à utilização de um método impróprio.

O princípio de funcionamento do método de amostrador de grandes volumes é determinado pela ABNT NBR 9547/1997 e consiste em um filtro favorável à coleta de partículas de até 25 μm –

50 μm, localizado no interior de um abrigo coberto, que irá aspirar uma certa quantidade de ar durante 24 horas. O ganho líquido em massa é determinado pesando-se o filtro antes e após a coleta, e o volume de ar amostrado é determinado a partir da vazão medida e do tempo de amostragem. Por fim, a concentração das partículas totais em suspensão no ar ambiente deverá ser calculada dividindo-se a massa das partículas coletadas pelo volume de ar amostrado e expresso em microgramas por metro cúbico (μg/ m^3) em condições-padrão (25°C e 1 atm).

No Brasil, o monitoramento de fumaça é realizado a partir da norma ABNT NBR 10736/1989. A amostragem consiste em acelerar o motor de forma rápida até obter a máxima utilização da bomba de injeção e a máxima velocidade do motor. Em seguida, realiza-se a desaceleração. Essa condição emite fumaça em quantidade semelhante à do veículo em uso. Durante esse processo, utiliza-se uma bomba de sucção, por cerca de 6 a 8 segundos, com um filtro de papel que muda de cor em função da qualidade da fumaça. Em seguida, a amostra é analisada em um reflectômetro.

O método de separação inercial/filtração consiste na mudança forçada de direção de um gás, para que, a inércia das partículas faça com que estas sigam em frente, enquanto o gás muda de direção, separando assim as partículas deste. Em seguida, essas partículas são filtradas.

No método de pararosanilina, determinado pela ABNT NBR 9546/1986, é utilizado um sistema de borbulhadores em que um determinado volume do ar ambiente, mediante o uso de uma bomba de vácuo, é succionado e borbulhado em solução de reagentes específicos para cada poluente por 24 horas. O dióxido de enxofre (SO_2) é absorvido em uma solução de tetracloromercurato de potássio (TCM), formando diclorossulfitomercurato que irá reagir com pararosanilina (corante vermelho) e formaldeído para formar o ácido metil-pararosanilina sulfônico, intensamente colorido. Em seguida, mede-se a absorvância da solução em espectrofotômetro.

O método de raios infravermelhos não dispersivos é determinado no Brasil pela ABNT NBR 13157/1994. É baseado na medição da absorção da luz que ocorre durante a passagem desta através da corrente de gases, utilizando uma fonte emissora e um detector. Na fonte, utilizam-se filtros ou outros mecanismos para medir a

absorção da luz em uma banda (faixa de comprimento de onda). Essa banda está centralizada em um pico de absorção correspondente à molécula a ser medida, dessa forma, a luz não irá se dispersar em todo o espectro.

O método da quimioluminescência utiliza medições quantitativas da emissão óptica da espécie química (poluente atmosférico) excitada para determinar a concentração da substância analisável, sendo produzida quando uma reação química gera uma espécie excitada eletronicamente, a qual emite luz ao voltar a um estado de menor energia.

Reflita

Os métodos de monitoramento descritos pela Resolução Conama nº 03/1990 são suficientes para garantir a qualidade do ar?

Retomando os nossos estudos sobre os amostradores, vale frisar que ao realizar o monitoramento da qualidade do ar, considera-se a mediação da poluição nas escalas de tempo e espaço. Diante disso, surgem os analisadores automáticos, buscando medições cada vez mais rápidas. Os analisadores automáticos fornecem medidas de 30 ou 60 minutos, utilizando princípios eletro-ópticos que consistem na entrada de ar em uma câmara de reação na qual a propriedade ótica do gás será medida diretamente ou uma reação química irá ocorrer, produzindo quimioluminescências ou luz fluorescente. Esse sinal de luz produz um sinal elétrico proporcional à concentração do poluente que está sendo medido. Porém, ressalta-se que dependendo do poluente, o analisador utiliza diferentes princípios eletro-ópticos, como quimioluminescência e raios infravermelhos não dispersivos. Esses analisadores possuem alto grau de precisão e permitem o armazenamento de uma grande quantidade de dados em um computador, após serem processados.

Além dos analisadores automáticos, destaca-se o uso de sensores remotos para o monitoramento da qualidade do ar. Lisboa (2008) destaca que os sensores remotos fornecem informações sobre as concentrações de poluentes em pontos mais distantes do equipamento, por meio de técnicas de eletroscopia, em que os dados são obtidos por integração, ao longo de um caminho óptico, de uma fonte de luz e de um receptor. Esse equipamento trabalha na faixa do ultravioleta e próximo do infravermelho. Os sensores remotos

são muito utilizados para medir a emissão de hidrocarbonetos e de monóxido de carbono dos veículos automotores, contudo, sem a necessidade de conectar o aparelho ao veículo. O sensor fica montado em um furgão estacionado e, a partir da emissão de um feixe de infravermelho ao longo de uma faixa de tráfego, consegue medir a concentração do poluente antes e depois da passagem do veículo, o que permite o cálculo da emissão devido à combustão. Quanto mais infravermelho a descarga de um veículo absorve, maior a emissão de poluentes. Os resultados são mostrados a partir de sinais de neon, e as placas dos veículos são registradas para que medidas legais sejam tomadas contra os maiores poluidores. Esse tipo de amostrador é utilizado pelo Programa de Inspeção e Manutenção Veicular (I/M) que discutimos na Unidade 2.

Lisboa (2008) destaca ainda que existem equipamentos mais sofisticados baseados em laser (LIDAR), utilizados especificamente para o monitoramento de emissões próximas às fontes emissoras e para medidas de concentração vertical na atmosfera. O sistema LIDAR é baseado em um laser de safira e titânio que envia pulsações (luz) na atmosfera, que são difundidas através de partículas pequenas e pelas moléculas do ar. A fração da luz que é refletida é recebida por um telescópio e um detector sensível. Esse sistema permite, quase simultaneamente, medidas espaciais de compostos orgânicos voláteis e NO_2, que são precursores de ozônio troposférico.

Pesquise mais

Que tal aprofundar os seus conhecimentos sobre os amostradores de qualidade do ar de uma forma mais aplicada? O artigo disponível no link a seguir traz os métodos de monitoramento da qualidade do ar utilizados em um ambiente hospitalar.

QUADROS, Marina Eller et al. Qualidade do ar interno em ambientes hospitalares. **Revista Tecnologia**, Fortaleza, v. 30, n. 1, p. 38-52, jun. 2009. Disponível em: <http://periodicos.unifor.br/tec/article/view/5275/4125>. Acesso em: 2 ago. 2017.

Além dos métodos e amostradores discutidos até agora, existem muitos analisadores para monitoramento das emissões de fontes fixas. Estes analisadores são divididos em analisadores de opacidade e analisadores de emissões gasosas.

Os analisadores de opacidade consistem na projeção de um

feixe de luz com características definidas através do efluente gasoso. Durante esse processo, o feixe de luz é atenuado devido à interação desta com a matéria, ocorrendo absorção com dispersão do particulado, e a porcentagem que foi atenuada é definida como a opacidade do particulado. Esses analisadores são muito utilizados em caldeiras a óleo, fornos e outros equipamentos de combustão na siderurgia, metalurgia e petroquímica.

Já os analisadores de emissões gasosas podem ser por meio de sistemas extrativos, sistemas *in situ* e sistemas remotos. Dos sistemas extrativos extraem-se determinadas substâncias que serão encaminhadas, sob condições constantes, para um módulo de analisador. Nos sistemas *in situ*, o gás é analisado na chaminé, sem nenhuma extração ou modificação do fluxo gasoso, por técnicas de espectrometria. E os sistemas remotos, que, como já vimos, utilizam laser para medição de poluentes atmosféricos.

Além de todos esses métodos e amostradores para o monitoramento da qualidade do ar, pela análise quantitativa e qualitativa, não podemos deixar de abordar o biomonitoramento, já que muitos seres vivos, sobretudo os vegetais, são sensíveis a determinados tipos de poluentes, sendo considerados bioindicadores da qualidade do ar. Além disso, o biomonitoramento é indispensável na complementação dos resultados, pois revela os efeitos causados pelos poluentes na biota. Logo, ressalta-se que o biomonitoramento é uma técnica complementar às técnicas quantitativas de monitoramento.

Klumpp (2001) relata que a biota, sobretudo os vegetais superiores, reagem ao estresse provocado por poluentes atmosféricos de duas formas: (1) acumulando poluentes em seus tecidos, sendo considerados resistentes e chamados de "bioindicadores de acumulação" e (2) sofrendo modificações morfológicas, fisiológicas, genéticas e etológicas, sendo, portanto, sensíveis e chamados de "bioindicadores de reação". Além disso, podem ser utilizadas técnicas visuais na verificação da frequência e abundância das espécies sensíveis expostas aos poluentes atmosféricos. O uso de bioindicadores pode ser realizado por método passivo, ou seja, quando se utilizam plantas que já habitam a área de estudo, ou por método ativo, quando se introduz de forma controlada uma determinada planta no local a ser estudado. Existem diversos organismos bioindicadores, porém, para o biomonitoramento da

qualidade do ar, iremos abordar organismos que com certeza você já viu, como os líquens, os musgos e as plantas superiores, em especial a espécie *Tradescantia pallida purpurea*.

Com certeza você já deve ter visto líquens (Figura 3.1), "manchas" verdes nas cascas das árvores. Os líquens são organismos formados pela associação simbiótica entre um fungo e uma alga ou cianobactéria. Esses organismos são altamente sensíveis a poluentes e perdem a sua vitalidade quando expostos a eles, uma vez que os poluentes são absorvidos pelos fungos e chegam até a alga ou cianobactéria, impedindo a fotossíntese. Portanto, o biomonitoramento por líquens consiste na análise das alterações na sua estrutura, como frequência, cobertura, diversidade e vitalidade.

Figura 3.1 | Líquens na casca de uma árvore

Fonte: <https://pixabay.com/p-315817/?no_redirect>. Acesso em: 8 ago. 2017.

Já os musgos (Figura 3.2), pertencentes à divisão Bryophyta, são plantas de pequeno porte e avasculares que ocorrem em todos os ecossistemas terrestres, e que você já deve ter visto também nas cascas das árvores. São amplamente utilizadas para o biomonitoramento devido à sua ampla distribuição, capacidade de sobreviver em ambiente poluídos, interação direta com o ambiente onde vivem e pela sua capacidade de bioacumulação.

Figura 3.2 | Musgos na casca de uma árvore

Fonte: <https://pixabay.com/p-177821/?no_redirect>. Acesso em: 8 ago. 2017.

A *Tradescantia pallida purpurea* (Figura 3.3) é uma planta de fácil identificação devido à sua coloração roxa, também muito utilizada para biomonitoramento por apresentar fácil adaptação em qualquer ambiente, e possui tamanho pequeno, podendo se desenvolver durante todo o ano. Além disso, praticamente todas as partes dessa planta podem ser utilizadas para bioensaios de mutagênese para a detecção e monitoramento da poluição ambiental: flores, pétalas, pelos estaminais, raiz, micrósporos, tubo polínico e material genético.

Figura 3.3 | *Tradescantia pallida purpurea*

Fonte: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/dc/Tradescantia_pallida_Purpurea1.jpg>. Acesso em: 2 ago. 2017.

Exemplificando

Na cidade de São Paulo, alguns pesquisadores, ao estudarem a qualidade do ar, observaram que o tabaco apresenta manchas amarelas na presença de ozônio que, quando presente na baixa atmosfera, é muito prejudicial à saúde humana. Além disso, os pesquisadores descobriram que o ozônio não está concentrado em lugares com muitos carros, mas sim em lugares afastados, como o Parque do Ibirapuera, porque o ozônio é subproduto dos poluentes.

SUPER INTERESSANTE. **Biomonitoramento do ar, o alerta das plantas**. 2016. Disponível em: <http://super.abril.com.br/ciencia/biomonitoramento-do-ar-o-alerta-das-plantas/>. Acesso em: 2 ago. 2017.

Caro aluno, chegamos ao final da primeira seção da Unidade 3. Agora, é importante que você busque, por meio de artigos científicos, a aplicação de cada um desses métodos, utilizados separadamente ou em associação. Essa pesquisa irá auxiliá-lo a elaborar a primeira entrega da Unidade 3, de forma mais específica e coerente com o que foi solicitado. Além disso, não deixe de buscar imagens e vídeos sobre os métodos para compreender melhor o princípio de funcionamento de cada um. Bons estudos!

Sem medo de errar

A poluição do ar é um problema que vem preocupando todo o mundo, devido aos malefícios provocados à saúde humana. Segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS), a poluição do ar já é a principal causa de mortes no mundo. Diante disso, é imprescindível que a qualidade do ar seja monitorada, para que, sejam tomadas medidas e atitudes para o controle e redução das emissões atmosféricas, sobretudo nos centros urbanos. Agora, imagine a seguinte situação: você é um profissional da área ambiental, recém-contratado por uma das filiais de uma indústria do ramo de petróleo e gás, que acaba de ser implantada em um município paulista. Na sua filial, você será responsável pelo monitoramento das emissões atmosféricas e, por isso, deverá elaborar o plano de monitoramento e controle da poluição do ar na unidade de refinaria do petróleo. Para elaborar a primeira parte do plano de monitoramento, você deverá fazer uma consulta sobre os tipos de amostradores que existem e a aplicabilidade de cada um deles. Para auxiliar na elaboração desta primeira etapa, responda às seguintes perguntas: como realizar a amostragem de poluentes

atmosféricos provenientes de uma refinaria de petróleo? Quais os principais amostradores/analisadores para essa unidade industrial? O que são sensores remotos? De que forma eles podem auxiliar no monitoramento da qualidade do ar na refinaria em que você trabalha?

Primeiramente, é necessário realizar uma pesquisa sobre os processos industriais de uma refinaria de petróleo e os principais poluentes atmosféricos provenientes dessa atividade industrial. Os processos de refino do petróleo são constituídos por fornos e caldeiras que queimam gás de refinaria, as unidades de craqueamento catalítico, as unidades de recuperação de enxofre e os conversores de amônia a nitrogênio. Todas essas unidades emitem poluentes atmosféricos, sendo os principais: material particulado, NO_x e SO_x, além de uma variedade de hidrocarbonetos. Nas indústrias de refinaria de petróleo, os principais equipamentos antipoluição para o controle desses poluentes são ciclones, filtros de manga, precipitadores eletrostáticos e lavadores de gases, estudados na Unidade 2. Porém, mesmo dispondo de equipamentos antipoluição, a refinaria deve realizar o monitoramento da qualidade do ar no seu entorno e até mesmo próximo à fonte emissora. Para o monitoramento na fonte emissora, como se trata de uma fonte fixa, indicam-se os analisadores de opacidade para determinação do material particulado e os analisadores de emissões gasosas, em especial, o sistema *in situ* para análise do gás na chaminé, por meio de espectrometria. Além disso, ressalta-se que os métodos de amostragem para os principais poluentes provenientes da refinaria de petróleo são determinados pela Resolução Conama n. 03/1990, sendo que, para o material particulado, utilizam-se os métodos de amostrador de grande volume, para o SO_x, utiliza-se o método de pararonasilina, e para o NO_x, o método de quimioluminescência. É importante frisar que podem ser utilizados métodos equivalentes de medição de poluentes, porém, é preciso tomar cuidado para que os resultados não sejam contestados devido à utilização de um método incorreto. Para isso, antes da aplicação de um método equivalente, é necessário verificar se este é aprovado pelo Ibama. Podemos ainda realizar o monitoramento da qualidade do ar nessa refinaria a partir de sensores remotos, como o LIDAR.

O LIDAR é um sistema a laser, utilizado especificamente para o monitoramento de emissões próximas às fontes emissoras e para medidas de concentração vertical na atmosfera, baseado em um

laser de safira e titânio que envia pulsações (luz) para a atmosfera, que são difundidas através de partículas pequenas e pelas moléculas do ar. A fração da luz que é refletida e recebida por um telescópio e um detector sensível. Esse sistema permite, quase simultaneamente, medidas espaciais de compostos orgânicos voláteis e NO_2, que são precursores de ozônio troposférico na baixa atmosfera, prejudicial à saúde humana. Portanto, observa-se que não se deve utilizar apenas um método de amostragem e apenas um método de monitoramento, os métodos e tecnologias devem ser utilizados em conjunto, garantindo assim um controle maior das emissões atmosféricas.

Lembre-se de que para elaborar essa primeira entrega do plano de monitoramento, referente aos amostradores, é preciso que você já conheça as características atmosféricas e meteorológicas (amplamente discutidas nas Unidades 1 e 2) da região onde está instalada a unidade de refinaria do petróleo. Além disso, associado a esses métodos de amostragem e monitoramento, você pode optar por realizar, de forma conjunta, o biomonitoramento por meio de vegetais, como, líquens, musgos e a *Tradescantia pallida purpúrea*.

Avançando na prática

Programa de Inspeção e Manutenção Veicular (I/M)

Descrição da situação-problema

Na cidade de São Paulo, o último relatório de qualidade do ar divulgado pela Cetesb (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo) mostrou que os níveis de diversos poluentes atmosféricos foram menores em 2016 do que em 2015. Essa redução reflete o sucesso do PROCONVE (Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores) e do Programa de Inspeção e Manutenção de Veículos em Uso (I/M). Considerando os dados apresentados, suponha que você seja um analista ambiental da Cetesb: de que forma você realizaria as medições de poluentes atmosféricos por veículos automotores nas vias de São Paulo?

Resolução da situação-problema

Na Cetesb, as medições de poluentes atmosféricos emitidos por veículos automotores, nas vias de São Paulo, são realizadas por meio do uso de sensores remotos, que não exigem a conexão do aparelho ao veículo. Esses sensores fornecem informações

sobre as concentrações de poluentes em pontos mais distantes do equipamento, por meio de técnicas de eletroscopia, em que os dados são obtidos por integração, ao longo de um caminho óptico, de uma fonte de luz e de um receptor. O sensor fica montado em um furgão estacionado e, a partir da emissão de um feixe de infravermelho ao longo de uma faixa de tráfego, é possível medir a concentração do poluente antes e depois da passagem do veículo, o que permite o cálculo da emissão devido à combustão. Quanto mais infravermelho a descarga de um veículo absorve, maior a emissão de poluentes. Os resultados são mostrados a partir de sinais de neon e as placas dos veículos são registradas, para que possamos tomar as medidas legais contra os maiores poluidores. Esse tipo de amostrador é utilizado pelo Programa de Inspeção e Manutenção Veicular (I/M).

Faça valer a pena

1. Nos amostradores _____, um certo volume de ar é sugado por _____ e passa através de um coletor químico ou físico por 24 horas. Em seguida, a coleta é realizada por adsorção, absorção, filtração, reação ou por uma combinação de dois ou mais destes processos.
Os termos que preenchem corretamente as lacunas no texto sobre um tipo de amostrador são:

a) ativos; uma bomba.
b) ativos; difusão.
c) passivo; uma bomba.
d) passivo; difusão.
e) automáticos; difusão.

2. No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas, por meio da NBR 13157/1994, determina a concentração de monóxido de carbono por um método que se baseia na medição da absorção da luz que ocorre durante a passagem da luz através da corrente de gases, utilizando uma fonte emissora e um detector.
O método descrito no texto e padronizado pela NBR 13157/1994, é chamado de:

a) Método da quimioluminescência.
b) Método da refletância.
c) Método do infravermelho não dispersivo.
d) Método de pararosanilina.
e) Método equivalente.

3. A Resolução Conama n. 418/2009, dispõe sobre os critérios para a implantação do Programa de Inspeção e Manutenção Veicular (I/M). Esse programa tem como objetivo desestimular a adulteração dos dispositivos de controle de emissões, contribuindo para a melhoria da qualidade do ar e para a economia de combustível. Além disso, o programa realiza o monitoramento das emissões atmosféricas de origem veicular a partir de medições dos poluentes emitidos pelos veículos.
O amostrador utilizado pelo Programa de Inspeção e Manutenção Veicular (I/M) é o:

a) Amostrador passivo.
b) Amostrador ativo.
c) LIDAR
d) Sensor remoto.
e) Analisador automático.

Seção 3.2

Modelos de transporte atmosférico

Diálogo aberto

Caro aluno,

Estudamos nas seções anteriores fundamentos importantes sobre as principais fontes emissoras de poluentes atmosféricos, bem como os sistemas de monitoramento e os equipamentos antipoluição. Porém, para que a gestão das emissões atmosféricas seja eficaz e garanta uma boa qualidade do ar, é necessário conhecermos o estado do ambiente e como este influencia na dispersão de poluentes na atmosfera. Estudamos na Unidade 1 que os processos e características atmosféricas que governam e favorecem a dispersão de poluentes são numerosos e complexos. Por isso, para descrevê-los e interpretá-los, é necessário utilizar modelos matemáticos de transporte atmosférico. A modelagem matemática possibilita, por exemplo, identificar a melhor área para instalação de equipamentos de amostragem e verificar o comportamento e a concentração de uma pluma de dispersão.

Neste contexto, imagine a seguinte situação: você é um profissional da área ambiental recém-contratado por uma das filiais de uma indústria do ramo de petróleo e gás, que acaba de ser implantada em um município paulista. Na sua filial, você será responsável pelo monitoramento das emissões atmosféricas e, por isso, deverá elaborar o plano de monitoramento e controle da poluição do ar na unidade de refinaria do petróleo. O plano será elaborado em três partes, sendo elas: (1) a amostragem dos poluentes, (2) os modelos de transporte atmosférico e (3) os sistemas de tratamento de poluentes atmosféricos. Agora que você já levantou os amostradores de poluentes atmosféricos e suas funcionalidades, deverá elaborar a segunda parte do plano de monitoramento, que consiste em descrever os principais modelos de transporte atmosférico. Para isso, responda às seguintes perguntas norteadoras: o que são modelos de transporte atmosférico? Quais os modelos que governam o transporte e a difusão de poluentes após lançados na atmosfera? Qual o modelo a ser adotado considerando as características meteorológicas da atmosfera local e que a refinaria de petróleo está implantada em um vale?

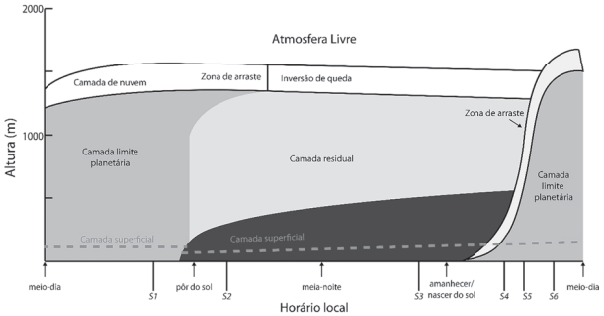
Lembre-se de pesquisar os principais poluentes atmosféricos emitidos por uma refinaria de petróleo e também as características atmosféricas do local de instalação da unidade de refinaria de petróleo. Considere que a refinaria está implantada em Cubatão (SP) para pensá-la como ambiente de estudo e, assim, buscar informações sobre as características atmosféricas. Para isso, você pode utilizar os sites do INPE e do INMET que já conhecemosna Unidade 2.

Não pode faltar

A gestão das emissões atmosféricas é um processo complexo e requer sobretudo o conhecimento do estado do ambiente. Estudamos nas unidades anteriores alguns pontos relevantes para a coleta de dados e formulação de um inventário das fontes de emissão, fundamentais para a quantificação da poluição do ar. Porém, o controle da qualidade do ar deve envolver, além de dados quantitativos, a interpretação destes dados, com instrumentos capazes de ligar a causa (fonte) de poluição com o efeito (concentração do poluente). Esses instrumentos são os modelos matemáticos que permitem descrever os processos atmosféricos que governam o transporte e a difusão de poluentes. Porém, antes de iniciarmos os nossos estudos sobre os modelos matemáticos de transporte e difusão de poluentes, vamos relembrar alguns fundamentos importantes sobre a dinâmica da atmosfera, sobretudo referentes à camada limite planetária (CLP).

A troposfera é a camada atmosférica mais próxima da superfície terrestre, com cerca de 11 quilômetros, onde a temperatura decresce com a altitude. Apesar de atingir até 11 quilômetros de altitude, apenas os primeiros quilômetros são diretamente influenciados pela presença da superfície terrestre, sendo que esses primeiros quilômetros recebem o nome de camada limite planetária (CLP), conforme pode ser observado na Figura 3.4. Acima dessa CLP se encontra a atmosfera livre, que sofre pequena variação diária de temperatura e o fluxo de ar, caracterizado como não turbulento. A altura da CLP é variável, sendo mais rasa durante a noite. Porém, ao longo do dia, a CLP pode atingir alguns quilômetros, dependendo da combinação do aquecimento da superfície pela incidência solar (forçante térmico) com o cisalhamento do vento (forçante mecânico).

Figura 3.4 | Regiões da Camada Limite Planetária (CLP)



Fonte: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/f/f1/Atmospheric_boundary_layer.svg/1280px-Atmospheric_boundary_layer.svg.png>. Acesso em: 2 ago. 2017.

O cisalhamento do vento é responsável pela grande variação vertical na velocidade do vento nos primeiros metros acima da superfície. Quando combinados, os forçantes geram processos de transporte de quantidades como umidade, calor e massa dentro da CLP, afetando as características desta. Um desses processos é chamado de "advecção", que é a transmissão de calor pelo deslocamento de massa atmosférica no sentido horizontal. Outro processo, e mais importante para o nosso estudo em questão, é o fluxo turbulento, caracterizado pelo movimento caótico dos poluentes e das massas de ar. A física da turbulência na CLP ainda não é totalmente compreendida, mas deve-se considerá-la nos estudos, uma vez que a turbulência está associada ao transporte de poluentes.

Relembrando o que estudamos na Seção 3 da Unidade 1, a estabilidade atmosférica é determinada pela temperatura de uma parcela de ar, uma vez que uma parcela de ar fria é mais densa, logo esta tende a retornar à sua posição inicial (estável), pois resiste ao movimento de ascensão (movimento convectivo). Vale ressaltar que o movimento de ascensão por convecção pode ser afetado por barreiras físicas, como as montanhas, gerando turbulência na parcela de ar. Tanto os movimentos convectivos quanto as turbulências são aumentadas quando o ar é instável, logo os poluentes atmosféricos são melhores misturados ao ar limpo quando há instabilidade. Quando o ar está estável, como não há comunicação da parcela de ar com o ar externo, a parcela de ar inibe os movimentos convectivos e a turbulência, logo, não há mistura dos poluentes com o ar limpo, dificultando a dispersão de poluentes.

Assimile

Uma atmosfera estável é caracterizada por uma temperatura menor na superfície terrestre em comparação à camada atmosférica acima dela. Já uma atmosfera instável é caracterizada por uma temperatura maior da superfície terrestre em comparação à camada atmosférica acima dela.

Os transportes turbulentos, influenciados pela diferença de temperatura entre a atmosfera e a superfície, bem como os ventos, definem três regiões temporais distintas da CLP (Figura 3.4), sendo elas: (1) camada limite convectiva (CLC), formada ao amanhecer e de forte instabilidade, uma vez que a superfície terrestre aquece primeiro que o ar; (2) camada residual (CR), que ocorre em torno de meia hora antes do pôr do Sol, com diminuição considerável da turbulência, e (3) camada limite estável ou camada limite noturna (CLE), caracterizada pelo resfriamento da superfície durante a noite até o momento em que a superfície atinge temperatura menor do que a do ar que está em contato com ela. Logo, na CLE a turbulência é mínima e gerada pelo cisalhamento do vento. Além disso, na CLE o ar se torna estável, ou seja, nesta camada a capacidade de dispersão de poluentes é baixa.

Agora que já retomamos alguns fundamentos importantes sobre a dinâmica da atmosfera, podemos iniciar os nossos estudos sobre os modelos matemáticos de dispersão de poluentes. A partir do que foi discutido até o momento, podemos inferir que a dispersão de poluentes na CLP ocorre devido a dois fatores: o vento médio e a turbulência. O vento médio determina o transporte horizontal dos poluentes e a turbulência é a responsável pela capacidade de dispersão atmosférica. A capacidade de dispersão é diretamente relacionada às circulações convectivas, chamadas de "termas". As termas são constituídas por regiões onde o fluxo de ar quente ascende, chamadas de *updrafts*, e por regiões onde o fluxo de ar descende, chamadas de *downdrafts*.

Na CLP, as termas originam a pluma do tipo looping (estudadas na Unidade 2), uma vez que a velocidade vertical nas regiões *updrafts* é maior do que nas regiões *downdrafts*, gerando assim uma distribuição assimétrica na CLP. Quando os poluentes são emitidos na CLE, que é estável, a dispersão de poluentes é mais efetiva na direção horizontal e raramente atinge a superfície durante

à noite devido à fraca turbulência existente nessa camada. Porém, os poluentes são misturados e poderão atingir a superfície quando uma nova CLC se formar. Quando a pluma se forma em uma CR, a dispersão ocorre na mesma proporção tanto na direção vertical quanto na horizontal. Isso ocorre porque existe uma condição de estabilidade entre a CLE e a CR, logo a pluma é impedida de se misturar com a CLE, persistindo até a manhã seguinte.

Agora que já relembramos fundamentos importantes sobre a dinâmica e estrutura da atmosfera, daremos início aos estudos dos principais modelos matemáticos utilizados na gestão das emissões atmosféricas, que são: (1) modelos Eulerianos, (2) modelos Lagrangeano, (3) modelos Gaussianos e (4) modelos analíticos.

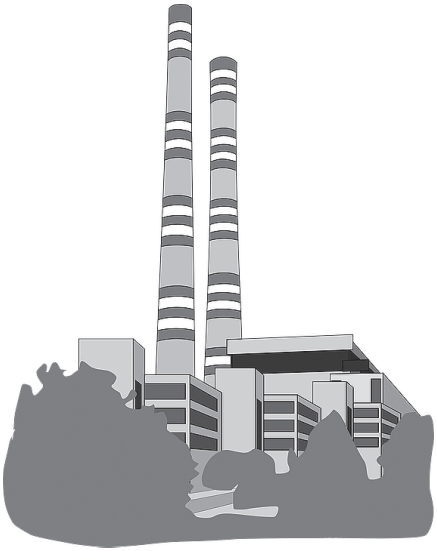
A emissão de um determinado poluente e a sua concentração em um determinado ponto receptor específico depende das condições meteorológicas e da relação espacial entre a fonte emissora e o ponto receptor. Portanto, todos os modelos matemáticos devem ser abastecidos com dados meteorológicos, da fonte emissora e do ponto receptor.

Os modelos Eulerianos consideram o movimento dos poluentes relacionado a um sistema de referência fixo no espaço, sendo muito utilizados para simular a concentração superficial de contaminantes da baixa atmosfera. Esses modelos são os mais adaptados para o estudo da dispersão de poluentes sobre topografia complexa e quando o poluente é reativo. Trata-se de um modelo determinístico, ou seja, eles predizem a concentração de um determinado poluente em um volume específico, a partir da resolução de uma equação diferencial para a conservação da massa do poluente.

Porém, esses modelos requerem parametrização para esses coeficientes de difusão, sendo uma dificuldade à sua aplicabilidade nos estudos de dispersão atmosférica.

Já os modelos Lagrangeanos utilizam um sistema de referência que segue a trajetória do vento na atmosfera. Esses modelos acompanham a nuvem de poluentes, do tipo "puff". A dispersão do tipo "puff" considera que cada nuvem emitida em um determinado instante libera uma quantidade de massa, ou seja, possui uma concentração média de poluente de cada "puff", sendo essa emissão de forma descontínua, conforme Figura 3.5.

Figura 3.5 | Dispersão atmosférica do tipo "puff"



Fonte: <https://pixabay.com/p-156675/?no_redirect>. Acesso em: 2 ago. 2017.

Além disso, os modelos Lagrangeanos representam o movimento de um conjunto de partículas que seguem passivamente o escoamento turbulento, a partir de trajetórias aleatórias. Com isso, as velocidades dessas partículas ficam sujeitas a um forçante, podendo ser descritas apenas por probabilidade. Como as partículas possuem trajetórias aleatórias e diferentes entre si, adota-se como o campo de concentração de um poluente a média do conjunto de partículas. Para abastecer esses modelos, adota-se que as partículas são fictícias (computacionais) e o campo de concentração é obtido a partir da distribuição espacial das partículas em um determinado intervalo de tempo.

Os modelos Gaussianos são amplamente empregados por órgãos públicos para estudar a dispersão de poluentes na atmosfera, pela simplicidade de sua fórmula. Partem do pressuposto que a turbulência é homogênea e estacionária (mas também são utilizados para dispersão do tipo "puff"), que o fluxo de emissão é constante, que o contaminante é quimicamente estável e que a topografia é constante. Além disso, consideram que o vento e o coeficiente de difusão turbulenta são constantes com a altura. São muito utilizados para tratamento da dispersão atmosférica proveniente de indústrias como refinarias e termelétricas.

Pesquise mais

É importante que você busque informações complementares sobre a aplicação de cada um desses modelos, bem como artigos que abordem a resolução das equações deles, como os materiais disponíveis nos links a seguir.

LOPES, Marta. **Modelação de poluição atmosférica**. 2017. Disponível em: <http://www.esac.pt/Abelho/ASA/Exercicio3.pdf>. Acesso em: 2 ago. 2017.

PAPA, Bruno del; GORDON, Ana Maria Pinho. Aplicação do modelo gaussiano de dispersão atmosférica. In: SEMINÁRIO ANUAL PROBIC, 8., 2011, São Paulo. **Resumos**...: PROBIC, 2011. p. 112-113. Disponível em: <http://pelicano.ipen.br/pibic/cd-virtual/2011%20-%20LAVOISIER/pdf/ipen_05_resumo.pdf>. Acesso em: 2 ago. 2017.

Os modelos analíticos podem ser considerados intermediários entre o modelo Euleriano e o modelo Gaussiano, pois o campo de concentração é descrito através de uma fórmula simples, porém permitem considerar situações em que o vento e o coeficiente de difusão turbulento variam com a altura.

Pesquise mais

Para compreender melhor a aplicação dos modelos analíticos, sugerimos a leitura do arquivo *Modelos analíticos de dispersão de poluentes atmosféricos*, disponível no link a seguir.

SOUZA, Mario Luiz Previatti de. **Modelos analíticos de dispersão de poluentes atmosféricos.** 2012. 36 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Matemática e Computação Científica) – Centro de Ciências Físicas e Matemáticas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/105453/Mario%20Luiz%20Previatti%20de%20Souza.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 2 ago. 2017.

Além dos modelos descritos até o momento, Mercer et al. (1998) classificam os modelos de dispersão atmosférica em quatro categorias, sendo elas: (1) modelos empíricos ou fenomenológicos; (2) modelos intermediários ou integrais; (3) modelos com aproximação de água rasa bidimensionais (*shallow layer*) e (4) modelos de fluidodinâmica computacional (CFD).

Exemplificando

O modelo CFD tem sido muito utilizado para avaliar o impacto da combustão da biomassa na qualidade do ar urbano, sobretudo referente às partículas inaláveis.

Os modelos empíricos são os mais simples para determinar a evolução de uma nuvem de poluentes considerando a distância e o tempo, através de correlações empíricas sobre as propriedades macroscópicas da nuvem de poluentes. Dentre esses modelos destaca-se o de Britter e McQuaid (1998), que desconsidera algumas complicações, como aquelas relacionadas ao local da fonte emissora, ao terreno, considerando apenas a quantidade de partículas liberadas (vazão volumétrica), a diferença entre a densidade do material e do ambiente, a velocidade medida do vento e a relação entre a altura e o diâmetro da nuvem de poluentes. São muito utilizados em áreas rurais e para estimar emissões instantâneas e contínuas.

Já os modelos integrais se baseiam na conservação de massa, energia e momento, considerando apenas a direção do vento. Dessa forma, é possível fazer estimativas rápidas sobre a evolução da nuvem de poluentes. Além disso, esses modelos partem do pressuposto da entrada de ar na nuvem e como esse processo é modelado ao longo da evolução da dispersão na atmosfera. Porém, determinar a entrada de ar na nuvem é um processo complexo e que gera diferenças entre os modelos integrais. A principal vantagem desses modelos é a rápida execução dos programas, permitindo a execução de vários cenários em curto espaço de tempo. Por isso, hoje são mais utilizados para descrição prévia de um acidente, e não de um acidente já ocorrido.

Pesquise mais

Dentro dos modelos integrais, existem ainda classes de modelos: *box models*, modelos de plumas, modelos de jatos, modelos de águas rasas unidimensionais. Para conhecer cada um deles, acesse o material disponível no link a seguir.

SALAZAR, Márcio Piovezan. **Estudo sobre a modelagem da dispersão atmosférica de gases densos decorrente de liberações acidentais em análise quantitativa de risco**. 2016. 111 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2016. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3135/tde-25082016-084227/pt-br.php>. Acesso em: 2 ago. 2017.

Os modelos com aproximação de águas rasas se baseiam na corrente de densidade. Essa corrente é um fenômeno que se

forma quando se tem dois fluidos de densidades diferentes, onde o mais pesado tende a fluir sob o mais leve. Nesses modelos, são adotadas correlações empíricas para a determinação das taxas de entrada de ar na nuvem, assim como nos integrais. Porém, é considerado um meio termo entre os modelos integrais e os modelos de fluidodinâmica computacional (CFD), sendo adequados para avaliar o efeito de terrenos complexos (depressões e terrenos montanhosos), visto que as forças de empuxo podem ser incluídas. A principal desvantagem desses modelos está relacionada a uma necessidade de uma capacidade computacional maior em relação aos outros modelos.

Por fim, os modelos de fluidodinâmica computacional buscam corrigir as falhas dos modelos integrais, que não consideram questões referentes à presença de obstáculos no campo, a partir dos códigos de mecânica dos fluídos, incluindo assim os chamados "efeitos do terreno" (vales, ambientes urbanos). Esses modelos são considerados como os que realizam uma descrição mais completa dos fenômenos envolvidos no processo de dispersão de poluentes, pois se fundamentam na resolução simultânea das equações diferenciais parciais que descrevem a conservação de massa, momento e energia. Porém, tais modelos também requerem uma maior capacidade computacional e há necessidade de validar os códigos para que sejam eficazes na modelagem. Esses modelos são muito utilizados na análise de riscos em processos industriais.

Reflita

Será que a utilização de apenas um dos tipos de modelos matemáticos de dispersão de poluentes na atmosfera é suficiente para estimar a dispersão de uma nuvem de poluentes?

Antes de finalizarmos os estudos referentes a esta seção, é preciso pontuar que existe uma norma técnica da Cetesb, a Norma Técnica P4.261/2011, intitulada como *Risco de acidente de origem tecnológica - método para decisão e termos de referência*, que aborda as condições meteorológicas a serem consideradas para modelos de transporte atmosféricos, sendo eles: temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento, direção do vento e classe de estabilidade (Pasquill-Gifford).

Pesquise mais

Você pode conhecer mais sobre as condições meteorológicas dispostas na Norma Técnica P4. 261/11, a partir da sua leitura.

NORMA TÉCNICA P4. 261/11. **Risco de Acidente de Origem Tecnológica - Método para decisão e termos de referência**. 2011. Disponível em: <http://datageo.ambiente.sp.gov.br/datageofiles/Legislacao/Normas/P4261-revisada.pdf>. Acesso em: 2 ago. 2017.

Além disso, sugerimos a leitura do artigo a seguir para melhor compreensão da classe de estabilidade.

OLIVEIRA JÚNIOR, José Francisco de; PIMENTEL, Luiz Cláudio Gomes; LANDAU, Luiz. Critérios de estabilidade atmosférica para a região da central nuclear Almirante Álvaro Alberto, Angra dos Reis – RJ. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 25, n. 2, p. 270-285, 2010. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbmet/v25n2/a11v25n2.pdf>. Acesso em: 2 ago. 2017

Caro aluno, ao longo desta seção você pôde perceber que existem diversos tipos de modelos matemáticos para avaliar a dispersão de poluentes na atmosfera e que tais modelos apresentam limitações. Por isso, cabe a você estudar em leituras complementares cada um desses modelos, as equações diferenciais utilizadas por cada modelo, as variáveis envolvidas em cada uma dessas equações, bem como a aplicabilidade de cada um deles. O seu compromisso com os estudos, além do que foi abordado nesta seção, resultará em uma melhor compressão do conteúdo e, consequentemente, será de suma importância para a entrega da segunda parte do seu produto, que consiste em descrever os principais modelos de transporte atmosférico, considerando as condições meteorológicas e de relevo complexo. Bons estudos! Até breve!

Sem medo de errar

Os problemas ambientais relacionados à poluição do ar não podem ser quantificados e solucionados a partir apenas de medições e utilização de equipamentos antipoluição. É preciso prever e estimar a concentração dos poluentes atmosféricos após suas emissões, considerando a interferência dos fatores meteorológicos e das características do terreno. Porém, é impossível estimar a concentração de poluentes após suas emissões de forma manual, devido à quantidade de variáveis envolvidas na dispersão de poluentes. Diante disso, utiliza-

se a modelagem matemática, a partir de equações diferenciais, para propor cenários futuros sobre a dispersão de poluentes na atmosfera e, assim, definir medidas e alternativas para gestão dessas emissões. Agora, imagine a seguinte situação: você é um profissional da área ambiental recém-contratado por uma das filiais de uma indústria do ramo de petróleo e gás, que acaba de ser implantada em um município paulista. Na sua filial, você será responsável pelo monitoramento das emissões atmosféricas e, por isso, deverá elaborar o plano de monitoramento e controle da poluição do ar na unidade de refinaria do petróleo. O plano será elaborado em três partes, sendo elas: (1) a amostragem dos poluentes, (2) os modelos de transporte atmosférico e (3) os sistemas de tratamento de poluentes atmosféricos. Agora que você já levantou os amostradores de poluentes atmosféricos e suas funcionalidades, você deverá elaborar a segunda parte do plano de monitoramento, que consiste em descrever os principais modelos de transporte atmosférico. Para isso, responda às seguintes perguntas norteadoras: o que são modelos de transporte atmosférico? Quais os modelos que governam o transporte e a difusão de poluentes após lançados na atmosfera? Qual o modelo a ser adotado considerando as características meteorológicas da atmosfera local e que a refinaria de petróleo está implantada em uma região de vale?

A gestão das emissões atmosféricas é um processo complexo e requer sobretudo o conhecimento do estado do ambiente. Porém, o controle da qualidade do ar deve envolver, além de dados quantitativos, a interpretação desses dados, com instrumentos capazes de ligar a causa (fonte) de poluição com o efeito (concentração do poluente). Esses instrumentos são os modelos matemáticos que permitem descrever os processos atmosféricos que governam o transporte e a difusão de poluentes. Os modelos de dispersão de poluentes podem ser divididos em modelos Eulerianos, mais adaptados para o estudo da dispersão de poluentes sobre topografia complexa e quando o poluente é reativo; Gaussianos, muito utilizados para tratamento da dispersão atmosférica proveniente de indústrias como refinarias e termelétricas, para todos os tipos de dispersão, tanto pluma quanto "puff"; e Lagrangeanos, mais adaptados para a dispersão do tipo "puff". Porém, recentemente surgiram modelos analíticos que são modelos intermediários entre o modelo Euleriano e o modelo Gaussiano, que, apesar da simplicidade, permitem considerar situações em que o vento e o coeficiente de difusão turbulento variam com a altura. Além desses modelos, Mercer et al. (1998) classificam os modelos de

dispersão atmosférica em quatro categorias, sendo elas: (1) modelos empíricos ou fenomenológicos; (2) modelos intermediários ou integrais; (3) modelos com aproximação de água rasa bidimensionais (*shallow layer*) e (4) modelos de fluidodinâmica computacional (CFD). No caso proposto nesta situação-problema, indica-se o uso de modelos do tipo Gaussianos, uma vez que são muito utilizados para tratamento da dispersão atmosférica proveniente de indústrias como refinarias e termelétricas, para todos os tipos de dispersão, tanto pluma quanto "puff". No entanto, outros modelos podem ser adotados, considerando a região de vale e, por isso, de terreno complexo, onde está instalada a refinaria. Nesse caso, podem ser adotados os modelos de fluidodinâmica computacional (CFD), que são adequados para avaliar o efeito de terrenos complexos, visto que as forças de empuxo podem ser incluídas. Porém, esses modelos necessitam de uma capacidade computacional maior em relação aos outros modelos. Logo, não é possível determinar com exatidão qual o melhor modelo, pois diversas variáveis estão envolvidas na escolha do modelo, desde os fatores meteorológicos da região, as características do terreno, os tipos de poluentes e, sobretudo, a capacidade computacional e técnica para utilizar tais modelos e interpretar os cenários e resultados apresentados. Os modelos Gaussianos e os CFD foram sugeridos aqui considerando poucas variáveis apresentadas na situação-problema, mas que servem como base para que você entenda como analisar caso a caso. Por isso, é importante que você aprofunde os estudos acerca dos modelos, a fim de identificar com exatidão os modelos mais adequados para a situação que estiver analisando.

Avançando na prática

Os modelos de transporte atmosférico como análise de risco

Descrição da situação-problema

Toda atividade humana está intrinsicamente relacionada a um tipo de perigo, sobretudo quando nos referimos às atividades industriais. O avanço tecnológico e a rápida industrialização, principalmente após a Revolução Industrial, aumentaram de forma substancial o perigo ao qual estamos diariamente expostos, o que pode ser observado a partir do número de acidentes industriais e o número de fatalidades envolvidas. Porém, entre as metodologias desenvolvidas para prevenção e proteção contra os perigos industriais, destaca-se a análise quantitativa de riscos (AQR). Na estimativa de risco, é preciso considerar a formação

e a dispersão de poluentes atmosféricos, momento no qual devem ser empregados os modelos de transporte atmosférico. Nesse contexto, imagine a seguinte situação: você trabalha em uma fábrica de amônia que possui um tanque de armazenamento cilíndrico e horizontal com capacidade máxima de 20.000 quilos de amônia pressurizada. Agora, considere o seguinte cenário acidental: houve liberação de todo o inventário do tanque de armazenamento de amônia em 10 minutos, o que corresponde a uma taxa de 33,3 kg/s. Considerando os dados apresentados, quais as condições meteorológicas a serem aplicadas para a simulação de um modelo de transporte atmosférico? Qual modelo de transporte atmosférico você optaria por utilizar nesse caso, Euleriano, Gaussiano ou Lagrangeano? Por quê? Lembre-se de consultar a Norma Técnica P4.261/2011 da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (Cetesb).

Resolução da situação-problema

Segundo o Anexo O da Norma Técnica P4.261/2011 - Risco de acidente de origem tecnológica - método para decisão e termos de referência, devem-se considerar as seguintes condições meteorológicas para modelos de transporte atmosféricos: temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento, direção do vento e classe de estabilidade (Pasquill-Gifford). Para a temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento, deve-se considerar a média aritmética ponderada para os períodos diurno e noturno. Para a direção do vento, deve-se adotar pelo menos oito direções com suas respectivas frequências de ocorrência, indicando o sentido do vento. E para a classe de estabilidade (Pasquill-Gifford), deve-se escolher a classe que detém o maior número de observações para cada conjunto de dados dia e noite.

O modelo mais adequado para este caso seria o modelo Gaussiano, que é baseado em uma equação simples que descreve um campo de concentração tridimensional, gerado por uma fonte pontual (como nesse caso) sobre condições de emissão e meteorológicas estacionárias (conforme parametrizado pela Norma Técnica P4.261/11 da Cetesb). Além disso, o modelo Gaussiano é a abordagem mais aceita para explicar o comportamento da pluma em períodos de tempo relativamente pequenos (como nesse caso, que foi de 10 minutos), uma vez que afirma que a variação da concentração de poluentes ao nível do solo, à medida que se afasta da fonte emissora, pode ser expressa por uma curva gaussiana (distribuição normal).

Faça valer a pena

1. A _____ é a camada atmosférica mais próxima da superfície terrestre, com cerca de 11 quilômetros, onde a temperatura decresce com a altitude. Apesar de atingir até 11 quilômetros de altitude, apenas os primeiros quilômetros são diretamente influenciados pela presença da superfície terrestre, sendo que esses primeiros quilômetros recebem o nome de _____. Acima dela se encontra a _____ que sofre pequena variação diária de temperatura e o fluxo de ar caracterizado como não turbulento.
As lacunas no texto referente à atmosfera são corretamente preenchidas pelos termos:

a) troposfera; camada limite planetária; atmosfera livre.
b) camada limite planetária; atmosfera livre; troposfera.
c) atmosfera livre; troposfera; camada limite planetária.
d) atmosfera livre; camada residual; camada limite planetária.
e) troposfera; camada residual; camada limite planetária.

2. Dentre os modelos de dispersão de poluentes atmosféricos, existem os que são mais adaptados para o estudo da dispersão de poluentes sobre topografia complexa e quando o poluente é reativo. Trata-se de modelos determinísticos, ou seja, que predizem a concentração de um determinado poluente em um volume específico, a partir da resolução de uma equação diferencial para a conservação da massa do poluente.
A partir da descrição acima, é possível concluir que os modelos descritos são do tipo:

a) Integrais.
b) Eulerianos.
c) Gaussianos.
d) Analíticos.
e) Lagrangeanos.

3. Os modelos Gaussianos são amplamente empregados por órgãos públicos para estudar a dispersão de poluentes na atmosfera, pela simplicidade de sua aplicação. Considerando as características desses modelos, analise os itens a seguir:
I. - Partem do pressuposto de que a turbulência é homogênea e estacionária.
II. - Consideram o movimento dos poluentes relacionado a um sistema de referência fixo no espaço.
III. - Utilizam um sistema de referência que segue a trajetória do vento na atmosfera.

Considerando as características dos modelos Gaussianos, pode-se afirmar que:

a) Apenas a afirmativa II está correta.
b) Apenas a afirmativa III está correta.
c) Apenas a afirmativa I está correta.
d) Apenas as afirmativas I e III estão corretas.
e) As afirmativas I, II e III estão corretas.

Seção 3.3

Sistemas de tratamento de poluentes atmosféricos

Diálogo aberto

Caro aluno,

Excluindo os problemas relativos ao aquecimento global e à depleção de ozônio estratosférico, vimos que os demais problemas da poluição atmosférica ocorrem na troposfera e, por isso, podem provocar efeitos adversos no meio ambiente e trazer prejuízos à saúde humana. Discutimos até aqui as principais fontes de poluição, os principais poluentes, os equipamentos antipoluição e, também, sobre os processos de dispersão e transporte de poluentes. Agora que chegamos ao final da Unidade 3, discutiremos, nesta seção, as tecnologias de tratamento de ar nas indústrias, os equipamentos antipoluição para fontes móveis e a análise de custos para investimentos e manutenção em sistemas de tratamento de poluentes atmosféricos. Dessa forma, você, enquanto profissional, será capaz de propor o melhor custo-benefício para a sua indústria, considerando os aspectos legais a serem obedecidos, contribuindo assim para a melhoria da qualidade ambiental.

Diante do exposto, vamos relembrar o contexto de aprendizagem: você é um profissional da área ambiental que acaba de ser contratado por uma das filiais de uma indústria do ramo de petróleo e gás, que acaba de ser implantada em um município paulista. Na sua filial, você será responsável pelo monitoramento das emissões atmosféricas e, por isso, deverá elaborar o plano de monitoramento e controle da poluição do ar dessa indústria. O plano será elaborado em três partes, sendo elas: (1) a amostragem dos poluentes, (2) os modelos de transporte atmosférico e (3) os sistemas de tratamento de poluentes atmosféricos. Você já identificou os tipos de amostradores, relatou como realizar a amostragem, estudou e apresentou os principais modelos de transporte e difusão de poluentes atmosféricos. Agora, para finalizar o plano, você deverá propor tecnologias de tratamento que sejam viáveis economicamente. Para nortear essa última fase do plano, responda às seguintes perguntas: quais as principais tecnologias de tratamento de poluentes atmosféricos, suas vantagens e desvantagens? Quais os fatores a serem avaliados para a viabilidade econômica dos sistemas de tratamento?

Lembre-se de aprofundar os seus estudos a partir da leitura de artigos científicos sobre o tema, para que você conheça as especificidades de cada setor industrial (metalurgia, têxtil, mecânica, bebida, química etc.). Vamos lá? Bons estudos!

Não pode faltar

Caro aluno,

Usamos inúmeros recursos naturais, como a água e o solo, para a realização de nossas atividades cotidianas. Porém, de todos os recursos naturais, o ar é o mais compartilhado e, de certa forma, o menos valorizado. Tradicionalmente, o ar não é visto como um recurso, como a água ou o solo, então não existem reivindicações sobre ele. Além disso, o ar não obedece às fronteiras geográficas, o que torna os problemas de poluição atmosférica difíceis de serem resolvidos. Outra questão relevante sobre a poluição atmosférica é que, após as emissões de poluentes para a atmosfera, não existe tecnologia disponível para tratar o ar poluído, devido ao transporte e dispersão dos poluentes pelos ventos na atmosfera.

Reflita

Nos esquecemos de que o ar também é um recurso natural, essencial à vida, e, por isso, pouco nos preocupamos com a qualidade do ar que respiramos. Diante disso, o que pode ser feito para que o recurso "ar" passe a ser mais valorizado e que a sua qualidade seja reivindicada pela população?

Portanto, abordaremos ao longo desta seção as tecnologias de tratamento disponíveis para as emissões na fonte, sejam elas móveis ou fixas, sendo que para estas últimas enfocaremos os ambientes fechados, como o interior das indústrias.

A poluição atmosférica interior difere da poluição atmosférica no ambiente, uma vez que as fontes e a circulação de ar (ventilação) são diferentes. Além disso, em ambientes internos a qualidade do ar raramente é monitorada. No entanto, nesses ambientes podem existir poluentes perigosos à saúde das pessoas, assim como em ambientes abertos. Nesse contexto, a Administração de Segurança e Saúde Ocupacional (OSHA), órgão do governo dos Estados Unidos, estabeleceu limites permissíveis de exposição (LPEs), conforme o Quadro 3.2, para alguns poluentes no ambiente de trabalho interno, acordados por meio de negociações com as próprias indústrias.

Quadro 3.1 | Poluentes atmosféricos de ambientes internos, fonte e limites permissíveis de exposição

Poluente	Fonte	LPEs
Monóxido de carbono	Fogões e fornos	$50\ ppm_v$
Formaldeído	Carpetes, placas de fibra de madeira, madeira compensada, acabamentos, pisos etc.	$0,75\ ppm_v$
Matéria particulada	Processamento de materiais, cozimento, carpetes	$5\ mg/m^3$
Composto orgânicos voláteis (COVs)	Solventes, material de limpeza, tintas	Específico para cada composto

Fonte: adaptado de Osha (1981).

Os LPEs visam proteger a saúde dos trabalhadores e, quando um dos limites é excedido, a OSHA pode obrigar o empregador a iniciar vários procedimentos, como o monitoramento da saúde dos empregados, amostragem do ar e medidas de controle. No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), em sua NBR 15848/2010, traz procedimentos e requisitos relativos às atividades de construção, reformas, operação e manutenção das instalações que afetam a qualidade do ar interior (QAI), porém relacionados aos equipamentos de ar condicionado. Além dessa norma, outros dispositivos legais buscam garantir a QAI, como a Portaria nº 3.523/1998 do Ministério da Saúde e a Resolução da Anvisa nº 09/2003, que traz referenciais de QAI em ambientes climatizados artificialmente de uso público e coletivo.

Pesquise mais

A qualidade do ar interior (QAI) para ambientes climatizados não é o foco dos nossos estudos neste livro didático, mas é importante que você conheça os seus dispositivos legais, para isso acesse-os nos links a seguir.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. **Resolução da Anvisa nº 09/2003**. 2003. Disponível em: <http://www.brasindoor.com.br/pdf/Resolu%C3%A7%C3%A3o%20RE%2009-2003%20ANVISA%20-%20Padr%C3%B5es%20Referenciais.pdf>. Acesso em: 2 ago. 207.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Portaria nº 3.523/1998 do Ministério da Saúde**. 1998. Disponível em: <http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/1998/prt3523_28_08_1998.html>. Acesso em: 2 ago. 2017.

Ainda sobre a qualidade do ar em ambientes internos, vamos dar enfoque às indústrias, abordando as tecnologias de controle e tratamento diretamente na fonte emissora.

Discutimos em outras seções que cada fonte industrial de poluição atmosférica apresenta problemas específicos de poluição, pois as emissões são características do processo de fabricação, como matéria-prima e combustíveis utilizados, processos e operações adotados, produtos fabricados, eficiência dos processos e medidas de controle adotadas. Porém, pode-se dizer que, de maneira geral, os processos industriais liberam partículas sólidas indesejáveis, que podem provocar danos à saúde dos profissionais, aos equipamentos, às instalações e ao meio ambiente.

Normalmente, as indústrias são classificadas em categorias, tais como as metalúrgicas, as mecânicas, as têxteis, as de bebidas, as químicas, entre outras. Dessa forma, é possível calcular o potencial de poluição do ar por categoria, conforme mostra o Quadro 3.3.

Quadro 3.3 | Estimativas de emissões por processo industrial

Processo industrial	Estimativa de emissão
Fabricação de concreto asfáltico	Estima-se que 2,5 kg de material particulado sejam emitidos para cada tonelada de produto.
Fabricação de vidro	Estima-se que 0,9 kg de material particulado seja emitido para cada tonelada de vidro processado.
Redução do minério de alumínio	Estima-se que de 35 a 39 kg de fluoretos são emitidos por tonelada de alumínio processado.
Fabricação de ácido sulfúrico	Estima-se que cerca de 26 kg de óxidos de nitrogênio sejam emitidos para cada tonelada de ácido produzido.
Torrefação do café	Estima-se que 3,5 kg de material particulado sejam emitidos por tonelada de café processado.

Fonte: adaptado de Derísio (2012).

Observa-se no Quadro 3.3 que muitos processos industriais emitem material particulado para a atmosfera, mas que também podem poluir o ambiente de trabalho nas indústrias. Diante disso, existem atualmente, equipamentos que visam garantir a qualidade do ar interno nas indústrias, como os exaustores, que possuem a função de movimentar o ar em um ambiente ffechado, e podem ser exaustores de pós, exaustores de odores, exaustores de gases e exaustores de vapores, conforme pode ser observado no Quadro 3.4. Além disso, os exaustores podem ser do tipo exaustão, e apenas eliminar o ar para o ambiente externo, ou filtrante, em que o ar passa por um processo de filtração para eliminação de odores.

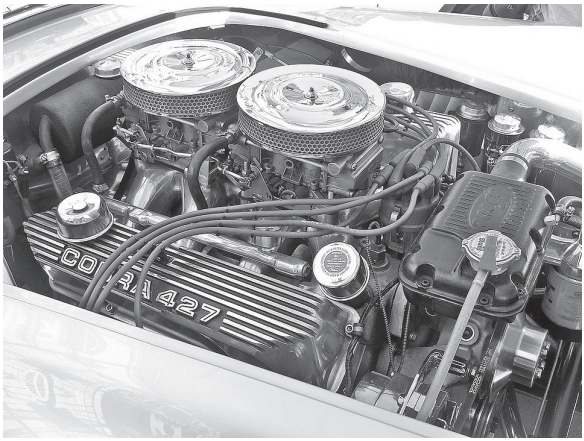
Quadro 3.4 | Exaustores, aplicações e produtos

Exaustores	Aplicações	Atividade relacionada com a aplicação
Pós	Capturar o pó na fonte de liberação	Farmácia de manipulação; laboratórios clínicos/ químicos; universidades; indústria farmacêutica, alimentícia, química, tinta ou cosmética; indústria metalúrgica
Odores	Substâncias que produzem odores quando expostos ao ambiente, logo, sua manipulação deve ser em ambientes restritos, isto é, em capelas exaustoras	Laboratórios clínicos/ químicos; universidades; indústria farmacêutica, alimentícia, química, tinta ou cosmética.
Gases	Utilização de capelas restritivas, para gases que quando liberados têm expansão rápida	Farmácia de manipulação; laboratórios clínicos/ químicos; universidades; indústria farmacêutica, alimentícia, química, tinta ou cosmética; indústria metalúrgica
Vapores	Utilização de coifa quando se aplica calor a substâncias líquidas ou semissólidas, que, na maioria das vezes, geram vapores	Farmácia de manipulação; laboratórios clínicos/ químicos; universidades; indústria farmacêutica, alimentícia, química, tinta ou cosmética; indústria metalúrgica

Fonte: adaptado de Mihelcic e Zimmerman (2012).

Além das medidas de controle da poluição do ar, tanto para emissões para o ambiente externo quanto para o ambiente interno das indústrias, não podemos nos esquecer da principal causa de poluição do ar atualmente: os veículos automotores. Os veículos podem ser divididos em leves, os quais usam gasolina, álcool e gás natural como combustível (Figura 3.6), e pesados, que utilizam óleo diesel. Porém, todos produzem gases, vapores e material particulado, sendo que a diferença reside nas quantidades que cada um deles emite para a atmosfera. Dentre os poluentes mais perigosos emitidos pelos veículos estão: (1) a evaporação de hidrocarbonetos (HC) do tanque de combustível; (2) a evaporação de HC do carburador; (3) emissões de gasolina não queimada e HC parcialmente oxidado do cárter; (4) óxidos de nitrogênio, HC e monóxido de carbono do escapamento.

Figura 3.6 | Motor de combustão interna



Fonte: <https://pixabay.com/p-1044236/?no_redirect>. Acesso em: 2 ago. 2017.

As perdas por evaporação dos tanques de combustível foram reduzidas pelo uso de tampas nos tanques, que impedem que o vapor escape. No carburador, as perdas foram reduzidas com a aplicação de caixas de carvão ativado, que armazenam os vapores emitidos quando o motor é desligado. A poluição emitida pelo cárter foi eliminada com o fechamento da saída para a atmosfera e a reciclagem dos gases dentro do coletor.

Assimile

Os adsorvedores são substâncias de alta porosidade que retêm poluentes gasosos/fumaça pela ação de forças de atração moleculares e afinidade química, como o carvão ativado utilizado no carburador.

Porém, os problemas relacionados às emissões atmosféricas provenientes do escapamento permanecem. O escapamento emite 60% do HC e quase todo o óxido de nitrogênio, o monóxido de carbono e o chumbo. Quando aceleramos demais o veículo, a combustão é eficiente, logo, há a redução de monóxido de carbono e de HC, mas a alta compressão produz muito óxido de nitrogênio. Em contrapartida, a desaceleração produz baixa concentração de óxido de nitrogênio, mas emite muito HC devido ao combustível parcialmente queimado.

Portanto, hoje existem basicamente três técnicas de controle de emissões para motores a combustão, sendo elas: (1) ajuste do motor; (2) conversores catalíticos, que oxidam o monóxido de carbono e o HC

para dióxido de carbono e água, mas têm o inconveniente de oxidar SO_2 para SO_3, responsável pela chuva ácida; (3) modificação do motor, como a configuração do cilindro onde ocorre a combustão e a injeção de combustível.

A configuração geométrica do cilindro é importante, pois a combustão completa exige que toda a gasolina inflame junto e queime como uma chama estável. Já a injeção de combustível é importante, pois mede a quantidade exata de gasolina necessária para o motor e a bombeia, evitando que o motor retire muito combustível do carburador e produza emissões no escapamento.

Porém, mesmo com tais medidas, é muito difícil produzir um motor de combustão interna totalmente limpo, surgindo assim os carros elétricos, que, no entanto, armazenam uma carga reduzida de energia. Diante disso, sem dúvida, o modo mais fácil de controlar a poluição do ar é eliminar a sua fonte, mas nem sempre isso é possível. Em outras situações, uma modificação do processo, como a substituição do carvão por gás natural em uma usina elétrica, já é suficiente para eliminar o problema da poluição do ar. Contudo, muitas vezes, o controle da poluição do ar só é possível por meio de tratamentos e equipamentos antipoluição, como os lavadores de gás, os ciclones, os precipitadores eletrostáticos, os filtros de manga, entre outros, estudados na Unidade 2.

Conforme estudamos anteriormente, a escolha do equipamento de tratamento adequado envolve uma combinação das características do poluente com os recursos do aparelho de controle, além de requerer altos custos, seja de implantação, operação e/ou manutenção. Por isso, vamos discutir alguns aspectos sobre a análise de custo relativos ao controle da poluição atmosférica, iniciando nosso estudo com alguns conceitos básicos sobre a avaliação econômica de projetos.

Primeiramente, é preciso identificar todos os custos e benefícios envolvidos em um determinado projeto, além de determinar o tempo de alcance do projeto. Esse tempo de alcance é referente ao período de atendimento das estruturas físicas projetadas, que no caso da gestão da poluição atmosférica, refere-se aos equipamentos antipoluição. Esse período é determinado pelo planejamento da instalação desses equipamentos, pela sua vida útil e pela disponibilidade financeira para investimentos.

Para a identificação dos custos envolvidos, é necessário considerar três tipos de custos: (1) custos de implantação, diretos (aquisição de equipamentos) e indiretos (fiscalização de obra, consultoria); (2) custos

de operação, referente aos custos com energia elétrica, mão de obra e insumos e (3) custos de manutenção, que são variáveis e ocorrem, geralmente, em parcelas mensais.

Para a identificação dos benefícios, deve-se considerar o retorno do investimento, que pode ser financeiro, sobre a venda de produtos, economia de recurso, e ganhos em geral. Porém, alguns benefícios não são quantificados monetariamente, os chamados "benefícios intangíveis", como os ganhos na saúde pública, ganho de credibilidade e imagem para uma empresa por atender às exigências legais, entre outros. Observe que esses são os principais benefícios referentes à gestão de emissões atmosféricas nas indústrias.

Exemplificando

Porém, quando temos benefícios intangíveis, como os descritos, a relação custo/benefício se torna mais subjetiva, uma vez que se justifica o investimento por meio dos benefícios gerados. Por exemplo, comparando-se dois projetos que possuam o mesmo custo, opta-se por aquele que traga mais benefícios econômicos, sociais e ambientais, que é o tripé do desenvolvimento sustentável.

Em uma indústria, os custos relativos aos equipamentos de controle da poluição do ar compreendem: custos iniciais com a compra e instalação dos equipamentos, custos com energia elétrica e com insumos (água, no caso dos lavadores de gás) e custos com manutenção da parte física de todos os equipamentos, como troca de peças danificadas, limpeza e reparos, e substituição de partes com vida útil limitada, além de incluir também o gasto com mão de obra e equipamentos auxiliares.

Vale ressaltar que o custo inicial, com a compra e instalação dos equipamentos, varia com a vazão a ser tratada, o tipo de equipamento, a eficiência desejada, com o número de pontos de captação e das dimensões projetadas. Por exemplo, o custo inicial de um ciclone (coletor seco de material particulado) varia de acordo com a perda de carga e eficiência desejada, uma vez que para uma mesma vazão, um diâmetro menor pode levar a uma maior perda de carga e maior eficiência. Porém, a vantagem do ciclone são os baixos custos com manutenção, já que não é necessário trocar nenhuma parte regularmente, mas a perda de carga localizada deve ser incluída no cálculo do custo de operação.

Já o custo inicial do filtro de manga depende de suas dimensões e do tipo de fibra utilizado: quanto maior a vazão a ser filtrada, maior o filtro. Nesse caso, há altos custos de manutenção do filtro, que precisa ser substituído periodicamente devido à vida útil limitada. Para o filtro de manga, o custo de operação é referente à perda de carga localizada, provocada pela passagem do ar no equipamento, que deve ser superada através de um ventilador ou exaustor.

Os exaustores, por sua vez, trazem benefícios intangíveis, como a preservação ambiental, manutenção ou melhoria da saúde ambiental e ocupacional, limpeza no ambiente industrial e melhoria da imagem da empresa junto à sociedade. Além disso, às vezes, é possível realizar a recuperação de materiais, tendo assim benefícios indiretos pela economia do material que seria perdido para a atmosfera.

Por fim, em uma análise de custo, é preciso considerar também a internalização dos custos ambientais. Sabemos que as atividades industriais afetam o seu entorno e, quando não há nenhum mecanismo que amenize ou interrompa essa interferência, ocorre o que é chamado de "externalidades". Por exemplo, o lançamento de emissões atmosféricas, sobretudo de gases poluentes, pode afetar a saúde da comunidade vizinha. Nas indústrias, os equipamentos antipoluição, assim como os sistemas de tratamento de efluentes, não fazem parte do processo de produção, e sua existência não beneficia economicamente a produção, mas os seus gastos devem ser contabilizados nos custos globais da empresa. Esse investimento em sistemas de tratamento é uma internalização de parte dos custos ambientais provocados pelo processo industrial, visando reduzir ou eliminar as externalidades negativas. Lembre-se de que esses custos são justificados pelas exigências ambientais, tanto para o licenciamento do empreendimento e da atividade quanto pelo cumprimento de legislação, que discutimos nas Unidades 1 e 2. Além disso, justificam-se pelas pressões de mercado e por investimentos na imagem da empresa a partir de certificações e selos ambientais.

Chegamos ao final de mais uma unidade. Agora, é importante que você releia os assuntos abordados e marque os pontos mais relevantes e os pontos que não ficaram totalmente esclarecidos. Dessa forma, você conseguirá identificar as suas dificuldades e poderá direcionar os seus estudos para saná-las. Além disso, esperamos que você se sinta motivado a buscar novas informações acerca dos temas que discutimos ao longo das Seções 1, 2 e 3. Bons estudos!

Sem medo de errar

Dentre os vários tipos de poluição, a poluição do ar é sem dúvida a mais complexa de identificar, controlar e monitorar, devido à dispersão dos poluentes na atmosfera e também por não ser identificada a olho nu. Por isso, é importante buscarmos cessar a poluição na sua fonte e, quando isso não for possível, utilizar equipamentos antipoluição e sistemas que minimizem as emissões atmosféricas. Diante do exposto, imagine que você é um profissional da área ambiental recém-contratado por uma das filiais de uma indústria do ramo de petróleo e gás, que acaba de ser implantada em Cubatão. Na sua filial, você será responsável pelo monitoramento das emissões atmosféricas e, por isso, deverá elaborar o plano de monitoramento e controle da poluição do ar dessa indústria. O plano será elaborado em três partes, sendo elas: (1) a amostragem dos poluentes, (2) os modelos de transporte atmosférico e (3) os sistemas de tratamento de poluentes atmosféricos. Você já identificou os tipos de amostradores, relatou como realizar a amostragem, estudou e apresentou os principais modelos de transporte e difusão de poluentes atmosféricos. Agora, para finalizar o plano, você deverá propor tecnologias de tratamento que sejam viáveis economicamente. Para nortear esta última fase do plano, responda às seguintes perguntas: quais as principais tecnologias de tratamento de poluentes atmosféricos considerando uma refinaria de petróleo? Quais os fatores a serem avaliados para a viabilidade econômica dos sistemas de tratamento para essa refinaria?

As refinarias emitem poluentes atmosféricos provenientes dos compostos voláteis presentes no óleo cru e nas suas frações, provenientes da queima de combustíveis nos aquecedores de processo e nas caldeiras, e também nas unidades de processo propriamente ditas. Nesse caso, sugere-se a utilização de equipamentos antipoluição estudados na Unidade 2, como os precipitadores eletrostáticos e os ciclones, que visam remover o material particulado presente nos gases gerados. Para a garantia da qualidade do ar interno, sugere-se a utilização de exaustores de pós e/ou gases. Além disso, é preciso considerar que, em uma indústria, os custos relativos aos equipamentos de controle da poluição do ar compreendem os custos inicias com a compra e instalação dos equipamentos, os custos com energia elétrica e com insumos (água no caso dos lavadores de gás) e custos com manutenção da parte

física de todos os equipamentos, como troca de peças danificadas, limpeza e reparos, e substituição de partes com vida útil limitada, além de incluir também o gasto com mão de obra e equipamentos auxiliares. Além disso, é preciso considerar, no custo inicial, a vazão a ser tratada, o tipo de equipamento, a eficiência que se deseja alcançar e a quantidade de pontos de captação. Você deverá coletar essas informações junto à filial onde irá trabalhar, pois são pontos relevantes a serem considerados antes de propor alternativas de gestão de emissões atmosféricas, além de atender às exigências legais, é preciso que a alternativa seja viável economicamente e que traga benefícios intangíveis para a refinaria.

Avançando na prática

As emissões atmosféricas e uma destilaria de uísque

Descrição da situação-problema

Sabe-se que todo processo industrial produz externalidades, principalmente referentes às emissões atmosféricas, que podem afetar a população vizinha e até mesmo contribuir para problemas de ordem global, como as mudanças climáticas. Nesse contexto, a produção de uísque, bebida alcoólica proveniente da destilação de grãos, sobretudo do malte, é responsável por grandes emissões de carbono. Porém, além das emissões de carbono, o principal efeito ambiental é o cheiro produzido, que muitas pessoas consideram desagradável.

Diante disso, imagine a seguinte situação: uma destilaria de uísque o contratou como consultor para projetar um aparelho de controle de poluição do ar para uma nova instalação, que será construída em uma área residencial. Considerando as emissões da destilaria e a geração de odores, como você lidaria com essa tarefa?

Resolução da situação-problema

Nesse caso, é importante fazer duas análises distintas: (1) a qualidade do ar interno, para os trabalhadores da destilaria, e (2) as emissões atmosféricas do processo industrial da destilação. Ao analisarmos a qualidade do ar interno, é preciso considerarmos o processo produtivo como um todo, como levantar dados relativos à matéria-prima utilizada, o combustível utilizado no processo industrial, os gases e vapores gerados nesse processo, a eficiência do processo,

entre outros aspectos. Para a redução das emissões de carbono, pode-se recomendar a substituição do combustível utilizado por outro que gere menos gases poluentes, uma vez que geralmente se utilizam turfas em forno para secagem da cevada. A turfa é um tipo de carvão mineral que possui cerca de 55% de carbono e, quando queimada, libera este composto para a atmosfera. Portanto, pode-se sugerir a substituição da turfa pelo gás natural, menos poluente. Observe que às vezes não é preciso investir em altas tecnologias de tratamento e controle da poluição, é possível minimizar as emissões melhorando o processo industrial. Você, como consultor, deve apresentar todas as possibilidades para o seu cliente. Por fim, considerando a geração de odores, pode-se sugerir a instalação de exaustores de odores do tipo filtrante, onde o ar passa por um processo de filtragem para eliminação de odores. Essa filtragem pode ser por carvão ativado ou por filtros de manga, sistemas que estudamos na Unidade 2 deste livro didático. Por fim, cabe ressaltar que para que você proponha a melhor solução, é preciso entender detalhadamente todo o processo industrial da destilaria de uísque na unidade em que será consultor, as possibilidades de investimentos, a localização da destilaria e, conforme já discutimos anteriormente, é importante conhecer as características meteorológicas da região, a fim de identificar se a dispersão dos gases e dos odores se dará no sentido da área residencial. Por isso, levante todos os dados e possibilidades e avalie a melhor alternativa.

Faça valer a pena

1. Nos Estados Unidos, a Administração de Segurança e Saúde Ocupacional (OSHA) estabeleceu limites permissíveis de exposição (LPEs) para alguns poluentes no ambiente de trabalho interno. No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) criou procedimentos e requisitos relativos às atividades de construção, reformas, operação e manutenção das instalações que afetam a qualidade do ar interior (QAI).
Assinale a alternativa que contém a norma brasileira citada no texto sobre qualidade do ar interior:

a) NBR 15848/2010.
b) NBR 10004/2004.
c) NBR 16401/2008.
d) NBR 16403/2015.
e) NBR 10007/2004.

2. Muitos processos industriais emitem material particulado tanto para a atmosfera quanto para o ambiente interno das indústrias. Diante disso, existem atualmente equipamentos que visam garantir a qualidade do ar interno nas indústrias.
Agora, assinale a alternativa correta sobre o equipamento antipoluição para ambiente interno:

a) Filtros de manga.
b) Exaustores.
c) Ventiladores.
d) Precipitadores eletrostáticos.
e) Lavador Venturi.

3. Os veículos automotores são os principais emissores de poluentes para a atmosfera, sejam eles veículos leves, movidos a gasolina, álcool e gás natural ou pesados, que utilizam óleo diesel. Todos produzem gases, vapores e material particulado, sendo que a diferença reside nas quantidades que cada um deles emite para a atmosfera.
Assinale a alternativa que apresenta os poluentes mais perigosos emitidos pelos veículos leves:

a) Hidrocarboneto, monóxido de carbono e óxidos de enxofre.
b) Ozônio, monóxido de carbono e óxido de nitrogênio.
c) Hidrocarboneto, dióxido de carbono e óxidos de enxofre.
d) Dióxido de carbono, dióxido de enxofre e óxidos de nitrogênio.
e) Hidrocarbonetos, monóxido de carbono e óxidos de nitrogênio.

Referências

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **NBR 9546**: Dióxido de enxofre no ar ambiente-determinação da concentração pelo método da pararosanilina. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.

_____. **NBR 10736**: Material particulado em suspensão na atmosfera-Determinação da concentração de fumaça pelo método da refletância da luz. Rio de Janeiro: ABNT, 1989.

_____. **NBR 13157**: Atmosfera-Determinação da concentração de monóxido de carbono por espectrofotometria de infravermelho não-dispersivo. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

_____. **NBR 9547**: Material particulado em suspensão no ar ambiente – Determinação da concentração total pelo método do ABNT-Associação amostrador de grande volume. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. **Resolução da Anvisa nº 09/2003**. 2003. Disponível em: <http://www.brasindoor.com.br/pdf/Resolu%C3%A7%C3%A3o%20RE%2009-2003%20ANVISA%20-%20Padr%C3%B5es%20Referenciais.pdf>. Acesso em: 2 ago. 2007.

BRANCO, Samuel Murgel; MURGEL, Eduardo. **Poluição do ar**. 2. ed. reform. São Paulo: Moderna, 2004.

BRITTER, R. E.; McQUAID, J. **Workbook on the dispersion of dense gases**. Sheffield: Health & Safety Executive, 1998.

CALIJURI, Maria do Carmo; CUNHA, Davi Gasparini Fernandes. **Engenharia ambiental**: conceitos, tecnologia e gestão. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013. 789 p.

CONAMA-CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução nº 03, de 22 de agosto de 1990**. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR. 1990. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=100>. Acesso em: 2 ago. 2017.

_____. **Resolução nº 418, de 26 de novembro de 2009**. Dispõe sobre critérios para a elaboração de Planos de Controle de Poluição Veicular-PCPV e para a implantação de Programas de Inspeção e Manutenção de Veículos em Uso-I/M pelos órgãos estaduais e municipais de meio ambiente e determina novos limites de emissão e procedimentos para a avaliação do estado de manutenção de veículos em uso. 2009. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=618>. Acesso em: 2 ago. 2017.

DERÍSIO, José Carlos. **Introdução ao controle de poluição ambiental**. 4 ed. São Paulo: Oficina de textos, 2012.

FRONDIZI, Carlos Alberto. **Monitoramento da qualidade do ar**: teoria e prática. Rio de Janeiro: E-PAPERS, 2008. 276 p.

KLUMPP, A. Utilização de bioindicadores de poluição em condições temperadas e

tropicais. In: MAIA, N. B.; MARTOS, H. L.; BARRELLA, W. (Eds.) **Indicadores ambientais**: conceitos e aplicações. São Paulo: EDUC/COMPED/INEP, 2001. p. 77-94.

LISBOA, Henrique de Melo. **Controle da poluição atmosférica**: Capítulo IV – Monitoramento de poluentes atmosféricos. 2008. Disponível em: <http://repositorio.asces.edu.br/bitstream/123456789/418/7/Cap%204%20Monitoramento%20de%20poluentes%20atmosf%C3%A9ricos.pdf>. Acesso em: 2 ago. 2017.

MERCER, A.; et al. H.I. **Heavy gas dispersion expert group**. Luxemburg: Official Publication of the European Commission – Environment and Climate Programme EUR17778, 1998.

MIHELCIC, James R.; ZIMMERMAN, Julie Beth. **Engenharia ambiental**: fundamentos, sustentabilidade e projeto. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Portaria nº 3.523/1998 do Ministério da Saúde**. 1998. Disponível em: <http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/1998/prt3523_28_08_1998.html>. Acesso em: 2 ago. 2017.

NORMA TÉCNICA P4.261/2011. **Risco de acidente de origem tecnológica** – método para decisão e termos de referência. 2011. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/11/2013/11/P4261-revisada.pdf>. Acesso em: 2 ago. 2017.

OLIVEIRA JÚNIOR, José Francisco de; PIMENTEL, Luiz Cláudio Gomes; LANDAU, Luiz. Critérios de estabilidade atmosférica para a região da central nuclear Almirante Álvaro Alberto, Angra dos Reis – RJ. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 25, n. 2, p. 270-285, 2010. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbmet/v25n2/a11v25n2.pdf>. Acesso em: 2 ago. 2017.

OSHA. Occupational Safety and Health Administration. hearing conservation amendment, 46 Fed. Reg. 4078-4179. Washington (DC): OSHA, 1981.

PAPA, Bruno del; GORDON, Ana Maria Pinho. Aplicação do modelo gaussiano de dispersão atmosférica. In: SEMINÁRIO ANUAL PROBIC, 8., 2011. **Resumos**... São Paulo: PROBIC, 2011. p. 112-113. Disponível em: <http://pelicano.ipen.br/pibic/cd-virtual/2011%20-%20LAVOISIER/pdf/ipen_05_resumo.pdf>. Acesso em: 2 ago. 2017.

PIXABAY. **Líquens na casca de uma árvore**. 2017. Disponível em: <https://pixabay.com/p-315817/?no_redirect>. Acesso em: 2 ago. 2017.

_____. **Musgos na casca de uma árvore**. 2017. Disponível em: <https://pixabay.com/p-177821/?no_redirect>. Acesso em: 2 ago. 2017.

_____. **Dispersão atmosférica do tipo "puff"**. 2017. Disponível em: <https://pixabay.com/p-156675/?no_redirect>. Acesso em: 2 ago. 2017.

_____. **Motor de combustão interna**. 2017. Disponível em: <https://pixabay.com/p-1044236/?no_redirect>. Acesso em: 2 ago. 2017.

QUADROS, Marina Eller et al. Qualidade do ar interno em ambientes hospitalares. **Revista Tecnologia**, Fortaleza, v. 30, n. 1, p. 38-52, jun. 2009. Disponível em: <http://periodicos.unifor.br/tec/article/view/5275/4125>. Acesso em: 2 ago. 2017.

SALAZAR, Márcio Piovezan. **Estudo sobre a modelagem da dispersão atmosférica de gases densos decorrente de liberações acidentais em análise quantitativa de risco**.

2016. 111 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2016. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3135/tde-25082016-084227/pt-br.php>. Acesso em: 2 ago. 2017.

SOUZA, Mario Luiz Previatti de. **Modelos analíticos de dispersão de poluentes atmosféricos**. 2012. 36 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Matemática e Computação Científica) – Centro de Ciências Físicas e Matemáticas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/105453/Mario%20Luiz%20Previatti%20de%20Souza.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 2 ago. 2017.

SUPER INTERESSANTE. **Biomonitoramento do ar, o alerta das plantas**. 2016. Disponível em: <http://super.abril.com.br/ciencia/biomonitoramento-do-ar-o-alerta-das-plantas/>. Acesso em: 2 ago. 2017.

VESILIND, Aarme P.; MORGAN, Susan M. **Introdução à engenharia ambiental**. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

WIKIMEDIA. **Tradescantia pallida purpúrea**. 2017. Disponível em: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/dc/Tradescantia_pallida_Purpurea1.jpg>. Acesso em: 2 ago. 2017.

_____. **Regiões da camada limite planetária (CLP)**. 2017. Disponível em: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/f/f1/Atmospheric_boundary_layer.svg/1280px-Atmospheric_boundary_layer.svg.png>. Acesso em: 2 ago. 2017.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease. 2016. Disponível em: <http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/250141/1/9789241511353-eng.pdf> Acesso em: 23 out. 2017.

Principais repercussões da poluição atmosférica

Convite ao estudo

Ao longo das unidades anteriores, discutimos pontos relevantes para a gestão de emissões atmosféricas, desde a compreensão da dinâmica da atmosfera até o aprendizado sobre os parâmetros de qualidade do ar e os mecanismos e equipamentos de controle da poluição do ar. Agora, para finalizarmos este livro didático, iremos discutir as principais repercussões da poluição do ar para a saúde humana, para o meio ambiente e para os ambientes construídos.

Nesse contexto, iniciaremos os nossos estudos refletindo sobre a exploração dos recursos naturais. Os recursos naturais, como florestas, solo, água, minério, vegetais, entre outros, há anos são amplamente explorados pela humanidade como elementos essenciais à sua sobrevivência e ao desenvolvimento econômico e tecnológico. Porém, dentre todos os recursos naturais, o ar é o que menos nos preocupa no dia a dia, mas é o mais complexo de controlar e monitorar em relação à sua qualidade.

As preocupações atuais referentes à qualidade do ar estão, de certa forma, limitadas aos seus efeitos sobre a temperatura do planeta, mas pouco se fala e se estuda sobre os efeitos da poluição do ar na saúde das pessoas e dos ecossistemas. Por isso, esperamos que você se sinta motivado a refletir sobre esses efeitos a fim de compreender a importância da qualidade do ar para a manutenção da qualidade de vida. Além disso, enquanto futuro profissional, esperamos que os temas apresentados ao longo deste livro didático sejam motivadores para que pesquise e busque o desenvolvimento de alternativas e melhorias tecnológicas que visem monitorar e controlar as emissões

atmosféricas, alcançando assim o desenvolvimento sustentável. Diante desse contexto, imagine a seguinte situação: você acaba de ser contratado por uma consultoria ambiental especializada no ramo de qualidade do ar. A consultoria, por meio de licitação, irá prestar serviço para um município paulista que está preocupado com a qualidade do ar e suas repercussões para a cidade, tanto do ponto de vista econômico e social quanto em relação à saúde da população. Você irá compor a equipe de consultores que irá realizar um estudo das repercussões da poluição atmosférica cujo resultado final será um relatório técnico da relação da qualidade do ar com a qualidade de vida, que será apresentado ao prefeito para que ele tome as devidas providências. Esse relatório será elaborado em três partes, sendo elas: (1) efeitos gerais dos poluentes atmosféricos; (2) repercussões da poluição atmosférica na saúde humana, e (3) efeitos da poluição atmosférica sobre o meio ambiente e materiais.

Pronto? Então, vamos lá! Bons estudos!

Seção 4.1

Efeitos gerais dos poluentes atmosféricos

Diálogo aberto

A humanidade usa o recurso ar de forma indiscriminada, pelo fato de estar disponível livremente sem que o seu uso implique qualquer esforço. Além dos usos metabólicos naturais, pelos homens, animais e vegetais, utilizamos o ar para comunicação, transporte, processos industriais e, principalmente, como receptor e transportador de resíduos da nossa atividade. Porém, esse uso indiscriminado, principalmente em áreas geograficamente limitadas e confinadas como os centros urbanos, leva à poluição do ar. Esta, por sua vez, traz prejuízos à saúde humana, ao meio ambiente e aos materiais em ambientes construídos. Relembrando o nosso contexto de aprendizagem, você foi recém-contratado por uma consultoria ambiental especializada no ramo de qualidade do ar, que irá prestar serviço para um município paulista preocupado com a qualidade do ar e suas repercussões para a cidade. Vocês irão realizar um estudo das repercussões da poluição atmosférica cujo resultado final será um relatório técnico da relação da qualidade do ar com a qualidade de vida. Para dar início ao relatório técnico solicitado pela prefeitura, você e os demais consultores deverão realizar um levantamento bibliográfico em estudos de caso sobre os efeitos gerais dos poluentes atmosféricos. Para isso, deverão responder às seguintes perguntas norteadoras: quais os principais fenômenos atmosféricos observados em áreas urbanas? Qual a relação de cada um desses efeitos com a poluição do ar? Qual a relação entre os poluentes atmosféricos e a camada de ozônio? De que forma o balanço térmico do planeta influencia esses fenômenos atmosféricos?

Não pode faltar

Na Unidade 1, abordamos alguns fenômenos, naturais e artificiais, que estão relacionados com a dispersão de poluentes atmosféricos. Vimos que alguns dos elementos quando presentes na atmosfera terrestre na forma gasosa, sejam provenientes de fontes naturais ou antrópicas, como o vapor de água, o gás carbônico (CO_2), o metano (CH_4), o óxido nitroso (N_2O) e ozônio (O_3), são capazes de reter a radiação térmica na atmosfera. Essa radiação térmica fica retida na

forma de calor, é responsável pelo balanço de energia do planeta Terra e permite também a existência de vida nele. Esse fenômeno é conhecido como "efeito estufa" e é um fenômeno natural e essencial à sobrevivência dos seres vivos, uma vez que sem ele o planeta seria gelado, o que impossibilitaria a existência de muitas espécies, inclusive a humana. Porém, como já mencionado, a queima de combustíveis fósseis aumenta a concentração dos gases, aumentando a retenção da radiação térmica na atmosfera, elevando assim a sua temperatura e gerando discussões acerca das mudanças climáticas.

Além disso, estudamos que os óxidos de nitrogênio, sobretudo o NO_2, são um dos principais poluentes secundários, uma vez que provêm de reações químicas da atmosfera. De uma maneira geral, os óxidos de nitrogênio e os oxidantes atmosféricos têm função especial na formação do *smog* fotoquímico (Figura 4.1), fenômeno que ocorre principalmente em grandes centros urbanos. O termo provém do inglês e quer dizer "nuvem de fumaça". Os principais poluentes do *smog* fotoquímico são o dióxido de nitrogênio e o ozônio. Como resultado, temos uma camada de poeira, de cor avermelhada, localizada próxima ao solo, observada nos grandes centros urbanos como demonstrado na Figura 4.1.

Figura 4.1 | *Smog* fotoquímico na cidade de São Paulo

Fonte: <https://c1.staticflickr.com/1/21/96375769_733ebdb4c8_z.jpg?zz=1>. Acesso em: 9 jul. 2017.

Além do *smog* fotoquímico, existe o *smog* industrial, característico de regiões que possuem muitas indústrias, como Cubatão no estado de São Paulo. As indústrias geralmente utilizam combustíveis fósseis como fonte de energia e, por isso, emitem muito enxofre em seus poluentes atmosféricos. Durante a combustão, são formados óxidos de enxofre, como o dióxido de enxofre (SO_2) e o trióxido de enxofre (SO_3), que ao reagirem com o vapor de água presente no ar, formam ácido sulfúrico (H_2SO_4). Esse é o mesmo processo de formação da chuva ácida.

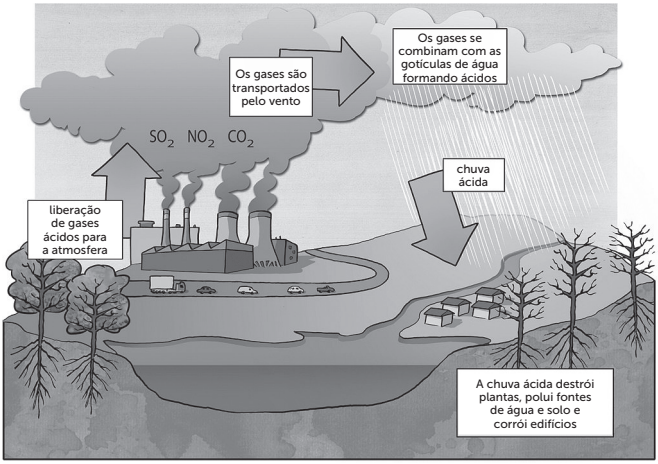
Assimile

O *smog* fotoquímico é formado principalmente pela emissão de óxidos de nitrogênio, que reagem com outros poluentes na atmosfera, e possuem como característica principal a cor avermelhada ou marrom. Já o *smog* industrial é formado principalmente pela emissão de óxidos de nitrogênio, sendo caracterizado pela fumaça.

Diariamente, as atividades humanas lançam na atmosfera uma grande quantidade de poluentes, que possuem propriedades ácidas ou básicas capazes de modificar as propriedades da atmosfera. Conforme estudamos na Unidade 2, a deposição úmida e a deposição seca são os mecanismos de limpeza atmosférica. Na deposição úmida, a água da chuva dissolve os gases solúveis e os arrasta junto com a água da chuva, mas quando existe uma quantidade significativa de compostos ácidos presente na chuva, ela é conhecida como "chuva ácida" (Figura 4.2).

Naturalmente, a água da chuva possui uma acidez natural (pH por volta de 5,6) proveniente da dissolução do CO_2, mas essa acidez tem sido intensificada nas últimas décadas devido aos poluentes atmosféricos. Os principais poluentes que acidificam a chuva são os óxidos de enxofre e os óxidos de nitrogênio, que em altas altitudes reagem com a água, o oxigênio e outros oxidantes, formando uma solução de ácido nítrico (HNO_3) e ácido sulfúrico (H_2SO_4). Cabe ressaltar que o SO_2 tem origem natural, nas erupções vulcânicas, e artificiais, como na extração de minérios sulfurosos e na combustão de combustíveis fósseis. Da mesma forma, os óxidos de nitrogênio são formados sobretudo a partir de motores de automóveis e centrais térmicas. Essa chuva ácida traz malefícios para os seres vivos, para as florestas, para o solo, para os ambientes construídos, entre outros. Porém, esses e outros problemas são detalhados na Seção 3 desta unidade.

Figura 4.2 | Formação da chuva ácida



Fonte: adaptada de <https://c1.staticflickr.com/8/7356/13579612483_0798ecd762_b.jpg>. Acesso em: 9 jul. 2017.

Lembre-se que, conforme estudamos, no inverno as condições climáticas são pouco favoráveis à dispersão de poluentes atmosféricos, uma vez que há pouco vento e os dias são claros, com grande incidência solar. Essas condições desfavoráveis à dispersão de poluentes ocorrem durante o fenômeno atmosférico natural da inversão térmica. A camada atmosférica mais próxima do solo é normalmente mais quente e esfria à medida que se afasta do solo. Porém, durante a inversão térmica, uma camada de ar mais frio (mais denso) está próxima ao solo e não consegue subir para as camadas mais altas da atmosfera, não havendo dispersão dos poluentes, o que favorece as reações fotoquímicas. Portanto, a inversão térmica pode intensificar e favorecer os fenômenos *smog* fotoquímico e a chuva ácida, que discutimos anteriormente.

Pesquise mais

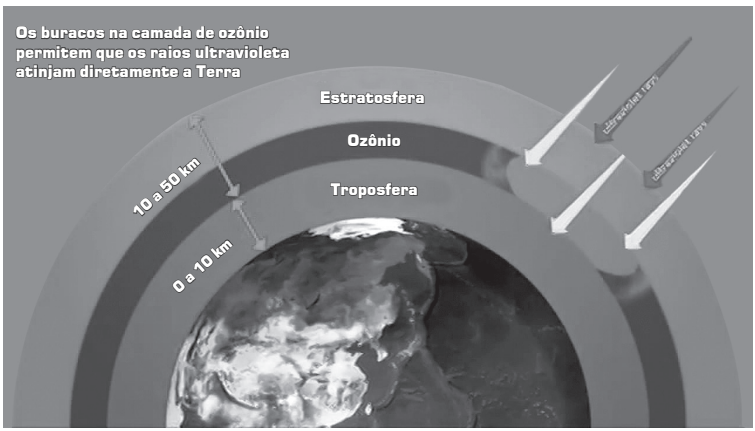
Para conhecer mais sobre a chuva ácida e sua ocorrência no Brasil, sugerimos a leitura a seguir.

FORNARO, Adalgiza. Água de chuva: conceitos e breve histórico. Há chuva ácida no Brasil?. **Revista USP**, São Paulo, n. 70, p. 78-87, jun./ago. 2006. Disponível em: <http://www.journals.usp.br/revusp/article/viewFile/13533/15351>. Acesso em: 9 jul. 2017.

Continuando nossos estudos referentes aos efeitos gerais dos poluentes atmosféricos, não podemos deixar de discutir os poluentes atmosféricos e a camada de ozônio (Figura 4.3). A camada de ozônio

se situa na estratosfera, região da atmosfera situada entre 15 e 50 km de altitude. Nessa camada, a concentração de ozônio chega a 10 ppmv (partes por milhão em volume) e atua como um gigantesco "filtro solar" natural, capaz de bloquear a radiação UV. Porém, essa camada tem sofrido depleção nas últimas décadas, devido aos problemas ambientais, como as emissões de poluentes atmosféricos. O principal vilão para os famosos buracos na camada de ozônio são os compostos de cloro, como os clorofluorcarbonetos (também chamados CFCs), uma vez que ao atingirem a estratosfera, destroem de forma catalítica as moléculas de ozônio.

Figura 4.3 | Camada de ozônio



Fonte: adaptada de <https://i.vimeocdn.com/video/517481830_1280x720.jpg>. Acesso em: 9 jul. 2017.

A descoberta de que os CFCs destruíam a camada de ozônio deu origem ao Protocolo de Montreal, iniciado em 1987, no qual ficou determinado o fim da produção e comercialização dos principais CFCs. Desde então, diversos países diminuíram suas emissões, sendo que o Brasil foi a quinta nação que mais diminuiu o uso dos CFCs e outros gases na última década. Além disso, uma parceria entre o Governo Federal e o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) resultou na Resolução Conama nº 267/2000, que estabelece em seu artigo 7° o recolhimento, acondicionamento e envio dos gases CFCs para reciclagem, evitando e o escape acidental desses gases para a atmosfera. Porém, outras substâncias destroem a camada de ozônio, sendo elas: hidroclorofluorcarbonos (HCFCs), halons, brometo de metila, tetracloreto de carbono (CTC), metilclorofórmio e hidrobromofluorcarbonos (HBFCs).

Baird (2002) aponta, para os problemas da diminuição na concentração do ozônio estratosférico, como os efeitos prejudiciais à maioria das formas de vida conhecidas, principalmente à humana, provocando bronzeamento e queimaduras na pele, além de afetar de forma adversa o sistema imunológico e o crescimento de algumas plantas e animais. Porém, iremos abordar esse tema com maior profundidade em outras seções.

Pesquise mais

Para conhecer mais sobre a camada de ozônio e sobre o que o governo brasileiro tem feito para protegê-la, acesse o material a seguir.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Proteção da camada de ozônio. 2017. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/259/_arquivos/faq_ozonio_259.pdf>. Acesso em: 9 jul. 2017.

Porém, não encontramos problemas atmosféricos somente no ambiente externo, como discutimos até agora. O ambiente interno, quando analisamos de uma perspectiva de exposição, contribui para o risco ambiental, o que fez surgir o projeto edifício verde. Em um ambiente projetado, as características do interior influenciam o movimento e a dispersão de poluentes de forma diferente dos processos atmosféricos que discutimos até o momento. Em um ambiente interno, o movimento do ar é determinado pelos sistemas de ventilação que fazem parte do projeto. Além disso, em ambientes internos, ao contrário do ar ambiente, a temperatura e a umidade podem ser predeterminados ou definidos.

Os sistemas naturais usam o vento e a diferença natural de temperatura interna/externa para criar ventilação. Esses sistemas também usam o vento e as pressões geradas termicamente. Esses fatores podem ser utilizados ao se projetar um edifício, uma vez que são mais sustentáveis, já que não requerem energia para mover o ar e também não requerem muitos recursos naturais para fabricação de sistemas de ventilação mecânica.

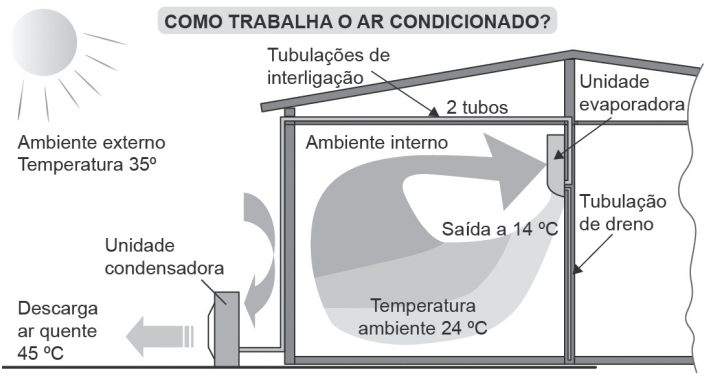
Por exemplo, a pressão do vento é criada quando o ar bate no edifício, causando uma pressão positiva na face que o recebe, favorecendo a entrada do ar pelas aberturas e seu movimento através da edificação, indo da região de elevada pressão para a de baixa pressão. Já a pressão térmica resulta da diferença entre as temperaturas interiores e exteriores. Essa diferença de temperatura gera também uma diferença de densidade, com o ar mais quente (menos denso) subindo e criando

um efeito chaminé. Quando esse ar mais quente está no edifício, ele induz a entrada de ar mais frio, através de aberturas na parte baixa do edifício, conforme aquele sai através das aberturas mais altas.

Porém, atualmente, na maioria dos edifícios, e até mesmo em residências, o escoamento de ar é controlado por meio de sistemas mecânicos de ventilação, que muitas vezes estão acoplados com subsistemas de aquecimento, resfriamento e controle de poluição atmosférica. Esses sistemas, coletivamente, receberam o nome de "HVAC" (sigla em inglês para "aquecimento, ventilação e condicionamento de ar").

Portanto, para analisar a qualidade do ar interno quando se possui ar condicionado, é preciso conhecer os princípios de funcionamento deste sistema (Figura 4.4). O ar condicionado supre o ar no ambiente com determinada vazão, temperatura e umidade previamente calculados, absorvendo os ganhos de calor e a umidade do ambiente, a fim de manter a temperatura e umidade relativa do ambiente dentro do que foi previamente estabelecido. Após ter percorrido o ambiente, o ar insuflado assume as condições de temperatura e umidade do ambiente e deve ser retirado e substituído por nova vazão de ar tratado. Portanto, a concentração dos poluentes remanescente é reduzida por diluição do ar novo introduzido. Cabe ressaltar que o ar suprido ao ambiente passa por filtros cuja eficiência de filtragem também é previamente determinada em função das características da qualidade do ar desejável.

Figura 4.4 | Princípio de funcionamento do ar condicionado



Fonte: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a8/Instala%C3%A7%C3%A3o_t%C3%ADpica_de_equipamento_Split_System.JPG>. Acesso em: 9 jul. 2017.

Contudo, quando se tem um mau dimensionamento do ar condicionado e da manutenção do sistema, o ar não será renovado suficientemente e irá favorecer o aumento da concentração de poluentes químicos e biológicos do ar interno. Os principais poluentes em ambientes internos são o monóxido e o dióxido de carbono (CO e CO_2), a amônia, o dióxido de enxofre e formaldeído, fumaça de cigarro, fotocopiadoras, além dos poluentes biológicos, como fungos, algas, protozoários, bactérias, ácaros, cuja proliferação é favorecida pela limpeza inadequada de carpetes, tapetes e cortinas. Em recintos com ar condicionado central, esses poluentes causam problemas de saúde nos trabalhadores, o que se convencionou chamar de "Síndrome do Edifício Doente", reconhecida em 1982 pela Organização Mundial de Saúde (OMS).

Exemplificando

No ano de 1968, na cidade de Pontiac, Michigan (EUA), uma epidemia, caracterizada por febre, dores de cabeça e musculares afetou 114 pessoas, entre elas 100 empregados de um edifício do departamento de saúde do município. A epidemia foi causada por um defeito no sistema de ar condicionado, fonte da difusão do agente patogênico.

Reflita

Grande parte da frota de veículos possui sistema de ar condicionado. O princípio de funcionamento é basicamente o mesmo para edifícios. Porém, considerando os poluentes presentes no ambiente externo, o sistema de filtragem deve ser mais eficiente, quando comparado ao ambiente interno? Qual a periodicidade ideal de manutenção do ar condicionado do veículo para garantir a qualidade do ar interno?

Prezado aluno, terminamos aqui a primeira seção sobre as principais repercussões da poluição atmosférica. São muitas as influências da poluição sobre os fenômenos naturais, além da formação de outros, provenientes exclusivamente da poluição. Por isso, para que os conteúdos sejam mais bem compreendidos, é importante que você busque aprofundar os seus estudos em fontes complementares, tais como livros e artigos científicos. Além disso, esperamos que você se sinta motivado a buscar melhorias e soluções para contribuir, enquanto profissional, para a gestão de emissões atmosféricas. Bons estudos!

Sem medo de errar

Desde a Revolução Industrial, no século XVIII, as atividades humanas vêm emitindo diariamente uma infinidade de poluentes na atmosfera, sendo que até pouco tempo, pouco se falava sobre as consequências e repercussões dessas emissões para o meio ambiente. Porém, diante das consequências da poluição do ar, tanto para o meio ambiente quanto para a saúde da populações, estudos têm sido desenvolvidos sobre essa temática.

Vamos relembrar o nosso contexto de aprendizagem: você foi contratado por uma consultoria ambiental especializada no ramo de qualidade do ar, que irá prestar serviço para um município paulista preocupado com a qualidade do ar e suas repercussões para cidade, tanto do ponto de vista econômico e social, quanto em relação à saúde da população. Você, juntamente com a equipe de consultores, deverá realizar um estudo sobre as repercussões da poluição atmosférica. O resultado final do estudo será um relatório técnico da relação da qualidade do ar com a qualidade de vida que será apresentado ao prefeito, para que ele tome as devidas providências. Esse relatório será elaborado em três partes, sendo que a primeira será referente aos efeitos gerais dos poluentes atmosféricos. Portanto, para dar início ao relatório técnico, você e os demais consultores deverão realizar um levantamento bibliográfico de estudos de caso sobre os efeitos gerais dos poluentes atmosféricos. Para isso, deverão responder às seguintes perguntas norteadoras: quais os principais fenômenos atmosféricos observados em áreas urbanas? Qual a relação de cada um desses efeitos com a poluição do ar? Qual a relação entre os poluentes atmosféricos e a camada de ozônio? De que forma o balanço térmico do planeta influencia esses fenômenos atmosféricos? Para responder à situação-problema, suponha uma cidade hipotética, que está localizada sobre um buraco na camada de ozônio. Além disso, a cidade se localiza em um vale que está em altas altitudes, próximo a uma área industrial, sobretudo com termoelétricas.

Cabe lembrar que a qualidade do ar em uma determinada região é influenciada não somente pelas emissões atmosféricas, mas também por fenômenos naturais, que acabam se intensificando com a poluição, como é o caso do efeito estufa.

O efeito estufa é um fenômeno natural, responsável pelo

balanço térmico do planeta, uma vez que os gases presentes na atmosfera, como o gás carbônico (CO_2), o metano (CH_4), o óxido nitroso (N_2O) e ozônio (O_3), além do vapor de água, possuem a capacidade de reter calor na Terra, o que garante a existência dos seres vivos. Porém, as emissões atmosféricas, sobretudo dos gases do efeito estufa, aumentam a concentração desses na atmosfera e, consequentemente, provocam o aumento da temperatura. Esse aumento pode ser prejudicial a espécies mais sensíveis às variações térmicas. Além disso, as emissões atmosféricas, sobretudo aquelas que emitem compostos de cloro, como os clorofluorcarbonetos, hidroclorofluorcarbonos (HCFCs), halons, brometo de metila, tetracloreto de carbono (CTC), metilclorofórmio e hidrobromofluorcarbonos (HBFCs), podem reagir com o ozônio da camada de ozônio, provocando sua depleção. Uma vez que a camada de ozônio atua como um filtro contra os raios UV, sua depleção expõe os seres vivos às ações maléficas desses raios solares, trazendo consequências graves, como queimaduras. Outro efeito prejudicial provocado pelas emissões atmosféricas é a chuva ácida, formada quando os óxidos de enxofre e os óxidos de nitrogênio em altas altitudes, como neste caso, reagem com a água, o oxigênio e outros oxidantes, formando uma solução de ácido nítrico (HNO_3) e ácido sulfúrico (H_2SO_4). Essa chuva ácida traz malefícios para os seres vivos, para as florestas, para o solo, para os ambientes construídos, entre outros. Além desses problemas, é possível observar os fenômenos: *smog* fotoquímico no município e o *smog* industrial no seu entorno, já que há uma área industrial próxima à cidade.

Dentre os diferentes poluentes emitidos diariamente, os óxidos de nitrogênio e os oxidantes atmosféricos têm função especial na formação do *smog* fotoquímico, cujo significado é "nuvem de fumaça", que ocorre principalmente em grandes centros urbanos. Como resultado, tem-se uma camada de poeira, de cor avermelhada, localizada próxima ao solo. Cabe ressaltar que esse fenômeno pode se intensificar por outro fenômeno (natural): a inversão térmica. Ela ocorre quando uma camada de ar mais frio (mais denso) está próxima ao solo e não consegue subir para as camadas mais altas da atmosfera, não havendo dispersão dos poluentes, o que favorece as reações fotoquímicas.

Já o *smog* industrial pode ser observado no entorno deste

município. Esse fenômeno é formado a partir da combustão de combustíveis fósseis, em que os óxidos de enxofre, como o dióxido de enxofre (SO_2) e o trióxido de enxofre (SO_3), ao reagirem com o vapor de água presente no ar, formam ácido sulfúrico (H_2SO_4), que além de concentrarem muita fumaça na região, também fazem parte do processo de formação da chuva ácida.

Para que você consiga entregar o produto desta seção, é importante relacionar esses fenômenos entre si, sendo naturais ou não, para que as melhores alternativas de controle sejam tomadas. Lembre-se de que também é importante agregar informações sobre as características meteorológicas da região. Bom trabalho.

Avançando na prática

Inversão térmica: neve ou neblina cinza?

Descrição da situação-problema

A atmosfera pode ser dividida em camadas, que estão relacionadas com propriedades físicas e químicas e com a mudança de temperatura de acordo com a altura. Dentre as camadas, a troposfera é a primeira camada que se estende do nível do mar até 15 quilômetros de altitude, onde a temperatura diminui com o aumento da altitude, estão presentes os gases da atmosfera e se formam as correntes de convecção.

Nesse contexto, imagine a seguinte situação: no início do inverno de 2017, 1500 pessoas subiram até a parte alta do Parque Nacional de Itatiaia (PNI) para aguardar a neve, já que os termômetros marcavam temperaturas negativas. Porém, não nevou, mas choveu e "sincelou". As geadas, mais fáceis de ocorrer, são frequentes na região. Porém, para nevar, é preciso uma combinação de frio abaixo de zero, ar quase saturado de umidade e chuva. Havia previsão para que essa combinação ocorresse no final de semana em Itatiaia, porém, uma inversão térmica não permitiu.

Suponha que você faça parte da equipe de profissionais de um instituto de meteorologia da região e precise explicar para a população por que não nevou naquele dia. Para isso, baseie-se nas seguintes perguntas norteadoras: o que é inversão térmica? Por que as pessoas viram uma neblina cinza no lugar de neve? Qual a relação da inversão térmica com o *smog* fotoquímico, o inverno e o que as pessoas observaram?

Resolução da situação-problema

A inversão térmica é um fenômeno atmosférico natural. Normalmente, a camada atmosférica mais próxima do solo é mais quente e esfria à medida que se afasta do solo. Porém, durante a inversão térmica, uma camada de ar mais frio, que é mais denso, está próxima ao solo e não consegue subir para as camadas mais altas da atmosfera, não havendo dispersão dos poluentes, o que favorece as reações fotoquímicas. Os óxidos de nitrogênio, poluentes emitidos pelos veículos automotores, e os oxidantes atmosféricos têm função especial na formação do *smog* fotoquímico (nuvem de fumaça), fenômeno que ocorre nos centros urbanos. No inverno, quando as condições climáticas são pouco favoráveis à dispersão de poluentes atmosféricos, há pouco vento e os dias são claros, com grande incidência solar, e essa nuvem de fumaça não consegue ascender. Como resultado, temos uma camada de poeira, localizada próxima ao solo. Na cidade de Itatiaia, apesar de haver possibilidade de nevar, devido à umidade e à chuva, não houve temperatura suficiente, devido a uma inversão térmica. Houve uma inversão térmica e a temperatura, a 3 mil metros de altitude, estava próxima de zero, mas, acima disso, estava um pouco mais alta, ou seja, não houve frio suficiente, mas sim uma condição favorável para a visualização do *smog* fotoquímico.

Faça valer a pena

1. Nos centros urbanos, os _____ são um dos principais poluentes secundários, uma vez que provêm de reações químicas da atmosfera. De uma maneira geral, esses poluentes e outros _____ atmosféricos têm função especial na formação do _____.
Agora, assinale a alternativa que preencha corretamente as lacunas do texto:

a) Óxidos de ozônio; poluentes; *smog* industrial.
b) Óxidos de nitrogênio; oxidantes; *smog* fotoquímico.
c) Óxidos de enxofre; oxidantes; *smog* fotoquímico.
d) Óxidos de nitrogênio; poluentes; *smog* industrial.
e) Hidrocarbonetos; poluentes; *smog* industrial.

2. Naturalmente, a água da chuva possui uma acidez (pH por volta de 5,6) proveniente da dissolução do CO_2, mas essa acidez tem sido intensificada nas últimas décadas devido aos poluentes atmosféricos.

Com base no contexto apresentado, assinale a alternativa que contém os principais poluentes que acidificam a chuva:

a) Dióxido de carbono e óxidos de nitrogênio.
b) Dióxido de carbono e óxidos de enxofre.
c) Monóxido de carbono e óxidos de nitrogênio.
d) Óxidos de enxofre e óxidos de nitrogênio.
e) Monóxido de carbono e óxidos de enxofre.

3. No inverno, aumentam-se os casos de problemas respiratórios nos centros urbanos, já que nesta estação do ano as condições climáticas são pouco favoráveis à dispersão de poluentes atmosféricos, uma vez que há pouco vento e os dias são claros, com grande incidência solar.

Essas condições desfavoráveis à dispersão de poluentes ocorrem durante qual fenômeno atmosférico?

a) Inversão térmica.
b) Efeito estufa.
c) *Smog* fotoquímico.
d) Chuva ácida.
e) *Smog* industrial.

Seção 4.2

A poluição atmosférica e a saúde humana

Diálogo aberto

Caro aluno,

O atual modelo de desenvolvimento econômico e o crescente aumento da população provocam alterações no meio ambiente, seja no solo, nos cursos de água ou através da emissão de poluentes na atmosfera. Essas alterações, sobretudo relacionadas à poluição do ar e, considerando a ausência de avanços para o controle e/ou redução dessas emissões, têm preocupado as agências de saúde, visto que a poluição do ar tem sido protagonista quando se fala em doenças respiratórias.

Porém, a gestão das emissões atmosféricas é um grande desafio para os órgãos ambientais e de saúde, considerando a complexidade de se estabelecer o nexo causal entre as exposições e a ocorrência de doenças ou outros efeitos adversos. Isso porque vários fatores devem ser considerados, tais como a escassez de informações sobre a dispersão de poluentes na atmosfera, a múltipla exposição a diferentes agentes no cotidiano, tanto em ambientes internos quanto externos, e a falta de controle e monitoramento ambiental em variados locais.

Diante do exposto, imagine a seguinte situação: você acaba de ser contratado por uma consultoria ambiental, especializada no ramo de qualidade do ar. A consultoria irá prestar serviço para um município paulista que está preocupado com a qualidade do ar e suas repercussões para a cidade, tanto do ponto de vista econômico e social quanto em relação à saúde da população. Juntamente com a equipe de consultores, vocês deverão realizar um estudo das repercussões da poluição atmosférica cujo resultado final será um relatório técnico da relação da qualidade do ar com a qualidade de vida, que será apresentado ao prefeito para que ele tome as devidas providências. Na primeira parte, foi realizado um estudo teórico sobre alguns fenômenos atmosféricos e suas relações com os poluentes. Agora, você deve realizar a segunda parte do relatório técnico. Para isso, siga as perguntas norteadoras: quais os principais poluentes prejudiciais à saúde humana? Quais as patologias que os poluentes podem ocasionar? Qual a relação entre a poluição atmosférica e a

qualidade de vida na área urbana e na área rural desse município? Quais os principais poluentes atmosféricos encontrados na área rural? Lembre-se de considerar como ambiente de estudo uma cidade hipotética, que está localizada sobre um buraco na camada de ozônio. Além disso, a cidade se localiza em um vale que está em altas altitudes, próximo a uma área industrial, sobretudo com termoelétricas.

Vamos lá? Bons estudos!

Não pode faltar

Iniciamos a Unidade 4 estudando as repercussões gerais da poluição atmosférica, como o *smog* fotoquímico e industrial, a chuva ácida e a depleção da camada de ozônio, além de discutirmos de que forma a poluição do ar interfere nos fenômenos naturais como o efeito estufa e a inversão térmica.

Agora na Seção 2, iremos estudar os principais poluentes que afetam a saúde da população, as principais patologias do sistema respiratório e a relação da poluição do ar com a qualidade de vida nos centros urbanos e na área rural.

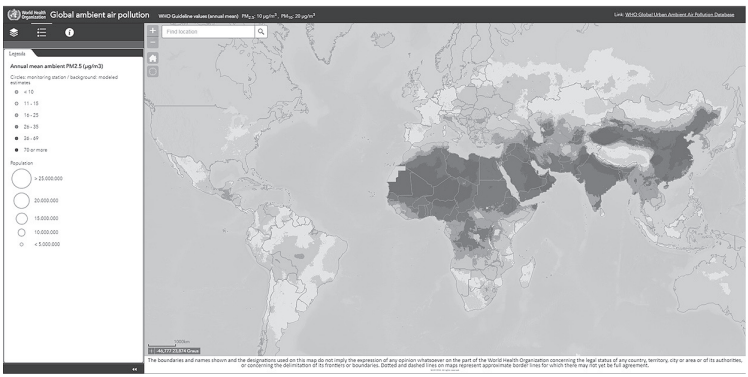
É fato que as atividades humanas afetam o meio ambiente. Porém, nos últimos séculos, o crescimento vertiginoso da população associado a um modelo de crescimento econômico pautado no consumo tem impactado o meio ambiente de forma devastadora, afetando inclusive a saúde das pessoas. Dentre os diferentes impactos ambientais, ressalta-se a poluição atmosférica, pela complexidade de se controlar e monitorar as emissões atmosféricas, bem como de se estabelecer o nexo causal entre a poluição do ar e a saúde da população.

Estudamos, nas primeiras unidades deste livro, que as emissões atmosféricas podem ter origem natural (vulcões e tempestades de areia, por exemplo) ou antrópicas (como queima de combustíveis fósseis). As emissões atmosféricas de origem antrópica podem ser de fontes fixas, como as indústrias, e de fontes móveis, como os veículos automotores, sendo que ambas impactam diretamente na qualidade do ar e consequentemente na saúde pública. Vimos que atualmente o setor de transporte é a principal causa da poluição nos centros urbanos, devido à queima de combustíveis fósseis.

Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS, 2016), em 2012, cerca de 6,5 milhões de mortes foram associadas à poluição do ar, tanto em ambientes abertos (*outdoor*) quanto em ambientes

fechados (*indoor*). Diante disso, atualmente a poluição atmosférica tem sido foco de estudos em todo o mundo, sobretudo sobre os efeitos da poluição do ar para a saúde. A própria OMS criou um modelo que mostra os locais de perigo em relação à poluição do ar nos países, fornecendo uma linha de base para monitorar progressos no combate à poluição (Figura 4.5).

Figura 4.5 | Mapa interativo da OMS: poluição global do ar



Fonte: <http://maps.who.int/airpollution/>. Acesso em: 30 ago. 2017.

A OMS (2016) alerta que 92% da população mundial vive em locais onde os níveis de qualidade do ar excedem as diretrizes de qualidade do ar ambiente da OMS para a média anual de partículas com um diâmetro inferior a 2,5 micrômetros (PM2.5), que é de 10 $\mu g/m^3$, e para partículas com diâmetro inferior a 10 micrômetros (PM10) que é de 20 $\mu g/m^3$, como podemos observar na Figura 4.5.

Pesquise mais

Preocupada com o alto número de mortes provocadas pela poluição do ar, a OMS lançou a campanha batizada como "Breathe Life" (Respire a Vida), com o objetivo de reduzir pela metade as mortes provocadas pela contaminação atmosférica até 2030. Para alcançar esse objetivo, a OMS conta com o apoio de políticas de combate à poluição. No site da campanha, <http://breathelife2030.org/>, é possível encontrar dados estatísticos sobre 3 mil cidades no mundo, a qualidade do ar e os principais problemas de saúde provenientes dessa poluição. Leia mais em:

BF CAPITAL. **Cidades vão tirar veículos a diesel de circulação até 2025.** 2017. Disponível em:

<http://www.bfcapital.com.br/cidades-vao-tirar-veiculos-a-diesel-de-circulacao-ate-2025/>. Acesso em: 30 ago. 2017.

A campanha Breathe Life mostra, por exemplo, que no Rio de Janeiro o ar possui 16 $\mu g/m^3$ de partículas com diâmetro inferior a 2,5 micrômetros (PM2.5), ou seja, concentração 60% superior à considerada segura pela OMS. Vale ressaltar que no Brasil a legislação não tem padrão estabelecido para o PM2.5.

Reflita

Que tipo de políticas públicas o Brasil vem tomando ou poderia tomar para reduzir as suas emissões atmosféricas?

Estudamos nas primeiras unidades que os principais poluentes monitorados no Brasil são os óxidos de nitrogênio (NO_x), os compostos orgânicos voláteis, o monóxido de carbono, o dióxido de enxofre (SO_2), o ozônio (O_3), as partículas totais em suspensão, as partículas inaláveis e a fumaça, cujos padrões estão estabelecidos na Resolução Conama nº 03/1990. Além disso, vale ressaltar que, segundo a Resolução Conama nº382/2006, em seu art. 3º, o material particulado é "todo e qualquer material sólido ou líquido, em mistura gasosa, que se mantém neste estado na temperatura do meio filtrante, estabelecida pelo método adotado" (BRASIL, 2006, p. 3).

Os materiais particulados são classificados conforme o diâmetro da partícula, sendo formados por múltiplos constituintes químicos, tais como compostos inorgânicos, como sulfatos e nitratos, metais de transição sob a forma de óxidos, sais solúveis, compostos orgânicos, como hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, e material biológico, como pólen, bactérias, esporos e restos animais. Dentre os materiais particulados, merecem destaque aqueles que possuem partículas com diâmetro inferior a 10 µm (MP10 ou fração inalável) e partículas com diâmetro inferior a 2,5 µm (MP2,5 ou fina), devido aos efeitos sobre a saúde humana. Porém, todos os poluentes monitorados são danosos para a saúde, conforme pode ser observado no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 | Principais poluentes atmosféricos, suas áreas de ação no sistema respiratório e efeitos sobre a saúde humana

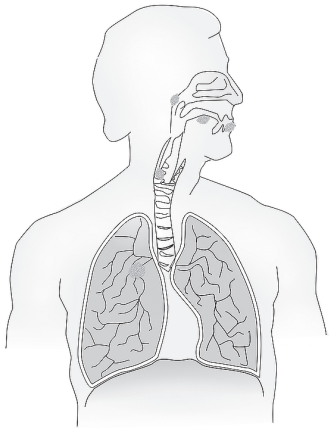
Poluente	Penetração no sistema respiratório	Efeitos na saúde humana

MP10	Traqueia, brônquios, bronquíolos	Diminui a função mucociliar e altera a função dos macrófagos; irrita as vias respiratórias; provoca estresse oxidativo*; inflamação pulmonar e sistêmica; causa alterações estruturais dos brônquios.
MP2,5	Alvéolos	
O_3	Traqueia, brônquios, bronquíolos, alvéolos	Causa irritação das vias aéreas e dos olhos; inflamação da mucosa do trato respiratório; desconforto torácico; lesão no tecido epitelial das vias aéreas; inflamação e obstrução das vias aéreas a estímulos como o frio e exercícios.
NO_x	Traqueia, brônquios, bronquíolos, alvéolos	Irrita a mucosa dos olhos e das vias aéreas; aumenta a suscetibilidade às infecções e aos alérgenos.
SO_2	Vias aéreas superiores, traqueia, brônquios, bronquíolos	Irrita a mucosa dos olhos e do trato respiratório; aumenta a reatividade brônquica, facilitando a broncoconstrição.
CO	Alvéolos, corrente sanguínea	Afeta o transporte de oxigênio por se ligar à hemoglobina; provoca cefaleia, náuseas e tontura; tem efeito deletério sobre o feto e está associado com recém-nascidos de baixo peso e morte fetal.

Fonte: adaptado de Arbex et al. (2012, p. 645).
* Estresse oxidativo consiste no desequilíbrio entre a produção de espécies reativas de oxigênio e a sua desintoxicação, a fim de evitar danos aos sistemas biológicos.

Os efeitos adversos na saúde, relatados no Quadro 4.1, são, de maneira geral, efeitos agudos. Porém, não podemos deixar de mencionar os efeitos crônicos da poluição do ar. Os efeitos agudos são aqueles que se manifestam após um curto espaço de tempo entre a exposição e os efeitos (horas ou dias). Arbex et al. (2012) relatam que os efeitos crônicos são avaliados geralmente em estudos longitudinais com duração de anos ou décadas. É possível observar ainda que as principais vias de entrada dos poluentes ocorrem pelas narinas e pela garganta, podendo atingir os pulmões, brônquios e alvéolos pulmonares, conforme Figura 4.6.

Figura 4.6 | Vias de entrada dos poluentes no corpo humano



Fonte: <https://pixabay.com/pt/c%C3%A2ncer-carcinoma-met%C3%A1stases-156101/>. Acesso em: 30 ago. 2017.

Os principais efeitos agudos são: (1) aumento da mortalidade; (2) exacerbação dos sintomas de doenças respiratórias como a asma; (3) aumento da frequência de infecções respiratórias agudas; (4) aumento do número de internações por pneumonia; (5) aumento da prevalência de sintomas e sinais de irritação; (6) alterações agudas na função pulmonar; (7) aumento da taxa de absenteísmo no trabalho e na escola; entre outros.

Já os efeitos crônicos são: (1) aumento da mortalidade por doenças respiratórias; (2) aumento da incidência e mortalidade por câncer de pulmão; (3) alterações crônicas na função pulmonar; (4) menor desenvolvimento pulmonar em crianças; (5) recém-nascidos com baixo peso; (6) partos prematuros; (7) alterações no desenvolvimento cognitivo das crianças; entre outros.

Cabe ressaltar que esses efeitos são intensificados em grupos de maior suscetibilidade, como idosos, gestantes, portadores de doenças crônicas preexistentes e crianças.

Pode-se perceber que os efeitos da poluição do ar na saúde são preocupantes e, nesse contexto, a Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE, 2016) estima que até 2060 cerca de 6 a 9 milhões de pessoas irão morrer prematuramente em decorrência da poluição do ar. É o mesmo que dizer que ocorrerá uma morte a cada 4 a 5 segundos.

Além disso, é importante salientar os impactos socioeconômicos disso. Por exemplo, uma pesquisa realizada em 29 regiões

metropolitanas no Brasil mostrou que, em 2014, cerca de 2% do total do orçamento do Ministério da Saúde foram destinados a essa questão. Porém, não foram contabilizados os gastos com internações, medicamento e redução da produtividade em indivíduos afetados, ou seja, trata-se de uma porcentagem que pode ser ainda maior. Portanto, conclui-se que o aumento das emissões atmosféricas, ao longo do tempo, terá um impacto direto na economia global, sendo que a OCDE estima que os custos com a poluição atmosférica aumentarão de US$ 21 bilhões em 2015 para US$ 176 bilhões entre 2050 e 2060.

Exemplificando

Na Europa, por exemplo, segundo a OMS (2016), a poluição atmosférica é responsável por um gasto de 1,6 trilhão de dólares por ano em mortes e doenças.

Outro aspecto importante a ser discutido são os efeitos da poluição do ar na saúde das comunidades rurais e de cidades interioranas, pois, apesar de aparentarem possuir uma boa qualidade do ar, nem sempre isso é constatado. A má qualidade do ar nessas regiões, onde as emissões são baixas, está relacionada à dispersão de poluentes na atmosfera, conforme estudamos anteriormente. Dessa forma, as emissões atmosféricas de uma determinada região podem, através dos ventos e das massas de ar, ser carregadas para áreas distantes, provocando efeitos como a chuva ácida e até mesmo afetando a saúde das pessoas que vivem nessa região. Além disso, é importante lembrar que atividades de mineração, de maneira geral, localizam-se em regiões afastadas e, por exemplo, podem lançar diariamente material particulado na atmosfera próximo a comunidades rurais. As próprias atividades agrícolas podem lançar material particulado na atmosfera, provenientes do preparo do solo, da utilização de adubos químicos e fitossanitários.

Assimile

Mesmo afastadas geograficamente das emissões atmosféricas provenientes de veículos automotores, as cidades interioranas e a zona rural não estão isentas de sofrerem com os efeitos da poluição do ar.

Discutimos até aqui os efeitos da poluição atmosférica na saúde da população, considerando o ambiente externo, mas os ambientes

internos também são fontes de poluição do ar, conforme discutimos na Unidade 3. Então, quais seriam os principais efeitos da poluição do ar interno na saúde humana?

Vimos na Seção 1 desta unidade que a preocupação com a Qualidade do Ar Interno (QAI) está relacionada à tendência em se construir edifícios fechados, com sistemas de ventilação e climatização artificiais, como o exaustor e o ar condicionado. Porém, estudos realizados pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA, 2000) mostraram que, em ambientes fechados, os níveis de concentração de poluentes podem ser de 2 a 5 vezes maiores do que em ambientes externos, o que traz riscos à saúde humana.

Dentre os poluentes atmosféricos em ambientes internos, estão aqueles descritos anteriormente para ambientes externos, além de substâncias provenientes de materiais de limpeza, mofo, atividades domésticas (varrer, cozinhar, lavar), fumaça de cigarro, além da presença de microrganismos (fungos, bactérias, vírus) potencialmente causadores de doenças.

Desses poluentes, ressalta-se principalmente a fumaça do cigarro e, por isso, em 2011, foi aprovada a Lei Antifumo, de 12.546 (Figura 4.7), que proíbe o ato de fumar cigarrilhas, charutos, cachimbos, narguilés e outros produtos em locais de uso coletivo, públicos ou privados, como halls e corredores de condomínios, restaurantes e clubes – mesmo que o ambiente esteja parcialmente fechado por uma parede, divisória ou toldo.

Figura 4.7 | Símbolo "Proibido fumar"

Fonte: <https://pixabay.com/p-145888/?no_redirect>. Acesso em: 30 ago. 2017.

Em consequência desse contexto, surgiu o conceito de Síndrome dos Edifícios Doentes (SED) que, segundo a OMS (2016), é definido

como uma situação em que os ocupantes de um edifício apresentam sintomas sem origem determinada e de etiologia desconhecida. Um edifício é considerado doente, quando pelo menos 20% de seus ocupantes apresentam efeitos agudos, tais como irritação das mucosas, efeitos neurotóxicos (enxaqueca, tontura), sintomas respiratórios e cutâneos e alterações dos sentidos, por no mínimo duas semanas, mas que desapareçam quando se afastam do edifício. Considerando os poluentes atmosféricos aos quais as pessoas estão expostas nos ambientes internos, podem-se citar como principais doenças causadas por causa da má qualidade do ar: reações alérgicas, deficiência respiratória, letargia, febre e problemas digestivos, pneumonia, rinite e asma. Além disso, pela característica da presença de microrganismos em ambientes internos, que acabam por favorecer a sua propagação, surgem doenças como a febre do umidificador, causada pelas toxinas de microrganismos que crescem nos sistemas de ventilação, a asma brônquica, a pneumonite alérgica ou alveolite extrínseca, e a pneumonia infecciosa (bactérias como *Streptococcus pneumoniae*, *Mycoplasma pneumoniae*, *Staphylococcus aureus*, *Legionella* e *Haemophilus influenzae*, vírus e alguns tipos de fungos).

Encerramos aqui o nosso estudo sobre os efeitos da poluição do ar na saúde das pessoas.

Pesquise mais

Caso queria aprofundar os seus conhecimentos, buscando leituras complementares, você pode realizar a leitura do artigo a seguir.

FREITAS, C. U. et al. Poluição do ar em cidades brasileiras: selecionando indicadores de impacto na saúde para fins de vigilância. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, Brasília, v. 22, n. 3, p. 445-454, jul./set. 2013. Disponível em: <http://scielo.iec.pa.gov.br/pdf/ess/v22n3/v22n3a09.pdf>. Acesso em: 16 ago. 2017.

Essa e outras leituras sobre o tema são imprescindíveis para que você compreenda a dimensão das consequências da poluição do ar, não somente do ponto de vista da saúde, mas de que forma isso afeta o desenvolvimento econômico e social de uma região ou país. Além disso, é importante que você, enquanto futuro profissional, enxergue essas consequências de uma maneira abrangente, para que alternativas e medidas de controle sejam desenvolvidas e adotadas, buscando a melhoria da qualidade do ar e, consequentemente, da qualidade de vida da população. Bons estudos e até breve!

Sem medo de errar

Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), 92% da população mundial vive em locais onde os níveis de qualidade do ar excedem os limites por ela estabelecidos como seguros à saúde. Essa exposição tem colocado a vida das pessoas em risco, visto que cresce o número de internações hospitalares e mortes prematuras relacionadas à má qualidade do ar, sobretudo nos centros urbanos e em ambientes fechados. Diante disso, vamos relembrar o nosso contexto de aprendizagem: você foi contratado por uma consultoria ambiental que irá prestar serviço para um município paulista preocupado com a qualidade do ar e suas repercussões para cidade. Foi solicitado um estudo das repercussões da poluição atmosférica cujo resultado final será um relatório técnico da relação da qualidade do ar com a qualidade de vida da população, que será apresentado ao prefeito para que ele tome as devidas providências. Em um primeiro momento, foi realizado um estudo teórico sobre alguns fenômenos atmosféricos e suas relações com os poluentes. A segunda parte consiste em realizar um levantamento sobre as patologias associadas à poluição do ar na cidade. Para isso, você irá se basear nas perguntas norteadoras: quais os principais poluentes prejudiciais à saúde humana? Quais as patologias que os poluentes podem ocasionar? Qual a relação entre a poluição atmosférica e a qualidade de vida na área urbana e na área rural desse município? Quais os principais poluentes atmosféricos encontrados na área rural? Lembre-se de considerar como ambiente de estudo uma cidade hipotética, que está localizada sobre um buraco na camada de ozônio. Além disso, a cidade se localiza em um vale que está em altas altitudes, próximo a uma área industrial, sobretudo com termoelétricas.

Os principais poluentes monitorados no Brasil são os óxidos de nitrogênio (NO_x), os compostos orgânicos voláteis, o monóxido de carbono, o dióxido de enxofre (SO_2), o ozônio (O_3), as partículas totais em suspensão, as partículas inaláveis e a fumaça, cujos padrões estão estabelecidos na Resolução Conama nº 03/1990. Além disso, vale ressaltar que, segundo a Resolução Conama nº 382/2006, em seu art. 3º, material particulado é "todo e qualquer material sólido ou líquido, em mistura gasosa, que se mantém neste estado na temperatura do meio filtrante, estabelecida pelo método adotado" (BRASIL, 2006, p. 3). Dentre os materiais particulados, merecem destaque aqueles que possuem partículas com diâmetro inferior a 10 μm (MP10 ou fração inalável)

e partículas com diâmetro inferior a 2,5 μm (MP2,5 ou fina), devido aos efeitos sobre a saúde humana. Esses poluentes são encontrados tanto em ambientes externos quanto internos. Porém, ressalta-se que em ambientes internos a concentração desses poluentes pode ser maior, devido à ausência de ventilação natural. Outro fator importante relacionado ao ambiente interno é a presença e disseminação de microrganismos patogênicos, como fungos, vírus e bactérias, que podem aumentar a incidência de pessoas com pneumonia, gripe e outras doenças respiratórias. No caso da cidade proposta como ambiente de estudo, é preciso considerar que a dispersão de poluentes é dificultada pela própria topografia da região, uma vez que a cidade está localizada em um vale. Além disso, ainda que ela seja uma cidade interiorana, não está isenta de sofrer com a poluição do ar, visto que os poluentes se dispersam na atmosfera através dos ventos. Essa mesma linha de pensamento pode ser empregada para zona rurais, uma vez que se pensa erroneamente que o ar do campo é mais limpo, mas isso pode não ser verdade, considerando a dinâmica da atmosfera, a proximidade de atividades industriais, como as termoelétricas neste caso, e a dispersão de poluentes.

Portanto, todos os poluentes monitorados são danosos para a saúde, podendo provocar efeitos agudos e crônicos. Dentre os efeitos agudos, podemos citar: (1) aumento da mortalidade; (2) exacerbação dos sintomas de doenças respiratórias como a asma; (3) aumento da frequência de infecções respiratórias agudas; (4) aumento do número de internações por pneumonia (5) aumento da prevalência de sintomas e sinais de irritação; (6) alterações agudas na função pulmonar; (7) aumento da taxa de absenteísmo no trabalho e na escola, entre outros. Já os efeitos crônicos são: (1) aumento da mortalidade por doenças respiratórias; (2) aumento da incidência e mortalidade por câncer de pulmão; (3) alterações crônicas na função pulmonar; (4) menor desenvolvimento pulmonar em crianças, (5) recém-nascidos com baixo peso; (6) partos prematuros; (7) alterações no desenvolvimento cognitivo das crianças, entre outros.

Esses efeitos têm impactos socioeconômicos, sobretudo no orçamento do Ministério da Saúde e, consequentemente, no orçamento da Secretaria de Saúde do município. Por isso, torna-se imprescindível que o município realize uma pesquisa correlacionando a qualidade do ar na cidade com o número de internações e mortes relacionadas com a poluição do ar, para que as medidas corretas sejam tomadas. Para enriquecer o seu relatório, você pode buscar

essas informações junto à Secretaria de Saúde do município e aos hospitais e agregá-las aos seus levantamentos acerca da qualidade do ar na cidade. Bom trabalho!

Avançando na prática

Compilação de dados: doenças respiratórias e qualidade do ar

Descrição da situação-problema

Cubatão é um município do estado de São Paulo cuja principal atividade econômica é a industrial. Durante muitos anos, Cubatão foi chamado de "Vale da Morte", devido às consequências da poluição do ar sobre a saúde da população. Atualmente, o município possui três estações de monitoramento da qualidade do ar, que são operadas pela CETESB, sendo uma delas localizada no centro da cidade. Nesse contexto, imagine a seguinte situação hipotética: você é funcionário da CETESB e, a pedido do Secretário de Saúde de Cubatão, deverá realizar uma pesquisa sobre a relação entre a poluição do ar em Cubatão e as internações hospitalares relacionadas com doenças respiratórias. Para realizar a pesquisa, você deverá utilizar dados secundários disponíveis no portal do *Projeto de avaliação de impacto da poluição do ar nas cidades brasileiras* (<http://www.observandosaopaulo.com.br/>), usando como filtro o intervalo de tempo entre "2003 a 2009", na aba "morbidade". Considerando esse contexto e os dados coletados, estruture a sua pesquisa respondendo às seguintes perguntas: quais são os poluentes amostrados na estação de monitoramento da qualidade do ar? Em relação ao período entre 2003 e 2009, o número de internações por doenças respiratórias diminuiu ou aumentou? Apresente argumentos que justifiquem essa diminuição/aumento. Quais as principais doenças respiratórias relacionadas à poluição do ar e quais os seus impactos econômicos?

Resolução da situação-problema

Os poluentes atmosféricos são amostrados nas estações de monitoramento da qualidade do ar medindo-se as concentrações horárias de material particulado (PM10), ozônio (O_3), dióxido de nitrogênio (NO_2), dióxido de enxofre (SO_2), além de variáveis meteorológicas, tais como temperatura e umidade. Além disso, lembre-se de que as condições meteorológicas podem aumentar a duração da exposição aos poluentes ao impedir a sua dispersão, sobretudo em áreas de vales, como é o caso de Cubatão.

Ao analisar os dados de morbidade em Cubatão, entre 2003 e 2009 (Tabela 4.1), observa-se que houve uma redução do número de internações relacionadas às doenças respiratórias de uma forma geral, mas sobretudo para faixa etária menor do que 5 anos de idade. Essa redução pode estar relacionada com a melhoria dos processos industriais e uso de equipamentos antipoluição por parte das indústrias. Porém, observa-se que as internações relacionadas às doenças respiratórias para maiores de 60 anos de idade aumentaram, fato que pode estar relacionado ao tempo de exposição aos poluentes.

Tabela 4.1 | Dados de morbidade DATASUS de Cubatão

Ano	Internações	Respiratória	Respiratória > 60	Respiratória < 5	Cardio > 40	Respiratória + Cardio > 40
2003	7.775	1.004 12,91%	138 1,77%	610 7,85%	631 8,12%	1.635 21,03%
2004	7.614	668 8,77%	86 1,13%	398 5,23%	493 6,47%	1.161 15,25%
2005	7.764	715 9,21%	125 1,61%	351 4,52%	567 7,30%	1.282 16,51%
2006	8.025	794 9,89%	110 1,37%	471 5,87%	555 6,92%	1.349 16,81%
2007	8.063	809 10,03%	100 1,24%	515 6,39%	530 6,57%	1.339 16,61%
2008	7.285	694 9,53%	101 1,39%	317 4,35%	546 7,49%	1.240 17,02%
2009	7.128	627 8,80%	150 2,10%	202 2,83%	577 8,09%	1.204 16,89%

Fonte: Observando São Paulo (2012).

Entre as doenças respiratórias relacionadas à poluição do ar, podem-se citar, principalmente, a rinite, a bronquite, a pneumonia e a asma. Porém, cabe ressaltar que existem três tipos principais de reação aos poluentes: os efeitos agudos em pessoas sadias, a exacerbação de doenças preexistentes e os fenômenos de hipersensibilidade imunológica ou de hiper-reatividade brônquica não específica. A exacerbação de doenças preexistentes pode ser observada na Tabela 4.1, em que o número de internações relacionadas às doenças respiratórias em associação com doença cardiovascular é bastante representativo quando comparado ao número total de internações, para todos os anos pesquisados. Diante disso, fica evidente a necessidade de controlar as emissões atmosféricas, para que a qualidade de vida e a saúde das pessoas não sejam afetadas. Além disso, também é preciso considerar que o aumento de problemas de saúde relacionados à qualidade do ar reflete em custos públicos e privados diretos, como a perda de produtividade (dias de trabalho perdidos), atividades restritas ou morte prematura e despesas médicas (tratamentos, exames e medicamentos).

Faça valer a pena

1. A poluição do ar tem trazido prejuízos para saúde humana. Diante disso, a legislação brasileira estabeleceu padrões para determinados poluentes. Os principais poluentes monitorados no Brasil são: _____, compostos orgânicos voláteis, _____, dióxido de enxofre, _____, partículas totais em suspensão, partículas inaláveis e fumaça, cujos padrões estão estabelecidos na Resolução Conama n° 03/1990.

Agora, assinale a alternativa que preenche corretamente as lacunas do texto:

a) Óxidos de nitrogênio, monóxido de carbono e ozônio.
b) Dióxido de nitrogênio, hidrocarbonetos e ozônio
c) Óxidos de nitrogênio, dióxido de carbono e material particulado.
d) Óxidos de nitrogênio, dióxido de carbono e material particulado.
e) Óxidos de enxofre, dióxido de nitrogênio e ozônio.

2. O ozônio, quando presente na troposfera (camada inferior da atmosfera), é um poluente secundário, ou seja, não é emitido diretamente, mas é formado a partir da reação fotoquímica com outros elementos, sendo capaz de provocar efeitos adversos na saúde humana.

Considerando os efeitos adversos do ozônio na saúde humana, assinale a alternativa correta:

a) Facilita a broncoconstrição.
b) Provoca pneumonia infecciosa.
c) Provoca irritação nos olhos e nas vias aéreas.
d) Provoca asma e bronquite.
e) Provoca cefaleia, náuseas e tonturas.

3. A poluição do ar tem sido motivo de preocupação entre as autoridades mundiais, já que tem afetado de forma preocupante a saúde das pessoas, seja através de efeitos agudos ou crônicos. A Organização Mundial de Saúde (OMS) estima que, em 2012, cerca de 6,5 milhões de mortes foram associadas à poluição do ar.

Considerando o contexto apresentado, assinale a alternativa que representa um dos efeitos agudos da poluição do ar na saúde:

a) Aumento da mortalidade por doenças respiratórias.
b) Partos prematuros.
c) Aumento do número de internações por pneumonia.
d) Alterações no desenvolvimento cognitivo das crianças.
e) Aumento da incidência e mortalidade por câncer de pulmão.

Seção 4.3

Efeitos da poluição atmosférica sobre o meio ambiente e materiais

Diálogo aberto

Caro aluno,

Ao longo deste livro didático, discutimos muito sobre a dinâmica da atmosfera, da dispersão e do transporte de poluentes e os equipamentos antipoluição. Na Seção 2 desta Unidade 4, discutimos sobre os principais efeitos da poluição do ar na saúde humana. Convém lembrar que as emissões atmosféricas impactam todo o ecossistema desde a acidificação dos corpos d'água e do solo, até a destruição de recursos florestais e de estruturas que compõem o meio ambiente construído, trazendo prejuízos econômicos, sociais e de perda da biodiversidade. Diante do exposto, imagine a seguinte situação hipotética: você acaba de ser contratado por uma consultoria ambiental especializada no ramo de qualidade do ar, que irá prestar serviço para um município paulista preocupado com a qualidade do ar e suas repercussões para a cidade, tanto do ponto de vista econômico e social quanto em relação à saúde da população. Você faz parte da equipe de consultores que realizará um estudo das repercussões da poluição atmosférica, cujo resultado final será um relatório técnico da relação da qualidade do ar com a qualidade de vida, que será apresentado ao prefeito para que as devidas providências sejam tomadas. Você já elaborou duas partes do relatório, referentes aos efeitos gerais dos poluentes e às repercussões para a saúde humana. Agora, você deve finalizar o relatório realizando uma pesquisa de campo sobre os efeitos da poluição atmosférica sobre o meio ambiente e sobre os materiais que compõem o meio ambiente construído. Para isso, você deverá responder às seguintes perguntas norteadoras: quais os principais efeitos da poluição atmosférica sobre os corpos d'água e de que forma isso pode afetar o abastecimento de água potável? Quais os efeitos da poluição atmosférica sobre o solo e sobre a vegetação e como isso pode afetar a produtividade agrícola e a biodiversidade do município? Na área urbana, quais os efeitos da chuva ácida sobre as estruturas metálicas, polímeros e concretos?

Não pode faltar

Caro aluno,

Ao longo deste livro didático, estudamos que a poluição do ar pode ser atribuída a diversas fontes, sejam elas móveis ou fixas, naturais ou antrópicas. Porém, dentre essas fontes, destaca-se a queima de combustíveis fósseis como a de maior contribuição para a poluição do ar nos centros urbanos. A poluição do ar, atualmente, é um dos maiores problemas que assolam a sociedade, devido aos impactos na saúde humana, no meio ambiente natural e artificial. Nesta última seção deste livro didático, abordaremos temas referentes aos efeitos da poluição do ar sobre os recursos hídricos, o solo, a vegetação e também sobre os materiais em ambientes construídos.

Assimile

Segundo a Política Nacional de Meio Ambiente, instituída pela Lei nº 6.938/1981, em seu art. 3º, meio ambiente é "o conjunto de condições, leis, influências e interações de ordem física, química e biológica, que permite, abriga e rege a vida em todas as suas formas" (BRASIL, 1981, [s.p.]). Portanto, pode-se inferir que as cidades constituem um componente ambiental importante chamado de "meio ambiente artificial".

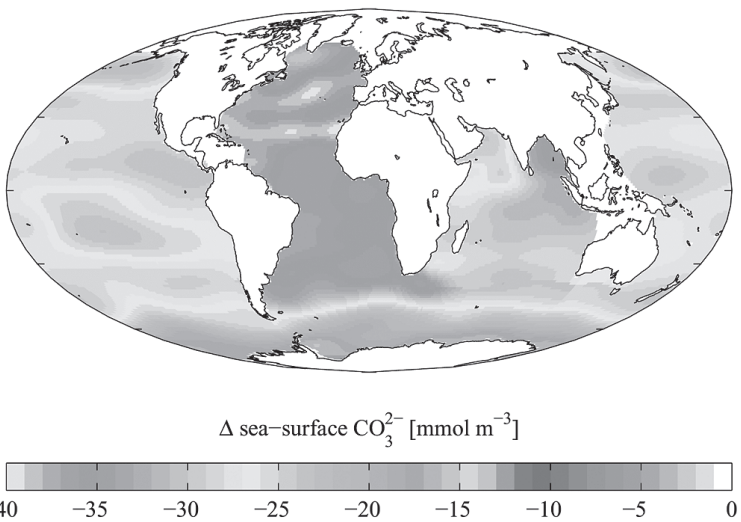
Na Seção 1 desta unidade, estudamos sobre a formação da chuva ácida, um dos efeitos gerais provenientes da emissão de poluentes na atmosfera. Relembrando, a chuva ácida corresponde àquela em que o pH se apresenta inferior a 5,65, sendo o seu caráter ácido associado à poluição do ar, sobretudo às emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x) e dióxido de enxofre (SO_2), em grande parte, oriundos dos processos de combustão de combustíveis fósseis. No entanto, dificilmente a chuva ácida provoca efeitos diretos e perceptíveis pela população e, por isso, ainda se fala muito pouco sobre os seus efeitos, apesar de ser um dos mais graves problemas ambientais.

Assimile

A escala de pH varia de 0 a 14, onde quanto maior a concentração de íons H^+ na solução, mais ácida ela é, sendo o seu valor na escala menor. No entanto, quanto maior a concentração de OH^-, mais básica é a solução, representado por valores mais altos na escala. Porém, os valores da escala são calculados a partir de uma função logarítmica, logo, pequenas alterações no pH representam, na verdade, grandes alterações de pH.

A chuva ácida ou deposição ácida provoca a acidificação dos oceanos, lagos e rios, dos solos, provoca profundas alterações na vegetação, além de danificar materiais empregados na construção civil e nos monumentos históricos. Além disso, chuvas ácidas trazem prejuízos severos para a agricultura, sobretudo culturas tais como alface, beterraba, cebola, soja e tabaco (iremos discutir cada um desses efeitos no decorrer desta seção). Porém, não são só os poluentes da chuva ácida que provocam alterações no meio ambiente. A acidificação dos oceanos, por exemplo, é provocada pelas emissões de dióxido de carbono (CO_2). Quando a água dos oceanos se encontra com o dióxido de carbono, forma-se o ácido carbônico (H_2CO_3) que se dissocia, formando íons carbonato (CO_3^{2-}) e íons hidrogênio (H^+). A Figura 4.8 mostra o nível de acidificação da superfície dos oceanos, em que é possível observar que em todos os lugares do mundo as emissões de CO^2 estão provocando o aumento da concentração de íons carbonato.

Figura 4.8 | Acidificação dos oceanos



Fonte: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/d3/WOA05_GLODAP_del_co3_AYool.png/1024px-WOA05_GLODAP_del_co3_AYool.png>. Acesso em: 30 ago. 2017.

Por isso, pequenas alterações podem afetar drasticamente a vida aquática nos oceanos. A acidificação dos oceanos afeta a formação de conchas nos organismos calcificadores, como mariscos, corais e moluscos, podendo levar à extinção. Isso ocorre porque o aumento da concentração de dióxido de carbono (CO_2) na água diminui o seu pH

e altera o sentido das reações que favorecem a utilização do carbono para a formação de carbonato de cálcio ($CaCO_3$), fazendo com que o carbonato se ligue com os íons H+ e fique menos disponível para a formação do carbonato. Essa diminuição na concentração de carbonato nos oceanos afeta o estágio inicial de vida dos organismos, sua fisiologia, reprodução, distribuição geográfica, morfologia, crescimento, desenvolvimento e tempo de vida. Além disso, os organismos aquáticos ficam mais sensíveis a mudanças de temperatura, provocadas ou não pelo aquecimento global, o que pode interferir na distribuição de espécies.

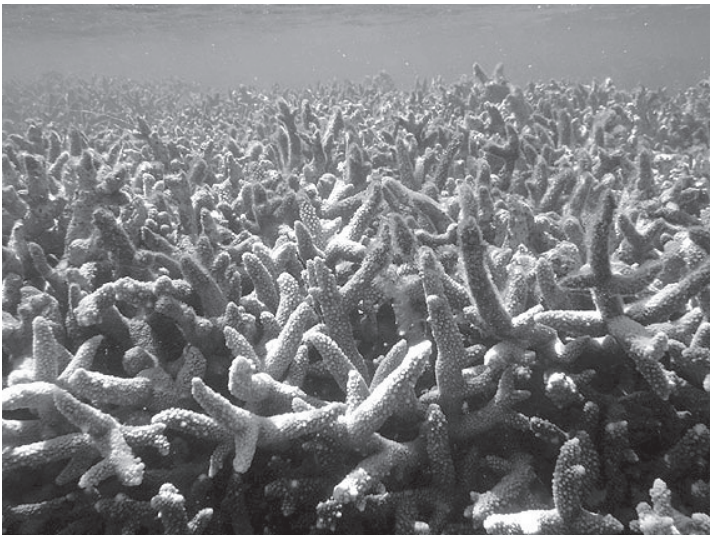
Exemplificando

Por exemplo, as regiões vulcânicas apresentam, naturalmente, altas concentrações de CO_2 e, por isso, apresentam baixa biodiversidade, apesar do elevado número de espécies invasoras. Por isso, esses ambientes podem ser demonstrações de como os ecossistemas marinhos serão futuramente, caso a acidificação dos oceanos permaneça.

O desaparecimento de espécies marinhas devido a não formação de suas conchas pode provocar um efeito cascata, atingindo todo o ecossistema e provocando também, impactos econômicos e sociais. Os mariscos e moluscos, por exemplo, formam a base da cadeia alimentar marinha, logo o seu desaparecimento ou redução afeta a existência de suas espécies, como peixes e baleias. Além disso, o desaparecimento ou redução desses organismos pode provocar um desequilíbrio socioeconômico, uma vez que formam uma parte significativa da produção mundial de pesca e aquicultura. Outro impacto econômico relevante associado à acidificação se refere aos manguezais, que funcionam como zona berçário para muitas espécies aquáticas, sobretudo de interesse comercial, como os caranguejos.

Porém, não podemos deixar de mencionar um efeito devastador e muito conhecido por todos, que é o fenômeno chamado de "branqueamento dos corais" (Figura 4.9). Os corais fazem associação simbiótica com as algas, conferindo-lhes cores vibrantes. Porém, a acidificação gera um estresse ambiental que induz o rompimento dessa relação, expondo assim o esqueleto de carbonato de cálcio dos corais. Por sua vez, o desaparecimento dos recifes de corais, que atuam como barreiras naturais expõe o litoral a ventos extremos, favorecendo tempestades e inundações.

Figura 4.9 | Branqueamento dos corais



Fonte: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c2/EL18p-R%C3%A9union.jpg>. Acesso em: 31 ago. 2017.

Contudo, até certo ponto, o aumento da acidez pode favorecer alguns microrganismos, pois a diminuição do pH aumenta a solubilidade de alguns metais, como do Ferro III, que é micronutriente essencial para o fitoplâncton, favorecendo a produção de dissulfeto que, ao ser lançado para a atmosfera, favorece a formação de nuvens. Além disso, inicialmente, o fitoplâncton pode aumentar a produtividade primária, que resulta em uma maior transferência de CO_2 da atmosfera para os oceanos, minimizando o aquecimento global. Porém, a saturação de CO_2 absorvido pelos oceanos somada ao aumento da temperatura das águas altera o sentido das reações químicas, e quantidade menores de CO_2 são absorvidas, prejudicando a formação de conchas, como vimos, e aumentando a sua concentração na atmosfera.

Reflita

Podemos dizer então que há um ciclo entre a acidificação dos oceanos e o aquecimento global?

Até o momento, falamos da acidificação dos oceanos, mas o mesmo processo ocorre também nos corpos hídricos, como rios e lagoas, afetando a biota do local, lavando à morte de peixes e outros organismos aquáticos, afetando assim o equilíbrio do ecossistema. Além disso, a acidificação dos rios afeta o tratamento de água de

abastecimento, uma vez que será necessária a correção do pH a partir da adição de maiores quantidades de cal hidratada ($Ca(OH)_2$).

Porém, a acidificação não impacta somente os corpos hídricos, ela também traz profundas modificações no solo e na vegetação. O efeito da chuva ácida sobre a vegetação causa o amarelamento e a queda das folhas e brotos (Figura 4.10), consequentemente diminuindo as copas das árvores e podendo levar à morte. Aquelas que sofrem menos com os efeitos têm seu crescimento e produtividade diminuídos.

Figura 4.10 | Amarelamento das folhas provocado pela chuva ácida

Fonte: <https://pixabay.com/pt/outono-queda-folhagem-folhas-1042349/>. Acesso em: 31 ago. 2017.

Portanto, a deposição ácida modifica a ciclagem de nutrientes, alterando o estado nutricional das plantas. Lopes (2001) afirma que, em regiões tropicais, como o Brasil, onde o solo é normalmente ácido e pobre em nutrientes, os efeitos oriundos da poluição do ar são mais intensos, podendo provocar graves alterações no balanço nutricional das plantas. Esses efeitos podem provocar o desaparecimento de espécies vegetais e, consequentemente, de animais que se alimentam delas, afetando toda uma cadeia alimentar e diminuindo drasticamente a biodiversidade do local. Cabe ressaltar que a proximidade com as fontes poluidoras está relacionada com uma maior concentração de poluentes no ar, sobretudo em elevadas altitudes, como a Serra do Mar, situada próximo ao polo industrial de Cubatão, conforme pode ser observado na Figura 4.11.

Figura 4.11 | Proximidade do polo industrial de Cubatão (SP) com a Serra do Mar

Fonte: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/55/Serra_do_Mar_coastal_forests_WWF.png/1036px-Serra_do_Mar_coastal_forests_WWF.png>. Acesso em: 31 ago. 2017.

Pesquise mais

Além da Serra do Mar, outras matas e florestas brasileiras sofrem os efeitos da deposição ácida, por isso, é importante que você pesquise em fontes complementares esses efeitos sobre os ecossistemas florestais. Por isso, indica-se a leitura do artigo a seguir.

CALLEGARO, Rafael Marian; ANDRZEJEWSKI, Camila; GOMES, Daniele Rodrigues; TURCHETTO, Felipe; MEZZOMO, Jessé Calleti; GRIEBELER, Adriana. Efeitos da chuva ácida em recursos florestais. **Caderno de Pesquisa, Série Biologia**, Santa Cruz do Sul, v. 23, n. 5, p. 13-20, nov. 2015. Disponível em: <https://online.unisc.br/seer/index.php/cadpesquisa/article/view/6815>. Acesso em: 31 ago. 2017.

Contudo, não são apenas as florestas que sofrem com os efeitos da deposição ácida, as culturas agrícolas, como soja, feijão, milho, também são impactadas, uma vez que a chuva ácida provoca o aumento na lixiviação de elementos essenciais das folhas (como potássio, cálcio, sódio e magnésio), a erosão da cutícula foliar, favorecendo a sua necrose, além de provocar decréscimo da taxa respiratória e fotossintética e, consequentemente, decréscimo na produção. Esses efeitos trazem prejuízos econômicos para os produtores e para o Brasil, por afetarem a produção nacional e a exportação de grãos.

A deposição ácida também prejudica os ecossistemas florestais e as culturas agrícolas por acidificar o solo, acelerando a lixiviação de cátions fundamentais como cálcio, magnésio, sódio e potássio, e, dessa forma, favorecendo a solubilização do alumínio, manganês, ferro e metais

tóxicos, que irão afetar o estado nutricional das plantas. É importante ressaltar que existem solos naturalmente ácidos, como ocorre em 70% dos solos cultivados no Brasil, devido aos seus materiais de origem ou pelas condições de formação do solo. Porém, a deposição ácida nesses solos favorece a solubilização de alumínio, aumentando a sua concentração no solo, tornando-o tóxico para as plantas.

Pesquise mais

Para que você compreenda melhor de que forma a deposição ácida afeta a disponibilidade e solubilidade de elementos no solo, sugere-se a leitura do capítulo 2 da dissertação indicada a seguir.

HAMA, Patrícia. **Estudo da influência da chuva ácida na concentração de alumínio em solos próximos a uma termoelétrica a carvão.** 2001. 131 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001. Disponível em: <http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Patricia%20Hama_M.pdf >. Acesso em: 31 ago. 2017.

Por fim, finalizaremos o nosso estudo sobre as emissões atmosféricas abordando os efeitos da poluição do ar no ambiente construído. A chuva ácida, nos centros urbanos, acelera a corrosão de muitos materiais utilizados na construção civil e também de materiais utilizados em monumentos históricos, conforme pode ser observado na Figura 4.12. Os monumentos históricos mais afetados pela chuva ácida são os de mármore e de outras pedras calcárias, uma vez que a chuva ácida provoca a dissolução dos carbonatos de cálcio e magnésio, formando sulfato de cálcio e/ou magnésio, que são solúveis em água e, por isso, são lavados pela chuva.

Figura 4.12 | Efeitos da chuva ácida em um monumento histórico

Fonte: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/23/Aleijadinho_-_Detalhe_do_rosto_do_profeta_Jeremias_-_Santu%C3%A1rio_do_Bom_Jesus_de_Matosinhos_-_Congonhas.jpg>. Acesso em: 31 ago. 2017.

Os compósitos cimentícios utilizados na construção civil são materiais cerâmicos que possuem elevada estabilidade química, dimensional e resistência mecânica, mas que apresentam elevada porosidade. Essa porosidade permite a entrada e movimentação de agentes agressivos, como os poluentes atmosféricos dissolvidos na chuva ácida, para o interior desses materiais, favorecendo a sua corrosão ao longo do tempo. A degradação desses compósitos pode ocorrer pela ação de sulfatos que reagem com os constituintes do cimento, resultando em perda de resistência, ruptura e fissuração, comprometendo a estrutura da construção. Além disso, a degradação pode ocorrer pela ação de cloretos que corroem o aço utilizado na construção civil, reduzindo a estética e a resistência da construção, levando à substituição prematura da estrutura afetada (Figura 4.13).

Figura 4.13 | Corrosão de material metálico devido à chuva ácida

Fonte: <https://pixabay.com/p-65755/?no_redirect>. Acesso em: 31 ago. 2017.

Assim, finalizamos o nosso estudo sobre a gestão de emissões atmosféricas, relatando os efeitos sobre o meio ambiente natural e artificial e observando que tais efeitos trazem prejuízos econômicos para o país. Esperamos que você, ao longo deste livro didático, tenha se sentido motivado a aprofundar os seus conhecimentos e que tenha se sensibilizado sobre a importância de discutir e estudar mais a poluição do ar. Bons estudos!

Sem medo de errar

A poluição do ar hoje é um dos principais problemas ambientais enfrentados pela humanidade, não somente pelos problemas de saúde decorrentes da má qualidade do ar, mas também devido aos impactos sobre os recursos hídricos, solo, agricultura, recursos florestais

e materiais no ambiente construído. Relembrando o nosso contexto de aprendizagem, você foi contratado por uma consultoria ambiental que irá prestar serviço para a um município paulista preocupado com a qualidade do ar e suas repercussões para a cidade. A consultoria deverá realizar um estudo sobre as repercussões da poluição atmosférica cujo resultado final será um relatório técnico da relação entre a qualidade do ar e a qualidade de vida, que será apresentado ao prefeito para que as devidas providências sejam tomadas. Você já elaborou duas partes do relatório e, agora, deverá realizar uma pesquisa de campo sobre os efeitos da poluição atmosférica sobre o meio ambiente e sobre os materiais que compõem o meio ambiente construído. Para isso, é preciso responder às seguintes perguntas norteadoras: quais os principais efeitos da poluição atmosférica sobre os corpos d'água e de que forma isso pode afetar o abastecimento de água potável? Quais os efeitos da poluição atmosférica sobre o solo e sobre a vegetação e como isso pode afetar a produtividade agrícola e a biodiversidade do município? Na área urbana, quais os efeitos da chuva ácida sobre as estruturas metálicas, polímeros e concretos? Para isso, considere a presença de pequenos produtores de hortaliças e legumes localizados na zona rural desse município.

Para finalizar o relatório que será entregue à prefeitura, é importante relatar de forma detalhada os problemas encontrados na pesquisa de campo. Para isso, antes de ir a campo coletar os dados, é preciso que a equipe de consultores se organize, elaborando um checklist dos pontos relevantes que deverão ser averiguados. Além disso, é importante que a consultoria colete informações sobre a qualidade da água do rio e sobre o processo de tratamento junto à companhia de abastecimento de água do município. É importante, ainda, buscar informações, a partir de artigos sobre o ecossistema aquático local, a fim de compreender se as chuvas ácidas têm afetado o equilíbrio dele. A equipe pode realizar a coleta de bioindicadores (por exemplo, microcrustáceos bentônicos) para quantificar e qualificar a qualidade ambiental do local.

Considerando os impactos da chuva ácida sobre o solo, é importante também coletar amostras de solo para posterior análise em laboratório acerca da presença e solubilidade dos nutrientes e de metais pesados, considerando as características de origem do solo, que pode ser naturalmente ácido. Como a acidificação dos rios afeta o tratamento da água de abastecimento, devido à necessidade de correção do pH a partir da adição de maiores quantidades de cal hidratada ($Ca(OH)_2$), é preciso realizar coleta de amostras de água.

Também é preciso analisar os impactos na vegetação do bioma local, observando as folhas, se estão amareladas, por exemplo, seu aspecto nutricional, entre outras características, e considerar os impactos da chuva ácida sobre a cultura de hortaliças legumes. Para isso, a equipe de consultores deverá coletar essas informações a partir dos produtores e das análises da cultura. Observe que se trata de um trabalho em equipe e multidisciplinar, de forma que as informações se complementam.

Por fim, a equipe deverá observar os impactos da chuva ácida sobre os materiais em ambientes construídos, observando se há desgaste de estruturas metálicas e de materiais cerâmicos, pois a degradação desses compósitos pode ocorrer pela ação de sulfatos que reagem com os constituintes do cimento, resultando em perda de resistência, ruptura e fissuração, comprometendo a estrutura da construção.

Além disso, a degradação pode ocorrer pela ação de cloretos que corroem o aço utilizado na construção civil, reduzindo a estética e a resistência da construção, levando à substituição prematura da estrutura afetada. É preciso observar se os monumentos históricos do município também sofreram com as chuvas ácidas ao longo do tempo, sobretudo aqueles constituídos de mármore e outras pedras calcárias, uma vez que a chuva ácida provoca a dissolução dos carbonatos de cálcio e magnésio, formando sulfato de cálcio e/ou magnésio, que são solúveis em água e, por isso, são lavados pela chuva. Lembre-se de fotografar os impactos encontrados. Para elaborar o relatório, você deve seguir a norma brasileira ABNT NBR 10719/2011, que dispõe sobre "Informação e documentação — Relatório técnico e/ou científico — Apresentação". Bom trabalho!

Avançando na prática

Os efeitos devastadores da poluição do ar no ambiente urbano

Descrição da situação-problema

É fato que desde o início da Revolução Industrial o homem vem modificando o meio ambiente a fim de atender às suas necessidades e proporcionar conforto a partir da tecnologia. Porém, essas modificações sobre o meio ambiente trouxeram consigo inúmeros problemas ambientais, como a contaminação dos corpos hídricos, do solo, a poluição do ar e da água, a perda de biodiversidade, entre outros. Destes, destaca-se a poluição do ar, devido à complexidade de se identificar e monitorar as emissões e dispersões de poluentes na atmosfera. Recentemente, a cidade de Cubatão, no estado de

São Paulo, entrou em estado de alerta após o vazamento de duas substâncias tóxicas, o nitrato de amônio e o ácido sulfúrico. Estes poluentes, além de altamente tóxicos para os seres humanos, podem provocar efeitos adversos ao longo do tempo, nas construções e monumentos históricos das cidades vizinhas. Dentro desse contexto, imagine a seguinte situação: você é o profissional da área ambiental da indústria onde ocorreu o vazamento e irá conceder uma entrevista para um telejornal, na qual deverá explicar para a população a relação entre o vazamento dos poluentes tóxicos com os efeitos em ambientes construídos. Quais são os prejuízos no ambiente urbano? De que forma os poluentes agem sobre as construções e monumentos históricos?

Resolução da situação-problema

A chuva ácida, nos centros urbanos, acelera a corrosão de muitos materiais utilizados na construção civil e também de materiais utilizados em monumentos históricos. Os monumentos históricos mais afetados pela chuva ácida são os de mármore e outras pedras calcárias, uma vez que a chuva ácida provoca a dissolução dos carbonatos de cálcio e magnésio, formando sulfato de cálcio e/ou magnésio, que são solúveis em água e, por isso, são lavados pela chuva. Os compósitos cimentícios utilizados na construção civil são materiais cerâmicos que possuem elevada estabilidade química, dimensional e resistência mecânica, mas que apresentam elevada porosidade. Essa porosidade permite a entrada e movimentação de agentes agressivos, como os poluentes atmosféricos dissolvidos na chuva ácida, para o interior desses materiais, favorecendo a sua corrosão ao longo do tempo. A degradação desses compósitos pode ocorrer pela ação de sulfatos que reagem com os constituintes do cimento, resultando em perda de resistência, ruptura e fissuração, comprometendo a estrutura da construção. Além disso, a degradação pode ocorrer pela ação de cloretos que corroem o aço utilizado na construção civil, reduzindo a estética e a resistência da construção, levando à substituição prematura da estrutura afetada. Portanto, o vazamento ocorrido em Cubatão pode favorecer a deposição ácida e contribuir assim para a corrosão de materiais utilizados na construção civil e em monumentos históricos, tanto em cidades próximas ao ocorrido quanto em locais distantes, considerando a dispersão de poluentes na atmosfera. Dessa forma, as estruturas afetadas deverão ser prematuramente substituídas e restauradas.

Faça valer a pena

1. A chuva ácida ou deposição ácida provoca a acidificação de oceanos, lagos e rios, dos solos, provoca profundas alterações na vegetação, além de danificar materiais empregados na construção civil e nos monumentos históricos.
Considerando os efeitos da chuva ácida sobre os oceanos, avalie as sentenças a seguir:
I. A acidificação dos oceanos é provocada pelas emissões de dióxido de enxofre.
II. A acidificação dos oceanos afeta a formação de conchas nos organismos calcificadores.
III. O desaparecimento de espécies marinhas devido à não formação de suas conchas não causa outros impactos no ecossistema.

Agora, assinale a alternativa que representa a resposta correta sobre a acidificação dos oceanos:

a) Apenas as afirmativas I e III estão corretas.
b) Apenas as afirmativas II e III estão corretas.
c) Apenas a afirmativa II está correta.
d) Apenas a afirmativa I está correta.
e) As afirmativas I, II e III estão corretas.

2. A chuva ácida não impacta somente os corpos hídricos, ela também traz profundas modificações no solo e na vegetação.
Os efeitos da chuva ácida sobre a vegetação causam o _____ e a queda das folhas e brotos, a modificação da _____, alterando o _____ das plantas.

Considerando os efeitos da acidificação na vegetação, assinale a alternativa que preenche corretamente as lacunas do texto:
a) Rompimento; estrutura das folhas; estado morfológico.
b) Espessamento; ciclagem de nutrientes; estado nutricional.
c) Amarelamento; estrutura das folhas; estado morfológico.
d) Amarelamento; ciclagem de nutrientes; estado nutricional.
e) Rompimento; ciclagem de nutrientes; estado nutricional.

3. A chuva ácida, nos centros urbanos, acelera a corrosão de muitos materiais utilizados na construção civil e também de materiais utilizados em monumentos históricos.
Considerando o contexto apresentando, analise as afirmativas a seguir e assinale V para verdadeiro e F para falso:

( ) Os monumentos históricos mais afetados pela chuva ácida são os de mármore e de outras pedras calcárias, uma vez que a chuva ácida provoca a dissolução dos carbonatos de cálcio e magnésio.
( ) Os compósitos cimentícios utilizados na construção civil são materiais cerâmicos que possuem elevada estabilidade química, dimensional e resistência mecânica, mas que apresentam elevada porosidade.
( ) A degradação dos compósitos cimentícios ocorre pela ação de sulfatos que reagem com os constituintes do cimento, resultando em aumento de resistência, comprometendo assim a estrutura da construção.

Agora, assinale a alternativa que representa a sequência correta em relação aos efeitos da chuva ácida sobre os materiais:

a) V – F – F.
b) V – V – F.
c) F – V – F.
d) F – V – V.
e) F – F – V.

Referências

ARBEX, Marcos Abdo et al. A poluição do ar e o sistema respiratório. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, São Paulo, v. 38, n. 5, p. 634-655, set./out. 2012.

BAIRD, C. **Química ambiental**. Porto Alegre: Bookman, 2002.

BF CAPITAL. **Cidades vão tirar veículos a diesel de circulação até 2025**. 2017. Disponível em: <http://www.bfcapital.com.br/cidades-vao-tirar-veiculos-a-diesel-de-circulacao-ate-2025/>. Acesso em: 16 jun. 2017.

BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, em 31 de agosto de 1981. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L6938.htm>. Acesso em: 15 ago. 2017.

_____. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Meio Ambiente, Conama. **Resolução Conama nº 003, de 28 de junho de 1990**. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res90/res0390.html>. Acesso em: 20 jul. 2017.

_____. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Meio Ambiente, Conama. **Resolução Conama nº 382, de 26 de dezembro de 2006**. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res38206.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2017.

_____. Lei nº 12.546, de 14 de dezembro de 2011. Institui o Regime Especial de Reintegração de Valores Tributários para as Empresas Exportadoras (Reintegra) [...]. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 15 dez. 2011. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2011/lei/l12546.htm>. Acesso em: 15 ago. 2017.

_____. Ministério do Meio Ambiente. **Proteção da camada de ozônio**. 2017. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/259/_arquivos/faq_ozonio_259.pdf>. Acesso em: 9 jul. 2017.

BREATH LIFE. **Institucional**. 2017. Disponível em: <http://breathelife2030.org/>. Acesso em: 30 ago. 2017.

EPA – AGÊNCIA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL DOS ESTADOS UNIDOS. American lung association. Indoor Air Quality and its Effects on Health. **Asthma magazine**, v. 5, n. 5, p. 22-23, 2000.

CALIJURI, Maria do Carmo; CUNHA, Davi Gasparini Fernandes. **Engenharia ambiental**: conceitos, tecnologia e gestão. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

CALLEGARO, Rafael Marian et al. Efeitos da chuva ácida em recursos florestais. **Caderno de Pesquisa, Série Biologia**, Santa Cruz do Sul, v. 23, n. 5, p. 13-20, nov. 2015. Disponível em: <https://online.unisc.br/seer/index.php/cadpesquisa/article/view/6815>. Acesso em: 31 ago. 2017.

DERÍSIO, José Carlos. **Introdução ao controle de poluição ambiental**. 4. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2012.

FORNARO, Adalgiza. Água de chuva: conceitos e breve histórico. Há chuva ácida no Brasil?. **Revista USP**, São Paulo, n. 70, p. 78-87, jun./ago. 2006. Disponível em: <http://www.journals.usp.br/revusp/article/viewFile/13533/15351>. Acesso em: 9 jul. 2017.

FREITAS, C. U. et al. Poluição do ar em cidades brasileiras: selecionando indicadores de impacto na saúde para fins de vigilância. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, Brasília, v. 22, n. 3, p. 445-454, jul./set. 2013. Disponível em: <http://scielo.iec.pa.gov.br/pdf/ess/v22n3/v22n3a09.pdf>. Acesso em: 16 ago. 2017.

HAMA, Patrícia. **Estudo da influência da chuva ácida na concentração de alumínio em solos próximos a uma termoelétrica a carvão**. 2001. 131 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001. Disponível em: <http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Patricia%20Hama_M.pdf >. Acesso em: 31 ago. 2017.

JESUS, Emanuel Fernando Reis de. A importância do estudo das chuvas ácidas no contexto da abordagem climatológica. **Sitientibus**, Feira de Santana, v. 14, p. 143-153, nov. 1996.

LOPES, M. I M. S. **Fluxo de água, balanço químico e alterações no solo da Floresta Atlântica atingida pela poluição aérea de Cubatão, SP, Brasil**. 2001. 188 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

MARQUES, Vinicius Martins; GOMES, Luciana Paulo; KERN, Andrea Parisi. Avaliação ambiental do ciclo de vida de telhas de fibrocimento com fibras de amianto ou com fibras de polipropileno. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, n. 1, p. 187-201, jan. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212016000100068>. Acesso em: 21 ago. 2017.

MATOS, Carlos E; ANDRADE, Roberta D. Toxicologia ambiental: aspectos toxicológicos e políticos sobre a poluição do ar. **Revista Intertox de Toxicologia, Risco Ambiental e Sociedade**, v. 6, n. 2, p. 75-89, jun. 2013.

MIHELCIC, James R.; ZIMMERMAN, Julie Beth. **Engenharia ambiental**: fundamentos, sustentabilidade e projeto. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

NARDOCCI, Adelaide Cassia; FREITAS, Clarice Umbelino de; LEON, Antônio Carlos Monteiro Ponce de; JUNGER, Washington Leite; GOUVEIA, Nelson da Cruz. Poluição do ar e doenças respiratórias e cardiovasculares: estudo de séries temporais em Cubatão, São Paulo, Brasil. **Cadernos de Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v. 29, n. 9, p.1867-1876, set. 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-311x00150012>. Acesso em: 21 ago. 2017.

OBSERVANDO SÃO PAULO. **Institucional**. 2012. Disponível em: <http://www.observandosaopaulo.com.br>. Acesso em: 30 ago. 2017.

OCDE – ORGANIZAÇÃO PARA COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO. **The economic consequences of outdoor air pollution**. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development, 2016. Disponível em: <https://www.oecd.org/environment/indicators-modelling-outlooks/Policy-Highlights-Economic-consequences-of-outdoor-air-pollution-web.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2017.

OPAS/OMS – ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DE SAÚDE/ORGANIZAÇÃO

MUNDIAL DE SAÚDE. **OMS divulga estimativas nacionais sobre exposição à poluição do ar e impacto na saúde**. 2016. Disponível em: <http://www.paho.org/bra/index.php?option=com_content&view=article&id=5249:oms-divulga-estimativas-nacionais-sobre-exposicao-a-poluicao-do-ar-e-impacto-na-saude&Itemid=839>. Acesso em: 20 jul. 2017.

PIXABAY. **Amarelamento das folhas provocado pela chuva ácida**. 2017. Disponível em: <https://pixabay.com/pt/outono-queda-folhagem-folhas-1042349/>. Acesso em: 31 ago. 2017.

_____. **Corrosão de material metálico devido à chuva ácida**. 2017. Disponível em: <https://pixabay.com/p-65755/?no_redirect>. Acesso em: 31 ago. 2017.

_____. **Símbolo "Proibido fumar**". 2017. Disponível em: <https://pixabay.com/p-145888/?no_redirect>. Acesso em: 30 ago. 2017.

_____. **Vias de entrada dos poluentes no corpo humano**. 2017. Disponível em: <https://pixabay.com/pt/c%C3%A2ncer-carcinoma-met%C3%A1stases-156101/>. Acesso em: 30 ago. 2017.

SILVA, Alexandre Fernando da; VIEIRA, Carlos Alexandre. Aspectos da poluição atmosférica: uma reflexão sobre a qualidade do ar nas cidades brasileiras. **Ciência e Sustentabilidade**, Juazeiro do Norte, v. 3, n. 1, p. 166-189, jan. 2017.

SODRÉ, Camilla Fernanda Lima; SILVA, Yuri Jorge Almeida da; MONTEIRO, Isabella Pearce. Acidificação dos oceanos: fenômeno, consequências e necessidade de uma governança ambiental global. **Revista Científica do Centro de Estudos em Desenvolvimento Sustentável da Undb**, São Luís, v. 1, n. 4, p. 1-14, nov. 2016.

SOUZA, Rui Barbosa; REBOITA, Michelle Simões; WELE, Ana Paula; COSTA, Eliane Betânia Carvalho. Influência das variáveis atmosféricas na degradação dos materiais da construção civil. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, [s.l.], v. 13, n. 1, p. 1-19, ago. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5216/reec.v13i1.41448>. Acesso em: 20 jul. 2017.

STATICFLICK. **Formação da chuva ácida**. 2017. Disponível em: <https://c1.staticflickr.com/8/7356/13579612483_0798ecd762_b.jpg>. Acesso em: 21 ago. 2017.

_____. **Smog fotoquímico na cidade de São Paulo**. 2017. Disponível em: <https://c1.staticflickr.com/1/21/96375769_733ebdb4c8_z.jpg?zz=1>. Acesso em: 21 ago. 2017.

VESILIND, Aarme P.; MORGAN, Susan M. **Introdução à Engenharia Ambiental**. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

VIMEOCDN. **Camada de ozônio**. 2017. Disponível em: <https://i.vimeocdn.com/video/517481830_1280x720.jpg>. Acesso em: 21 ago. 2017.

WIKIPEDIA. **Acidificação dos oceanos**. 2017. Disponível em: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/d3/WOA05_GLODAP_del_co3_AYool.png/1024px-WOA05_GLODAP_del_co3_AYool.png>. Acesso em: 30 ago. 2017.

_____. **Branqueamento dos corais.** 2017. Disponível em: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c2/EL18p-R%C3%A9union.jpg>. Acesso em: 31 ago. 2017.

_____. **Efeitos da chuva ácida em um monumento histórico**. 2017. Disponível em:

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/23/Aleijadinho_-_Detalhe_do_rosto_do_profeta_Jeremias_-_Santu%C3%A1rio_do_Bom_Jesus_de_Matosinhos_-_Congonhas.jpg />. Acesso em: 31 ago. 2017.

_____. **Princípio de funcionamento do ar condicionado**. 2017. Disponível em: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a8/Instala%C3%A7%C3%A3o_t%C3%ADpica_de_equipamento_Split_System.JPG>. Acesso em: 21 ago. 2017.

_____. **Proximidade do polo industrial de Cubatão (SP) com a Serra do Mar**. 2017. Disponível em: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/55/Serra_do_Mar_coastal_forests_WWF.png/1036px-Serra_do_Mar_coastal_forests_WWF.png/>. Acesso em: 31 ago. 2017.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Global ambient air pollution**. 2017. Disponível em: < http://maps.who.int/airpollution/>. Acesso em: 30 ago. 2017.

Anotações

ISBN 978-85-522-0180-9

9 788552 201809 >