

Efeito Fitotóxico do Ozônio na Troposfera: Experimento em Sala de Aula

Phytotoxic Effect of Ozone at Troposphere: Classroom Experimentation

Márcia Matiko Kondo*¹, Adriano Francisco Barbosa², Valéria Maria Pereira Barbosa³,
Milady Renata Apolinário da Silva⁴ e Sandro José de Andrade⁵

^{1,4,5}Instituto de Física e Química, Universidade Federal de Itajubá, Brasil

^{2,3}Universidade Federal de Alfenas, Brasil

Resumo

Enquanto o ozônio na estratosfera nos protege dos efeitos prejudiciais dos raios ultravioleta (UV), o ozônio no nível do solo causa muitos danos, por exemplo, destruindo plantas, provocando doenças respiratórias e irritação nos olhos dos seres humanos. O presente trabalho tem como objetivo simular um ambiente atmosférico contendo concentrações elevadas de ozônio (O₃), uma das substâncias formadas em um evento de smog fotoquímico. Esse experimento poderá ser reproduzido em sala de aula onde os alunos do ensino médio poderão observar os efeitos danosos que o ozônio pode causar em plantas ao longo de vários dias de exposição. Os resultados deste experimento poderão ser abordados pelo professor de maneira interdisciplinar e vários outros temas ambientais poderão ser trabalhados com a participação ativa dos alunos.

Palavras-chave: Ozônio. Bioindicador. Experimento didático.

Abstract

While ozone in the stratosphere protects us from the harmful effects of ultraviolet radiation (UV), ozone at ground level causes several damages, destroying plants, causing respiratory diseases and irritation in the human eyes. The main objective of the present work was to simulate an atmospheric ambient containing high concentration of ozone (O₃), which is one of the substances generated during a photochemical smog event. This experiment can be reproduced at school where students will be able to observe the harmful effects of ozone in plants during a period of several days under O₃ exposition. The results of the experiment can be approached with an interdisciplinary context and several other environmental issues can be worked with the active participation of the students.

Keywords: Ozone. Bioindicator. Classroom experimentation.

1 Introdução

Desconsiderando o sempre presente vapor de água, os principais componentes da atmosfera terrestre não-poluída são nitrogênio diatômico (N_2 , cerca de 78% das moléculas), oxigênio diatômico (O_2 , cerca de 21%), argônio (Ar, cerca de 1%), dióxido de carbono (CO_2 , atualmente cerca de 0,04%) e concentrações traço de outros gases (Mozeto, 2001). Essa mistura gasosa parece ser não-reativa nas camadas inferiores da atmosfera. No entanto, essa aparente falta de reatividade é enganosa. Muitos processos químicos importantes do ponto de vista ambiental ocorrem no ar, seja este puro ou poluído (Baird e Cann, 2011). A composição dinâmica da atmosfera se deve, principalmente, a diversos oxidantes que podem ser encontrados no ar ambiente, sendo os principais o oxigênio (O_2), o ozônio (O_3), peróxido de hidrogênio (H_2O_2), radical hidroxila ($HO\bullet$), radical hidroxilperóxido ($HO_2\bullet$), radical nitrato ($NO_3\bullet$) e nitrato de peroxiacetila (PAN). Dentre esses, o O_3 ocupa lugar de destaque, pois é responsável por todas as cadeias de oxidação primárias que ocorrem na atmosfera natural (BAIRD e CANN, 2011).

Na atmosfera não poluída, o ozônio é formado na estratosfera. A estratosfera é a parte da atmosfera compreendida entre 15 e 50 quilômetros de altura e que se encontra logo acima da troposfera. A troposfera é a região da atmosfera compreendida entre a superfície da Terra e a altitude de aproximadamente 15 quilômetros. Na estratosfera (e acima dela), moléculas de nitrogênio (N_2) e oxigênio (O_2) filtram toda a radiação solar e nenhuma energia com comprimento de onda abaixo de 220 nm atinge a Terra. O ozônio filtra toda a luz ultravioleta (UV) proveniente do Sol conhecida como UV-C (200-280 nm). Entretanto, o ozônio absorve apenas uma fração da radiação UV solar na faixa de 290-320 nm. Assim, o O_3 não é totalmente efetivo como escudo para radiação na região UV-B (280-320 nm). Como nem o ozônio nem qualquer outro constituinte da atmosfera limpa absorve significativamente na faixa de radiação UV-A (320-400 nm), a maior parte dessa radiação atinge a superfície da Terra. No entanto, a radiação UV-A é menos prejudicial ao ser humano e ao ambiente (BAIRD e CANN, 2011; MOZETO, 2001).

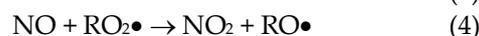
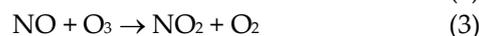
Com o crescente avanço tecnológico, emissões antropogênicas de substâncias como óxidos nitrosos (NOx) e compostos orgânicos voláteis tem contribuído para a formação de ozônio na troposfera. Este fenômeno é conhecido como smog fotoquímico (SPIRO e STIGLIANI, 2009). O termo *smog* provém do inglês e deriva das palavras *smoke* = fumaça e *fog* = neblina (ROCHA et al., 2009).

1.1 O ozônio na troposfera

O *smog* fotoquímico pode se formar sempre que uma grande quantidade de gases de exaustão automotivos

e industriais é confinada por uma camada de inversão térmica sobre uma localidade exposta ao Sol (SPIRO e STIGLIANI, 2009). Por exemplo, o período do ano mais favorável ao fenômeno na cidade de São Paulo é o inverno, quando as condições meteorológicas são pouco favoráveis à dispersão dos poluentes atmosféricos, há pouco vento e os dias são claros, com poucas nuvens e grande incidência de luz solar. Durante esse fenômeno que aflige um número crescente de cidades, pessoas mais sensíveis sentem um desconforto visual e seus olhos lacrimejam (ROCHA et al., 2009).

As substâncias normalmente presentes na ocorrência de smog são os óxidos de nitrogênio (NOx) e os compostos orgânicos voláteis (COV) emitidos, principalmente, pela queima de combustíveis fósseis. Embora a maior parte do dano causado pelo smog resulte da ação do ozônio e de outros oxidantes, esses não se acumulam sem a ação combinada entre NOx e COV (Equações 1 a 3) (Rocha et al., 2009). A formação e o acúmulo dependem não só de NOx, mas também de hidrocarbonetos. Eles produzem os radicais peroxila, os quais podem reagir com o NO antes do ozônio e regenerar o NO_2 (4).



Um dos problemas causados pelo ozônio na troposfera é seu efeito fitotóxico em algumas plantas. O ozônio pode penetrar nas folhas das plantas através dos estômatos durante as trocas gasosas e prontamente reage com moléculas de água, o que dá origem a diversas espécies reativas de oxigênio – $O_2\bullet$, $HO\bullet$, $HO_2\bullet$, H_2O_2 , entre outras - que podem afetar os processos fisiológicos e metabólicos das plantas (FURLAN et al., 2007; FURLAN et al., 2008). Devidos a sua reatividade, quando em excesso, essas espécies apresentam ação deletéria, oxidando moléculas biológicas como proteínas, aminoácidos, lipídeos, ácidos nucléicos e levando à produção de outras espécies reativas de oxigênio (PINA e MORAES, 2010). A fotossíntese é um processo particularmente susceptível ao ozônio. Sua redução pode ocorrer em virtude da diminuição da condutância estomática, do transporte de elétrons e da carboxilação.

A sensibilidade ao O_3 pode estar relacionada à maior difusão do poluente para o interior da folha ou à baixa eficiência dos compostos que neutralizam o estresse oxidativo (FURLAN et al., 2008). Algumas das respostas obtidas em espécies sensíveis ao O_3 são a degradação da clorofila, a formação de necroses e acúmulo de compostos do metabolismo secundário que ocasionam a formação de sintomas foliares visuais. Tais sintomas podem ser utilizados no biomonitoramento da qualidade do ar. Uma espécie bioindicadora da poluição atmosférica é aquela que exhibe injúrias quando

exposta a um determinado poluente ou mistura de poluentes. Um difundido bioindicador da poluição por ozônio é a cultivar *Nicotiana tabacum* 'Bel W3' que vem sendo empregada há várias décadas no mapeamento e distribuição geográfica das concentrações fitotóxicas de ozônio. Várias outras espécies também vêm sendo utilizadas como o pau-brasil (*Caesalpinia echinata* Lam.), a goiabeira (*Psidium guajava* L. 'Paluma'), a quaresmeira (*Tibouchina pulchra* Cogn.), entre outras (FURLAN et al., 2007; FURLAN et al., 2008; PINA e MORAES, 2010; DIAS et al., 2007).

Enquanto o ozônio na estratosfera nos protege da radiação UV danosa para o ser humano, o ozônio na troposfera pode causar vários problemas ao meio ambiente e ao ser humano.

A Lei 9394/96, que regulamenta o sistema educacional brasileiro e os Parâmetros Curriculares para o Ensino Médio (PCNEM) recomenda que questões ambientais, dentre outras, devem ser tratadas no Ensino de Química. A problemática ambiental, por estar diretamente ligada ao cotidiano dos alunos, está sendo trabalhada de forma experimental nas salas de aulas (Ferreira et al., 2004). A experimentação no Ensino de Química pode ser uma estratégia eficiente no processo de ensino aprendizagem, desde que bem contextualizada (Ferreira et al., 2010), onde o aluno não atue de forma passiva, como ocorre frequentemente no ensino tradicional. Ao contrário, a experimentação pode proporcionar ao aluno atuar como protagonista no processo de aprendizagem. Por outro lado, a experimentação não pode ser apresentada como uma forma de se demonstrar uma teoria ou ser usada simplesmente como uma ferramenta motivadora (Galiazzi e Gonçalves, 2004), existe a necessidade de tornar as atividades experimentais na escola verdadeiros processos de investigação para assim desenvolver o pensamento científico e consequentemente uma aprendizagem

significativa (Giordano, 1999). É necessário indagar o aluno durante a experimentação, ouvir suas explicações (Galiazzi e Gonçalves, 2004), pois a criação de problemas reais e concretos é uma alternativa interessante para que os aprendizes possam ser atores da construção do próprio conhecimento (Guimarães, 2009). Diante deste contexto, o presente trabalho propõe um experimento que apresenta de maneira simples e lúdica os efeitos fitotóxicos do ozônio.

2 Procedimento Experimental

2.1 Materiais

Copos plásticos de 50 mL (copos para café), tubo de PVC com 80 mm de diâmetro e 90 cm de comprimento, 2 aquários retangulares em vidro de tamanho médio, mangueiras de aquário, 2 tampões de tubo de PVC com diâmetro de 80 mm, 2 compressores de aquário, 1 reator eletrônico para lâmpada com voltagem compatível, 1 interruptor liga/desliga, 2 conectores para lâmpada UV, plugue de 3 pinos para tomada, uma lâmpada UV germicida ($\lambda_{\max} = 254 \text{ nm}$) compatível com o reator, 2 vasos de violetas, sementes de feijão e de girassol e câmera digital.

2.2 Montagem do sistema para geração de ozônio

A visualização da montagem completa e construção do sistema de geração de ozônio é apresentada na Figura 1. Para a montagem do sistema siga os seguintes passos:

Peça a um vidraceiro para fazer duas pequenas aberturas nas laterais dos aquários (Figura 2a).

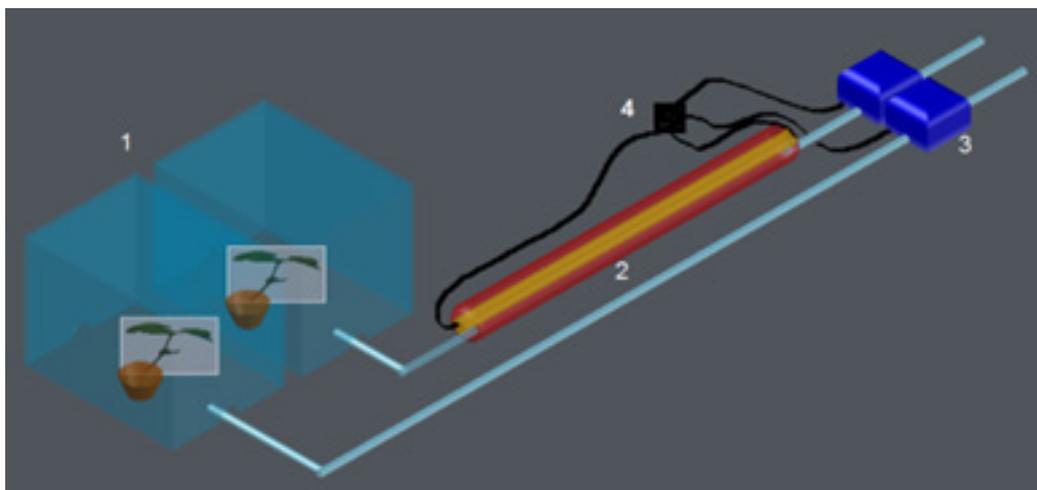


Figura 1: Representação esquemática do sistema utilizado para os ensaios em ambiente contendo O_3 e controle: 1) cubas em vidro para simulação dos ambientes; 2) reator para produção de O_3 ; 3) bombas de aquário utilizadas para impulsionar ar para dentro das cubas; 4) sistema elétrico para acionamento da lâmpada de UV.



Figura 2: Fotos ilustrativas detalhadas do processo de montagem do sistema contendo atmosfera de ozônio. (a) Cuba de vidro, que pode ser um aquário retangular; (b) tampão de PVC contendo um furo no centro de diâmetro igual ao da lâmpada e outro com diâmetro igual ao da mangueira de aquário; (c) uma das extremidades montadas e (d) seladas com cola de silicone.

Faça um furo no centro dos dois tampões de PVC com diâmetro igual ao da lâmpada de UV.

Faça outro furo com diâmetro igual ao da mangueira de aquário (Figura 2b).

Cole o tampão de PVC perfurado a uma das extremidades do tubo de PVC e introduza a lâmpada de UV de forma que os conectores fiquem para fora do tubo.

Cole o outro tampão tomando cuidado para que o conector da lâmpada fique na parte externa (Figura 2c).

Fixe aos furos menores as mangueiras de aquário e vede todos os furos com cola de silicone de tal forma

que o fluxo de ar pelo reator seja somente através das mangueiras (Figura 2d).

Faça a montagem do circuito eletrônico do reator para acionamento da lâmpada de UV conforme instruções do fabricante, instalando também um interruptor liga/desliga.

Para a montagem do sistema contendo a atmosfera de ozônio, conecte uma das mangueiras ligadas no reator ao compressor de ar de aquário e introduza a outra em um dos aquários que deve estar virado para baixo. Para a montagem da atmosfera de controle (sem presença

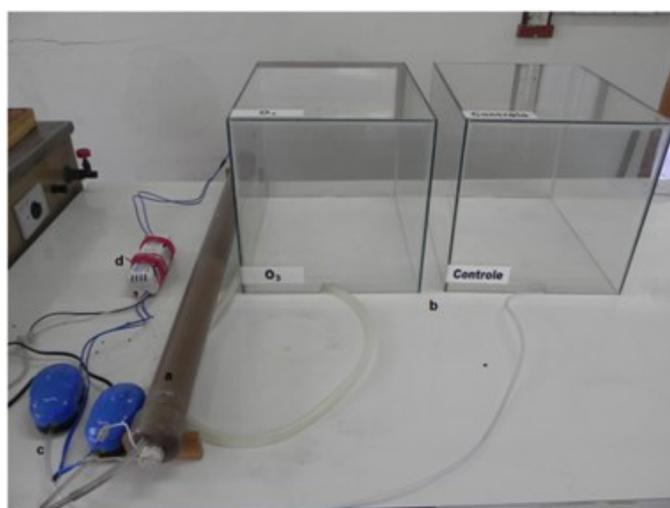


Figura 3: Foto ilustrativa do sistema completo contendo (a) reator de produção de ozônio; (b) cubas em vidro para simulação dos ambientes; (c) bombas de aquário utilizadas para introdução de gás atmosférico ou ozônio para dentro das cubas; (d) circuito elétrico para acionamento da lâmpada.

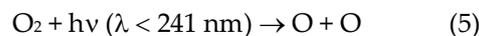
de ozônio) introduza a saída de ar do compressor de aquário para dentro do segundo aquário, que também deve estar virado para baixo (Figura 3).

Para realizar a simulação ambiental e avaliar os efeitos do gás ozônio em plantas, é possível utilizar plantas em germinação e plantas em estágio de floração. Para obter as plantas em germinação, plante as sementes de feijão e girassol em copos plásticos de 50 mL de capacidade. Para obter plantas em estágio de floração adquira, por exemplo, dois vasos de violetas com flores de mesma cor e que apresentem a maior semelhança possível. Transfira as mudas e os vasos de violetas para cada uma das cubas (controle e com O_3) e ligue o sistema. Registre por meio de anotações e fotos as mudanças observadas num período mínimo de um mês (nas flores, nas folhas e no processo de germinação). O sistema em questão deve ser mantido em local fresco e que receba luz solar. As plantas devem ser regadas a cada dois dias. Tenha cuidado ao manipular a lâmpada germicida, não olhe diretamente para ela e nem fique exposto diretamente à sua radiação, pois pode causar queimaduras e problemas na visão.

3 Resultados e Discussão

O ozônio é formado dentro do sistema montado com o tubo de PVC contendo uma lâmpada germicida. Esta lâmpada possui seu máximo de emissão de radiação UV no comprimento de onda de 254 nm, e possui energia suficiente para quebrar a molécula de oxigênio diatômico

a átomo de oxigênio (Equação 5). O átomo de oxigênio reage rapidamente com uma molécula de O_2 , formando uma molécula de ozônio (O_3) (Equação 6).



Cabe salientar que estas reações são similares às reações de geração de ozônio que ocorrem em nossa estratosfera, ou seja, a de formação da camada de ozônio que protege nosso planeta da radiação UV-C e parte da UV-B. Estas reações não ocorrem na troposfera para a formação do problema ambiental denominado *smog* fotoquímico. Neste experimento o reator está gerando o O_3 que está sendo introduzido a um ambiente fechado e assim será possível observar os efeitos danosos deste gás sobre a vegetação.

As espécies utilizadas para estudo (feijão, girassol e violeta) não são as mais utilizadas como bioindicadoras da presença de ozônio. Entretanto, as mesmas foram alvo desse trabalho pela facilidade de aquisição e pelo pequeno espaço físico que essas plantas ocupam, por serem plantas de pequeno porte.

Após o terceiro dia de incubação foram observadas lesões foliares consideráveis nas mudas de feijão e girassol (Figura 4b), apresentando ressecamento de suas folhas enquanto as mudas do ambiente controle se desenvolveram sem apresentar nenhuma lesão aparente (Figura 4a).

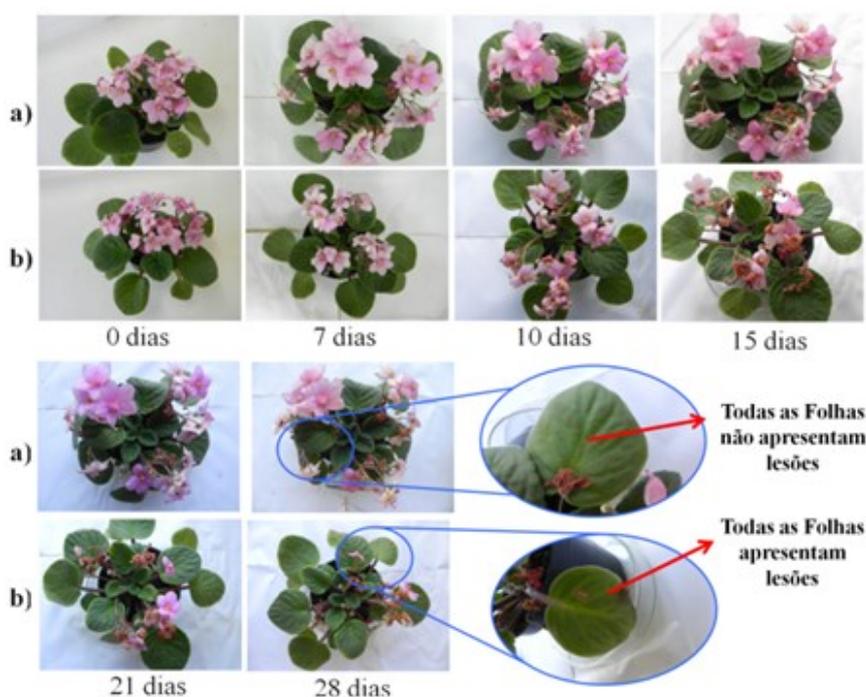


Figura 4: Fotos das mudas de feijão e girassol após incubação por três dias em: (a) ambiente controle (atmosfera de O_2 ambiente) e (b) atmosfera de ozônio.

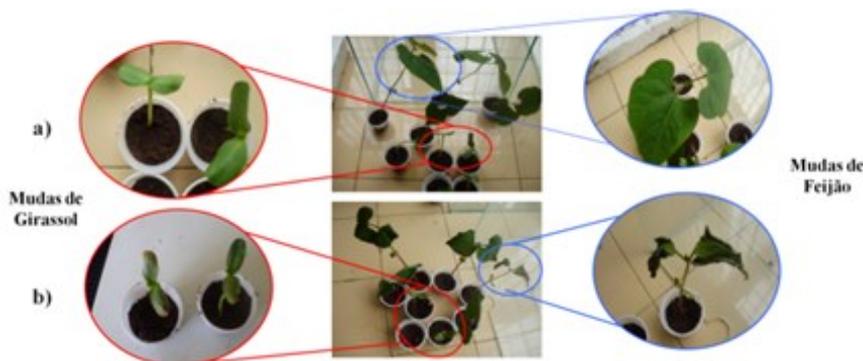


Figura 5: Fotos de violetas após incubação por respectivamente 0, 7, 10, 15, 21 e 28 dias em (a) ambiente controle (atmosfera de O_2 ambiente) e (b) atmosfera de O_3 .

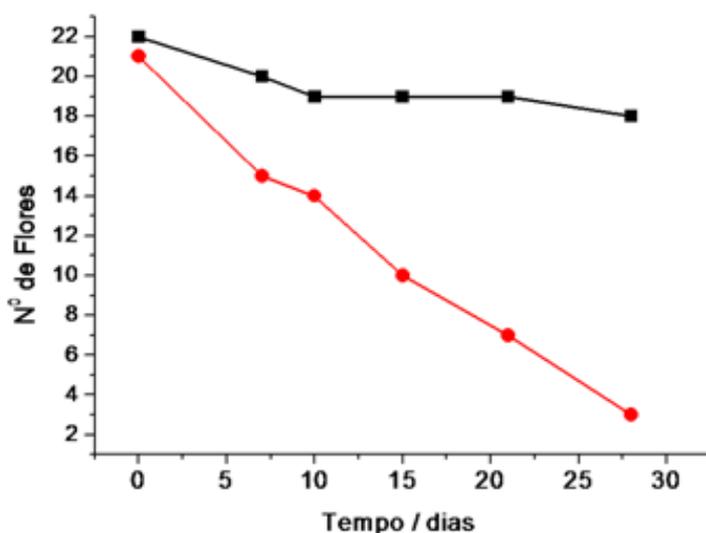


Figura 6: Gráfico representativo do número de flores vivas após exposição por: 0; 7; 10; 15; 21 e 28 dias em: (—■—) Controle (atmosfera de O_2 ambiente); (—●—) atmosfera de O_3 .

No estudo com as plantas em floração foram realizadas inspeções periódicas da evolução das plantas por um mês. Observou-se que aquelas mantidas em ambiente de ozônio apresentaram lesões foliares e maior perda de flores quando comparadas com as violetas mantidas em ambiente controle (Figura 5). As lesões foliares começaram a aparecer com dez dias de incubação. Ao final de um mês as folhas do vaso de violetas incubado no ambiente com O_3 apresentavam lesões notáveis localizadas nas bordas e na região central das folhas, ao passo que a violeta no ambiente controle não apresentou nenhuma lesão foliar. Já a perda de flores, foi observada tanto em ambiente controle quanto no ambiente teste. No entanto, observou-se que a perda de flores no ambiente contendo O_3 foi mais acentuada quando comparada com aquela em ambiente controle (Figura 6). Após 30 dias de experimento o sistema foi desligado e os dois vasos de violetas foram cuidados de forma igual em ambiente aberto. Quarenta e cinco dias após o término do expe-

rimento houve uma nova floração onde foi possível observar que o vaso de violeta que permaneceu sob os efeitos do ozônio apresentou menor número de flores e as lesões foliares existentes se agravaram.

4 Considerações Finais

Historicamente, as aulas de química do ensino médio, principalmente na rede pública, são em sua maioria teóricas, onde o aluno deve usar a imaginação para tentar visualizar os conceitos e fenômenos que o professor está ministrando. Os Parâmetros Curriculares Nacionais (1999) e as Orientações Curriculares Nacionais para o Ensino Médio (2006) vêm tentando mudar essa situação através da articulação entre o conhecimento empírico e teórico. Diante disso, este experimento foi elaborado com o intuito de auxiliar os professores na abordagem de um assunto do cotidiano dos alunos, frequentemente

divulgado na mídia que é poluição atmosférica e seus efeitos aos seres vivos. O experimento descrito, que pode ser montando em qualquer sala de aula, possibilita a visualização dos efeitos danosos do ozônio troposférico em plantas. Este experimento abre espaço para a discussão sobre o fenômeno de *smog* fotoquímico e das consequências diretas deste sobre o ambiente, o que pode levar à abordagem da importância da preservação ambiental. Essa é uma discussão que implica em conhecimentos interdisciplinares e que permite discutir a importância das inter-relações entre os conceitos químicos e aqueles próprios de outras áreas de conhecimento como a biologia. Por se tratar de um tema interdisciplinar, os professores poderão, inclusive, utilizar a abordagem CTSA relacionando Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente. Como sugestão poderão ser abordados temas como a diminuição da produção de alimentos e seus impactos, a questão da mobilidade urbana com o crescente aumento da frota de veículos, combustíveis fósseis e fontes energéticas alternativas, entre outros. Leituras complementares poderão ser sugeridas pelo professor dando subsídios para a participação ativa dos alunos através da apresentação de trabalhos como painéis ou seminários.

Agradecimentos

À FAPEMIG, à Rede Mineira de Química, ao CNPq e CAPES pelos apoios recebidos.

Referências

- Baird, C., Cann M. (2011) Química Ambiental. 4ª ed. Porto Alegre: Bookman.
- Dias, A.P.S.; Rinaldi, M.C.S., Moraes, R.M. (2007). Alterações bioquímicas associadas a injúrias foliares visíveis em plantas jovens de *Psidium guajava* 'Paluma' mantidas em ambiente contaminado por ozônio. *Hoehnea*, 34, 231-238.
- Furlan, C.M.; Moraes, R.M.; Bulbovas, P.; Domingos, M.; Salatino, A., Sanz, M.J. (2007). *Psidium guajava* 'Paluma' (the guava plant) as a new bio-indicator of ozone in the tropics. *Environmental Pollution*, 147, 691-695.
- Furlan, C.M.; Moraes, R.M.; Bulbovas, P.; Sanz, M.J.; Domingos, M., Salatino, A. (2008). *Tibouchina pulchra* (Cham.) Cogn., a native Atlantic Forest species, as a bio-indicator of ozone: visible injury. *Environmental Pollution*, 152, 361-365.
- Ferreira, L.H., Abreu, D.G., Yamamoto, Y., Andrade, J.F. (2004). Determinação simples de oxigênio dissolvido em água. *Química Nova na Escola*, 19, 32-35.
- Ferreira, L.H., Hartwig, D.C., Oliveira, R.C. (2010). Ensino experimental de química: Uma abordagem investigativa contextualizada. *Química Nova na Escola*, 32, 101-106.
- Galiazzi, M.C. e Gonçalves, F.P. (2004). A natureza pedagógica da experimentação: Uma pesquisa na licenciatura em Química. *Química Nova*, 27, 326-331.
- Giordan, M. (1999). O papel da experimentação no ensino de ciências. *Química Nova na Escola*, 10, 43-49.
- Guimarães, C.C. (2009). Experimentação no Ensino de Química: Caminhos e descaminhos rumo à aprendizagem significativa. *Química Nova na Escola*, 31, 198-202.
- Mozeto, A.A. (2001). Química atmosférica: a química sobre nossas cabeças. *Cadernos Temáticos: Química Nova na Escola*, 1, 41-49.
- Pina, J.M., Moraes, R.M. (2010). Gas exchange, antioxidants and foliar injuries in saplings of a tropical woody species exposed to ozone. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 73, 685-691.
- Rocha, J.C.; Rosa, A.H., Cardoso, A.A. (2009). Introdução à Química Ambiental. 2ª ed. Porto Alegre: Bookman.
- Spiro, T.G., Stigliani, W.M. (2009). Química Ambiental. 2ª ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall.