

EFEITOS DA CHUVA ÁCIDA EM RECURSOS FLORESTAIS

Rafael Marian Callegaro¹
Camila Andrzejewski²
Daniele Rodrigues Gomes¹
Felipe Turchetto¹
Jessé Calleti Mezzomo²
Adriana Griebeler³

RESUMO

A poluição atmosférica tem aumentado em níveis preocupantes, gerando consequências danosas a saúde humana e ao meio ambiente. A chuva ácida é um fator que está atrelado à elevação do grau poluente no ar, a qual tem recebido atenção científica, devido seu possível prejuízo. Com o objetivo de aglomerar informações sobre os efeitos da chuva ácida, foi realizada uma revisão bibliográfica em artigos científicos que tratam da deposição ácida e recursos florestais. Os resultados compilados evidenciaram vários problemas decorrentes da chuva ácida: lixiviação de nutrientes; necrose; desfolhação; elevação da acidez do solo; restrição à ocorrência de fungos micorrízicos. Ficou evidente a importância de experimentos com chuva ácida simulada, pois identificam efeitos da acidez sobre as plantas. Constatou-se também que espécies vegetais são bons bioindicadores da qualidade ambiental. Portanto, é de grande importância que se esclareçam os danos oriundos da precipitação ácida sobre ecossistemas florestais, sendo que a prevenção evitará danos ecológicos e financeiros.

Palavras-chave: poluição atmosférica; deposição; acidificação; ecossistemas florestais.

¹ Engenheiro(a) Florestal, Me., Doutorando em Engenharia Florestal, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria - Rio Grande do Sul - Brasil. E-mail:

rafaelm.callegaro@gmail.com; daniele.rodriguesgomes@yahoo.com.br; turchetto.felipe@gmail.com

² Engenheiro(a) Florestal, Mestrando(a) do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria - Rio Grande do Sul - Brasil. E-mail: camila_andrzejewski@hotmail.com; jessecm_@hotmail.com

³ Acadêmica do Curso de Engenharia Florestal. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria - Rio Grande do Sul - Brasil. E-mail: griebeleradriana@gmail.com

EFFECTS OF ACID RAIN ON FORESTS

ABSTRACT

The air pollution has increased at worrying levels, leading to harmful consequences to human health and the environment. Acid rain is a factor that is related to elevation degree of pollutant in the air, which have received scientific attention, since its effects are increasingly visible. With the aim of information cluster on the effects of acid rain, was held a literature review in scientific articles that dealing with acid deposition and forest resources. The compiled results evidenced several problems deriving of acid rain by leaching nutrients; necrosis, deciduous, increase soil acidity; restriction the occurrence of mycorrhizal fungi. It was evident the importance of experiments with simulated acid rain, because identify effects acidity on plants. It found that plant species are good bioindicators environmental quality. Therefore, is of big importance that if clarify the damages coming from acid precipitation on forest ecosystems, the prevent ecological damage and financial.

Keywords: air pollution; deposition; acidification; forest ecosystems.

INTRODUÇÃO

O termo “chuva ácida” surgiu a partir da constatação de um aumento na acidez da água que precipitava em várias regiões do planeta (Fornaro, 2006). Conforme a autora pode-se afirmar que o termo chuva ácida tem sido usado desde os primeiros estudos para descrever a acidificação da precipitação. Com a expansão das pesquisas sobre esse fenômeno, verificou-se a ocorrência de deposição de substâncias ácidas na forma de neve, nuvem, nevoeiro/neblina/garoa e até mesmo em ausência de fase líquida (deposição seca), assim o conceito de chuva ácida foi expandido para deposição ácida. Mas, ainda há divergência na literatura sobre o tema, sendo esses dois termos usados como sinônimos.

Considera-se “chuva ácida” aquela que apresenta $\text{pH} < 5$ e “chuva alcalina” aquela com $\text{pH} > 6$. Alguns estudos revelaram a acidez em águas da chuva em regiões industrializadas, onde foram constatados valores de pH inferiores que 4,5, chegando a 2 para eventos isolados em algumas regiões (Fornaro, 1991 citado por Fornaro, 2006).

Os estudos sobre a acidez das chuvas têm sido aprofundados principalmente em regiões mais industrializadas, onde se observa um efeito mais visível do resultado da interferência humana sobre o ambiente que acabam retornando para a própria sociedade por meio da precipitação (Marques et al., 2006).

No Brasil, a poluição atmosférica passou a constituir um novo fator de degradação da vegetação a partir de 1960, com a expansão da industrialização do país e o surgimento de grandes centros urbanos (Pompéia, 1997). Além de poluir rios e lagos, destruindo flora e fauna aquática, a chuva ácida infiltra no solo, liberando metais potencialmente tóxicos tais como Al, Pb, Cd, que podem se introduzir na cadeia alimentar.

A extensão, na qual a precipitação ácida afeta uma determinada área, depende significativamente da composição do solo: áreas fortemente afetadas são as que contêm granito ou quartzo, já que estes têm pequena capacidade de neutralização; em contraste,

solos contendo carbonato de cálcio, podem neutralizar a acidez de modo mais eficiente (Martins e Andrade, 2002).

Conforme Pompéia (2000 citado por Lopes, 2001), dentre os locais sujeitos à poluição atmosférica no país, a região da Serra do Mar, situada em torno do pólo industrial de Cubatão-SP, é a que sofre os maiores impactos, tornando-a um grande laboratório natural para a investigação dos efeitos da poluição sobre a floresta tropical úmida. Isto corrobora com a afirmação de que ecossistemas florestais próximos a centros urbanos e pólos industriais estão mais suscetíveis a impactos oriundos da poluição atmosférica, a qual caracteriza a chuva ácida como agente deteriorante do meio ambiente.

Nos últimos anos, tem se verificado uma relação direta entre danos à vegetação e a precipitação ácida. O fenômeno de destruição de florestas foi observado pela primeira vez, em larga escala, na Alemanha, onde florestas com elevadas altitudes são as mais afetadas pela precipitação ácida, provavelmente por estarem mais expostas à base de nuvens baixas, onde a acidez é mais concentrada (Martins e Andrade, 2002).

Ao atingir ecossistemas florestais a precipitação ácida pode alterar a ciclagem de nutrientes influenciando no estado nutricional das plantas. Em regiões tropicais, onde o solo é normalmente ácido e pobre em nutrientes devido sua volatilização e percolação para camadas inferiores do solo, é possível supor que, os efeitos oriundos da poluição aérea sejam mais intensos, podendo provocar graves alterações no balanço nutricional das plantas (Lopes, 2001).

Foram desenvolvidos trabalhos isolados com avaliação do efeito da acidez na inibição da germinação e crescimento de plantas; acidificação de solos de florestas; diminuição da produção de frutas causada pela acidez de lagos, rios e outros (Cowling, 1982; Fornaro, 2006).

Nesse contexto, pode-se atrelar a deposição ácida a possíveis problemas no crescimento de plantas, acidificação do solo e aporte de elementos tóxicos em florestas, além da acidificação de rios e lagos. Assim, o presente trabalho tem como objetivo realizar uma revisão bibliográfica sobre os efeitos da deposição ácida nos recursos florestais.

DESENVOLVIMENTO

Efeitos da chuva ácida. Igawa et al. (2002) avaliaram a lixiviação de nutrientes por nevoeiro ácido na espécie abeto - *Abies firma* Siebold & Zucc (abeto), numa floresta natural do Japão. Os autores observaram a lixiviação dos íons Ca^{2+} e Mg^{2+} , por meio da troca iônica com os cátions do nevoeiro ácido, além do aumento na quantidade de boro lixiviado com o aumento da concentração de Ca^{2+} lixiviado (Figura 1). Os coeficientes de correlação foram de 0,63 para o experimento de campo e de 0,82 para o experimento de laboratório, sendo ambas significativas ao nível de 1%. Ao final do experimento, concluíram que a deficiência de cálcio e boro por lixiviação pode ser uma das principais causas de declínio da floresta de abeto. A alta lixiviação de íons de cálcio por nevoeiro ácido também foi observado por Igawa et al. (2002b).

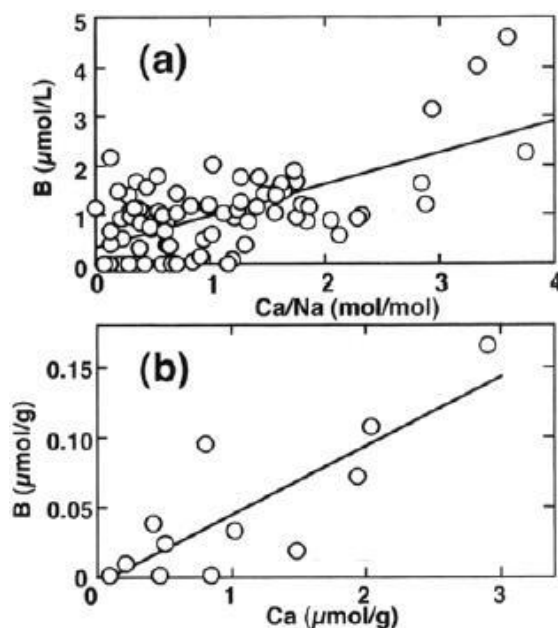


Figura 1 - Lixiviação de boro (a) na precipitação e (b) no experimento de aplicação laboratorial. A névoa ácida simulada foi aplicada às acículas dos ramos de mudas de abeto, e as soluções aplicadas foram em diferentes concentrações de ácido nítrico, clorídrico e sulfúrico com pH 2,5-5,0.

Fonte: Igawa et al. (2002).

Conforme Wang et al. (2007), danos em florestas de *Pinus* na Europa têm sido associados à deficiência de macronutrientes, tais como Mg, K e Ca nas acículas, devido ao empobrecimento de cátions básicos disponíveis no solo, agravado por meio da acidificação do solo pela chuva ácida.

Wang et al. (2007) sugerem que a menor longevidade da acícula de *Pinus massoniana*, em uma floresta natural com ocorrência da espécie (Tabela 1), localizada na porção de floresta da bacia hidrográfica Lu Chong Guan (LCG), está relacionada a maior concentração de SO₂ no ar.

Tabela 1 - Percentual de *Pinus massoniana* avaliados (classes Kraft 1-3) com intervalos diferentes de desfolha em período 2000-2004.

Sítio	Intervalo de desfolhação (%)	Ano					Classe de desfolhação
		2000	2001	2002	2003	2004	
TieShanPing	0-10	7,5	0,5	0,3	0,0	0,5	Sem
	11-25	17,3	9,5	4,8	7,3	9,3	Leve
	26-60	63,0	77,2	69,3	78,7	77,5	Moderada
	61-99	12,2	7,4	18,0	12,3	10,7	Severa
	100	0	5,4	7,6	1,6	1,9	Morta
LuChongGuan	0-10	50,7	35,7	11,9	2,2	4,0	Sem
	11-25	34,6	43,1	50,2	25,5	35,5	Leve
	26-60	13,2	19,5	34,7	59,0	54,3	Moderada
	61-99	1,5	1,9	2,9	13,3	5,4	Severa
	100	0,0	0,0	0,4	0,0	0,7	Morta

Fonte: Wang et al. (2007).

Mello e Almeida (2004) ao analisarem a água da chuva no Parque Nacional de Itatiaia (RJ), sugeriram que a oxidação de SO₂ originou a maior parte de SO₄ presente na água da chuva, a qual, conseqüentemente, pode ter desempenhado um papel importante na determinação da acidez da água da chuva. Nesse contexto, é possível relacionar, em parte, uma maior desfolhação de árvores com uma maior abundância de SO₂ na precipitação.

Tie Shan Ping (TSP) está aproximadamente 25 km a nordeste do centro da cidade de Chongqing, a qual é considerada como a maior cidade com maior poluição atmosférica no Sul da China, com uma faixa de elevação de 512 a 579 m. Lu Chong Guan (LCG) está localizado ao nordeste a cerca de 10 km do centro da cidade de Guiyang, capital da Província de Guizhou, com faixa de elevação de 1320-1400 m (Wang et al., 2007). Essas características indicam que a distância de centros urbanos e a cota de elevação de uma floresta são fatores que podem alterar os níveis de impactos ocasionados pela precipitação ácida.

A proximidade de fontes poluidoras pode determinar uma maior concentração de poluentes no ar, as quais em parte podem reagir com elementos presentes na água em suspensão, alterando a concentração de íons formadores da acidez. Martins e Andrade (2002) citam que florestas com elevadas altitudes são as mais afetadas pela precipitação ácida, provavelmente por estarem mais expostas à base de nuvens baixas, onde a acidez é mais concentrada.

Estudos realizados em várias partes do mundo vêm demonstrando que os fungos micorrízicos arborícolas (FMAs), conferem às plantas que os abrigam resistência a agentes causadores de estresses ambientais, como chuvas ácidas e metais pesados (Mazzoni-Viveiros e Trufem, 2004). Os autores constataram que baixos valores de pH favorecem a ocorrência de espécies do gênero *Acaulospora* e *Scutellospora*, enquanto *Gigaspora* teve sua ocorrência em solo menos ácido. Quanto ao gênero *Glomus*, foi verificada a ausência no sítio com o valor mais elevado de pH (Vale do Rio Pilões) e presente naqueles de valores menores (Reserva Biológica do Alto da Serra de Paranapiacaba e Vale do Rio Moji). Desta forma, é possível afirmar que o aumento da acidez do solo, oriunda em parte da deposição ácida, interfere na proteção do sistema radicular de árvores quando estas não estão associadas a fungos micorrízicos.

Os possíveis efeitos de chuva ácida simulada sobre plântulas e plantas juvenis de espécies arbóreas tem sido foco de estudo, uma vez que a chuva ácida simulada traz como vantagem a possibilidade de controlar a concentração de elementos na solução e determinar como varia a influência de cada elemento. Um dos itens observados é o possível impacto de elementos tóxicos sobre a estrutura foliar. Tais estudos têm grande importância, pois, podem evidenciar problemas decorrentes da ação de ácidos em determinadas espécies.

Nesse sentido, Sant'Anna-Santos et al. (2006) avaliaram o efeito de chuva ácida simulada sobre a anatomia e a micromorfologia de *Genipa americana* L., genipapo (Rubiaceae), em plântulas e plantas juvenis. Foram observados nas folhas expostas à chuva ácida: necroses pontuais intervenais, colapso das células do mesófilo e da epiderme; hipertrofia do parênquima lacunoso e acúmulo de compostos fenólicos e grãos de amido. A análise micromorfológica evidenciou, nas áreas necrosadas, plasmólise das células-guarda e ruptura da cutícula e da crista estomática. Alterações anatômicas ocorreram antes que sintomas visuais fossem observados nas folhas. Estes resultados comprovam a importância de dados anatômicos na diagnose precoce da injúria e na determinação da sensibilidade de *G. americana* à chuva ácida.

A elevada acidez da chuva ácida simulada (pH= 3,0) está relacionada a uma alta concentração de íons de hidrogênio na água, o que pode ser verificado em locais e/ou

regiões onde há grande emissão de poluentes. No Brasil, uma das regiões que pode chegar a esse valor é a região metropolitana de São Paulo, onde no período de 1983/1985 foi medida a acidez máxima de 2,7 e acidez média de 4,6 (Jesus, 1996). Embora, um pH tão baixo seja raro, deve-se dar atenção aos resultados encontrados por de Sant'Anna-Santos et al. (2006), pois sintomas semelhantes podem acometer espécies que tenham características morfológicas similares e se localizem próximas a zonas com elevada acidez na precipitação.

A aspersão de chuva ácida (pH= 3,0) sobre a espécie *Eugenia uniflora* L. (pitangueira) ocasionou várias manchas necróticas, diferindo estatisticamente do tratamento controle (pH= 6,5), em contraste a *Clusia hilariana* Schlttdl. onde foram observadas poucas manchas necróticas (Tabela 2). *C. hilariana* e *E. uniflora* são espécies dominantes da restinga, local no qual onde foram coletadas as sementes para germinação e posterior obtenção de mudas a serem submetidas a aplicação dos tratamentos com chuva ácida. Estas espécies, apresentaram lesões foliares quando próximas na região em torno de uma fábrica de “pelotização” de ferro, indicando que a emissão de poluentes como H₂SO₄ está afetando parte da vegetação próxima e também pode afetar as plantas juvenis das espécies (Silva et al., 2005).

Tabela 2 - Grau de necrose foliar (escores atribuídos)*

	<i>Eugenia uniflora</i>	<i>Clusia hilariana</i>
Controle	0,08 ± 0,17 B	0,00 ± 0,00 a
Chuva ácida	1,25 ± 0,50 A	0,17 ± 0,19 a

Médias ± desvio padrão, n= 4. Diferenças significativas (p < 0,05) são indicadas por letras diferentes. Letras maiúsculas comparam médias de *E. uniflora* e letras minúsculas comparam médias de *C. hilariana*. *0 - sem necroses; 1 - com necroses até 25 % da área foliar; 2 - com necroses em 26 a 50% da área foliar; 3 - necroses em 51-75% da área foliar; 4 - necroses em 76 a 100% da área foliar.

Fonte: Silva et al. (2005).

Plântulas e mudas das espécies *Gallesia gorazema* Moq. (Phytolaccaceae), *Genipa americana* L. (Rubiaceae), *Joannesia princeps* Vell. (Euphorbiaceae), *Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub. (Fabaceae) e *Spondias dulcis* Forst. f. (Anacardiaceae), foram submetidas a 20 min diários de chuva com flúor (30 mg.L⁻¹), por 10 dias consecutivos. Como consequências, foram observadas necroses apicais e marginais nas folhas de todas as espécies logo após a primeira chuva simulada. *S. dulcis*, no estágio de muda, foi a espécie mais sensível ao flúor, pois apresentou extensas necroses com apenas dois dias de tratamento, enquanto que *G. americana* foi a espécie mais resistente (Silva et al., 2000). De acordo com os autores, a sensibilidade ao flúor observada em *S. dulcis* indica que essa espécie apresenta potencial para ser usada como bioindicadora da qualidade.

Nesse sentido, é interessante avaliar a fitotoxidade de elementos químicos da precipitação ácida sobre espécies presentes nos distintos ecossistemas brasileiros, uma vez que podem servir como bioindicadoras do grau de acidez oriunda da deposição ácida nas respectivas regiões do Brasil.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio das referências bibliográficas consultadas foi possível enumerar vários problemas relacionados à precipitação ácida: (1) lixiviação de nutrientes, principalmente

nas folhas; (2) desfolhação; (3) necrose (4) elevação da acidez do solo; (5) restrição à ocorrência de fungos micorrízicos.

Atribui-se grande importância a experimentos com chuva ácida simulada, pois evidenciam efeitos de elementos ácidos sobre as plantas, tendo em vista, que os resultados obtidos a campo podem sofrer a influência de outros fatores. Entre esses efeitos citam-se as alterações micromorfológicas de folhas e o estabelecimento de determinadas espécies como bioindicadoras.

Enfim, é de suma importância que se esclareçam os danos oriundos da precipitação ácida sobre ecossistemas florestais, sendo que a prevenção evitará danos ecológicos e financeiros.

REFERÊNCIAS

COWLING, E. B. Acid precipitation in historical perspective. **Environmental Science & Technology**, Washington, v. 16, n. 2, p. 110-123, 1982.

FORNARO, A. Águas de chuva: conceitos e breve histórico. Há chuva ácida no Brasil? **Revista USP**, São Paulo, v. 70, p. 78-87, 2006.

IGAWA, M. et al. Acid fog removes calcium and boron from fir tree: one of the possible causes of forest decline. **Journal of Forest Research**, Japão, v. 7, n. 4, p. 213-215, 2002.

IGAWA, M. et al. Severe leaching of calcium ions from fir needles caused by acid fog. **Environmental Pollution**, Pennsylvania, v. 119, n. 3, p. 375-382, 2002.

JESUS, E. F. R. de. A importância do estudo das chuvas ácidas no contexto da abordagem climatológica. **Sitientibus**, Feira de Santana, v. 14, p. 143-153, 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, R. et al. Ensaio preliminares para o monitoramento da acidez da chuva em Cuiabá-MT. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 7, n. 1, p. 225-235, 2006.

MARTINS, C. R.; ANDRADE, J. B. de. Química atmosférica do enxofre (IV): emissões, reações em fase aquosa e impacto ambiental. **Química Nova**, v. 25, p. 259-272, 2002.

MAZZONI-VIVEIROS, S. C.; TRUFEM, S. F. B. Efeitos da poluição aérea e edáfica no sistema radicular de *Tibouchina pulchra* Cogn. (Melastomataceae) em área de Mata Atlântica: associações micorrízicas e morfologia. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 27, p. 337-348, 2004.

MELLO, W. Z. de; ALMEIDA, M. D. de. Rainwater chemistry at the summit and southern flank of the Itatiaia massif, Southeastern Brazil. **Environmental Pollution**, v. 129, p. 63-68, 2004.

POMPÉIA, S. L. **Sucessão secundária da Mata Atlântica em áreas afetadas pela poluição atmosférica de Cubatão, SP.** 193 f. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

SANT'ANNA-SANTOS, B. F. et al. Effects of simulated acid rain on leaf anatomy and micromorphology of *Genipa americana* L. (Rubiaceae). **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 49, p. 313-321, 2006.

SILVA, L. C. da. et al. Flúor em chuva simulada: sintomatologia e efeitos sobre a estrutura foliar e o crescimento de plantas arbóreas. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 23, p. 385-393, 2000.

SILVA, L. C. da et al. Micromorphological and anatomical alterations caused by simulated acid rain in restinga plants: *Eugenia uniflora* and *Clusia hilariana*. **Water, Air and Soil Pollution**, v. 168, p. 129-143, 2005.

WANG, Y. et al. Assessments of tree crown condition of two Masson pine forests in the acid rain region in south China. **Forest Ecology and Management**, v. 242, p. 530-540, 2007.