

A IMPORTÂNCIA DO ESTUDO DAS CHUVAS ÁCIDAS NO CONTEXTO DA ABORDAGEM CLIMATOLÓGICA

Emanuel Fernando Reis de Jesus
 Prof. Titular do Dep. de Ciências Humanas e Filosofia
 Doutor em Geografia Física - FFLCH/USP
 Prof. Adjunto do Dep. de Geografia - IGEO/UFBA
 Prof. Titular do Dep. de Geografia - IFCH/UCSAL

RESUMO — *Este trabalho aborda alguns aspectos relativos ao estudo da chuva ácida, focalizando seus efeitos a longo prazo, sobre o meio ambiente, assim como sobre a saúde humana. A chuva ácida, convencionalmente, é considerada aquela que apresenta valores de pH inferiores a 5,6. O decréscimo de uma unidade de pH significa um aumento de dez vezes na concentração de íon de hidrogênio. A questão da chuva ácida representa um dos temas de extrema relevância no contexto da climatologia urbana, nos dias contemporâneos.*

ABSTRACT — *This paper deals with some aspects related to the study of acid rain focusing its long remaining effects not only on environment but on human health as well. The term, acid rain, is closely related to a kind of rain whose level, in terms of pH, is lower than 5.6. The decrease of a unity of pH means ten times the increase in the concentration of hydrogen ion. Nowadays, the debate over acid rain is considered as one of the most important themes concerning urban climatology.*

Nos últimos anos, quando o homem parece acordar para os grandes problemas neste final de século, podemos enumerar os vários estragos que o mesmo vem causando à natureza com repercussões nos diversos ecossistemas terrestres. A chuva ácida, particularmente, não representa um problema recente, ela é tão antiga quanto a própria Revolução Industrial. A primeira vez em que o termo chuva ácida apareceu na literatura climatológica, data do século XIX, precisamente, no ano de 1872, na obra elaborada por ROBERT ARGUS SMITH intitulada *Air and rain: the beginnings of a Chemical Climatology*. O trabalho de SMITH obteve grande êxito, uma vez que o autor procurou estabelecer, pela primeira vez, uma relação entre o pH da chuva e a combustão do carvão numa determinada área industrial.

CROWTHER e RUSTON (1911), citados por COWLING (1982), relacionaram a acidez com a combustão de carvão, demonstrando que a chuva ácida inibia o crescimento e a germinação de plantas,

além de afetar a fixação do nitrogênio no solo. Em 1922, o biólogo norueguês KNUT DAHL, também citado por COWLING (1982), reconhecia a estreita relação entre a acidez das chuvas e a morte de plantas e dos peixes em vários lagos da Noruega. As observações realizadas por DAHL revelaram que a acidez foi responsável pela morte de algas, plânctons e insetos. Sem essa vida microscópica, as águas adquiriram uma transparência fora do normal. Por outro lado, como parte da cadeia alimentar, DAHL constatou que as aves, sem ter o que comer, migraram para outras áreas.

BOTTINNI (1939), citado por COWLING (1982), detectou a presença do ácido hidrocloreídrico na água da chuva, nas áreas próximas ao vulcão Vesúvio, assinalando ser essa a fonte de acidez. ERIKSSON (1950) desenvolveu várias pesquisas relacionadas com as chuvas ácidas e seus principais efeitos sobre as regiões.

A questão da acidificação vem-se agravando cada vez mais nas últimas décadas, constituindo-se um problema de natureza ecológica em várias regiões onde haja grandes aglomerações urbanas e/ou centros industriais. Segundo as pesquisas realizadas pela UNESCO (1964), as bacias fluviais e lacustres foram as primeiras a aparecerem como vítimas das chamadas chuvas ácidas. A razão disso deve-se ao fato de que o subsolo dessas áreas, formado a partir de minerais, como, granitos e rochas ricas em quartzo e gnaisses, não se desagrega com facilidade e praticamente não pode neutralizar o ácido que recebe das águas pluviais, tornando-o dessa forma mais vulnerável à acidez.

A poluição produzida por países altamente industrializados como, Alemanha, França e Inglaterra vem sendo transportada pelos ventos para outras regiões, causando um fenômeno, a Noruega, conhecido como morte das florestas, pelo qual as árvores mais altas começam a ser atingidas pelas ponteiros. Concomitantemente, os lagos tornaram-se acidificados, provocando a toxidez da água e a conseqüente morte dos peixes.

A chuva ácida, no sentido mais amplo, pode ser traduzida como uma devolução da poluição que o homem cria sobre a superfície terrestre. A longo prazo, seus efeitos constituem um importante indicador das condições de degradação do meio ambiente, estando, portanto, ligada à qualidade do ar sobre as áreas fortemente urbanizadas. Do ponto de vista da análise química, a chuva ácida corresponde àquela em que o pH se apresenta inferior a 5,65, sendo seu caráter ácido associado à poluição do ar.¹ As gotas de água das chuvas vêm misturadas com água oxigenada e ácidos sulfúrico, nítrico, acético e fórmico além do sulfato e nitrato de amônia. Portanto, esse tipo de precipitação pluviométrica é resultante da produção e emissão

de gases, como, dióxido de enxofre e óxidos de nitrogênio, que são lançados na baixa atmosfera pelas ações antrópicas e sofrem as reações mais variadas em contato com a água. O ácido que cai das nuvens sobre qualquer região do planeta é responsável pela destruição de metais, dos monumentos públicos, mortes das plantas e também afeta a saúde humana.

No Brasil em particular, esse problema é bastante acentuado sobre as nossas maiores metrópoles nacionais. Nas duas últimas décadas, foram desenvolvidas pesquisas voltadas para investigação desse problema. Além das nossas maiores metrópoles, outras áreas em nosso território também já registram sintomas dos efeitos emanados das chuvas ácidas, como na região carbonífera de Santa Catarina, nos arredores dos pólos industriais de Paulínia, em São Paulo, na área industrial de Ipatinga, em Minas Gerais, além da região do Pólo Petroquímico de Camaçari, no Estado da Bahia.

A chuva ácida que ocorre na cidade de São Paulo já apresenta um PH médio de 4,6, o que significa estar numa situação semelhante à de Los Angeles, segundo dados analisados pelos pesquisadores do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), detectados no período 1983/85. Os dados analisados revelaram que, nas amostras recolhidas, havia uma acidez máxima de 2,7 e a mínima em torno de 6,3, sendo que o valor médio do pH para todas as amostras coletadas foi de 5,0. Caso a chuva fosse normal, deveria apresentar um valor de pH igual a 5,6.

Em 1986, pesquisadores da UFF (Universidade Federal Fluminense) constataram que a vegetação da floresta da Tijuca, na cidade do Rio de Janeiro, estava sendo afetada pelos efeitos das chuvas ácidas.

A chuva ácida não provoca efeitos diretos e perceptíveis pela população. Ela passa muitas vezes quase que despercebida, porém, é aí que está o perigo. No Brasil, ainda se fala muito pouco sobre esse problema. Existe uma escassez muito grande de pesquisas direcionadas para essa questão. Contudo, cabe ressaltar que foram de grande valia as contribuições realizadas por TAVARES (1983) que estudou a concentração iônica e a acidez das águas de chuva no Estado de São Paulo. (BROWN (1983), com o estudo da acidez das chuvas sobre a floresta da Tijuca. NORDEMANN (1984), através do estudo sobre a composição das águas das chuvas em quatro pontos diferentes da cidade do Salvador. LIMA (1985), que se deteve em investigar a correlação existente entre a influência da composição vegetal na concentração de íons e a acidez das águas da chuva. LISBOA e SANT'ANNA (1990) realizaram estudos sobre a qualidade das águas da chuva na cidade de Tubarão, em Santa Catarina, localizada numa região carbonífera onde a emissão de enxofre é a principal causadora das chuvas ácidas.

Em várias partes do mundo, os estragos resultantes das chuvas ácidas, sobretudo na Europa e na América do Norte, são extremamente preocupantes. Na Grécia, as pedras que restaram do Partenon, em Atenas, se dissolveram aos poucos; na Alemanha, a arquitetura gótica da catedral de Colônia foi corroída ao longo dos anos. Ainda na Alemanha, cerca de 35% das florestas sofreram influência das chuvas ácidas. Sabe-se que a chuva química degrada os equipamentos, fios e cabos dos sistemas de transmissão de energia e de telefonia, lavouras são esturricadas e os animais têm a pele queimada.

A ação das chuvas ácidas foi a responsável pela restauração recente por que passou um dos maiores símbolos turísticos da cidade do Rio de Janeiro, o Cristo Redentor, instalado no alto do Morro do Corcovado, a 709 metros acima do nível do mar, localizado no Parque Nacional da Tijuca. A estátua, inaugurada em 1931, mede, aproximadamente, 38 metros, foi castigada ao longo desses anos pelos ventos, pela umidade, fortes tempestades, porém, a ação mais devastadora foi a das chuvas ácidas.

Transportados pelos ventos, os poluentes atmosféricos se espalham pela atmosfera até centenas de quilômetros de distância dos locais onde foram liberados. Os males para a saúde do homem ainda continuam sendo estudados pelos médicos que não chegaram ainda a resultados conclusivos. Contudo, o patologista SALDIVA, do Laboratório de Poluição Atmosférica Experimental da Universidade de São Paulo, afirma que as partículas ácidas presentes na chuva têm efeito cumulativo sobre o organismo, podendo acelerar o desenvolvimento de doenças para aquelas pessoas menos saudáveis. Para aquele pesquisador, as partículas se acumulam no nariz e na garganta, porém, enquanto isso acontece pioram os casos relacionados à asma, rinite e sinusite alérgica. O referido pesquisador vai mais longe, afirmando que, quando as partículas de ácido sulfúrico e ácido nítrico solúveis na chuva se infiltram nos brônquios, reduzem os seus mecanismos de defesa contra as infecções oportunistas. Isso, segundo SALDIVA, predispõe ao aparecimento de broncopneumonias. Por último, os olhos expostos à poluição da chuva têm probabilidade maior de apresentar conjuntivite. Doenças, como, bronquite, asma e rinite, entre outras, surgem ou se intensificam pela alta taxa de concentração de dióxido de enxofre no ar. Em regiões de climas mais frios, como no sul do Brasil, a situação se agrava devido ao processo das inversões térmicas.

Quando o ar atmosférico está desprovido de poluentes, o único ácido que influencia no pH das chuvas é o ácido carbônico. Esse ácido, dissolvido na água pura, mantém o pH das águas pluviais

levemente ácido, com valores pouco abaixo de 5,65. O dióxido de enxofre (SO_2) representa o principal elemento responsável pela acidez das chuvas, um fragmento do ácido sulfúrico cujo odor é extremamente desagradável. No momento em que o SO_2 é submetido a determinadas reações no ar atmosférico, o SO_2 (dióxido de enxofre) oferece-se como pilar para o ácido sulfúrico. Juntam-se a estes os óxidos de nitrogênio (NO_2), lançados de forma indiscriminada na atmosfera ao longo das últimas décadas. O enxofre é liberado para a atmosfera pela atividade humana e pela decomposição de algas. No ar atmosférico, os óxidos de enxofre ligam-se às moléculas de água, formando ácido sulfúrico, que é um dos componentes-chaves da chuva ácida. Um dos derivados do enxofre, o dimetil-sulfeto, atua na atmosfera como núcleo de condensação de nuvens e de vapor d'água. A Figura 1 apresenta um breve esquema sobre a ação do enxofre na atmosfera.

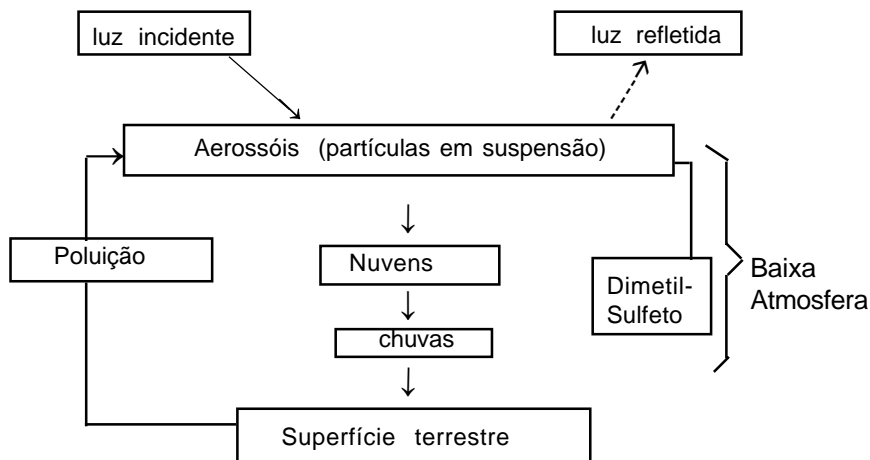


Fig. 1 . Ação do enxofre na atmosfera

Quando forma partícula de sulfanato de metano, o enxofre atua como aerossol e reflete a luz proveniente do sol, reduzindo a sua intensidade sobre a superfície terrestre. Por outro lado, a presença de dimetil-sulfeto atua como núcleo para a formação de nuvens. Essas nuvens são capazes de refletir até 90% da luz visível proveniente do sol.

O nitrogênio, por sua vez, como poluente do ar atmosférico, é originado no processo de combustão do carvão vegetal, na combustão dos derivados de petróleo, especialmente nos veículos e fontes motoras. Na reação do nitrogênio com o oxigênio, sob condições de temperaturas muito elevadas, ocorre a formação do óxido nítrico. O Quadro 1 focaliza os mecanismos químicos responsáveis pela formação de chuva ácida na baixa atmosfera.

Quadro 1. Mecanismos químicos de formação da chuva ácida

Óxidos de Enxofre		Óxidos de Nitrogênio	
$S+O_2$	SO_2	N_2+O_2	$2NO$
SO_2+H_2O	H_2SO_3	$2NO+O_2$	$2NO_2$
$H_2SO_3+\frac{1}{2}O_2$	Catalizador H_2SO_4	$2NO_2+H_2O$	$NH_4NO_2+HNO_3$
$2SO_2+O_2$	Catalizador $2SO_3$	HNO_2+NH_3	NH_4NO_2
SO_2+H_2O	H_2SO_4	HNO_3+NH_3	NH_4NO_3
$H_2SO_4+NH_3$	$(NH_4)_2SO_4$	$2HNO_2+CaCO_3$	$Ca(NO_2)_2+H_2O+CO_2$
$H_2SO_4+CaCO_3$	$CaSO_4+H_2O+CO_2$	$2HNO_3+CaCO_3$	$Ca(NO_3)_2+H_2O+CO_2$

Fonte: COOPER Jr. et alli (1976)

Recentemente, foi detectada, no Brasil, a ocorrência de chuvas com pH médio, em torno de 4,7, tanto em áreas urbanizadas como em áreas onde esse processo ainda é pouco acentuado, levando a crer que a poluição já se espalhou por toda parte. Na Amazônia, por exemplo, foram coletados valores de pH entre 4,5 e 4,7 com valores bem próximos daqueles coletados em São Paulo e no Rio de Janeiro. A explicação para isso deve-se ao fato de que a chuva ácida provém da oxidação do sulfeto de hidrogênio, ou seja, a reação do sulfeto em contato com o oxigênio do ar, que se volatiliza nas regiões alagadas, mas resulta, principalmente, da grande quantidade de ácidos orgânicos emitidos pela própria floresta.

O Quadro 2, a seguir, relaciona alguns países do mundo onde há ocorrência de chuvas ácidas e suas principais conseqüências.

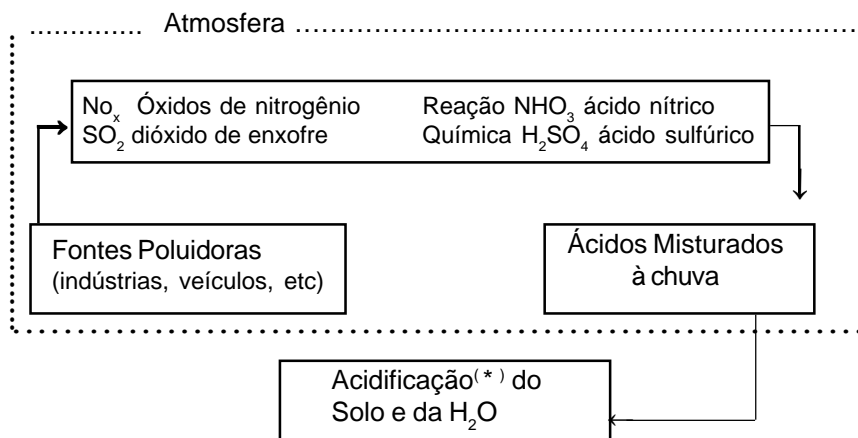
Quadro 2. Ocorrência de chuvas ácidas no plano mundial

Países	Problemas registrados
CANADÁ	Além de danos sobre a vegetação, a água de 300 lagos na região de Ontaro tem pH inferior a 5.
ESTADOS UNIDOS	Extensos danos sofrem as florestas de Coníferas e nos Montes Apalaches. Cerca de 10% dos lagos da Região das Montanhas ADIRONDAK têm pH inferior a 5.
BRASIL	As cidades de São Paulo e Rio de Janeiro registram chuvas com pH inferior a 5 médio.
SUÍÇA	Na região dos Alpes Centrais, cerca de 50% das Coníferas estão mortas ou danificadas.
REINO UNIDO	A chuva ácida causou estragos em 67% das florestas.
NORUEGA	Na região Sul daquele país, cerca de 80% dos lagos estão biologicamente mortos ou extremamente ameaçados.
GRÉCIA	A poluição ácida em Atenas ameaça o Partenon e outros edifícios históricos.
SUÉCIA	Estão acidificados 20 mil lagos, onde cerca de 4 mil deles não têm mais peixes.
ALEMANHA	As chuvas ácidas causaram estragos em mais da metade de suas florestas.
POLÔNIA	A chuva ácida provocou um grande efeito corrosivo sobre as dormentes de suas ferrovias
REPÚBLICA SUL AFRICANA	A chuva ácida provocou danos nos edifícios e monumentos históricos.
ÍNDIA	A poluição industrial danifica edifícios em Bombaim e o Palácio de Taj Mahal um dos mais importantes monumentos hindus.
CHINA	Próximo a Chongging, a chuva ácida causou danos às plantações de arroz, em Guiyang as chuvas têm pH médio inferior a 4.
JAPÃO	Em Tóquio, certos problemas de saúde são atribuídos ao ar extremamente poluído.

Fonte: The Global Ecology Handbook (1990).

Os gases químicos lançados na atmosfera podem retornar de três maneiras: em forma de chuva ácida propriamente dita, neblina (névoa) ou deposição seca (poeira-material particulado).

Mesmo sendo ácida, a chuva ainda pode ser considerada como um mecanismo eficaz de lavagem, ou seja, de limpeza da atmosfera poluída, principalmente no inverno, quando os índices de poluição são mais elevados. Porém, cabe ressaltar que a lavagem da atmosfera apenas transfere a sujeira para os rios e os lagos, acarretando sérios problemas de natureza ambiental. A Figura 2 apresenta um pequeno esboço referente ao processo de formação da chuva ácida.



(*) Acidificação — reação dos óxidos de nitrogênio e dióxido de enxofre com componentes químicos das nuvens

Fig. 2

O dióxido de enxofre (SO_2), junto com os óxidos de nitrogênio (No_x), tem um papel preponderante na formação da chuva ácida. Esses gases são transferidos do ar para a chuva, reagem com a água e originam o ácido nítrico (HNO_3), o nitroso (HNO_2) e o ácido sulfúrico (H_2SO_4).

A água da chuva, portanto, contém pequenas quantidades de substâncias dissolvidas e suspensas e pH igual a 5 em média. A concentração dessas substâncias assim, como o pH pode variar com o tempo e lugar, segundo CARROLL (1962). A água da chuva contém gases que ela dissolve da atmosfera (O_2 , CO_2 , N_2 , SO_2 , NH_3 , N_2O , HCl e CO).

Quadro 3. Gases na água da chuva

Temperatura (°C)	Teores em cm ³ N ₂ +AR	O ₂	CO ₂	Total
0	18,99	10,18	0,52	29,70
10	14,97	7,87	0,36	23,20
20	12,32	6,36	0,26	18,94

Fonte: SCHOELLER, 1962.

Os aerossóis incluem, também, partículas do solo que são transportadas pela ação dos ventos, sobretudo em regiões áridas (partículas menores do que 1m de diâmetro) de origem proveniente de poeira de rochas ou de origem antropogênica, tal como fuligem de combustão. Além disso, suas origens podem ser a partir de reações entre partículas e gases na atmosfera, por exemplo, SO₂, H₂S, NH₃ ou hidrocarbonetos com O₂ e O₃.

O Quadro 4 apresenta a composição química média da água da chuva coletada no período de 1985-1986, em algumas cidades brasileiras.

Quadro 4. Composição química média da H₂O de chuva

Cidades	P(mm)	pH	Na ⁺	K ⁺	Ca ²	Mg ²
Salvador (BA)	1.900	6,65	0,28	3,33	15,75	0,66
Ubatuba (SP)	2.124	4,50	0,35	0,19	0,25	0,17
Cubatão (SP)	2.414	4,20	3,35	0,40	1,14	0,72
São José dos Campus (SP)	1.100	4,40	1,00	0,64	2,37	0,11

Fonte: SZIKSZAY et al. (1990)

As áreas urbanas, portanto, representam as maiores propulsores dos impactos que o homem causa na natureza. O processo de urbanização possibilitou ao homem produzir novos ambientes nos quais há interações complexas entre os grupos humanos, as marcas de seu trabalho e a natureza. Nos diversos ecossistemas existentes no espaço geográfico, há uma interação entre diferentes elementos climáticos, como, temperaturas, chuvas, ventos, dentre outros. Foi no espaço urbano, sobretudo, que as ações antropogênicas mudaram drasticamente o funcionamento desses elementos, rompendo assim o equilíbrio que antes existia.

Do ponto de vista da análise climatológica, a questão da chuva

ácida está extremamente vinculada a outros aspectos do clima urbano, como a qualidade do ar sobre as cidades e as relações entre o clima e o homem.

A superfície da cidade constituída de área edificada influi de maneira tridimensional, na interação que existe entre a estrutura urbana e a atmosfera. O estudo do clima no nível das escalas inferiores (clima local) e mais precisamente, o estudo do clima urbano, é detentor de um amplo espectro temático de grande aplicação para todos aqueles profissionais preocupados com a questão ambiental nas metrópoles. Mais do que nunca é preciso pensar a cidade como um todo e ter uma ação muito mais integrada e global. É cada vez mais necessário que se tenha uma política ambiental capaz de desenvolver ações setoriais, como, controle da poluição do ar, controle da poluição das águas, dentre muitas outras ações. É no contexto destas discussões que a participação dos climatólogos é cada vez mais necessária, sob os mais diversos aspectos pertinentes ao estudo do meio ambiente urbano nos dias atuais.

NOTA

¹ De uma forma simplificada, o pH expressa a quantidade de núcleos de hidrogênio que são liberados por uma substância quando ela se dissocia numa reação ou num determinado meio. Quanto mais hidrogênio for liberado, mais forte é o ácido. A escala de pH varia de 0 a 14. A H₂O pura é neutra e tem pH 7. O ácido clorídrico, muito forte, tem pH 0. A soda cáustica está no extremo oposto e tem pH 14. O sangue humano tem pH 7 e a água do mar possui pH 8. Tem-se assim uma escala de acidez, de acordo com o potencial de hidrogênio (pH).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BROWN, I.F. et al. *Comportamento de Na, K, Ca, SO e pH em águas fluviais da floresta da Tijuca*. In: REUNIÃO ANUAL DA SBPC, Belém, Pará, 1983.
- CASTRO, S.P. *Algumas considerações sobre a precipitação ácida em florestas. Folha Florestal*. Viçosa, v.14, n.50, p.1-4, 1981.
- COOPER Jr., H.B.H. et al. *Chemical composition of acid precipitation in central Texas*. Report Upper Darby, n.23, p.281-291, 1976.
- COWLING, E.B. Acid precipitation in historical perspective. *Environ. Sci. Technol.* v.16, n.2 p. 110A-123A, 1982.
- GEIGER, R. *Manual de Microclimatologia: o clima da camada de ar junto ao solo*. Lisboa: Fundação Caloreste Gulbenkian, 1960.

- LIMA, W. de P. *Estudos de íons presentes na água da chuva em florestas homogênea de pinheiros tropicais e em vegetação natural de cerrado*. Piracicaba: IPEF, 1985.
- LISBOA, H. de M., SANT'ANNA, F.S. *Análise da qualidade das águas da chuva em Tubarão/SC*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA. 6. Anais. Salvador, 1990. v.2
- MONTEIRO, C.A.F. *A questão ambiental no Brasil: 1960-1980*. Instituto de Geografia, Universidade de S. Paulo, 1981.
- NORDEMANN, L.C. et al. *Análise química preliminar das águas de chuva de Cubatão: impactos ambientais*. São Paulo: Public. INPE, 1984.
- SCHOELLER, H. *Les eaux souterraines*. Paris: Mason, 1962.
- SZIKSZAY, M., KIMMEZMANN, A.A., SAMESHIMA, R.H. *Evolution of the chemical composition of water passing through the unsaturated zone to groundwater at an experimental site of the University of São Paulo, Brazil*. *Journal of Hydrology*, v.118 n. 1/4 p. 175-190, 1990.
- TAVARES, M.F.M. *Análise química de íons em águas de chuva de regiões naturais; correlação com aerossóis atmosféricos*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRA DE HIDROGEOLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS, 5. Blume-nau, 1983.
- UNESCO. *As chuvas ácidas: uma importação indesejada*. *Correio da UNESCO*, Paris p.21-3, 1984.