



Universidade de São Paulo  
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas  
Departamento de Ciências Atmosféricas  
DCA/IAG/USP

AGM5823 – Tópicos em química atmosférica

# Águas de chuva – chuva ácida

Adalgiza Fornaro

Departamento de Ciências Atmosféricas, IAG/USP

<[adalgiza.fornaro@iag.usp.br](mailto:adalgiza.fornaro@iag.usp.br)>

## **Processos de remoção atmosférica: deposição seca e úmida**

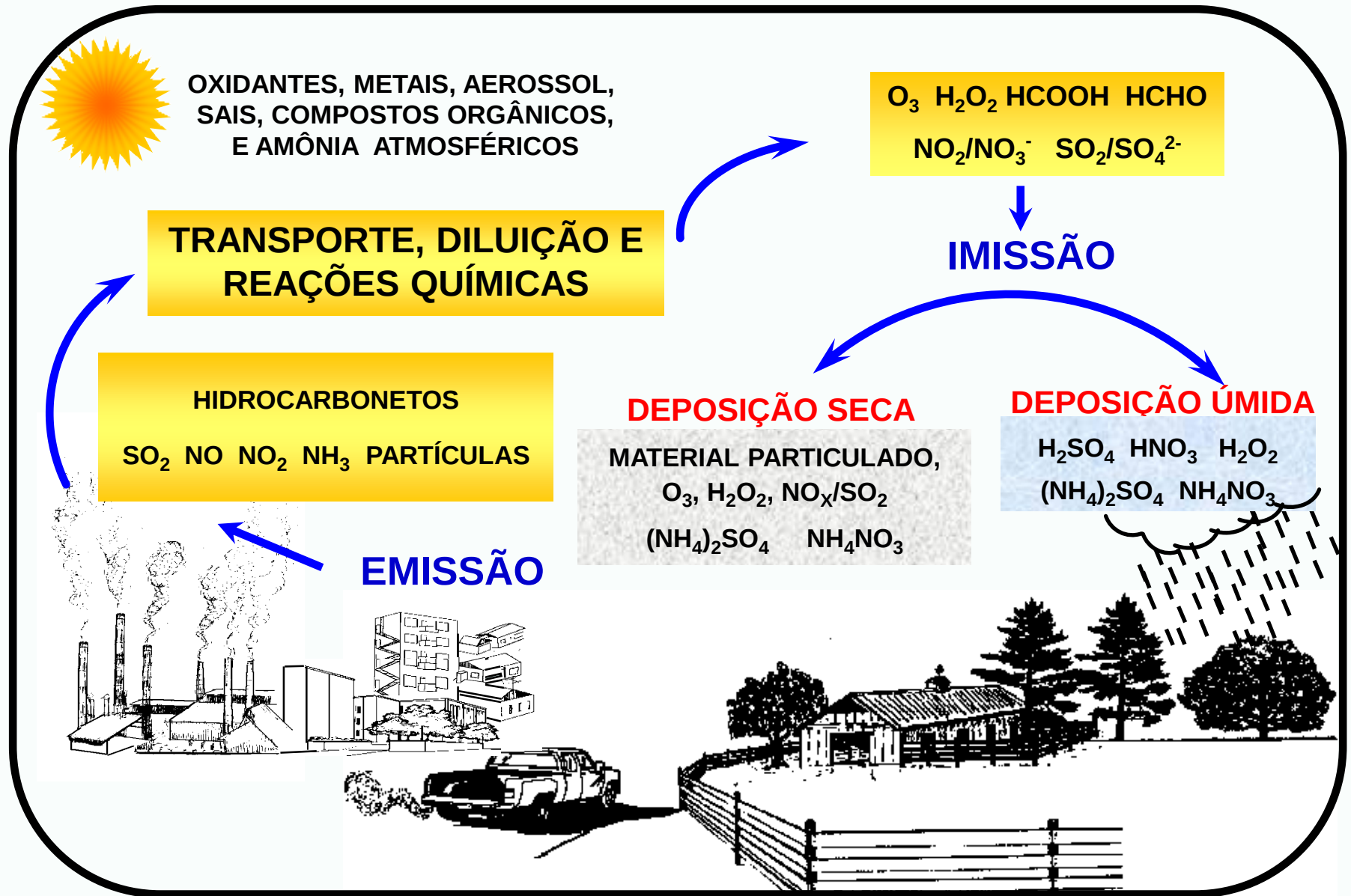
### **Deposição seca:**

- Material particulado,
- gases

### **Deposição úmida:**

- águas de chuva, neve, neblina
- dissolução de gases,
- reações heterogêneas (partículas, gases, filme líquido)

# Processos e compostos envolvidos na poluição do ar.

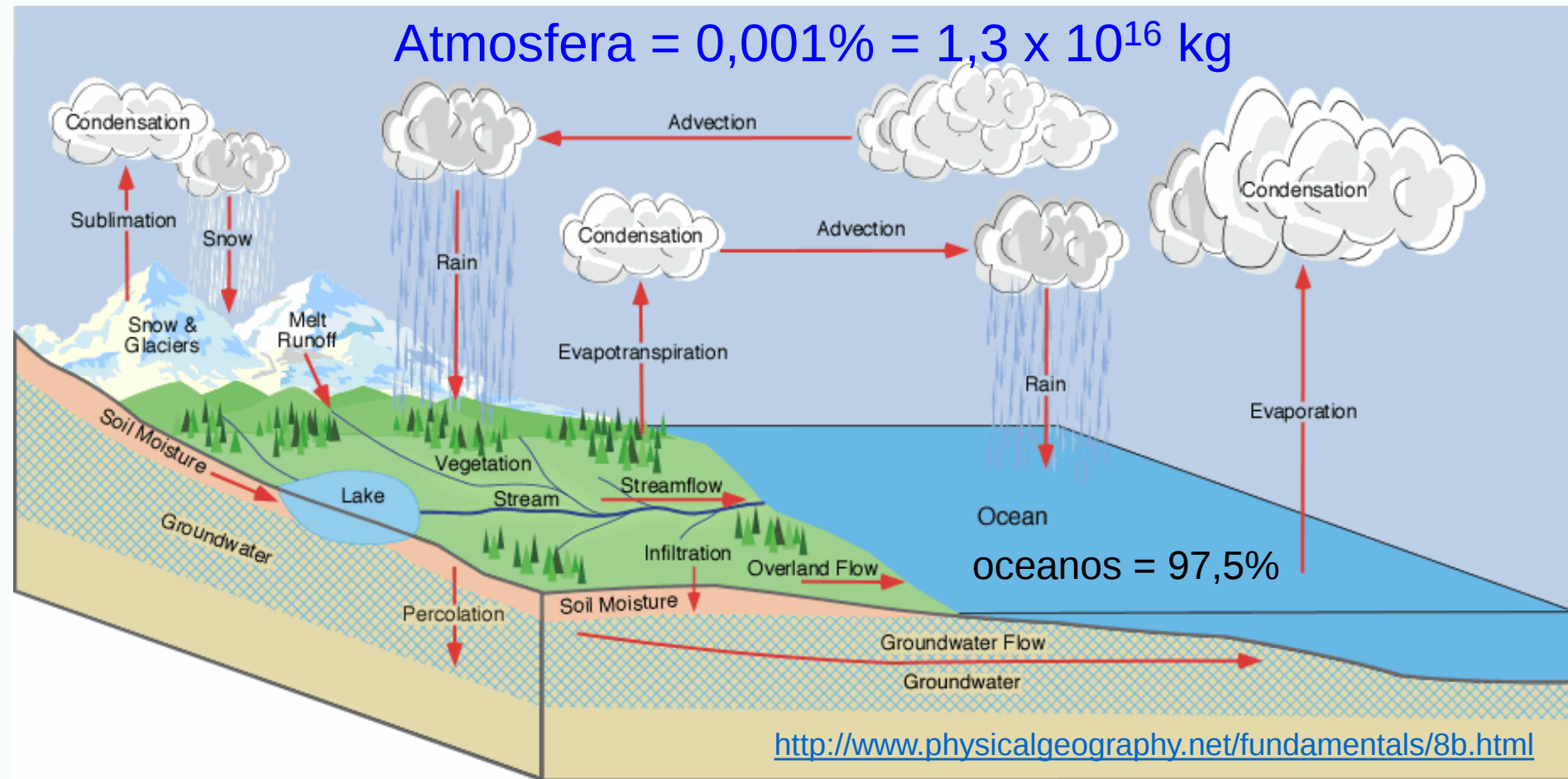


# ÁGUA

- 70% superfície da Terra é coberta por água
- Solvente natural
  - líquido mais abundante
  - constante dielétrica → solvente para substâncias iônicas
  - dissolução de minerais, nutrientes para plantas
- transparente para luz visível e UV longo → permitindo fotossíntese para plantas aquáticas.
- Habilidade para conservar calor e a energia necessária para evaporação → mantém estrutura e temperatura dos corpos de água.
  - alta capacidade calorífica ( $4,19 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ).
- Alto calor de vaporização ( $2260 \text{ kJ kg}^{-1}$ ) → limita sua vaporização, protegendo os organismos que vivem nela.
- Relação densidade-temperatura → densidade máxima  $\sim 4^\circ\text{C}$  → gelo flutua prevenindo o congelamento total dos corpos de água.
- Tensão superficial → a mais alta de todos os líquidos ( $\sim 73 \text{ mN m}^{-1}$ ) → controla o formato das gotas (águas de chuva, *spray* marinho, etc.)

# Ciclo hidrológico

Atmosfera = 0,001% =  $1,3 \times 10^{16}$  kg



Água doce = 2,5% do total da hidrosfera

Geleiras = 1,8%  
Águas subterrâneas = 0,63%  
Lagos e rios = 0,01%  
Atmosfera = 0,001%

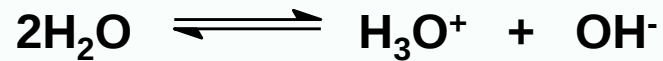
# CHUVA ÁCIDA:

## CONCEITO

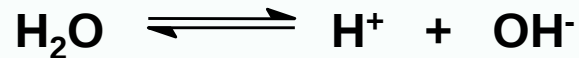
A precipitação ou chuva ácida pode ocorrer tanto como deposição seca ou úmida – ou seja não é um fato limitado pela presença de chuva. Portanto, atualmente o conceito adequado para o fenômeno da chuva ácida é **DEPOSIÇÃO ÁCIDA**.

## Natureza química da água

A água pura é uma mistura com tres componentes principais:  $\text{H}_2\text{O}$  e seus produtos de dissociação, o íon hidrônio  $\text{H}_3\text{O}^+$  e o íon hidroxila  $\text{OH}^-$



ou



## A acidez da água

A acidez de qualquer solução aquosa é uma medida da concentração de íons hidrogênio em solução; ela é medida em termos de pH

$$\text{pH} = -\log_{10}[\text{H}^+]$$

## Produto iônico da água, $K_w$



"Esse processo é denominado autoionização da água e ocorre em escala muito pequena, ou seja, a água é um eletrólito muito fraco, com valores baixos de grau de ionização e de constante de ionização no equilíbrio ( $K$ ). É exatamente por isso que a água possui condutividade tão baixa.

Para se ter uma ideia, na temperatura ambiente de  $25^\circ\text{C}$  é possível determinar que as concentrações dos íons hidróxido e hidrônio produzidos na autoionização da água pura são iguais a  $1 \times 10^{-7} \text{ mol L}^{-1}$ . Isso quer dizer que de um bilhão de moléculas de água, somente duas se ionizam.

A constante do equilíbrio iônico da água é denominada constante de dissociação da água, constante de autoprotólise ou produto iônico da água. Essa constante é representada por  $K_w$ , porque o  $w$  se refere à palavra *water*, que em inglês significa água."

A equação,



representa duas reações ocorrendo ao mesmo tempo.

A reação para frente é a quebra de  $\text{H}_2\text{O}$  em  $\text{H}^+$  e  $\text{OH}^-$ .

Ao mesmo tempo ocorre a reação reversa de combinação do  $\text{H}^+$  com o  $\text{OH}^-$ , formando água.

Como isto representa um equilíbrio, a concentração de qualquer espécie em solução não pode ser alterada com o tempo. A extensão em que a água é dissociada é dada pela constante de equilíbrio,  $K$  (a 25 °C):

$$K = \frac{[\text{H}^+][\text{OH}^-]}{[\text{H}_2\text{O}]} = 1,8 \times 10^{-16}$$

A constante de equilíbrio dessa reação é muito pequena indicando que somente uma pequena proporção da água é ionizada.

A concentração da água não dissociada ( $[\text{H}_2\text{O}]$ ) deve ser pouco afetada pela dissociação.

A concentração da água = massa de 1  $\text{dm}^3$  dividido pela massa molar relativa de água,

$$[\text{H}_2\text{O}] = 1000/18 = 55,56 \text{ mol L}^{-1}.$$

$$K = \frac{[\text{H}^+][\text{OH}^-]}{55,56} = 1,8 \times 10^{-16}$$

Ou seja,

$$K_w = [H^+][OH^-] =$$

$$K \times 55,56 =$$

$$1,8 \times 10^{-6} \times 55,56 =$$

$$K_w = 1 \times 10^{-14} (\text{mol L}^{-1})^2$$

A nova constante,  **$K_w$** , é chamada **produto iônico da água**.

Em água pura concentrações iguais de  $H^+$  e  $OH^-$  são formadas a partir da dissociação da água – sendo essa solução descrita como neutra.

O produto iônico da água pode ser reescrito em termos de pH e pOH:

$$\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$$

$$\text{pOH} = -\log[\text{OH}^-]$$

Sendo,  $K_w = [\text{H}^+][\text{OH}^-]$

$$\log K_w = \log[\text{H}^+] + \log[\text{OH}^-]$$

$$-\log K_w = -\log[\text{H}^+] - \log[\text{OH}^-]$$

$$\text{p}K_w = \text{pH} + \text{pOH}$$

Se  $\text{p}K_w = 14$

$$\text{pOH} = 14 - \text{pH}$$

# Escala de pH

H<sup>+</sup> conc.

$10^{-1}$

$10^{-3}$

$10^{-6}$

$10^{-9}$

$10^{-12}$

pH Scale

0

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

OH<sup>-</sup> conc.

$10^{-13}$

$10^{-11}$

$10^{-8}$

$10^{-5}$

$10^{-2}$

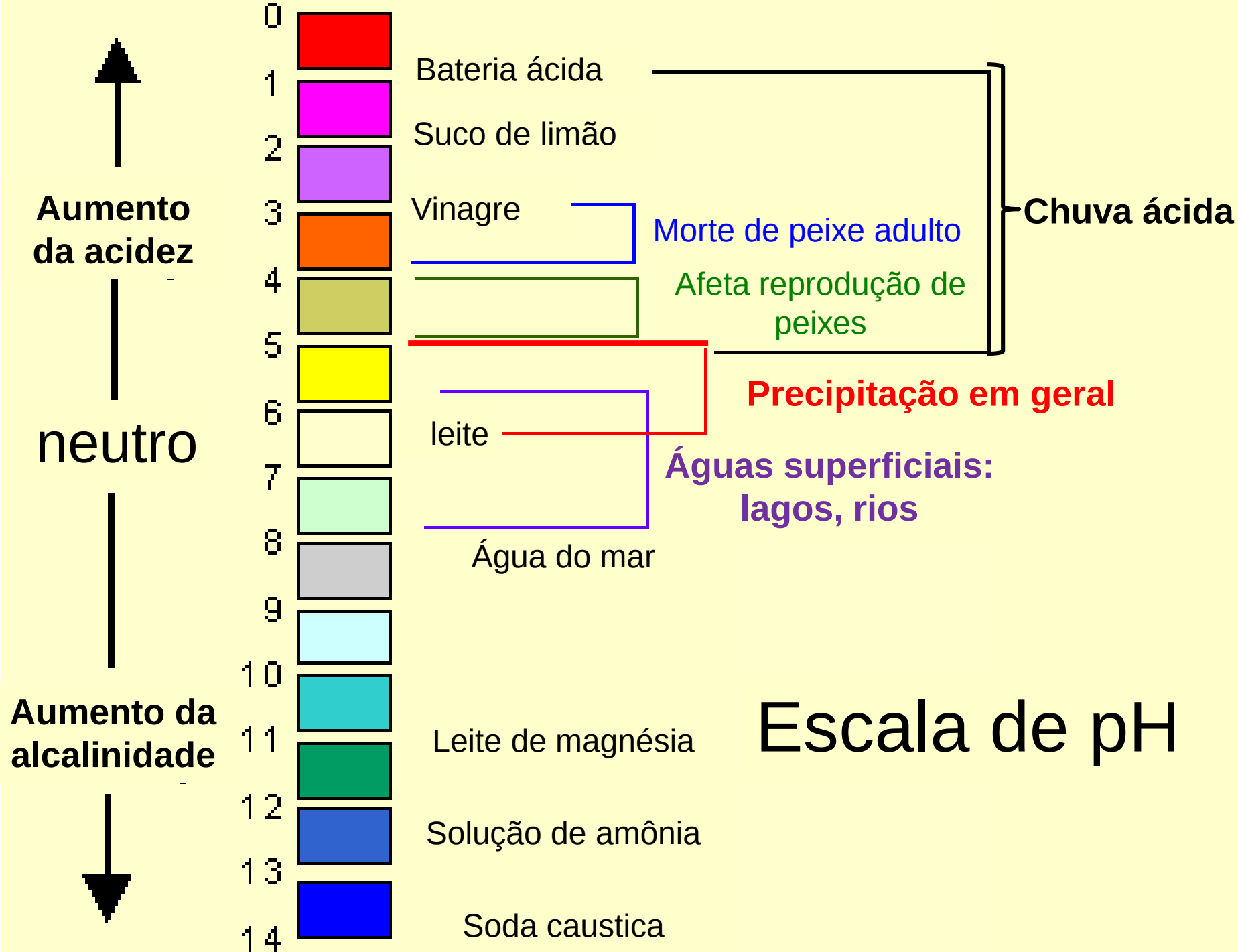
ácido

básico

neutro

Aumento do íon hidrogênio

Aumento do íon hidroxila



## Critical pH Levels for Aquatic Organisms

| <u>Animal</u> |                                                                                     | <u>Critical pH Level</u> |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| Snails        |    | 6                        |
| Clams         |    | 6                        |
| Bass          |    | 5.5                      |
| Crayfish      |    | 5.5                      |
| Mayfly        |    | 5.5                      |
| Trout         |    | 5                        |
| Salamanders   |   | 5                        |
| Perch         |  | 4.5                      |
| Frogs         |  | 4                        |

menos resistente

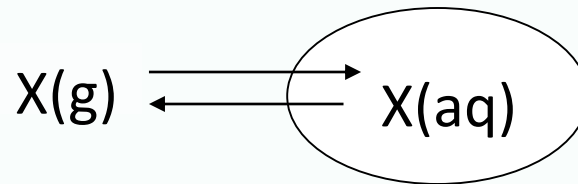
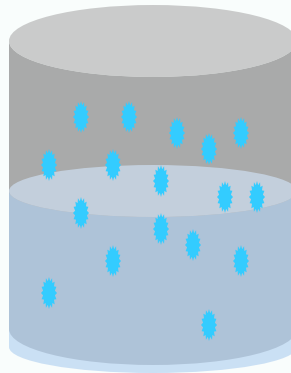


Esta figura ilustra o nível de pH em que alguns organismos-chave podem ser perdidos à medida que seu ambiente se torna mais ácido. Nem todos os peixes e mariscos, ou os insetos que eles comem, podem tolerar a mesma quantidade de ácido.

Qual o valor do pH de águas de chuva “naturais”?

O que é chuva ácida?

# Equilíbrio gás / fase líquida: Lei de Henry



$$K_H = X_{(aq)} / X_{(g)} \qquad K_H = \frac{[X_{aq}]}{[X_g]} = \frac{[X_{aq}]}{p_{i_x}}$$

# Atmosfera terrestre

## Composição do ar seco ao nível do mar.

Gases  
majoritários

99,9999%

| Gás                       |                       | % volume     |
|---------------------------|-----------------------|--------------|
| Nitrogênio                | N <sub>2</sub>        | 78,084       |
| Oxigênio                  | O <sub>2</sub>        | 20,948       |
| Argônio                   | Ar                    | 0,934        |
| <u>Dióxido de carbono</u> | <u>CO<sub>2</sub></u> | <u>0,033</u> |
| Neônio                    | Ne                    | 0,00182      |
| Hidrogênio                | H <sub>2</sub>        | 0,0010       |
| Hélio                     | He                    | 0,00052      |
| Metano                    | CH <sub>4</sub>       | 0,0002       |
| Criptônio                 | Kr                    | 0,0001       |
| Monóxido de carbono       | CO                    | 0,00001      |
| Xenônio                   | Xe                    | 0,000008     |
| Ozônio                    | O <sub>3</sub>        | 0,000002     |
| Amônia                    | NH <sub>3</sub>       | 0,000001     |
| Dióxido de nitrogênio     | NO <sub>2</sub>       | 0,0000001    |
| Dióxido de enxofre        | SO <sub>2</sub>       | 0,00000002   |
| Óxido nitroso             | N <sub>2</sub> O      | 0,00003      |

Gases  
traço

vapor de água - H<sub>2</sub>O 0-5%



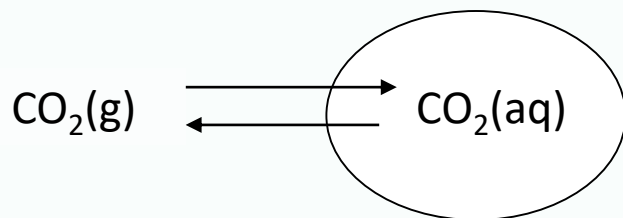
# Equilíbrio gás / fase líquida: Lei de Henry

| GÁS                     | CONSTANTE DA LEI DE HENRY<br>(M /atm at 298 K) |                        |
|-------------------------|------------------------------------------------|------------------------|
| OXIGÊNIO                | O <sub>2</sub>                                 | 1.3 x 10 <sup>-3</sup> |
| OZÔNIO                  | O <sub>3</sub>                                 | 9.4 x 10 <sup>-3</sup> |
| DIÓXIDO DE NITROGÊNIO   | NO <sub>2</sub>                                | 1.0 x 10 <sup>-2</sup> |
| DIÓXIDO DE CARBONO      | CO <sub>2</sub>                                | 3.1 x 10 <sup>-2</sup> |
| DIÓXIDO DE ENXOFRE      | SO <sub>2</sub>                                | 1.3                    |
| ÁCIDO NÍTRICO (efetivo) | HNO <sub>3</sub>                               | 2.1 x 10 <sup>5</sup>  |
| PERÓXIDO DE HIDROGÊNIO  | H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>                  | 9.7 x 10 <sup>+4</sup> |
| RADICAL HIDROPEROXILA   | HO <sub>2</sub>                                | 9.0 x 10 <sup>3</sup>  |
| NITRATOS de ALQUILA     | (RONO <sub>2</sub> )                           | 1.3                    |

$$K_H = \frac{[A_{aq}]}{[A_g]} = \frac{[A_{aq}]}{p_{i_A}}$$

## Cálculo do valor de pH da água de chuva “natural”:

O pH da água de chuva é determinado pelo  $\text{CO}_2$ ; a partição (dissolução) do  $\text{CO}_2$  na água tem um valor constante de acordo com a Lei de Henry,



$$K_{\text{CO}_2} = [\text{CO}_2]_{\text{aq}} / P_{\text{CO}_2(\text{atm})}$$

A concentração encontrada na água de chuva depende da pressão parcial do  $\text{CO}_2$  na atmosfera.

$\text{CO}_2$  aquoso (dissolvido) combina-se com água para formar ácido carbônico,



A maior parte do gás CO<sub>2</sub> na água está solvatado; mas a forma química usada na expressão de equilíbrio não altera o resultado,

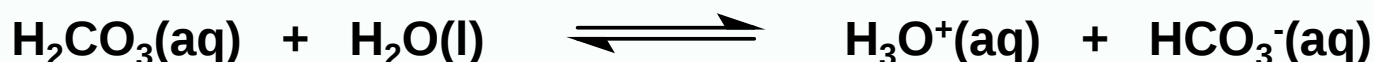
$$K_{\text{CO}_2} = [\text{H}_2\text{CO}_3]_{\text{aq}} / P_{\text{CO}_2(\text{atm})} \quad K_{\text{H}} = 0,031 \text{ mol L}^{-1} \text{ atm}^{-1}$$

$$K_{\text{CO}_2} \times P_{\text{CO}_2(\text{atm})} = [\text{H}_2\text{CO}_3]_{\text{aq}}$$

$$\text{At } 25^\circ, H_{\text{CO}_2} = 10^{-1.47} \text{ and } P_{\text{CO}_2} = 10^{-3.5} \text{ atm} = 350 \text{ ppm}$$

$$[\text{H}_2\text{CO}_3]_{\text{aq}} = 10^{-1.47} \times 10^{-3.5} = 10^{-4.97}$$

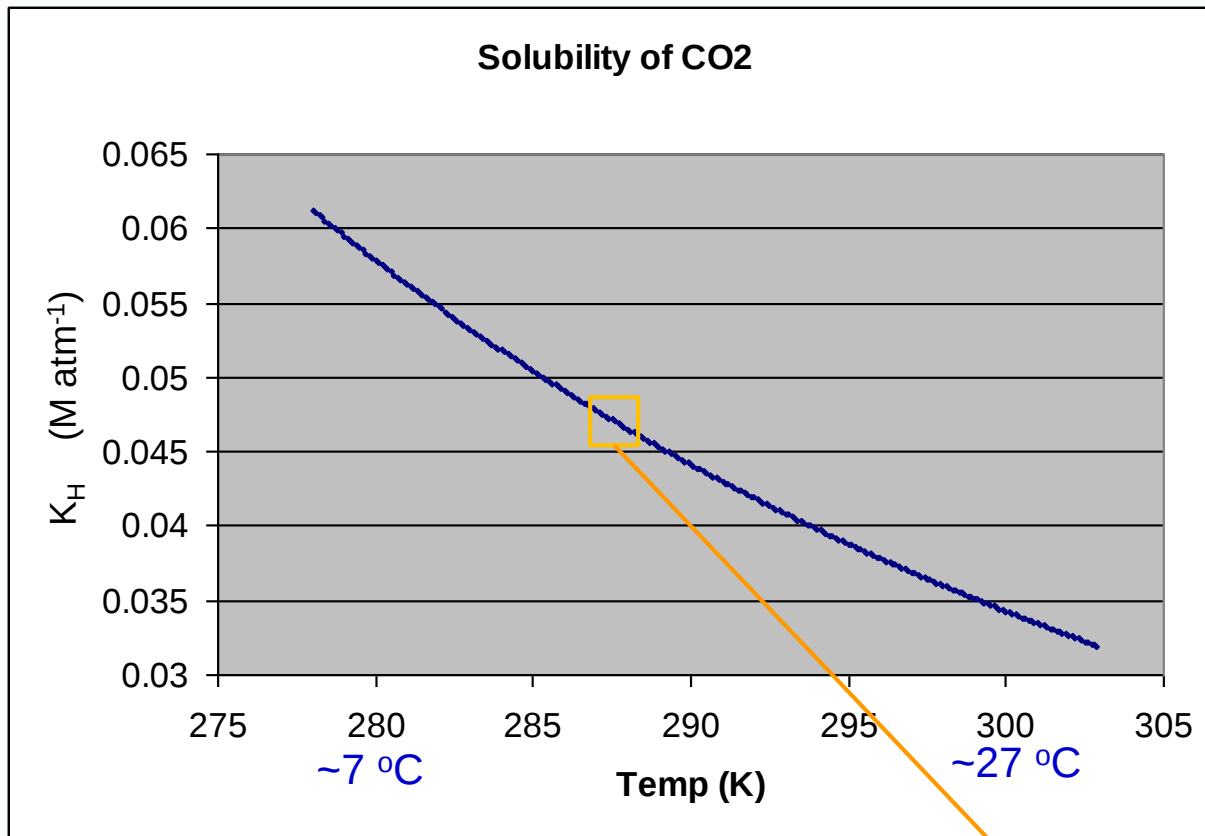
Ácido carbônico dissocia-se em água de acordo com o equilíbrio:



$$[\text{H}_3\text{O}^+] = [K_{\text{CO}_2} \times K_{\text{a1}} \times P_{\text{CO}_2}]^{1/2}$$

$$= [10^{-1.47} \times 10^{-6.37} \times 10^{-3.5}]^{1/2} = 10^{-5.68}$$

Portanto, pH = 5,68 em águas de chuva “limpas” saturadas com CO<sub>2</sub>

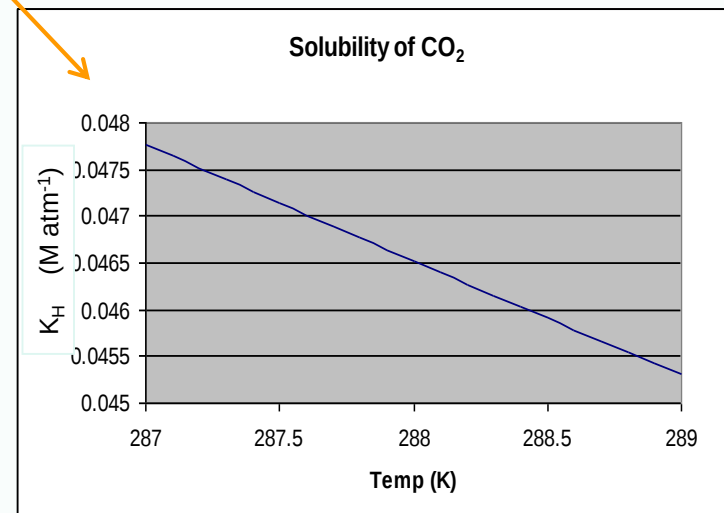


Efeito salinidade:  
K<sub>H</sub> (20°C)

■ água “fresca”  
=  $3,91 \times 10^{-2} \text{ M atm}^{-1}$

■ 35%  
=  $3,32 \times 10^{-2} \text{ M atm}^{-1}$

Solubilidade do CO<sub>2</sub> = f(T)



O pH da água de chuva pode ser afetado por outros poluentes  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HNO}_3(\text{g})$  e  $\text{H}_2\text{SO}_4(\text{g})$ ; a chuva “arrasta” esses poluentes gasosos durante a formação das nuvens ou durante transporte das gotas para a superfície da terra.

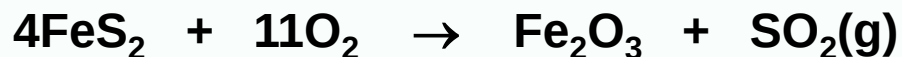
Água de chuva pode ser tamponada por carbonatos ( $\text{HCO}_3^-$  /  $\text{CO}_3^{2-}$ ) e/ou amônia ( $\text{NH}_3$  /  $\text{NH}_4^+$ ) presentes na atmosfera como núcleos de condensação ou poeira absorvida por gotas de chuva.

Água de chuva pode ser fonte de muitos íons que servem como nutrientes para águas naturais ou solo (plantações, florestas), como o nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), potássio ( $\text{K}^+$ ), cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), etc.

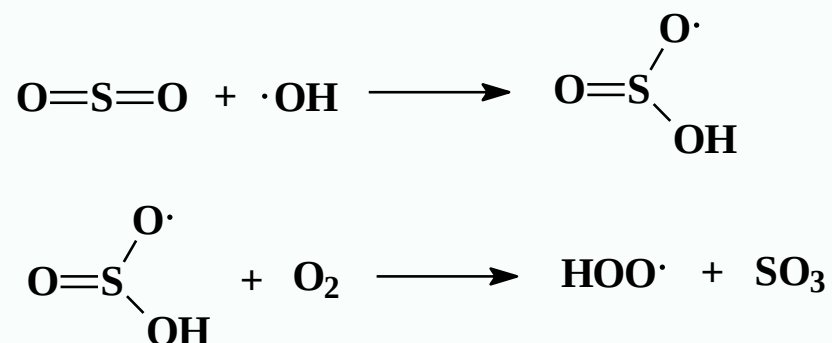
## Dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) e chuva ácida

Estima-se que 67% de toda emissão de SO<sub>2</sub> na atmosfera ocorre devido geração de eletricidade

A principal fonte antrópica de SO<sub>2</sub> é a combustão de carvão contendo pirita (FeS<sub>2</sub>)

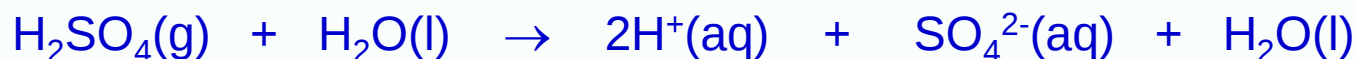


O SO<sub>2</sub> produzido na oxidação da pirita reage com o radical **hidroxila** na atmosfera.



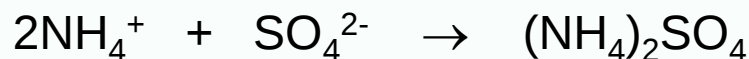
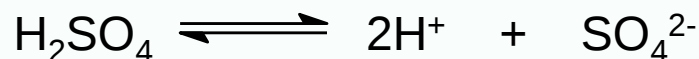
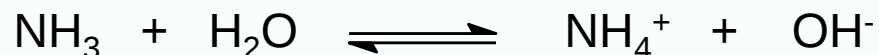
Nota: o radical hidroxila é uma das espécies mais reativas da atmosfera; liga-se a muitos compostos com duplas ligações, como o SO<sub>2</sub>, e retira átomos de H de outros compostos sem múltiplas ligações.

O trióxido de enxofre (SO<sub>3</sub>) combina-se com água produzindo ácido sulfúrico



SO<sub>3</sub> é “arrastado” pelas gotas de chuva formando a **chuva ácida**; valores de pH em gotas de chuva ácida podem estar abaixo de 2.

Se amônia está presente no ar, ácido sulfúrico pode reagir para formar partículas

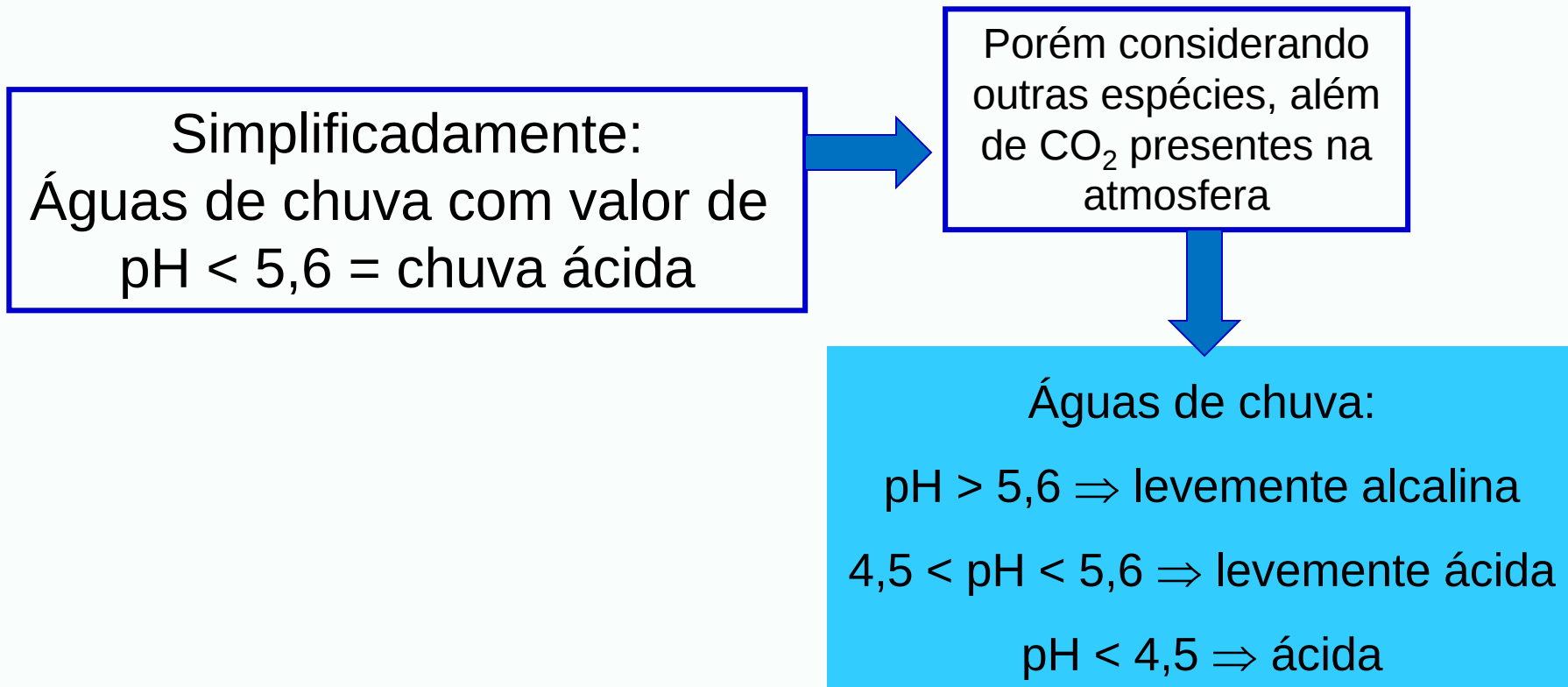


partículas de sulfato na atmosfera aumentam o albedo da luz solar; isto é muito importante quando ocorre erupção vulcânica que lança grandes quantidades de  $\text{SO}_2$  na atmosfera.

Outras fontes de  $\text{SO}_2$  na atmosfera incluem  $\text{H}_2\text{S}$  (sulfeto de hidrogênio) e  $(\text{CH}_3)_2\text{S}$  (dimetilsulfeto) emitidos nos pântanos e oceanos.

# CHUVA ÁCIDA:

**CONCEITO:** A precipitação ou chuva ácida pode ocorrer tanto como deposição seca ou úmida – ou seja não é um fato limitado pela presença de chuva. Portanto, atualmente o conceito adequado para o fenômeno da chuva ácida é **DEPOSIÇÃO ÁCIDA**.



**Table 5.2. Equilibrium Constants of Importance in Gas-Water Equilibria**

| Reactions                                                                        |                                                     | $K_{25^\circ\text{C}}^a$ |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------|
| 1. $\text{CO}_2(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l})$                        | $= \text{H}_2\text{CO}_3^*(\text{aq})$              | $3.39 \times 10^{-2}$    |
| 2. $\text{H}_2\text{CO}_3^*$                                                     | $= \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$                     | $4.45 \times 10^{-7}$    |
| 3. $\text{HCO}_3^-$                                                              | $= \text{H}^+ + \text{CO}_3^{2-}$                   | $4.69 \times 10^{-11}$   |
| 4. $\text{SO}_2(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l})$                        | $= \text{SO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}(\text{aq})$ | 1.25                     |
| 5. $\text{SO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$                                        | $= \text{H}^+ + \text{HSO}_3^-$                     | $1.29 \times 10^{-2}$    |
| 6. $\text{HSO}_3^-$                                                              | $= \text{H}^+ + \text{SO}_3^{2-}$                   | $6.24 \times 10^{-8}$    |
| 7. $\text{NH}_3(\text{g})$                                                       | $= \text{NH}_3(\text{aq})$                          | 57                       |
| 8. $\text{NH}_3(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}$                                 | $= \text{NH}_4^+ + \text{OH}^-$                     | $1.77 \times 10^{-5}$    |
| 9. $\text{HNO}_3(\text{g})$                                                      | $= \text{H}^+ + \text{NO}_3^-$                      | $3.46 \times 10^6$       |
| 10. $\text{HCl}(\text{g})$                                                       | $= \text{H}^+ + \text{Cl}^-$                        | $2.00 \times 10^6$       |
| 11. $\text{HNO}_2(\text{aq})$                                                    | $= \text{HNO}_2(\text{aq})$                         | 49                       |
| 12. $\text{HNO}_2$                                                               | $= \text{H}^+ + \text{NO}_2^-$                      | $5.13 \times 10^{-4}$    |
| 13. $\text{H}_2\text{S}(\text{g})$                                               | $= \text{H}_2\text{S}(\text{aq})$                   | $1.05 \times 10^{-1}$    |
| 14. $\text{H}_2\text{S}$                                                         | $= \text{H}^+ + \text{HS}^-$                        | $9.77 \times 10^{-8}$    |
| 15. $\text{HS}^-$                                                                | $= \text{H}^+ + \text{S}^{2-}$                      | $1.00 \times 10^{-19}$   |
| 16. $\text{NO}(\text{g}) + \text{NO}_2(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l})$ | $= 2 \text{HNO}_2(\text{aq})$                       | $1.24 \times 10^2$       |
| 17. $\text{CH}_3\text{COOH}(\text{g})$                                           | $= \text{CH}_3\text{COOH}(\text{aq})$               | $7.66 \times 10^2$       |
| 18. $\text{CH}_3\text{COOH}$                                                     | $= \text{H}^+ + \text{CH}_3\text{COO}^-$            | $1.75 \times 10^{-5}$    |
| 19. $\text{CH}_2\text{O}(\text{g})$                                              | $= \text{CH}_2\text{O}(\text{aq})$                  | $6.3 \times 10^3$        |
| 20. $\text{N}_2(\text{g})$                                                       | $= \text{N}_2(\text{aq})$                           | $6.61 \times 10^{-4}$    |
| 21. $\text{O}_2(\text{g})$                                                       | $= \text{O}_2(\text{aq})$                           | $1.26 \times 10^{-3}$    |
| 22. $\text{CO}(\text{g})$                                                        | $= \text{CO}(\text{aq})$                            | $9.55 \times 10^{-4}$    |
| 23. $\text{CH}_4(\text{g})$                                                      | $= \text{CH}_4(\text{aq})$                          | $1.29 \times 10^{-3}$    |
| 24. $\text{NO}_2(\text{g})$                                                      | $= \text{NO}_2(\text{aq})$                          | $1.00 \times 10^{-2}$    |
| 25. $\text{NO}(\text{g})$                                                        | $= \text{NO}(\text{aq})$                            | $1.9 \times 10^{-3}$     |
| 26. $\text{N}_2\text{O}(\text{g})$                                               | $= \text{N}_2\text{O}(\text{aq})$                   | $2.57 \times 10^{-2}$    |
| 27. $\text{H}_2\text{O}_2(\text{g})$                                             | $= \text{H}_2\text{O}_2(\text{aq})$                 | $1.0 \times 10^5$        |
| 28. $\text{O}_3(\text{g})$                                                       | $= \text{O}_3(\text{aq})$                           | $9.4 \times 10^{-3}$     |

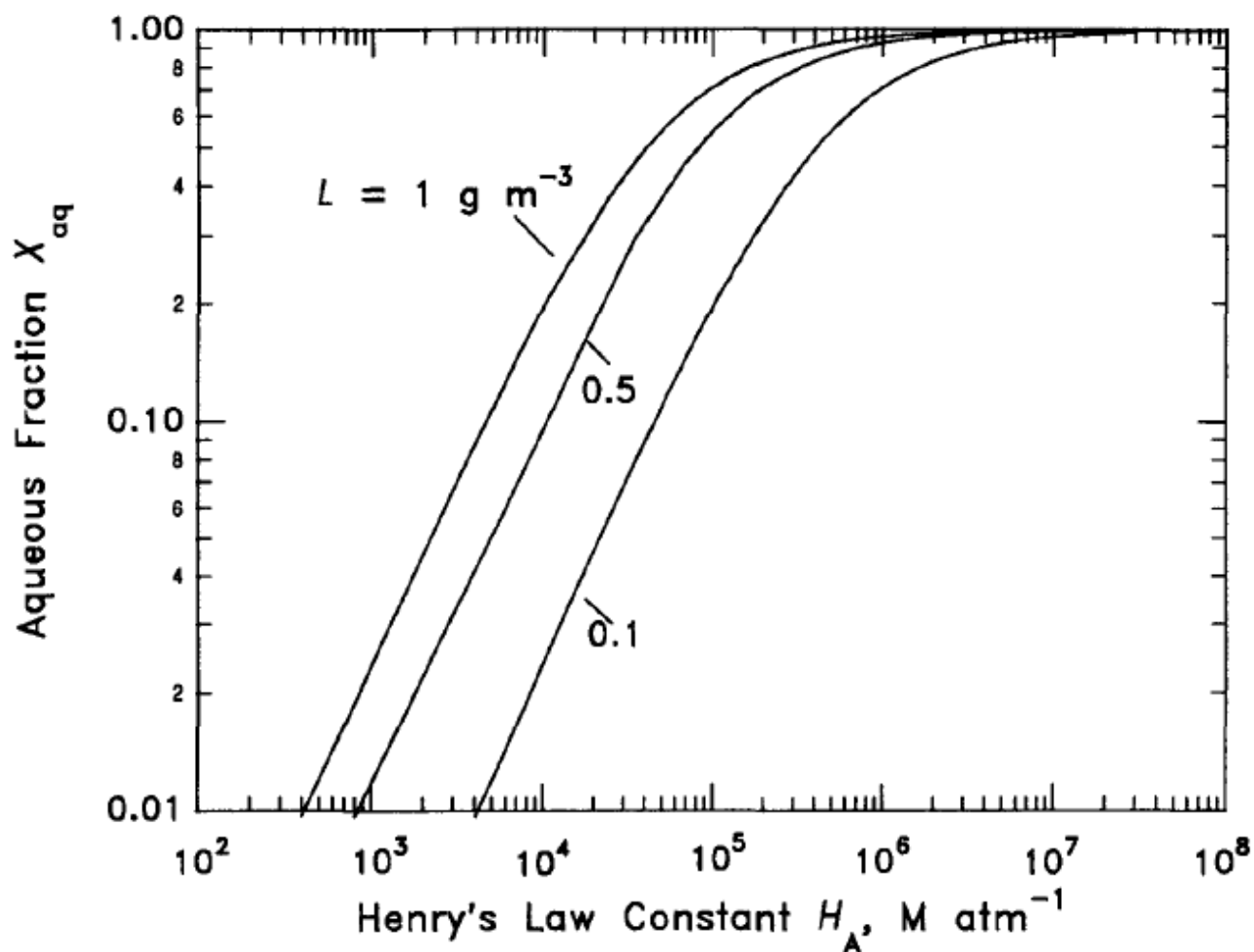
<sup>a</sup>Henry constants are  $K_H$  values given in  $\text{M atm}^{-1}$ ; Henry constants for organic substances are given in Figures 5.3 and 5.15 and in Table 5.3.

Qual pH de águas de chuva “pura” em presença de  $\text{SO}_2$  (20ppb)?

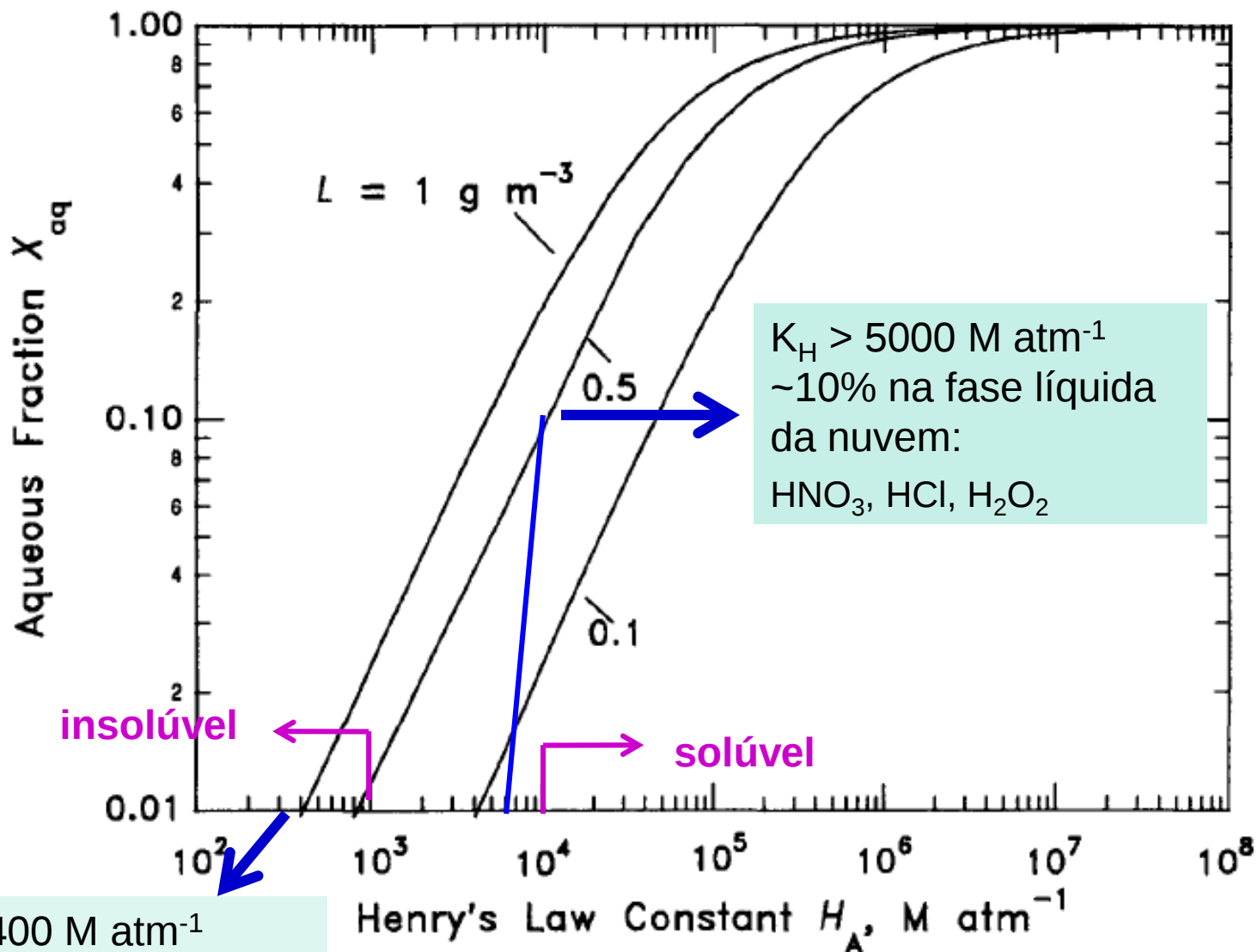
Qual pH de águas de chuva “pura” em presença de  $\text{NH}_3$  (20ppb)?

Muito solúveis:  
 $\text{HNO}_3$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{CH}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$

Solubilidade dos gases também depende do “conteúdo de água líquida” (p. ex., nuvens)



**FIGURE 7.3** Aqueous fraction of a species as a function of the cloud liquid water content and the species' Henry's law constant.

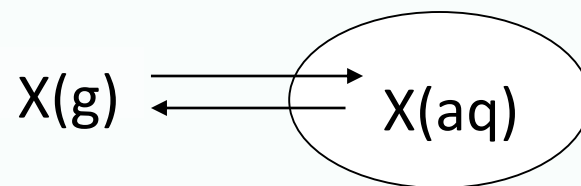
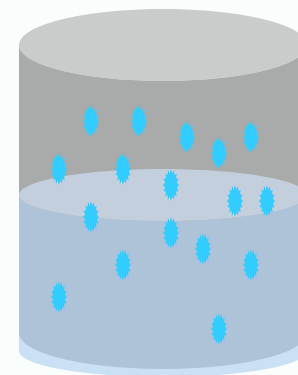
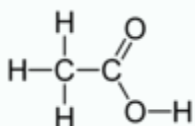
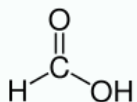


$K_H < 400 \text{ M atm}^{-1}$   
Menos de 1% na fase líquida da nuvem  
Ex.:  $\text{O}_3, \text{NO}, \text{NO}_2$  e HC

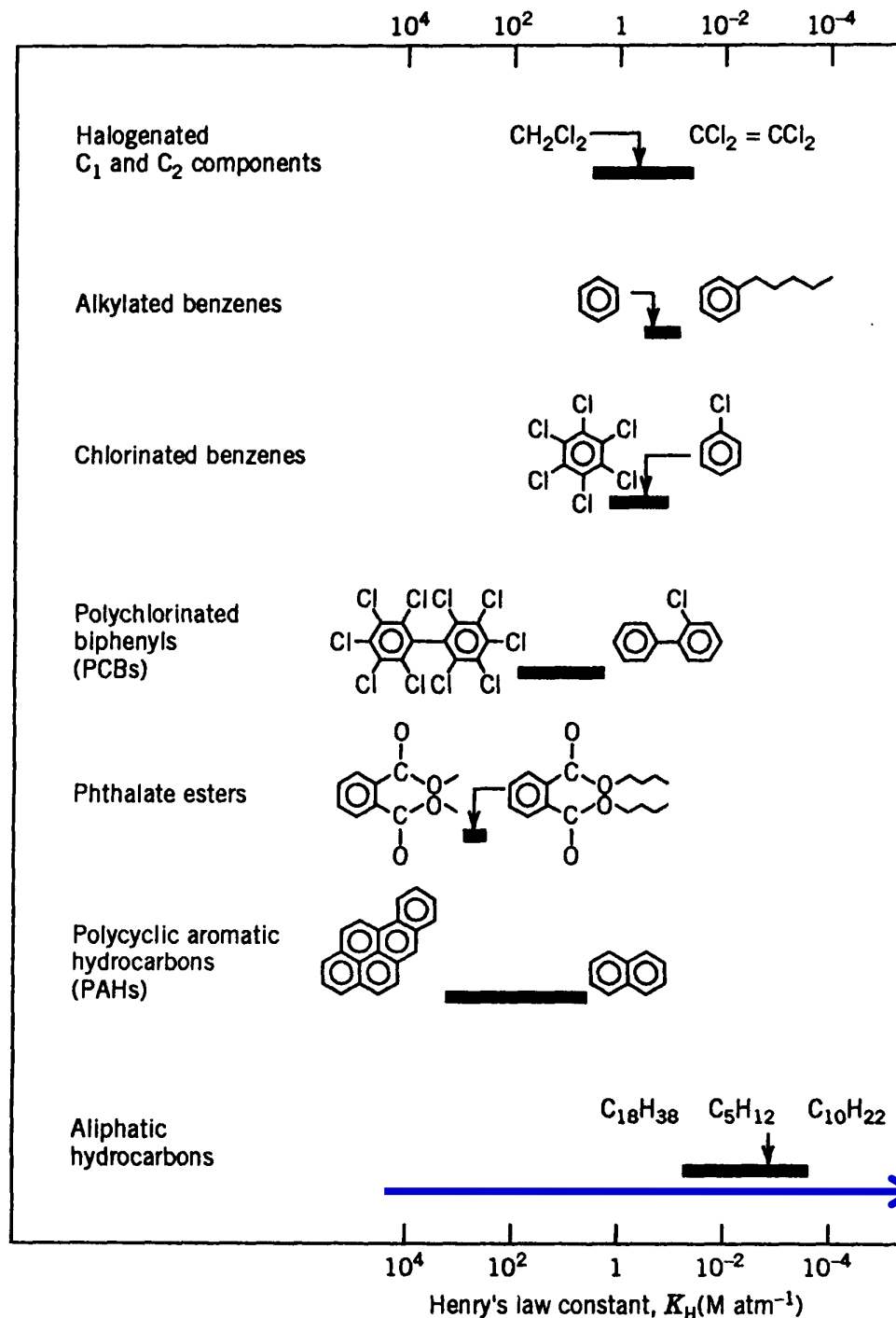
fraction of a species as a function of the cloud liquid water content and the constant.

## Valores de constante de Henry para alguns gases atmosféricos

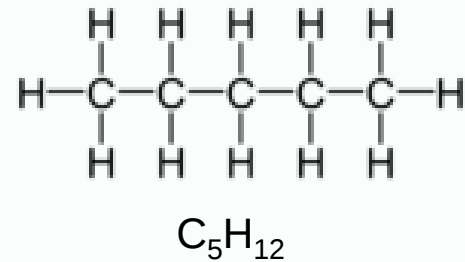
| Species <sup>a</sup>                                           | $H(\text{M atm}^{-1})$ at 298 K |
|----------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| O <sub>2</sub>                                                 | $1.3 \times 10^{-3}$            |
| NO                                                             | $1.9 \times 10^{-3}$            |
| H <sub>2</sub> C=CH <sub>2</sub> C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | $4.8 \times 10^{-3}$            |
| NO <sub>2</sub>                                                | $1.0 \times 10^{-2}$            |
| O <sub>3</sub>                                                 | $1.1 \times 10^{-2}$            |
| N <sub>2</sub> O                                               | $2.5 \times 10^{-2}$            |
| CO <sub>2</sub>                                                | $3.4 \times 10^{-2}$            |
| H <sub>2</sub> S                                               | 0.1                             |
| DMS                                                            | 0.56                            |
| HCl                                                            | 1.1                             |
| SO <sub>2</sub>                                                | 1.23                            |
| NO <sub>3</sub>                                                | 1.8                             |
| CH <sub>3</sub> ONO <sub>2</sub>                               | 2.0                             |
| CH <sub>3</sub> O <sub>2</sub>                                 | 6                               |
| OH                                                             | 25                              |
| HNO <sub>2</sub>                                               | 49                              |
| NH <sub>3</sub>                                                | 62                              |
| CH <sub>3</sub> OH                                             | 220                             |
| CH <sub>3</sub> OOH                                            | 310                             |
| CH <sub>3</sub> C(O)OOH                                        | 473                             |
| HO <sub>2</sub>                                                | $5.7 \times 10^3$               |
| HCOOH                                                          | $3.6 \times 10^3$               |
| HCHO <sup>b</sup>                                              | 2.5                             |
| CH <sub>3</sub> COOH                                           | $8.8 \times 10^3$               |
| H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>                                  | $1 \times 10^5$                 |
| HNO <sub>3</sub>                                               | $2.1 \times 10^5$               |



$$K_H = X_{(\text{aq})} / X_{(\text{g})}$$



Valores de constante de Henry ( $K_H$ ) para algumas classes importantes de COVs. Compostos com alta pressão de vapor tem partição apreciável da fase água para fase gás (baixo valor de  $K_H$ ).



# QUÍMICA DA FASE AQUOSA

## LEI DE HENRY

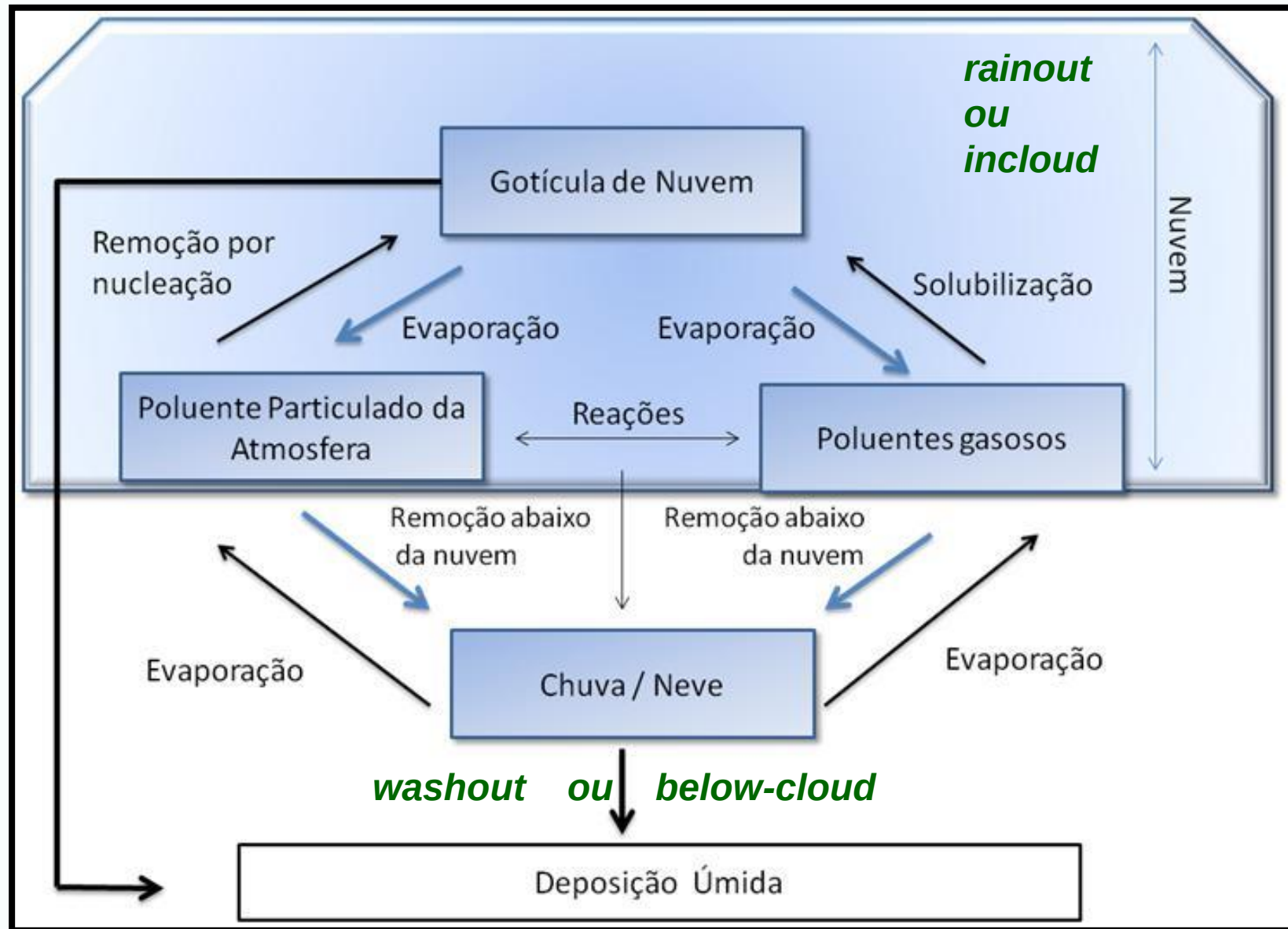
A massa de gás que dissolve em dada quantidade de um líquido em dada temperatura é diretamente proporcional à pressão parcial do gás acima do líquido. Esta lei não se aplica a gases que reagem ou ionizam-se no líquido.

Finlayson p.151 ou Chameides, *J. Geophys. Res.*, 4739, 1984.

Veja também  
[www.mpch-mainz.mpg.de/~sander/res/henry.html](http://www.mpch-mainz.mpg.de/~sander/res/henry.html)

O caminho para a remoção úmida depende de múltiplos processos e compostos químicos, também envolvem diversas fases do estado da matéria, e é influenciado pelos fenômenos de uma variedade de escalas físicas (Seinfeld e Pandis, 1998).

# Modelo conceitual dos processos de remoção úmida (Seinfeld e Pandis, 1998).



Características de gases, partículas de aerossol e partículas de hidrometeoros  
(Atmospheric Pollution – M.Z. Jacobson, 2002).

|                 | Diâmetro<br>típico ( $\mu\text{m}$ ) | Concentração<br>(moléculas ou<br>partículas $\text{cm}^{-3}$ ) | Massa ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) |
|-----------------|--------------------------------------|----------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| gases           | 0,0005                               | $2,45 \times 10^{19}$                                          | $1,2 \times 10^{-9}$           |
| Aerossol        |                                      |                                                                |                                |
| Pequeno         | $< 0,2$                              | $10^3 - 10^6$                                                  | $< 1$                          |
| Médio           | $0,2 - 2,0$                          | $1 - 10^4$                                                     | $< 250$                        |
| grande          | $> 2,0$                              | $< 1 - 10$                                                     | $< 250$                        |
| Hidrometeoros   |                                      |                                                                |                                |
| Gotas neblina   | $10 - 20$                            | $1 - 500$                                                      | $10^4 - 10^6$                  |
| Gotas de nuvens | $10 - 200$                           | $1 - 1000$                                                     | $10^4 - 10^7$                  |
| garoa           | $2000 - 1000$                        | $0,01 - 1$                                                     | $10^5 - 10^7$                  |

# Tamanho de gotas na atmosfera

Tamanho médio de gotas de  
chuva  $> 2000 \mu\text{m}$  (ou 2 mm)  
Velocidade de queda:  $4\text{-}5 \text{ m s}^{-1}$

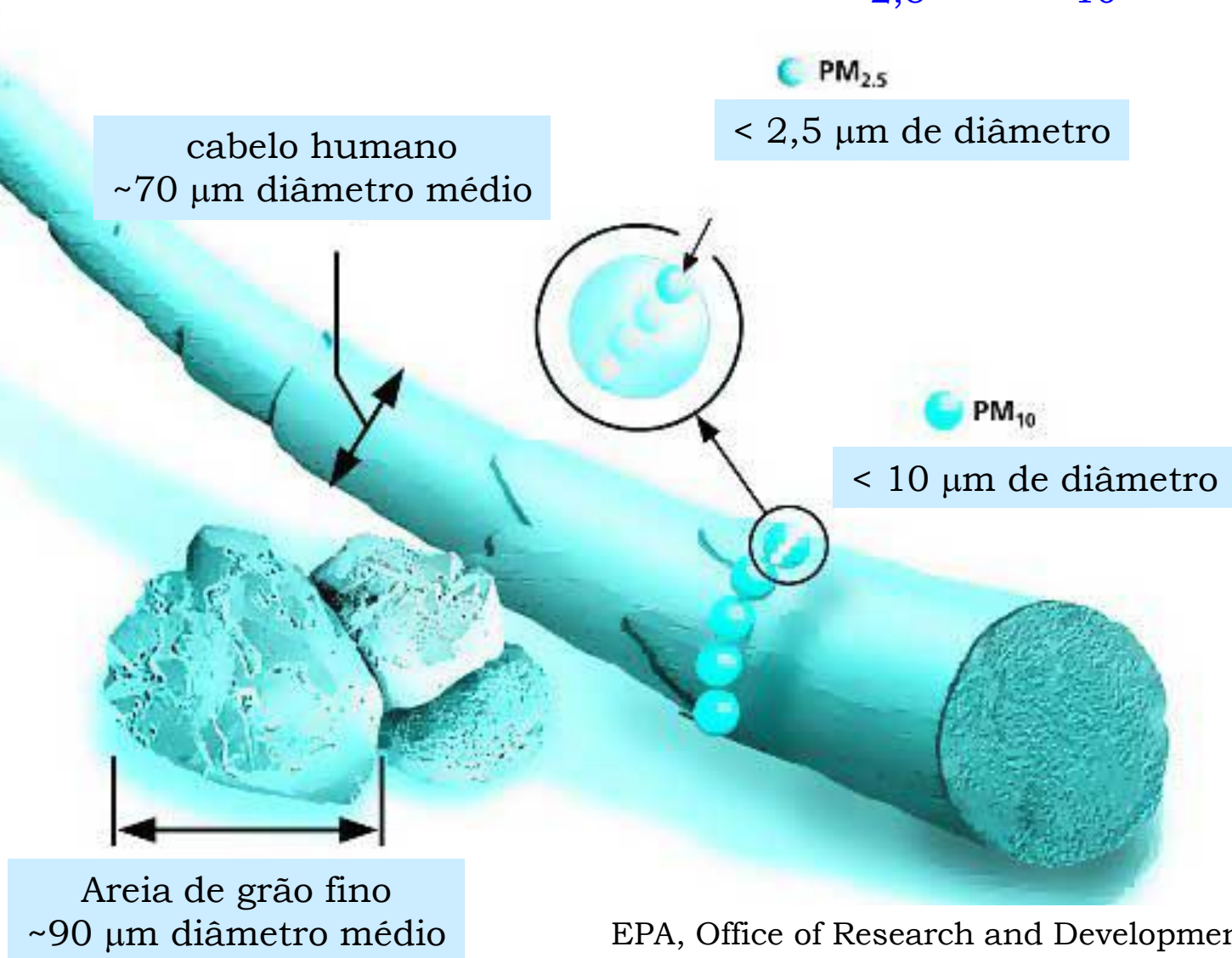
Tamanho médio de gotas de  
nuvem:  $0,02 \text{ mm} = 20 \mu\text{m}$



Tamanho médio de núcleos  
de condensação:  $0,0002 \text{ mm}$   
 $= 0,2 \mu\text{m}$



# Comparação dos diâmetros de um fio de cabelo humano e areia com $PM_{2,5}$ e $PM_{10}$

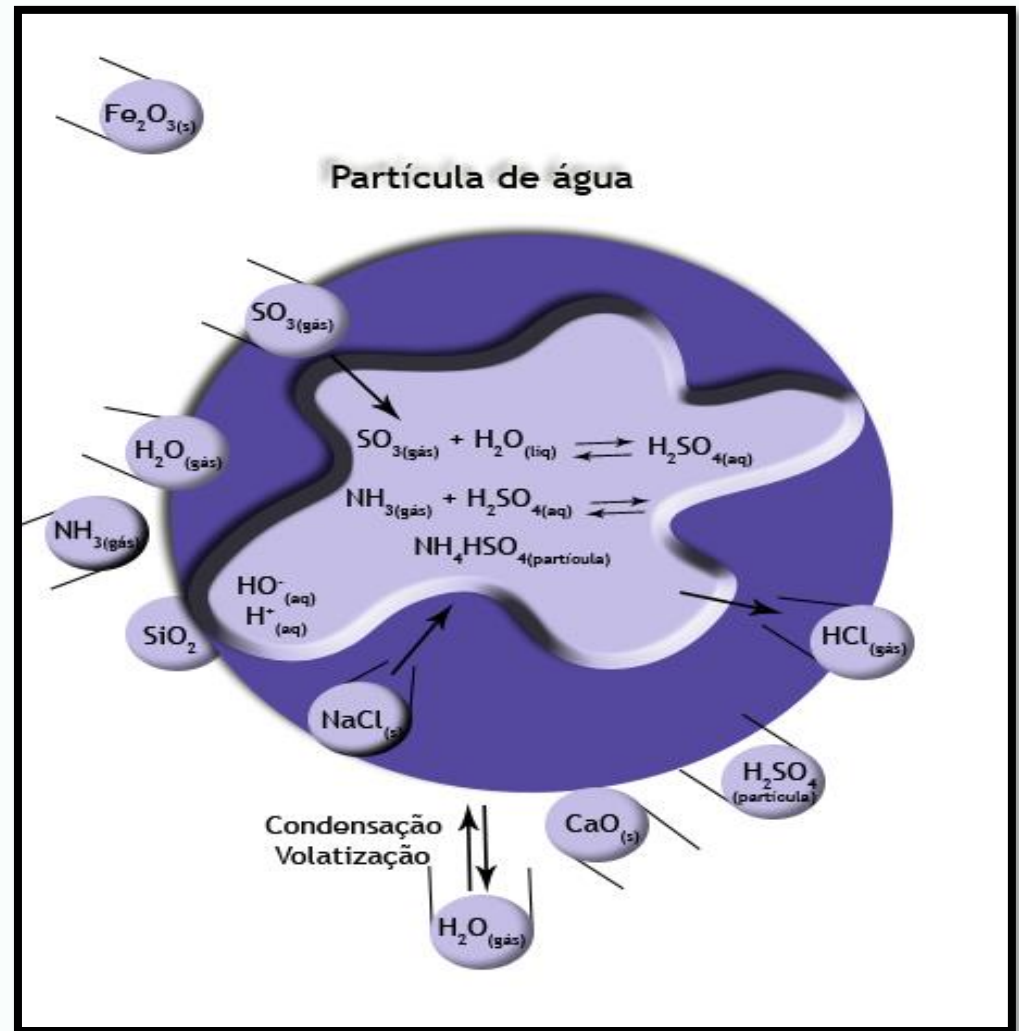


EPA, Office of Research and Development

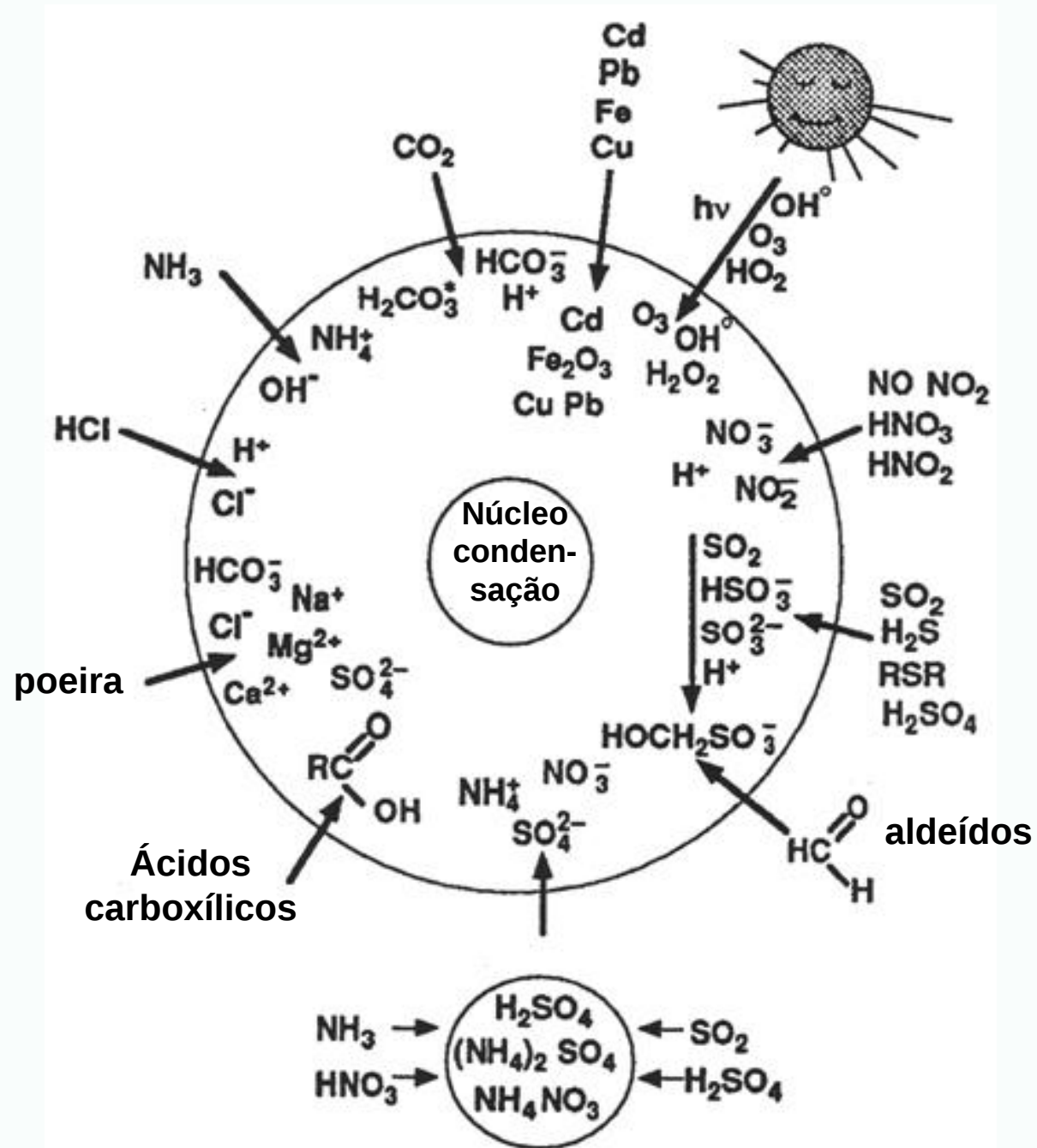
Representação de alguns processos que utilizam uma gotícula de água suspensa na atmosfera como meio de reação (Lenzi, e Favero, 2009).

➤ Processos gerais de incorporação de óxidos, amônia, partículas de sal e volatilização do vapor d'água.

➤ Este é um breve esquema da complexa interação físico-química entre poluentes e a atmosfera.



Interação gases, partículas e fase líquida na atmosfera – microfísica (gota de nuvem)



# Composição química de águas de chuva:

- ❖ pH – conteúdo de  $H^+$  livre
- ❖ Condutividade (conteúdo iônico total)
  - ❖ Cátions ( $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $NH_4^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ )
- ❖ Ânions ( $Cl^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ , ácidos carboxílicos)
  - ❖ Metais ( $Pb^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ , etc)
  - ❖ Oxidantes ( $H_2O_2$ )

Amostragem de águas de chuva: somente deposição úmida (*wet only*) ou deposição total (*bulk deposition*)

Composição química:

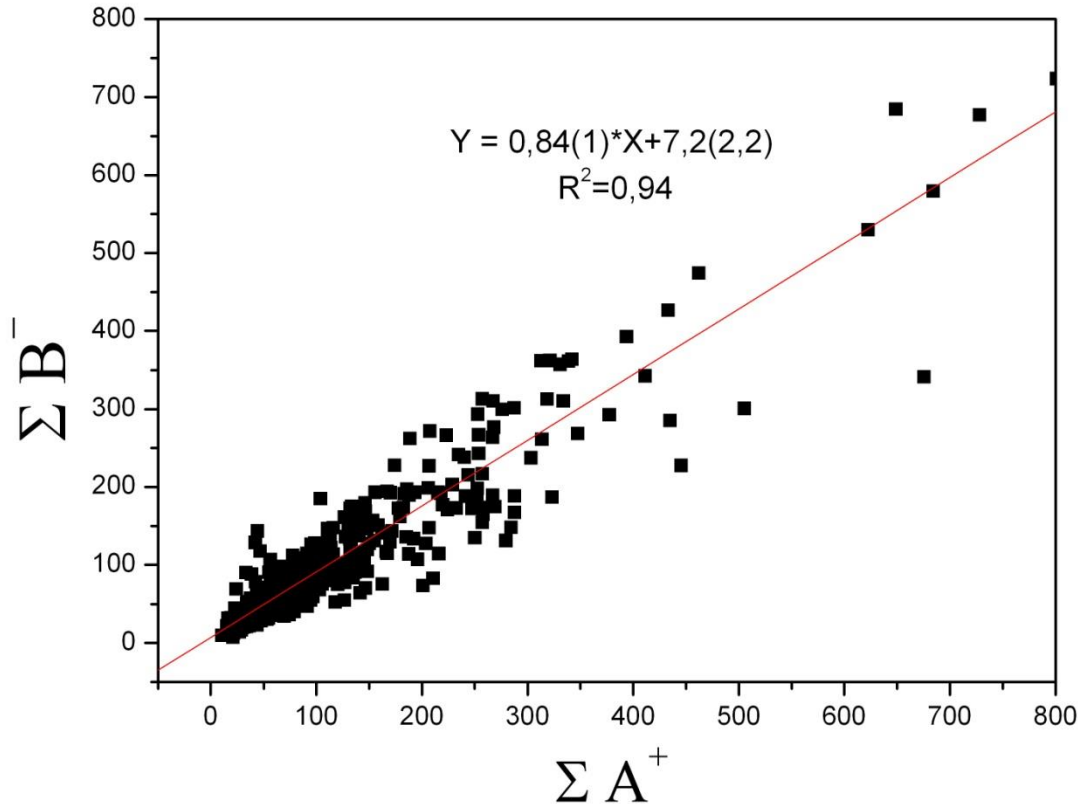
- Medidas de pH: íons  $H^+$
  - Medidas de condutividade: conteúdo iônico total
  - **Cromatografia de íons (íons majoritários):**
    - ✓ **Ânions:** cloreto ( $Cl^-$ ), nitrato ( $NO_3^-$ ), sulfato ( $SO_4^{2-}$ )
    - ✓ **Cátions:** sódio ( $Na^+$ ), potássio ( $K^+$ ), amônio ( $NH_4^+$ ), cálcio ( $Ca^{2+}$ ), magnésio ( $Mg^{2+}$ )
- ânions de ácidos carboxílicos: acetato, formiato, glicolato, oxalato

Espécies traço:

metais (solúvel) em geral: ferro, cobre, chumbo, alumínio, cromo, níquel, zinco, etc

Outras espécies: peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ), radicais hidroxila e hidroperóxila

## VALIDAÇÃO DOS DADOS DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE ÁGUAS DE CHUVA



➤ O balanço iônico considera o produto das cargas pela concentração em unidades de ( $\mu\text{eq L}^{-1}$ ). O balanço iônico foi estimado de acordo com as equações (Allan, 2004):

$\Sigma \text{ C\acute{a}tions} = \Sigma \text{ \u00c2nions}$  , onde:

$$\Sigma A^+ = [H^+] + [NH_4^+] + [Na^+] + [K^+] + 2x[Ca^{2+}] + 2x[Mg^{2+}]$$

$$\Sigma B^- = [Cl^-] + [NO_3^-] + [CH_3COO^-] + [HCOO^-] + 2x[SO_4^{2-}] + 2x[C_2O_4^{2-}]$$

Balanço carga massa e relação  
entre condutividades medidas e  
calculadas

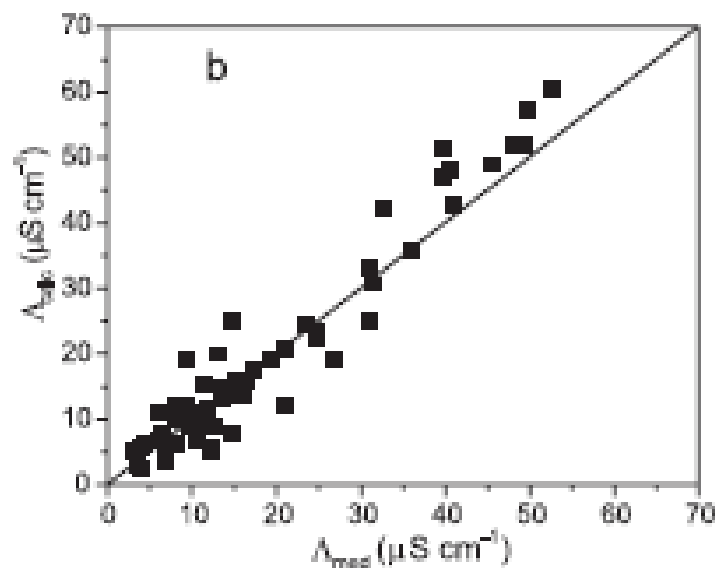
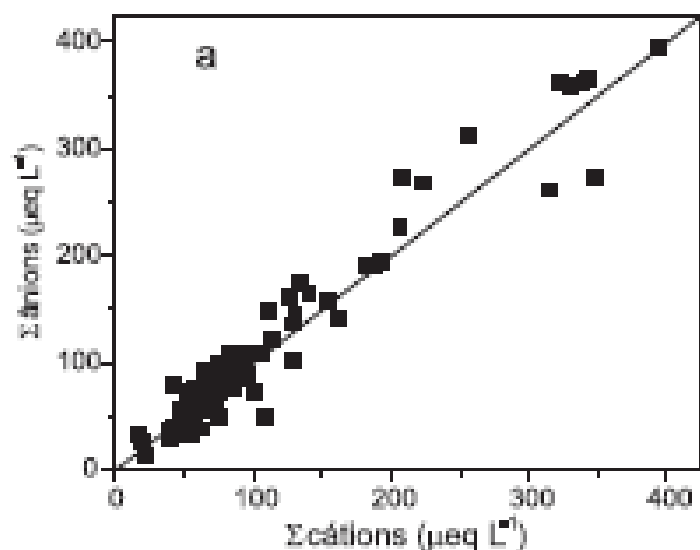
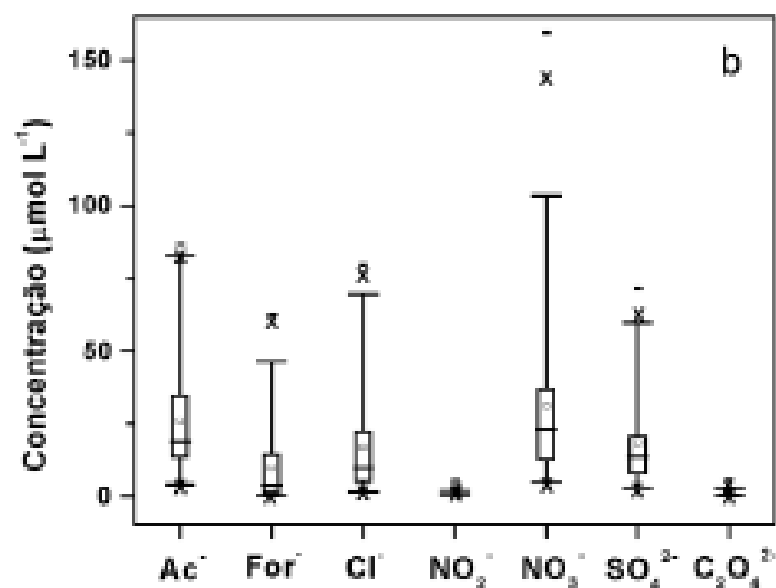
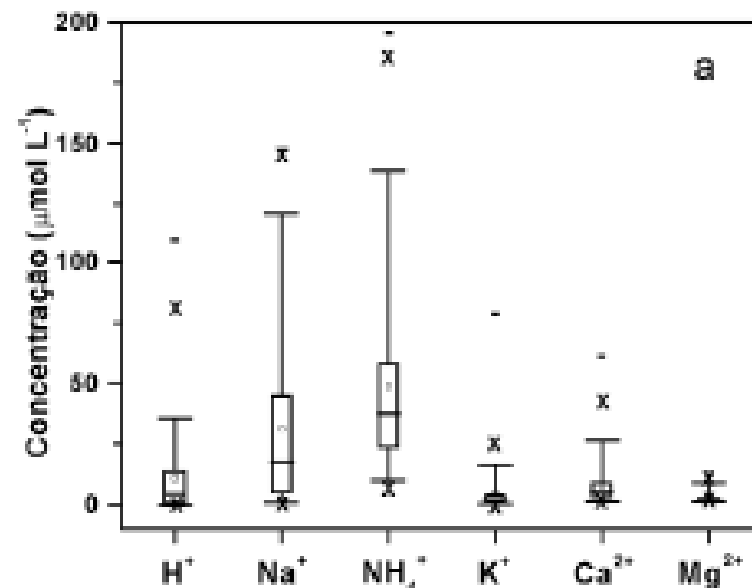
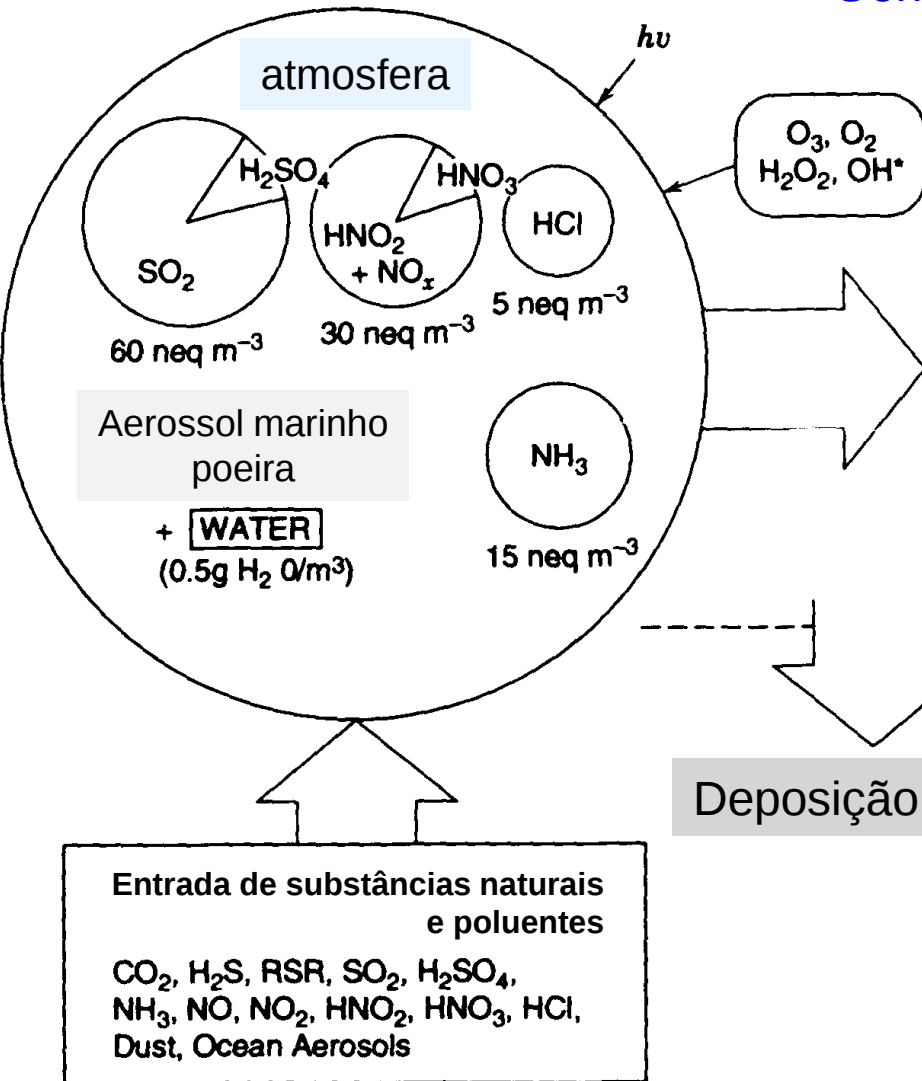


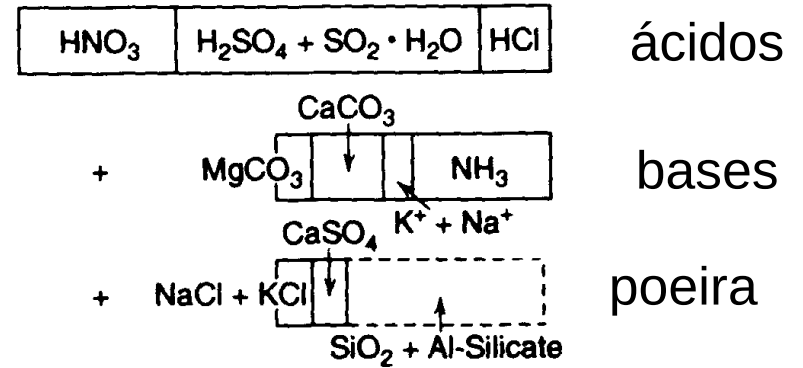
Gráfico tipo “box-whisker” das concentrações  
dos cátions (a) e dos ânions (b) em amostras  
de águas de chuva de São Paulo,



# Gêneses da chuva ácida - Exemplo: Zurich, Suíça



## Reações ácido-base na atmosfera



Deposição seca

Água de chuva

Composição iônica resultante

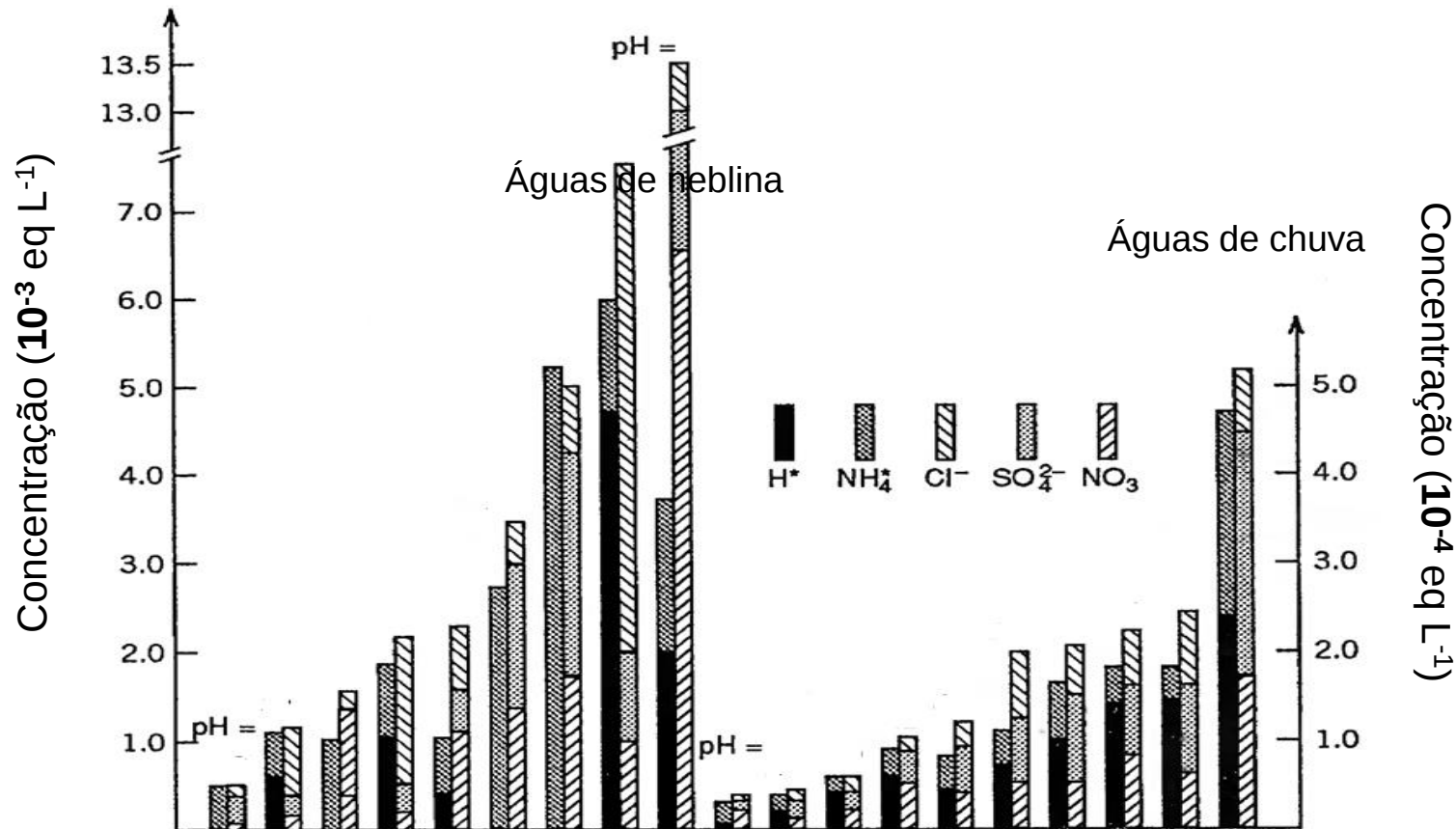
|                                   |                    |                            |                                              |
|-----------------------------------|--------------------|----------------------------|----------------------------------------------|
| $\text{NO}_3$                     | $\text{SO}_4^{2-}$ | $\text{Cl}^-$              | Anions                                       |
| $\text{H}^+(\text{strong acids})$ | $\text{Al}^{3+}$   | $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ | Cations (incl. $\text{H}^+$ ) (strong acids) |
|                                   | $\text{Mg}^{2+}$   | $\text{Ca}^{2+}$           |                                              |
|                                   |                    | $\text{NH}_4^+$            |                                              |

pH  $\approx$  4.3

SCALE



## Comparação da composição iônica de águas de neblina e chuva (Zurique, Suíça - 1994)

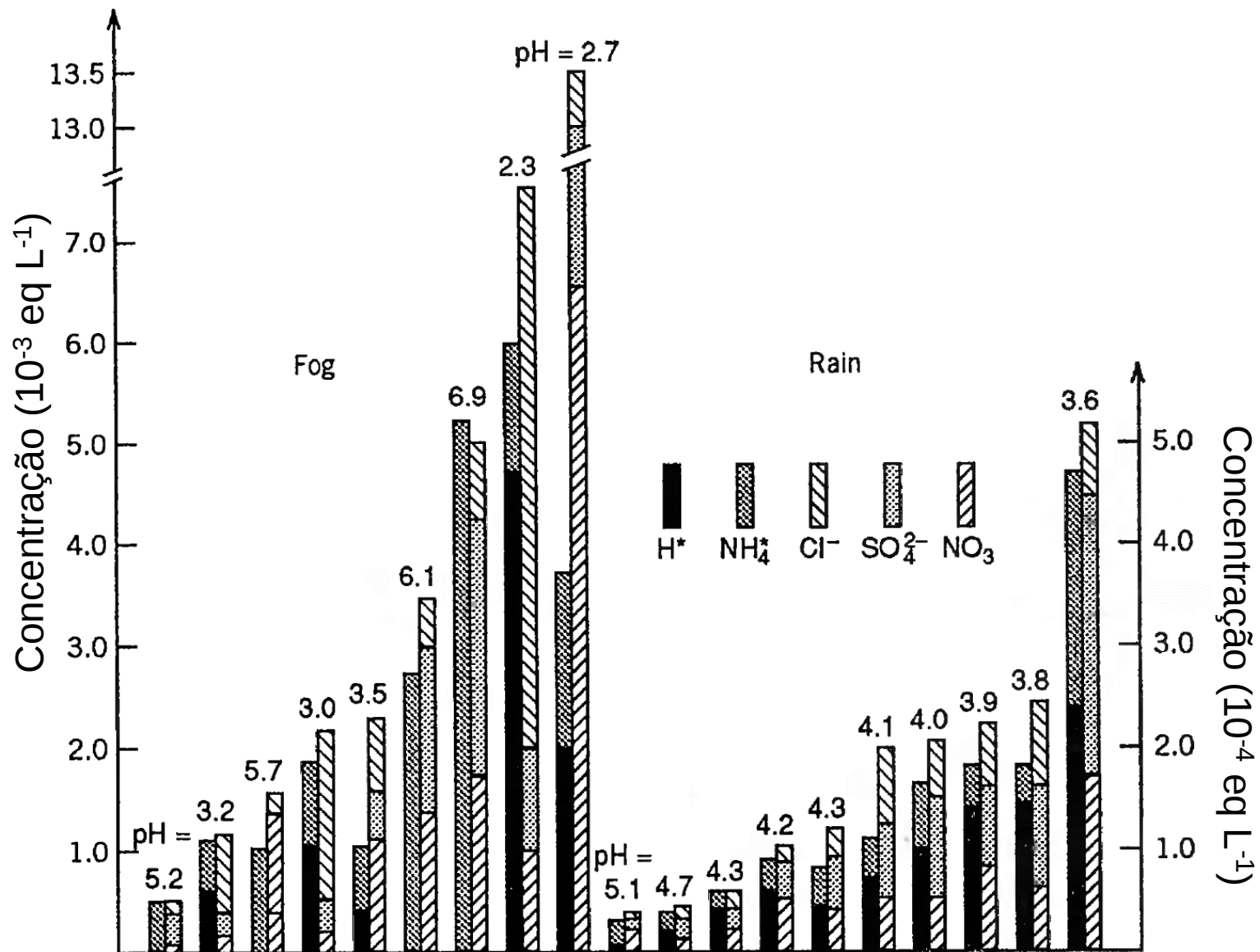


Lembrando da definição  $\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$ , qual o valor de pH para essas amostras de águas de neblina e de chuva?

Porque em algumas amostras não foi possível o valor de pH ser calculado diretamente pelos dados de cada amostra?

Valores de pH estão no próximo slide!!

Comparação da composição iônica de águas de neblina e chuva (Zurique, Suíça - 1994)



Deposição atmosférica total anual dos íons majoritários:  
precipitação e deposição seca (Oak Forest, Walker Branch  
Watershed - 1986)

| Process             | Atmospheric Deposition (meq m <sup>-2</sup> yr <sup>-1</sup> ) |                              |                |                              |                  |                |
|---------------------|----------------------------------------------------------------|------------------------------|----------------|------------------------------|------------------|----------------|
|                     | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>                                  | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | H <sup>+</sup> | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | Ca <sup>2+</sup> | K <sup>+</sup> |
| Precipitation       | 70 ± 5                                                         | 20 ± 2                       | 69 ± 5         | 12 ± 1                       | 12 ± 2           | 0.9 ± 0.1      |
| Dry deposition      |                                                                |                              |                |                              |                  |                |
| Fine particles      | 7 ± 2                                                          | 0.1 ± 0.02                   | 2.0 ± 0.9      | 3.6 ± 1.3                    | 1.0 ± 0.2        | 0.1 ± 0.05     |
| Coarse particles    | 19 ± 2                                                         | 8.3 ± 0.8                    | 0.5 ± 0.2      | 0.8 ± 0.3                    | 30 ± 3           | 1.2 ± 0.2      |
| Vapors <sup>b</sup> | 62 ± 7                                                         | 26 ± 4                       | 85 ± 8         | 1.3                          | 0                | 0              |
| Total deposition    | 160 ± 9                                                        | 54 ± 4                       | 160 ± 9        | 18 ± 2                       | 43 ± 4           | 2.2 ± 0.3      |

<sup>a</sup>Values are means ± standard errors for 2 years of data. Numbers of observations range from 15 (HNO<sub>3</sub>) to 26 (particles) to 128 (precipitation) to 730(SO<sub>2</sub>). In comparing these deposition rates it must be recalled that any such estimates are subject to considerable uncertainty. The standard errors given provide only a measure of uncertainty in the calculated sample means relative to the population means; hence additional uncertainties in analytical results, hydrologic measurements, scaling factors, and deposition velocities must be included. The overall uncertainty for wet deposition fluxes is about 20% and that for dry deposition fluxes is approximately 50% for SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> and approximately 75% for NO<sub>3</sub><sup>-</sup> and H<sup>+</sup>.

<sup>b</sup>Includes SO<sub>2</sub>, HNO<sub>3</sub>, and NH<sub>3</sub>. Complete conversion of deposited SO<sub>2</sub> to H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and of NH<sub>3</sub> to NH<sub>4</sub><sup>+</sup> was assumed in determining the vapor input of H<sup>+</sup>. NH<sub>3</sub> deposition was estimated from the literature.

Source: Lindberg et al. (1986).

# Composição química de águas de chuva de diferentes regiões.

Table 1

Major chemical species in rainwater at various locations, VWM concentrations (except column 1), with  $\text{Cl}^-$  and  $\text{SO}_4^{2-}$  corrected for non-sea-salt contribution only

| Species                     | VWM ( $\mu\text{mol l}^{-1}$ ), rural, forest and/or remote sites |      |      |      |     |      | VWM, urban sites |      |      |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------|------|------|------|-----|------|------------------|------|------|
|                             | 1 <sup>a</sup>                                                    | 2    | 3    | 4    | 5   | 6    | 7                | 8    | 9    |
| $\text{HCOO}_t^-$           | 6.8                                                               | 2.2  | 6.6  | 2.9  | 5.1 | 5.5  | 12.4             | 1.2  | 17.1 |
| $\text{CH}_3\text{COO}_t^-$ | 5.7                                                               | 1.3  | 3.0  | 9.3  | 3.0 | 1.0  | 4.1              | 7.7  | 9.0  |
| nss- $\text{Cl}^-$          | 1.9                                                               | 3.0  | 0.9  | 4.6  | 4.0 | 1.6  | (0)              | 21.4 | 0.9  |
| $\text{NO}_3^-$             | 7.3                                                               | 4.4  | 8.6  | 4.2  | 1.3 | 0.5  | 16.6             | 42.8 | 15.6 |
| nss- $\text{SO}_4^{2-}$     | 3.3                                                               | 7.0  | 5.3  | 1.0  | 1.6 | 0.6  | 9.6              | 26.2 | 8.6  |
| $\text{Na}^+$               | 19                                                                | 116  | 11.1 | 2.4  | 4.4 | 13.2 | 21.0             | —    | 3.6  |
| $\text{NH}_4^+$             | 7.1                                                               | 2.8  | —    | 3.0  | 4.7 | 0.6  | 16.8             | —    | 27.9 |
| $\text{K}^+$                | 1.8                                                               | 0.9  | 2.0  | 0.8  | 1.8 | 0.4  | 1.6              | —    | 3.7  |
| $\text{Mg}^{2+}$            | 0.9                                                               | 0.8  | —    | 0.45 | —   | 1.6  | 2.7              | —    | 1.7  |
| $\text{Ca}^{2+}$            | 5.1                                                               | 2.5  | 4.6  | 1.2  | —   | 0.6  | 4.2              | —    | 5.5  |
| $\text{H}^+$                | 1.6                                                               | 13.1 | 18.1 | 17.0 | 8.4 | 10.9 | 15.4             | 4.5  | 16.9 |

<sup>a</sup>Arithmetic mean (VWM not available).

1: Post et al. (1991)—Barrington, Australia. 2: Galloway and Keene (1989)—Bermuda. 3: Lacaux et al. (1992)—Mayombé Forest Equatorial Africa. 4: Williams et al. (1997)—Central Amazonia, Brazil. 5: Andreae et al. (1990)—Central Amazonia, Brazil. 6: Galloway et al. (1996)—Torres del Paine National Park, Chile. 7: Sakugawa et al. (1993)—Los Angeles, USA. 8: Morales et al. (1998)—Maracaibo, Venezuela. 9: This work—São Paulo, Brazil.

## Composição química de águas de chuva de diferentes regiões.

Table 1

Major chemical species in rainwater at various locations, VWM concentrations (except column 1), with  $\text{Cl}^-$  and  $\text{SO}_4^{2-}$  corrected for non-sea-salt contribution only

| Species                     | VWM ( $\mu\text{mol l}^{-1}$ ), rural, forest and/or remote sites |      |      |      |     |      | VWM, urban sites |      |      |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------|------|------|------|-----|------|------------------|------|------|
|                             | 1 <sup>a</sup>                                                    | 2    | 3    | 4    | 5   | 6    | 7                | 8    | 9    |
| $\text{HCOO}_t^-$           | 6.8                                                               | 2.2  | 6.6  | 2.9  | 5.1 | 5.5  | 12.4             | 1.2  | 17.1 |
| $\text{CH}_3\text{COO}_t^-$ | 5.7                                                               | 1.3  | 3.0  | 9.3  | 3.0 | 1.0  | 4.1              | 7.7  | 9.0  |
| nss- $\text{Cl}^-$          | 1.9                                                               | 3.0  | 0.9  | 4.6  | 4.0 | 1.6  | (0)              | 21.4 | 0.9  |
| $\text{NO}_3^-$             | 7.3                                                               | 4.4  | 8.6  | 4.2  | 1.3 | 0.5  | 16.6             | 42.8 | 15.6 |
| nss- $\text{SO}_4^{2-}$     | 3.3                                                               | 7.0  | 5.3  | 1.0  | 1.6 | 0.6  | 9.6              | 26.2 | 8.6  |
| $\text{Na}^+$               | 19                                                                | 116  | 11.1 | 2.4  | 4.4 | 13.2 | 21.0             | —    | 3.6  |
| $\text{NH}_4^+$             | 7.1                                                               | 2.8  | —    | 3.0  | 4.7 | 0.6  | 16.8             | —    | 27.9 |
| $\text{K}^+$                | 1.8                                                               | 0.9  | 2.0  | 0.8  | 1.8 | 0.4  | 1.6              | —    | 3.7  |
| $\text{Mg}^{2+}$            | 0.9                                                               | 0.8  | —    | 0.45 | —   | 1.6  | 2.7              | —    | 1.7  |
| $\text{Ca}^{2+}$            | 5.1                                                               | 2.5  | 4.6  | 1.2  | —   | 0.6  | 4.2              | —    | 5.5  |
| $\text{H}^+$                | 1.6                                                               | 13.1 | 18.1 | 17.0 | 8.4 | 10.9 | 15.4             | 4.5  | 16.9 |

<sup>a</sup>Arithmetic mean (VWM not available).

1: Post et al. (1991)—Barrington, Australia. 2: Galloway and Keene (1989)—Bermuda. 3: Lacaux et al. (1992)—Mayombé Forest Equatorial Africa. 4: Williams et al. (1997)—Central Amazonia, Brazil. 5: Andreae et al. (1990)—Central Amazonia, Brazil. 6: Galloway et al. (1996)—Torres del Paine National Park, Chile. 7: Sakugawa et al. (1993)—Los Angeles, USA. 8: Morales et al. (1998)—Maracaibo, Venezuela. 9: This work—São Paulo, Brazil.

## Contribuição relativa dos ácidos orgânicos e inorgânicos para a acidez livre potencial de águas de chuva de diferentes regiões

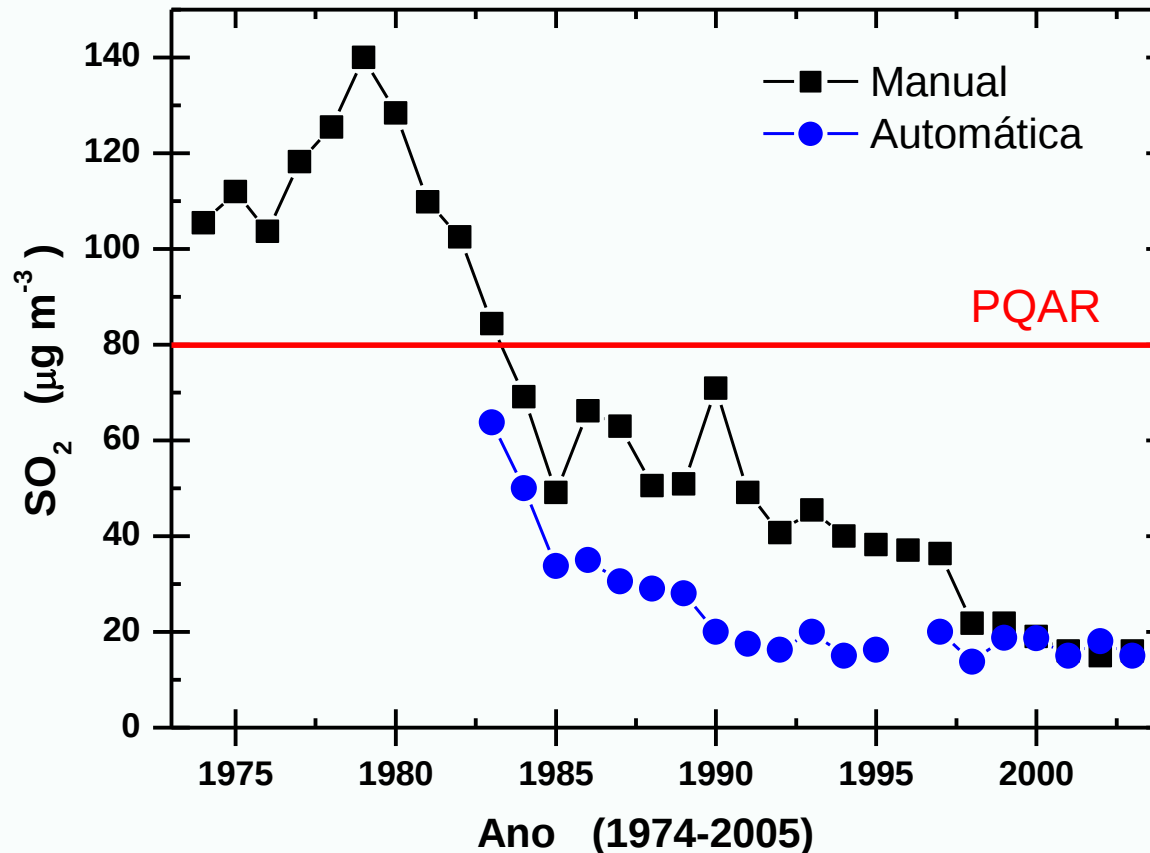
Table 2  
Inorganic and organic acids contribution to the potential free-acidity (PFA) of the rainwater for the same sites of Table 1

| Species                         | PFA (%) for rural, forest and/or remote sites |      |      |      |      |     | PFA (%), urban sites |     |      |
|---------------------------------|-----------------------------------------------|------|------|------|------|-----|----------------------|-----|------|
|                                 | 1 <sup>a</sup>                                | 2    | 3    | 4    | 5    | 6   | 7                    | 8   | 9    |
| HCOOH                           | 24                                            | 9    | 22   | 13   | 31   | 56  | 23                   | 1   | 29   |
| CH <sub>3</sub> COOH            | 20                                            | 5    | 10   | 40   | 18   | 10  | 7                    | 6   | 15   |
| HCl                             | 7                                             | 12   | 3    | 20   | 24   | 17  | —                    | 17  | 1    |
| HNO <sub>3</sub>                | 26                                            | 18   | 29   | 18   | 8    | 5   | 31                   | 34  | 26   |
| H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>  | 23                                            | 56   | 36   | 9    | 19   | 12  | 39                   | 42  | 29   |
| Σ anions (μeq l <sup>-1</sup> ) | 28.0                                          | 24.9 | 29.7 | 23.0 | 16.6 | 9.8 | 52.3                 | 126 | 59.8 |

<sup>a</sup>From arithmetic mean (VWM not available).

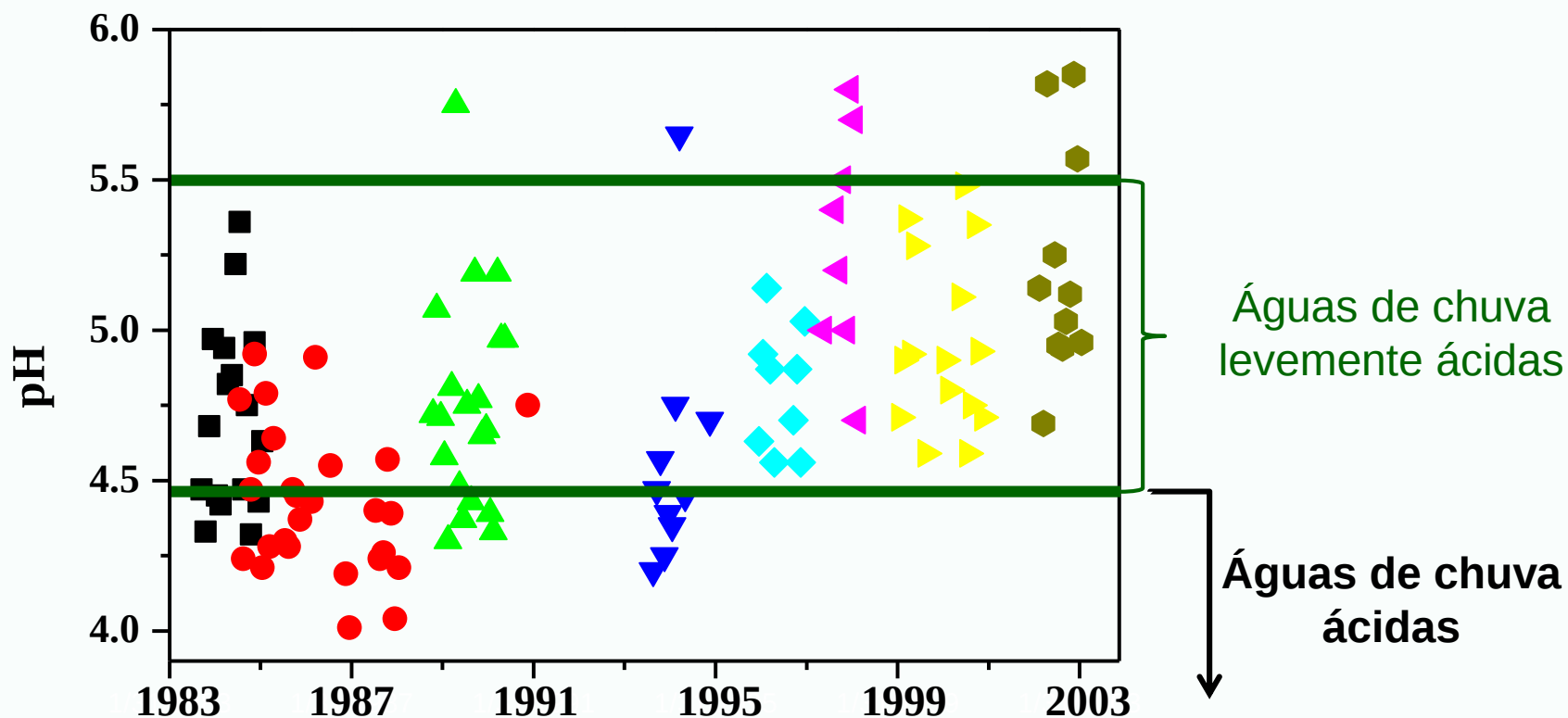
VWM concentrations, non-sea-salt only contributions for HCl and H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, Σ anions of Eq. (2) given in last line.

## Perfil da variação da concentração média anual de SO<sub>2</sub> na Região Metropolitana de São Paulo

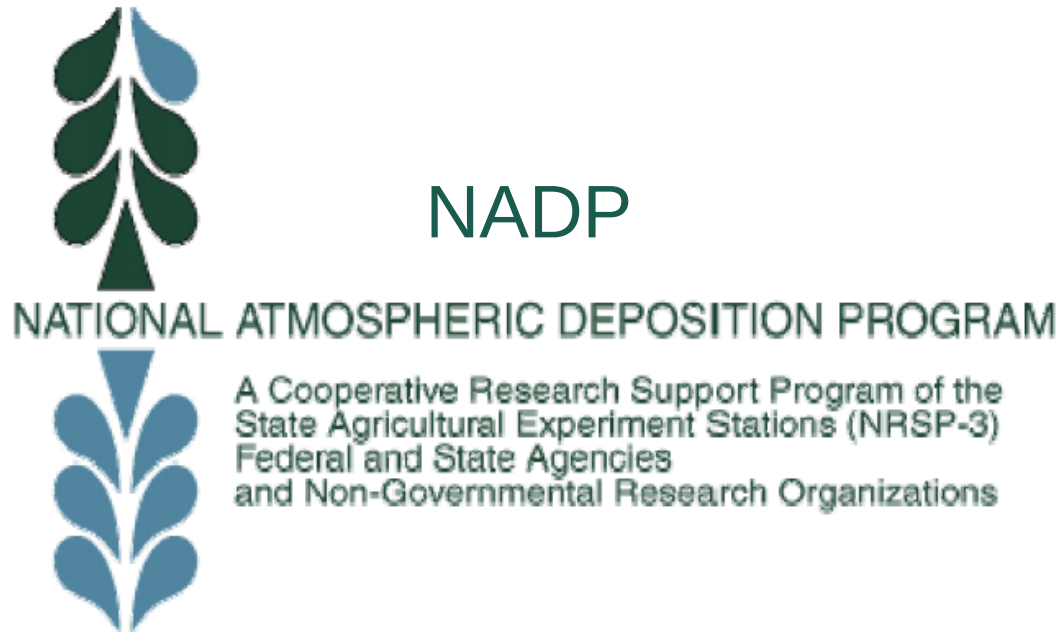


A rede manual tem poucos pontos de amostragem comparados com a rede automática e representa regiões de intensa emissão.

# Perfil da variação do valor de pH médio mensal em águas de chuva na Região Metropolitana de São Paulo



## Thirty Years Down and a Century to Go



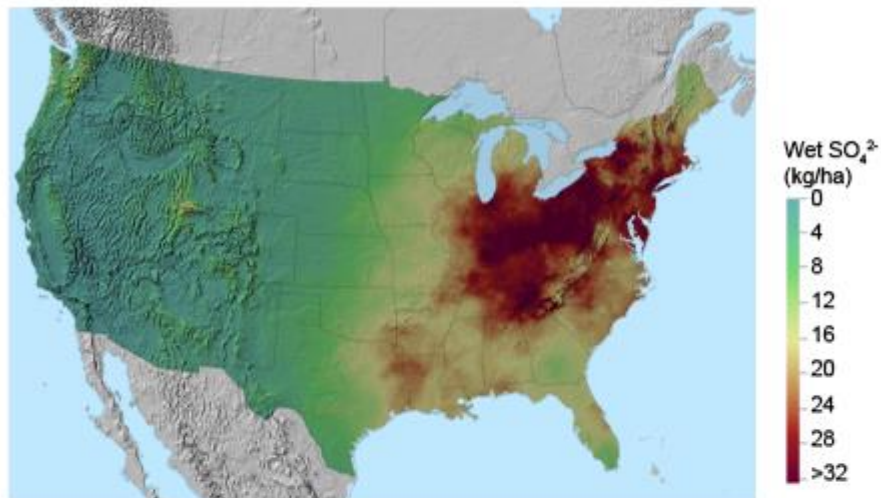
NADAP mais de 300 pontos de monitoramento de águas de chuva



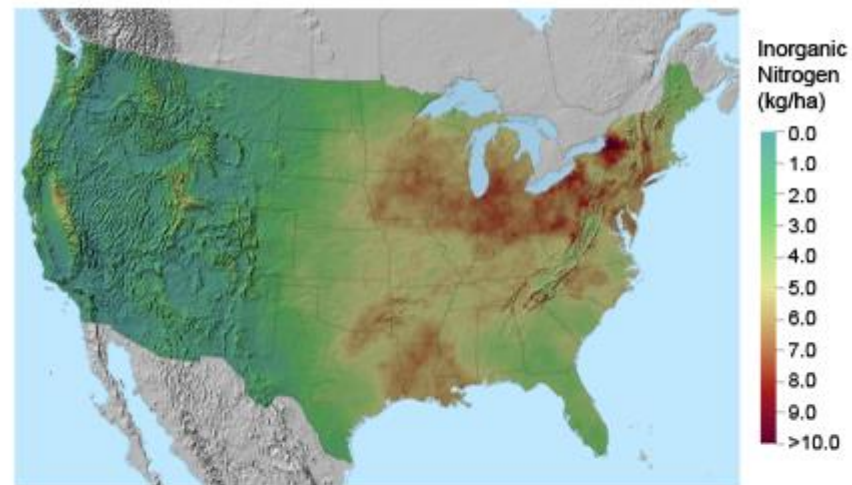
Figure 1. An atmospheric-deposition-monitoring site at Little Bighorn Battlefield National Monument in Montana.

# Variação da deposição de sulfato e nitrato, EUA

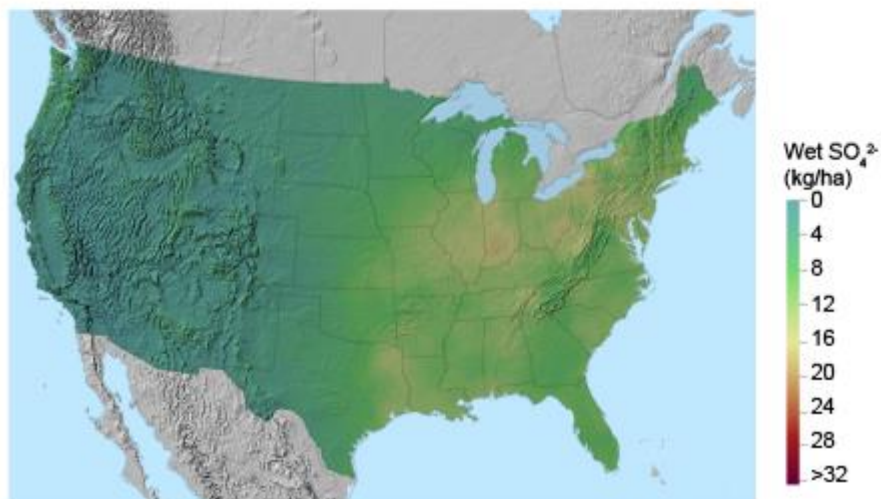
1989–1991



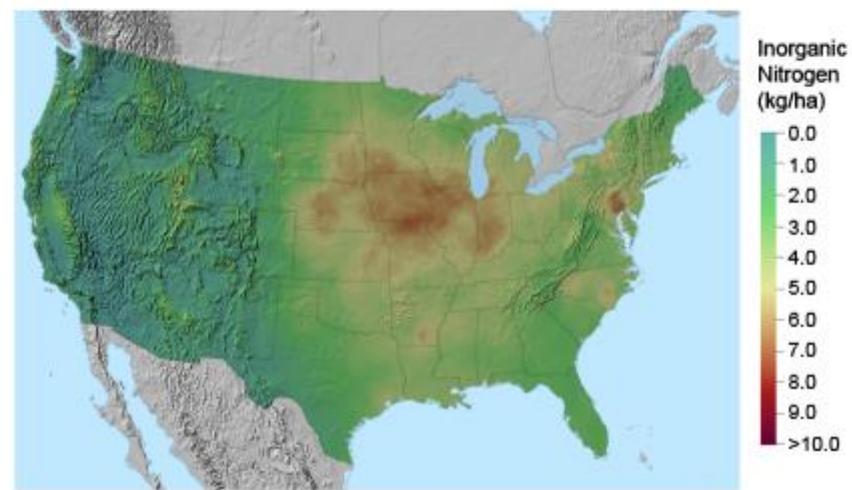
1989–1991



2008–2010



2008–2010



# Acid Rain Conference

## Columbus, Ohio, EUA

12-15 de maio de 1975 - Primeiro Simpósio Internacional em Precipitação Ácida e o Ecossistema de Florestas.

Os objetivos dessa reunião foram:

- avaliar o que era conhecido sobre acidez em precipitação e enfocar a atenção em seus efeitos ecológicos pelo mundo, e
- servir como um fórum de encontro entre diferentes grupos (acadêmico, industrial, governamental e público em geral) para discussão da magnitude, extensão, natureza, e conseqüências de precipitação ácida.

# Histórico

1975 - Columbus, Ohio, EUA

1980 - Saderfjord, Noruega

1985 - Muskoka, Canadá

1990 - Glasgow, Reino Unido

1995 - Göteborg, Suécia

2000 - Tsukuba, Japão

2005 – Praga, República Tcheca

2011 - Beijing, China

**2023 – Niigata, Japão**

1995 - Göteborg, Suécia

ACID REIGN' 95

5<sup>th</sup> Conference on Acidic Deposition

Volume especial: Water, Air and Soil Pollution 85, 1995

*Acid Rain 2000* -Tsukuba, Japão

6<sup>th</sup> Conference on Acidic Deposition

*Looking back to the past and thinking of the future*

Volume especial: Water, Air and Soil Pollution 130, 2001

# Acid Rain 2005

7<sup>th</sup> International Conference on Acid Deposition



Air pollution, its effects and future



# Acid Rain 2005 Praga

## Air pollution, its effects and future

- marca a transição da visão da “chuva ácida” como um fenômeno isolado, para uma visão de sua inter-relação com os temas: mudanças climáticas, uso do solo, biodiversidade e saúde humana.

# The 8<sup>th</sup> International Conference on Acid Deposition:

## ACID RAIN 2011, Beijing, China, 2011

Acid Rain 2011 will place new emphasis on these areas and encourages contributions from scientists focusing on [biogeochemical cycling](#) and its implications for the wider [Earth system](#).



A deposição ácida apresenta muitos desafios científicos. À medida que o clima global e os modelos do sistema da Terra começam a incluir tratamentos cada vez mais detalhados da dinâmica da vegetação e as interações entre a vegetação, o solo e a atmosfera, há um renovado interesse pela deposição de nutrientes e poluentes que afetam a fisiologia das plantas e que podem influenciar o clima. Este interesse no ciclo biogeoquímico de oligoelementos, particularmente nitrogênio, enxofre e fósforo, apresenta novos desafios que precisam ser enfrentados na compreensão das implicações no clima futuro e mudança de uso do solo. Acid Rain 2011 colocará nova ênfase nessas áreas e incentivará contribuições de cientistas que se concentrem no [ciclo biogeoquímico e suas implicações para o sistema terrestre mais amplo](#).



The theme of Acid Rain 2015 is:

**“Successes Achieved and the Challenges Ahead”.**

"Sucessos alcançados e os desafios futuros". Registraram-se enormes progressos na Europa e América do Norte nas últimas três décadas na redução das emissões que formam chuva ácida, enquanto na Ásia as emissões podem estar apenas começando a diminuir. O monitoramento ambiental demonstrou que a recuperação de ecossistemas sensíveis fica claramente aquém do declínio das emissões e da deposição.

ACID RAIN  
2020 NIIGATA  
JAPAN

[Home](#) [Program](#) [Sponsors](#) [More](#)



## The Future Environment and Role of Multiple Air Pollutants

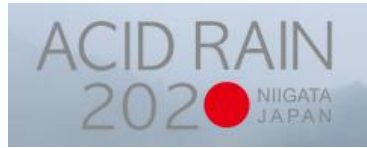
10th International Conference  
on Acid Deposition

© ACID RAIN 2020

ACID RAIN  
2020 NIIGATA  
JAPAN

**Date: Monday - Friday, 17-21 April, 2023**

<https://www.acidrain2020.org/>



## **O futuro do ambiente e o papel de vários poluentes atmosféricos**

A próxima conferência é intitulada "ACID RAIN 2020: O futuro do ambiente e papel de vários poluentes atmosféricos", que abrange questões não apenas específicas da chuva ácida, mas também uma ampla gama de tópicos científicos relacionados a vários poluentes atmosféricos, incluindo ozônio, partículas.

Esperamos que o escopo mais amplo ative a conferência e também aprofunde a pesquisa sobre chuva ácida.

|     |                                                                                                                                                               |
|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| T1  | Emissions and their Evaluation by Monitoring and Modeling                                                                                                     |
| T2  | Long-range Transport and Modeling                                                                                                                             |
| T3  | Urban and regional air pollution by multiple pollutants in Asia                                                                                               |
| T4  | Wet, Dry, and Occult Deposition                                                                                                                               |
| T5  | Deposition of Air Pollutants and their toxicity                                                                                                               |
| T6  | Effects of Atmospheric Deposition and Multiple Pollutants on Terrestrial Ecosystems (including biodiversity, ecosystem functions, physiology, microbes, etc.) |
| T7  | Effects of Atmospheric Deposition and Multiple Pollutants on Aquatic Ecosystems (including biodiversity, ecosystem functions, physiology, etc.)               |
| T8  | Status and Trends of Surface Water Chemistry                                                                                                                  |
| T9  | Long-term trends of acidification and recovery                                                                                                                |
| T10 | Atmospheric Reactive Nitrogen Embedded in the Planetary Boundaries                                                                                            |
| T11 | Recovery from Acidification and Altered Sulfur Dynamics in Ecosystems                                                                                         |
| T12 | Biogeochemical Cycling and its relation to acidification in Ecosystems                                                                                        |
| T13 | Acidification and Trace Elements                                                                                                                              |
| T14 | Acid deposition impacts on urban ecosystems                                                                                                                   |

|     |                                                                                                                    |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| T15 | Effects of acid deposition on carbon cycle                                                                         |
| T16 | Ecosystem Management and Restoration in Response to Air Pollutant Impacts                                          |
| T17 | Environmental Isotopes in Acid Rain                                                                                |
| T18 | Effects of Air Pollutants on Climate Change                                                                        |
| T19 | Climate Change Impacts on Weathering and Critical Load (including chemical and biological processes of ecosystems) |
| T20 | Critical load mapping and dynamic modeling                                                                         |
| T21 | Recovery from acidification and its modeling                                                                       |
| T22 | Linkages among Multiple Pollutants and Elements in the Environments                                                |
| T23 | Air Pollution and their Effects on Materials and Cultural Heritage                                                 |
| T24 | Progress and Application of the Integrated Assessment Model in Europe, USA and Asia                                |
| T25 | Towards Clean Air Policies and Its Human Health Effects                                                            |
| T26 | Progress in Regional Transboundary Air Pollution Governance?                                                       |

## Sugestão de leitura

Fornaro, A., Gutz, I.G.R., Wet deposition and related atmospheric chemistry in the São Paulo metropolis, Brazil. Part 3: Trends in precipitation chemistry during 1983–2003, *Atmospheric Environment* , 40 (2006) 5893–5901.

Fornaro, A., Águas de chuva: conceitos e breve histórico. Há chuvas ácidas no Brasil? *REVISTA USP*, São Paulo, n.70, p. 78-87, junho/agosto 2006