

# Propriedades óticas de aerossóis atmosféricos

**Marco Aurélio de Menezes Franco**

Departamento de Física Aplicada

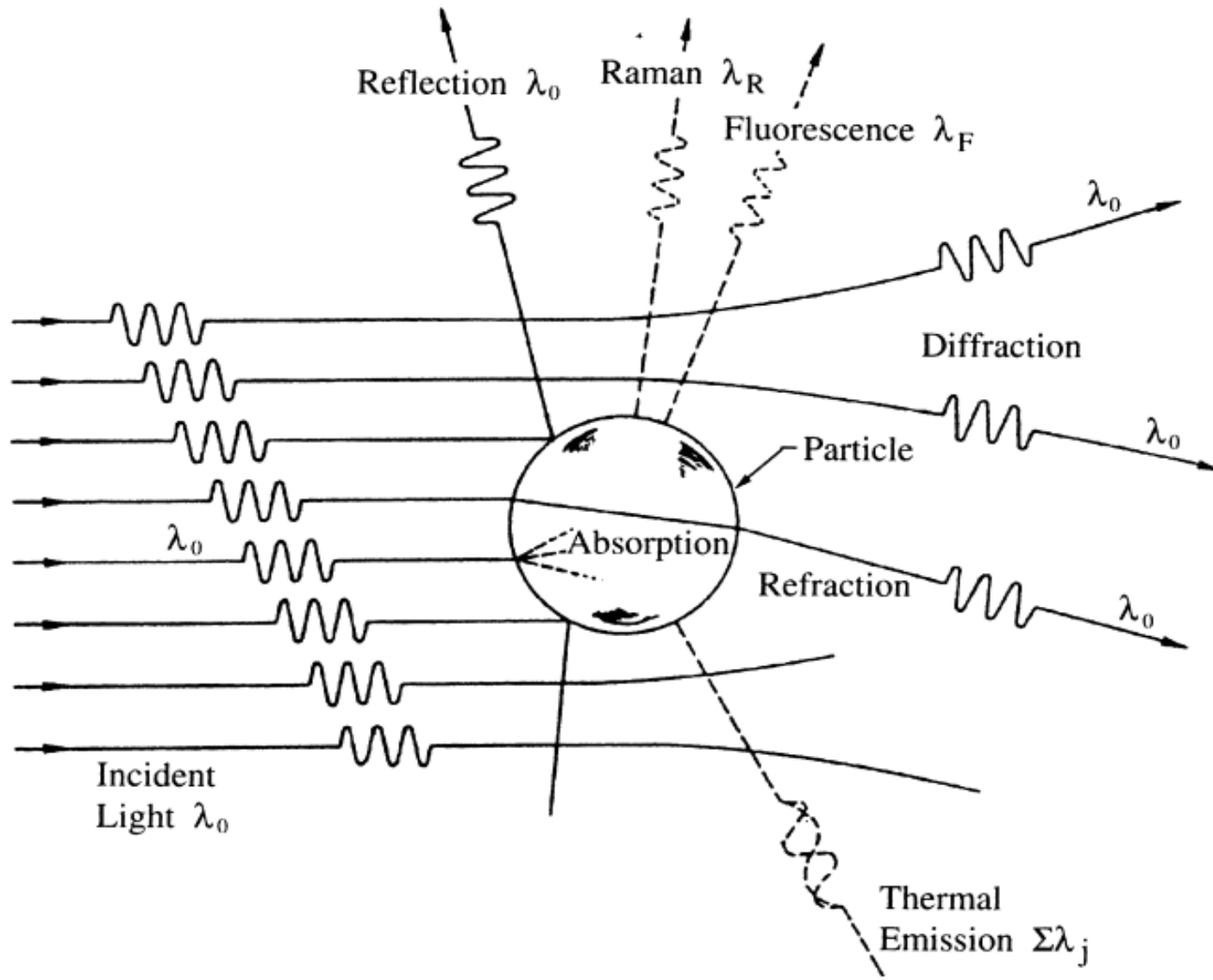
Universidade de São Paulo



# Sumário

- Espalhamento e absorção de radiação por pequenas partículas
- Regime de espalhamento de partículas na atmosfera
- Índice de refração
- Função de fase
- Teoria Mie
- Instrumentos para análises de prop. óticas de aerossóis
- Breve comentário sobre aerossóis não-esféricos
- Visibilidade atmosférica

# Espalhamento e absorção de radiação por pequenas partículas



Interação radiação – matéria: acúmulo de cargas elétricas oscilantes na superfície da partícula. Cargas excitadas reirradiam energia em todas as direções e podem converter parte desta em energia térmica, que pode ser absorvida.

Tipos de espalhamento:

- Elástico:  $\lambda_i = \lambda_f$ , ex.: reflexão (Rayleigh);
- Quase-elástico:  $\lambda_i$  deslocado devido efeito Doppler;
- Inelástico:  $\lambda_i \neq \lambda_f$ , ex.: Raman Scat.;

- ▶ Radiação espalhada e absorvida por partículas de aerossol:

$$I_{\text{esp}} = C_{\text{esp}} I_0$$

$$I_{\text{abs}} = C_{\text{abs}} I_0$$

$I_0$ : intensidade de radiação incidente ( $\text{W}/\text{m}^2$ );

$C_{\text{esp}}, C_{\text{abs}}$  ( $\text{m}^2$ ): seção de choque de espalhamento e de absorção, respectivamente;

- ▶ A combinação dos efeitos de espalhamento e absorção da radiação (de acordo com a conservação da energia) permite definir uma seção de choque de extinção:

$$C_{\text{ext}} = C_{\text{esp}} + C_{\text{abs}}$$

- ▶ Eficiência de espalhamento e absorção (considerando partículas esféricas):

$$Q_{\text{esp}} = \frac{C_{\text{esp}}}{\pi r^2}$$

$$Q_{\text{abs}} = \frac{C_{\text{abs}}}{\pi r^2}$$

$$Q_{\text{ext}} = Q_{\text{esp}} + Q_{\text{abs}}$$

- ▶ Albedo de espalhamento simples (*single-scattering albedo*): fração da luz na extinção que foi espalhada.

$$\omega = \frac{Q_{esp}}{Q_{abs}} = \frac{C_{esp}}{C_{abs}}$$

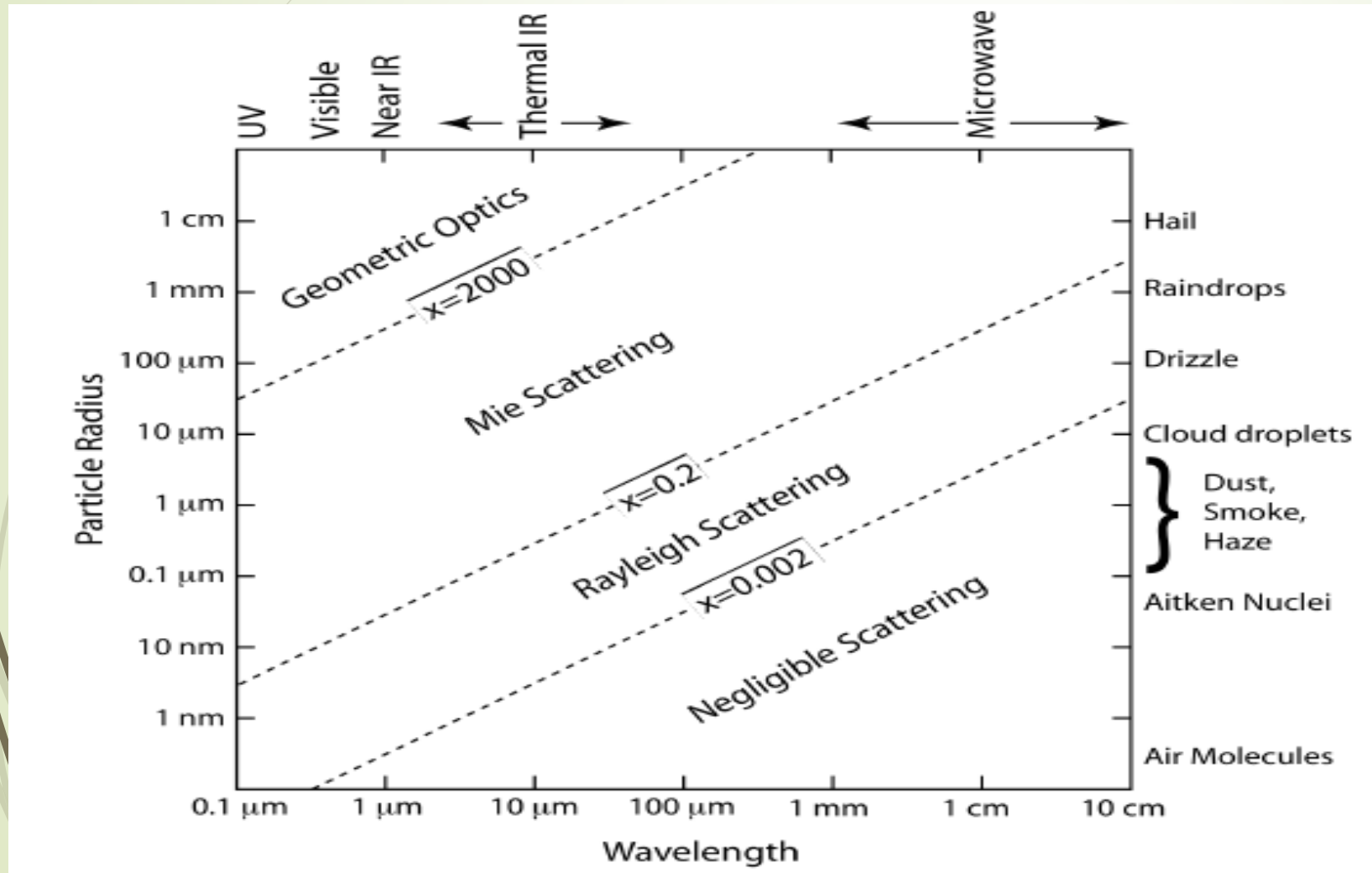
A parte absorvida é  $1 - \omega$ .

Fatores que governam espalhamento e absorção de luz:

- ▶ Comprimento de onda da radiação incidente  $\lambda$ ;
- ▶ Índice de refração das partículas:  **$m = n + ik$** ;
- ▶ Tamanho das partículas. Para o caso de partículas esféricas, é possível estabelecer um índice  $\alpha$ , conhecido como parâmetro de tamanho, que é função tanto do raio da partícula quanto do comprimento de onda da radiação incidente:

$$\alpha = \frac{2\pi r}{\lambda}$$

# Regime de espalhamento de partículas na atmosfera



Regime Rayleigh:  $\alpha \ll 1$ , moléculas ou partículas atmosféricas muito menores que  $\lambda$ ;

Regime descrito pela teoria Mie:  $\alpha \approx 1$ , partículas de tamanho da ordem de  $\lambda$ ;

Regime descrito pela ótica geométrica:  $\alpha \gg 1$ , partículas muito maiores que  $\lambda$ ;

# Índice de Refração

- ▶ Índice de refração caracteriza a forma com que um meio interage com a radiação eletromagnética;

$$N(\lambda) = n + ik$$

- ▶  $N$  é um número complexo.  $n = c/v_1$ , onde  $v_1$  é a velocidade da luz no meio material de interesse.  $k$ , relativo à parte complexa, caracteriza o grau de absorção do meio. Quanto maior  $k$  maior a capacidade de absorção de radiação por um dado meio.

- ▶  $N$  é normalmente normalizado pelo índice de refração do meio,  $N_0 \Rightarrow N/N_0 = m$ . No caso do ar,  $N_0 = 1,00029 + 0i$  em  $\lambda = 589\text{nm}$ .

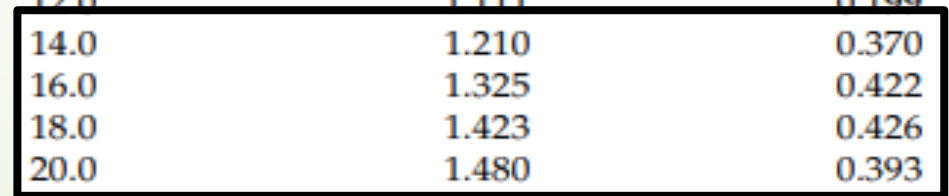
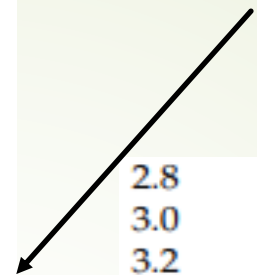
$$m = n + ik$$

### Refractive Index, Real $n$ , and Imaginary $k$ Part for Liquid Water

$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	$n$	$k$
0.25	1.362	$3.35 \times 10^{-8}$
0.30	1.349	$1.6 \times 10^{-8}$
0.35	1.343	$6.5 \times 10^{-9}$
0.40	1.339	$1.86 \times 10^{-9}$
0.45	1.337	$1.02 \times 10^{-9}$
0.50	1.335	$1.00 \times 10^{-9}$
0.55	1.333	$1.96 \times 10^{-9}$
0.60	1.332	$1.09 \times 10^{-8}$
0.65	1.331	$1.64 \times 10^{-8}$
0.70	1.331	$3.35 \times 10^{-8}$
0.75	1.330	$1.56 \times 10^{-7}$
0.80	1.329	$1.25 \times 10^{-7}$
0.85	1.329	$2.93 \times 10^{-7}$
0.90	1.328	$4.86 \times 10^{-7}$
0.95	1.327	$2.93 \times 10^{-6}$
1.0	1.327	$2.89 \times 10^{-6}$
1.2	1.324	$9.89 \times 10^{-6}$
1.4	1.321	$1.38 \times 10^{-4}$
1.6	1.317	$8.55 \times 10^{-5}$
1.8	1.312	$1.15 \times 10^{-4}$
2.0	1.306	$1.10 \times 10^{-3}$
2.2	1.296	$2.89 \times 10^{-4}$
2.4	1.279	$9.56 \times 10^{-4}$
2.6	1.242	$3.17 \times 10^{-3}$

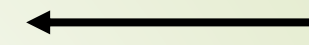
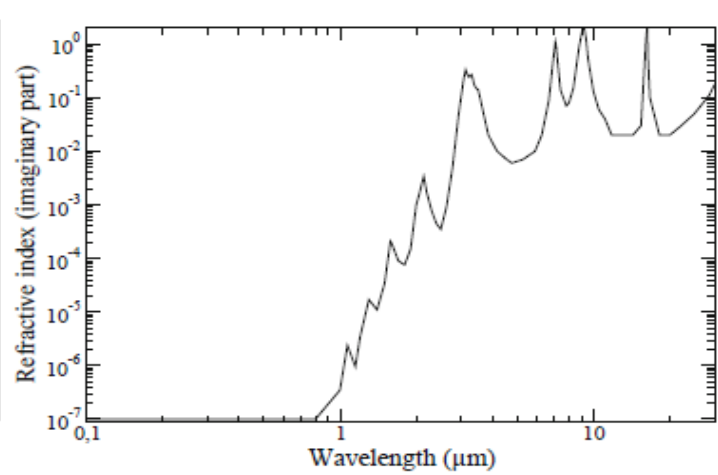
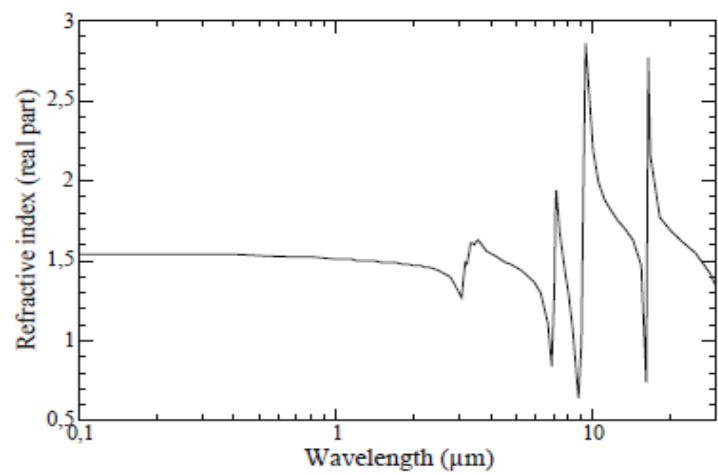
2.8	1.142	0.115
3.0	1.371	0.272
3.2	1.478	0.0924
3.4	1.420	0.0195
3.6	1.385	0.00515
3.8	1.364	0.00340
4.0	1.351	0.00460
4.2	1.342	0.00688
4.4	1.334	0.00103
4.6	1.330	0.0147
4.8	1.330	0.0150
5.0	1.325	0.0124
5.5	1.298	0.0116
6.0	1.265	0.107
6.5	1.339	0.0392
7.0	1.317	0.0320
7.5	1.304	0.0326
8.0	1.291	0.0343
9.0	1.262	0.0399
10.0	1.218	0.0508
11.0	1.153	0.0968
12.0	1.111	0.199
14.0	1.210	0.370
16.0	1.325	0.422
18.0	1.423	0.426
20.0	1.480	0.393

Região do espectro visível

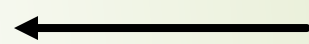
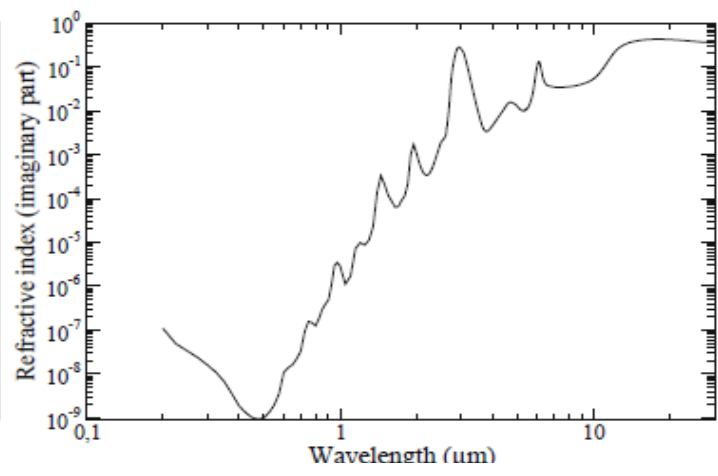
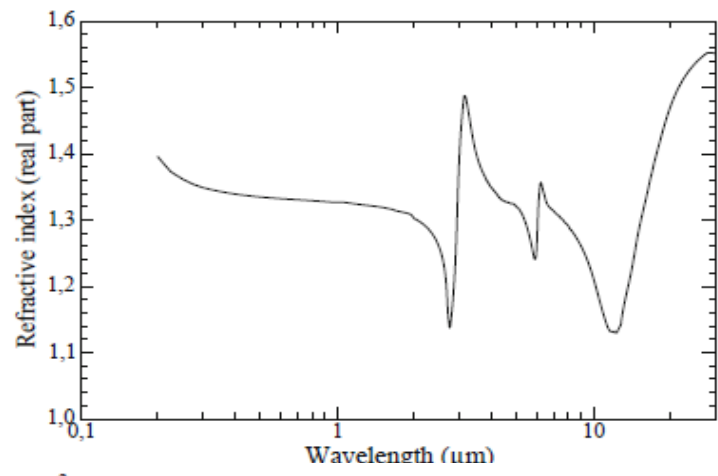


Source: Hale and Querry (1973).

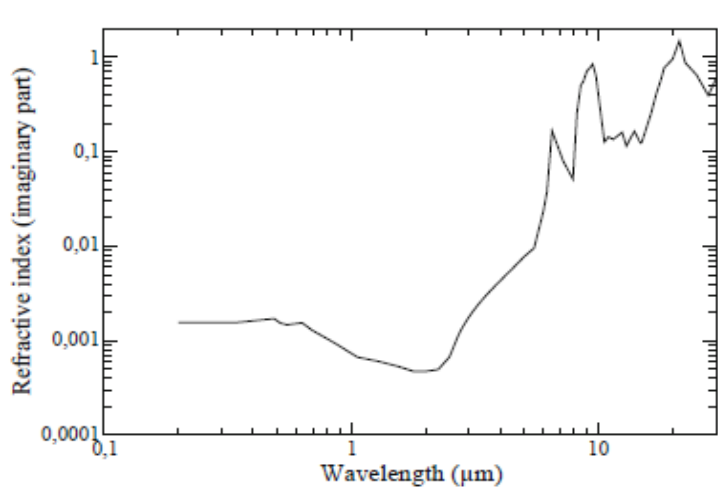
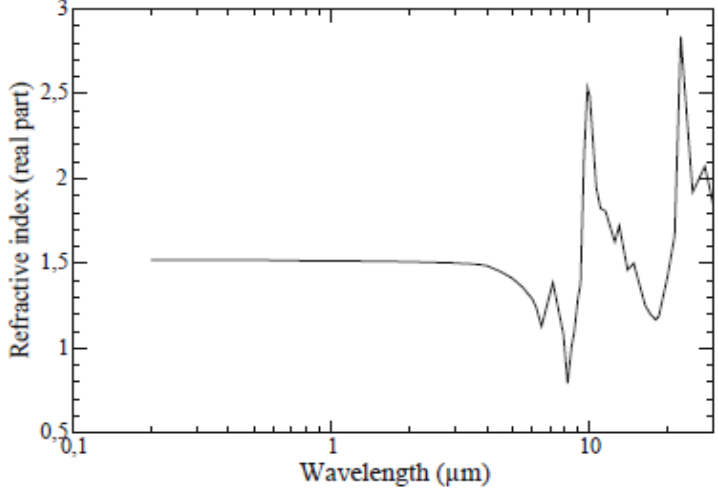




Sulfato de amônia



Água pura



Partículas de  
poeira do  
deserto do  
Saara

# Função de Fase

- Mede a distribuição angular da radiação espalhada por uma partícula de aerossol em um dado comprimento de onda.

$$P(\theta, \alpha, m) = \frac{F(\theta, \alpha, m)}{\int_0^\pi F(\theta, \alpha, m) \sin \theta d\theta}$$

$F(\theta, \alpha, m)$  é a intensidade de luz espalhada em um ângulo  $\theta$ ;

$$\int_0^{2\pi} \int_0^\pi P(\theta, \alpha, m) \sin \theta d\theta d\phi = 4\pi$$

Integral da função de fase em uma esfera centrada na partícula;

$$g = \frac{1}{2} \frac{\int_0^\pi \cos \theta F(\theta) \sin \theta d\theta}{\int_0^\pi F(\theta) \sin \theta d\theta}$$
$$= \frac{1}{2} \int_0^\pi \cos \theta P(\theta) \sin \theta d\theta$$

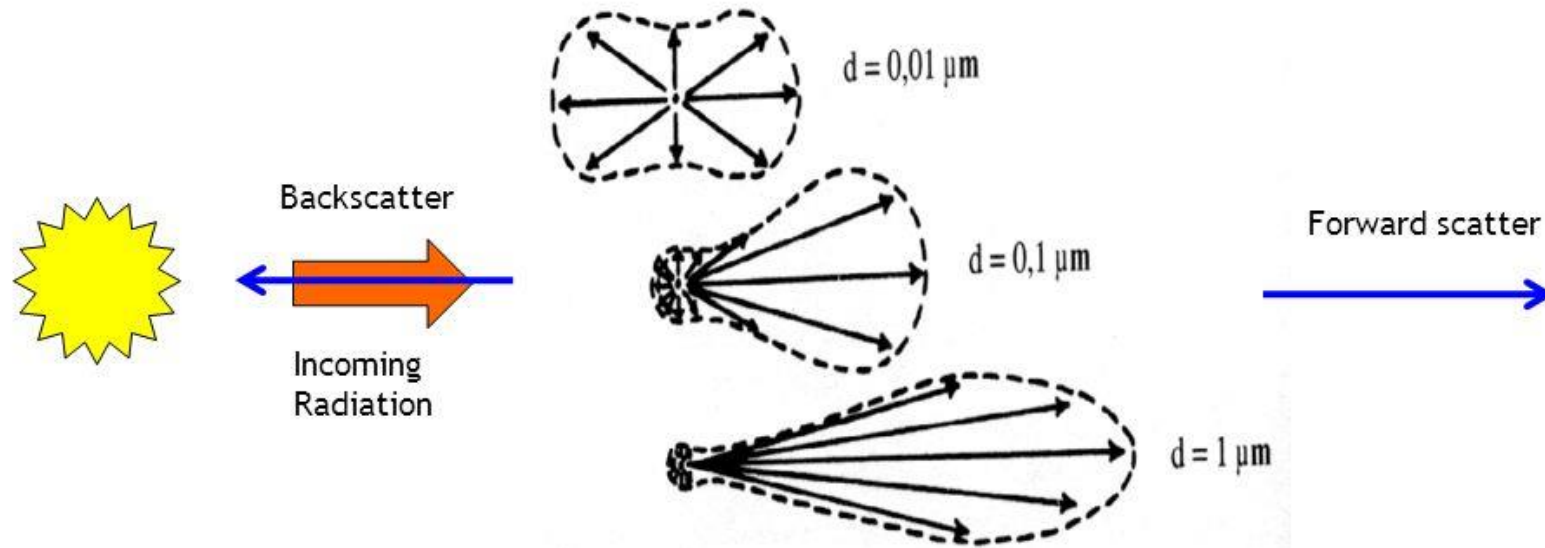
Fator de assimetria: momento de primeira ordem da função de fase e mede o grau de simetria da função de fase entre os hemisférios dianteiros e traseiros;

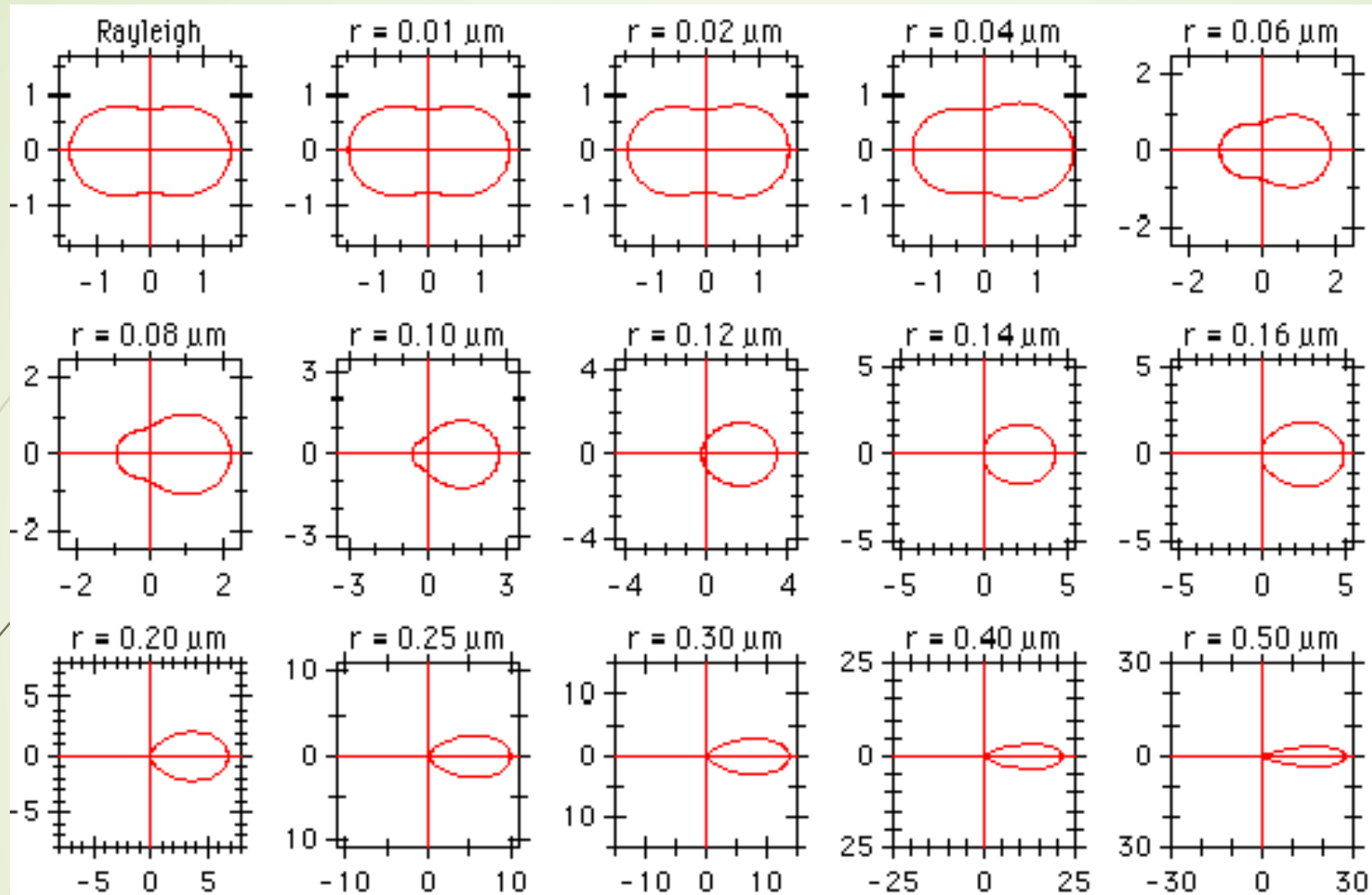
$g = 1 \Rightarrow$  toda radiação é espalhada na direção frontal;  $g = -1 \Rightarrow$  toda radiação é espalhada na direção traseira;  $g = 0 \Rightarrow$  radiação espalhada frontalmente é igual à espalhada na direção oposta;

# Optical Properties

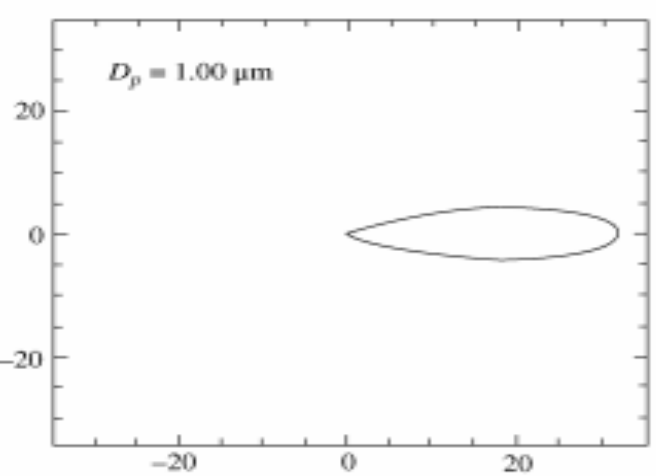
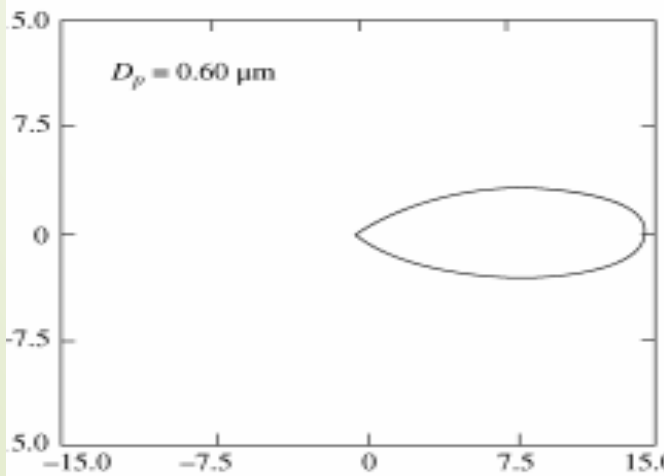
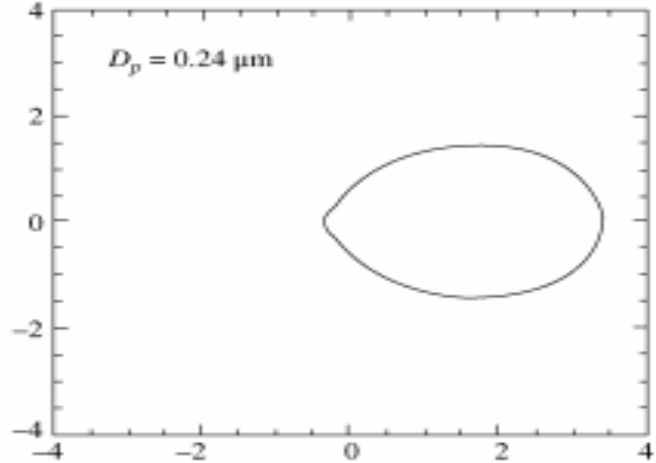
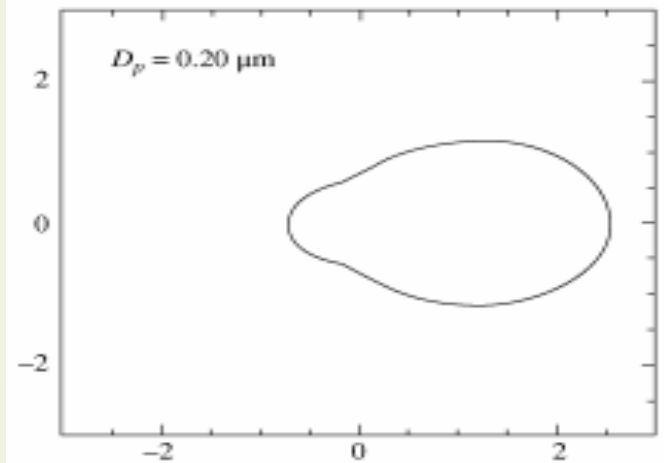
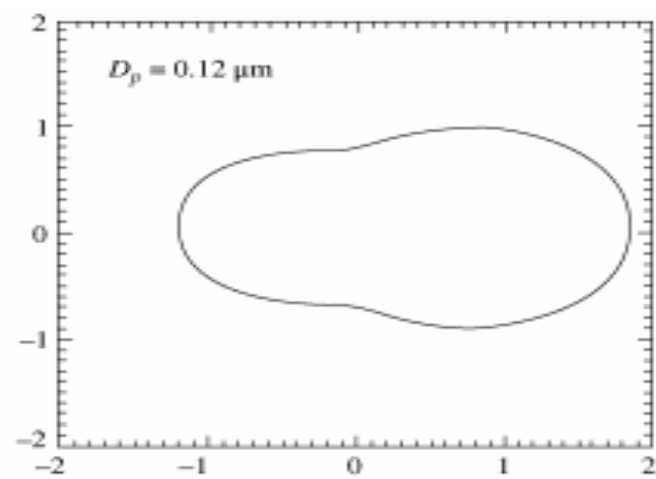
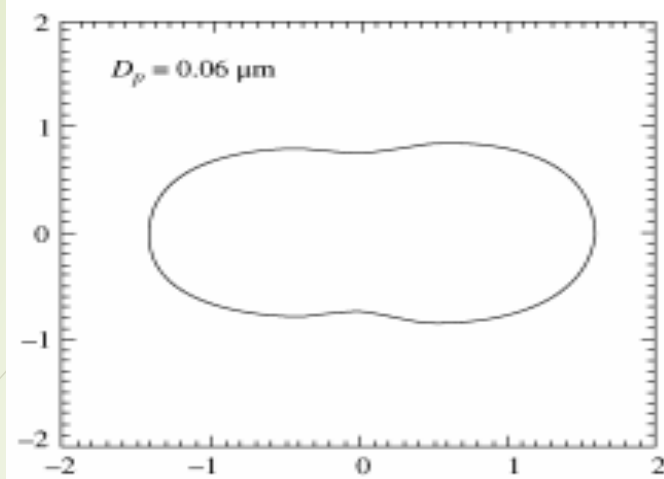
## Scattering Phase Function

The directional light scattering due to the aerosol particles

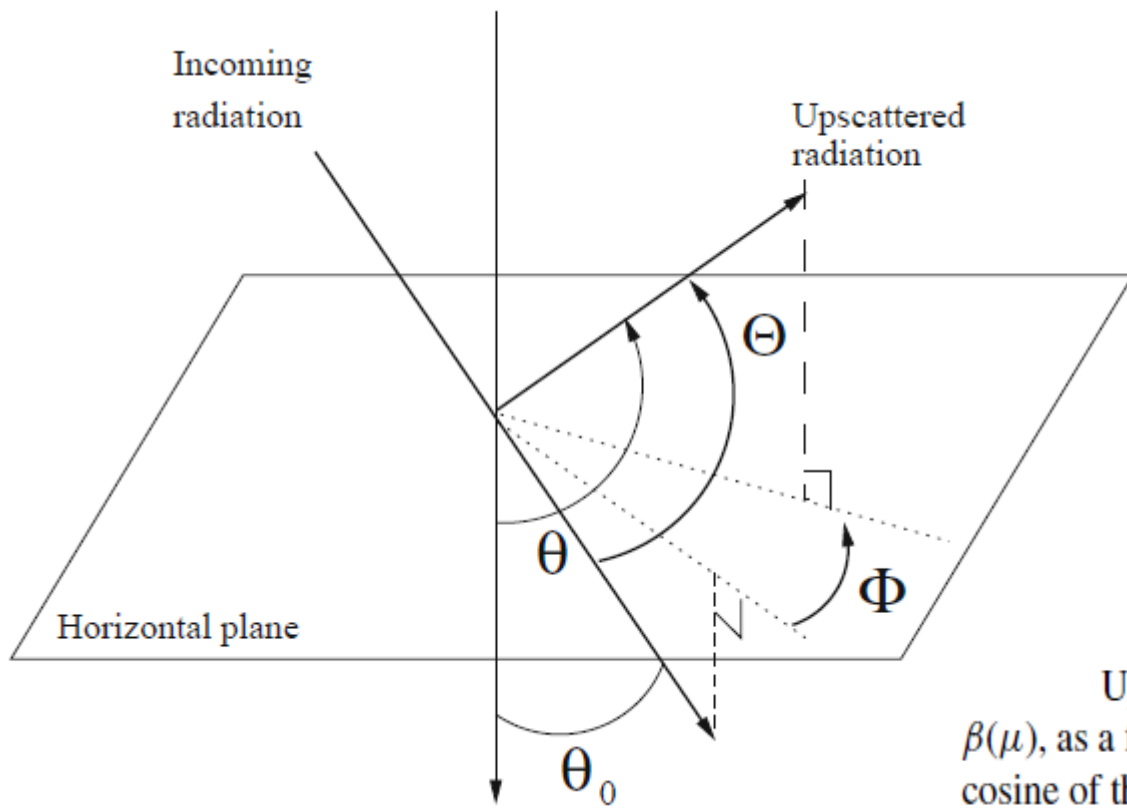




Simulação da função de fase de uma partícula com diferentes tamanhos, comprimento de onda incidente de 550 nm e índice de refração  $m = 1,52 + 0,008i$



Caso real:  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  em ambiente com 80% de umidade relativa no comprimento de onda 550 nm.



## Upscattered radiation

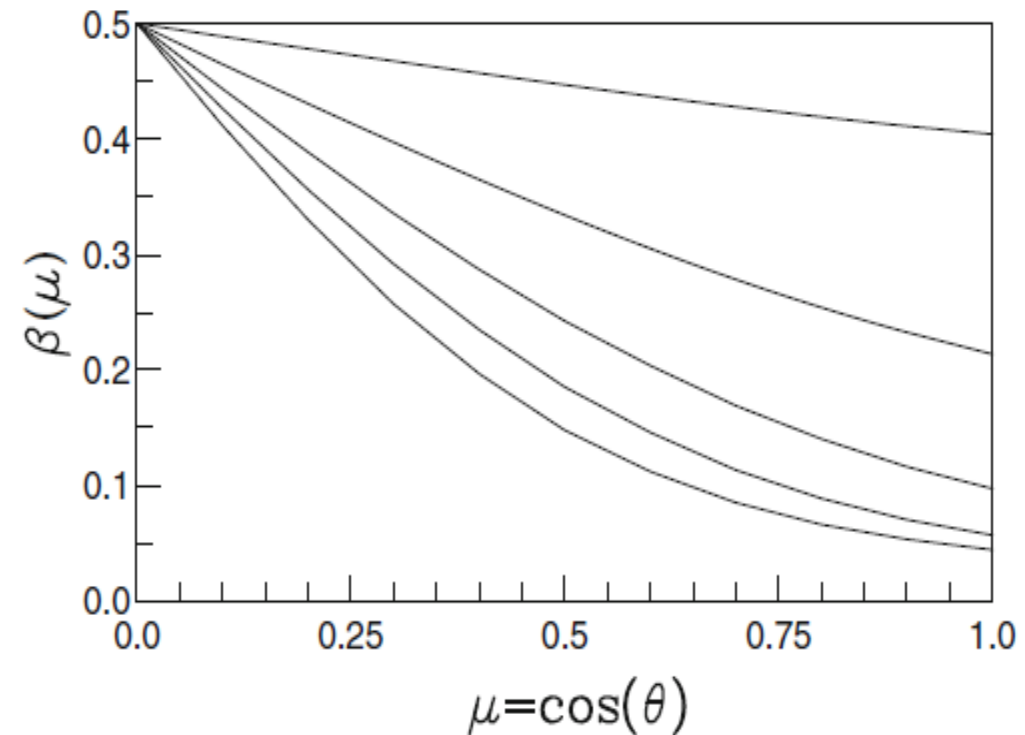
$$\bar{\beta} = \frac{1}{2\pi} \int_{-1}^1 \arccos(\mu) P(\mu) d\mu.$$

$\beta(\mu)$  é maior para partículas menores e aumenta quando  $0 \leq \theta \leq 90$ .

$$b = \beta(1) = \frac{1}{2} \int_{-1}^0 P(\mu) d\mu$$

Backscattered radiation can be measured with nephelometers!

Upscatter fraction,  $\beta(\mu)$ , as a function of the cosine of the zenith angle,  $\mu$ , for a range of log-normal size distributions for homogeneous spheres with a refractive index  $m = 1.33$ , mean geometric volume diameters (from top to bottom on the graph) of 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 and 0.5  $\mu\text{m}$ , and a geometric standard deviation  $\sigma_g = 1.4$

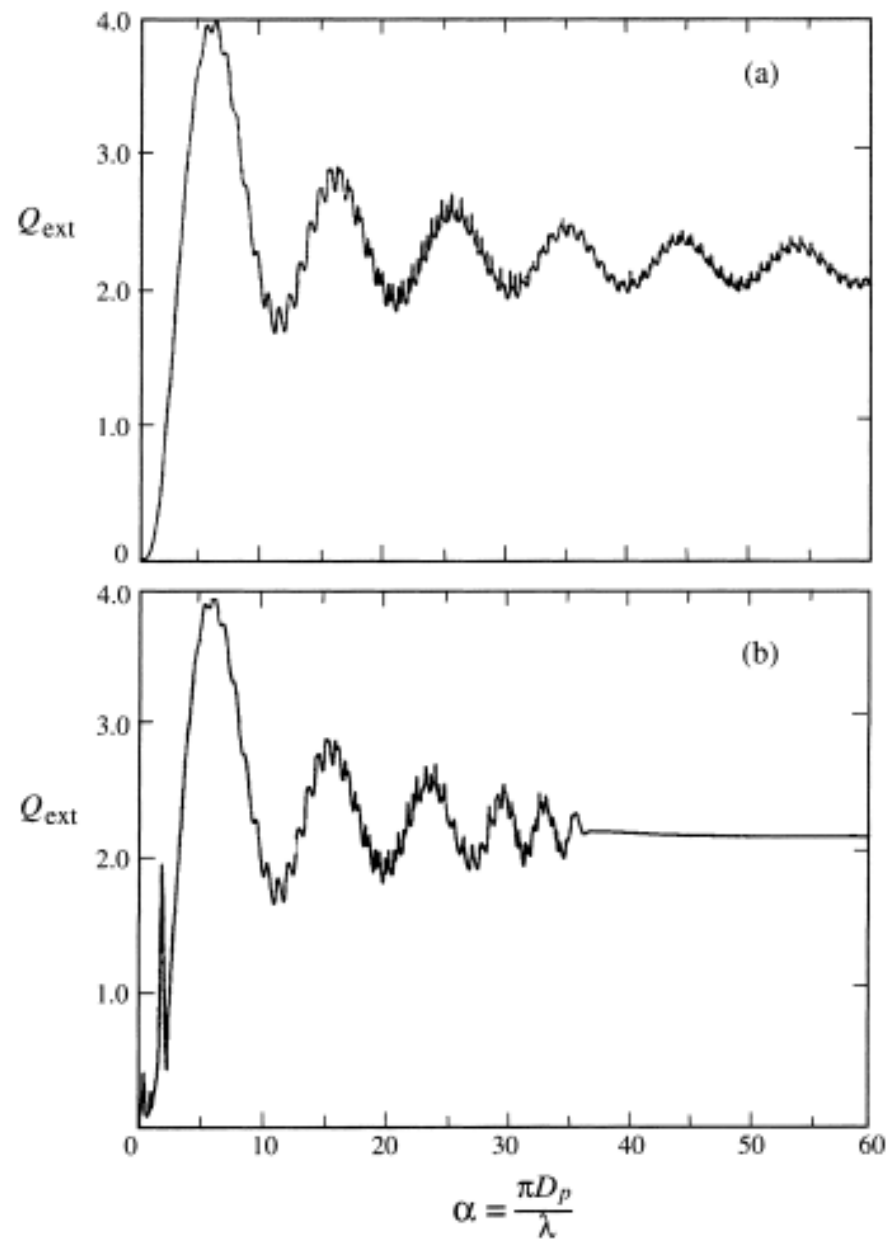
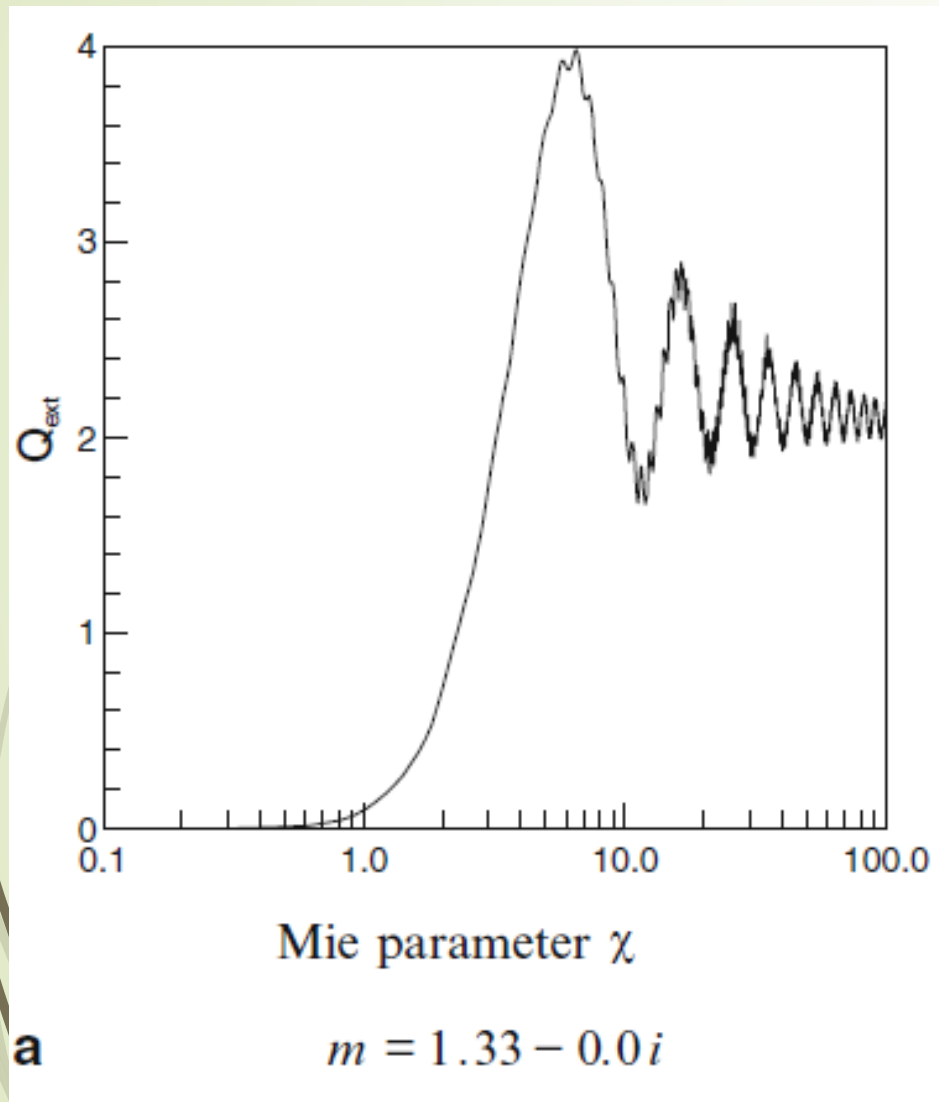


# Teoria Mie

- ▶ Desenvolvida por Gustav Mie em 1908, emprega as equações de Maxwell para obter parâmetros físicos das partículas e preenche a lacuna descritiva entre os regimes de espalhamento Rayleigh e geométrico;
- ▶ Descreve o espalhamento de partículas **esféricas** ;
- ▶ De acordo com a teoria Mie, propriedades óticas dependem **exclusivamente** do parâmetro de tamanho  $\alpha$ . Obs.: esse parâmetro é comumente chamado de  $\chi$ .

$$\alpha = \frac{2\pi r}{\lambda}$$

## Caso sem absorção (água)



Comprimento de onda constante (500 nm);

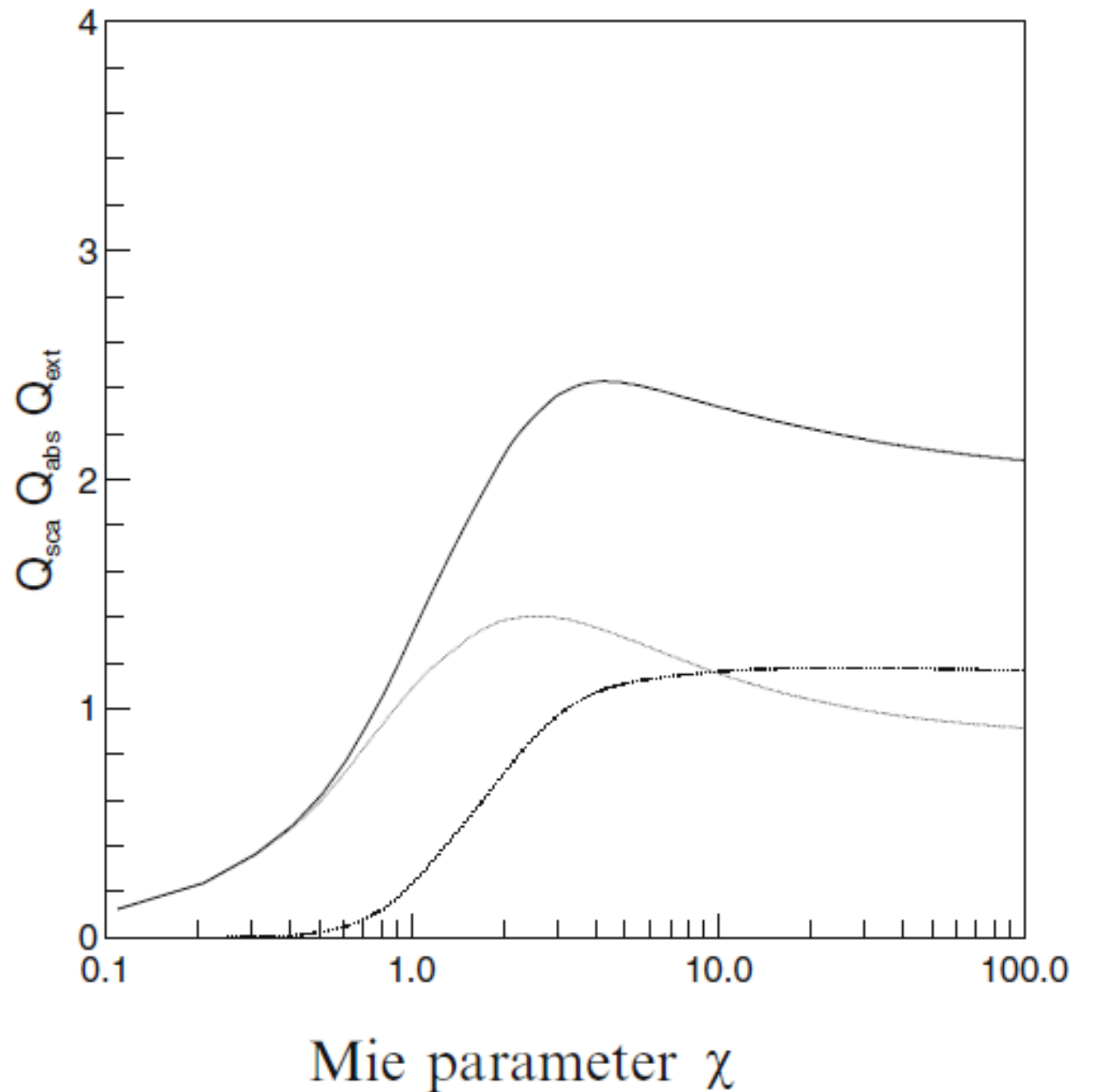
Raio da partícula constante (2  $\mu\text{m}$ );



## Caso com forte absorção

Coeficiente de extinção: linha sólida;  
coeficiente de espalhamento e absorção: linhas pontilhadas;

Fator de absorção domina para coeficientes Mie menores enquanto que fatores de espalhamento dominam para coeficientes maiores;



$$m = 1.33 - 0.5i$$

► Parâmetros relevantes calculados com a teoria Mie:

$$\alpha_v^{\text{sca}} = s^{\text{sca}} v$$

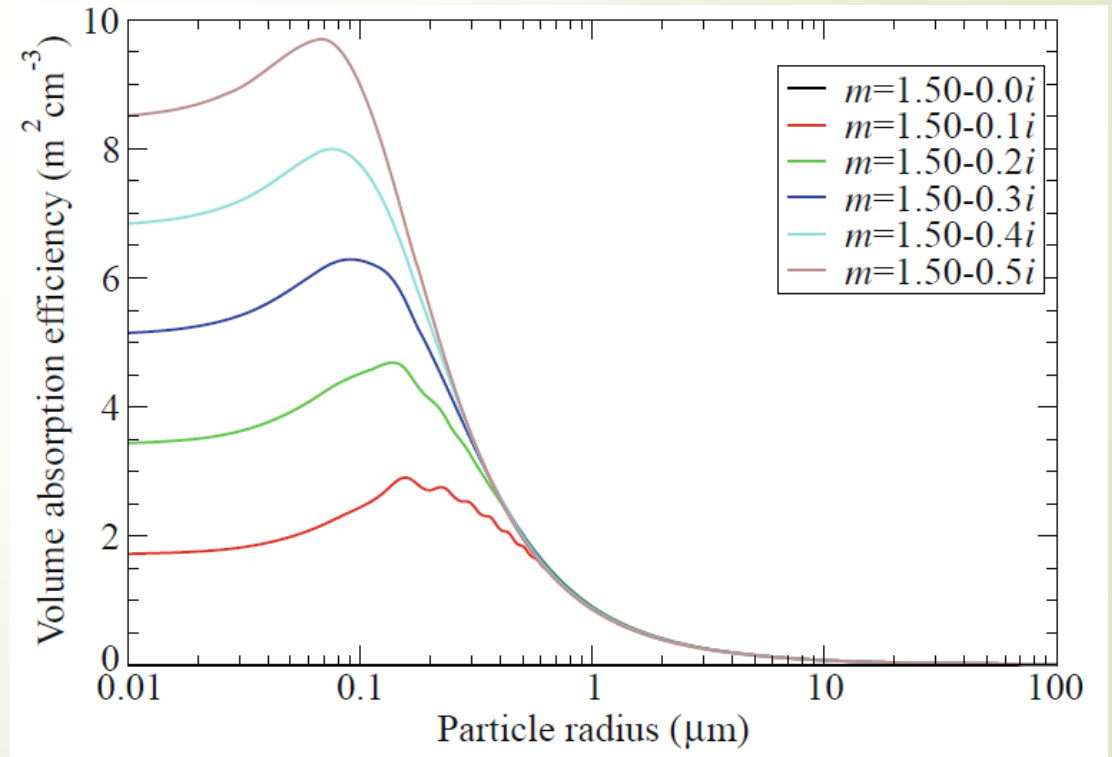
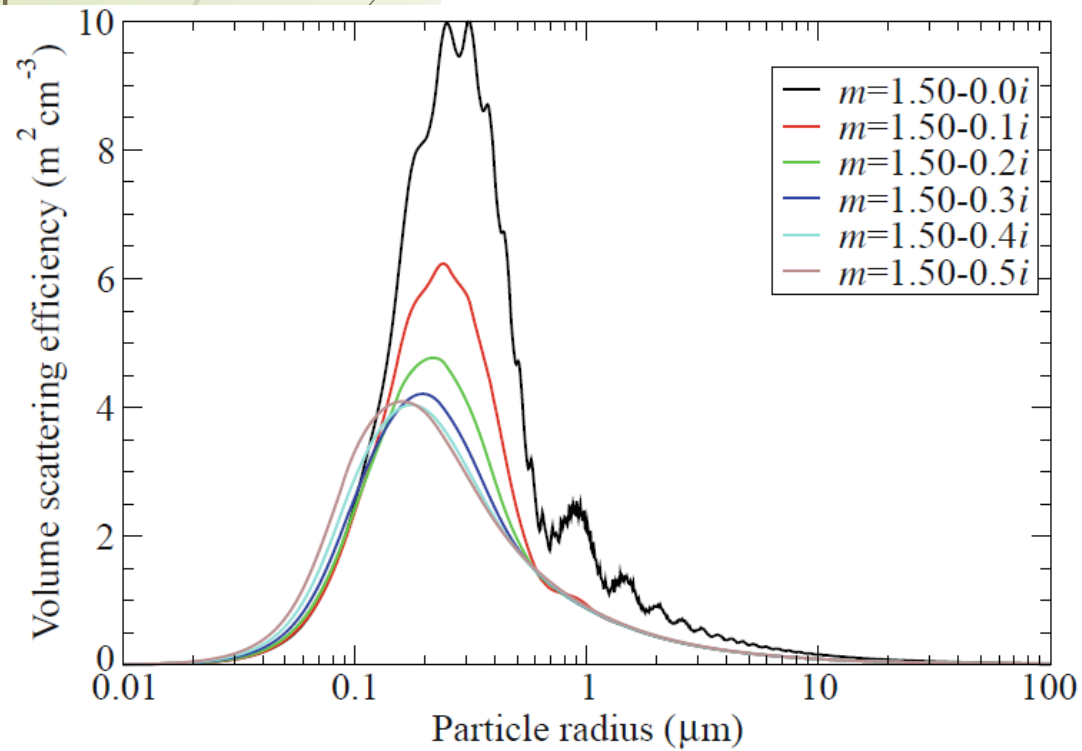
$$\alpha_v^{\text{abs}} = s^{\text{abs}} v$$

$$\alpha_m^{\text{sca}} = s^{\text{sca}} m = \alpha_v^{\text{sca}} \rho$$

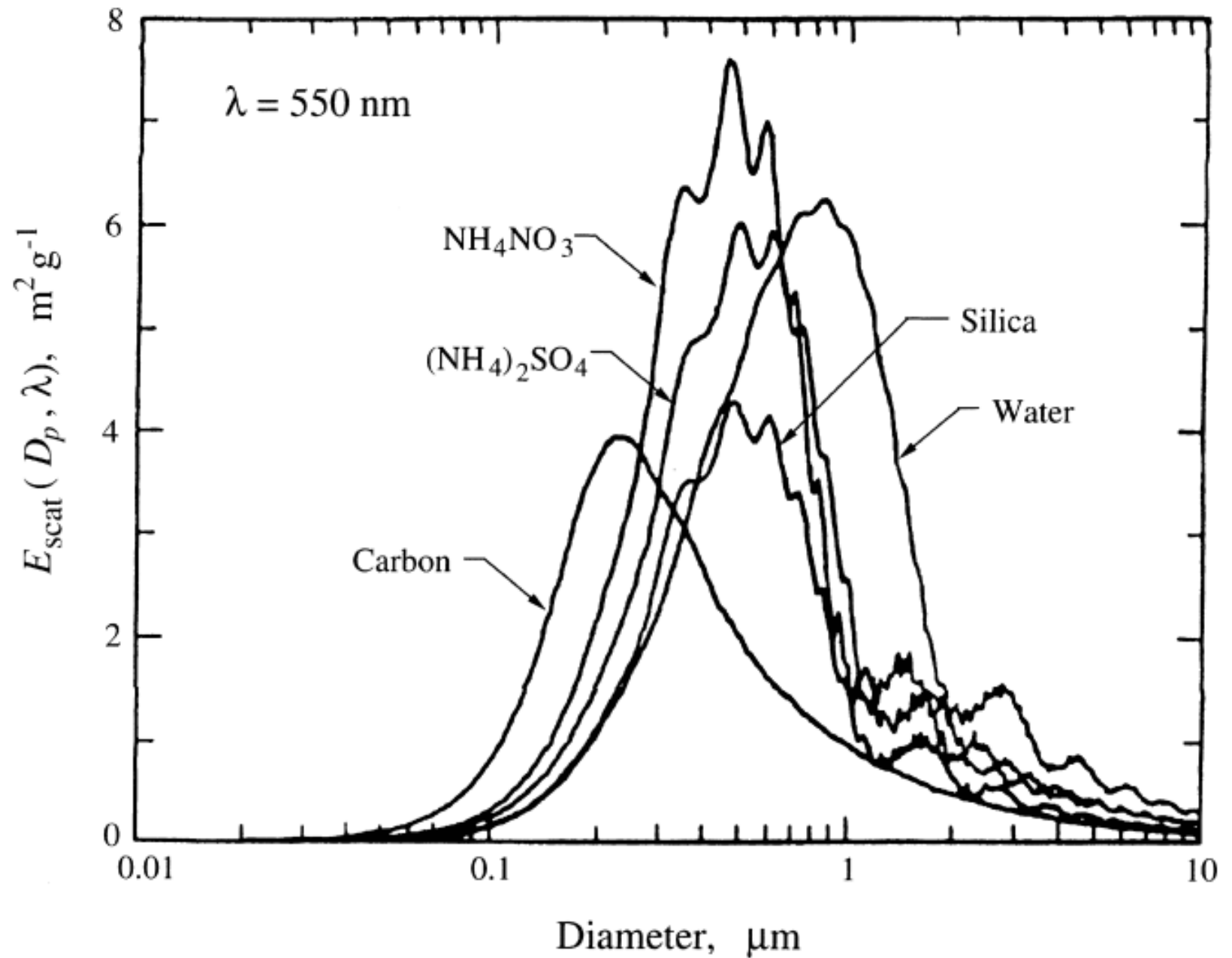
$$\alpha_m^{\text{abs}} = s^{\text{abs}} m = \alpha_v^{\text{abs}} \rho$$

**Eficiência de absorção e espalhamento em termos da massa e do volume.**

$s^{\text{sca}}$  e  $s^{\text{abs}}$  são justamente os coeficientes  $C_{\text{esp}}$  e  $C_{\text{abs}}$ ;



# Eficiência de espalhamento em termos da massa



► Mais parâmetros relevantes:

Para uma população de aerossóis:

$$\alpha_m^{\text{sca}} = \frac{\int_0^\infty \pi r^2 Q^{\text{sca}}(r) n(r) dr}{\int_0^\infty \frac{4}{3} \pi r^3 \rho n(r) dr}$$

Distribuição usualmente log-normal

$$\alpha_m^{\text{abs}} = \frac{\int_0^\infty \pi r^2 Q^{\text{abs}}(r) n(r) dr}{\int_0^\infty \frac{4}{3} \pi r^3 \rho n(r) dr}$$

$$\sigma^{\text{sca}} = \int_0^\infty \pi r^2 Q^{\text{sca}}(r) n(r) dr$$

$$\sigma^{\text{abs}} = \int_0^\infty \pi r^2 Q^{\text{abs}}(r) n(r) dr$$

**Sem normalização:** coeficientes de espalhamento e absorção ( $\text{m}^{-1}$ );

Coeficiente de extinção:

$$\sigma^{\text{ext}} = \sigma^{\text{sca}} + \sigma^{\text{abs}}$$

$$b_{\text{ext}}(\lambda) = \int_0^{D_p^{\text{max}}} \frac{\pi D_p^2}{4} Q_{\text{ext}}(m, \alpha) n(D_p) dD_p$$

Estes coeficientes medem propriedades locais da atmosfera.

- Profundidade ótica do aerossol (do inglês, *aerosol optical depth*, AOD):

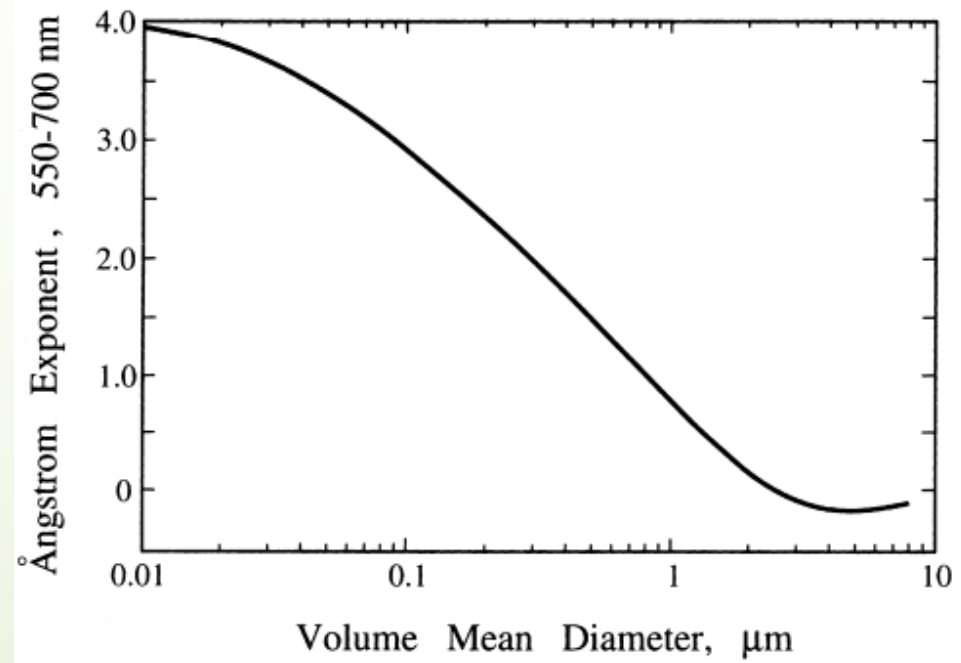
$$\tau = \int_{\text{surface}}^{\text{top of atmosphere}} \sigma^{\text{ext}}(z) dz$$

- Coeficiente de Angström: mede a dependência espectral do AOD e **evidencia** o “tamanho” do espalhamento.

$$\dot{a} = - \frac{d \log b_{\text{ext}}}{d \log \lambda}$$

$$\approx - \frac{\log(b_{\text{ext}1} / b_{\text{ext}2})}{\log(\lambda_1 / \lambda_2)}$$

Espalhamentos moleculares: ~4;  
 Moda de acumulação: ~2;



## Size Distributions (Lognormal) of Different Classes of Atmospheric Aerosol

Aerosol type	Nuclei mode			Accumulation mode			Coarse-particle mode		
	$D_{pg}$ ( $\mu\text{m}$ )	$\sigma_g$	$V$ ( $\mu\text{m}^3$ $\text{cm}^{-3}$ )	$D_{pg}$ ( $\mu\text{m}$ )	$\sigma_g$	$V$ ( $\mu\text{m}^3$ $\text{cm}^{-3}$ )	$D_{pg}$ ( $\mu\text{m}$ )	$\sigma_g$	$V$ ( $\mu\text{m}^3$ $\text{cm}^{-3}$ )
Marine background	0.019	1.6 <sup>a</sup>	0.0005	0.3	2.0	0.10	12.0	2.7	12.0
Clean continental background	0.03	1.6	0.006	0.35	2.1	1.5	6.2	2.2	5.0
Average background	0.034	1.7	0.037	0.32	2.0	4.45	6.04	2.16	25.9
Background and aged urban plume	0.028	1.6	0.029	0.36	1.84	44.0	4.51	2.12	27.4
Background and local sources	0.021	1.7	0.62	0.25	2.11	3.02	5.6	2.09	39.1
Urban average	0.038	1.8	0.63	0.32	2.16	38.4	5.7	2.21	30.8
Urban and freeway	0.032	1.74	9.2	0.25	1.98	37.5	6.0	2.13	42.7
Labadie plume (1976) <sup>b</sup>	0.015	1.5	0.1	0.18	1.96	12.0	5.5	2.5	24.0

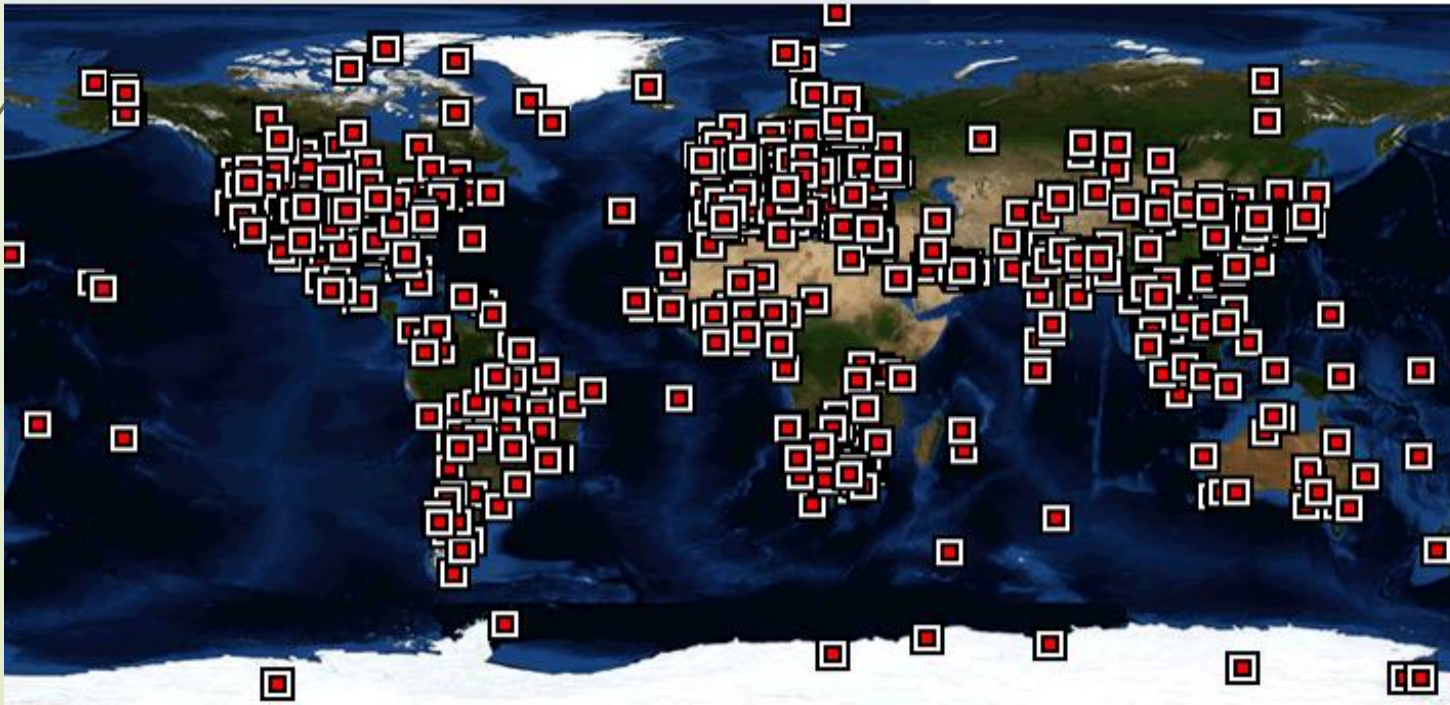
<sup>a</sup>Assumed.

<sup>b</sup>Typical distribution observed in the plume from the Labadie coal-fired power plant near St. Louis, Missouri.

# Rede AERONET



The screenshot shows the top section of the NASA AERONET website. It features the NASA logo and 'GODDARD SPACE FLIGHT CENTER' on the left, and a '+ Visit NASA.gov' link on the right. Below this is a banner image of an AERONET sun photometer with the text 'AERONET AEROSOL ROBOTIC NETWORK'. At the bottom of the banner is a navigation menu with five items: '+ AEROSOL OPTICAL DEPTH', '+ AEROSOL INVERSIONS', '+ SOLAR FLUX', '+ OCEAN COLOR', and '+ MARITIME AEROSOL'. Below the menu is the text 'Web Site Feature' and 'AERONET Data Synergy Tool - Access Earth Science data sets for AERONET sites'.



## AEROSOL OPTICAL DEPTH (V3)

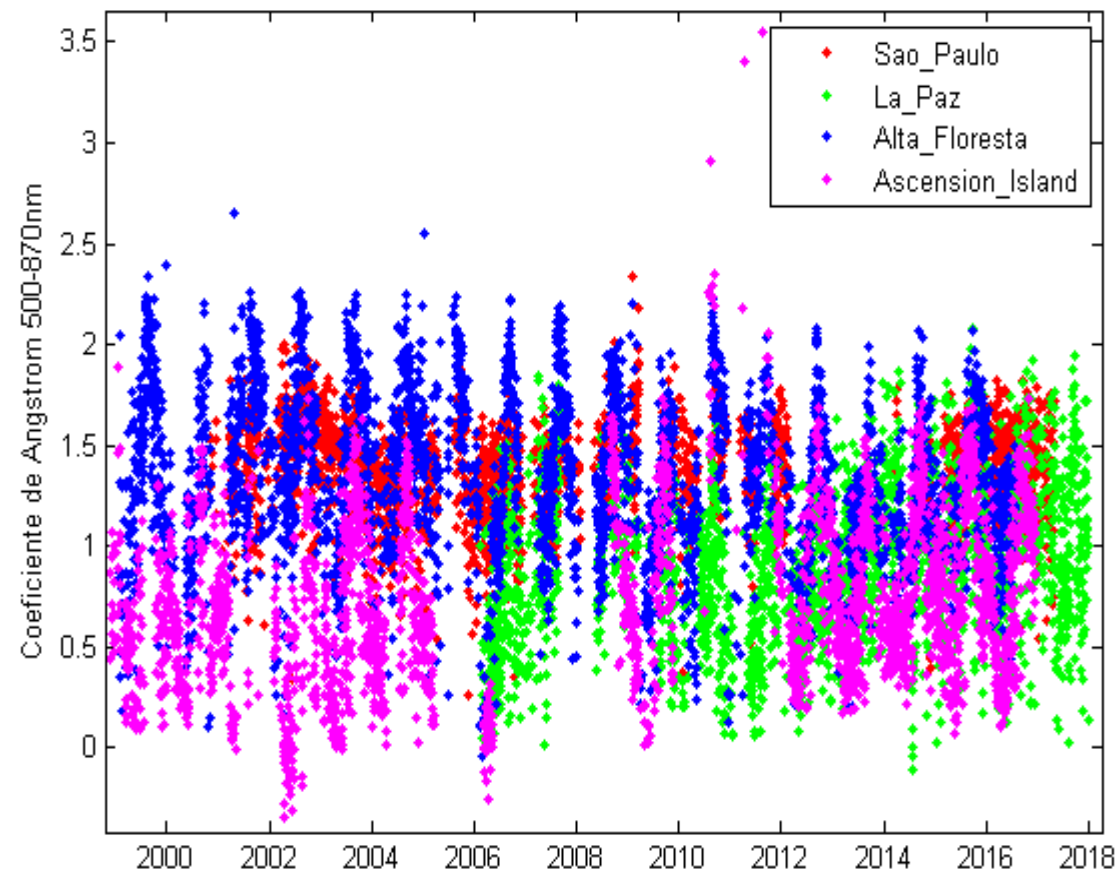
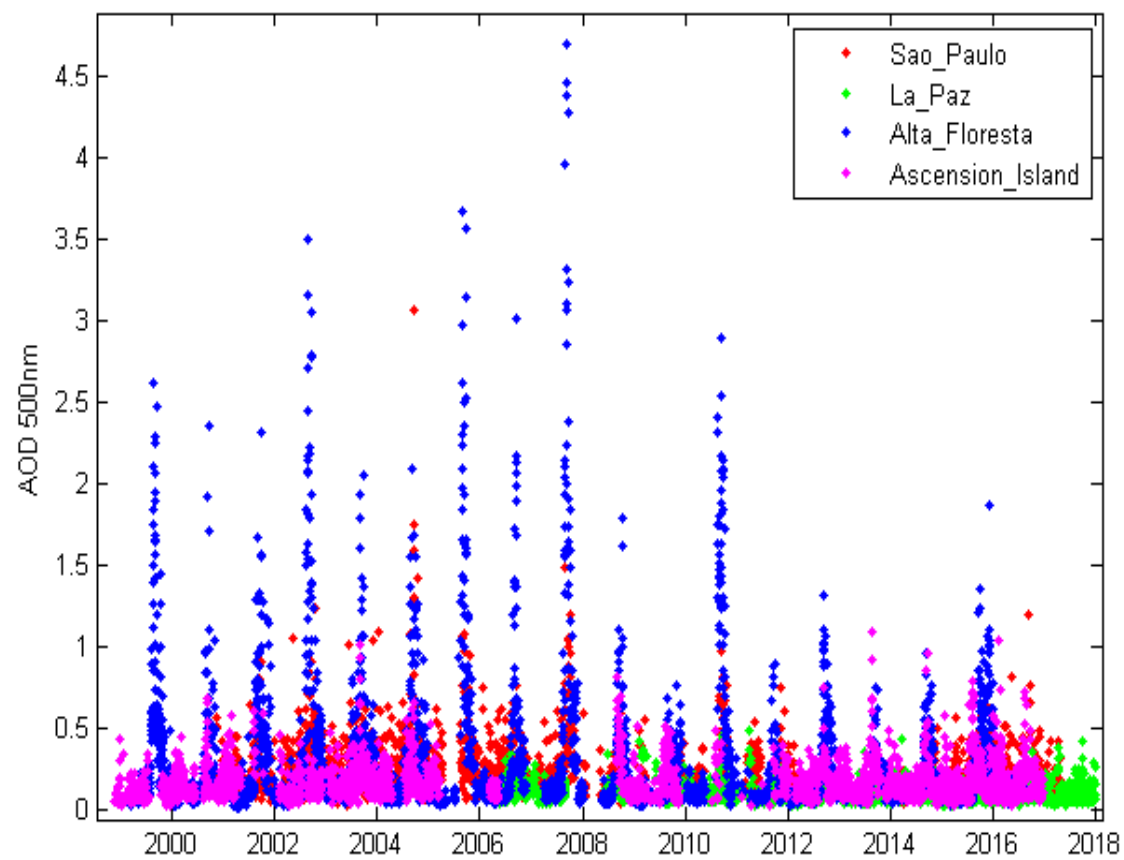
- + Data Display
- + Download Tool
- + Download All Sites
- + Climatology Tables
- + Web Service

## AEROSOL INVERSIONS (V3)

- + Data Display
- + Download Tool
- + Web Service

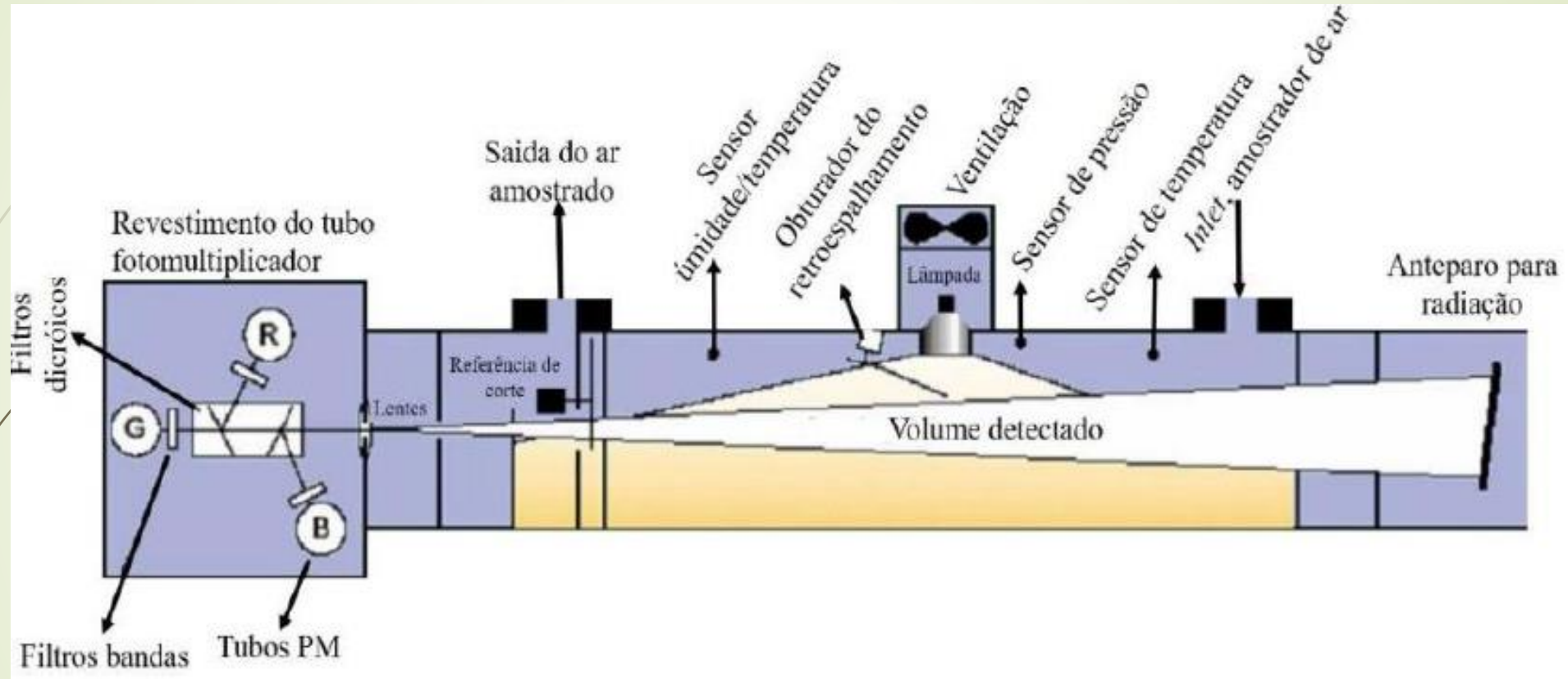
## AEROSOL OPTICAL DEPTH (V2)

- + Data Display
- + Download Tool
- + Download All Sites
- + Climatology Tables
- + Climatology Maps
- + Data Availability (L2.0)



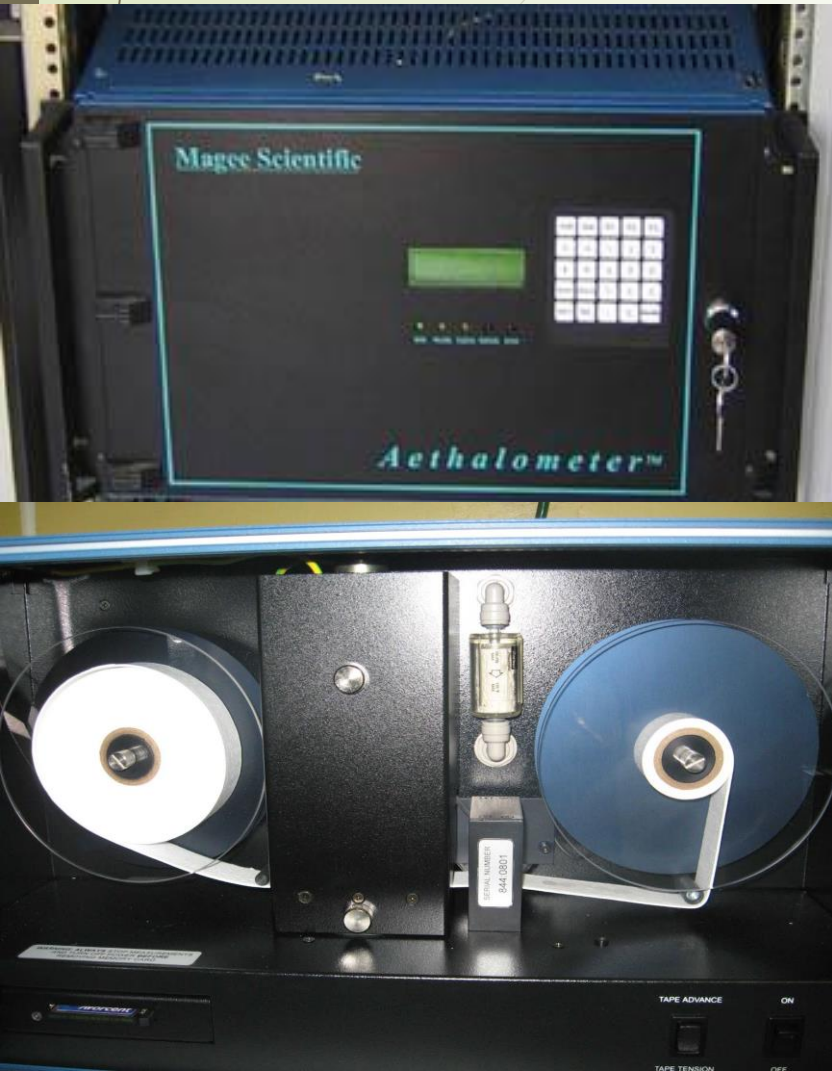


# Nefelômetro



- Obtém o coeficiente de espalhamento da radiação por aerossóis em diversos comprimentos de onda: 450, 525 e 635 nm, no caso do modelo TSI 3563;
- Instrumento obtém também o retroespalhamento (backscattering);
- Dados permitem obter o coeficiente de Angström;

# Aetalômetro e MAAAP

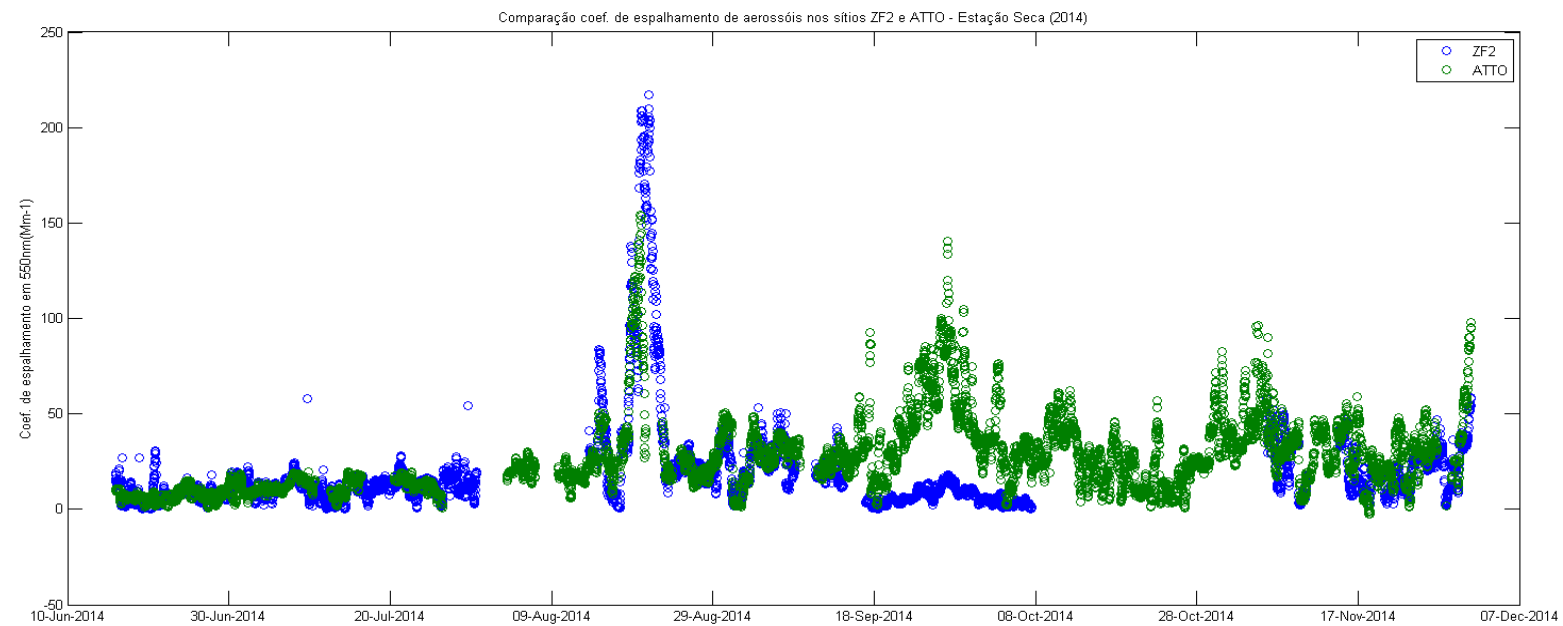
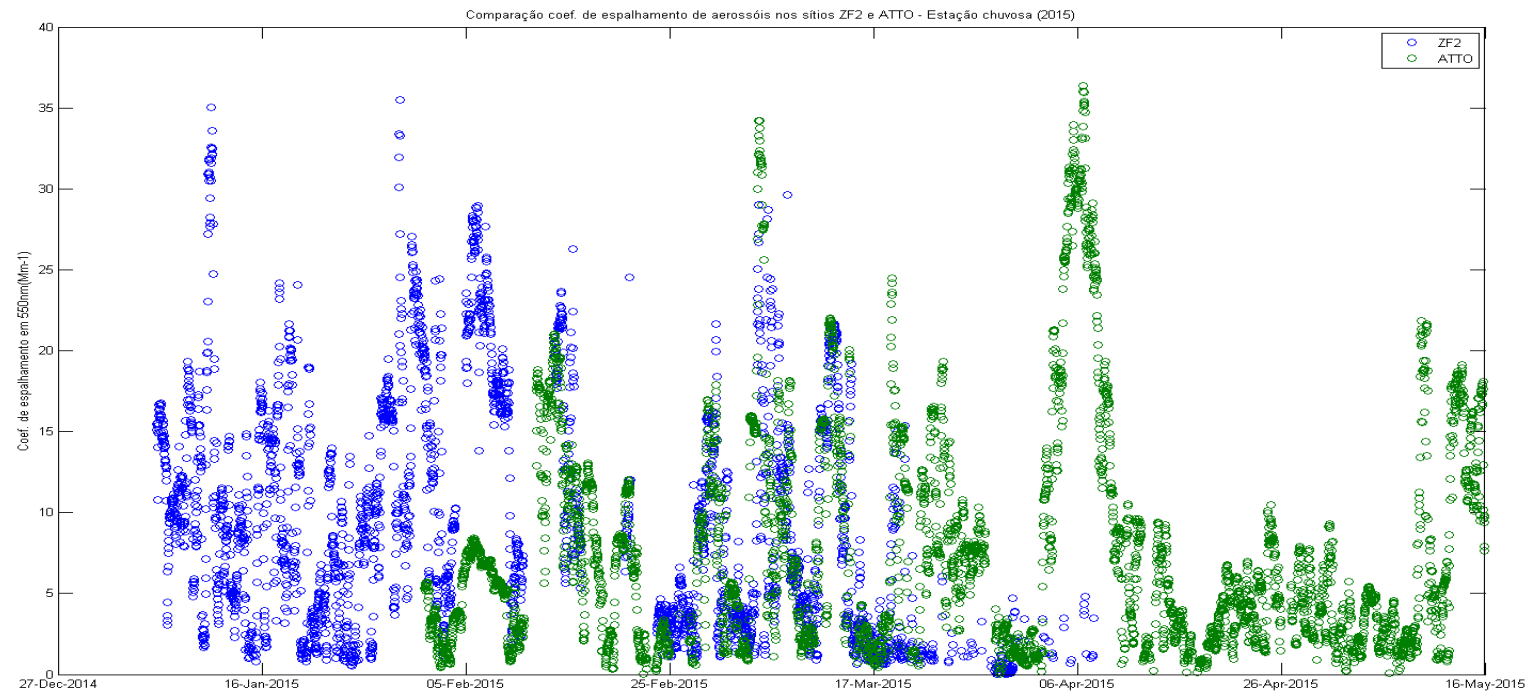


Instrumentos medem a concentração de partículas absorvedoras na atmosfera, com especial atenção ao *Black Carbon*. MAAAP mede apenas em 637 nm e Aetalômetro em 470, 520, 590 e 660 nm .

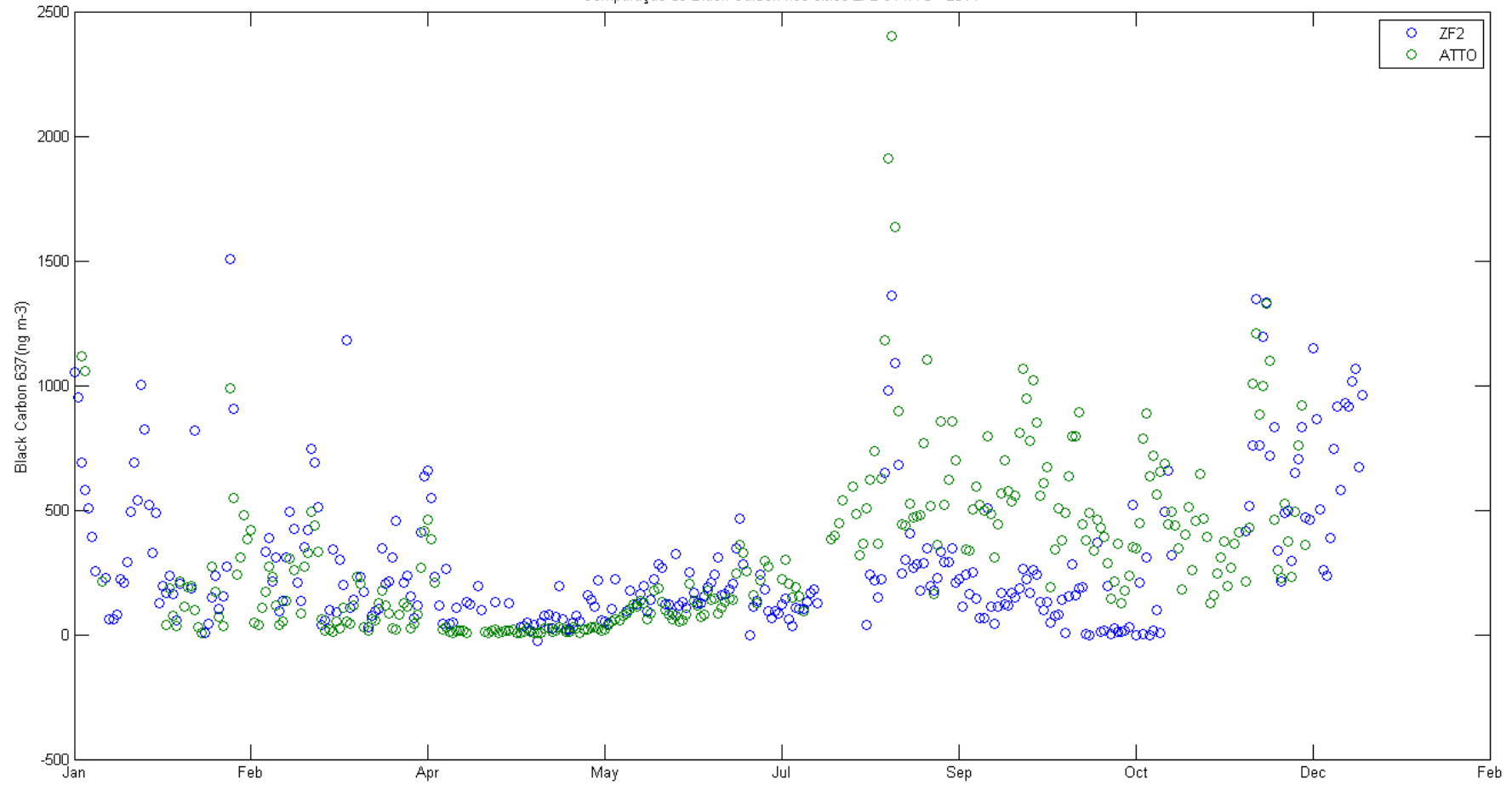
Princípio de funcionamento baseado na lei de Beer: atenuação da radiação ao atravessar um meio.

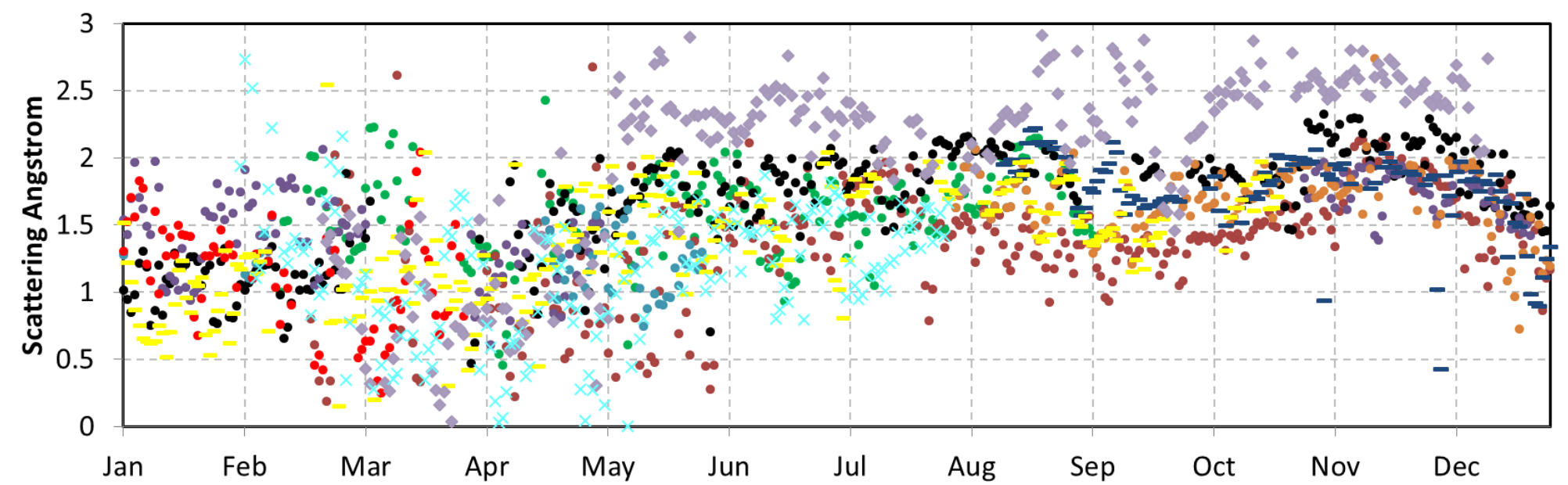
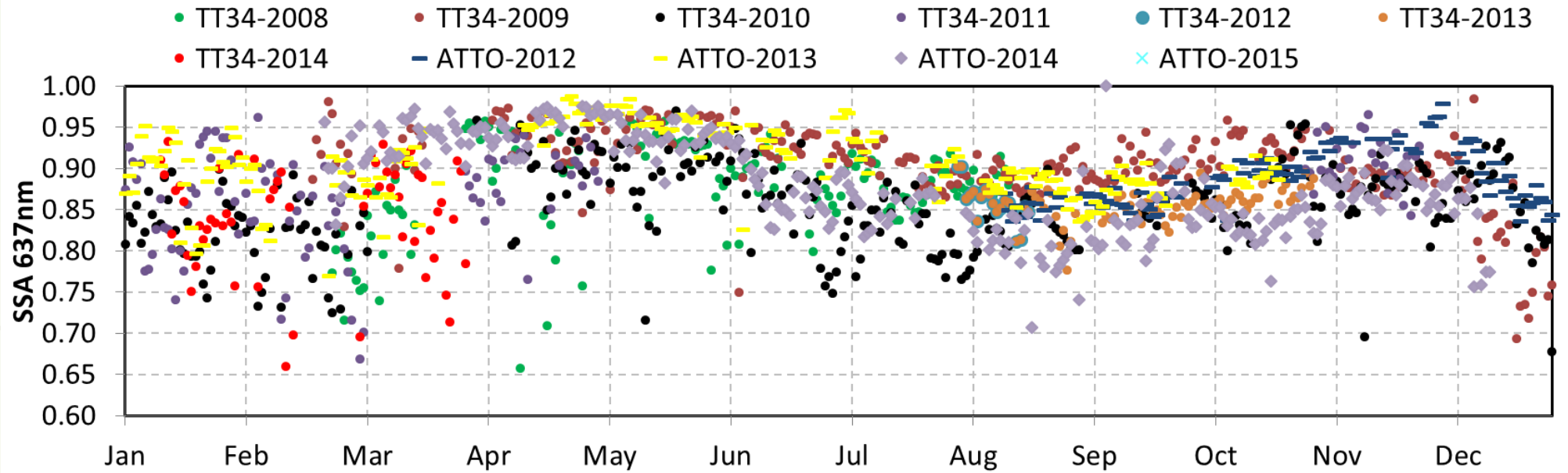
$$BC(\text{ngm}^3) = \frac{A \cdot \Delta ATN}{\alpha_{ATN} \cdot Q \cdot \Delta t'}$$





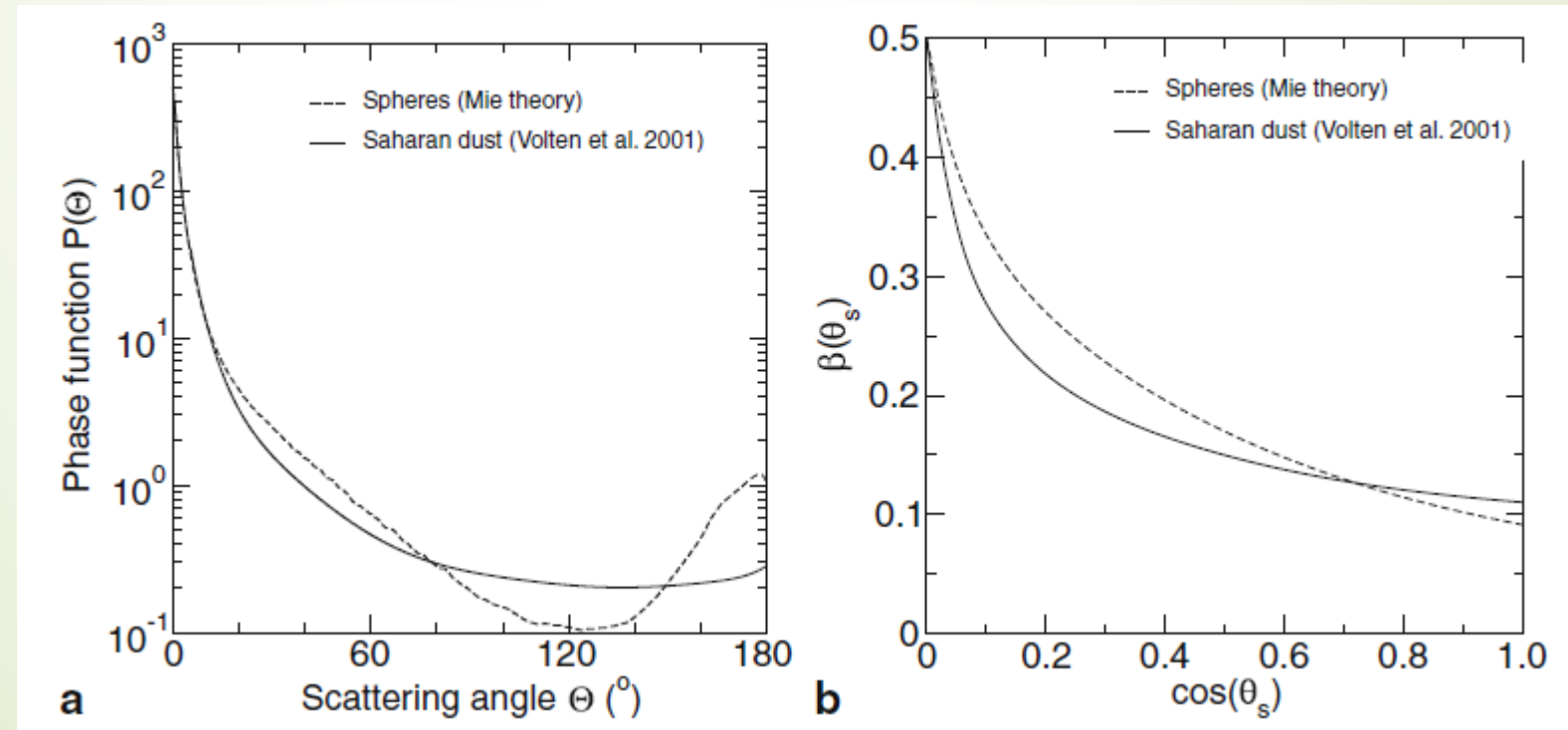
Comparação de Black Carbon nos sites ZF2 e ATTO - 2014





# Aerossóis não-esféricos

- Teoria Mie **NÃO** se aplica a partículas não-esféricas;
- A função de fase não apresenta um pico em  $180^\circ$  nem um mínimo pronunciado em torno de  $120^\circ$ ;
- Aplicação de modelos híbridos entre teoria Mie e diversas parametrizações;



# Visibilidade atmosférica

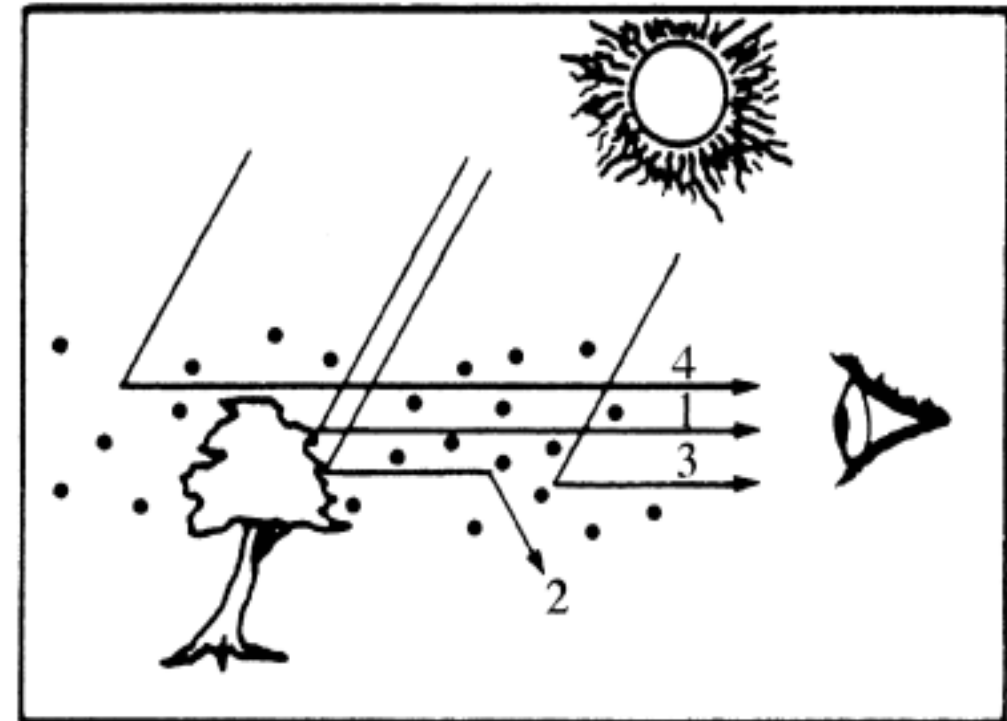
- Distância em que um objeto preto pode ser discernido em um fundo branco;
- Contribuições para visibilidade atmosférica: (1) luz residual de uma fonte próxima ao observador; (2) luz espalhada pela fonte para fora da linha de visão do observador; (3) luz espalhada por partículas na linha de visão do observador; (4) luz difusa proveniente de partículas localizadas no horizonte;



Pequim - China

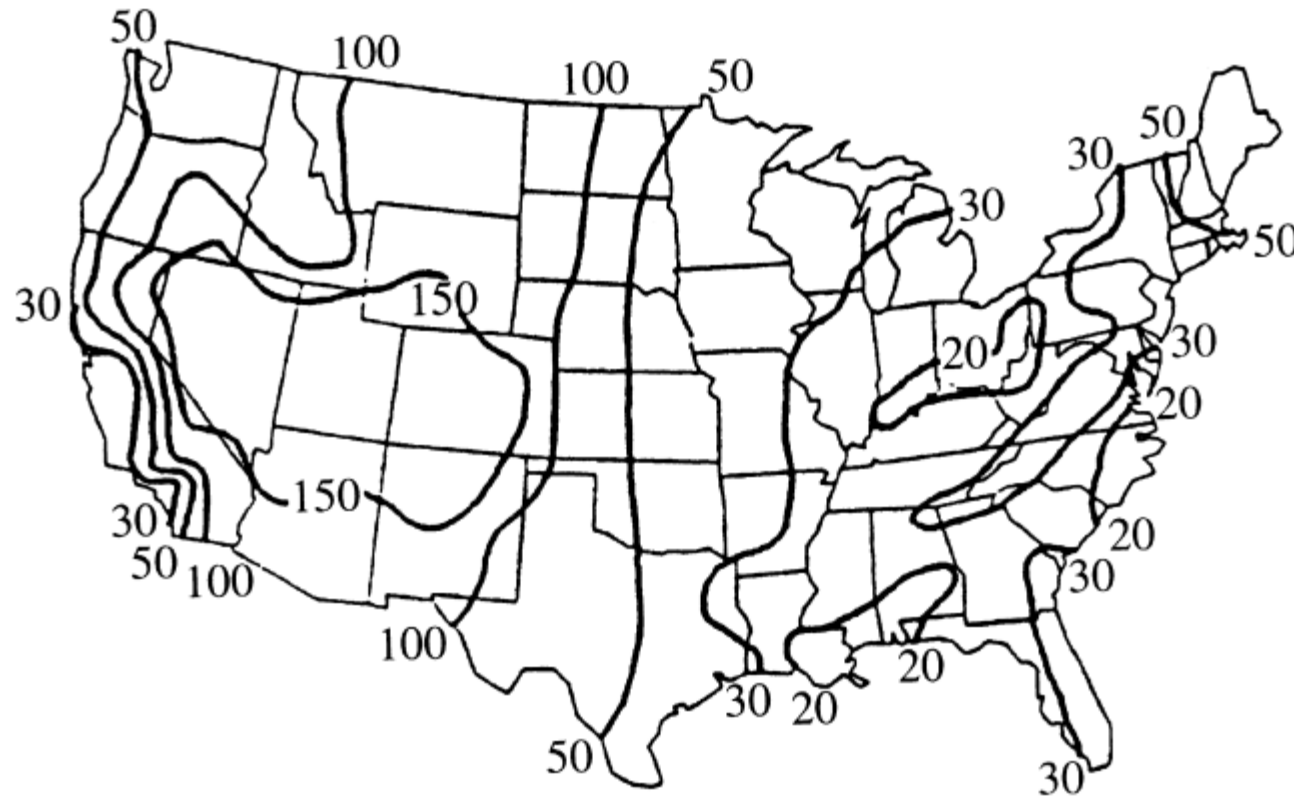
$$\chi = \frac{3.912}{\sigma_{ext}}$$

**Equação de Koschmieder**



- Visibilidade aumenta com a altitude e diminui com a concentração de aerossóis;

<u>Altitude above sea level (km)</u>	<u><math>b_{sg} \times 10^6 \text{ (m}^{-1}\text{)}</math></u>
0	13.2
1.0	11.4
2.0	10.6
3.0	9.7



**Distância média de visão (Km) nos EUA em 1994**





Obrigado!



# Bibliografia



- ▶ Seinfeld, John H., and Spyros N. Pandis. "Atmospheric chemistry and physics. Hoboken." (2006).
- ▶ Boucher, Olivier. "Atmospheric Aerosols: Properties and Climate Impacts." (2017)