Aula 8

Atenuação

Capítulo 6 - Battan

Atenuação

Quando derivamos a equação do radar, nós assumimos que a distância entre o volume iluminado e o alvo estava preenchida por um meio não atenuante. Em outras palavras, não tínhamos perda de potência devido à absorção (atenuação) do meio. Na realidade, este efeito não é valido já que o caminho da propagação esta preenchido por gases (moléculas de ar), partículas de nuvem e precipitação. Adicionalmente, temos que dependendo do comprimento de onda e da concentração das moléculas, partículas de nuvem e de precipitação, a atenuação pode ser extremamente significativa.

A perda de potência pode ser tanto da energia transmitida que sai de um alvo, da energia retro-espalhada pelo alvo, ou por ambos:

Perda de Potência → Espalhamento (por partículas ao longo do caminho)

Perda de Potência → Absorção

Em geral a atenuação pode ser expressa como:

$$dP_r = -2\, k_L\, P_r\, dr$$

onde $\mathbf{P_r}$ é a potência de retorno (assumindo que representa a potência média recebida em dB), $\mathbf{dP_r}$ é a redução da potência de retorno associada com a absorção e espalhamento do meio, r é a distância, e $\mathbf{k_L}$ é o coeficiente de atenuação em unidade de m^{-1}. O fator 2 se deve ao caminho de ida e de volta da energia.

Portanto, se integramos (1), temos

$$P_r = P_{r0} e^{-2\int k_L dr} \qquad \textbf{(2)}$$

onde $\mathbf{P_{r0}}$ é a potência de retorno não atenuada

A equação (2) pode ser re-escrita da seguinte forma,

$$\ln\left[\frac{P_r}{P_{r0}}\right] = -2\int k_L\,dr \qquad \textbf{(3)}$$

onde os limites da integral variam de 0 até a distância **r**. .

Definindo κ como o coeficiente de atenuação expresso em unidade de dB/comprimento, onde $\kappa = 10\log_{10}(e)\,k_L$

Lembrando que $10 \log a^b = b\, 10 \log a$. e **$10 \log (e) = 4{,}343$**

$$\underbrace{10\log\left[\frac{P_r}{P_{r0}}\right]}_{dB} = -2\int k\,dr \qquad \textbf{(3´)}$$

Em geral, a atenuação pode ser causada por gases, partículas de nuvem e de precipitação, logo temos,

$$10\log\left[\frac{P_r}{P_{r0}}\right] = -2\int_0^r \left[k_g + k_c + k_p\right] dr \qquad \textbf{(4)}$$

onde,

κ_g é o coeficiente de atenuação por gases (dB/km)

κ_c pelas partículas de nuvem (dB/km)

κ_p pela partículas de precipitação (dB/km).

Atenuação dos gases

Em comprimentos de onda utilizados por radares meteorológicos, a atenuação por gases está associada somente à absorção.

Sendo que o espalhamento molecular é desprezível nestes comprimentos de onda.

Para várias moléculas tais como o vapor d´água e oxigênio, os estados vibracional e rotacional são excitados por radiações em microondas. A medida que a molécula relaxa até atingir o estado base, a energia absorvida é irradiada pela molécula ou retirada como um aumento da energia interna das moléculas

Atenuação dos gases

Battan (1973)

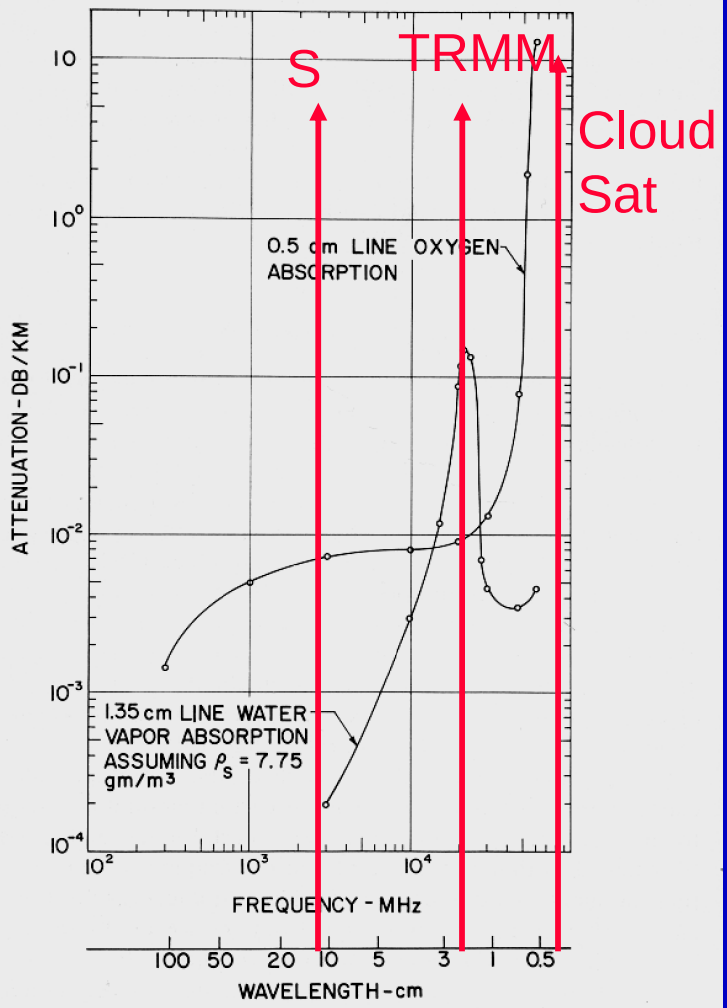


Fig. 6.1. Atmospheric absorption by the 1.35-cm line of water vapor for a mean absolute humidity of 7.75 g/m³ and by the 0.5-cm line of oxygen at a temperature of 20°C and a pressure of one atmosphere. After Bean and Dutton (1968).

Atenuação pela absorção de gases pode ser substancial para comprimentos de onda próximos de 1cm ao longo de caminhos extensos próximo a superfície da Terra.

Obviamente, nós esperamos uma dependência da pressão atmosférica na absorção dos gases, uma vez que a concentração molecular diminui exponencialmente com a altura.

O gráfico ao lado ilustra a atenuação dos gases em unidades de dB/km para o Oxigênio e o Vapor d´Água.

Podemos notar que esta dependência espectral influencia bastante a escolha dos comprimentos de onda utilizados em meteorologia por radar.

Atenuação por Gases

Doviak and Zrnic (1993)

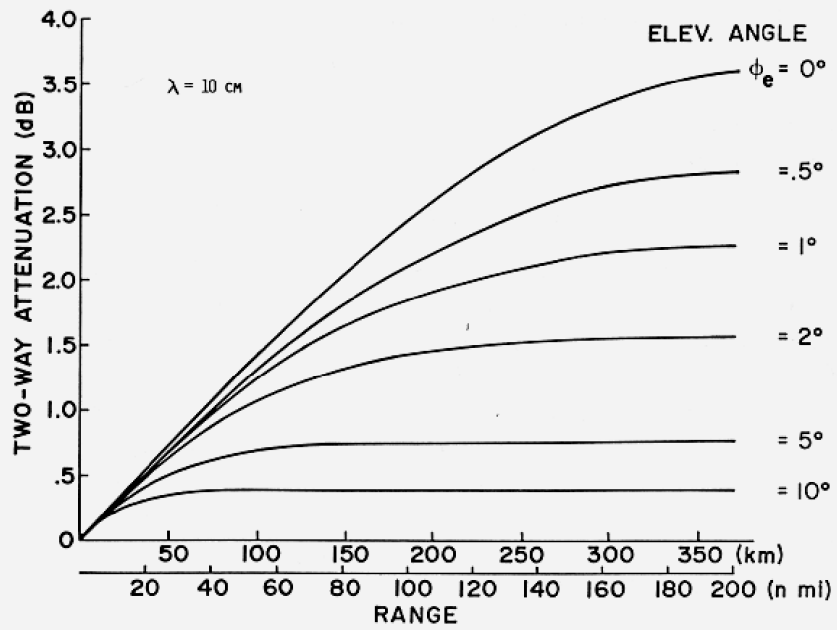


Fig. 3.6 Attenuation (two-way) for propagation through a standard atmosphere ($\lambda = 10$ cm). Central Radio Propagation Laboratory's (CRPL) exponential reference atmosphere (Fig. 2.7) is used to compute ray paths, and the pressure–temperature profile is based on the International Civil Aviation Organization (ICAO) standard atmosphere.

A figura ao lado mostra a atenuação dos gases devido aos 2 caminhos (ida/volta) , assumindo uma atmosfera padrão.

A atenuação depende não somente da extensão do caminho da propagação, mas também da espessura que a tropopausa se estende.

Atenuação por Gases

Doviak and Zrnic (1993)

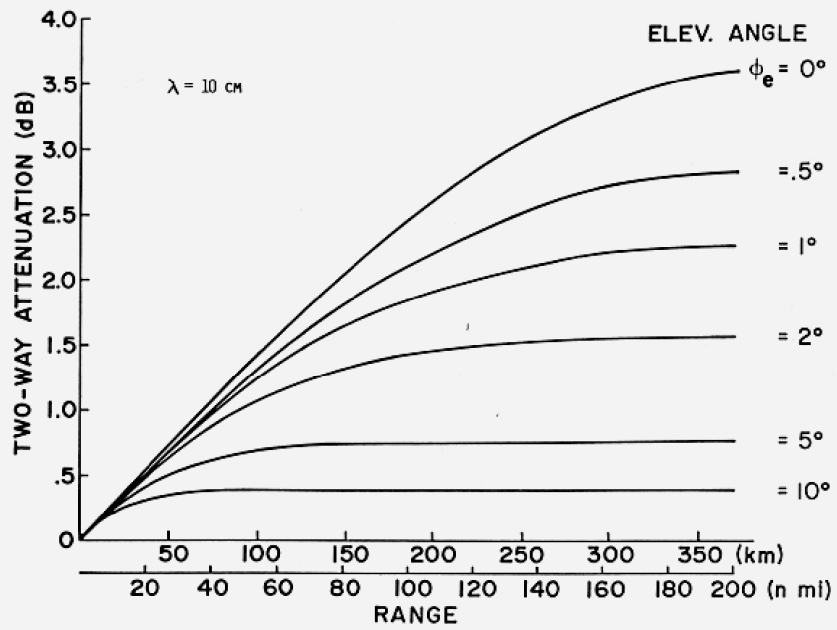


Fig. 3.6 Attenuation (two-way) for propagation through a standard atmosphere ($\lambda = 10$ cm). Central Radio Propagation Laboratory's (CRPL) exponential reference atmosphere (Fig. 2.7) is used to compute ray paths, and the pressure–temperature profile is based on the International Civil Aviation Organization (ICAO) standard atmosphere.

A eq. Abaixo apresenta uma formula empírica que aproxima a atenuação dos 2 caminhos para ângulos de elevação (θ) e distâncias do raio (inclinado) < 200 km.

Sendo que para um caminho de 100 km (ida e volta) $\mathbf{k_g}$ = 1,4 dB

Banda C multiplicar por 1,2

Banda X multiplicar por 1,5

Radar Banda S

$$2k_g = \left[0{,}4 + 3{,}45\exp\left\{-\frac{\theta}{1{,}8}\right\}\right] x \left[1 - \exp\left\{-\frac{r}{27{,}8 + 154\exp\left(-\frac{\theta}{2{,}2}\right)}\right\}\right] [dB]$$

A atenuação por partículas de nuvem e de precipitação

A atenuação por partículas de nuvem e de precipitação pode ser tanto por **absorção** **como por** **espalhamento**. Portanto, a atenuação depende tanto do tamanho, da forma e da composição química.

Considerações gerais

A teoria de espalhamento Mie propõe uma expressão para a seção transversal de retro-espalhamento. Além disso, a teoria Mie também propõe outras seções transversais:

$\mathbf{Q_s}$ = seção transversal de espalhamento; área a qual, quando multiplicada pela energia incidente dá a potência total espalhada pelas partículas;

$\mathbf{Q_a}$ = seção transversal de absorção; área a qual, quando multiplicada pela energia incidente dá a potência total absorvida pelas partículas (as partículas dissipam através do calor interno).

$\mathbf{Q_t}$ = seção transversal de atenuação; área a qual, quando multiplicada pela energia incidente dá a potência total removida da onda incidente pelos processos de absorção e espalhamento.

Logo, $\mathbf{Q_t = Q_s + Q_a}$

Para condições de espalhamento Rayleigh, temos:

$$Q_s = \frac{128}{3}\frac{\pi^5}{\lambda^4} a^6 |K|^2$$

$$Q_a = \frac{8\pi^2}{\lambda} a^3 \operatorname{Im}[-K], onde: \operatorname{Im}(-K) = \operatorname{Im}\left[-\frac{(m^2-1)}{(m^2-2)}\right]$$

$$Q_t = Q_s + Q_a$$

onde ***a*** é o tamanho da partícula, ***K*** o índice de refração.

Estas equações são aplicadas somente para uma partícula. Porém, como um radar ilumina várias partículas em um dado pulso, temos que generalizar estas equações para um pulso volumétrico, que é função da distância e da largura do feixe da antena.

Portanto podemos definir:

$$\sum Q_t = \sum \left(Q_a + Q_s \right) = k_{(c+p)L}$$

onde a somatória leva em conta todo o volume, e ***k*** é definido como o coeficiente de atenuação em unidades de m^{-1}. Dessa maneira, temos que a potência recebida é dada por:

$$P_r = P_{r0} e^{-2\int \sum Q_t dr}$$

onde $\mathbf{Q_t}$ está em cm^2 e o volume em consideração é de 1 m^3,

$$k_{(c+p)L} = \beta \sum_{volume} Q_t = 0{,}4343 \sum_{volume} Q_t$$

Para $\alpha << \lambda$, $\mathbf{Q_s} << \mathbf{Q_a}$, e para

partículas pequenas

$$k_{(c+p)L} = 0{,}4343\left[\frac{8\pi^2}{\lambda}\sum a^3 \operatorname{Im}(-K)\right]$$

partículas grandes, $\alpha \geq \lambda$

$$k_{(c+p)L} = 0{,}4343\sum\left(Q_s + Q_a\right)$$

Atenuação por Partículas de Nuvem

Para partículas de nuvem temos

$$k_{(c+p)L} = 0{,}4343\left[\frac{8\pi^2}{\lambda}\sum a^3 \operatorname{Im}(-K)\right]$$

Usualmente, é mais fácil estimar o conteúdo de água líquida (ou gelo) em uma nuvem do que medir a distribuição de tamanho de gotas (DSD).

Uma vez que o conteúdo de água liquida é: $\mathrm{M} = \frac{4}{3}\pi\rho a^3$, temos que

$$k_{(c+p)L} = 0{,}4343\left[\frac{6\pi}{\rho\lambda}\right]\operatorname{Im}\left|-K\right|M = K_1 M$$

onde M (g/m^3)

Logo para nuvens, temos que:

- A atenuação diminui com o aumento do comprimento de onda;
- Em 5 e 10 cm, a atenuação por nuvens pode ser negligenciada;
- A atenuação aumenta com a diminuição da Temperatura
- A atenuação é bem menor em nuvens de gelo quando comparada com nuvens de água para a mesma quantidade de água líquida.

Atenuação por partículas de nuvem

Attenuation Tables (Battan, 1973)

Attenuation Coefficients for Clouds as a function of temperature and wavelength.

TABLE 6.1 One-Way Attenuation Coefficient, K_1, in Clouds in DB/Km/Gm/M³

	Temperature (°C)	Wavelength (Cm)			
		0.9	1.24	1.8	3.2
Water Cloud	20	0.647	0.311	0.128	0.0483
	10	0.681	0.406	0.179	0.0630
	0	0.99	0.532	0.267	0.0858
	−8	1.25	0.684	0.34 (extrapolated)	0.112 (extrapolated)
Ice Cloud	0	8.74×10^{-3}	6.35×10^{-3}	4.36×10^{-3}	2.46×10^{-3}
	−10	2.91×10^{-3}	2.11×10^{-3}	1.46×10^{-3}	8.19×10^{-4}
	−20	2.0×10^{-3}	1.45×10^{-3}	1.0×10^{-3}	5.63×10^{-4}

SOURCE: Gunn and East 1954.

Atenuação por chuva

A atenuação pode ser significativa para comprimentos de onda menor ou igual a banda C (5 cm) sob condições de chuvas intensas.

Para estes comprimentos de onda, a chuva entra facilmente no regime Mie. Logo, Qt deve levar em consideração a teoria completa de Mie.

Em geral, Qt é proporcional ao raio$^{k>3}$, eliminando assim a relação entre Qt e a razão de mistura de chuva. Na pratica, a atenuação por chuva é dada em termos da taxa de precipitação R (Ai mora o perigo!!!!).

Lembrando que a taxa de precipitação pode ser expressa por

$$R = \frac{4}{3}\pi\rho_L \int_0^\infty N(r) r^3 \left(V_t(r) - W_u\right) dr$$

onde ***r*** é o raio da gota, $V_t(r)$ é a velocidade terminal da gota de raio r, W_u é a velocidade vertical. Dividindo a equação acima pela densidade da água, ρ_L, temos R em espessura/tempo (mm/h).

Ryde (1946) encontrou que:

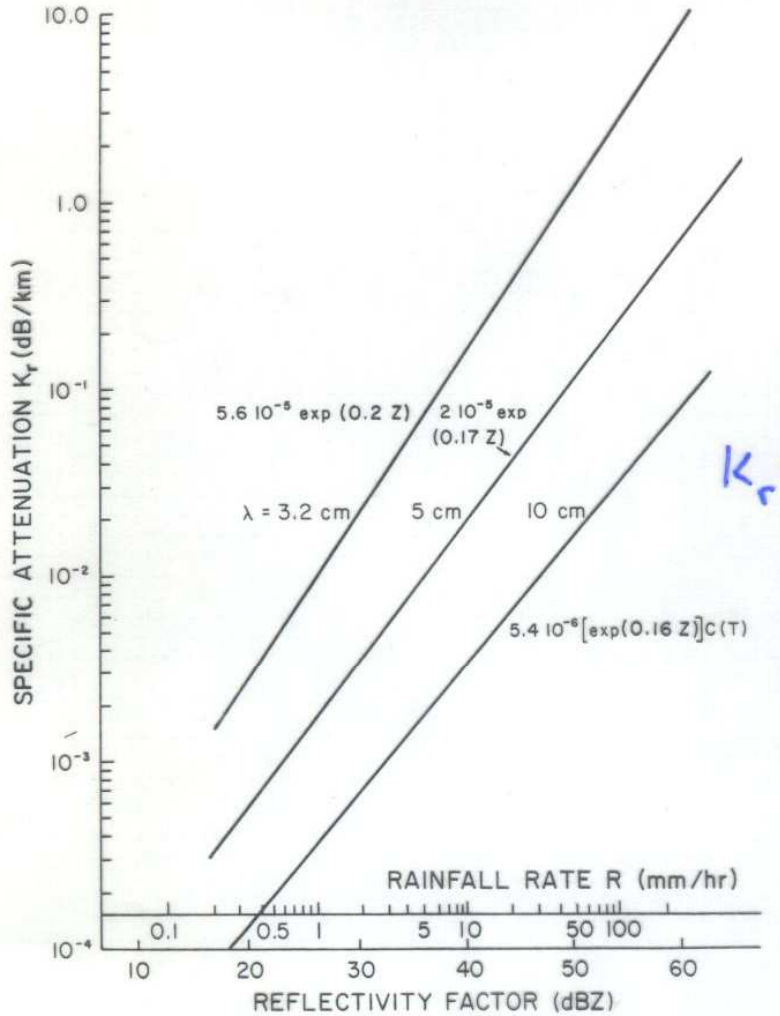
$$K_p(dB/km) = f(R) = K_2 R^{\alpha}$$

onde $\mathbf{K_2}$ e α são funções do comprimento de onda**.**

Como a refletividade por ser escrita como: $Z = aR^b$

Podemos re-escrever a equação da atenuação em função de Z.

$$k_p = cZ^d \quad (Z \text{ in } mm^6/m^3)$$



$$K_r = \int \sigma_e N(D)\,dD$$

$$\sigma_e = \sigma_{scat} + \sigma_{abs}$$

0.97

$$K_r = \begin{cases} 0.000343\,R^{1.05} & \lambda = 1\,D \\ 0.0018\,R & \lambda = 5\,cm \\ 0.01\,R^{1.21} & \lambda = 3.2\,cm \end{cases}$$

$K_r \rightarrow$ dB/km

$R \rightarrow$ mm/h

N(D) follows ....

Fig. 3.5 Specific attenuation versus rainfall rate (T = 18°C). The Laws and Parson (1943) drop size distribution is assumed. The relation between the rainfall rate and drop size distribution is developed in Chapter 8, and the reflectivity factor is defined in Section 4.4.5. Temperature adjustment factor $C(T) = 2\exp(-0.035T)$. $Z = 10\log(400R^{1.4})$. (Z is in units of dBZ.)

$$R = \int m(D)\,N(D)\,dD$$

$$Z = \int N(D)\,D^6\,dD$$

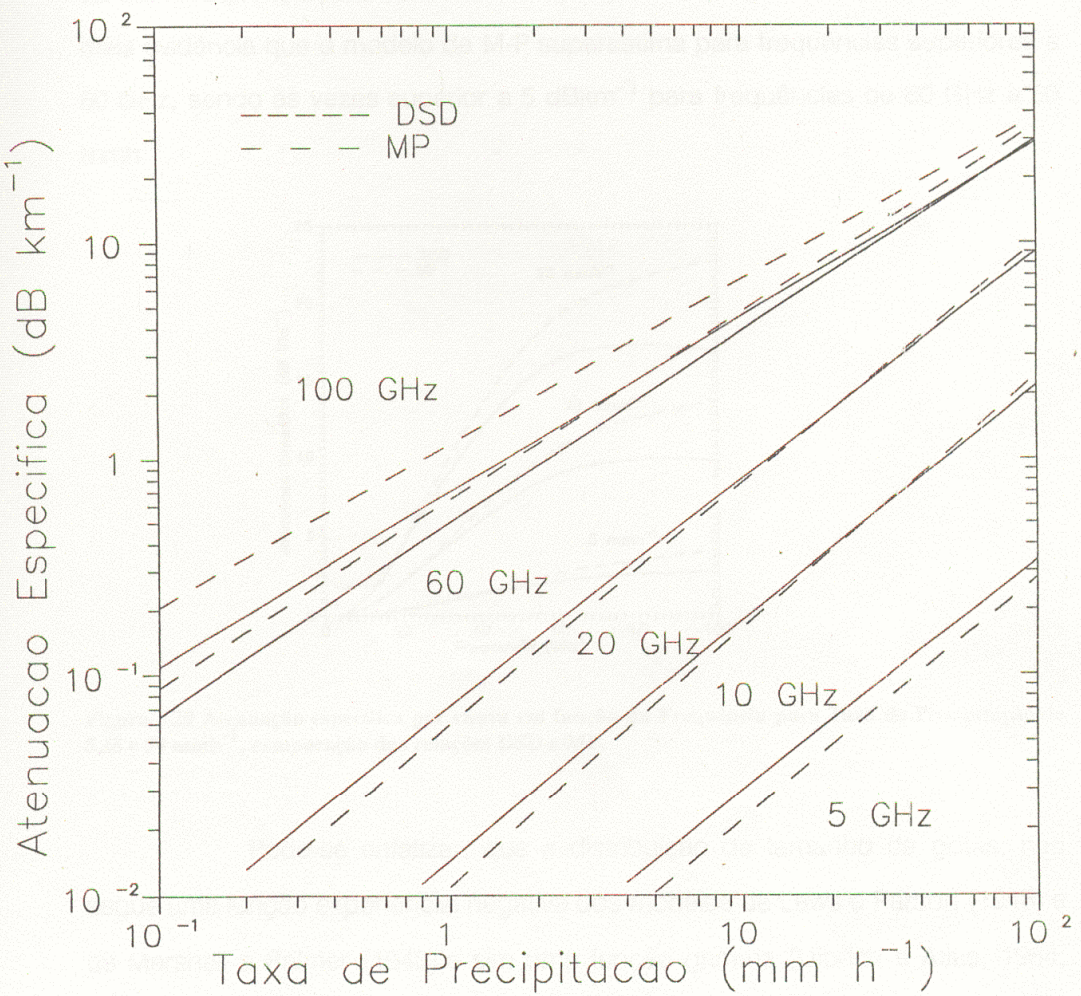


Figura 3.28 Comparação das relações A-R disdrométricas (DSD) e a de Marshall e Palmer (MP).

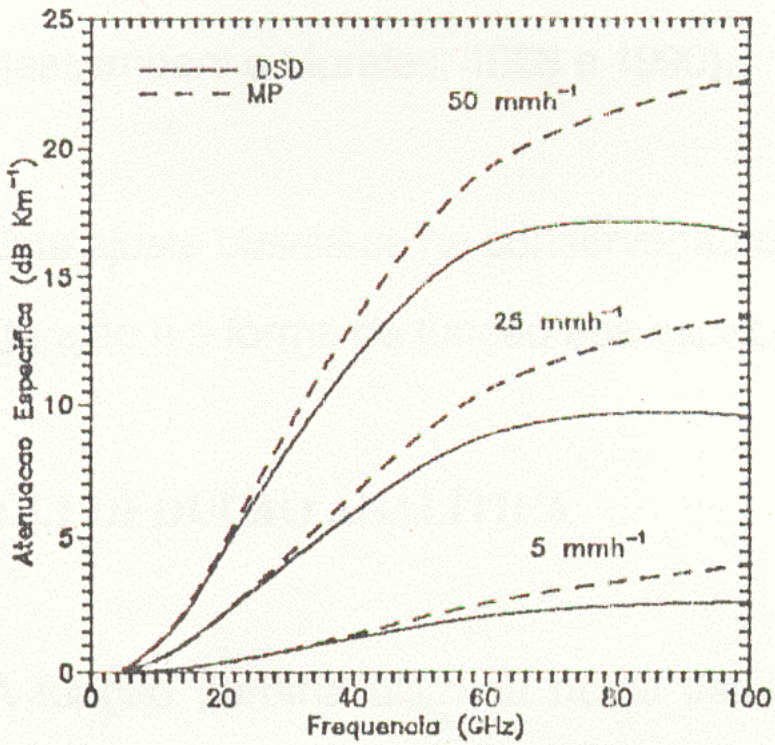


Figura 3.29 Atenuação específica por chuva em função da Frequência para Taxa de Precipitação de 5,25 e 50 mmh^{-1}, comparação das relações DSD e MP.

Attenuation Tables (Battan, 1973)

Attenuation Coefficients for Rain as a function of Z and wavelength.

Some Expressions of Attenuation by Rain Expressed in Terms of Z

Frequency (GHz)	Wavelength (Cm)	k_p (DB/Km)
15.0	2.0	$7.15\times10^{-4}\ Z^{0.725}$*
9.3	3.21	$2.9\times10^{-4}\ Z^{0.72}$†
8.0	3.75	$1.16\times10^{-4}\ Z^{0.806}$*
5.5	5.5	$1.12\times10^{-4}\ Z^{0.62}$†
3.0	10.0	$3.0\times10^{-5}\ Z^{0.62}$†

*From McCormick 1970.

†Based on data in table 6.2 for Modified M-P distribution and T = 0°C.

Attenuation Coefficients for Rain for different wavelengths and DSD's.

TABLE 6.2 One-Way Rain Attenuation K' (DB/Km/Mm/Hr)

Wavelength (Cm)	M-P (at 0°C)	Modified M-P (0°C)	Mueller-Jones (0°C)	Gunn and East (18°C)
0.62 . . .	0.50–0.37	0.52	0.66	. . . . .
0.86 . . .	0.27	0.31	0.39	. . . . .
1.24 . . .	$0.117R^{0.07}$	$0.13R^{0.07}$	0.18	$0.12R^{0.06}$
1.8	. . . . .	. . . . .	. . . . .	$0.045R^{0.11}$
1.87 . . .	$0.0045R^{0.10}$	$0.050R^{0.10}$	0.065	. . . . .
3.21 . . .	$0.011R^{0.15}$	$0.013R^{0.15}$	0.018	$0.0074R^{0.31}$
4.67 . . .	0.005–0.007*	0.0053	0.0058	. . . . .
5.5	0.003–0.004*	0.0031	0.0033	. . . . .
5.7	. . . . .	. . . . .	. . . . .	$0.0022R^{0.17}$
10	0.0009–0.0007*	0.00082	0.00092	0.0003

SOURCE: Wexler and Atlas 1963.

*First value applies at 2 mm/hr, the second at 50 mm/hr, and there is a "smooth transition" between them.

Verifiquemos alguns exemplos:

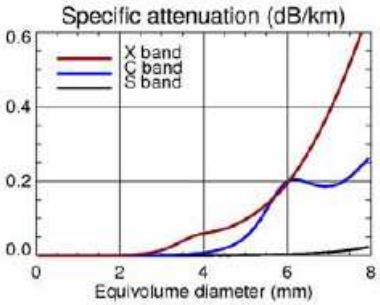
Band S	0,0001 dB/km por mm/h
Banda X	0,018
TRMM (Ku)	0,065
CloudSat (W)	0,37

Lembrando que os radares do TRMM e CloudSat estão olhando para baixo a partir do satélite, e isso ajuda bastante!!!!!!

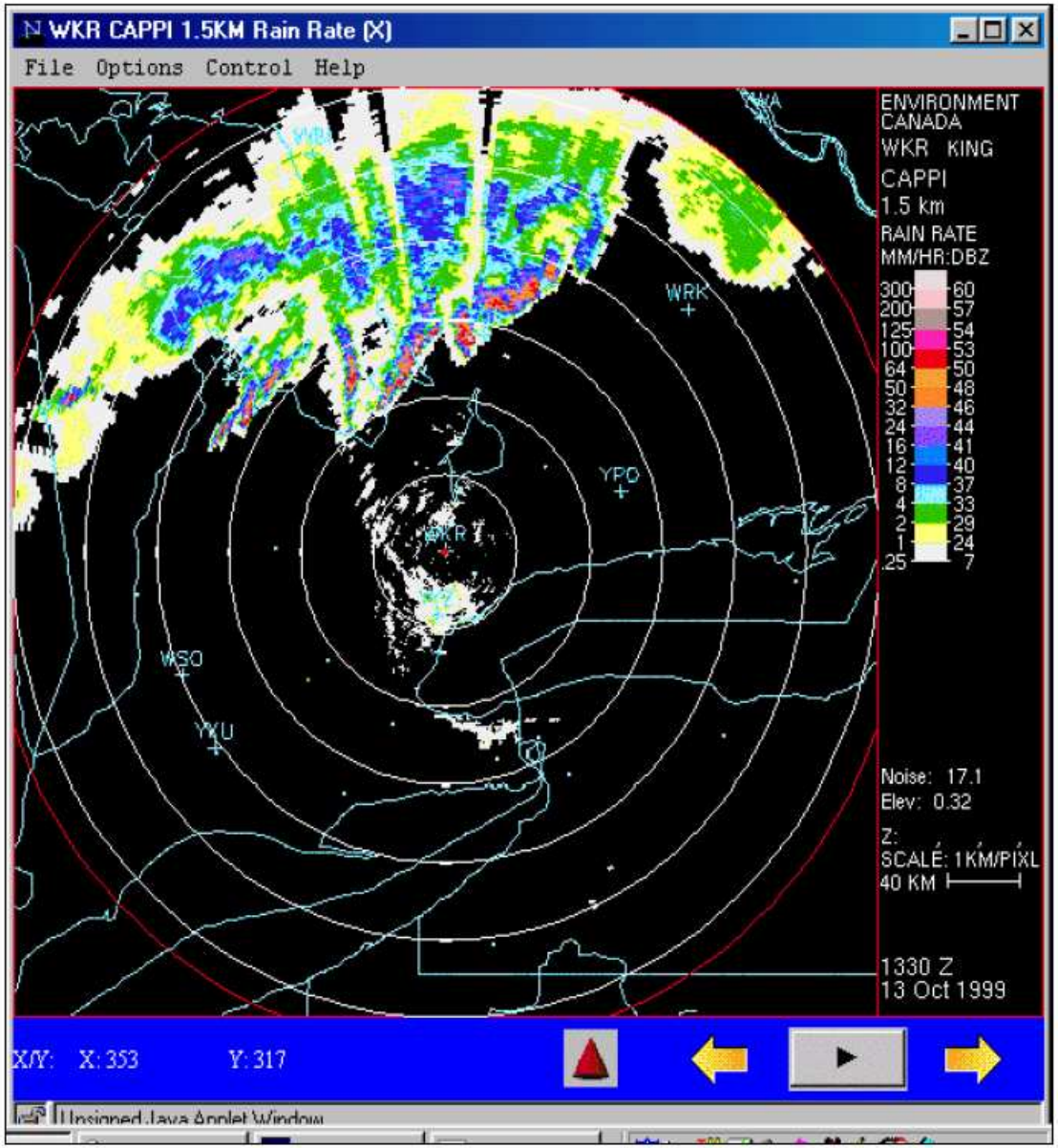
Assumindo um caminho de 10 km e
uma taxa de precipitação de 10 mm/h, a atenuação de 2 caminhos é

S	→ 0.02 dB
X	→ 3.6 dB
TRMM	→ 13 dB
CloudSat	→ 74 dB

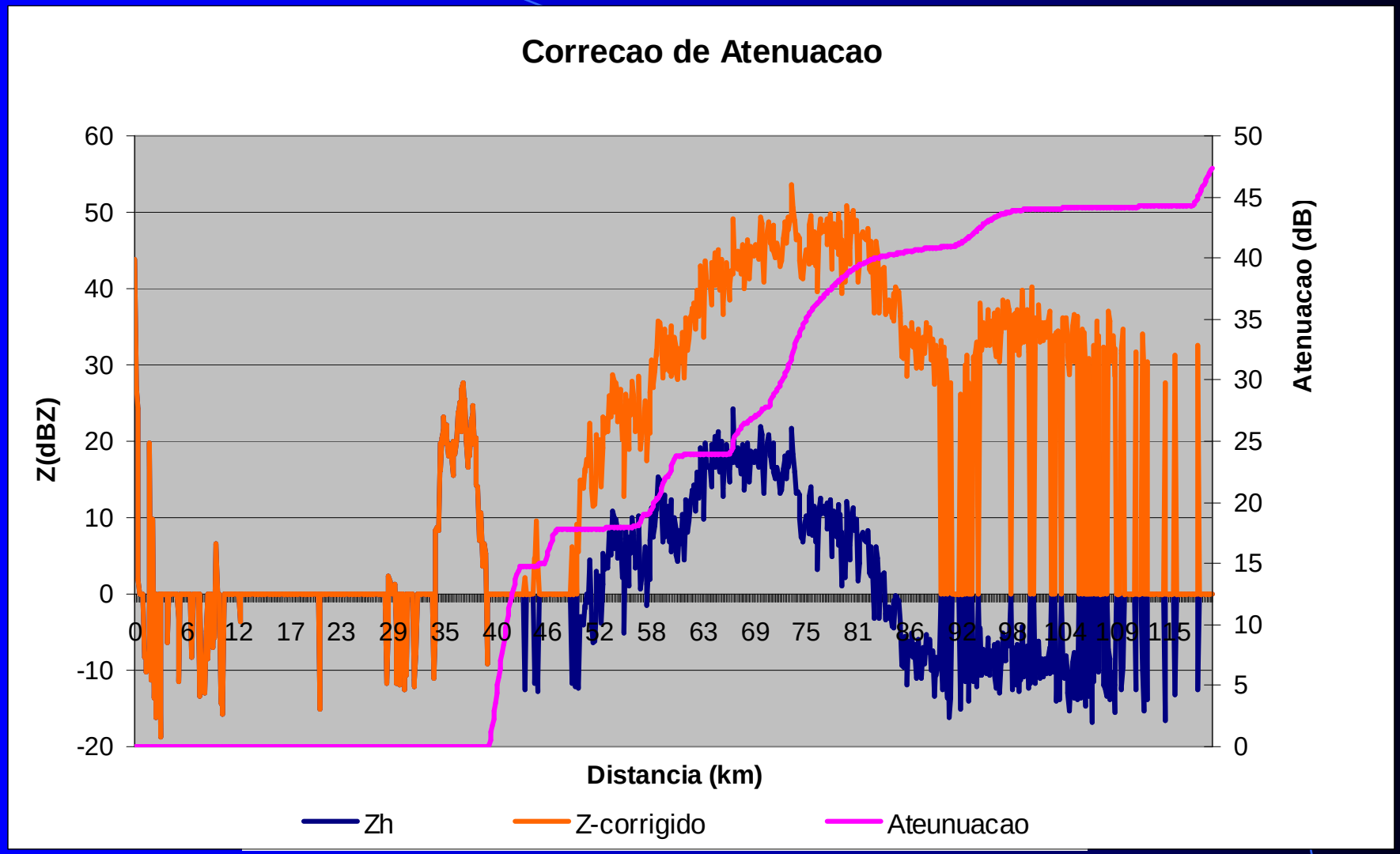
Example of severe C-band attenuation of radar reflectivity behind a squall line.



C-band resonance effects at D > 5 mm



Source: Meteorological Service of Canada, http://www.cwrp.mcgill.ca/presentation/N113-Testingv2.ppt


Correcao de Atenuacao
Z(dBZ)
60
50
40
30
20
10
0
-10
-20
Atenuacao (dB)
50
45
40
35
30
25
20
15
10
5
0
0 6 12 17 23 29 35 40 46 52 58 63 69 75 81 86 92 98 104 109 115
Distancia (km)
Zh
Z-corrigido
Ateunuacao

Atenuação devido a Neve

A partir dos primeiros resultados e em condições de regime Rayleigh, a atenuação por espalhamento e absorção pode ser calculada por:

$$Q_s = \frac{128}{3}\frac{\pi^5}{\lambda^4}|K|^2 \sum_{volume} a^6$$

(m^{-1}) seção transversal/volume

$$Q_a = \frac{8\pi^2}{\lambda}\mathrm{Im}[-K]\sum_{volume} a^3$$

(m^{-1})

Então, $\mathbf{Q_t = Q_s + Q_a}$

Assim temos que expandir Qs e Qa para termos uma função de R ou seja, taxa de precipitação de água equivalente.

1º) Z ~ **ΣD⁶** → **Σa⁶** = Z/64, logo Q_s pode ser expresso como:

$$0{,}4343\sum_{volume} Q_s = \frac{128}{3}\frac{\pi^5}{\lambda^4}|K|^2\frac{Z}{64} = 3{,}5x10^{-2}\frac{R^2}{\lambda^4} = k_s[dB/km]$$

$$onde, Z = 200R^{1,6}(Z\left[\frac{mm^6}{m^3}\right]; R\left[\frac{mm}{h}\right])$$

Expressões similares podem ser derivadas para ΣQ_a , porém lembrando que

$$\sum D^3 = \frac{6R}{\pi W}$$

assumindo neve esférica com ρ = 1g/cm3 e W = 1m/s para a neve

Logo, temos que

$$0{,}4343 \sum_{volume} Q_a = 2{,}2x10^{-2} \frac{R}{\lambda}$$

$$k_t = k_s + k_a = 3{,}5x10^{-2} \frac{R^2}{\lambda^4} + 2{,}2x10^{-2} \frac{R}{\lambda}$$

(dB/km; λ cm; **<u>um caminho</u>**)

Atenuação devido a Neve

Attenuation Coefficients For Snow as a function of wavelength and precipitation rate.

TABLE 6.4

One-Way Attenuation Coefficients in DB/Km by Low-Density Snow at 0°C Calculated from Equation (6.23)

Wavelength (Cm)	Precipitation Rate – R (Mm/hr)		
	1	10	100
1.8	0.0046	0.344	33.5
3.2	0.0010	0.040	3.41
10.0	0.00022	0.0026	0.057

Consideravelmente temos mais atenuação para neve molhada @ λ = 3 cm $\mathbf{Q_{t,molhada} \approx 5Q_{t,seco}}$

Seco: 0.026 dB p/ **R =** 10 mm/hr @ S-band, 10 km caminho

Para Banda-X, 3.44 dB para as mesmas condições

Atenuação devido a Granizo

Q_t – Coeficiente de extinção calculado a partir da teoria Mie para várias composições de granizo:

Granizo esponjoso, granizo coberto por água, gelo e etc...

Conhecendo-se N(D) e σ_t, $\kappa_{granizo}$ pode ser calculado via:

$$\kappa_{hail} = \int N(D)\, \sigma_t \, dD \quad \text{(dB/km)}$$

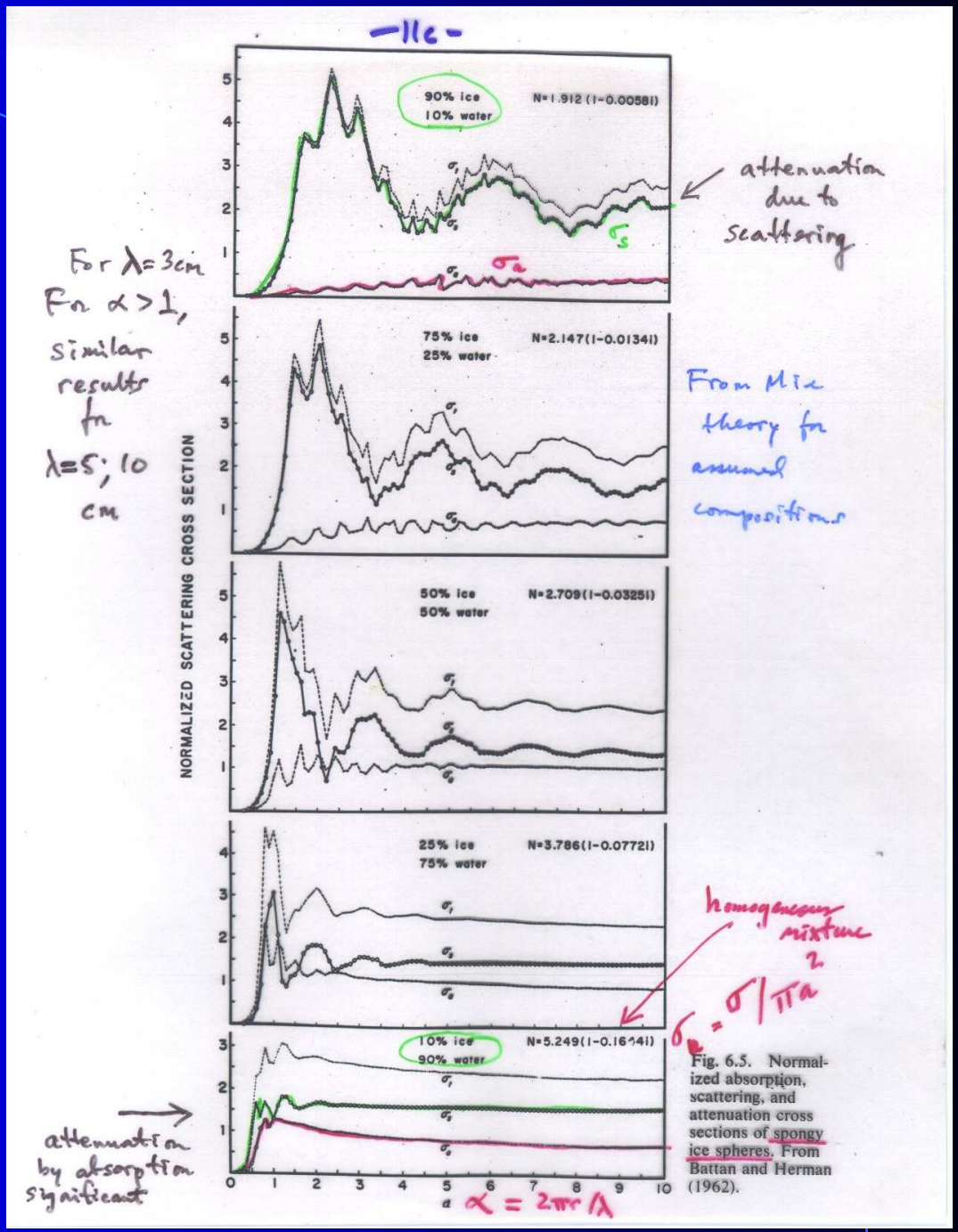
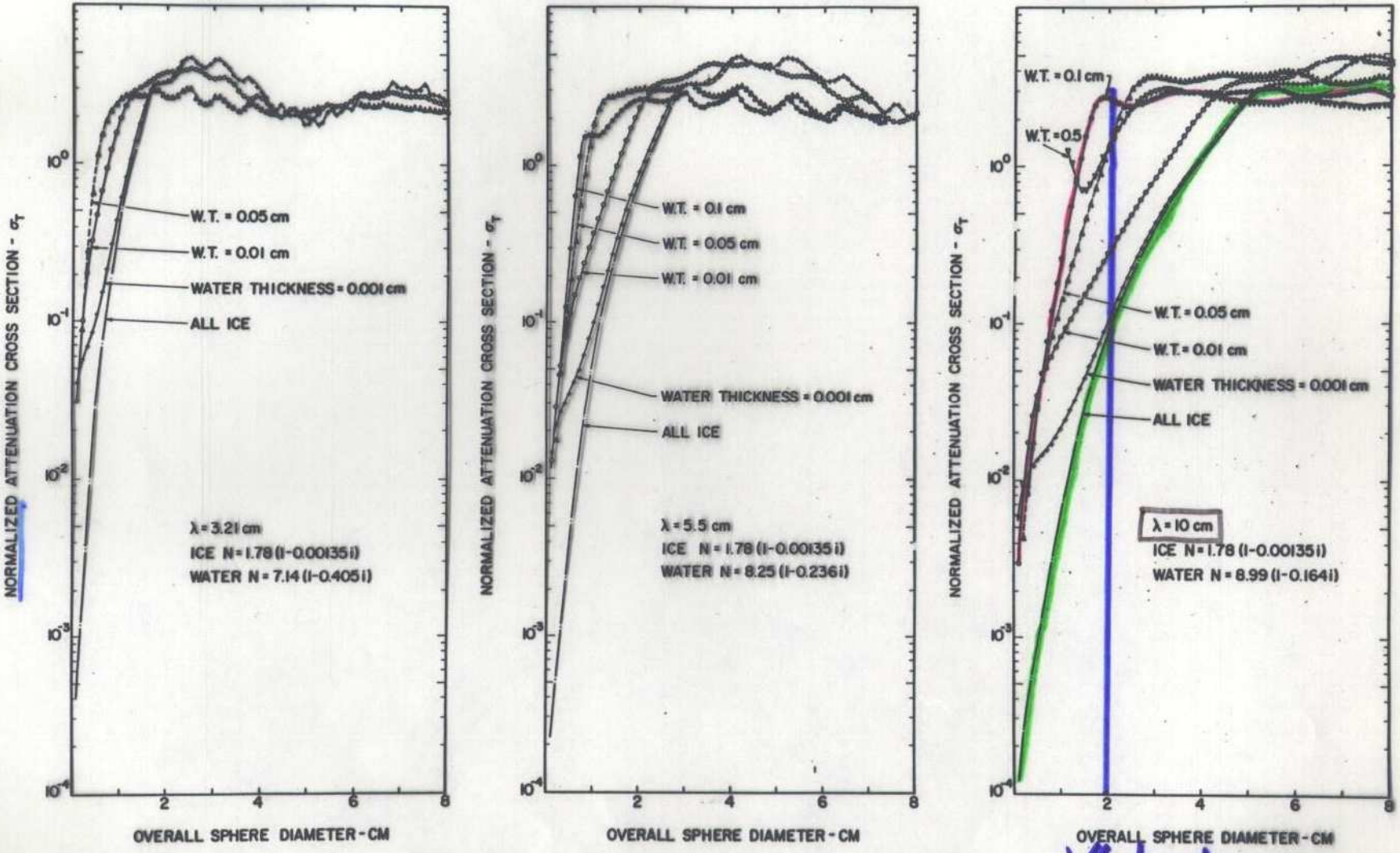


Fig. 6.5. Normalized absorption, scattering, and attenuation cross sections of spongy ice spheres. From Battan and Herman (1962).

— WATER COATED HAIL $k = \int N(D)\sigma\, dD$



1" hail.

Fig. 6.6. Normalized attenuation cross sections of ice spheres coated with a uniform layer of water. Water-shell thicknesses (W.T.) are indicated. From Battan, Browning, and Herman (1970*b*).

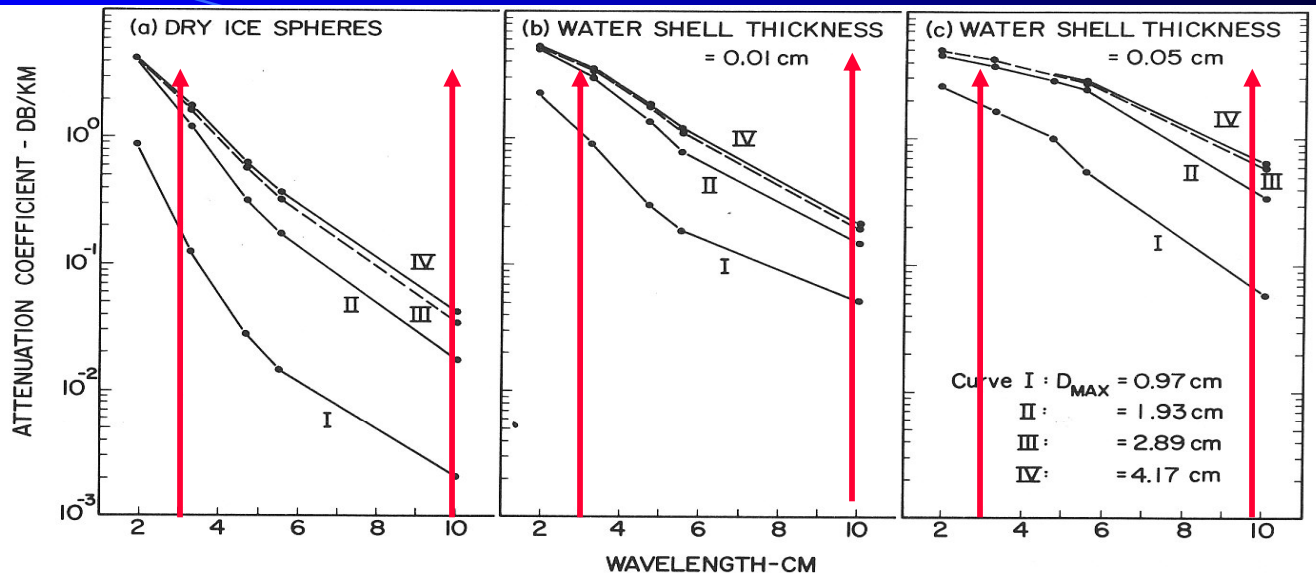


Fig. 6.7. Attenuation coefficient of a distribution of dry and water-coated ice spheres. From Battan (1971).

$$N_0 = 90 m^{-3} cm^{-1}$$

Battan (1974), Atenuação: Granizo Seco X Granizo molhado .

As diferenças entre a banda S e X estão ilustradas pelas linhas verticais em vermelho.

$$N(D) = N_0 \exp\{-3{,}09D\}, N_0 = 31 m^{-3} cm^{-1}$$

Atenuação devido a granizo

Attenuation Tables (Battan, 1973)

TABLE 6.5 One-Way Attenuation in DB/Km for Distributions of Spherical Hail Where $N_D = 31e^{-31.0D}$ and D_{max} Is as Shown

Distribution	D_{max} (Cm)	Water-Shell Thickness (Cm)											
		Wavelength 3.21 Cm				Wavelength 5.5 Cm				Wavelength 10.0 Cm			
		Dry	0.01	0.05	0.10	Dry	0.01	0.05	0.10	Dry	0.01	0.05	0.10
I	0.97	0.12	0.91	1.68	1.50	0.015	0.19	0.56	0.94	0.0020	0.051	0.058	0.080
II	1.93	1.21	3.01	3.72	3.49	0.18	0.79	2.48	2.30	0.017	0.15	0.34	0.89
III	2.89	1.66	3.46	4.03	3.79	0.33	1.12	2.82	2.60	0.034	0.19	0.60	1.18

SOURCE: Battan 1971.

NOTE: Appropriate for a distribution normalized to a liquid-water content of 1 g/m³.

13x 63x 40x

14X 22X 17X

Attenuation Coefficients for Hail as a function of Size, wavelength, and water shell thickness (wet hail).