## Medidas Doppler

Cap. 8 - Battan

## Velocidade Doppler

- Além das medidas do fator refletividade do radar, alguns radares meteorológicos conseguem inferir a velocidade de propagação radial dos alvos amostrados.
- Basicamente, os alvos em movimento mudam a frequência do sinal que é proporcional à sua velocidade de deslocamento.
- Sendo que os radares Doppler conseguem medir as mudanças de fase nas frequências de microondas.

# Efeito Doppler

Assumindo que um alvo está a uma distância r do radar e opera em uma frequência  $f_0$  (f=c/ $\lambda$ ).

Temos que a distância percorrida pela onda eletromagnética até o alvo é d = 2r (ida e volta).

Em termos do número de onda a distância,d:

$$d = 2r/\lambda$$

ou em radianos  $d = (2r/\lambda)2\pi = 4\pi r/\lambda$ 

 Se o radar transmiste a onda EM com uma fase incial φo, temos que após o pulso retornar ao radar a fase será:

$$\varphi = \varphi o + 4\pi r/\lambda$$

Logo, a mudança de fase em função do tempo (de um pulso a outro) pode ser expressa como:

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{d}{dt} \left[ \varphi_0 + \frac{4\pi r}{\lambda} \right] = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{dr}{dt}$$

• mas como a velocidade radial é  $V = \frac{ar}{dt}$ 

• e a frequência angular é 
$$\Omega = \frac{d\varphi}{dt}$$

Lembrando que  $\Omega = 2\pi f$  (onde f é a mudança de frequência em ciclos por segundo, Hz) temos que:

$$\Omega = 2\pi f = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{dr}{dt} \Rightarrow f = \frac{2V}{\lambda}$$

$$\Omega = 2\pi f = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{dr}{dt} \Rightarrow f = \frac{2V}{\lambda}$$

- Como o comprimento de onda λ é cte, isso implica que a mudança de frequência é linearmente proporcional à velocidade de propagação do alvo.
- Como a variação da frequência é sempre perpendicular ao feixe, temos que o radar meteorológico mede a velocidade radial.

$$\Omega = 2\pi f = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{dr}{dt} \Rightarrow f = \frac{2V}{\lambda}$$

- Com o aumento da velocidade do alvo, a mudança de fase também aumenta.
- Entretanto existe um limite para a mudança de fase que o radar pode detectar.

Por exemplo, se um alvo estivesse se distanciando do radar a um velocidade,  $V = \frac{1}{2} \lambda$  entre 2 consecutivos pulsos, a fase  $\varphi$  seria igual a  $\pi$ , e se estivesse se movendo em direção ao radar a fase também seria  $\pi$ .

Por outro lado, se estivesse se propagando a uma velocidade  $V = \lambda$ , a fase seria 0 e o alvo estaria estacionado.

- Baseado nestas limitações podemos calcular a velocidade máxima que um radar Doppler pode detectar corretamente ou sem ambiguidades.
- Este valor é obtido através da velocidade que pode produzir uma mundança de fase, ou seja, π, e é conhecida como frequência de Nyquist ou velocidade Nyquist, conforme expresso abaixo:

$$V_{\text{max}} = \frac{f_{\text{max}} \lambda}{2}$$

$$f_{\text{max}} = \frac{PRF}{2}$$

$$\Rightarrow V_{\text{max}} = \frac{PRF \lambda}{4}$$

 Dessa maneira, para valores altos de PRF podemos medir velocidades altas, entretanto isso compromete o alcance do radar, ou seja:

$$R_{MAX} = \frac{c}{2PRF}$$

 Portanto manipulando a equação de velocidade máxima e verificando a dependência com a distância máxima, podemos obter a expressão abaixo:

$$V_{\text{max}} R_{\text{max}} = \frac{c\lambda}{8}$$

Para medirmos velocidade altas, temos que reduzir o alcance do radar

Por exemplo,

PRF = 1000 Hz e alcance de 150km

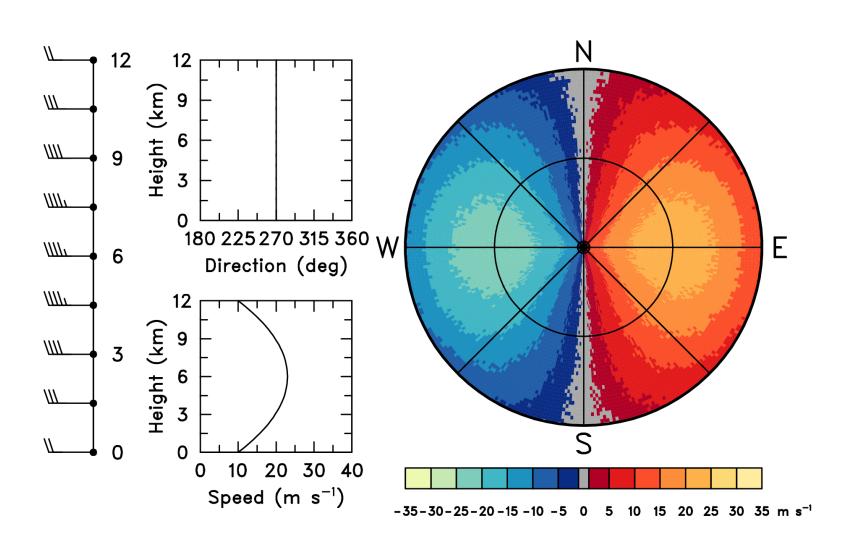
Banda S  $\rightarrow$  V max =  $\pm$  25 m/s

Banda  $X \rightarrow V \text{ max} = \pm 8 \text{ m/s}$ 

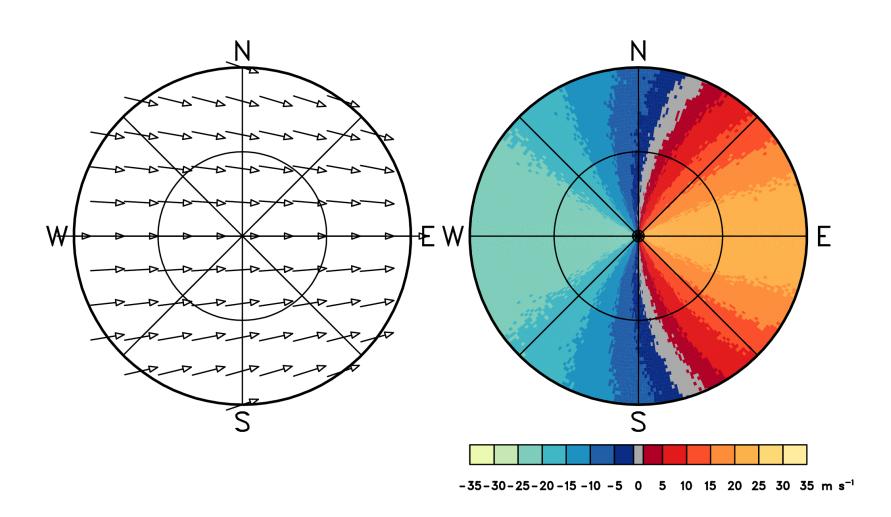
Por convenção, as velocidade positivas significam que os alvos estão se distanciando do radar, enquanto que as negativas estão se aproximando.

Exemplos de simulações analiticas assumindo diferentes campos de vento (Rodger Brown and Vincent Wood of NSSL)

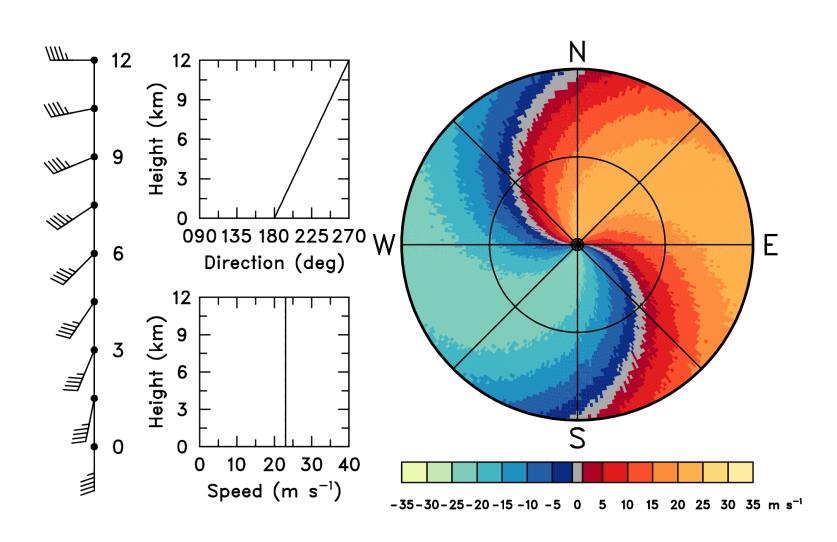
Velocidade máxima do vento em 6 km AGL



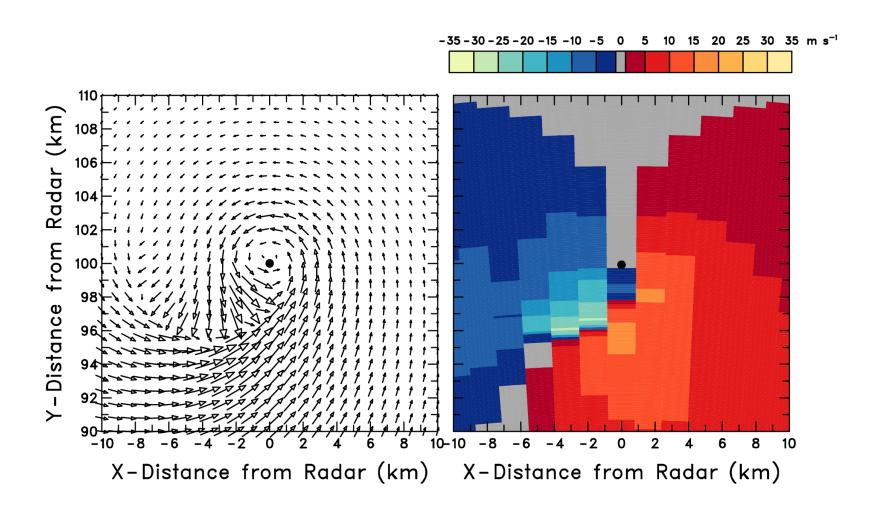
## Fluxo de convergência



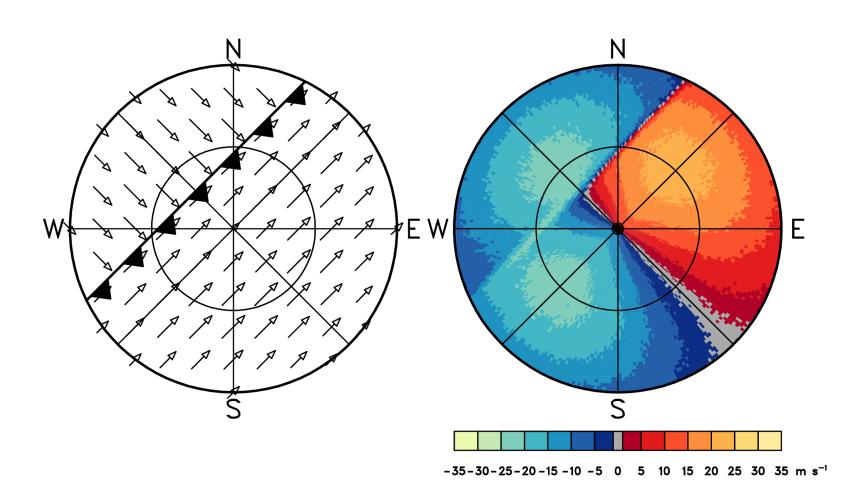
#### Direção do vento mudando no sentido horário com a altura



## Rotação e Convergência



#### Frente Fria at NW do radar



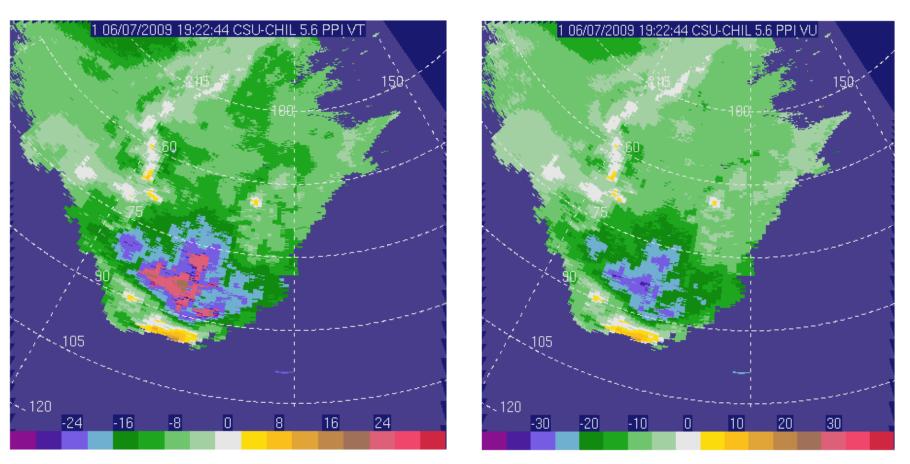
# Velocidade Ambigua

Correção de unfolding: adicionar ou subtrair 2n \* Vmax aos volumes folded, sendo que n =1 para fold simples, n=2 para fold duplo, e assim por diante etc

#### **Velocidades Folded**

(não temos valores próximos de zero)

#### Velocidade sem Fold



$$24 - (2 * 26.4) = -28.8 \text{ m/s}$$

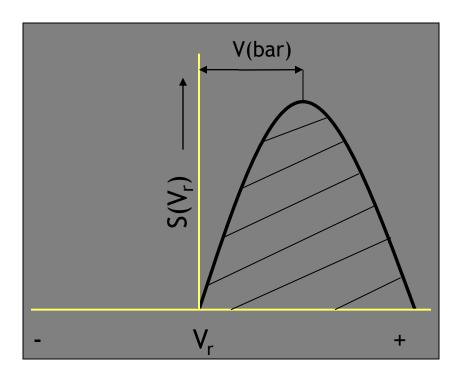
Neste exemplo temos que Velocidade Nyquist = 26.4 m/s

```
197.61
KM.
                VU
               -24.2
        23.4
        23.4
               -28.3|
       -24.41
               -23.01
       -23.01
```

Neste exemplo a velocidade Nyquist é 26.4 m/s.

O espectro de velocidade Doppler (DVS) contém informações sobre os alvos espalhadores bem como os efeitos de turbulência, cisalhamento, largura do feixe da antona.

antena



A potência total é proporcional a Área da curva (em geral aproximado a uma distribuição gaussiana)

 $2\sigma_v$  = largura do espectro

A largura do espectro Doppler é controlado pelos efeitos de turbulência, cisalhamento, largura da distribuição da velocidade terminal, e da largura do feixe da antena.

 $S(V_r)$  é a potência observada no receptor devido ao espalhamento de um volume com velocidades radiais em um intervalo  $V_r$  and  $V_r + \Delta V_r$ 

De uma forma geral, quanto mais estreito for o espectro Doppler, mais homogêneo será o volume amostrado. Já que temos uma relação entre a potência e a refletividade (eq. do radar), o espectro de velocidade Doppler (DVS) pode ser pensado como sendo a refletividade ponderada pela distribuição de velocidades radiais em um volume pulsado (.e. velocidade radial pesada por D<sup>6</sup>)

## Momentos de DVS

$$S_0 = \int S(v) dv = \int S(f) df$$

 $V(bar) = \{ \int V^*S(v) dv \} / S_0$ 

 $\sigma_v^2 = \{ \int (V - V(bar))^2 S(v) dv \} / S_0$ 

## Potência do Sinal P<sub>r</sub>

Para alvos precipitantes,  $S_0$  está relacionado com a refletividade do radar e contém informações sobre a DSD.

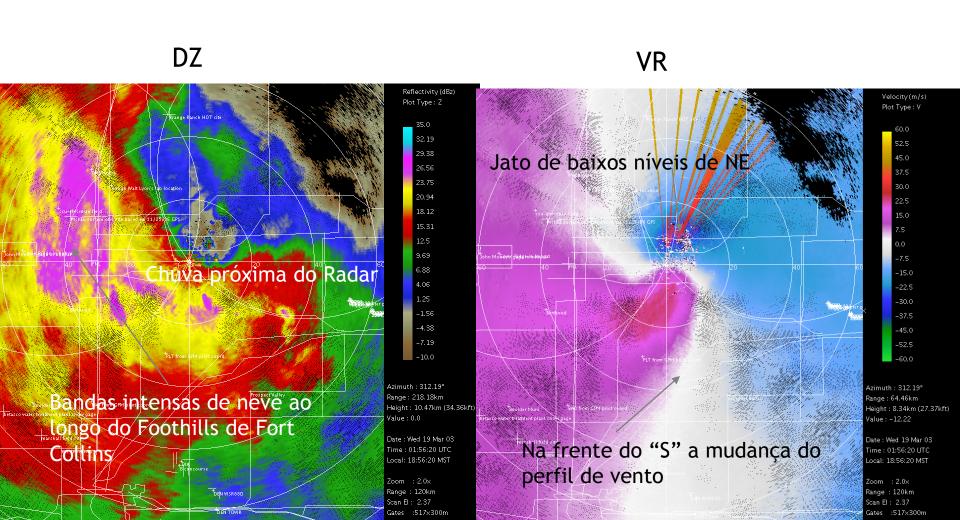
#### Vel. Radial Média

Análogo ao centro de massa de uma distribuição tipo dente de serra

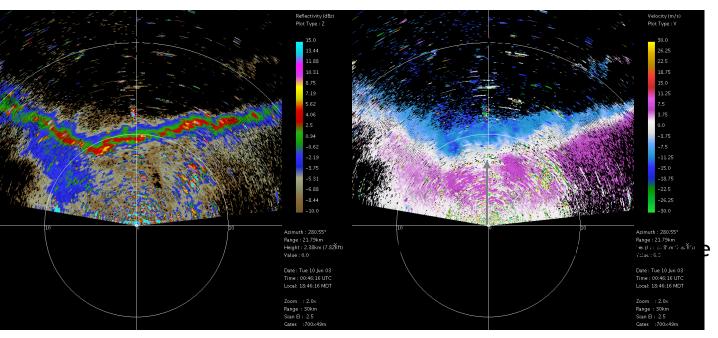
## Largura Espectral

Controlada pela turbulência, cisalhamento e largura da antena, vel. Terminal caracteristica dos espalhadores dentro do volume pulsado

## Radar CHILL em 20 Março de 2003 as 01:56 UTC



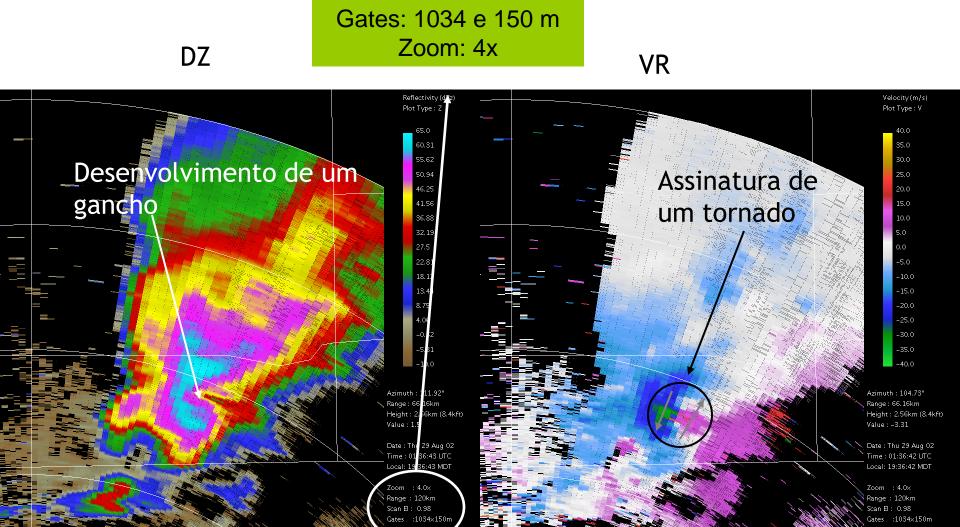
# Observações de zonas de convergência na camada limite



Observações do CHILL durante uma linha bem fina em 10 Junho de 2003

Próximo da superfície, padrões lineares de uma convergência "forte" são referenciadas como zonas de convergência da camada limite (BLCZs). Muitas vezes, estes padrões são bem estreitos (< 5 km de largura) e são chamados de "linhas finas". Estas características podem ser formadas por vários processos incluindo os fluxos de tempestades, contrastes de temperatura, umidade do solo e cobertura de nuvens por exemplo. As BLCZs são muitas vezes os precursores do desenvolvimento convectivo.

# Observações do CHILL durante uma super-célula e tornado



## Outras aplicações de um Radar Doppler

Quando a antena do radar está direcionada na vertical (90°) sob uma área de precipitação, a velocidade radial observada é basicamente a velocidade de queda das partículas (Vp).

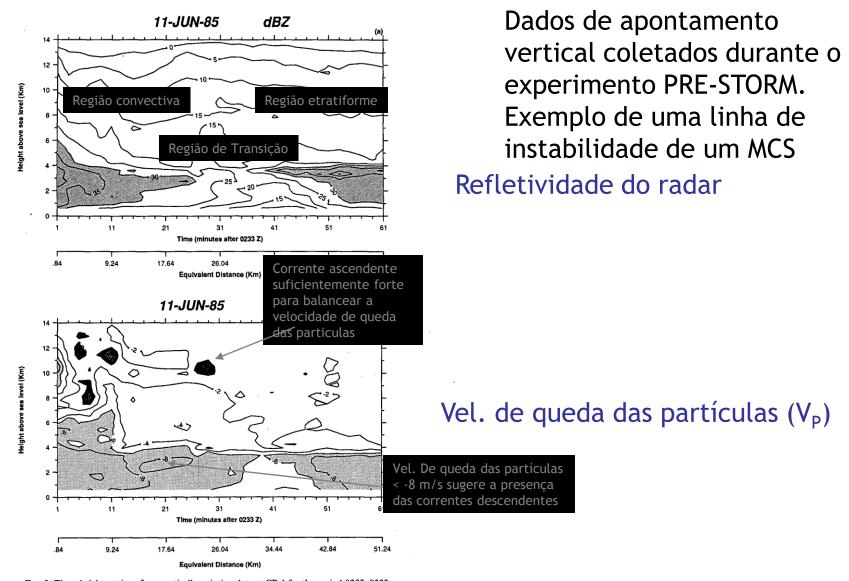
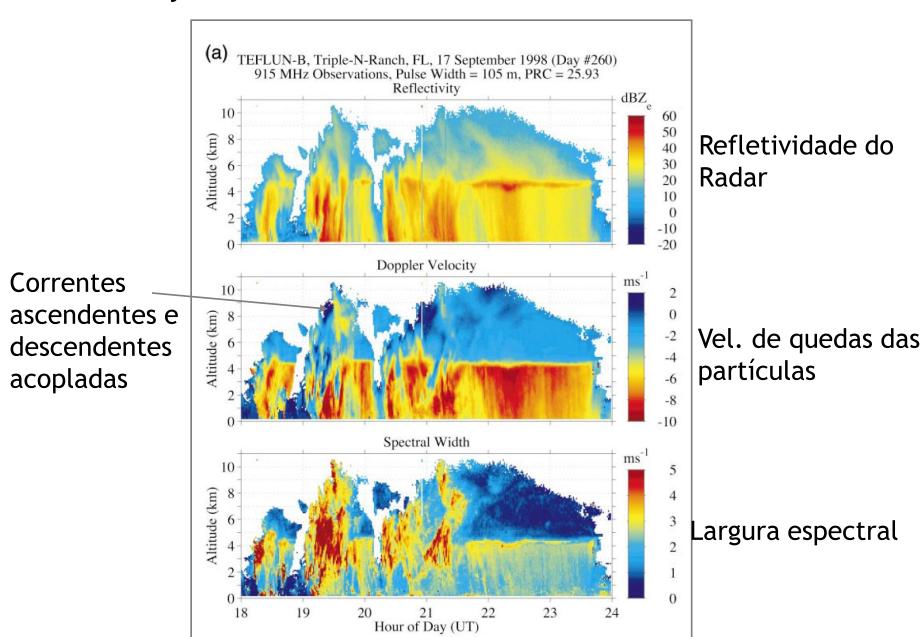


FIG. 8. Time-height sections from vertically pointing data at CP-4 for the period 0232–0332 UTC. (a) Reflectivity in dBZ. Shading denotes reflectivities > 30 dBZ. (b) Doppler velocities in m s<sup>-1</sup> at vertical incidence. Light shading denotes Doppler velocities < -6 m s<sup>-1</sup>. Heavy shading denotes velocities > 0. For velocities > 0, a 1 m s<sup>-1</sup> contour interval is used.

Rutledge et al. 1988

## Observações durante o TEFLUN-B



## Relação entre a V<sub>T</sub> e Refletividade

O movimento das partículas observado pelo radar é a somatória das velocidades terminais de cada partícula (VT) e o movimento do ar (w):

 $V_P = w - V_T$  (como convenção, vel. negativas indicam movimento p/ o radar)

Se  $V_T$  pode ser estimado indiretamente, a equação acima pode ser utilizada para termos a solução de w.

Quais outras observações do radar podem ser utilizadas para determinar V<sub>T</sub>?

Podemos lembrar que o velocidade média radial V(bar) é a refletividade ponderada pela velocidade doppler

De forma análoga a Rogers 1964, V<sub>T</sub> pode ser definido como a refletividade ponderada pela velocidade de queda:

$$V_{T}(bar) = \frac{\int_{0}^{\infty} N(D)D^{6}V(D)dD}{\int_{0}^{\infty} N(D)D^{6}dD}$$

Usando V(D) =  $aD^b (p_0/p)^{0.4}$  and N(D) =  $N_0 exp^{-AD}$ 

$$V_{T}(bar) = \left(\frac{p_{0}}{p}\right)^{0.4} \frac{\int_{0}^{\infty} N_{0}e^{-\Delta D}D^{6}aD^{b}dD}{\int_{0}^{\infty} N_{0}e^{-\Delta D}D^{6}dD}$$

Integrando, temos:  $V_T(bar) = a \left(\frac{p_0}{p}\right)^{0.4} \frac{\Gamma(7+b)\Lambda^7}{\Gamma(7)\Lambda^{7+b}}$ 

$$V_T(bar) = a \left(\frac{p_0}{p}\right)^{0.4} \frac{\Gamma(7+b)}{\Gamma(7)\Lambda^b}$$

Lembrando que para uma DSD exponencial, o fator refletividade do radar (Z) pode ser expresso como:

$$Z = N_0 \Gamma(7) / \Lambda^{(7)}$$

Usando a relação de Z em VT(bar), temos:

$$V_{T}(bar) = a \left(\frac{p_{0}}{p}\right)^{0.4} \frac{\Gamma(7+b)Z^{\frac{b}{7}}}{\Gamma(7)(N_{0}\Gamma(7))^{\frac{b}{7}}}$$

A qual nos leva a uma equação na forma de  $V_T(bar) = a'Z^{b'}$ 

Alguns exemplos de relações disponíveis na literatura

Onde V<sub>T</sub>(bar) está em m/s e Z em mm<sup>6</sup>/m<sup>3</sup>

Assumindo a DSD de MP - N(D) = N0 exp $^{-\Lambda D}$ N<sub>0</sub> = 0.08 cm-4,  $\Lambda$  = 41R $^{-0.21}$ 

$$V_T(bar) = 3.84 Z^{0.071}$$

Para tempestades :  $V_T(bar) = 4.3 Z^{0.052}$  (Sekhon e Srivastava 1971)

 $V_T(bar) = 2.6 Z^{0.107}$  (Joss e Waldvogel 1970)

Esta técnica tem grande acurácia quando medidas em situ (DSD) são feitas, proporcionando uma melhor determinação da relação V = aD<sup>b</sup> bem como dos parâmetros da distribuição de tamanhos

 $V_T(D) \approx 386.6 D^{0.67}$  (Gunn e Kinzer)