

Universidade de São Paulo – USP  
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – IAG  
Departamento de Ciências Atmosféricas – ACA  
Meteorologia Sinótica

**Modelos conceituais de sistemas de precipitação**

- *Nowcasting* (ou previsão imediata) que envolve sistemas de precipitação apresenta deficiências por falta de observações apropriadas dos sistemas;
  - Estruturas de mesoescala e subestruturas convectivas presentes são dificilmente diagnosticadas e prognosticadas;
- As observações por satélite e radar representam boas ferramentas para descrever a escala reduzida, em especial nuvens e precipitação, resgatando as informações de campos de visão contaminados por nuvens e inferindo o escoamento de ar a partir de padrões e movimentos de nuvens e da precipitação (subjetividade);
- Mesmo com modelos de mesoescala, *é necessário um critério subjetivo para analisar a mesoescala*;
- O estado atual de recursos para manipulação e visualização de informações requer que o previsor tenha um melhor enquadramento conceitual para uma correta interpretação;
- Modelos conceituais de sistemas de precipitação de mesoescala e seu contexto na larga escala serão discutidos.

## **Modelos de esteira transportadora aplicáveis a latitudes médias**

- Histórico: houve domínio dos modelos frontais da escola norueguesa por mais de 50 anos;
- A interpretação de sistemas de precipitação de latitudes médias como cópias de frentes frias, quentes e oclusas é inadequada e errônea;
  - É necessária uma nova análise frontal que concilie naturalmente a mesoescala com a escala sinótica: esteiras transportadoras.

### **A esteira transportadora quente**

- O levantamento baroclínico inclinado é o mecanismo dominante nos sistemas frontais;
- As nuvens em forma de banda alongada ao longo da fronteira de uma grande zona de confluência adiante do cavado são a característica chave para a identificação dessas esteiras;



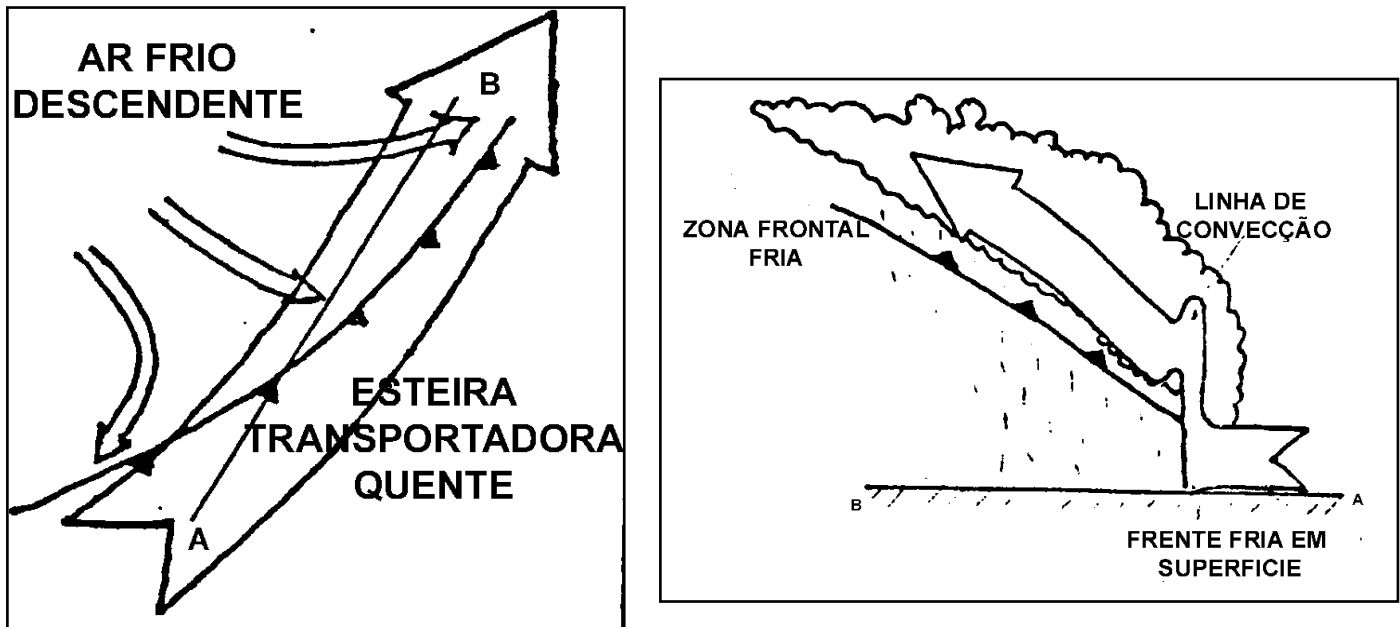
*Figura 1*

- O ar quente é elevado para a média troposfera ao viajar na esteira de nuvens e eventualmente produz uma camada de cirrus na alta

troposfera adiante do sistema frontal (deck de cirrus da zona baroclínica);

- O ar na esteira quente flui ao longo da frente fria na forma de jato de baixos níveis na camada limite adiante à frente fria em superfície;
- A componente principal do movimento é ao longo da frente; porém existe componente ageostrófica pequena (transversal à frente) que pode distinguir duas situações:
  - **Levantamento inclinado para trás:** movimento para trás em relação à frente, sendo que o levantamento ocorre na vizinhança e acima da zona frontal fria;
  - **Levantamento inclinado para frente:** movimento para frente em relação à frente fria, com levantamento ocorrendo mais adiante (na região de baroclinicidade frontal quente).

**A esteira transportadora quente com levantamento para trás:**



*Figura 2*

- Situação ana frontal clássica;
- O ar quente se eleva acima da cunha de ar frio que avança;
- A frente fria de superfície tende a ser mais brusca, pois o ar é levantado abruptamente (velocidades verticais de alguns m/s) até 2 a 3 km;
- Após esta fase, passa por um levantamento adicional (alguns cm/s) acima da cunha de ar frio, ocorrendo dois padrões de precipitação:
  - Banda estreita de chuva forte na frente fria de superfície;
  - Amplo cinturão de chuva fraca a moderada atrás da frente fria.

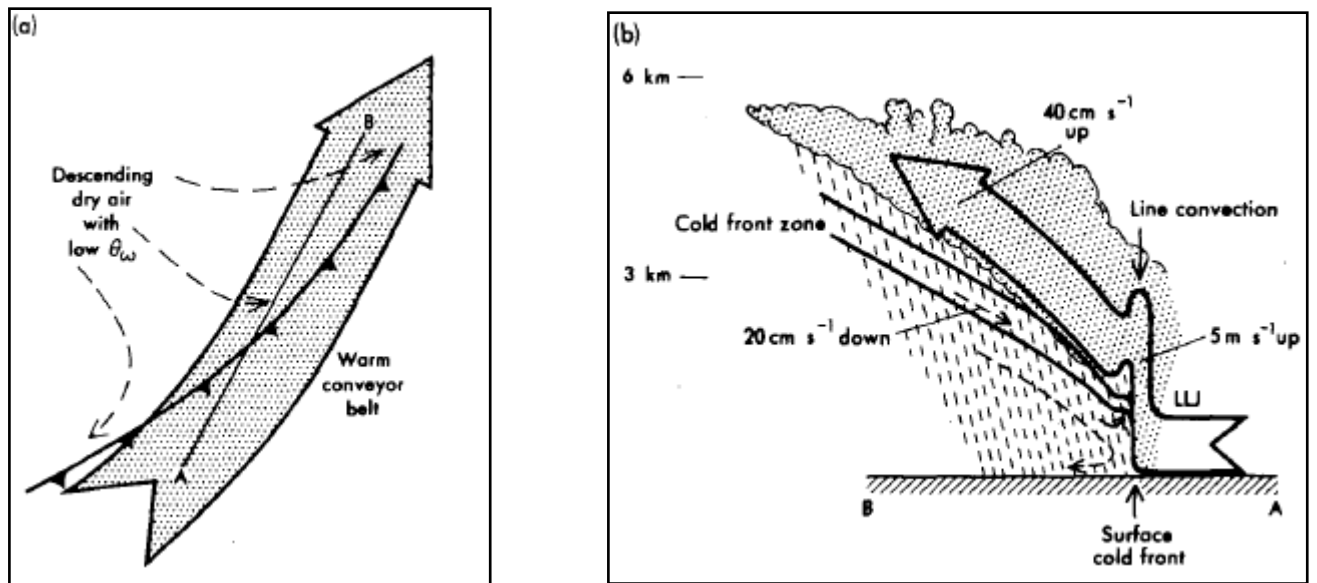


FIG. 3. Schematic portrayal of airflow at a classical ana cold front showing the warm conveyor belt (bold arrow) undergoing rearward-sloping ascent above the cold frontal zone with the cold air (dashed lines) descending beneath it: (a) plan view; (b) vertical section along *AB* in (a). Flows are shown relative to the moving frontal system. LLJ marks axis of low-level jet in (b).

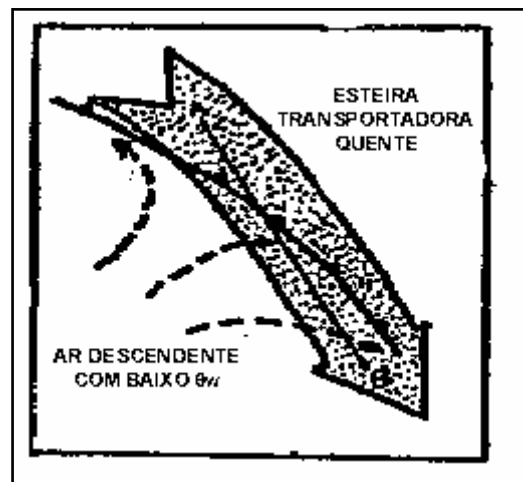


Figura 4

## A esteira transportadora quente com levantamento para frente:

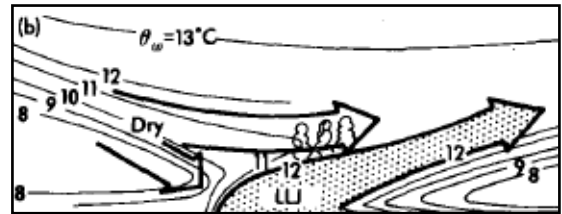
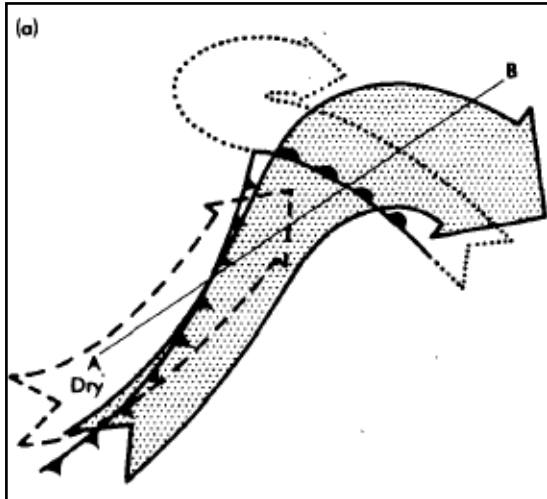


FIG. 4. Schematic portrayal of airflow in a midlatitude cyclone in which the warm conveyor belt (solid arrow with stippled shading) is undergoing forward-sloping ascent ahead of a kata cold front before rising above a flow of cold air ahead of the warm front (dotted arrow referred to later as the cold conveyor belt). Cold middle-tropospheric air with low  $\Theta_w$  (dashed arrow) is shown overrunning the cold front and generating potential instability in the upper portions of the warm conveyor belt. Plan view and vertical section are shown in (a) and (b), respectively, the section in (b) being along the line *AB* in (a). Flows are shown relative to the moving frontal system.

Figura 5

- Situação kata frontal;
- O principal levantamento ocorre adiante da frente fria;
- A esteira quente é alcançada na média troposfera por ar frio e seco;
  - Geração de instabilidade potencial, a qual é liberada como convecção com levantamento suficientemente grande;
  - A borda dianteira do ar frio e seco que se sobrepõe e avança adiante da frente fria de superfície forma uma frente fria em altitude;
- Eventualmente gira anticiclonicamente ao alcançar e subir sobre o ar frio (pode ser identificado nas imagens do visível);
- Adiante da frente fria em altitude, a espessura do ar quente e úmido aumenta abruptamente, causando uma banda de convecção organizada que produz larga banda de chuva de moderada a forte.

- Após a passagem da frente fria em altitude vem uma camada úmida e rasa com ocorrências aleatoriamente alternadas de chuva fraca ou chuviscos.
- A existência de uma frente em altitude adiante da de superfície é denominada modelo de frente separada.

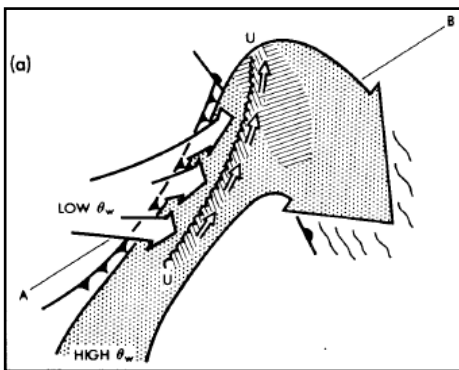


FIG. 5. Schematic portrayal of the same situation as in Fig. 4, i.e., with the warm conveyor belt undergoing forward-sloping ascent but drawing attention to the split-front characteristic and the overall precipitation distribution: (a) plan view; (b) vertical section along  $AB$  in (a). In (a)  $UU$  represents the upper cold front. The hatched shading along  $UU$  and ahead of the warm front represents precipitation associated with the upper cold front and warm front, respectively. Numbers in (b) represent precipitation type as follows: 1) warm frontal precipitation, 2) convective precipitation-generating cells associated with the upper cold front, 3) precipitation from the upper cold frontal convection descending through an area of warm advection, 4) shallow moist zone between the upper and surface cold fronts characterized by warm advection and scattered outbreaks of mainly light rain and drizzle, and 5) shallow precipitation at the surface cold front itself (after Browning and Monk, 1982).

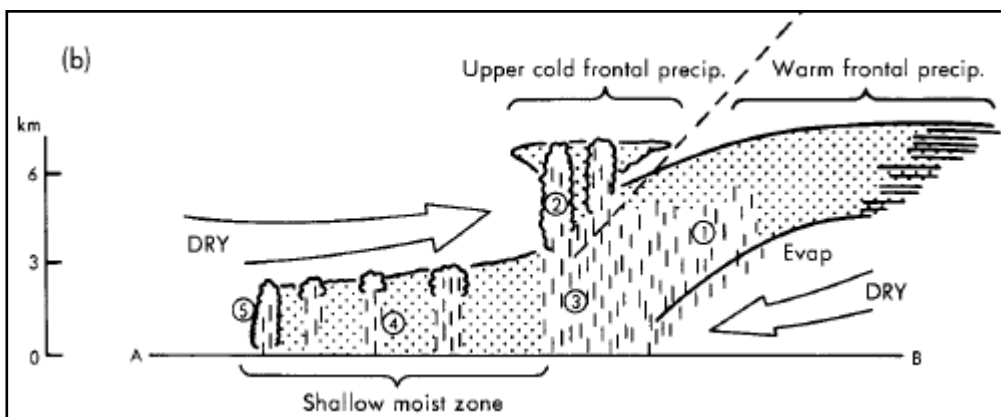


Figura 6

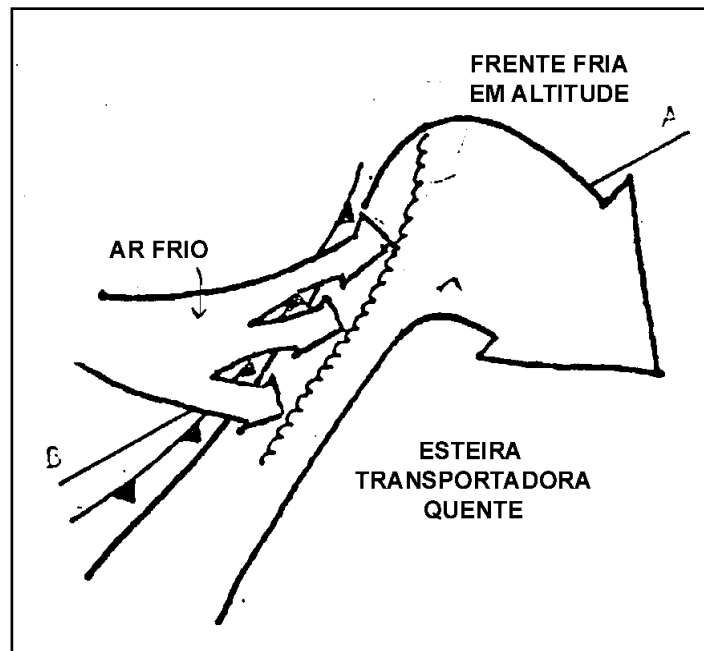


Figura 7

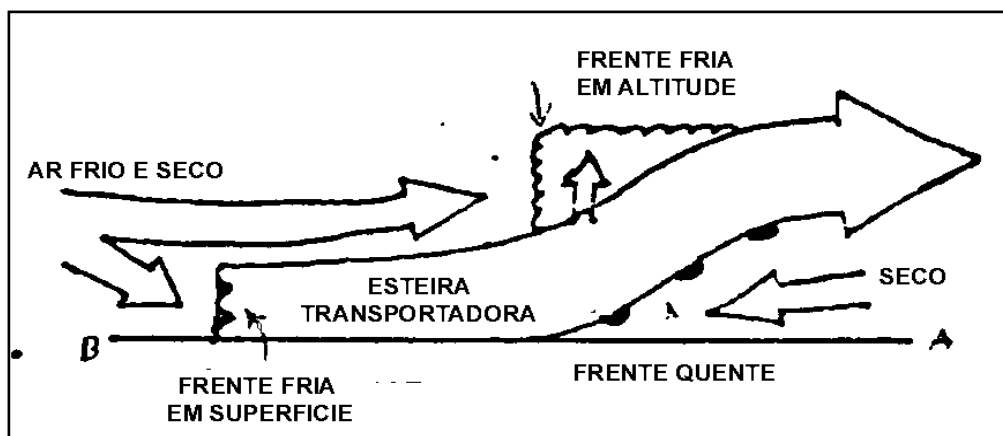


Figura 8

### A esteira transportadora fria

- A esteira quente é a principal responsável pela formação de nuvens, mas um agente secundário é a esteira fria, que *se origina no escoamento anticiclônico de baixos níveis a sudeste do ciclone (nordeste no HN)*;



- Em relação ao ciclone que caminha, a esteira fria avança para oeste adiante da frente quente em superfície e debaixo da esteira quente;
- No início o ar frio tem movimento descendente e é muito seco, sendo que a precipitação da esteira quente se evapora ao cair neste ar.

Na figura abaixo é mostrado o movimento vertical (setas finas) relativo ao centro de baixa pressão em superfície L, onde setas largas denotam as esteiras transportadoras quente e fria.

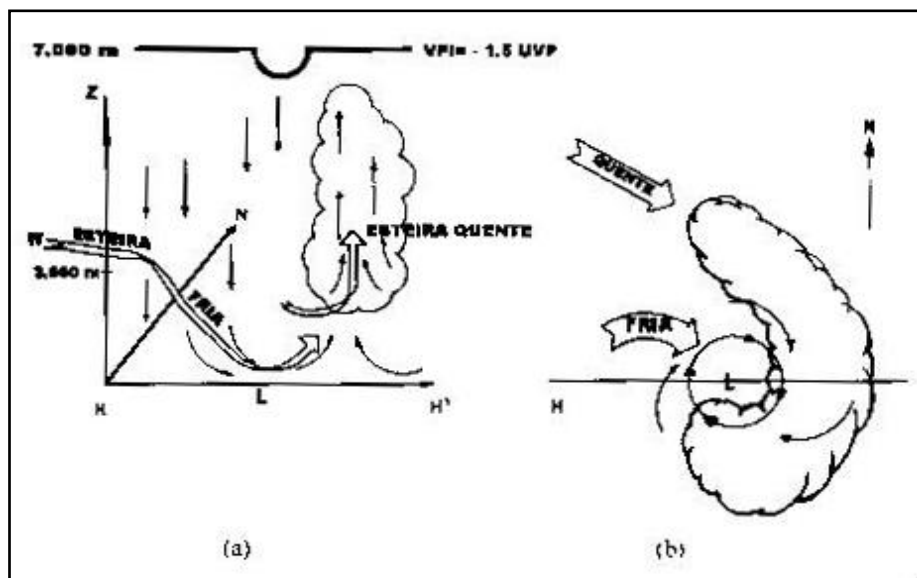


Figura 9

### 3. Classificação das bandas de precipitação em sistemas frontais de latitudes médias

Em primeira aproximação, as áreas de chuva se alinham ao longo dos escoamentos citados acima.

Como os escoamentos são paralelos às frentes em superfície, assim também acontece com a precipitação; porém existem situações em que a esteira transportadora se orienta transversalmente à frente

(exemplo: quando a frente fria em altitude alcança a frente quente em superfície);

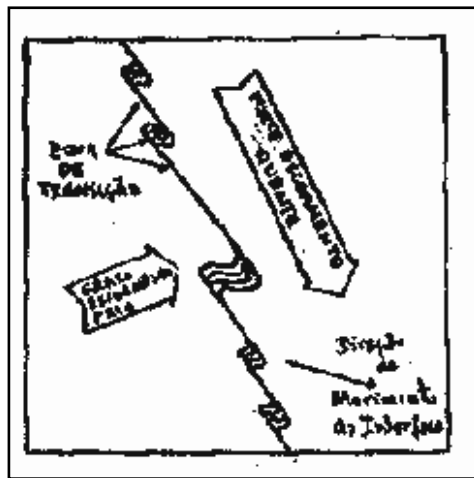
Raramente a precipitação é uniforme ao longo de uma esteira pois a atuação de circulações convectivas e de mesoescala implicam em complexos padrões:

- Convecção: tendência de concentração da precipitação em pequenas células;
- Mesoescala: 2 tipos de circulação induzindo:
  - Agrupamentos de células convectivas causando áreas de precipitação de dezenas de km;
  - Chuva em forma de bandas quase uniformes ao longo de seu comprimento, as quais são nada mais do que áreas de precipitação em mesoescala alinhadas ao longo do eixo da esteira transportadora: bandas estreitas e bandas largas.

#### Bandas de precipitação estreitas:

- Em geral são fenômenos de camada limite;
- As mais significativas ocorrem nas estações frias na descontinuidade frontal brusca junto à frente de superfície, em situações de levantamento inclinado para trás;
- Adiante da frente, a camada limite atinge 2 a 3 km de altura, com uma camada estável no topo; as bandas que ali ocorrem são alinhadas com a frente de superfície e freqüentemente produzem chuva forte e pequenos granizos;
- A banda de convecção quase vertical que dá origem à precipitação estreita de frente fria é denominada convecção alinhada:

- Ocorre imediatamente adiante do ar frio;
- Possui características de uma corrente de densidade;
- Está associada a queda de temperatura e salto de pressão;
- Pode estender-se como uma linha contínua por 100 km ou então estar quebrada em elementos da ordem de 10 km, o que está associado à instabilidade de cisalhamento horizontal na borda do jato de baixos níveis, adiante da frente.



*Figura 10*

#### Bandas de precipitação largas:

- Ampla zona de leve a moderada precipitação;
- Frequentemente com bandas organizadas de chuva de moderada a forte de algumas dezenas de km de largura;
- Associadas a circulações de mesoescala dentro da esteira quente;
- Existem dois tipos de bandas convectivas profundas:
  - No setor quente, são associadas a linhas de instabilidade;
  - No setor frio, correspondem às nuvens do tipo vírgula invertida de massa fria.

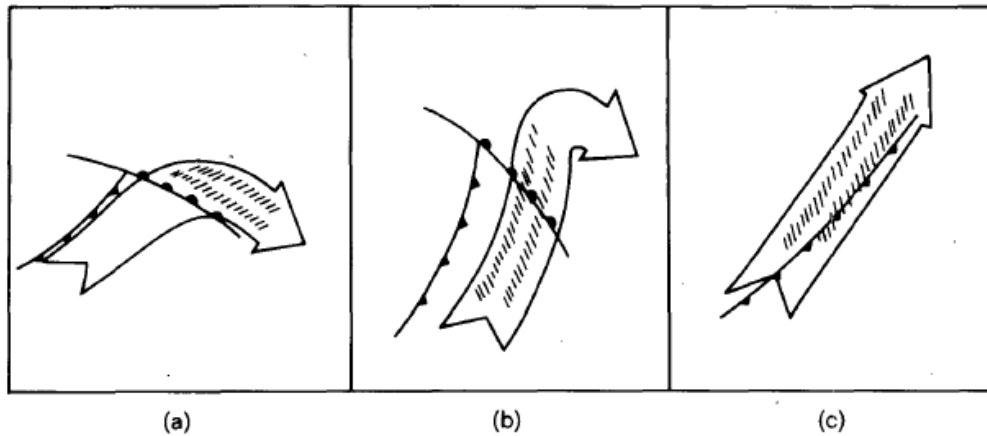


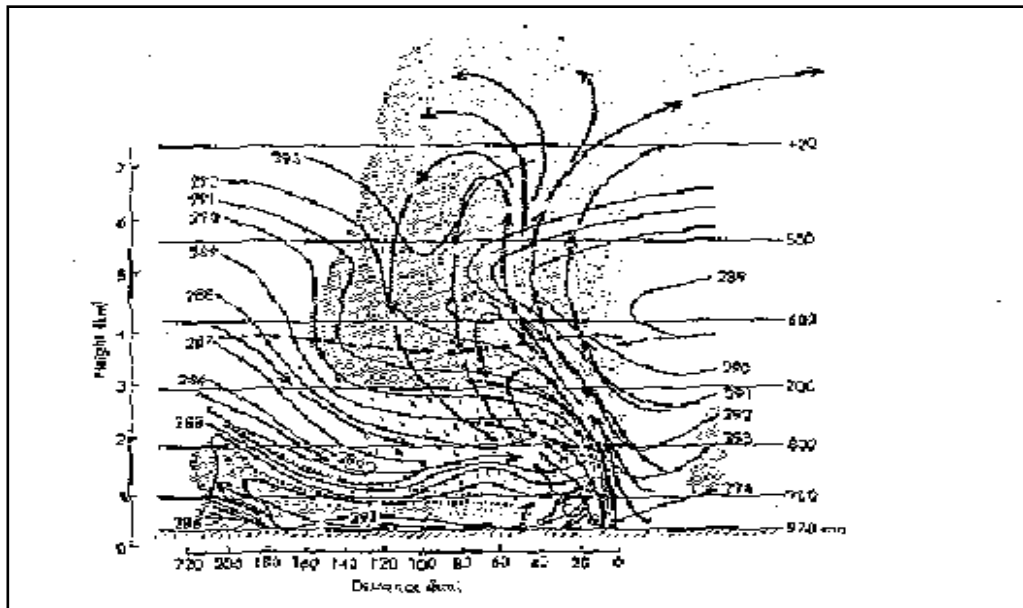
FIG. 11. Idealized representation of three types of configuration of *U*-type wide rainbands (hatched shading) in relation to the warm conveyor-belt flow (broad arrows). (a) and (b) represent forward-sloping ascent situations with warm frontal and prefrontal cold surge rainbands, respectively; (c) represents rearward-sloping ascent with cold frontal rainbands. Narrow rainband elements occur in the boundary layer along the surface cold front coexisting with the wide rainbands in (c).

## Sistemas convectivos de mesoescala

### Linhas de instabilidade de latitudes médias:

As linhas de instabilidade mais vigorosas não ocorrem em situações de convecção alinhada. As mais significativas estão associadas a linhas de células convectivas profundas que surgem no setor quente, a cerca de 200-300 km da frente fria.

O ar na esteira transportadora quente passa por um levantamento inclinado para frente adiante da frente fria em superfície e é alcançado pelo ar seco recém chegado de níveis superiores.



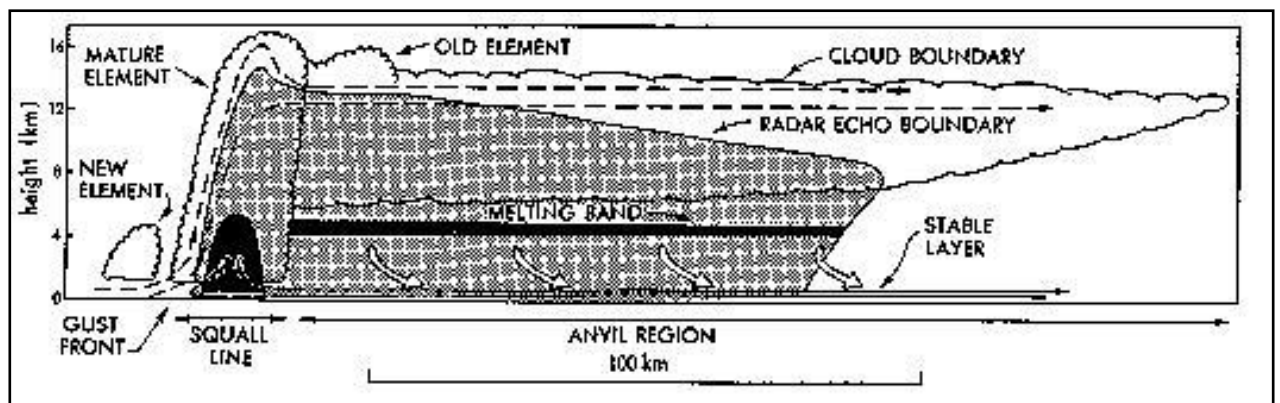
*Figura 12:* Seção transversal de uma linha de instabilidade.

- O ar úmido e quente adiante da tempestade se eleva abruptamente através da massa de ar condicionalmente instável;
- A precipitação que cai da corrente ascendente evapora no ar seco que entra na circulação da tempestade em altos níveis;
- O resfriamento por evaporação faz com que o ar desça por aumento de densidade e se esparrama dentro de uma mesoalta de pressão atrás da linha de tempestade;
- Assim, a borda dianteira do ar frio forma uma corrente de densidade ou pseudo frente fria, que ali dispara convecção renovada e controla a razão de propagação da linha de instabilidade como um todo.

Assim como nas tempestades individuais, as linhas de instabilidade disparam agrupamentos novos ao Norte, ou esquerda no HS (direita no HN), enquanto a dissipação ocorre no lado Sul, à direita no HS (esquerda no HN).

### Linhas de instabilidade tropicais:

- Possuem organização similar às linhas de latitudes médias, mas estando imersas num escoamento de leste, viajam para oeste.
- Em ambos os casos a linha tende a se deslocar por uma combinação de translação de células e por propagação discreta.
- Novas células de correntes ascendentes se formam disparadas por um escoamento tipo corrente de densidade (frente de rajada) na superfície, as quais crescem e tornam-se as células principais da linha antes de decair na retaguarda.
- O ar frio e seco, originado nos níveis médios adiante da frente, alimenta correntes descendentes e, ao atingir a superfície, parte se espalha para frente para produzir a frente de rajada, mas a maior parte fica para trás como uma cauda comprida de ar frio e estável na camada limite.



*Figura 13*

Sistemas convectivos de mesoescala não classificados como linhas de instabilidade:

São agrupamentos de nuvens em mesoescala, sendo a forma mais comum dos sistemas de mesoescala tropicais;

O modelo de agrupamento de nuvens deste tipo apresenta quatro estágios de ciclo de vida:

- *Estágio de formação:* células convectivas espalhadas são disparadas por alguma convergência de mesoescala em baixos níveis;
- *Estágio de intensificação:* mais células convectivas se formam enquanto que as células existentes crescem e se fundem levando a uma grande área contínua na qual as células convectivas estão interconectadas por precipitação estratiforme de intensidade moderada que cai da camada de bigorna que se espalha;
- *Estágio maduro:* mistura de precipitação convectiva e estratiforme, como antes, mas com a área de precipitação estratiforme tornando-se extensiva e contendo correntes ascendentes e descendentes de mesoescala;
- *Estágio de dissipação:* a razão de formação de novas células diminui, mas a área de nuvem estratiforme em altura persiste por algum tempo com chuva leve ou virga.

Estes quatro estágios duram aproximadamente um dia, com as circulações convectivas dominando os primeiros estágios e as circulações de mesoescala nos últimos estágios.

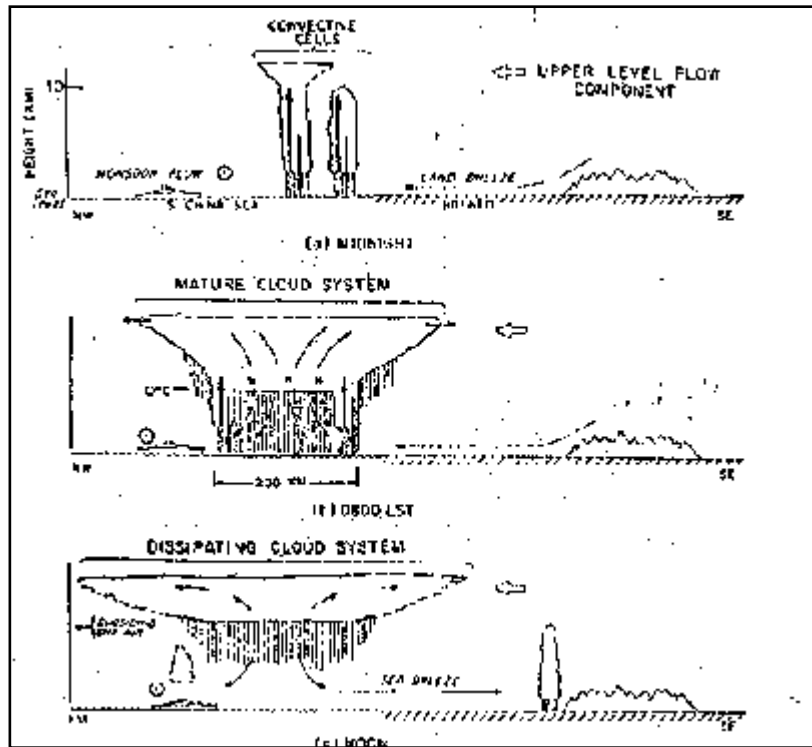


Figure 14

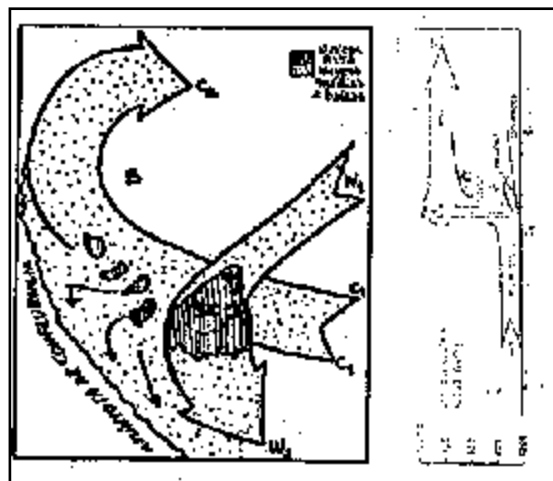


Figure 15



### Sistemas convectivos de latitudes médias:

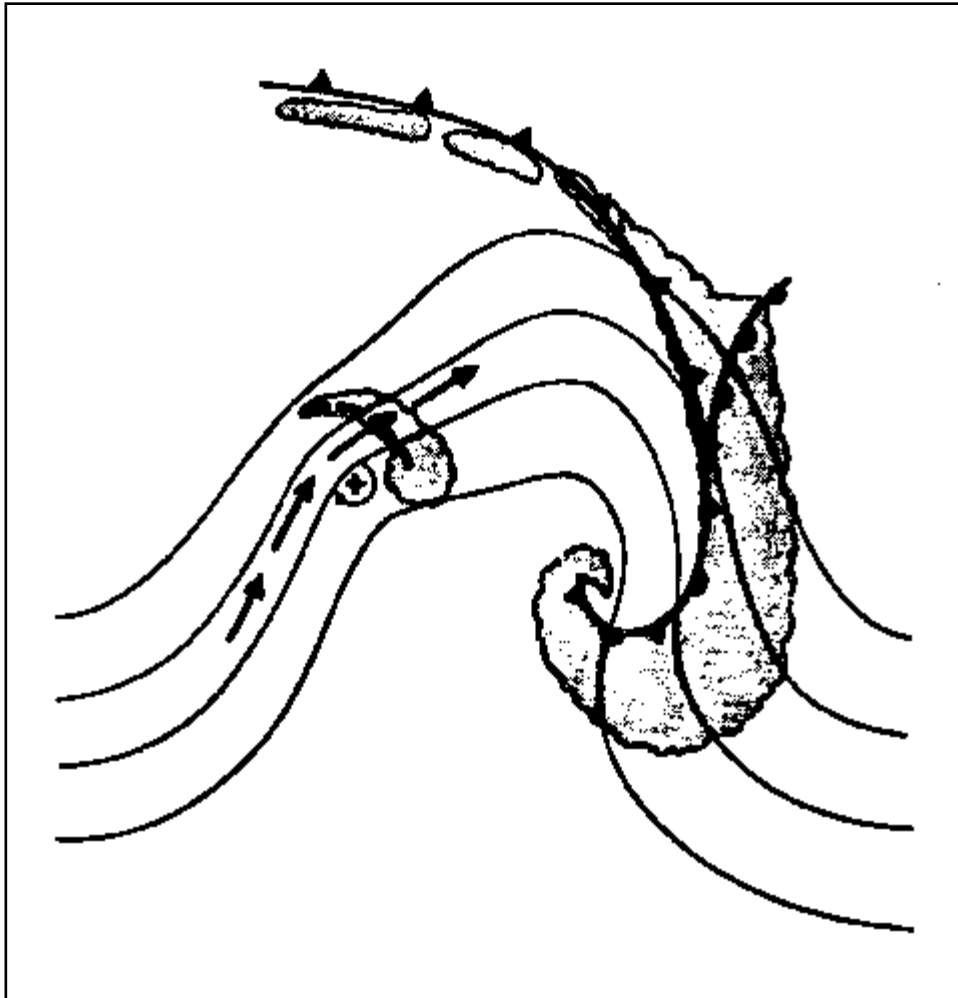
- São parecidos com os agrupamentos de nuvens tropicais, sendo denominados complexos convectivos de mesoescala nas latitudes médias.
- Possuem ciclo de vida como o descrito anteriormente;
- Sua característica visual mais distinta é a quase simétrica cobertura de nuvens;
- Existem critérios para identificar os CCM's, porém alguns critérios particulares excluem sistemas menores, mesmo que apresentem características e estrutura semelhantes aos CCM's;
- Apesar de serem dominados por circulações sub-sinóticas, seu desenvolvimento é fortemente influenciado pela forçante de escala sinótica.

### **Outros sistemas de latitudes médias**

#### Nuvens do tipo vírgula associadas a vórtices de massa fria:

- Invertida no HS;
- Diferenças confusas entre fenômenos frontais (baroclínicos) e convectivos:
  - As bandas de precipitação frontais usualmente têm caráter convectivo;
  - Por outro lado, fenômenos essencialmente convectivos tomam características frontais.
- Esse caráter é absolutamente evidente nas nuvens e precipitação em forma de vírgula invertidas associadas a poços frios dentro de correntes de ar polar;

- São geralmente de escala subsinótica, espaçando-se em intervalos de 1000 km quando ocorrem em forma múltipla;
- Desenvolvem-se com maior frequência sobre os oceanos no inverno, originando-se em regiões de aquecimento em baixos níveis e de convecção intensificada e adquirindo a padrão de vírgula ao amadurecer;
- Sistemas de nuvens em vírgula de escala subsinótica ocorrem em associação a baroclinicidade e ao mesmo tempo, instabilidade condicional ao longo de uma espessura considerável;
- Duas formas coexistem:
  - As baixas polares de intrusões polares extremamente frias sobre os oceanos quentes (costa da Noruega) nas quais a convecção é vigorosa e um mecanismo CISK parece ser a força impulsionadora mais importante;
  - Nuvens em forma de vírgula nas quais o levantamento inclinado baroclínico é a principal força que impulsiona o sistema (noroeste da Europa e dos EUA).
- Usualmente se desenvolvem próximo à borda dianteira de um poço frio atrás de um sistema frontal bem definido.



*Figura 16:* Representação esquemática da nuvem vírgula invertida, adaptada para o hemisfério sul. Fonte:

<http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/cliesp10a/virgula.html>

Nas figuras abaixo é mostrada a evolução de uma vírgula invertida em superfície (a) e altitude (b) no hemisfério sul, segundo Dereczynski (1994).

Parâmetro Dia	09/06 12 TMG	10/06 12 TMG	11/06 12 TMG	12/06 12 TMG	13/06 12 TMG
aspecto da nebl na imagem satélite	C1 	C1 C2 	C1+C2 	C1+C2 	C1+C2 
posição da frente fria	entre RJ e sul do ES	sul da BA			
tempo presente	C1: chv. e trv. em algumas estações	C1 e C2: chv. e trv. em algumas estações	C1+C2: chv. forte e trv. em diversas estações	C1+C2: chv. leve em poucas estações	C1+C2: céu claro na maior parte das estações
nuvens	C1: Cb/Ac/Ci	C1: St/Ac C2: Cu/Sc	C1+C2: Sc/Cu/Ac	C1+C2: Cu	
tendência da temperatura em 24 h	C1: +2°C	C1: -4°C C2: -2°C	C1+C2: +1°C	C1+C2: -2°C	C1+C2: +1°C
tendência da pressão em 24h:	C1: +1 hPa	C1: +5 hPa C2: +2 hPa	C1+C2: +2 hPa	C1+C2: +2 hPa	C1+C2: +1 hPa

Figura 17

Parâmetro Dia	09/06 12 TMG	10/06 12 TMG	11/06 12 TMG	12/06 12 TMG	13/06 12 TMG
Vento em 700 hPa	Cavado sobre o Paraguai.	Cavado desde Paraguai até RS.	Vórtice ciclônico 24 55/S/52W 3140 mgp.	Cavado 24S/42W 3150 mgp.	-
Vento em 850 hPa	Cavado sobre o Paraguai.	Cavado sobre SC.	Vórtice ciclônico 23°S/53°W.	Vórtice ciclônico 21.5°S/40°W.	-
Advecção térmica	Advecção fria nos níveis inferiores e médios no RS e Argentina.	Bifurcação da língua de adv. fria nos níveis inf. e médios. Máx. adv. fria do período em 700 hPa.	Máx. adv. que nos níveis sup. sobre a virgula invertida. Fraca adv. que em níveis inf.	Advecção quente sobre o distúrbio em níveis inferiores e superiores.	Advecção quente sobre o distúrbio em níveis inferiores e superiores.
Vorticidade relativa	Vorticidade ciclônica nos níveis inferiores sobre o Paraguai.	Vorticidade ciclônica nos níveis inferiores sobre o Paraguai.	Vorticidade ciclônica em todos os níveis. Máxima do período em altos níveis.	Vorticidade ciclônica em todos os níveis. Máx. do dia em altos níveis.	Vorticidade anticiclônica em níveis inferiores e ciclônica em níveis médios e superiores.
Divergência do fluxo de umidade em níveis inferiores	Região de conv. assoc. a frente fria.	Região de conv. desloc. p. Atlântico.	Núcleo de conv. assoc. a nuvem virgula invertida. Máx. do período.	Desloc. do núcleo de conv. para leste.	Prossegue desloc. do núcleo de conv. para leste.

Figura 18

Parâmetro Dia	09/06 12 TMC	10/06 12 TMC	11/06 12 TMC	12/06 12 TMC	13/06 12 TMC
Movimento vertical em 700 hPa	Ascendente sobre virgula invertida	Núcleo de mov. vertical ascendente sobre 25°S.	Núcleo de mov. vertical ascendente ao longo da costa.	Máximo de mov. vertical ascendente no período.	Núcleo de mov. vertical ascendente sobre Atlântico.
análise isentrópica (θ=305K)	-	Esteiras frias: a) desde o N da Argentina até MS e b) desde o NE da Argentina, até Atlântico e MG. Esteira quente no Atlântico.	Esteira fria desde o NE da Argentina, com giro ciclônico sobre o vórtice, prosseguindo como quente Esteira quente no Atlântico	Esteiras frias e quentes semelhantes ao dia anterior, porém deslocadas cerca de 10° para leste.	-

Figura 19

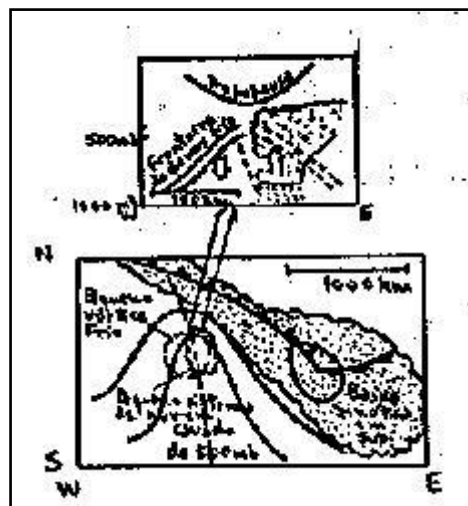
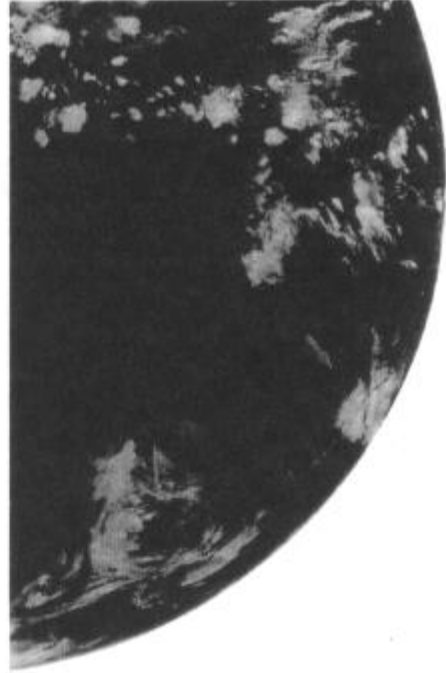


Figura 20



(a) 11/06/89 - 09:00 UTC



(b) 11/06/89 - 12:00 UTC



(c) 11/06/89 - 21:00 UTC



(d) 12/06/89 - 00:00 UTC

*Figura 21:* Sequência de imagens do satélite GOES-7 (canal IR) mostrando uma nuvem vírgula.

## **Referências**

Browning, K.A. 1986 Conceptual models for precipitation systems, *Weather and Forecasting*, 1, 23-41.

Dereczynski, C. P., 1994: Estudo de caso de uma nuvem vírgula invertida e a subsequente ocorrência de ventos fortes na Bacia de Campos. Tese de Mestrado/IAG/USP.

### Sites:

<http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/cliesp10a/virgula.html>