

# AGM5717

# Laboratório de Meteorologia

Pós-graduação – DCA (IAG/USP)

# Revisão de Escalas dos Movimentos

# Visão Geral

## Origem da palavra Sinótica

A palavra sinótica deriva do Grego “synoptikos”, significando “visão geral do todo”. Seu significado meteorológico foi ampliado com o tempo, implicando também, hoje em dia, “ao mesmo tempo” ou “simultâneo”.

A definição da palavra “sinótica” no Glossário de Meteorologia (Huschke, 1959) não menciona a extensão de área ou escala horizontal da rede de estações.

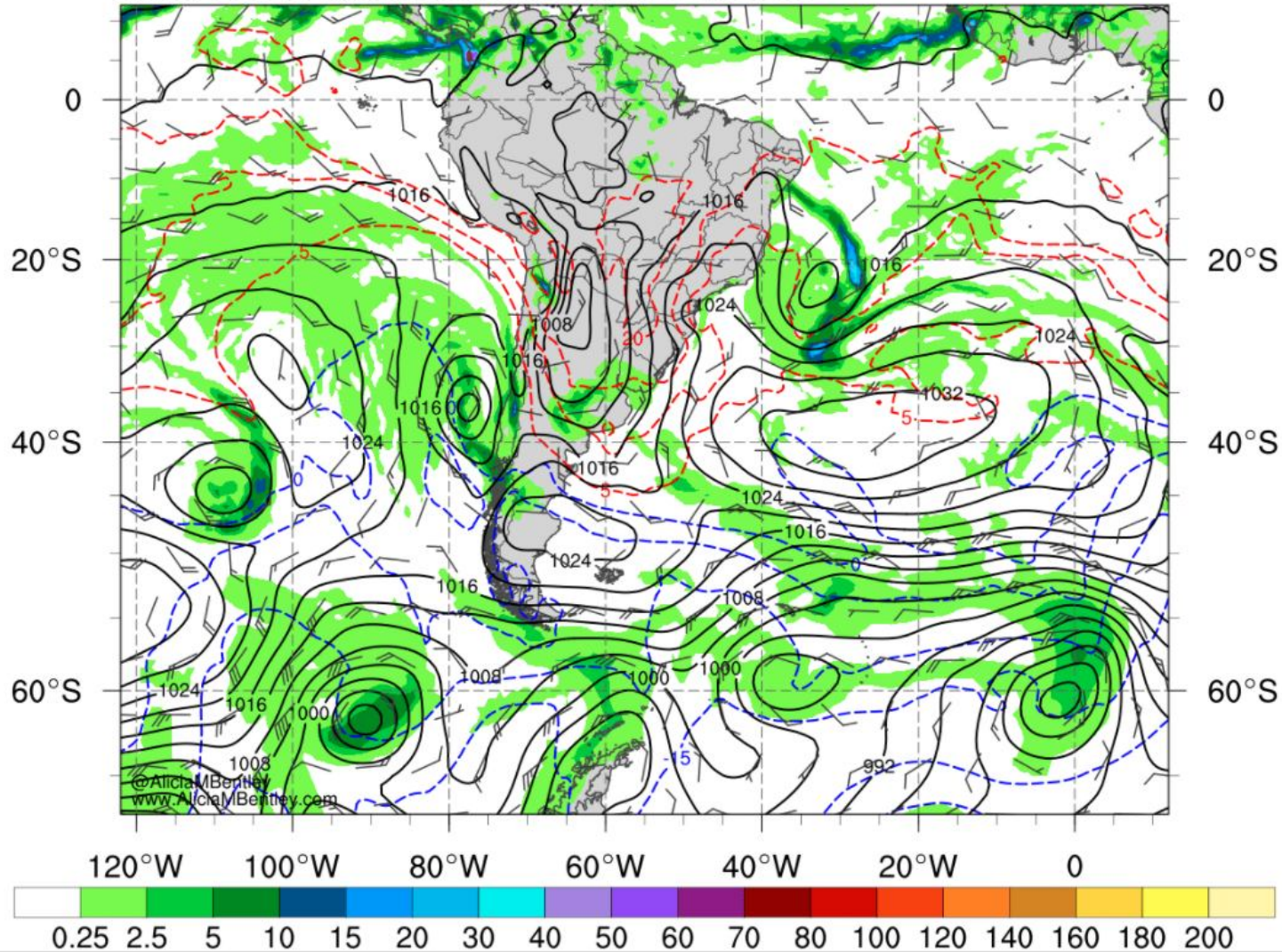
# Definições das Escalas

## – Escala Sinótica

- É a escala das frentes e ciclones estudados pelos primeiros cientistas noruegueses (1<sup>a</sup>. Guerra Mundial). A escala sinótica clássica é a escala de tempo e também do espaço resolvidas por observações feitas em grandes cidades europeias, que têm um espaçamento médio de cerca de 100 km. Daí, sistemas meteorológicos que têm escalas de algumas centenas de quilômetros ou mais e escalas de tempo de alguns dias são o que geralmente aceita-se como fenômenos de "escala sinótica".

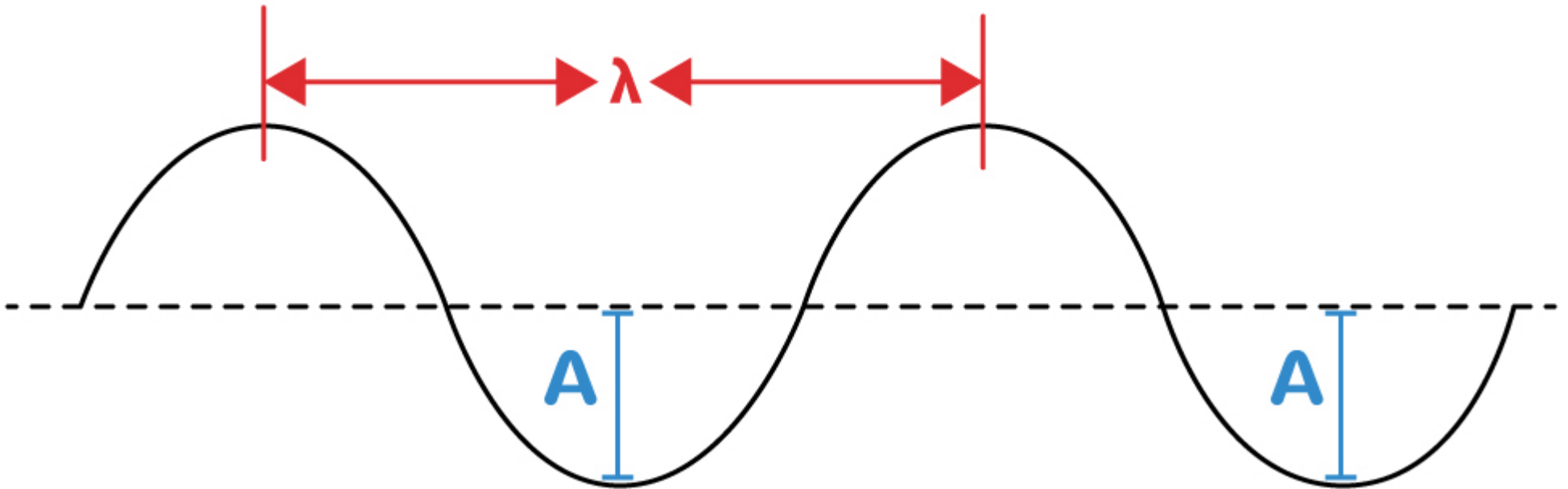
# Definições das Escalas

MSLP (black, hPa), precipitation (shaded, mm/6h), 850-hPa temperature (red/blue, C), 10-m wind (barbs, kt)  
Initialized: 1200 UTC 25 Aug 2020 | Forecast hour: 0 | Valid: 1200 UTC 25 Aug 2020



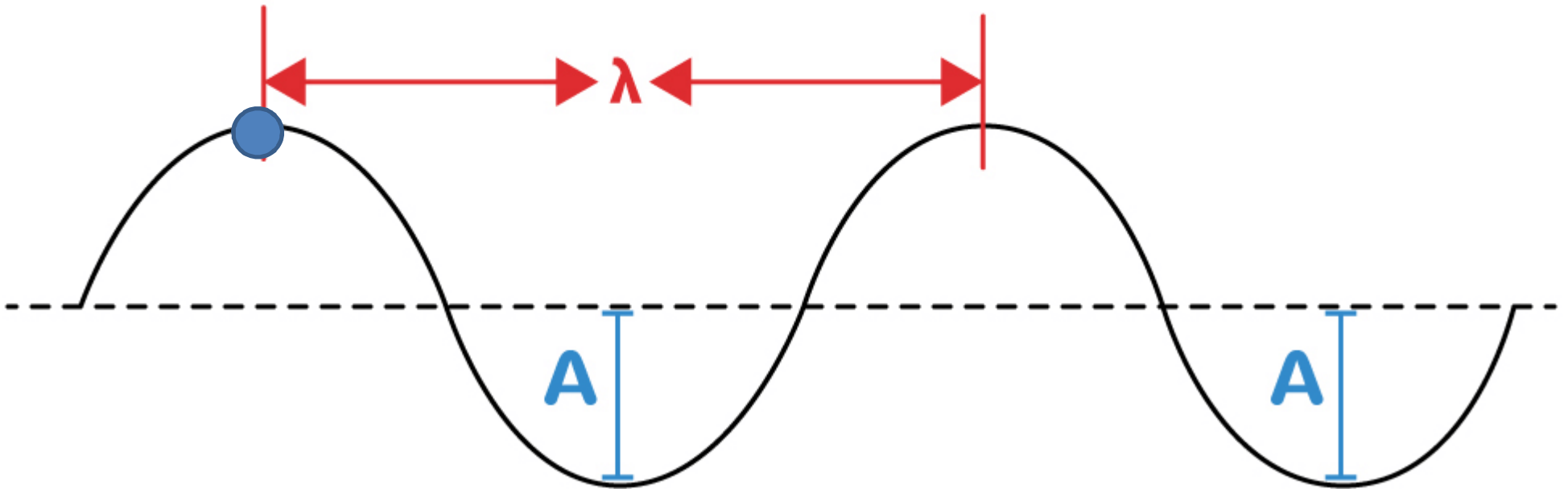
# Definições das Escalas

Quantos pontos de grade são necessários para “resolver” um comprimento de onda na atmosfera?



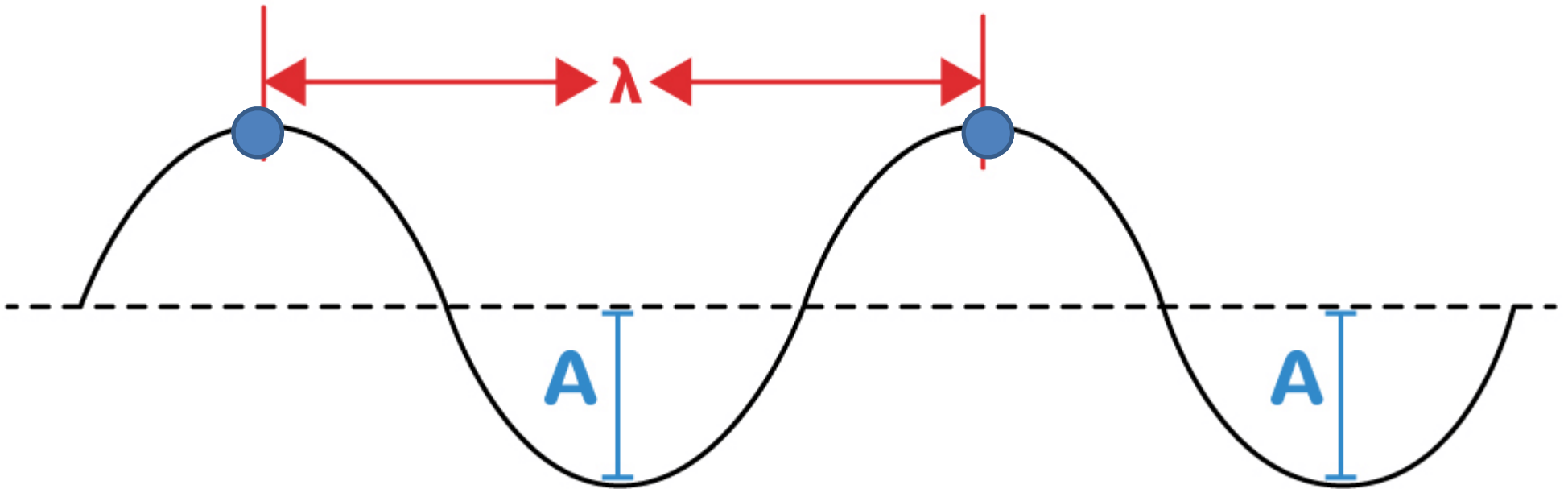
# Definições das Escalas

Quantos pontos de grade são necessários para “resolver” um comprimento de onda na atmosfera?



# Definições das Escalas

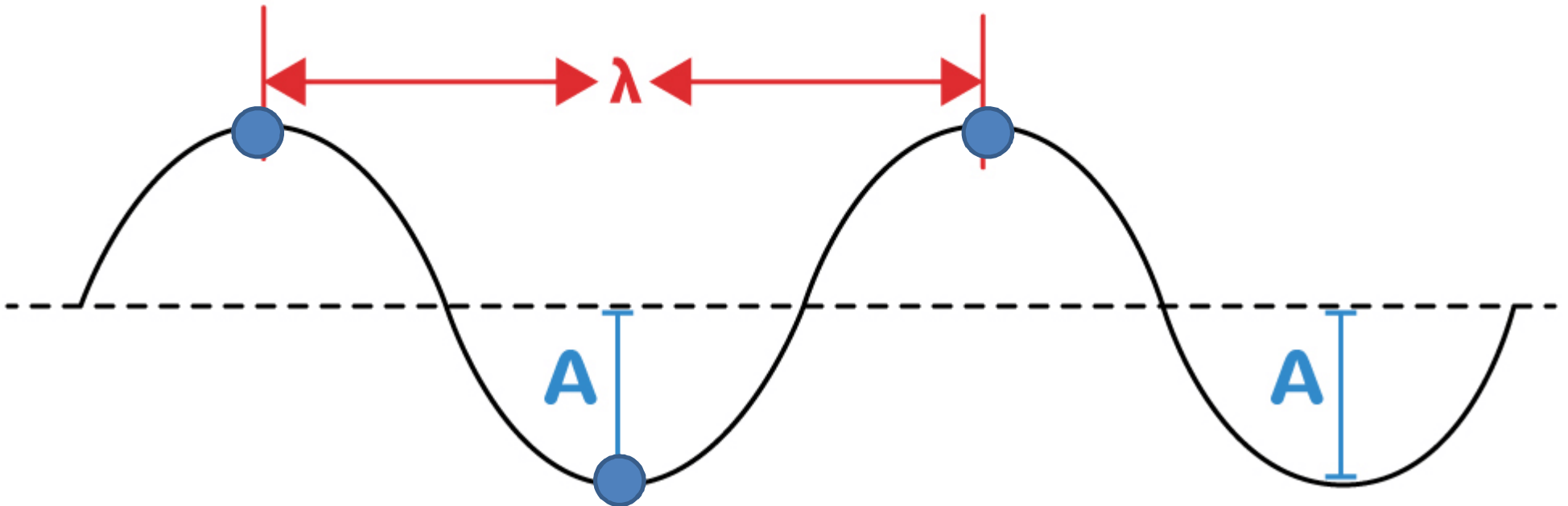
Quantos pontos de grade são necessários para “resolver” um comprimento de onda na atmosfera?





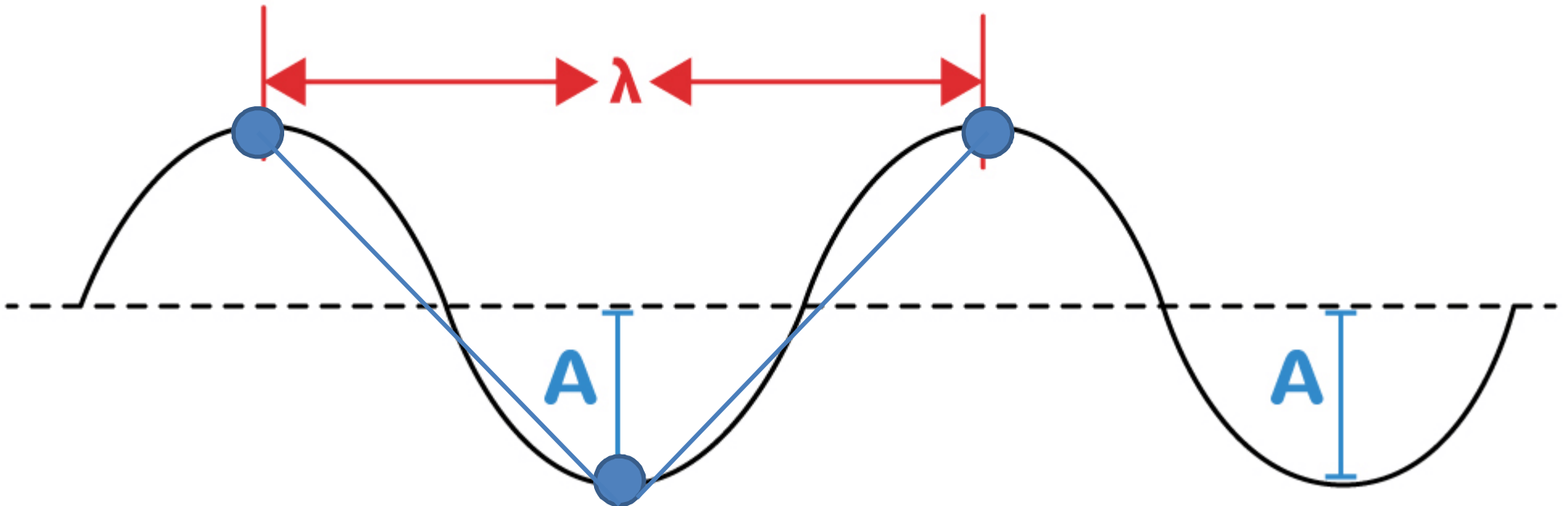
# Definições das Escalas

Quantos pontos de grade são necessários para “resolver” um comprimento de onda na atmosfera?



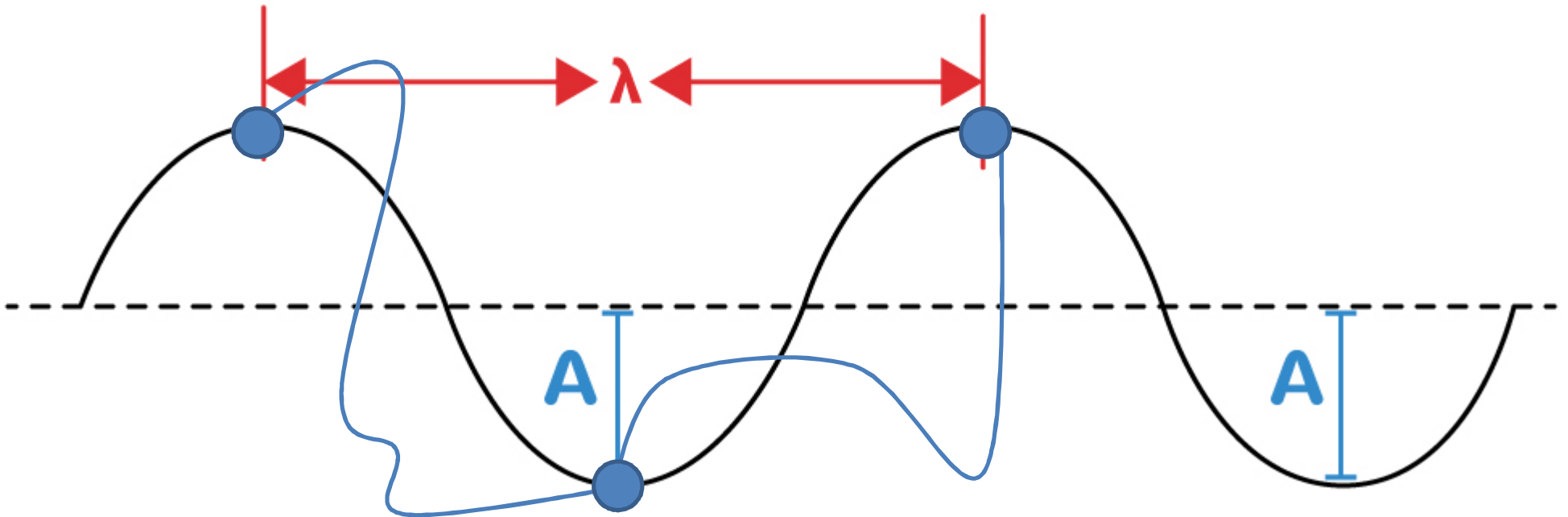
# Definições das Escalas

Quantos pontos de grade são necessários para “resolver” um comprimento de onda na atmosfera?



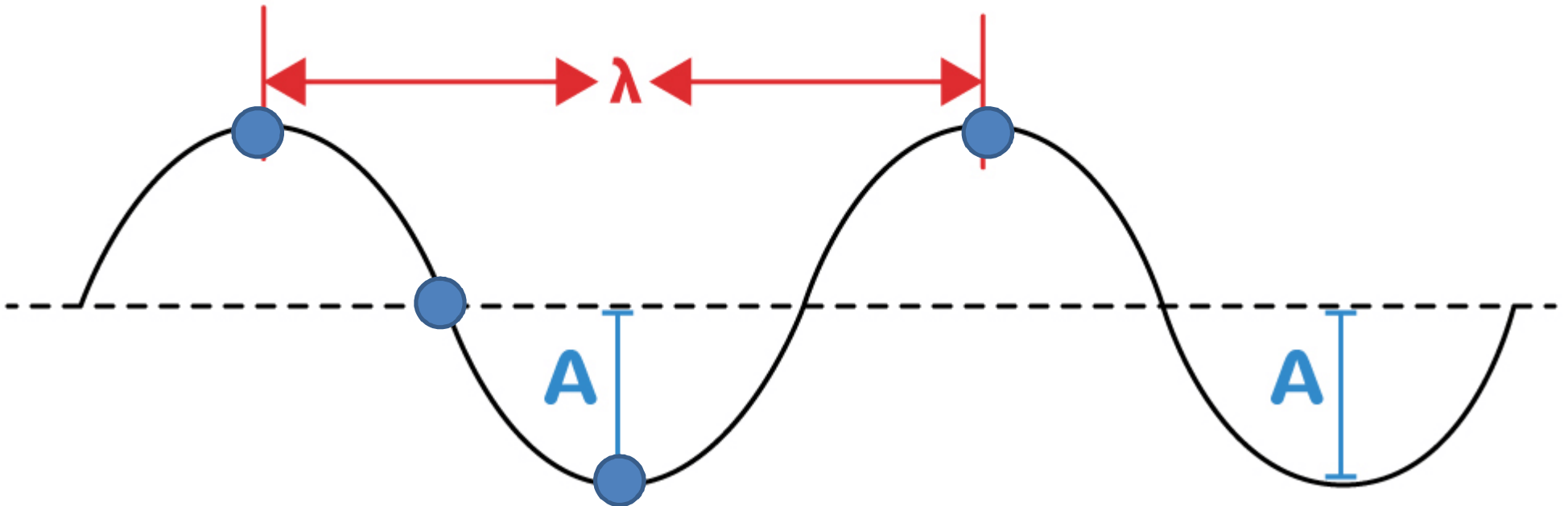
# Definições das Escalas

Quantos pontos de grade são necessários para “resolver” um comprimento de onda na atmosfera?



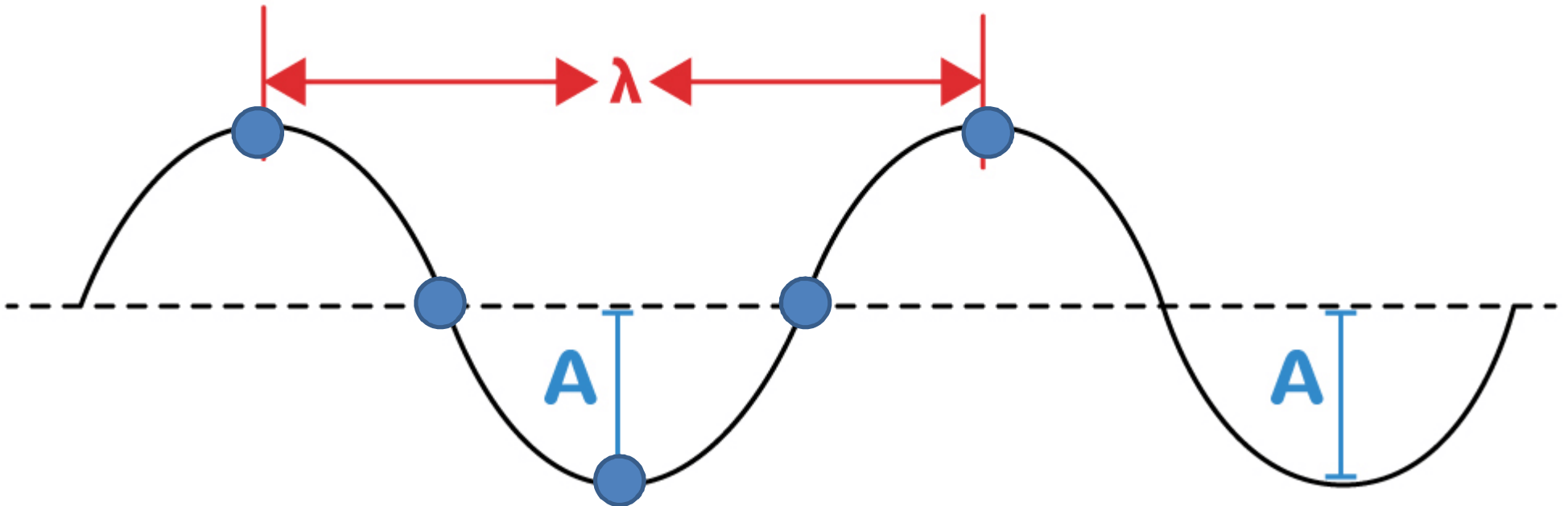
# Definições das Escalas

Quantos pontos de grade são necessários para “resolver” um comprimento de onda na atmosfera?



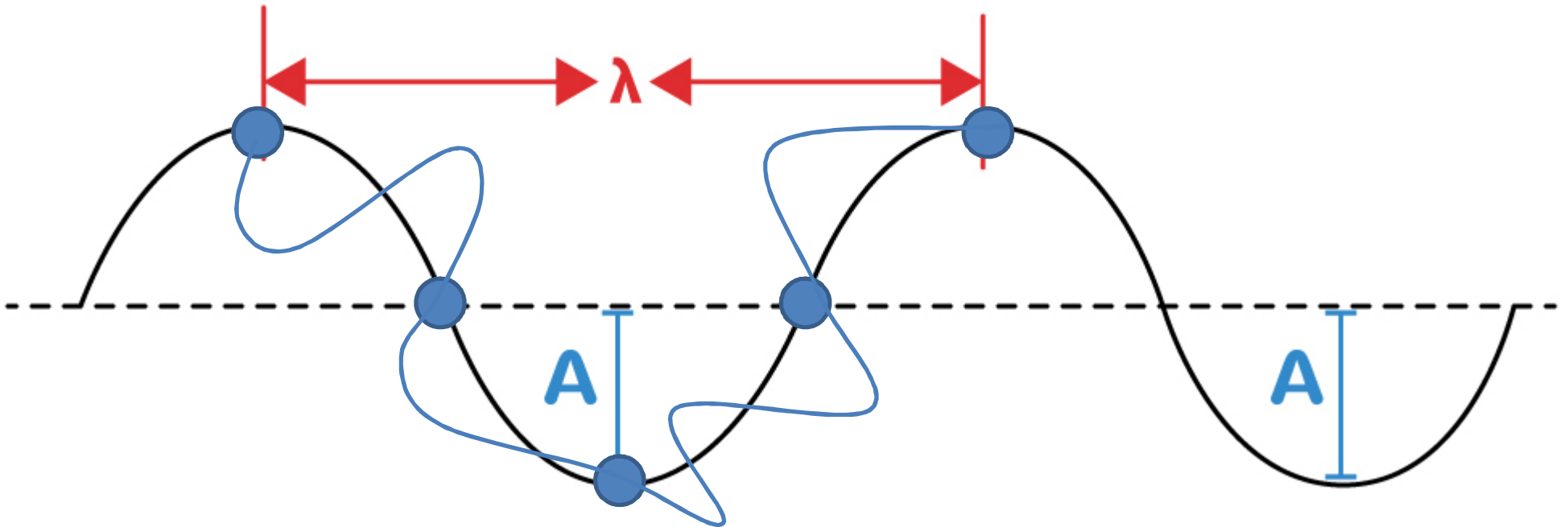
# Definições das Escalas

Quantos pontos de grade são necessários para “resolver” um comprimento de onda na atmosfera?



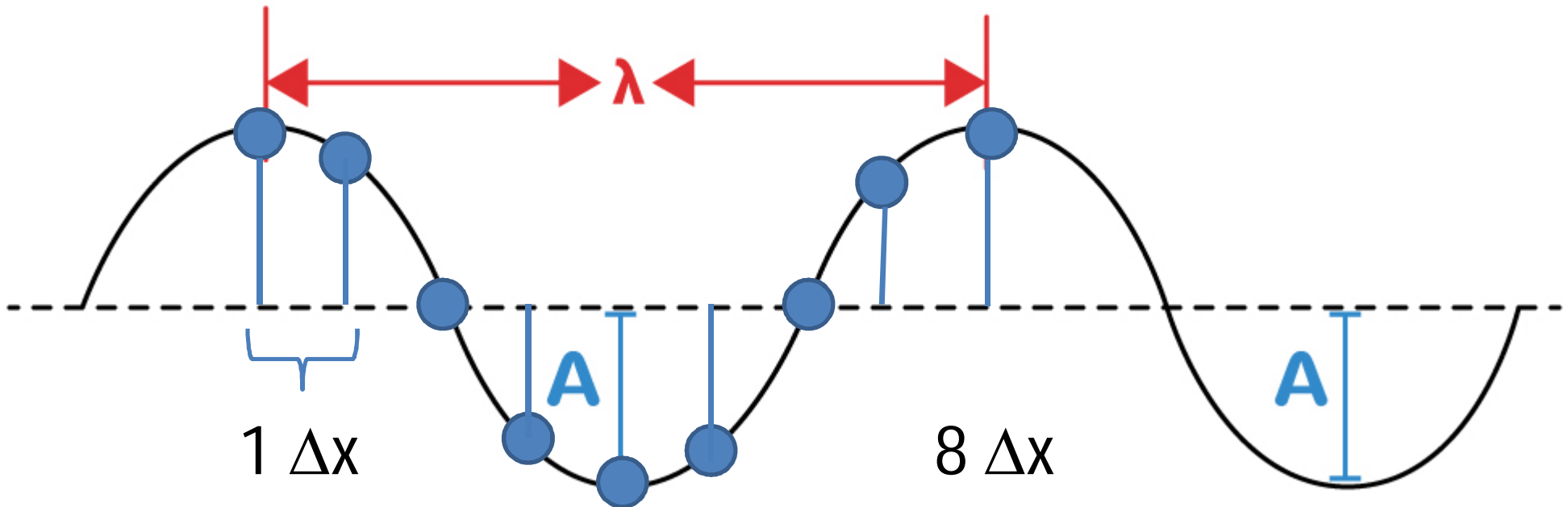
# Definições das Escalas

Quantos pontos de grade são necessários para “resolver” um comprimento de onda na atmosfera?



# Definições das Escalas

Quantos pontos de grade são necessários para “resolver” um comprimento de onda na atmosfera?



# Definições das Escalas

## – Cumulus

- Foi definido pelo advento da meteorologia por RADAR no final da década de 1940 para ser a escala dos ecos de tempestades e das células cumulus individuais. Tornou-se, na época, a segunda escala de pesquisa mais importante na meteorologia. De forma geral, esta escala é da ordem de 2 a cerca de 50 km e escalas temporais de alguns minutos a várias horas.



# Energia Cinética dos Movimentos

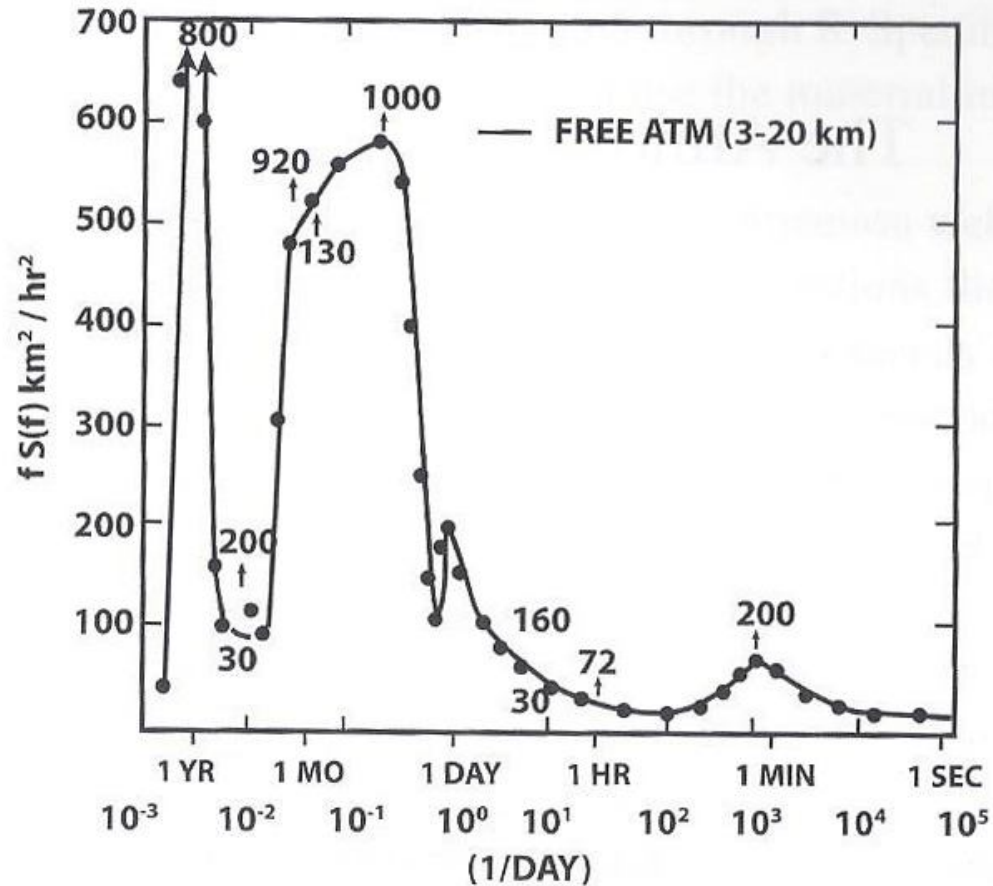


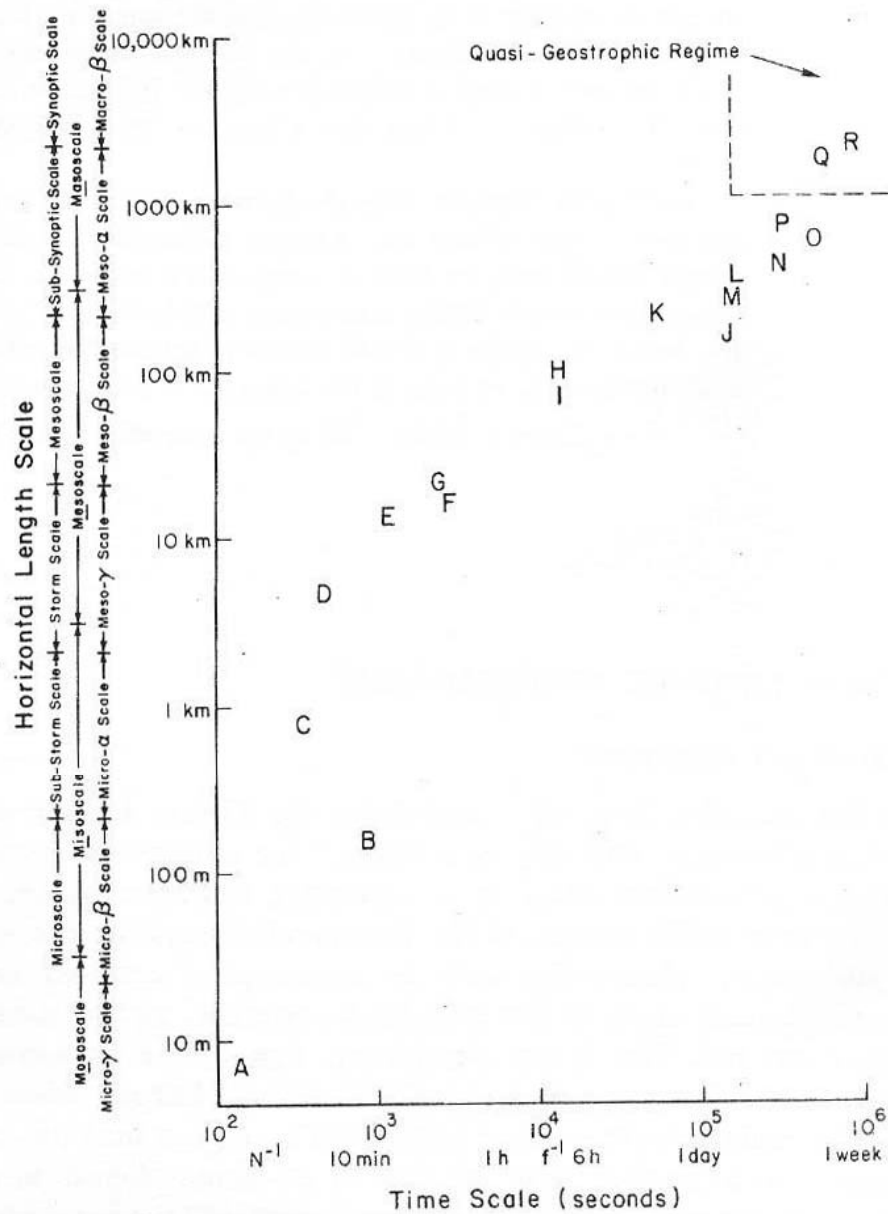
Figure 1.1. Average kinetic energy spectra (spectral density) of the free-atmospheric zonal wind as a function of frequency. Numbers show maximum kinetic energy at particular periods. After Vinnichenko (1970).

# Definições das Escalas

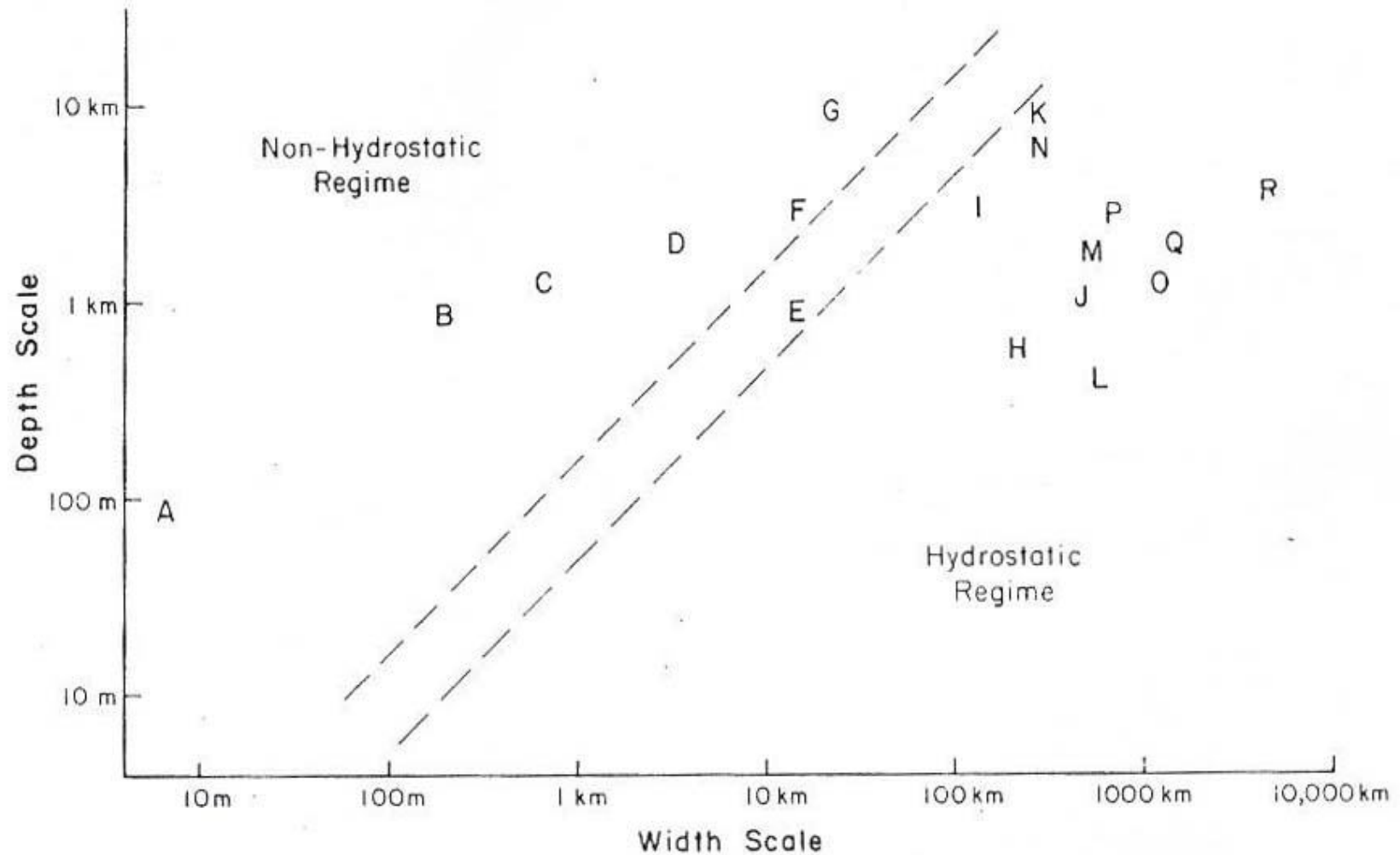
- Mesoescala (definição original)
  - Cunhado por Lidga (1951), mesoescalas são as "Escalas do Meio ou Média", ou seja, situadas entre a escala sinótica e a escala cumulus . Esta definição original, assim, se refere aos fenômenos meteorológicos de escalas intermediária entre o que foi pensado inicialmente ser as duas "energias primárias" contendo escalas de cumulus e escala sinótica. A definição moderna de mesoescala é muito mais robusta.

# Definições das Escalas

- Mesoescala (definição moderna)
  - Orlanski (1975) propôs um novo conjunto de escalas (ignorando os termos sinótica e cumulus), que incluem a micro, a meso e a macro escalas. Todas as três definições ganharam ampla aceitação a partir de então, apesar de existir uma proposta ainda mais recente por Fujita (1981). A definição de "mesoescala" de Orlanski é para escalas entre 2 km e 2000 km. Assim, escalas maiores que 2000 km são "macroescala" e escalas menores que 2 km são "microescala" .

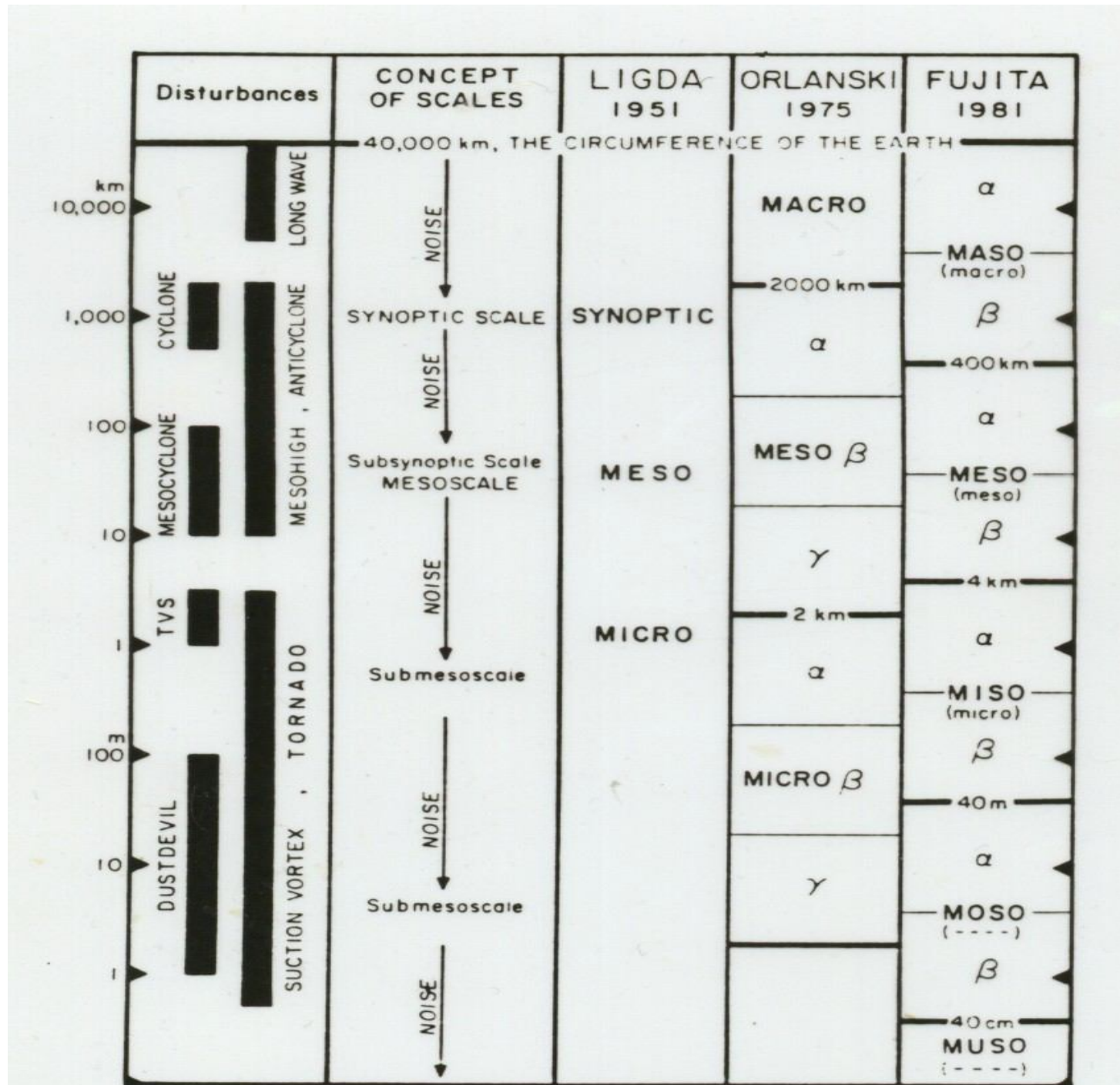


**Figure 1.1** Horizontal-length scales and time scales for the following atmospheric phenomena: A, dust devils; B, tornadoes and waterspouts; C, cumulus clouds; D, downbursts; E, gust fronts; F, mesocyclones; G, thunderstorms; H, sea/land/lake breezes, mountain-valley circulations, and meso-highs and meso-lows; I, precipitation bands; J, coastal fronts; K, mesoscale convective systems; L, the low-level jet; M, the dryline; N, "bombs" and tropical cyclones; O, upper-level jets; P, surface fronts; Q, extratropical cyclones and anticyclones; and R, troughs and ridges in the baroclinic westerlies.



**Figure 1.2** Depth and width scales for the atmospheric phenomena shown in Fig. 1.1. (By *width* we mean the characteristic horizontal scale; some features such as fronts are elongated and therefore are characterized by two different length scales. In this case we refer to the longer of the two scales as the *width*.)

# Mesoescala ao Longo dos Anos

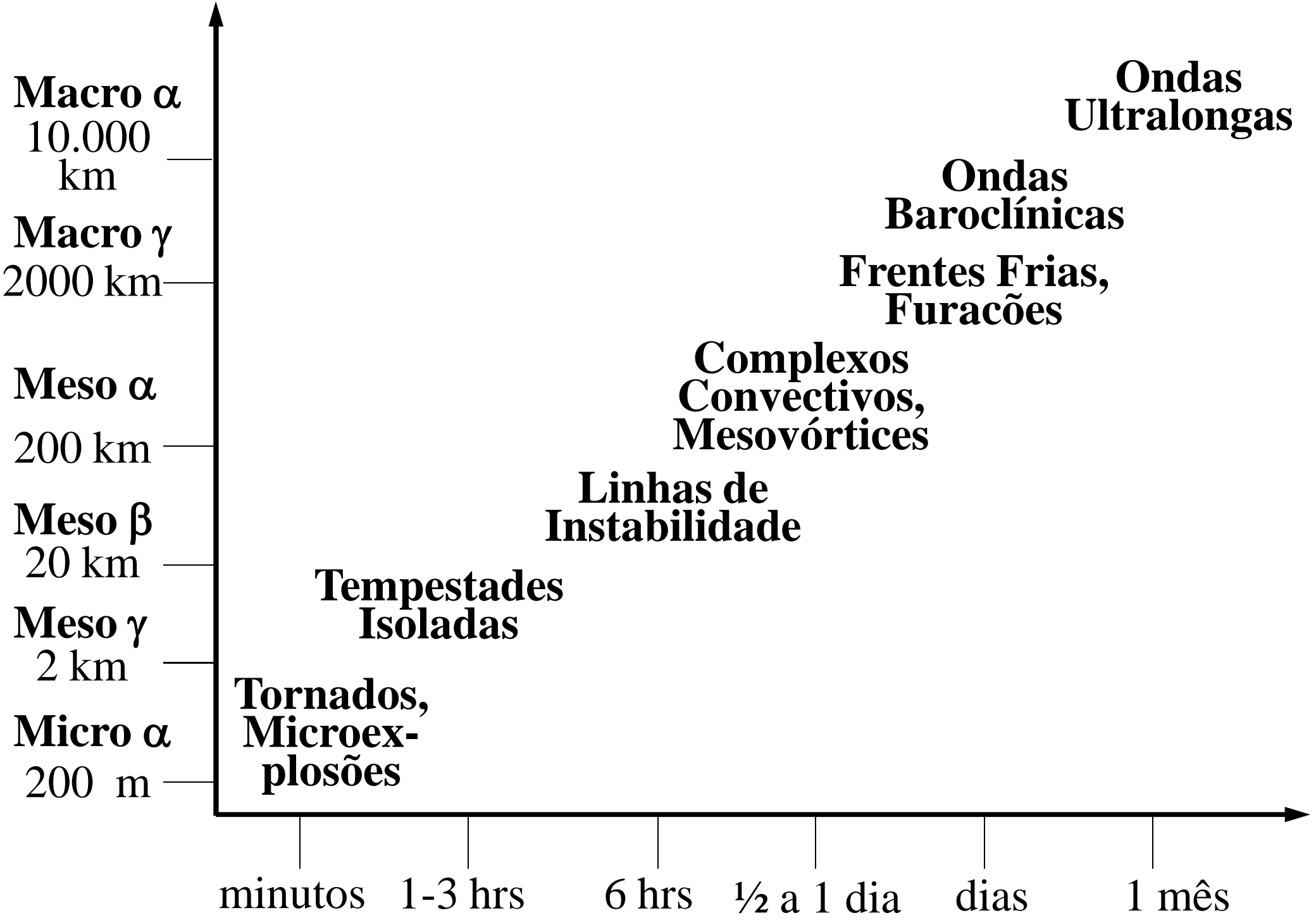


# Orlanski – BAMS (1975)

SCALE DEFINITION				$\frac{T_s}{L_s}$	1 MONTH $(\beta L_R)^{-1}$	DAY $(t)^{-1}$	1 HOUR $(\frac{g}{\theta} \frac{d\theta}{dx})^{-1/2}$	1 MINUTE $(\frac{g}{H})^{-1/2} (\frac{L}{u})$	1 SEC		
MACRO-SCALE	MACRO-SCALE	MACRO-SCALE	MACRO-SCALE	10,000 KM	Standing waves	Ultra long waves	Tidal waves			MACRO or SCALE	
	A										
	B			2,000 KM	Baroclinic waves					MACRO $\beta$ SCALE	
INTERMEDIATE SCALE		A									
		B		200 KM		Fronts and Hurricanes				MESO or SCALE	
		C									
	MESO-SCALE		MESO-SCALE	20 KM		Nocturnal low level jet	Squall lines	Inertial waves	Cloud clusters	Min. & Lake Disturbances	MESO $\beta$ SCALE
MESO-SCALE		D									
				2 KM			Thunderstorms	I.G.W.	C.A.T.	Urban effects	MESO $\gamma$ SCALE
				200 M			Tornadoes	Deep convection	Short gravity waves		MICRO or SCALE
				20 M			Dust devils	Thermals	Wakes		MICRO $\beta$ SCALE
									Plumes		
									Roughness		MICRO $\gamma$ SCALE
									Turbulence		
JAPANESE NOMENCLATURE	EUROPEAN NOMENCLATURE	G.A.T.E.	U.S.A. NOMENCLATURE	C.A.S	CLIMATOLOGICAL SCALE	SYNOPTIC AND PLANETARY SCALE	MESO SCALE	MICRO-SCALE		PROPOSED DEFINITION	

FIG. 1. Scale definitions and different processes with characteristic time and horizontal scales.

# Divisão Racional de Escalas Espaço-Temporais Segundo Orlandski (1975)





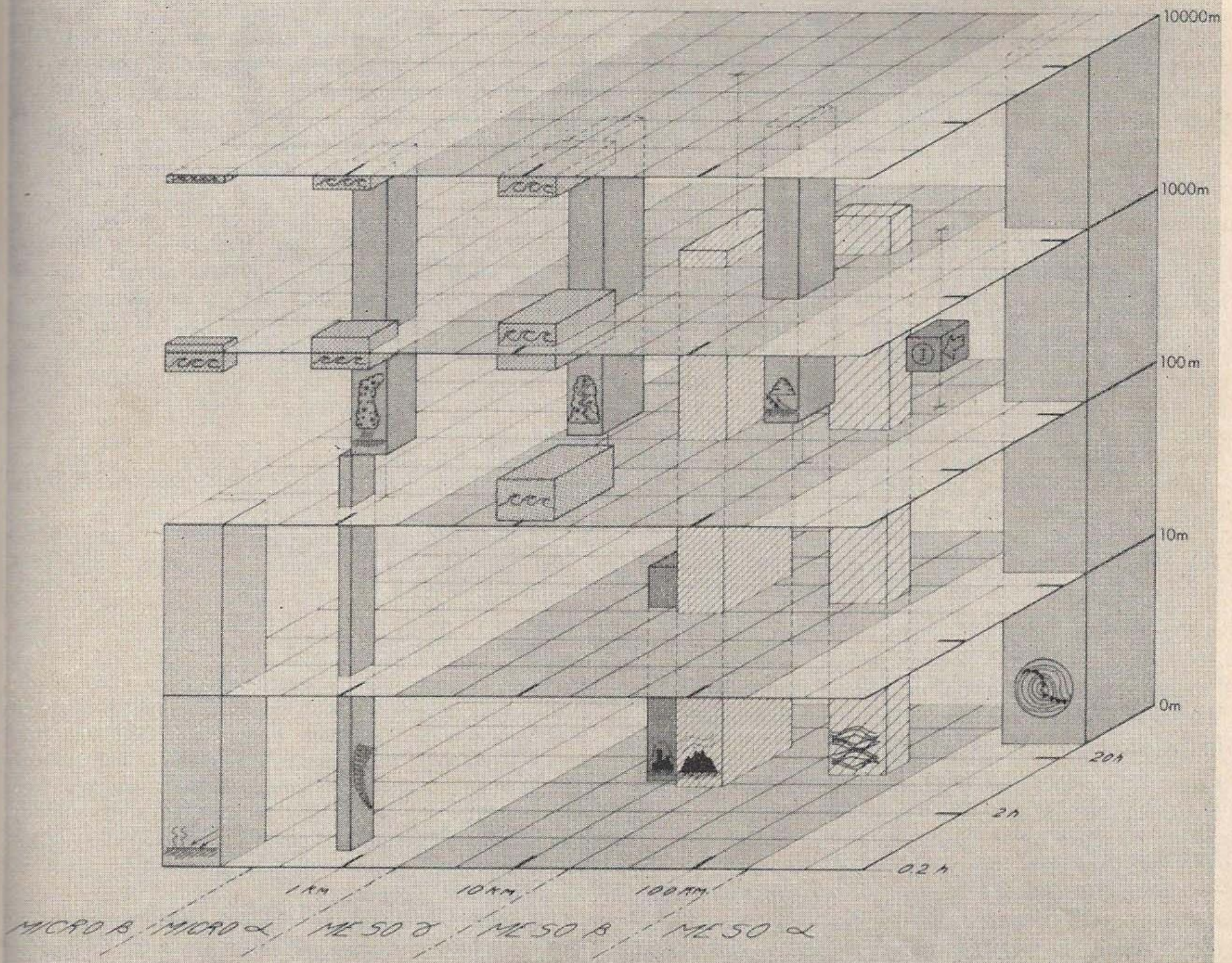


FIG. 2. The meteorological log scale frame.

# Em RESUMO: Na Definição de Mesoescala

- Vários esquemas de classificação para as escalas dos fenômenos atmosféricos têm sido propostos

- Os esquemas são baseados em:

Observações: Escalas Espaciais  
Escalas Temporais

Teoria: Escalas e tipos de instabilidade  
(i.e., estática, inercial, baroclínica)

Aplicabilidade de condições de balanço  
(i.e. geostrófico, hidrostático)

- Escoamento de Mesoescala, em boa parte, é:

- Ageostrófico
- Não hidrostático

$L_H$	Lifetime	Stull (1988)	Pielke (1984)	Orlanski (1975)	Thunis and Bornstein (1996)	Atmospheric Phenomena
10 000 km	1 month	Macro- $\alpha$	Synoptic Regional	Macro- $\alpha$	Macro- $\alpha$	General circulation, long waves
				Macro- $\beta$	Macro- $\beta$	Synoptic cyclones
2000 km	1 week	Meso	Meso	Meso- $\alpha$	Macro- $\gamma$	Fronts, hurricanes, tropical storms, short cyclone waves, mesoscale convective complexes
200 km	1 day			Meso- $\beta$	Meso- $\beta$	Mesocyclones, mesohighs, supercells, squall lines, inertia-gravity waves, cloud clusters, low-level jets, thunderstorm groups, mountain waves, sea breezes
20 km	1 h			Meso- $\gamma$	Meso- $\gamma$	Thunderstorms, cumulonimbi, clear-air turbulence, heat island, macrobursts
2 km		Micro	Micro			
200 m	30 min			Micro- $\alpha$	Meso- $\delta$	Cumulus, tornadoes, microbursts, hydraulic jumps
20 m	1 min			Micro- $\beta$	Micro- $\beta$	Plumes, wakes, waterspouts, dust devils
2 m	1 s	Micro- $\delta$		Micro- $\gamma$	Micro- $\gamma$	Turbulence, sound waves
				Micro- $\delta$		

# Portanto, numa visão geral:

- Definições de Escalas
  - Mesoescala (moderna)
    - Orlanski divide a “mesoescala” em três “submesoescalas”:
      1. Meso -  $\gamma$ : 2-20 km
      2. Meso -  $\beta$ : 20-200 km
      3. Meso -  $\alpha$ : 200-2000 km

# Visão Geral

Verbetes MESOESCALA no Glossário de Meteorologia da A. M. Society

- Pertencente a fenômenos atmosféricos com escalas horizontais que variam de algumas a várias centenas de quilômetros, incluindo tempestades, linhas de instabilidade, frentes, bandas de precipitação em ciclones tropicais e extratropicais e sistemas meteorológicos gerados topograficamente, como ondas de montanha e brisas marítimas e terrestres.
- De uma perspectiva dinâmica, este termo se refere a processos com escalas de tempo que variam do inverso da frequência de Brunt-Väisälä a um dia pendular, abrangendo convecção úmida profunda e todo o espectro de ondas inércio-gravitacionais, mas parando antes dos fenômenos de escala sinótica, os quais têm números de Rossby menores que 1.

# Visão Geral

O número de Rossby é frequentemente usado para separar escala sinótica e grande escala das escalas inferiores:

$$R_o = \frac{U}{fL}$$

onde  $U$  é a escala de velocidade,  $f$  é o parâmetro de Coriolis e  $L$  é a escala de comprimento horizontal. Este número desempenha um papel fundamental na definição do regime da dinâmica dos fluidos geofísicos em grande escala. Fluxos em grande escala são definidos como aqueles que são significativamente influenciados pela rotação da terra e com  $L$  suficientemente grande para  $R_o$  ser da ordem de um ou menos (por exemplo, fluxos com número de Rossby suficientemente pequeno estão em equilíbrio geostrófico).

OBS.: Para tornados, por outro lado,  $R_o$  deve ser muito grande (~1000).

# Significância Física de Mesoescala

- Duas Categorias Maiores de Balanço Dinâmico de Forças Dominam a Mesoescala:
  1. Hidrostático:
    - Gravidade versus Gradiente de Pressão
  2. Inercial:
    - a) Geostrófico (Gradiente Horizontal de Pressão versus efeito de Coriolis)
    - b) Ciclostrófico (Gradiente de Pressão versus Inércia Rotacional)
    - c) Gradiente (Gradiente Horizontal de Pressão versus todas as forças inerciais)

# Eq. Mov. Vertical

$$\frac{dw}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g + \vec{F}_z + (2\Omega \cos \phi)u.$$

# Significância Física de Mesoescala

Duas categorias maiores de BALANÇO de forças resultam para a mesoescala:

Hidrostático

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = g$$

gravidade vs. FGP vertical

Inercial

Sistema de Coordenadas Naturais (para escoamento // a  $\phi$  e  $R = \text{cte}$ )

(geostrófico |  $R| = \infty$ )

$$-\frac{\partial \phi}{\partial n} = fV \quad 0 = -\frac{\partial \phi}{\partial s}$$

Coriolis vs. FGP Horizontal

(inercial)

$$\frac{V^2}{R} = -fV \quad 0 = -\frac{\partial \phi}{\partial s}$$

Coriolis vs. Força Centrífuga

(ciclostrófico)

$$-\frac{\partial \phi}{\partial n} = \frac{V^2}{R} \quad 0 = -\frac{\partial \phi}{\partial s}$$

FGP Hor. vs. Força Centrífuga

(gradiente)

$$-\frac{\partial \phi}{\partial n} = \frac{V^2}{R} + fV \quad 0 = -\frac{\partial \phi}{\partial s}$$

FGP Hor. vs. Forças Centrífuga e de Coriolis



# Perturbações do Balanço

- Para balanço estável: as perturbações iniciam oscilações que resultam em ondas
- Para balanço instável: perturbações produzem um distúrbio que cresce com o passar do tempo

## Perturbações do Balanço Hidrostático

Perturbações do estado de balanço estável levam a ondas de gravidade (flutuação)



Velocidade de fase horizontal:

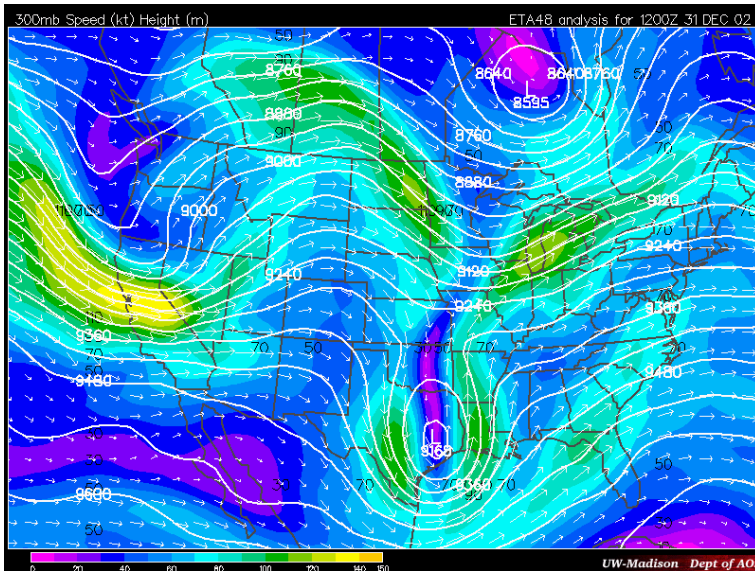
$$c_g = \frac{N}{k} = \frac{L_z}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z}}$$

Perturbações do balanço instável levam à convecção



## Perturbações do Balanço Inercial

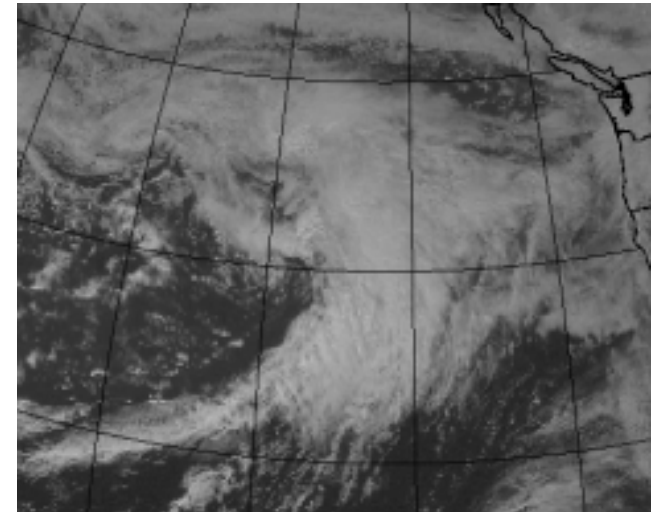
Perturbações do estado de balanço estável levam a ondas inerciais (por exemplo: Ondas de Rossby)



Velocidade de fase horizontal:

$$c_R = \frac{f}{k} = \frac{f L_x}{2\pi}$$

Perturbações do estado de balanço instável levam a distúrbios crescentes (por exemplo: instabilidade baroclínica e ciclones)



Na Natureza, ambos os balanços, hidrostático e inercial, estáveis e instáveis existem e o escoamento é perturbado de diversas maneiras.

**E qual é o resultado??**

Depende de qual ajustamento predomina...

**EXEMPLO:**

Na Mesoescala, podemos estimar qual ajustamento dinâmico predominará pela razão das velocidades de fase das ondas de gravidade e onda inercial:

$$R_o = \frac{c_g}{c_R} = \frac{L_z N}{L_x f} \quad \text{Raio de Deformação de Rossby}$$

## O que é o Raio de Deformação de Rossby?

É a escala na qual há resposta igual para as ondas inerciais e de gravidade

Esta situação é quando o Raio de Rossby é dado por:

$$R_o = 1$$

$$L_x = L_R = \frac{L_z N}{f} = \frac{HN}{f}$$

Em latitudes médias:  $f \sim 10^{-4} \text{ s}^{-1}$

$H \sim 10 \text{ km}$  (profundidade do distúrbio)

$N \sim 1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$

Comprimento de Onda para o Raio de Deformação de Rossby = 1  
é aproximadamente 1000 km

# METEOROLOGIA DE MESOESCALA

## Escalas baseadas em Mecanismos Físicos:

Pequenas escalas ( $L_x \ll L_R$ )

- Tendência de domínio das relações hidrostáticas, sendo a força de gravidade a força restauradora dominante para perturbações

Grandes escalas ( $L_x \gg L_R$ )

- Tendência de domínio das relações geostróficas, sendo a força de Coriolis a força restauradora dominante para perturbações

OBS.: O Raio de Rossby para um vórtice simétrico em relação a seus eixos, com velocidade do vento rotacional “V” e raio “R”, é:

$$L_R = \frac{c_g}{(f + \zeta)^{\frac{1}{2}} \left( f + \frac{2V}{R} \right)^{\frac{1}{2}}}$$

# *Meso* – $\gamma$

- Escalas de 2-20 km ( $\ll$  Raio de Rossby)
- Distúrbios caracterizados por *Ondas de Gravidade* (*Flutuação ou Buoyancy*) (condições estáveis) ou *Convecção Profunda* (condições instáveis).
- Efeito de Coriolis geralmente desprezível, embora efeitos inerciais locais possam surgir para alterar o caráter dos distúrbios (exemplo: tempestades rotativas, tornados, rodamosinhos, etc).

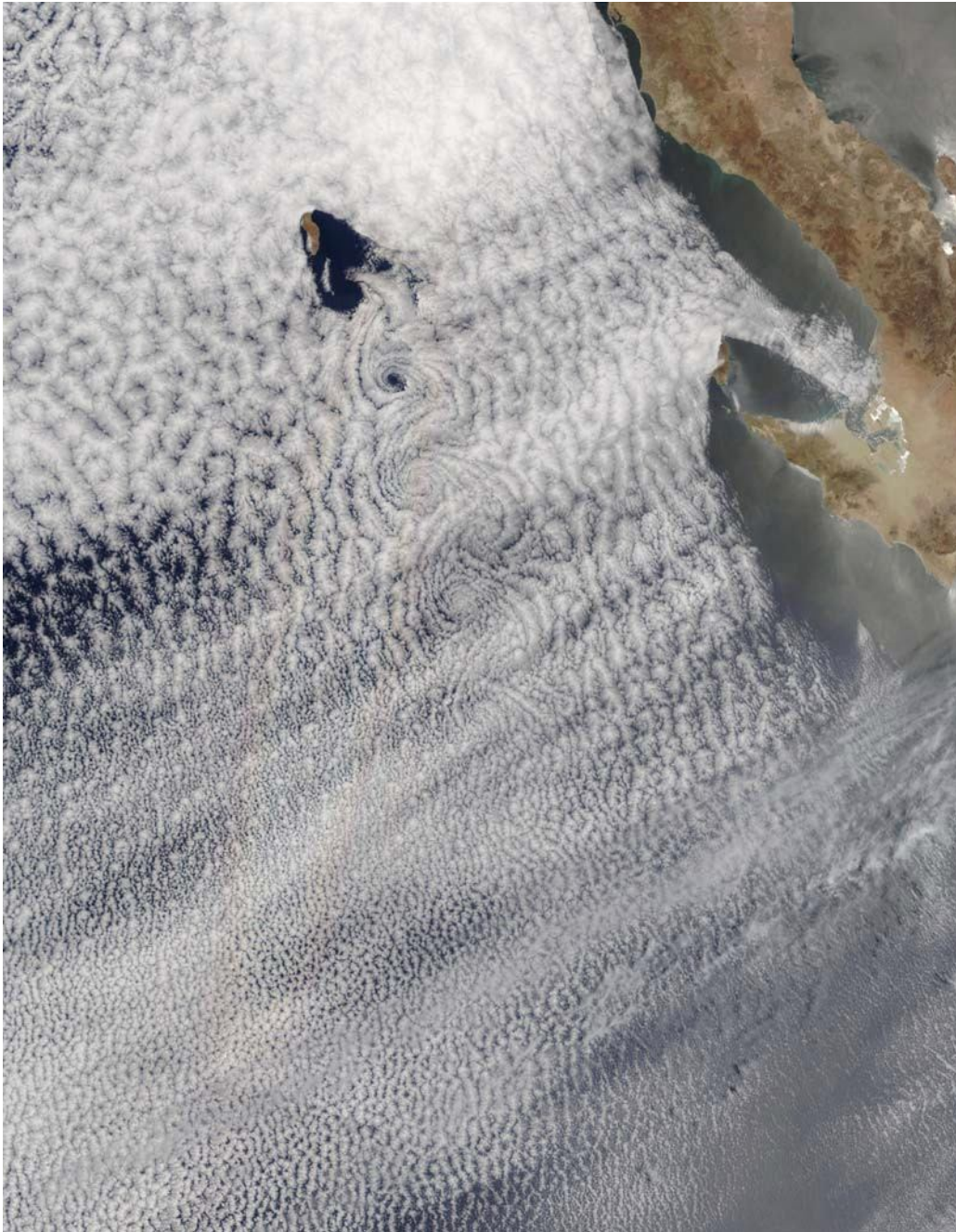


# Convecção em rolo (Roll convection)

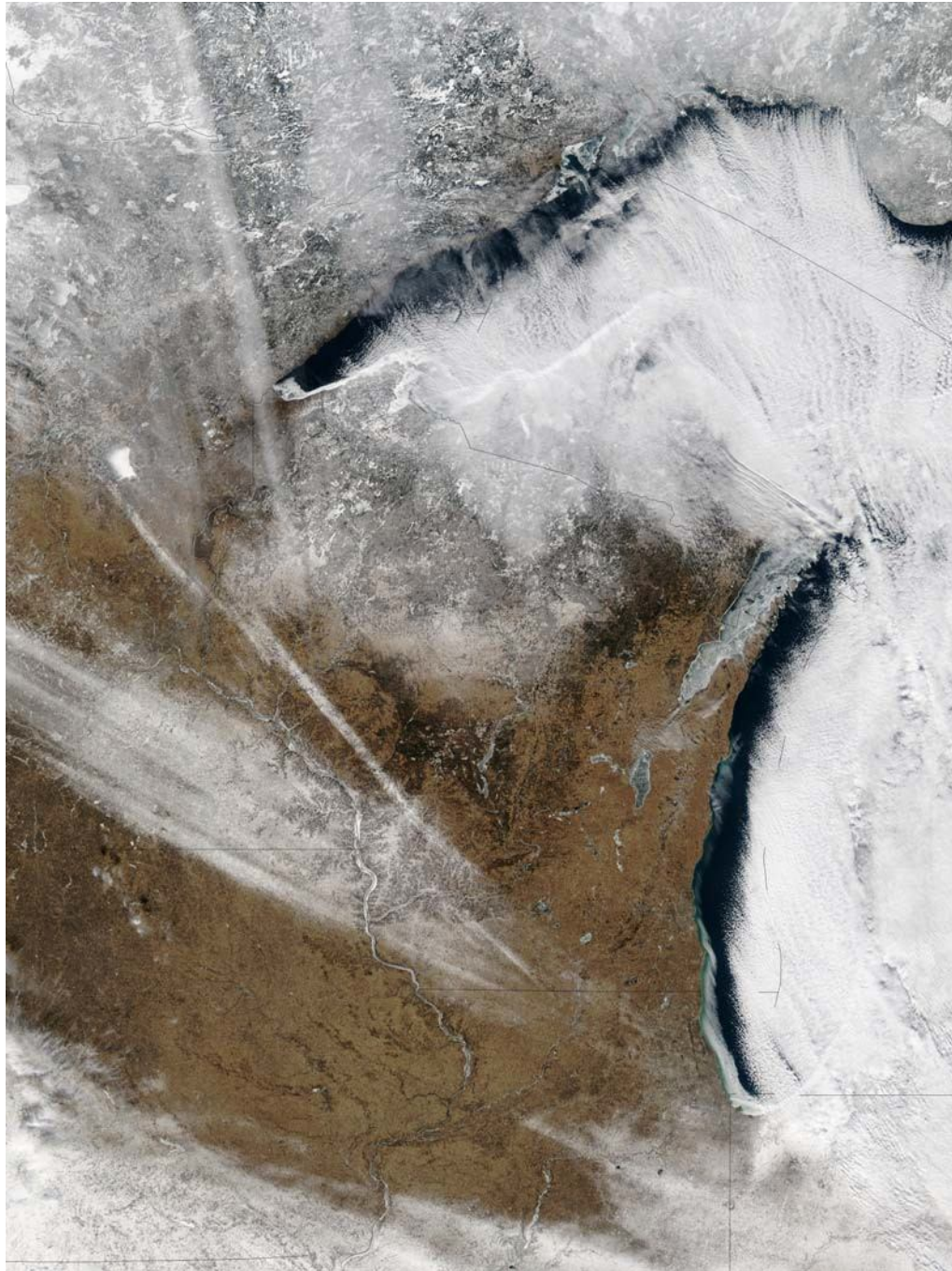


# Células Abertas e Fechadas





Células  
Abertas e  
Fechadas  
com Lee  
Eddies



# Nuvens de Efeito Lago



Fog  
Marinho



Fog  
de  
Vale

# Ondas de gravidade a sotavento

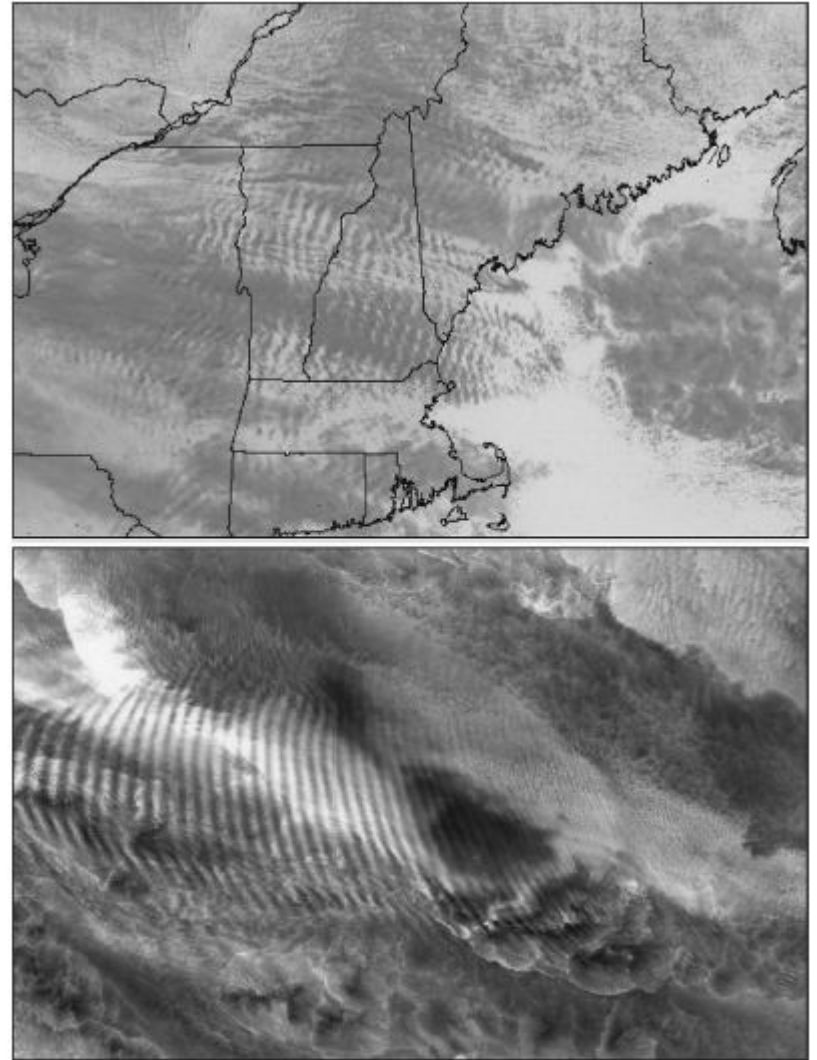
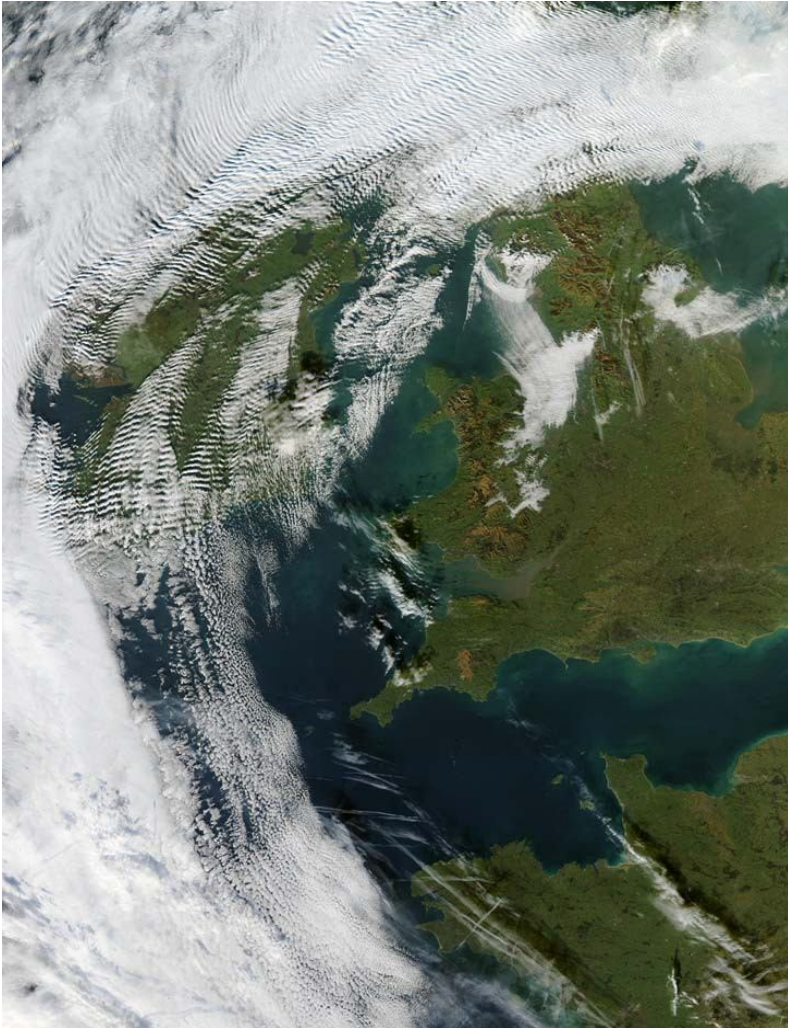


Fig. 3.14 Gravity waves, as revealed by cloud patterns.

# Distúrbios Ondulatórios sobre Montanhas





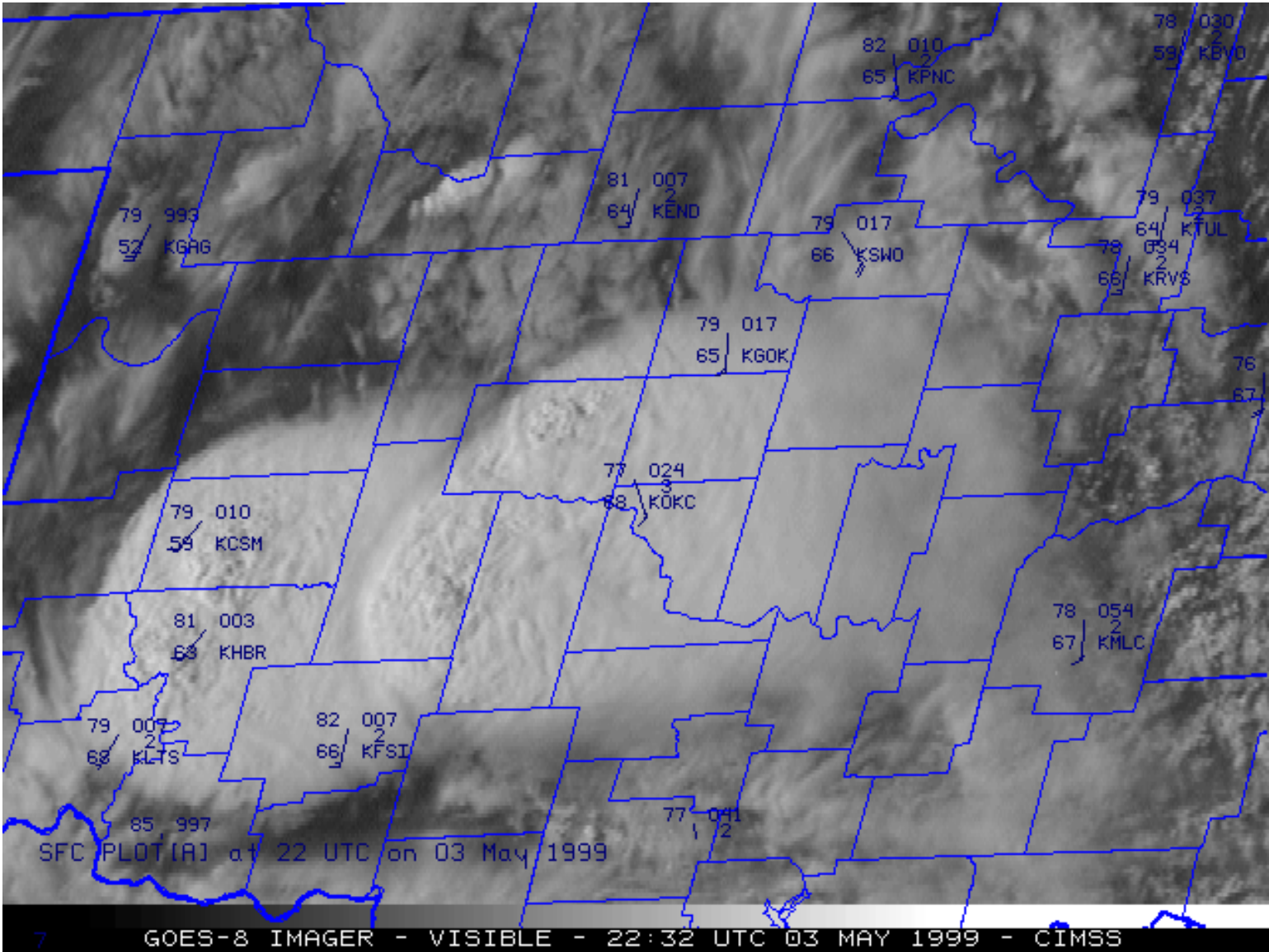
# Distúrbios Ondulatórios sobre Montanhas



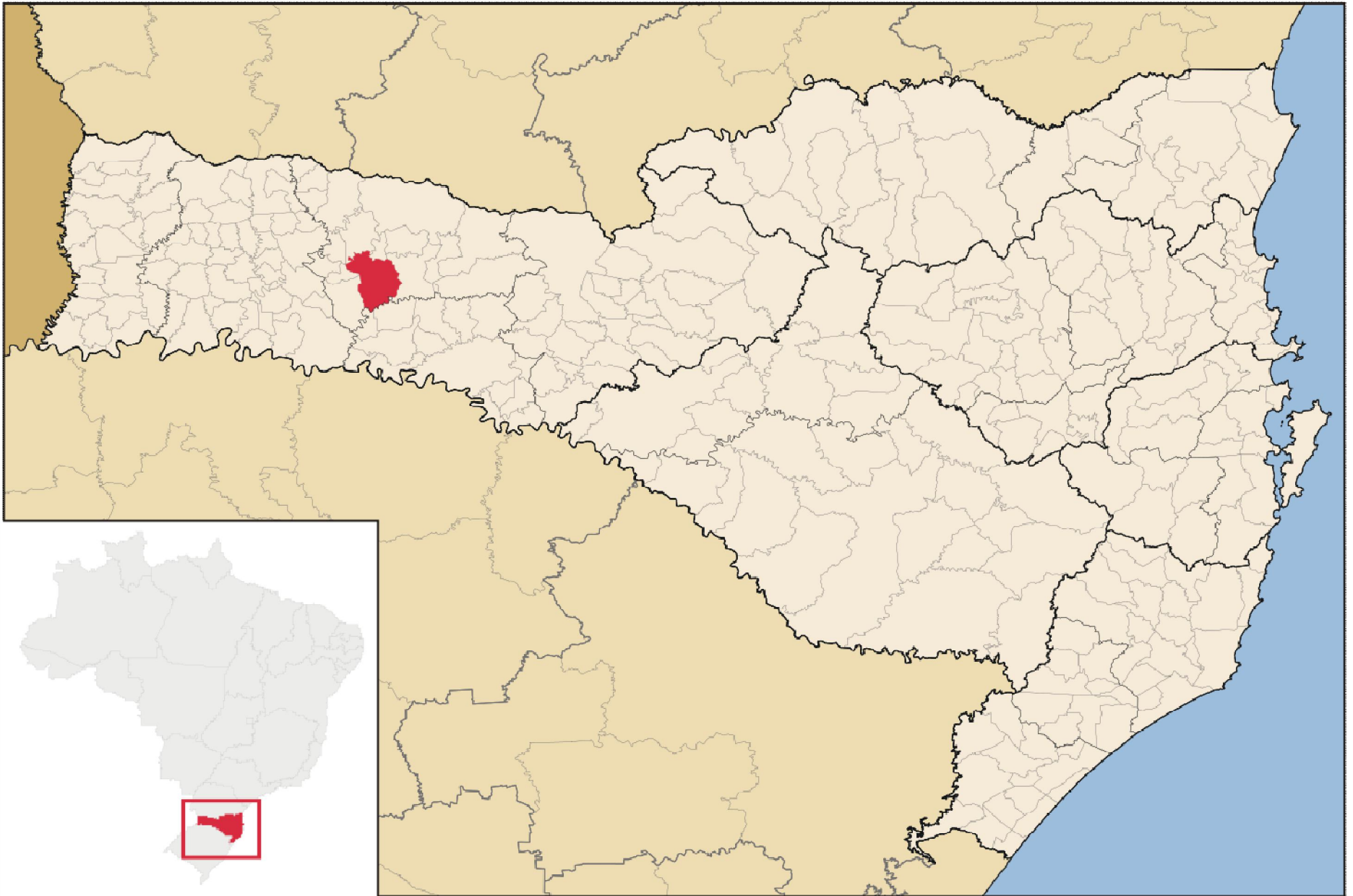
# Precipitação Orográfica



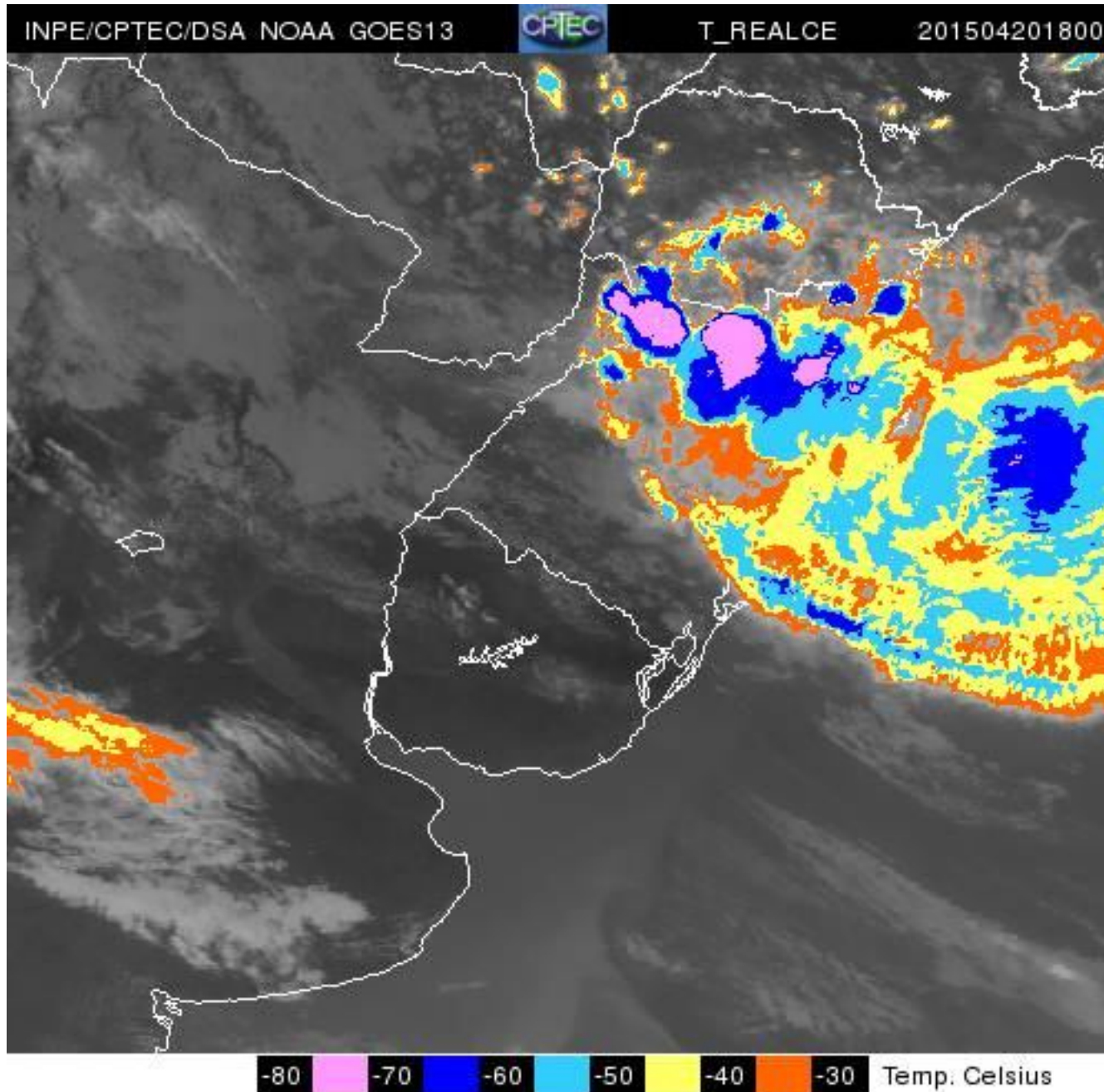
# Supercélulas



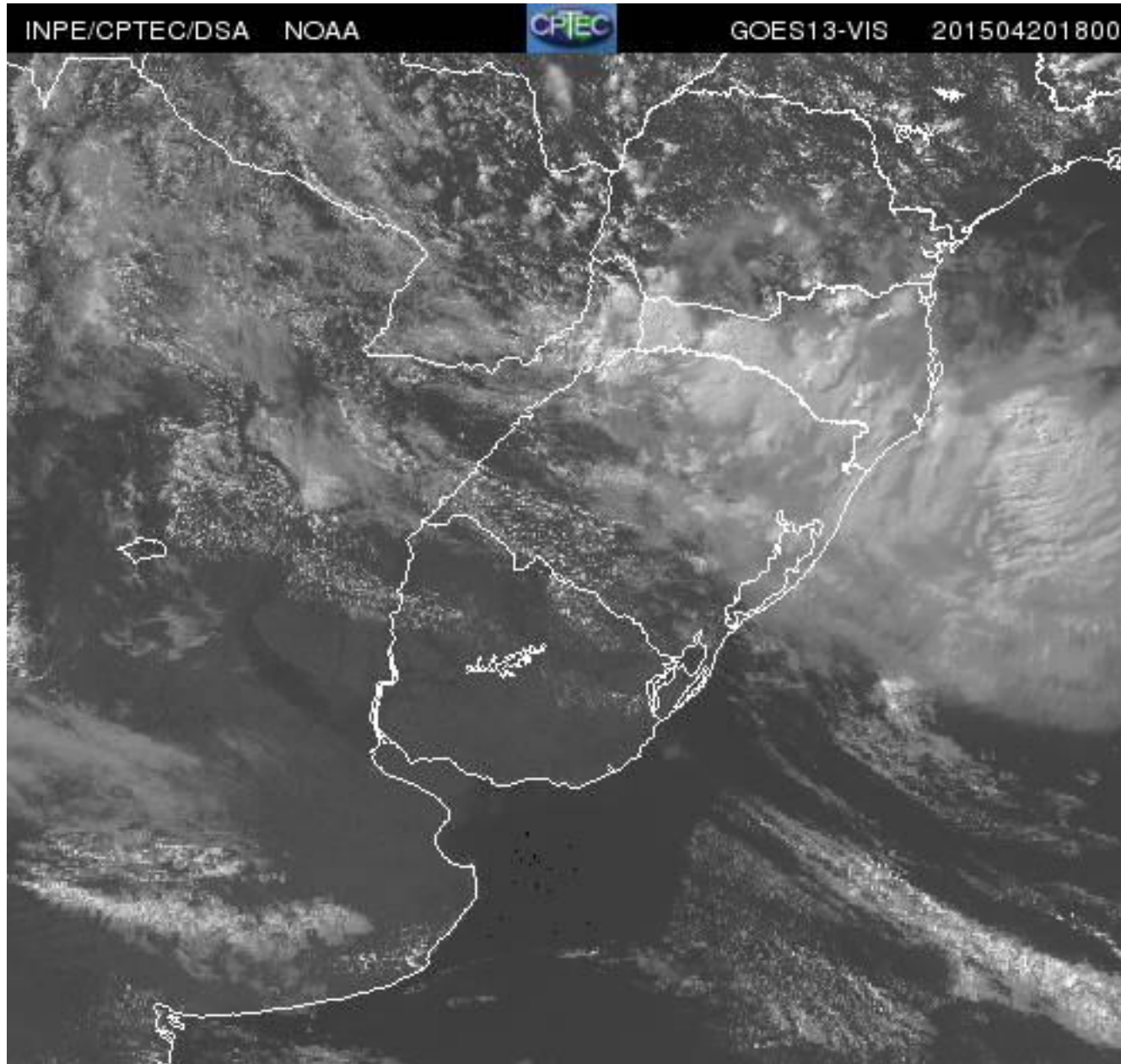
# Supercélulas em Xenxerê – SC (2015)



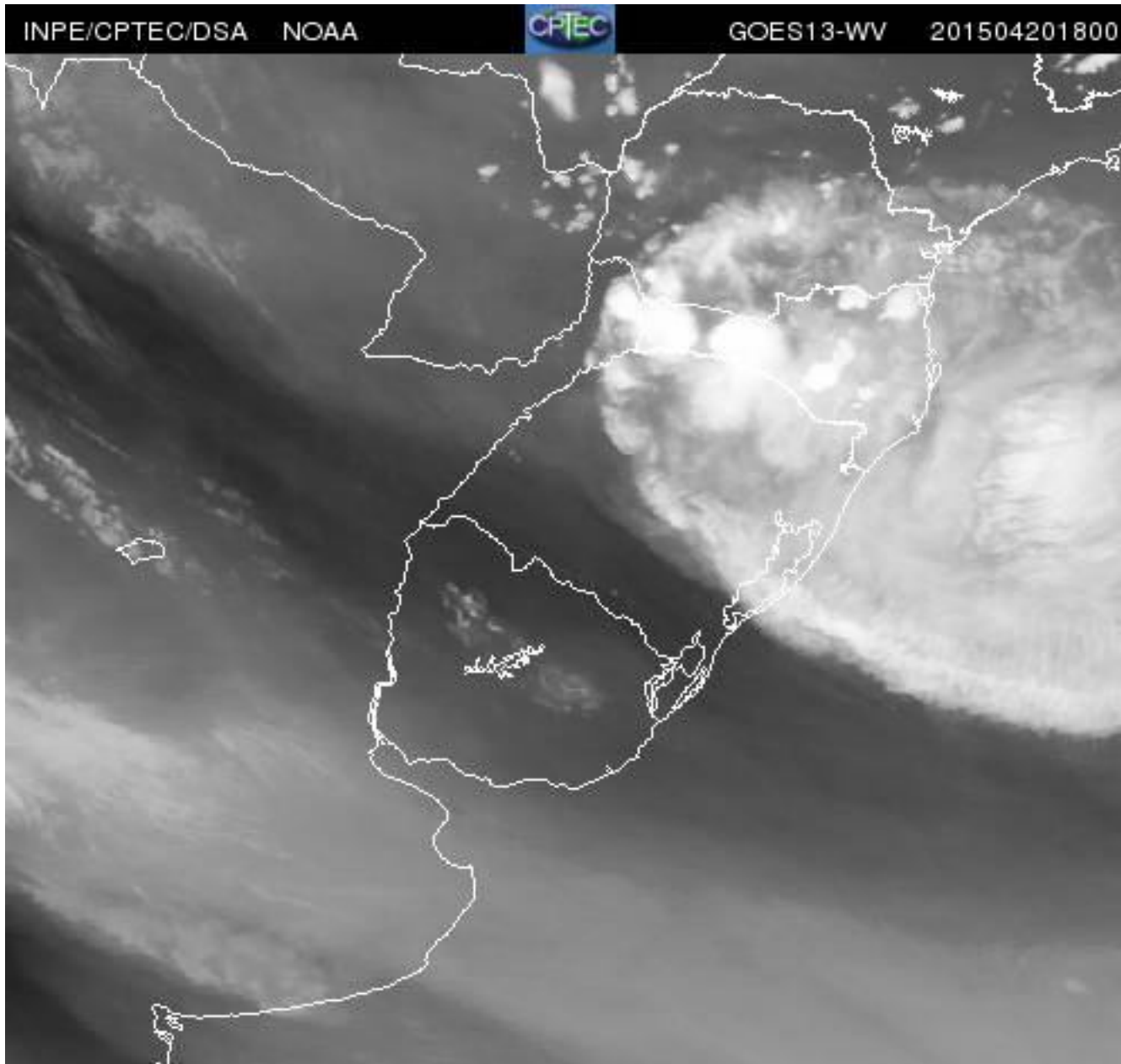
# Supercélulas em Xenxerê – SC (20 de abril de 2015)



# Supercélulas em Xenxerê – SC (20 de abril de 2015)



# Supercélulas em Xenxerê – SC (20 de abril de 2015)





# Supercélulas





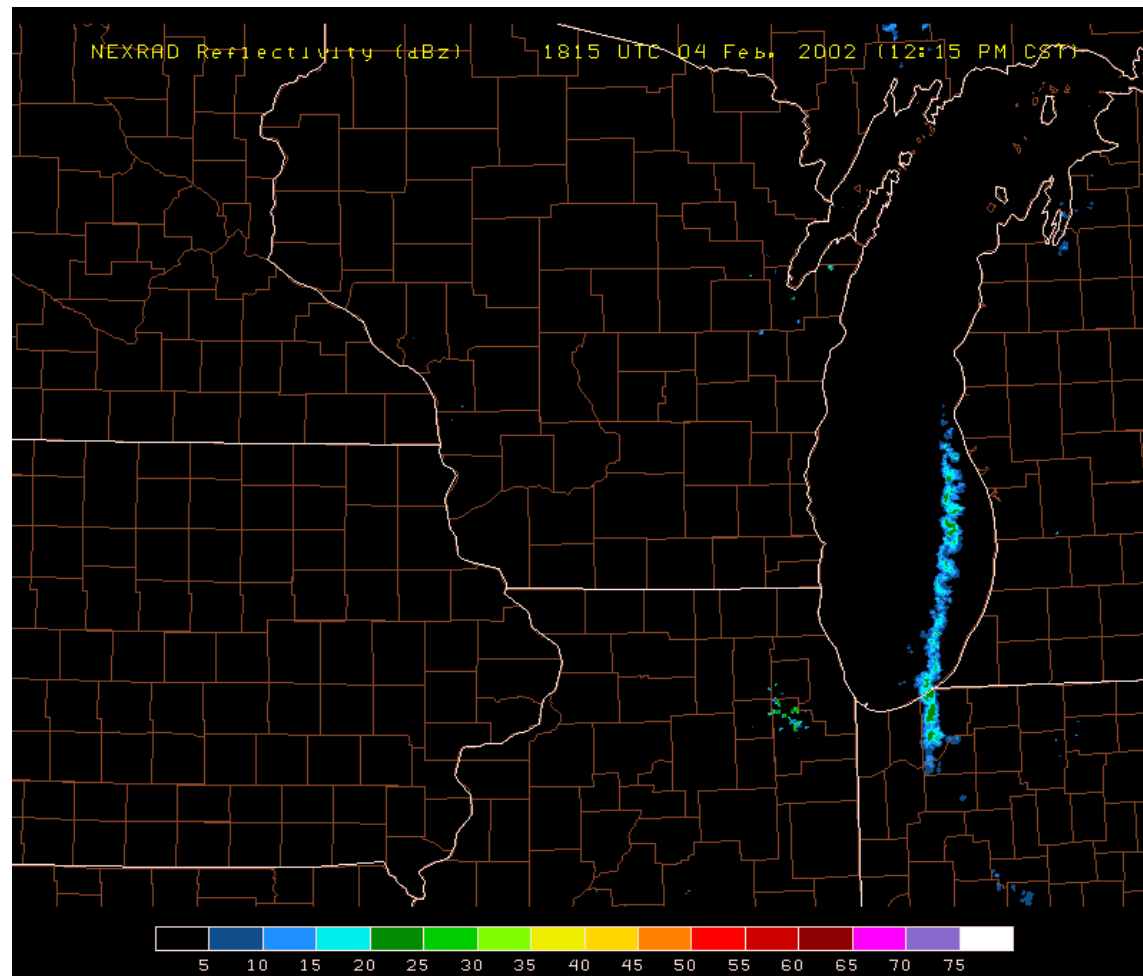
# Tornados



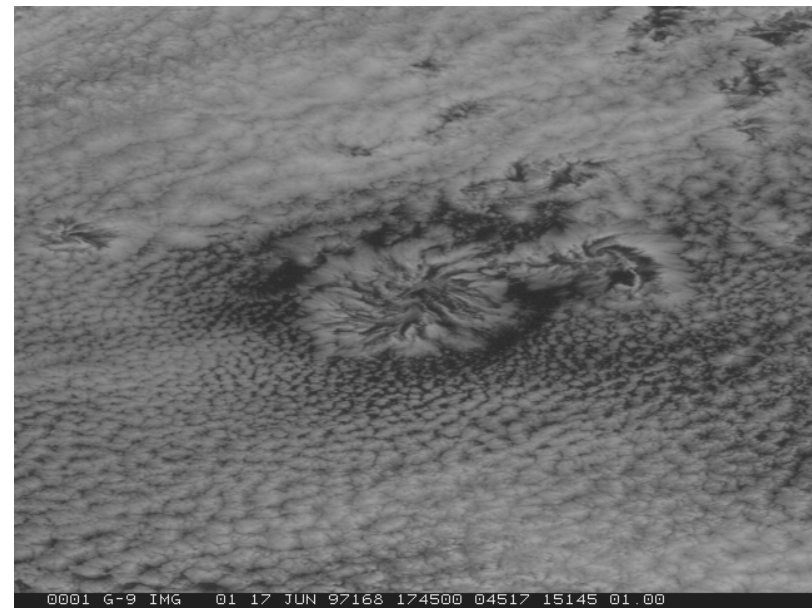
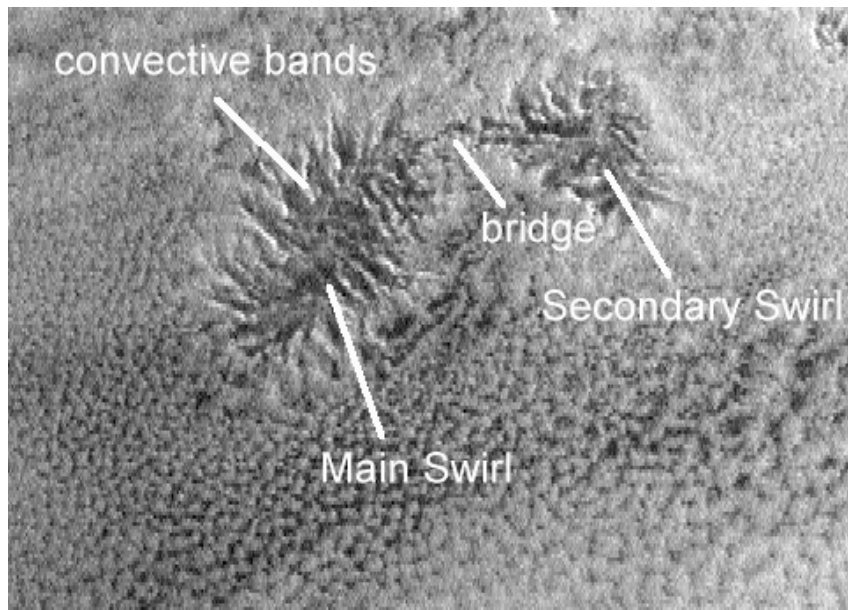
# *Meso – $\beta$*

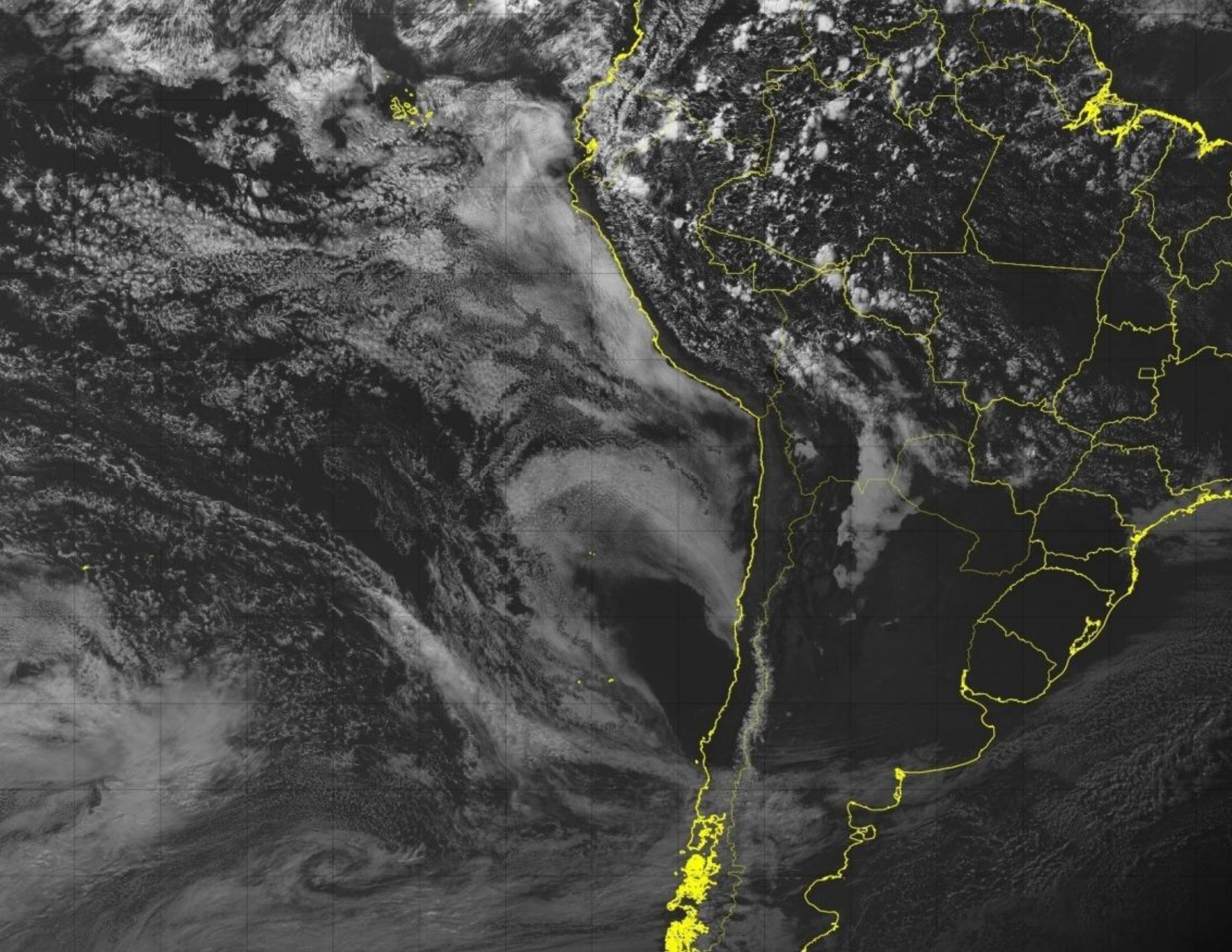
- Ecalas de 20-200 km (Aproximando-se do Raio de Rossby)
- *Ondas de Gravidade (Flutuação - Buoyancy)* governam a evolução do sistema e organização dos sistemas em condições instáveis
- Oscilações inerciais são importantes para a dinâmica de ondas (Ondas Gravito-Inerciais) e efeitos inerciais modificam a organização da convecção

# Banda de Nuvens Associada ao Efeito Lago, Paralelo à Costa

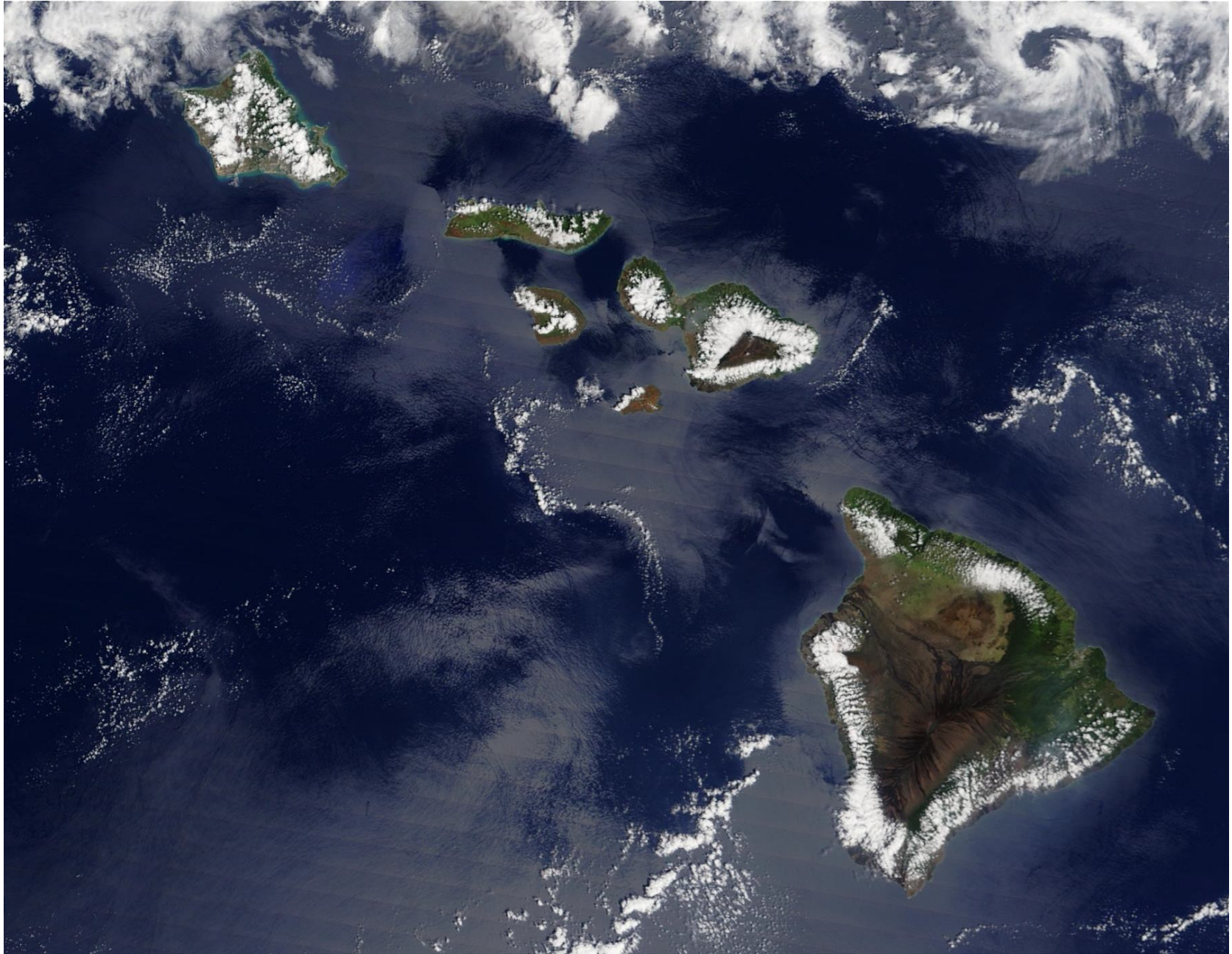


# Nuvens Actinae (200-300 km de raio)

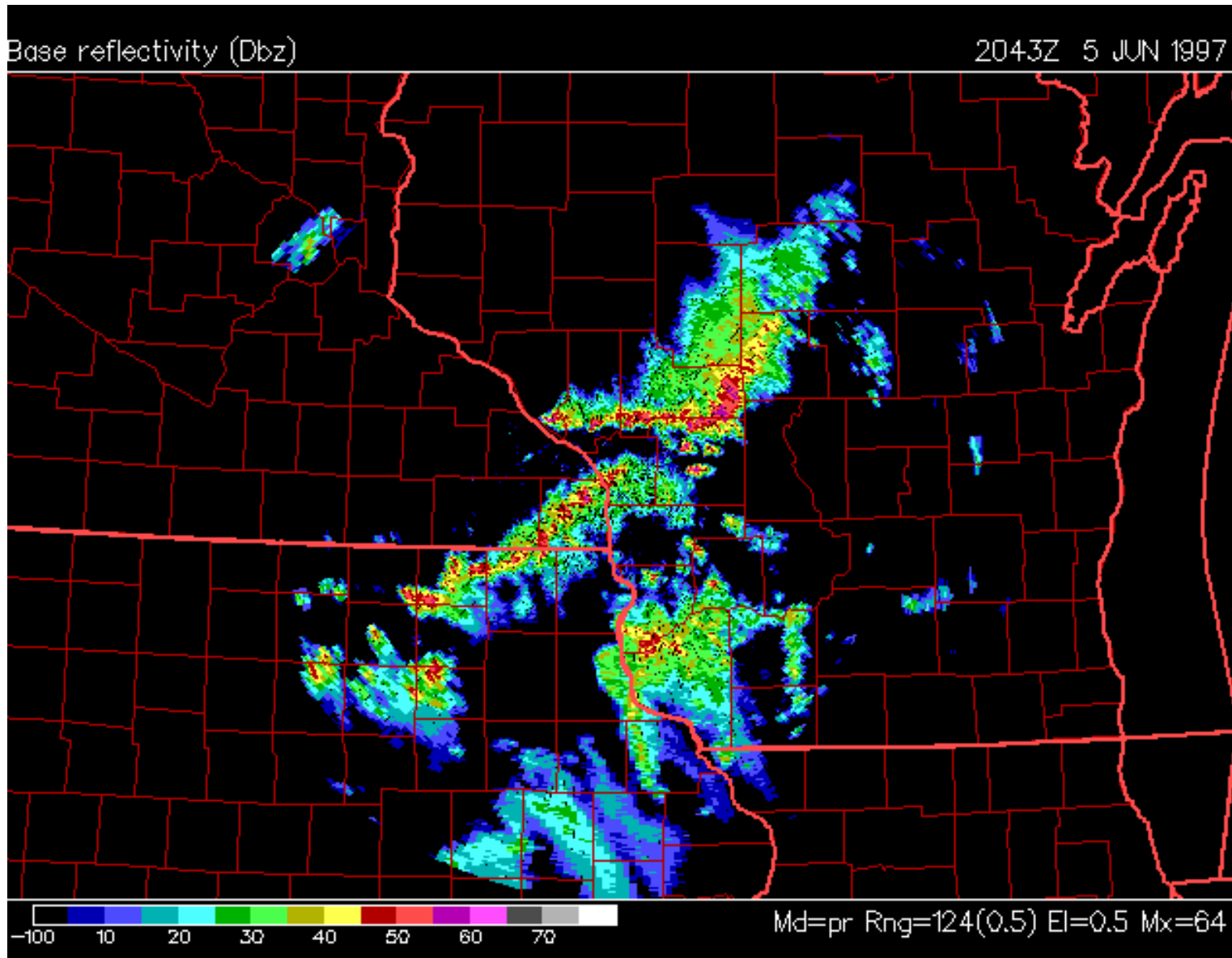




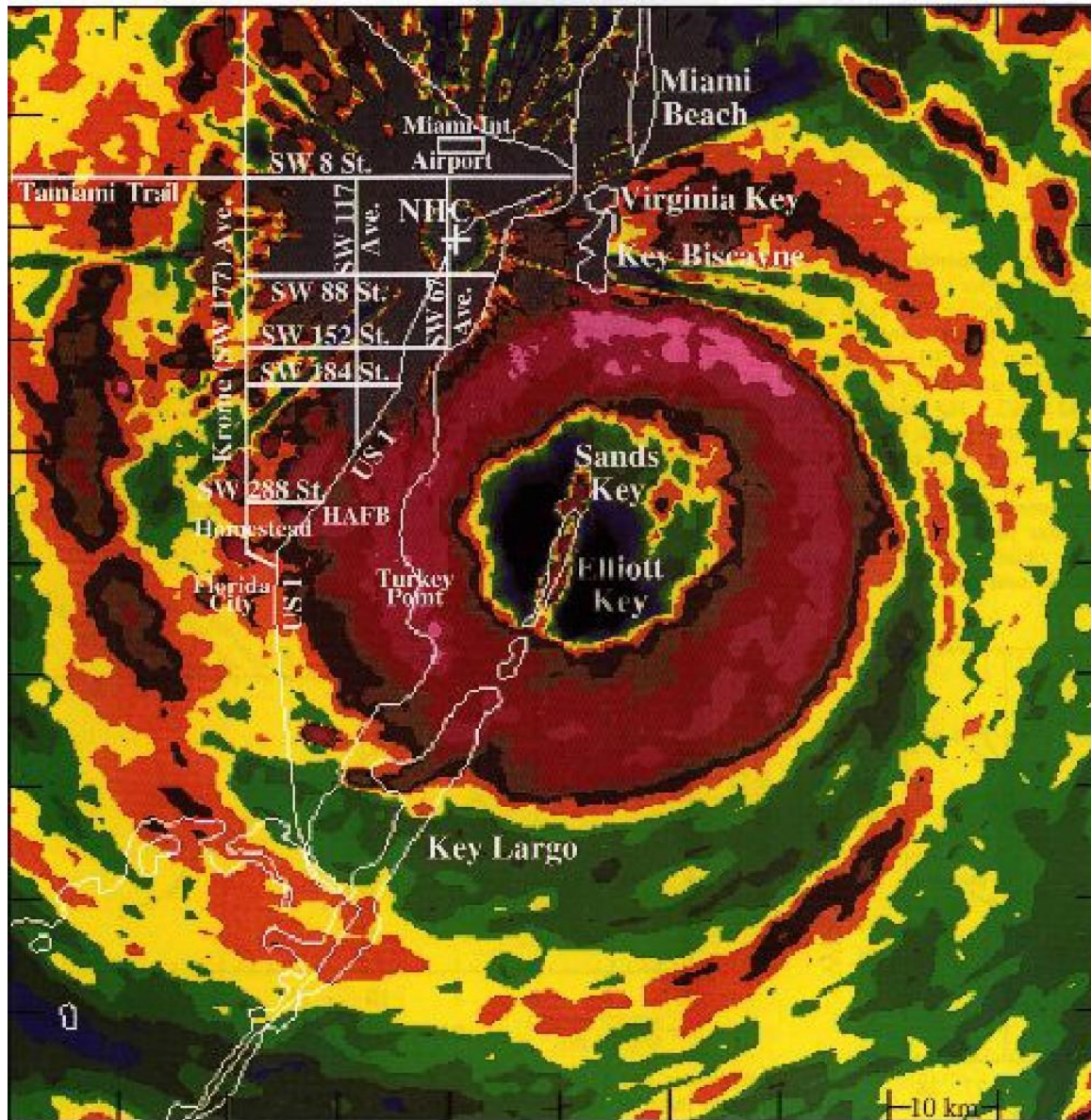
# Efeito Brisa Marítima



# Linhas de Instabilidade Meso-Beta



# Olho de Furacão



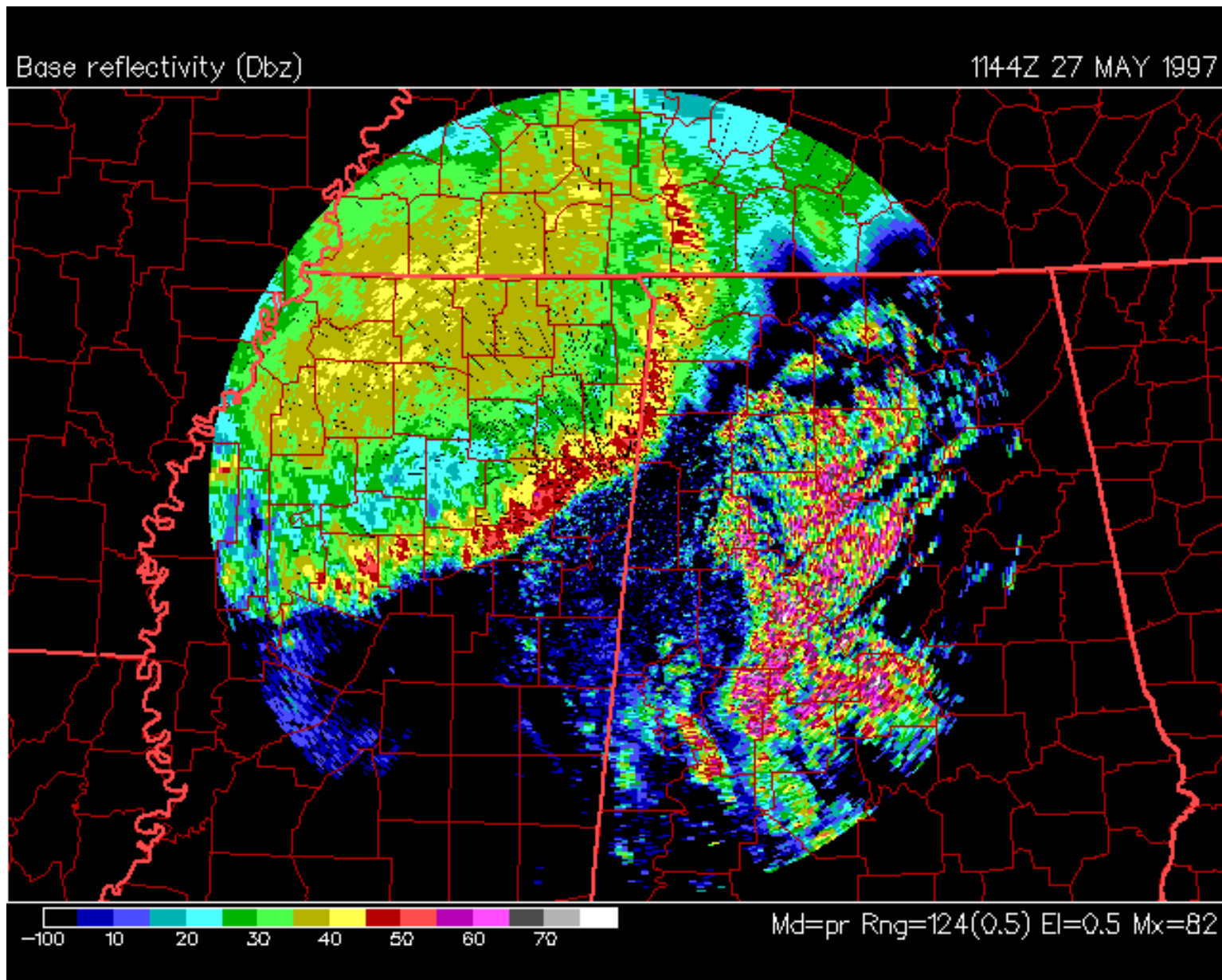
Courtesy NOAA/National Climate Data Center



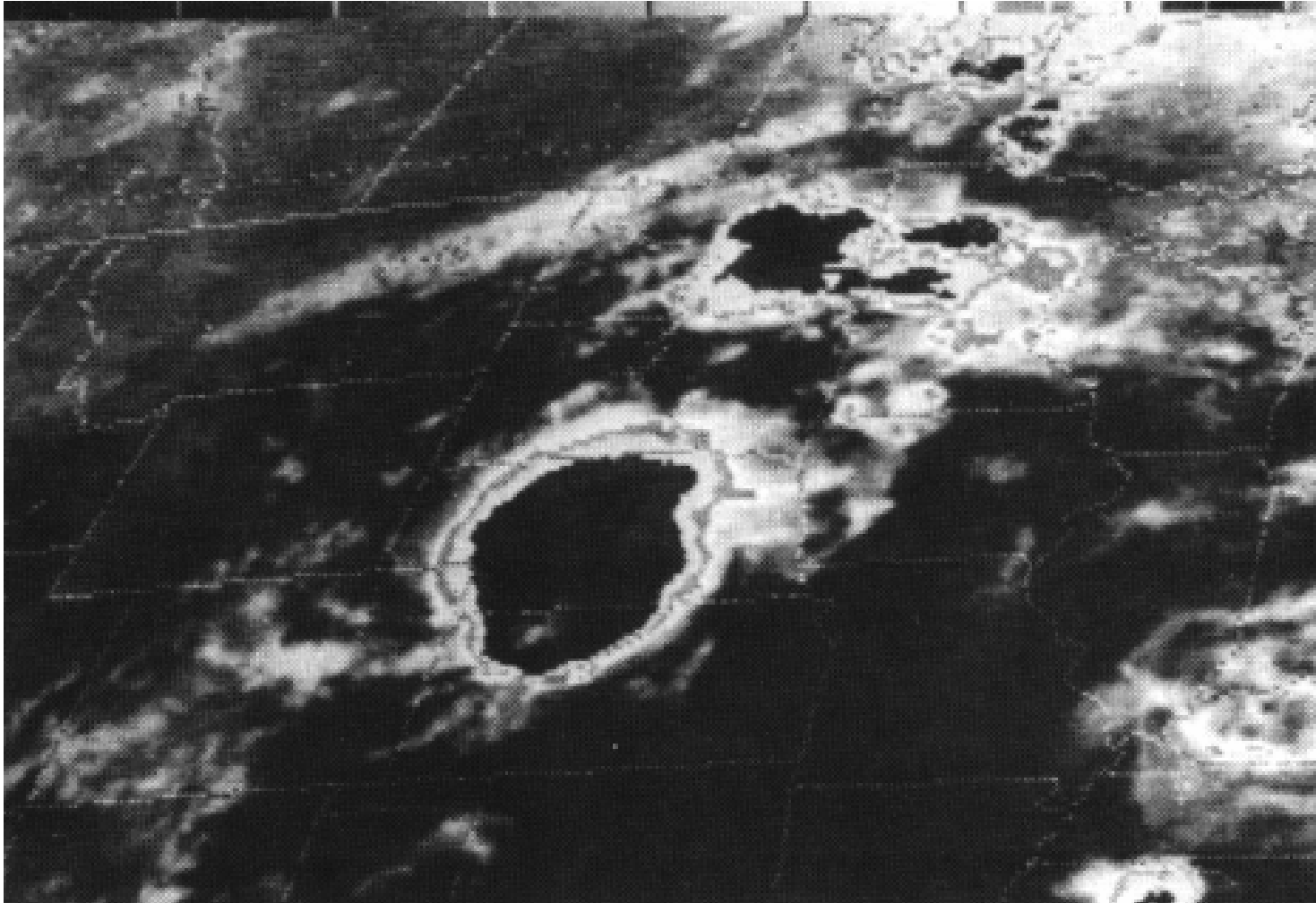
# Meso- $\alpha$

- Escalas entre 200-2000 km ( $>$  Raio de Rossby)
- As menores circulações dessa escala são comandadas por respostas gravito-inerciais
- São caracterizadas por *Balanço Geostrófico* aproximado e vento gradiente
- A perturbação geostrófica determina a evolução do sistema e circulações ageostróficas surgem por distúrbios no escoamento balanceado

# Linha de Instabilidade Meso- $\alpha$



# CCM

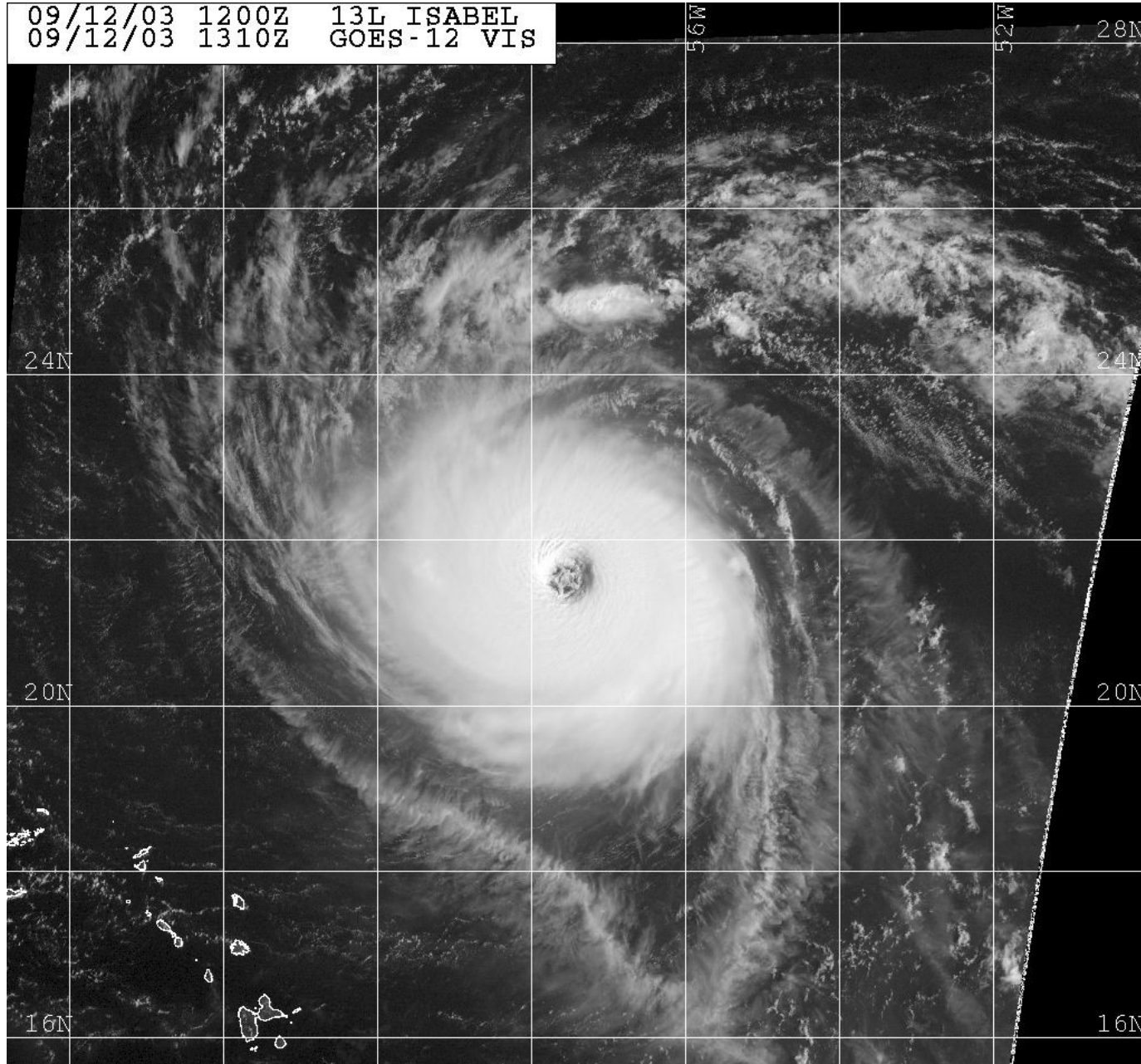


# Aglomerados na ITCZ



GOES8 VIS 27 MAY 1997 161500

09/12/03 1200Z 13L ISABEL  
09/12/03 1310Z GOES-12 VIS



# Ciclone Tropical

Naval Research Laboratory [http://www.nrlmry.navy.mil/sat\\_products.html](http://www.nrlmry.navy.mil/sat_products.html)  
<-- Visible ( Sun elevation at center is 49 degrees) -->

# Observações:

- Estas regras acima são uma descrição aproximada de como as três mesoscalas dividem os distúrbios típicos.
- Mudanças em latitude significam mudanças em atitude! À medida que nos movemos para latitudes mais baixas diminui o efeito Coriolis e a escala do Número de Rossby aumenta, indo ao infinito no equador! Assim, em relação ao efeito inercial da Terra, todos os distúrbios em torno do equador são dinamicamente pequenos e são governados por ondas de gravidade (flutuação).

- Perturbações mais profundas conduzem a maiores velocidades de fase da onda de gravidade e por isso têm maior valor de Raio de Rossby e vice-versa para distúrbios rasos. Assim, a profundidade do distúrbio afetará sua dinâmica: um distúrbio mais profundo sendo menos provável de possuir equilíbrio inercial e os distúrbios mais rasos com maior probabilidade ao equilíbrio inercial. Alguns exemplos:

- ✓ **Brisa Marítima sem convecção profunda:** muito rasa, é provável que atinja significativo balanço geostrófico.
- ✓ **Brisa Marítima com convecção profunda:** não é provável que atinja o balanço inercial;
- ✓ **Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM):** a parte do sistema com convecção profunda claramente apresenta valores menores que o Raio de Rossby. A parte estratiforme (bigornas) tem uma escala horizontal grande e rasa que **pode excitar distúrbios inercialmente balanceados**, isto é, um vórtice ciclônico de mesoescala ou **mesovórtice**.

# Observações:

- Sistemas de observação em escala sinótica tem espaçamento horizontal de 100 km e temporal de 1 h à superfície, e 400 km e 12 h acima, e são claramente inadequadas para capturar a maior parte da meso- $\alpha$ , com exceção da sua parte final superior.
- A dinâmica dos distúrbios de mesoescala contém importantes características *transientes* não balanceadas, que se propagam rapidamente.
- Na mesoescala, os sistemas são altamente tridimensionais, de modo que a estrutura vertical é tão importante quanto a estrutura horizontal.

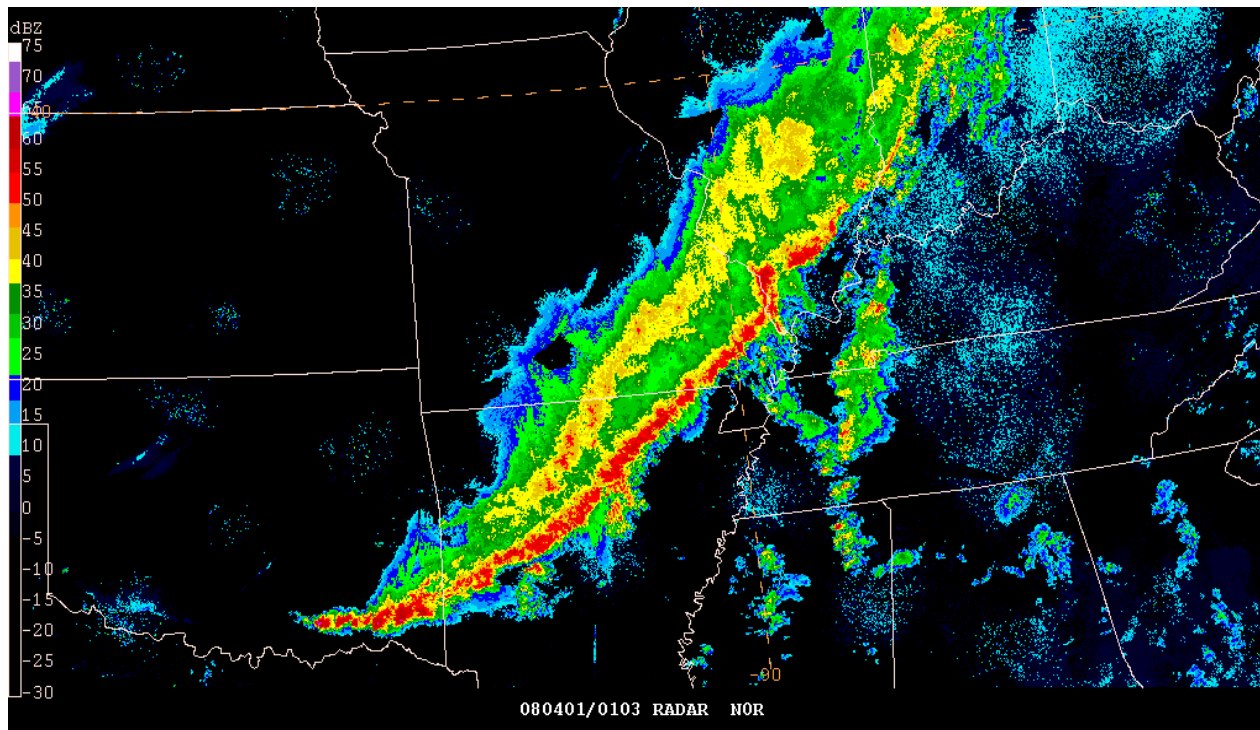


# Dificuldades Adicionais

- Distúrbios de mesoescala têm maior probabilidade de serem um resultado *híbrido* de diversas entidades dinâmicas interagindo entre si para manter o sistema.
- A *Interação dos Processos* é especialmente importante. Tais processos incluem as interações da microfísica de nuvens com as transferências radiativas, o que gera dificuldades observacionais adicionais.
- Interações de escalas para um mesmo fenômeno de mesoescala (interações por todos os processos determinados pelos valores assumidos pelo Raio de Deformação de Rossby – Exemplo: CCM).

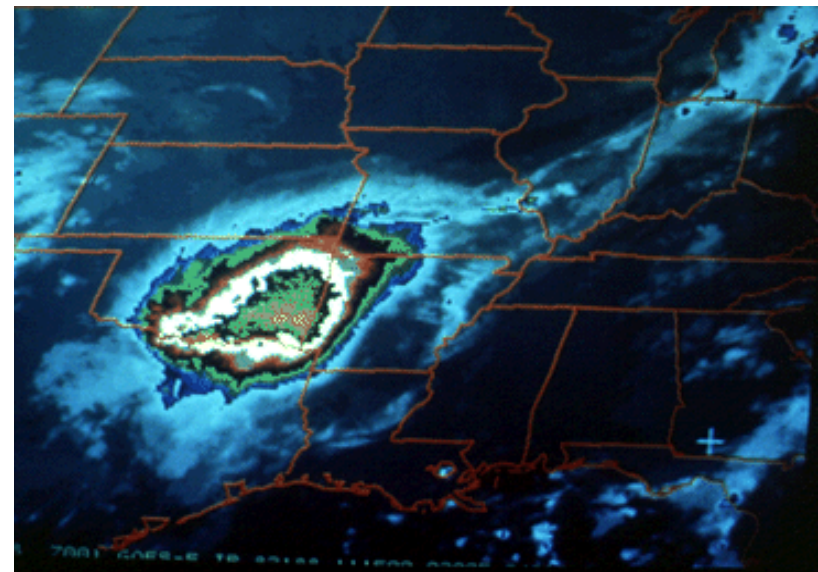
# Cb ordinário





**Linha de Instabilidade  
(Radar)**

**Sistema Convectivo de Mesoescala  
(Satélite)**



# Como tratar os problemas de falta de representatividade dos dados observados?

- Use observações como PISTAS para as análises e não espere que os dados sejam suficientes para revelar os processos que estão por trás das observações.
- Associe um modelo dinâmico “forte” às observações para preencher as lacunas deixadas pelos dados. À medida que o modelo reproduza as observações em pontos de medidas atmosféricas, o modelo ganha credibilidade (quando isto ocorre, as chances de acerto de uma previsão crescem).
- *Estude o modelo* para entender a dinâmica. Se o modelo é consistente com as poucas observações, então o modelo pode ser usado (**sempre com cautela**) para revelar a dinâmica do sistema.

# Mas o que é um modelo?

- Modelos podem ser dos tipos mais simples aos mais complexos.
- Um modelo simples é o modelo Quase-Geostrófico: advecção de vorticidade negativa resulta em movimento vertical para cima.
- É tão simples que podemos aplicar o modelo de cabeça! Porém, ele tem muitas aproximações e é muito provável que desconsidere características de alguns fenômenos que podem ser representados em modelos mais complexos.

- Modelos Numéricos de Pesquisa: possuem física mais precisa, mas são muito “pesados” para serem executados em tempo real. Porém, também são hábeis para proporcionar uma compreensão profunda de processos específicos que causam um evento observado.
- Estes modelos, usados em estudos de casos reais ou no modo idealizado, proporcionam o entendimento básico que usamos para construir modelos que possam ser rodados em tempo real.

- Modelos de Equações Primitivas de Previsão (Modelos mais Complexos), tais como os modelos GFS, ECMWF, BRAMS, ou WRF e outros mais, devem ser resolvidos no computador e ser mais precisos do que o SQG.
- Por que, então, algumas pessoas olham para o mapa de previsão de 500 hPa do modelo GFS e então discordam com o seu padrão de movimento vertical porque o padrão não está de acordo com o SQG, tratável mentalmente? Algumas pessoas o fazem! (Mas não deviam...)

**FIM**