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

Ciclones e ciclogêneses

Definições

- **Ciclone:** área na atmosfera na qual a pressão é menor que nas vizinhanças em um mesmo nível de altura. É representado em uma carta sinótica por um sistema de isóbaras em um nível de altitude específico (ou um sistema de contornos de altura geopotencial em um mesmo nível de pressão);
- Os ciclones fazem parte do grupo dos fenômenos severos da escala sinótica;
- Primeiras considerações climatológicas: Taljaard, 1972;
- Primeiras identificações por satélite: Troup & Streten, 1972;
- **Ciclogênese:** é o processo de abaixamento da pressão atmosférica de superfície com consequente formação de circulação ciclônica. Muitas vezes pode ser disparada por vórtices ciclônicos de altos níveis (serão vistos adiante);
- Esses vórtices de ar superior e os centros de baixa pressão à superfície provocam alterações no tempo e podem causar problemas locais e regionais;

- No que diz respeito ao HS, as ciclogêneses são mais frequentes em latitudes médias, entre 35° e 55°S, em quase todo o hemisfério.

- obs: nem sempre os sistemas de baixa pressão produzem padrões de nuvens identificáveis como vórtices ciclônicos;

Estágios de desenvolvimento do ciclone e Sutcliffe

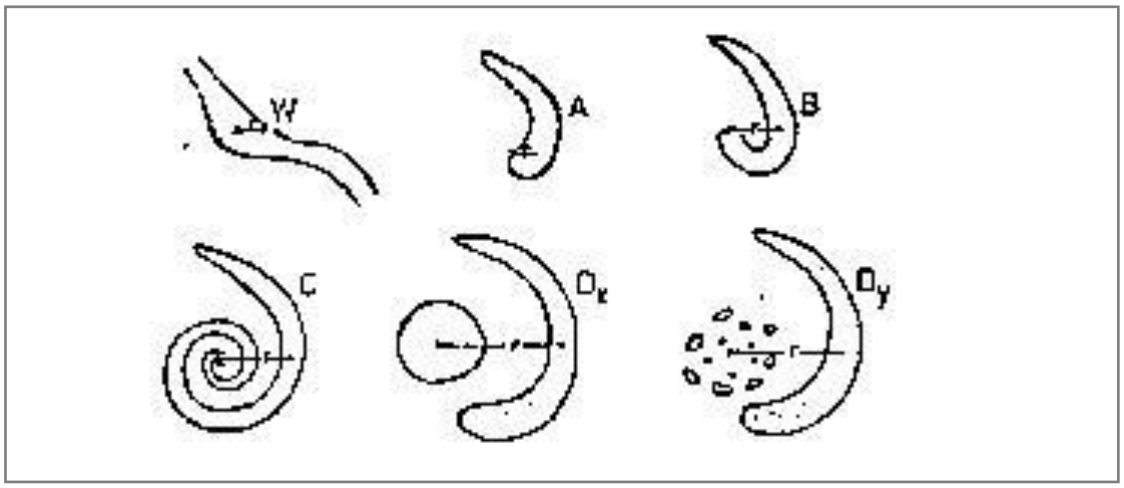

Figura 1: Estágios de desenvolvimento de um vórtice visto através de imagens de satélite.

- **W**: estágio de onda, apresentando saliência na banda de nuvens;

- **A** e **B**: estágio de formação do ciclone, apresentando forma de vírgula e gancho respectivamente;

- **C**: estágio maduro, com a nuvem espiralada em torno de um centro definido;

- **Dx** e **Dy**: estágios de dissipação, com nuvens concentradas no centro do vórtice que evoluem para bandas circulares menos organizadas.

- Em baixos níveis, essa evolução é dependente do aquecimento próximo à superfície e do movimento vertical adiabático, ou seja,

apresenta um cavado em superfície que vai intensificando até que a isóbara de baixa pressão se feche;

- Em 1947, Sutcliffe partindo da relação da variação da pressão em superfície, estabeleceu equações dinâmicas que descrevem o desenvolvimento de ciclones para um sistema quasi-gestrófico. Ele combinou a variação temporal da vorticidade absoluta no nível de 1000 mb com a advecção de vorticidade em 500 mb (nível não divergente - NND); com a advecção de temperatura na camada entre 1000 mb e 500 mb; com a variação de temperatura por movimento vertical; com a mudança de temperatura por aquecimento da coluna atmosférica. Desta forma, todos os termos são calculados de forma que os valores negativos indicam tendência a favorecer a ciclogênese, seja na formação ou na intensificação.

- Para que haja abaixamento da pressão na superfície deve haver uma diminuição de massa na coluna de ar, o que só é fisicamente viável se o perfil vertical de divergência apresentar maior divergência do que convergência, como mostrado na Figura 2:

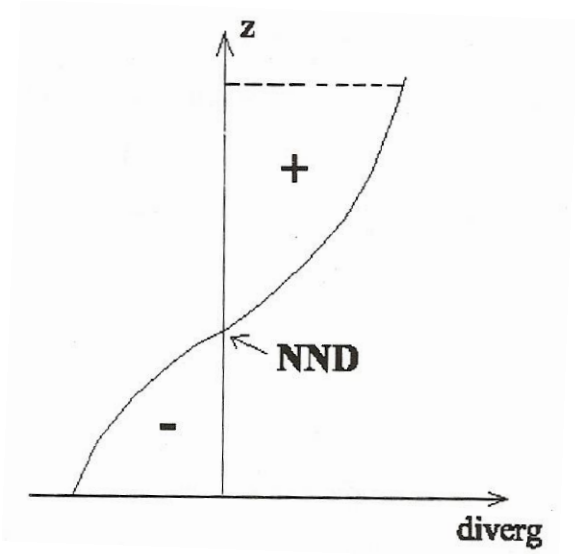

Figura 2

- Na prática, a vorticidade é mais adequada para analisar pois as estimativas de divergência possuem muitos erros devido a erros nas medidas de vento;

- A teoria de Sutcliffe é aplicada no nível de não divergência (NND) - afim de usar a equação do vento térmico - e baseia -se em considerar a vorticidade geostrófica como a vorticidade real, o vento térmico como o cisalhamento vertical do vento real;

- Desta forma, a teoria quase-geostrófica permitiu uma simplificação nas equações, relacionando a divergência com a componente vertical da vorticidade absoluta. Desde que a divergência é uma medida da taxa de adição/remoção de massa de uma coluna atmosférica, é possível obter uma relação entre a variação da pressão de superfície e o campo de vorticidade em diversos níveis verticais. O conceito de desenvolvimento de sistemas está justamente relacionado com esta taxa de variação de pressão na superfície, que quando positiva (negativa) indica formação ou intensificação de um anticiclone (ciclone);

- A equação desenvolvida por Sutcliffe é:

$$\frac{\partial Q_0}{\partial t} = -(\vec{V} \cdot \nabla \mathrm{Q})_p - \frac{R}{f} \nabla_{\mathrm{p}}^2 \int_{\mathrm{P}}^{\mathrm{P_0}} (\mathrm{A_T} + \mathrm{S} + \mathrm{H})\, \mathrm{dlnp}$$

- Fisicamente o primeiro termo da equação indica a variação temporal da vorticidade absoluta em 1000 mb (termo da tendência de Q_0). O segundo termo indica a advecção de vorticidade em 500 mb; o terceiro termo indica a advecção de espessura (ou temperatura) entre 1000 e 500 mb; já o quarto termo indica a variação da temperatura por movimento vertical (termo da estabilidade ou adiabático)

enquanto o quinto termo indica aquecimento médio na camada (termo diabático). Na tabela abaixo é expresso a contribuição de cada um:

Tabela 1: Contribuição dos termos da equação de Sutcliffe (Cardoso, 2000).

	Termo	**Significado**	**Favorece quando**
1	$Q_0 = \frac{\partial v_0}{\partial x} - \frac{\partial u_0}{\partial y} + f$	Vorticidade absotuda em 1000 hPa	< 0
2	$-(\vec{\boldsymbol{V}} \cdot \boldsymbol{\nabla \mathbf{Q}})_{\boldsymbol{p}}$	Advecção de vorticidade em 500 hPa	< 0
3	$A_T = -\vec{V} \cdot \nabla_{\mathrm{p}} \mathrm{T}$	Advecção de espessura ou temperatura	< 0
4	$S = -\omega \left(\frac{\partial T}{\partial p} - \frac{1}{\rho C_p} \right)$	Movimento vertical ou estabilidade (compressão e expansão adiabática)	> 0
5	H	Taxa de aquecimento médio na camada (1000-500) (termo diabático)	< 0

Classificação

- Ciclones com ciclo de vida <u>convencional</u> (uma fase):

  - ✓ **Ciclones tropicais**:
    - Núcleo quente e simétrico;
    - Vento forte sustentado, ressacas e precipitação intensa; após a passagem, há aumento de temperatura e bom tempo.
  - ✓ **Ciclones extratropicais:**
    - Núcleo frio e assimétrico;

        - Vento forte em forma de rajadas, chuva com intensidade de leve a moderada; na seqüência, há diminuição de temperatura e bom tempo.

- Ciclones com ciclo de vida <u>não convencional</u> (múltiplas fases – combinação dos ciclos convencionais):

    - ✓ **Transição extratropical**: núcleo quente => frio.
    - ✓ **Seclusão quente**: núcleo frio => quente raso.
    - ✓ **Transição tropical**: núcleo frio => quente profundo.
    - ✓ **Ciclone subtropical**: ciclones híbridos, com componentes frias em altos níveis e quentes em baixos níveis, e formação baroclínica na presença de vorticidade negativa sobre TSM quente (Guishard *et al*., 2007); possui estruturas e/ou origem ambíguas (Evans e Guishard, 2004); efeitos de tempo similares aos de um ciclone tropical.

Ciclogênese na América do Sul

- Na América do Sul e Atlântico Sul (até 30°W), metade das ciclogêneses acontecem ao norte de 35°S;

- A maior frequência de ciclogênese ocorre <u>sobre o oceano no verão</u> e <u>sobre o continente no inverno</u>;

- As baixas quentes de superfície da região do Chaco tendem a se tornar sistemas ciclônicos desprendidos que se movem para leste, enquanto que ciclones extratropicais apresentam um deslocamento médio para leste e sudeste;

- Considerando as ocorrências de ciclones sobre o sul da América do Sul, 70% se formam na região 10°-55°S e 0°-90°W sendo o restante

referente a sistemas migratórios com origem fora desta área; dos 70%, apenas 20% se forma na região do Pacífico Sul e 50% sobre o continente e Atlântico Sul;

- Cerca de 90% dos casos tem influência no alinhamento de frentes frias (outono-inverno) ou em interação com sistemas convectivos (primavera-verão);

- No inverno o principal processo de desenvolvimento de ciclones é a conversão de energia do estado básico para a perturbação (instabilidade baroclínica), enquanto que no verão estes sistemas dependem de instabilidade hidrodinâmica;

- A ligação entre ciclogênese e precipitação consiste em suprimento de umidade (da região amazônica ou mesmo de regiões marítimas), o qual possui grande importância na própria dinâmica da ciclogênese.

Ferreira (1989) e Satyamurty, Ferreira & Gan (1990):

- Investigaram cuidadosamente a frequência de ciclones e de desenvolvimento de ciclones, bem como suas áreas e estações preferenciais de geração na região da América do Sul, através de 7 anos de imagens de satélite e cartas sinóticas;

- Avaliam um limiar de vorticidade nos níveis 500-300 hPa necessário para o desenvolvimento de ciclones sobre o continente no inverno, a partir de dados de vento oriundos das análises operacionais do NMC em grids de 5° (também usam diferenças centradas no espaço para as estimativas);

    i. Se por um lado o reconhecimento via imagens de satélite é vantajoso pelo fato de: (i) promover uma figura das condições

atmosféricas na troposfera como um todo, e (ii) cobrir áreas sem cobertura amostral, por outro lado perde-se um pouco da distinção dos níveis de ocorrência do fenômeno;

- Na região 30°-70°W 15°-45°S, durante o período de observações (Janeiro de 1980 a Dezembro de 1986) o número de ciclones que se formaram é cerca de 750, sendo 280 destes formados acima de 30°S.

Table 1. *Frequency of formation of cyclonic vortices in the region 15–45°S, 30–70°W during the period 1980–86*

Season / Year	Summer	Autumn	Winter	Spring	Total
1980	28	20	31	36	115
1981	30	25	16	24	115
1982	26	23	28	30	107
1983	34	35	18	39	126
1984	26	20	17	25	100
1985	30	22	15	30	97
1986	31	30	18	20	89
total	227	175	143	204	749

Table 2. *Direction of movement of the vortices generated in the region 15–45°S; 30–70°W during the period 1980–86*

Season / Direction	Summer	Autumn	Winter	Spring	Total
SE	125	101	78	110	424
E	47	33	47	48	175
NE	17	15	8	18	58
N	2	1	0	3	6
NW	1	0	0	0	1
W	1	0	0	0	1
S	4	7	5	5	22
stationary	34	11	0	17	62
total	242	169	138	200	749

Figura 3

Obs1: Por ano, cerca de 100;

Obs2: No ano de 1983 (El-Niño) o número subiu cerca de 25%, sendo que o principal aumento se deu ao norte de 30°S, consistente com a precipitação acima do normal neste ano no Sul do Brasil;

Obs3: A região sul-americana apresenta condições distintas para a ocorrência de ciclogênese em relação à América do Norte, pois a máxima freqüência observada aconteceu no verão e não no inverno (lembrar o curto período dos dados, não deve ser absolutamente conclusivo);

Obs4: Quanto às direções de propagação, apenas 8% se dissiparam sem apresentar movimento significativo, enquanto que 56% foram para

sudeste e 22% para leste, sem variação sazonal característica destes valores;

Obs5: Vale notar que não se desenvolvem vórtices estacionários durante o inverno (nenhum caso).

Entre 15°-60°S e 30°-70°W para o período de observações, 800 vórtices neutros passaram sem nenhum desenvolvimento ou intensificação detectável.

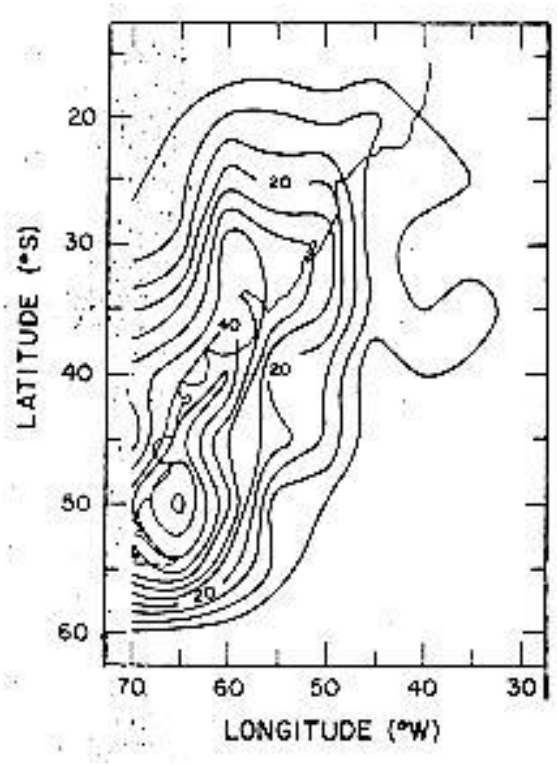

Figura 4: Frequência de ciclogêneses. Os contornos representam o número de ciclones numa caixa de 5° de latitude e longitude durante um período de 7 anos: 1980-86. O intervalo do contorno é 5.

Table 3. *Passage of vortices without development in the region 75–60°S; 30–70°W during the period 1980–86*

Season Year	Summer	Autumn	Winter	Spring	Total
1980	24	13	13	14	64
1981	29	15	13	33	90
1982	38	40	18	25	121
1983	17	31	45	39	132
1984	38	45	25	35	143
1985	23	29	16	28	96
1986	29	34	38	37	138
total	198	207	168	211	784

Table 4. *Velocity and duration of cyclonic vortices (7-year mean)*

	Summer	Autumn	Winter	Spring
cyclones without development ($m\,s^{-1}$)	20.5	17.1	23.3	21.1
cyclones with development ($m\,s^{-1}$)	12.6	11.1	13.9	13.2
duration of development (h)	14.2	17.6	21.1	18.6

Figura 5

Obs1: mais vórtices neutros passando pela região do que se formando nela.

Obs2: preferência pelas estações de transição.

Obs3: pouquíssimas ocorrências de vórtices neutros no cinturão 25°-35°S, o que significa que todas as ocorrências ao norte de 30°S formaram-se ou desenvolveram-se sobre o continente.

Obs4: cerca de 63% desses vórtices se moveram para leste e os demais se dividem entre trajetórias para nordeste e sudeste.

Obs5: Vórtices transientes se propagam mais rapidamente (média de 20 m/s) do que os que se formam na região (média de 12,5 m/s).

- Considerando cartas sinóticas de superfície, pode-se estimar uma velocidade média de deslocamento de centros de baixa pressão de cerca de 13 m/s no inverno e 9 m/s no outono (valores comparáveis com as estimativas por satélite para sistemas que se desenvolvem e bem menores do que a dos vórtices neutros).

- No inverno de 1979 foram observados 39 sistemas convectivos intensos, e com exceção de apenas 1, todos ocorreram associados a vórtices de intensidade superior a 2 x 10^{-5} s^{-1} que cruzaram os Andes.

    - O fato da maior ocorrência de ciclogênese sobre a América do Sul ser no verão indica que embora a baroclinicidade seja um fator indispensável, existem outros agentes como a convergência de vapor e calor sensível que são mais ativos na região;

    - Vórtices muito lentos ou muito rápidos passam sem se amplificar pela região;

    - A ocorrência de baixas de superfície na região é bastante frequente e apresenta uma distribuição latitudinal com picos relativos em 25° e 50°S, principalmente no verão, fato devido à formação frequente dos CCM's no Chaco;

    - O limiar de vorticidade ciclônica em 500 hPa para a geração de sistemas convectivos intensos na costa leste da América do Sul no inverno é de 2 x 10-5 s-1, com 40% de chance (os autores enfatizam que é necessário estender a análise para outros períodos para caracterização climatológica).

<u>Gan & Rao (1991)</u>

- Estudo realizado com base em 10 anos de dados para verificar as estações do ano preferenciais para ciclogênese de superfície sobre a América do Sul.

- *Os dados*:
    - Cerca de 14600 cartas de superfície (4 por dia) da Força Aérea Brasileira para o período de Janeiro de 1979 a Dezembro de 1988;
    - Médias mensais para 8 estações de radiossondagem no Brasil e Argentina, para o período Janeiro de 1978 a Dezembro de 1987;
    - Dados mensais de precipitação para 12 estações de superfície no sul do Brasil.

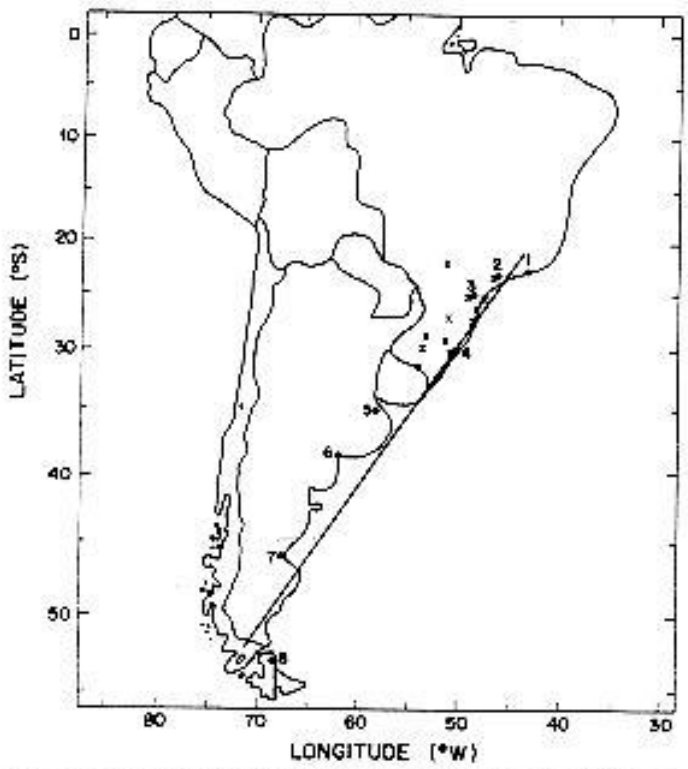

Figura 6: Localização das 8 estações de radiossondas ao longo da costa leste da América do Sul (pontos) e estações raingage no sul do Brasil (cruz).

- *Critérios*:
    - No mínimo uma isóbara fechada ao redor de um centro de baixa na análise de 2 hPa de intervalo;
    - Este centro deve persistir no mínimo em 4 mapas consecutivos.
- *Frequências de ocorrência nos 10 anos de dados*:

TABLE 2. Frequency of cyclogenesis for each month.

Year	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Total
1979	4	9	7	4	18	3	9	11	4	9	9	6	93
1980	8	11	5	9	7	10	12	11	9	8	12	9	111
1981	7	7	8	13	4	5	8	6	6	6	9	7	86
1982	7	7	8	5	13	12	10	3	11	11	2	8	97
1983	8	4	12	9	14	14	14	13	12	15	11	9	135
1984	7	7	7	6	20	15	13	4	12	12	8	8	119
1985	11	10	7	11	15	11	10	6	10	15	4	4	114
1986	8	6	10	11	20	11	7	14	6	7	5	4	109
1987	3	6	7	9	7	11	17	19	13	12	6	7	117
1988	10	5	9	11	16	9	7	10	7	10	7	9	110
Total	73	72	80	88	134	101	107	97	90	105	73	71	1091

Figura 7

- Em 1981, de menor frequência e 1983, de maior;
- Existe variação sazonal e os meses de inverno apresentam maior frequência do que os meses de verão (máximo maio 134, mínimo dezembro 71, máximo secundário de 105 em outubro).

- *Separação por estações*:

TABLE 3. Frequency of cyclogenesis for the four seasons.

Year	Summer	Autumn	Winter	Spring
1979	13*	29	23	22
1980	25	21	33	29
1981	23	25	19	21
1982	21	26	25	24
1983	20	35	41	38
1984	23	33	32	32
1985	29	33	27	29
1986	18	41	32	18
1987	13	23	47	31
1988	22	36	26	24
Total	207	302	305	268

* Only cyclogeneses of January and February 1979 are included.

Figura 8

- Ocorre novamente a preferência por outono e inverno, com verão por último;
- A variação interanual: 1983 (maior), 1986 e 1987 (anos de El-Niño);
- Em 1981 apresentou menor frequência e era justamente um ano caracterizado por valores positivos do IOS.

- Em termos de precipitação consistente com as ciclogêneses, foram avaliadas as anomalias de precipitação nas estações do sul do país:
  - Para 1981 as anomalias são sempre negativas (exceto uma), concordando com a menor frequência de ciclogênese;
  - Em 1983 estão as anomalias mais positivas, até 100% acima;
  - Em 1987 o El-Niño não foi tão intenso e algumas estações mais ao sul chegaram a mostrar anomalias negativas.

TABLE 4. Rainfall anomalies (mm) for select stations in Southern Brazil.

Station	1981	1983	1987	Normal
Presidente Prudente (22°–07°S, 51°–23°W)	−10.4	+17.8	−12.8	125.1
São Paulo (23°–30°S, 46°–37°W)	+9.8	+162.9	+102.3	121.4
Curitiba (25°–20°S, 49°–14°W)	−150.0	+247.0	−36.2	249.8
Paranagua (25°–31°S, 48°–31°W)	−34.9	+208.2	+41.6	238.6
S. F. do Sul (26°–15°S, 48°–39°W)	−43.7	+438.8	−2.6	257.7
Campos Novos (27°–24°S, 51°–12°W)	−75.6	+602.1	−45.9	431.3
Florianópolis (27°–36°S, 48°–38°W)	−44.2	+556.6	+32.1	230.1
Cruz Alta (28°–38°S, 53°–36°W)	−237.6	+308.1	+144.2	403.3
Caxias do Sul (29°–10°S, 51°–12°W)	−70.5	+421.4	+218.5	425.1
Santa Maria (29°–42°S, 53°–42°W)	−65.2	+99.7	+325.2	399.3
Porto Alegre (30°–01°S, 51°–13°W)	−94.1	+184.1	+216.1	363.4
Bagé (31°–20°S, 54°–06°W)	−86.0	+88.2	+175.0	344.5

Figura 9

- Os autores concluem que a variação interanual da frequência de ciclogênese é consistente com as anomalias de precipitação, ou seja:
  - Os anos de maior ocorrência de ciclogênese são os anos de maior ocorrência de chuva e estão associados a valores negativos do IOS (anos de El-Niño);
  - Os anos de menor ocorrência de ciclogênese são os anos de menor ocorrência de chuva e estão associados a valores positivos do IOS.
- A maior frequência de ciclogênese no inverno está de acordo com Taljjard (1972) e Necco (1982) e aparentemente em desacordo com

Satyamurty, Ferreira e Gan (1990); a justificativa é que os últimos se basearam fortemente em imagens de satélite e desta maneira podem ter incluído ciclogênese nos altos níveis, prejudicando a estatística.

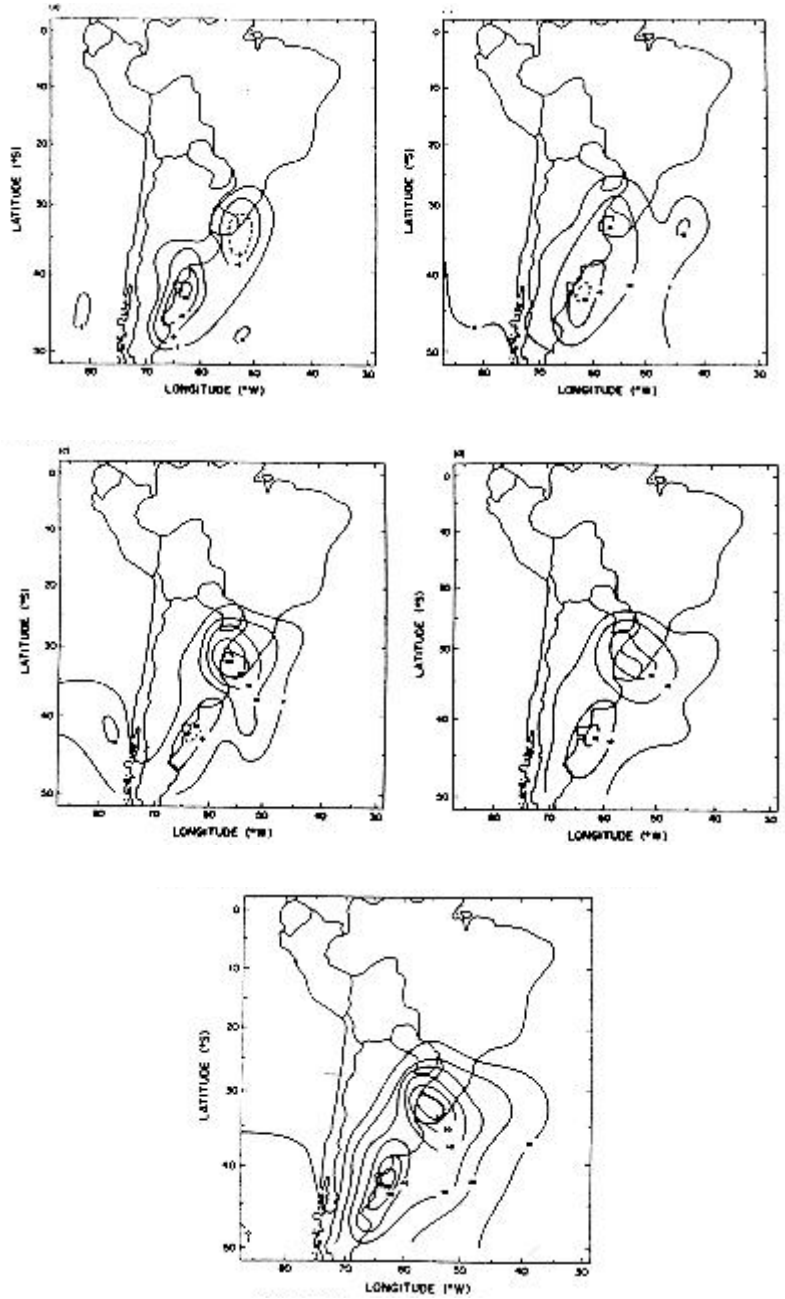

Figura 10: Isolinhas de freqüência média de ocorrência de ciclogênese para as estações do ano (respectivamente verão, outono, inverno e primavera) e para o ano como um todo.

- Basicamente a presença de dois núcleos durante todo o ano;

- Para verificar a importância do estado da atmosfera coerente com as diferenças sazonais e interanuais, avaliaram o campo do número de Richardson e da estabilidade estática, dados respectivamente por:

$$R_i = \frac{g(\partial\bar{\theta}/\partial z)}{\bar{\theta}(\partial\bar{u}/\partial z)^2}$$

  - Pois sabe-se que estabilidade estática e cisalhamento do vento são os principais fatores para a origem de ciclones extratropicais.

- Considerando as estações de radiossondagem citadas anteriormente, obtiveram as secções verticais médias de inverno e verão:

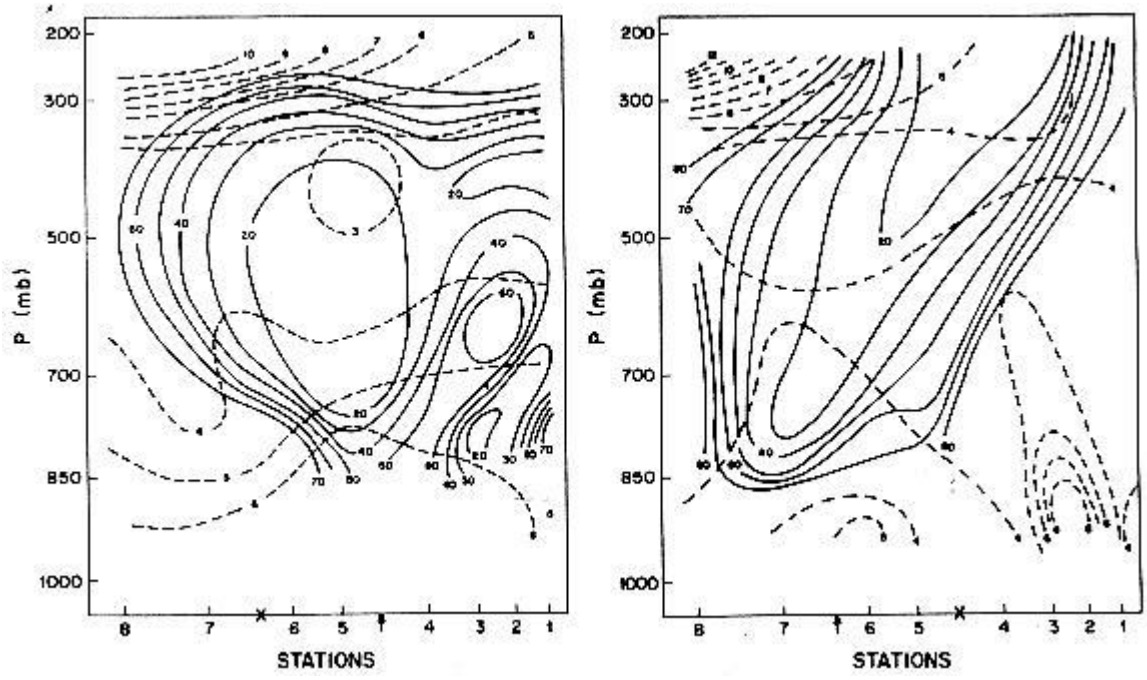

Figura 11: (a) Seções verticais da estabilidade estática (linhas pontilhadas em ºC/km) e o número de Richardson (linhas sólidas) para médias de 10 anos do inverno. A seta indica a posição do principal centro de máxima frequência de ciclogêneses, e a cruz indica o centro secundário. (b) Idem à Figura 11a, mas para o verão.

- Os principais centros de ciclogênese estão nas regiões de baixo R_i nos níveis baixos, além do que os mínimos são menores no inverno do que no verão;

- De acordo com a maior frequência de ocorrência no inverno.

- E para confirmar este argumento apresentam também as correspondentes secções para os dois casos extremos citados anteriormente (1981 e 1983):

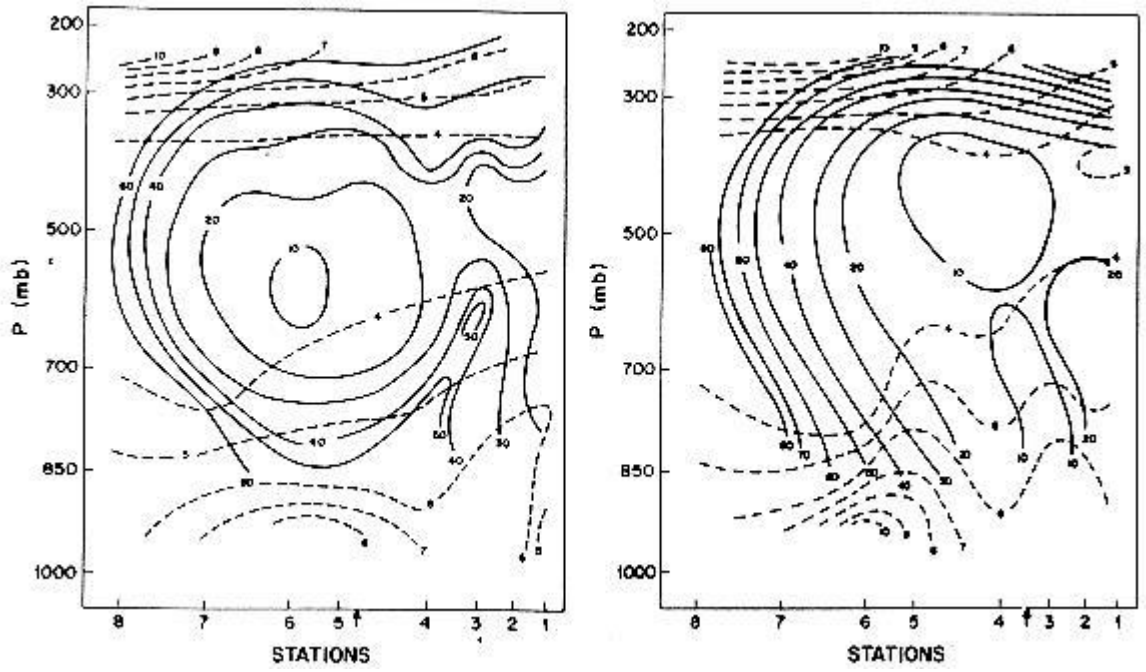

Figura 12: Idem à Figura 11, mas para o(a) inverno de 1981 e (b) verão de 1983.

- Observe os valores bem menores em 1983 em comparação com 1981.

- Portanto, a combinação da estabilidade estática com o cisalhamento do vento parecem explicar, pelo menos parcialmente, as diferenças na frequência de ciclogênese notadas anteriormente.

- Em termos de deslocamentos dos ciclones, as direções preferenciais detectadas estão de acordo com estudos anteriores, com predomínio para sudeste no cinturão 15°-40°S e para leste entre 40°-50°S.

Influências:

- Possível explicação para a formação e localização destes centros:
    - Instabilidade baroclínica local no escoamento de oeste (núcleo sobre o Uruguai). É nos extratrópicos, região caracterizada pelo intenso contraste norte-sul de temperatura, onde se movimentam distúrbios de grande escala, denominados ondas baroclínicas.
    - Distúrbio baroclínico se movendo sobre uma cadeia de montanhas, que gera a chamada lee-ciclogênese a sotavento da montanha (núcleo sobre o Golfo de São Matias). Efeito da topografia que propicia a ocorrência de ventos catabáticos que interagem com o contraste continente-oceano. A ciclogênese se manifesta principalmente a sotavento das cadeias montanhosas (Sinclair, 1995) e nas proximidades de regiões costeiras (Taljaard, 1967).
    - Papel das correntes oceânicas onde condições quentes (frias) prevalecem na porção leste (oeste) dos continentes. Saraiva e Silva Dias (1997) sugerem a influência do gradiente de TSM produzido pela confluência das correntes do Brasil e das Malvinas (Peterson e Stramma, 1991).
- Consequências da baroclinia: os sistemas de baixa pressão inclinam-se em direção ao ar frio à medida que a altura aumenta; os ventos de oeste aumentam em magnitude com o aumento da altura => intensificação do sistema.

Reboita, M. S.; R. P. da Rocha; T. Ambrizzi; S. Sugahara (2009):

- Este trabalho mais recente verificou a presença de uma terceira região ciclogenética no setor oeste do oceano Atlântico Sul. O trabalho mostrou que, ao todo, a frequência de ciclones é máxima em três setores (Figura 13): costa sul/sudeste do Brasil (~25ºS) com maior densidade de sistemas no verão, costa do Uruguai (~35ºS) com maior densidade no inverno e costa sudeste da Argentina (~45ºS) com máximo no verão (Sinclair 1996; Reboita *et al*., 2005; Hoskins e Hodges, 2005; Reboita *et al*., 2009a).

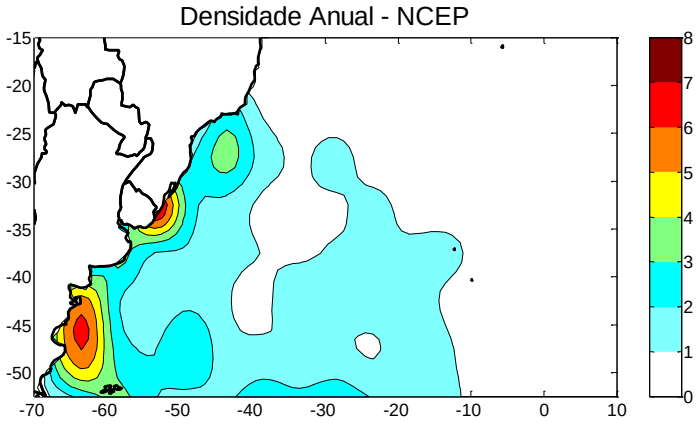

Figura 13: Densidade de ciclogêneses, no período de 1990 a 1999, que se iniciaram com vorticidade $\zeta \leq -1{,}5 \times 10^{-5} s^{-1}$ e que tiveram tempo de vida maior ou igual a 24 h na reanálise do NCEP. Na escala de cor da figura, o valor 1,5 corresponde a aproximadamente 37,5 sistemas.

Vórtices ciclônicos de altos níveis de origem subtropical

Definição:

- São sistemas que se desenvolvem no Sul e Sudeste do Brasil associados a padrões em altos níveis que chegam pela costa oeste da América do Sul vindos do Pacífico;

- São sistemas de baixa pressão de escala sinótica, apresentando-se fechados na alta troposfera;

- Apesar de sua grande importância para as regiões Sul e Sudeste, diversas características sinóticas (variações sazonais e interanuais, processos físicos envolvidos, manutenção, etc) ainda não são bem conhecidas;

- São conhecidos por baixas frias por apresentarem o centro mais frio do que a periferia e ao penetrarem no continente, normalmente provocam instabilidade e precipitação nos setores leste e nordeste do vórtice;

- Sua duração pode variar de algumas horas até duas semanas, podendo provocar chuvas e ventos fortes e eventualmente geadas;

- Seu mecanismo de formação se baseia na amplificação de uma crista corrente acima (como no caso dos VCAN da Região Nordeste);

- Podem se propagar para altitudes menores e estar associados a ciclones de superfície ou mesmo promover ciclogênese.

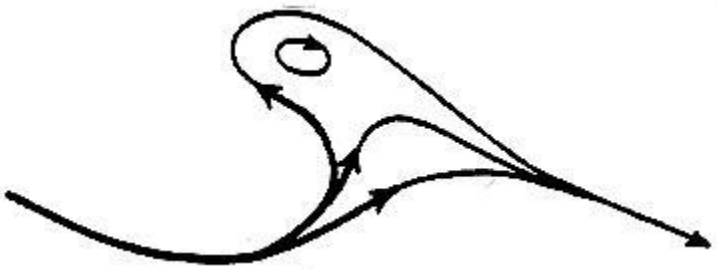

Figura 14: Formação esquemática de um VCAN.

Vórtices do tipo Palmer:

- Origem tropical;
- Formam-se preferencialmente na primavera, verão e outono e passam a maior parte de suas vidas nos trópicos;
- Originam-se acima de 9000m nas latitudes mais baixas, são persistentes, crescem e intensificam-se durante a passagem para as latitudes mais altas (lembrar dos vórtices ciclônicos de altos níveis que atuam sobre o nordeste do país).

Vórtices do tipo Pálmen:

- Formam-se em qualquer época do ano, inclusive no inverno;
- Formam-se devido à pré-existência de um cavado frio em altos níveis de latitudes médias, que ao penetrar no continente se inclina meridionalmente; esta inclinação faz com que haja um atraso da parte em baixas latitudes, desprendendo completamente um núcleo, o qual apresenta circulação ciclônica fechada.

- Segundo Rao & Bonatti (1987), a instabilidade barotrópica não é um mecanismo importante na geração desses vórtices ciclônicos; a liberação de calor latente e a variação da intensidade do anticiclone são mais importantes.
- Os vórtices ciclônicos podem ser classificados como úmidos ou secos, dependendo da quantidade de nebulosidade associada; os confinados na alta e média troposfera são secos enquanto que os que atingem níveis mais baixos possuem maior nebulosidade e são úmidos.

Tabela:			
Mês	**Número/Ano**	**Número Dissip./Ano**	**Número Atlântico/Ano**
Janeiro	3.1	1.6	1.5
Fevereiro	2.7	1.1	1.6
Março	2.4	1.1	1.3
Abril	3.6	1.6	2.0
Maio	3.8	1.5	2.3
Junho	4.0	1.5	2.5
Julho	4.4	1.4	3.0
Agosto	4.3	1.9	2.4
Setembro	3.3	1.2	2.1
Outubro	3.2	1.0	2.2
Novembro	3.1	1.1	2.0
Dezembro	2.9	1.1	1.8
Total	*40.8*	*16.1*	*24.7*

- A climatologia com imagens de satélite e análises operacionais do ECMWF para um período de 10 anos, na área 0°-120°W e 0°-70°S.
    - A análise visual mostra que alguns vórtices próximos à Cordilheira dos Andes decaem e alguns se dissipam completamente; mas existem também os que se intensificam;
    - Ocorrem vórtices ciclônicos de altos níveis no Pacífico Sudeste o ano inteiro, sendo que o maior número é observado nos meses de inverno (JJA);
    - No mês de julho, em média, ocorre o maior número de formação de VCAN por ano e é neste mês que ocorre também a maior freqüência de VCAN que chegam até o Atlântico;
    - Março é o mês de menor freqüência de VCAN que chegam no Atlântico e é também o mês de mínima freqüência média;

- Cerca de 60% do total de VCAN chegam até o Atlântico;
- Quanto à dissipação na costa oeste da AS, o mês de agosto apresenta maior freqüência e outubro a menor.

Avaliação da estrutura dos ciclones

Cyclone Phase Space - CPS (Hart, 2003):

- O CPS (ou diagrama espacial de fase do ciclone) é uma ferramenta que auxilia a identificação das fases dos ciclones. É baseado em dois parâmetros:
  - Assimetria térmica ou de espessura:

$$B = h\left(\overline{Z_{600hPa} - Z_{900hPa}}\,|_{RIGHT} - \overline{Z_{600hPa} - Z_{900hPa}}\,|_{LEFT}\right)$$

  - Anomalia do campo de geopotencial - características em baixos e altos níveis do núcleo do ciclone.

$$\left.\frac{\partial(Z_{\max} - Z_{\min})}{\partial \ln p}\right|_{900}^{600} = \frac{(Z_{\max} - Z_{\min})|_{600} - (Z_{\max} - Z_{\min})|_{900}}{\ln 600 - \ln 900} = -\left|V_T^L\right|$$

$$\left.\frac{\partial(\mathrm{Z_{max}} - \mathrm{Z_{min}})}{\partial \ln \mathrm{p}}\right|_{600}^{300} = -\left|\mathrm{V_T^U}\right|$$

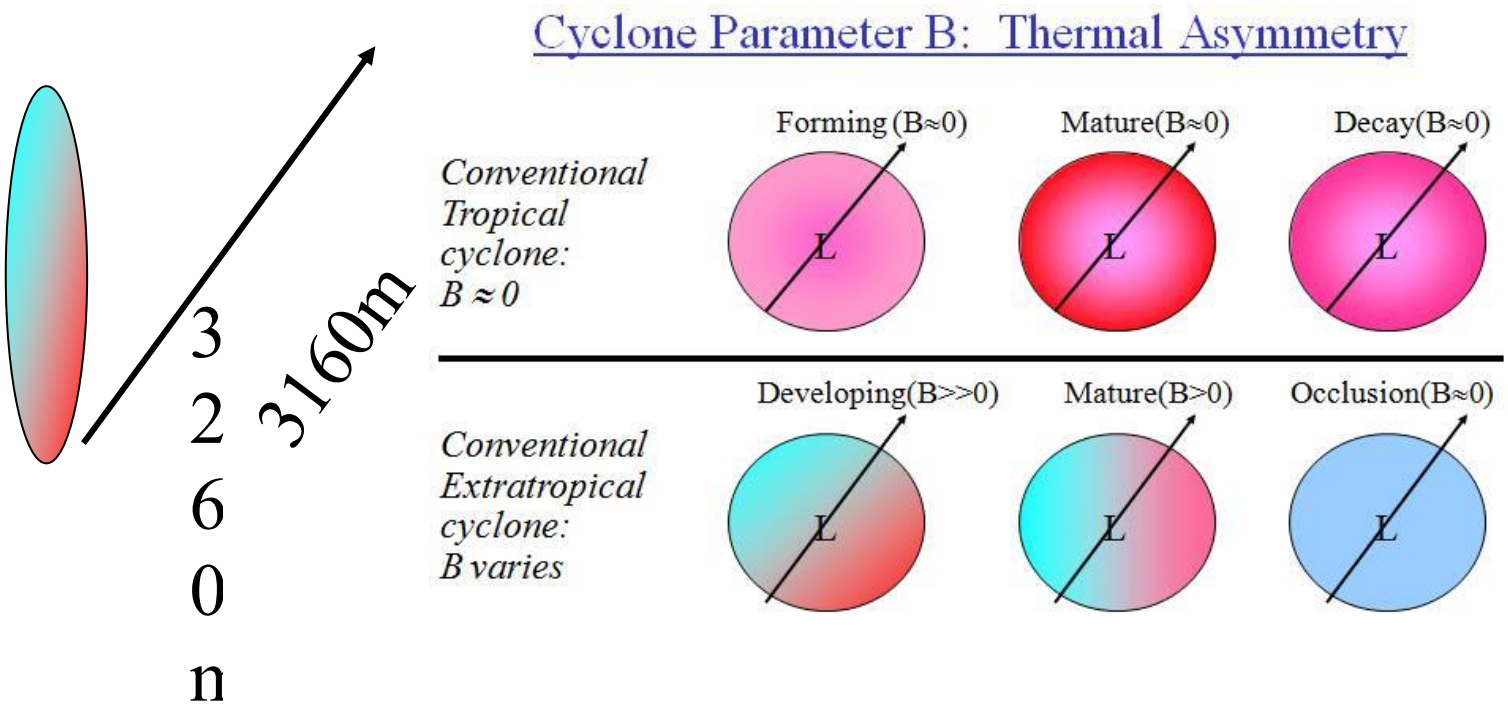

Figura 15: Assimetria térmica dada pelo parâmetro B. Adaptado de Hart e Evans, 2002.

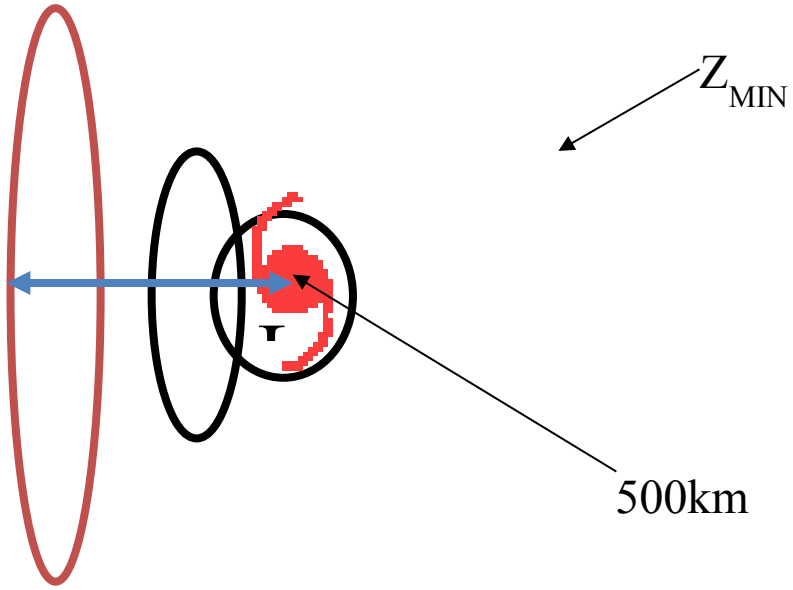

Figura 16

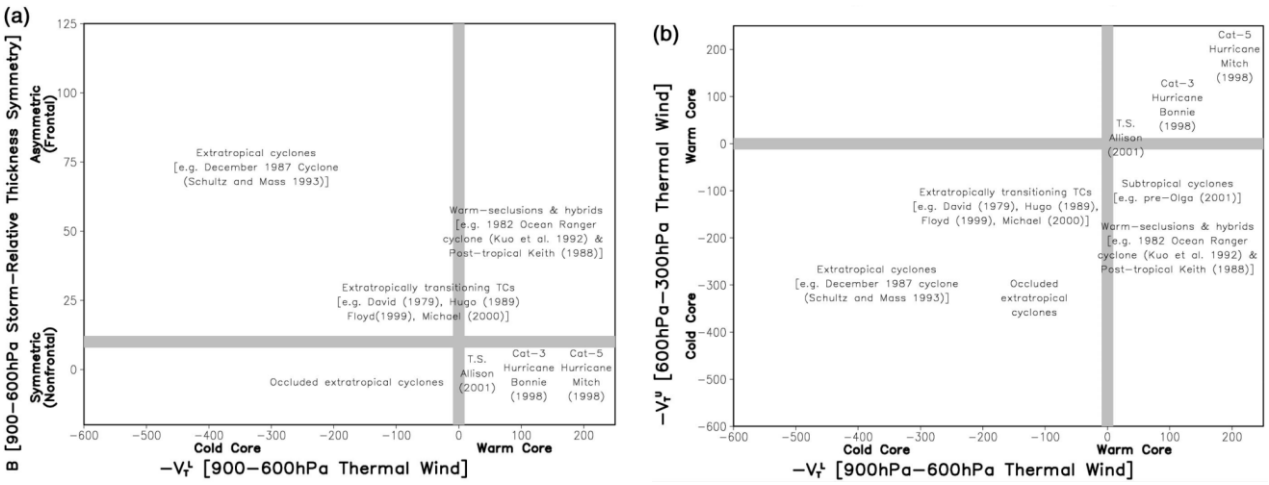

Figura 17: Relação dos locais de vários tipos de ciclones a partir do diagrama proposto. (a) vento térmico em baixos níveis e parâmetro B; (b) vento térmico em altos e baixos níveis. Adaptado de Hart, 2003.

- No artigo de Hart há exemplos do diagrama de fase para diferentes tipos de ciclones (tropicais, extratropicais, de transição...).

Questionário

1) Como ocorre a ciclogênese?

2) Quais os fatores (superfície e altitude) importantes para a formação do ciclone?

3) Sabemos que um baixo valor para o número de Richardson, indica favorecimento à ciclogênese. Discuta essa relação.

4) O que são baixas frias?

5) Qual o mecanismo de formação de um VCAN de origem subtropical?

6) Qual a diferença entre o VCAN dos subtrópicos e o VCAN do Nordeste brasileiro?

7) Faça uma comparação entre os vórtices tipo Palmen e do tipo Palmer (semelhanças e diferenças).

8) Na década de 90, alguns trabalhos importantes sobre ciclogênese na América do Sul foram publicados. Você seria capaz de discutir (com suas próprias palavras!) o motivo:

   a) Da existência de dois núcleos ciclogenéticos na América do Sul?

   b) Da sazonalidade preferencial da ciclogênese?

   c) Do deslocamento característico do ciclone?

Referências

Cavalcanti, I. F. A., 1995: Ciclones extratropicais. IV Curso de interpretação de imagens e análise meteorológicas, UNIVAP, São José dos Campos.

Gan, M. A., Rao, V. B., 1991: Surface Cyclogenesis over South America, Mon. Weath. Rev., 119, 1293-1302.

Gan, M. A., 1992: Ciclogeneses e ciclones sobre a América do Sul. Tese de Doutorado. Inoe/5400-TDI/479.

Hart, R. E. A cyclone phase space derived from thermal wind and thermal asymmetry. Monthly Weather Review, 131, 585-616, 2003.

Holton, J. R., 1979: An Introduction to Dynamic Meteorology. Academic Press, 391 pp.

Lourenço, M.C.M., Ferreira, N.J. & Gan, M.A. 1996: Vórtices ciclônicos em altos níveis de origem subtropical, Climanálise Especial 10 anos, 163-167.

Saucier, W. J., 1969: Principios de análise Meteorológica. Universidade de Chicago.

Sutcliffe, 1947: QJRMS 73 370-383.

Petersen, 1956: Weather Analysis and Forecasting.

Silva Dias, P.L., 1986: Interpretação da Teoria de Desenvolvimento de Sutcliffe - Curso de Extensão Universitária - Introdução ao uso de modelos diagnósticos para previsão do tempo - DCA/IAG/USP.

Ferreira, C.C. 1989: Ciclogêneses e ciclones extratropicais na Região Sul-Sudeste do Brasil e suas influências no tempo, INPE-4812-TDL/359.

Satyamurty, P., Ferreira, C.C. & Gan, M.A. 1990: Cyclonic Vortices over South America, Tellus, 42A, 194-201.

Gan, M.A. & Rao, V.B. 1991: Surface Cyclogenesis over South America, Monthly Weather Review, 119, 1293-1302.

Reboita, M. S.; R. P. da Rocha; T. Ambrizzi; S. Sugahara, 2009 a: South Atlantic Ocean Cyclogenesis Climatology Simulated by Regional Climate Model (RegCM3). Climate Dynamics, 10.1007/s00382-009-0668-7.

Seluchi, M.E. 1995: Diagnóstico y pronóstico de situaciones sinópticas conducentes a ciclogénesis sobre el este de Sudamérica, Geof.Intern., 34(2), 171-186.

Sites:

http://www.dca.iag.usp.br/www/material/ritaynoue/aca-0422/2009_aulas%20amanda/ (acessado em 12/08/10)

http://nsidc.org/arcticmet/glossary/cyclone.html (acessado em 13/08/10)

http://moe.met.fsu.edu/cyclonephase/ppt/talkhartevans.ppt (acessado em 13/08/10)