

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

Complexos convectivos de mesoescala

Ciclo de vida de um CCM

Gênese

Um número de tempestades individuais se desenvolve em uma região onde as condições são favoráveis para convecção (leve movimento ascendente na baixa troposfera, coluna condicionalmente instável, etc).

Efeitos de pequena escala, como topografia e fontes de calor localizadas podem exercer importante papel no estágio inicial de desenvolvimento.

A liberação de calor latente e o aquecimento por compressão no meio podem se combinar para produzir uma região de aquecimento anômalo em meso-b, de modo que eventos extremos (tornados, fortes rajadas) ocorrem nesta fase.

Nos níveis médios, o entranhamento de ar potencialmente mais frio do ambiente produz evaporação e conseqüentemente ventos descendentes, originando mesoaltas e rajadas de ar frio na camada limite superficial.

Desenvolvimento

O meio em larga-escala começa a responder à presença de uma região quente anômala e uma camada em níveis médios (750-400hPa) de influxo se desenvolve.

Na superfície, frentes de rajada e outflows das tempestades individuais se mergem para produzir uma mesoalta fria outflow boundary.

Continua um forte influxo nos níveis baixos de ar úmido e instável e o sistema cresce rapidamente.

Os elementos mais convectivos ocorrem ao longo da zona de convergência produzida pela interação da outflow boundary com o influxo nos níveis baixos.

Em resposta ao aquecimento produzido pela tempestade, ar na média troposfera converge para o sistema, onde é incorporado numa região de movimento ascendente em mesoescala.

Eventualmente esta região pode se tornar saturada e exibir uma estrutura de núcleo quente.

Estágio maduro

Elementos de convecção intensa continuam a se formar na região onde o influxo dos baixos níveis fornece combustível para essas condições instáveis.

Nesta etapa, tempestades severas podem ainda ocorrer; entretanto o tipo principal de condição do tempo passa a ser fortes chuvas localizadas pois os elementos convectivos ocorrem em um ambiente úmido com fraco cisalhamento vertical e assim são bastante eficientes quanto à precipitação.

As características dominantes do sistema maduro parecem ser a grande extensão do fluxo de massa ascendente na média troposfera e a grande área de precipitação.

A natureza de núcleo quente da circulação de mesoescala pode produzir uma mesobaixa acima, justamente sobre a mesoalta associada com a rasa camada de ar frio à superfície; esta mesobaixa ajuda a intensificar a convergência no sistema, além do que neste estágio uma grande mesoalta está presente nos altos níveis sobre o sistema.

Dissipação

O estágio de dissipação é marcado por uma rápida mudança na estrutura do sistema, pois elementos de intensa convecção não mais se desenvolvem.

O suprimento de combustível para o sistema foi interrompido ou modificado, de maneira que não apresenta mais a estrutura em mesoescala organizada e aparenta mais caótico nas imagens.

Os CCMs podem ter começado a decair por uma série de motivos:

1. O domo de ar frio adiante do sistema pode se tornar tão intenso que a zona de convergência à superfície se afasta da região de ascensão em mesoescala indo em direção a regiões de subsidência nos níveis médios e altos.
2. O sistema pode ter se movido para um meio diferente em larga-escala de modo que o escoamento relativo muda e a convergência de umidade nos baixos níveis é significativamente reduzida.
3. Pode também ter se movido para um meio mais seco e estável em larga-escala.

Embora o CCM rapidamente perca sua organização em meso-a, o ar frio e a outflow boundary de superfície ainda formam alguma nebulosidade de maneira que pequenas pancadas podem persistir por algumas horas.

Provavelmente a feição mais importante dos CCMs é sua associação com uma região de convergência na média troposfera e também com uma ascensão organizada em mesoescala; o desenvolvimento dessa feição é particularmente importante porque reflete a sua organização em escala meso-a, sua estrutura e sua dinâmica, os quais são bastante diferentes de outros tipos de sistemas atmosféricos.

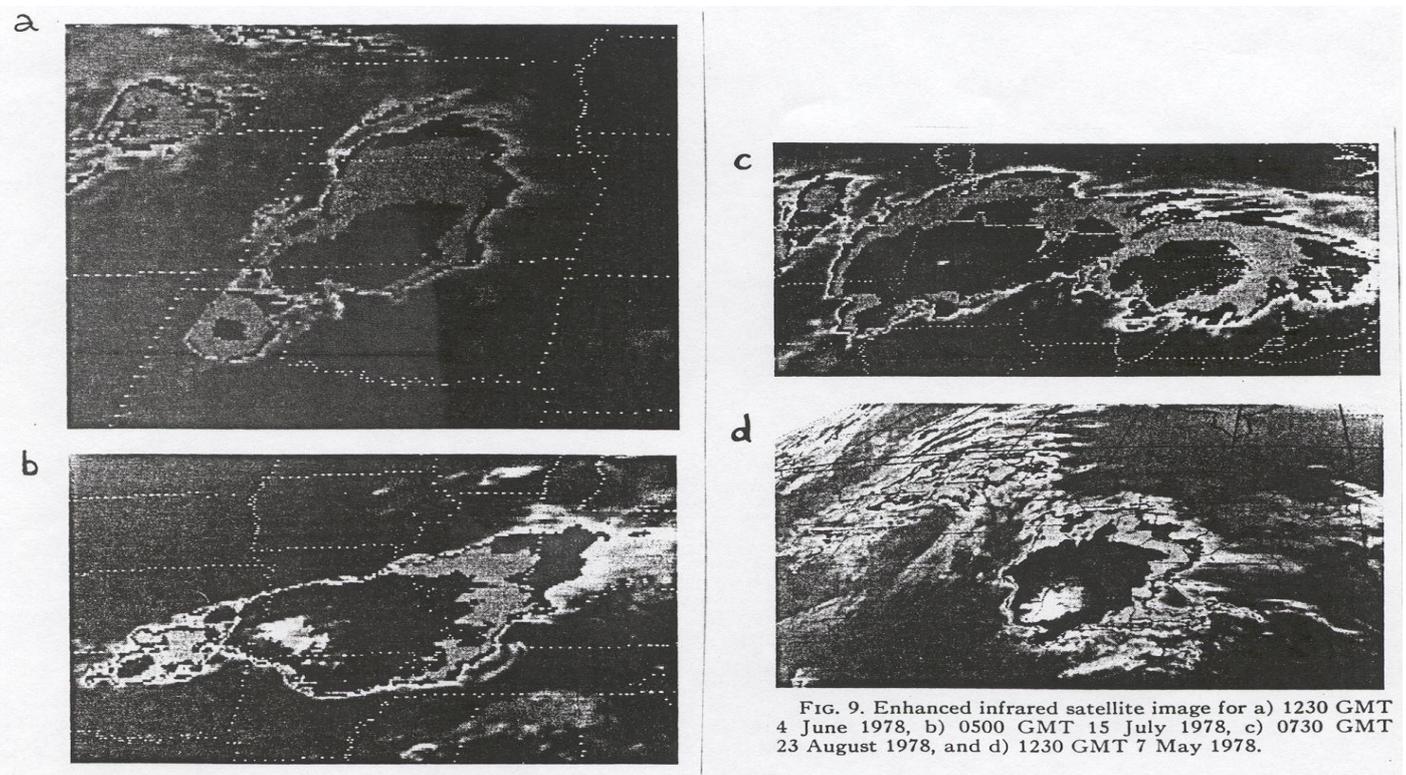


Figura 1

Alguns estudos realizados

Maddox (1980)

Com base em características físicas obtidas com técnicas de realce em imageamento de satélite no canal do infravermelho, os complexos

convectivos de mesoescala (CCM) devem satisfazer definidos por Maddox (1980), que levam em consideração o tamanho, a forma e o tempo de vida. Os critérios foram criados para identificar CCMs a partir de imagens de satélite do IR.

- Tamanho A - uma região com temperaturas $< -32^{\circ}\text{C}$ e com uma área de 100000 km^2 ;
- Tamanho B - o sistema deve apresentar um núcleo frio com temperaturas $< -52^{\circ}\text{C}$ e com uma área de 50000 km^2 ;
- Início: quando as definições de tamanho A e B forem satisfeitas;
- Duração: definições de tamanho A e B deve ser mantidas por um período de 6h;
- Máxima extensão: quando a região definida em A alcançar máximo tamanho;
- Forma: excentricidade 0.7 no instante da máxima extensão;
- Término: quando as definições de tamanho A e B não mais forem satisfeitas.

Obs 1: a restrição em excentricidade exclui sistemas lineares do tipo linhas de instabilidade.

Obs 2: os valores de temperaturas citados se referem aos EUA.

Tempestades individuais maduras com temperaturas da mesma ordem ($< -32^{\circ}\text{C}$) podem cobrir áreas de aproximadamente 1000 km^2 ou pouco mais, mas de qualquer forma a escala de um CCM é duas ordens de grandeza maior.

Sistemas convectivos de escala meso-a (escala de comprimento de 250-2500 km e escala de tempo de 6h) podem ser classificados de acordo

com suas características físicas, seu nível de organização e seus locais de ocorrência:

- Tipo linear:
 - trópicos: *tropical squall*.
 - lat.médias: *squall line*.
- Tipo circular:
 - trópicos: *cloud cluster*.
 - *tropical storm/cyclone*
 - *mesoscale convective complex*
 - lat.médias: *cloud cluster*
 - *mesoscale convective complex*

Obs: A escala meso-b (escala de comprimento de 25-250 km e escala de tempo menor que 6h) tem uma classificação semelhante.

Comparações entre eventos meteorológicos demonstram que os CCMs e as linhas de instabilidade manifestam-se como diferentes tipos de sistemas convectivos, tanto em estações de superfície quanto em imagens de radar e satélite.

Supõe-se, portanto, que o formato circular de CCMs indica a predominância de circulações de mesoescala convectivamente geradas; em contraste, o formato de linha de severas instabilidades pré-frontais é imposto e modulado por padrões de larga-escala (tais como cavado em altitude, convergência adiante da frente em superfície, etc).

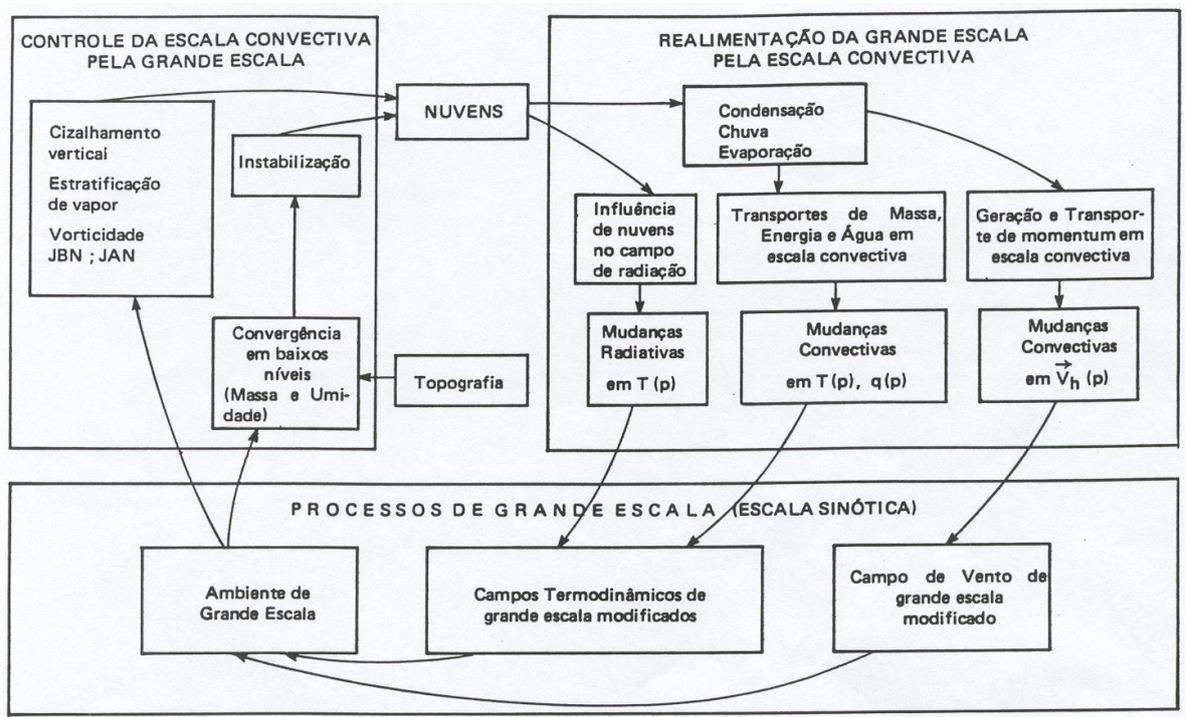


Figura 2: Diagrama esquemático de interação entre grande escala e escala convectiva. Escala convectiva inclui mesoescala e pequena escala. Adaptado de Betts, 1974.

- Os CCMs são conjuntos de cumulonimbus cobertos por densa camada de cirrus que podem ser facilmente identificados em imagens de satélite devido a seu formato aproximadamente circular e com um crescimento explosivo de 6 a 12 horas.
- Nos EUA, estes sistemas são observados a sotavento (lee-side) das Montanhas Rochosas e na América do Sul, a sotavento dos Andes nas latitudes médias e na costa do Peru nos trópicos.
- Algumas trajetórias típicas do centro geométrico de CCMs ocorridos na AS e localizados em imagens de satélite.

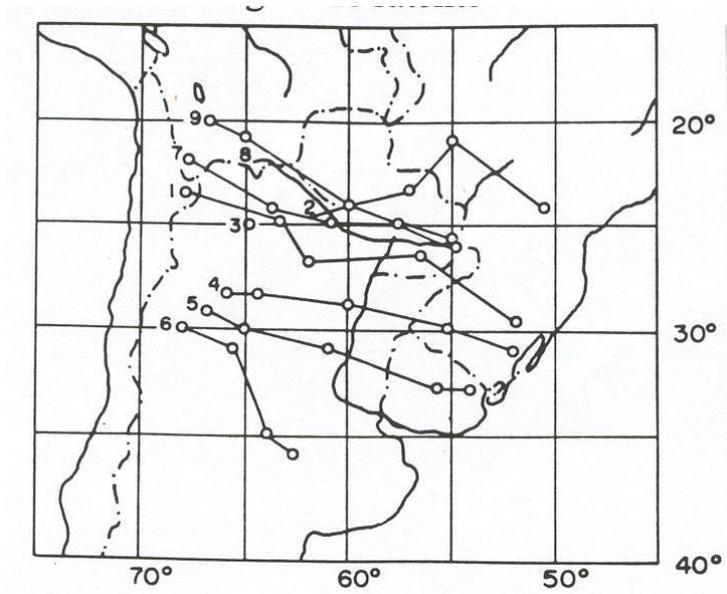


Figura 3: Trajetórias do centro geométrico de CCMs. Fonte: Guedes e Silva Dias, 1984.

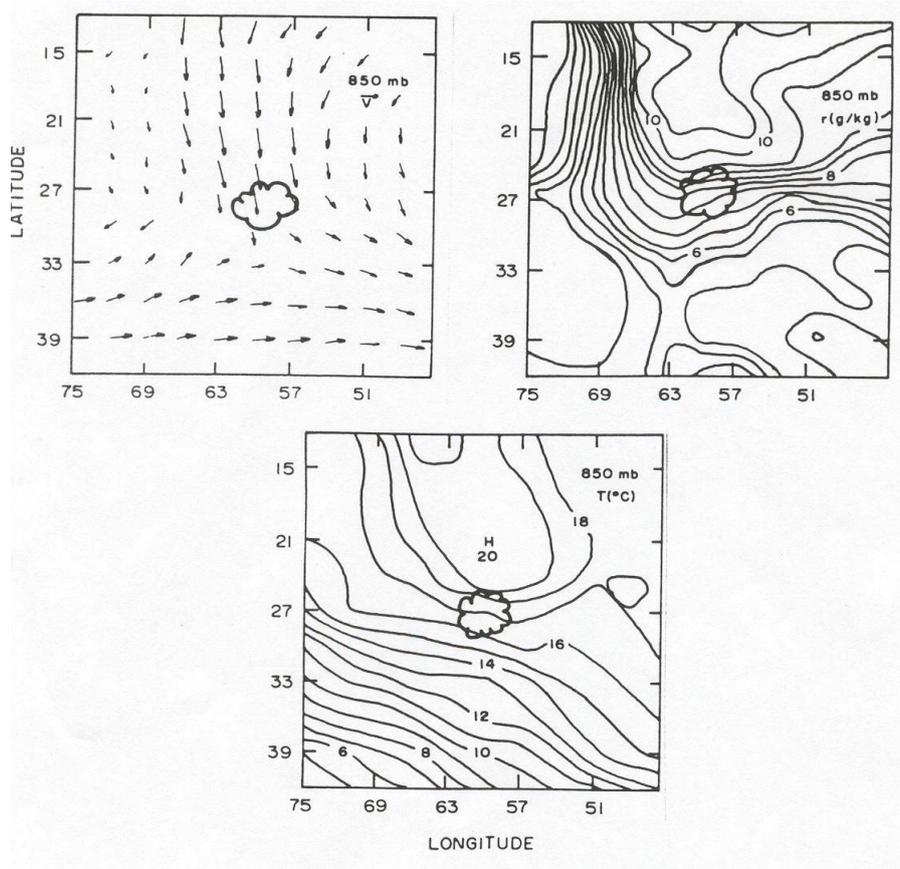


Figura 4: Campos meteorológicos obtidos por composição com relação ao centro dos CCMs da Figura 3, no horário das 12 TMG em que o sistema está maduro. (a) Campo do vento em 850 mbar. (b) Razão de mistura em 850 mbar. (c) Temperatura em 850 mbar. Fonte: Guedes e Silva Dias, 1984.

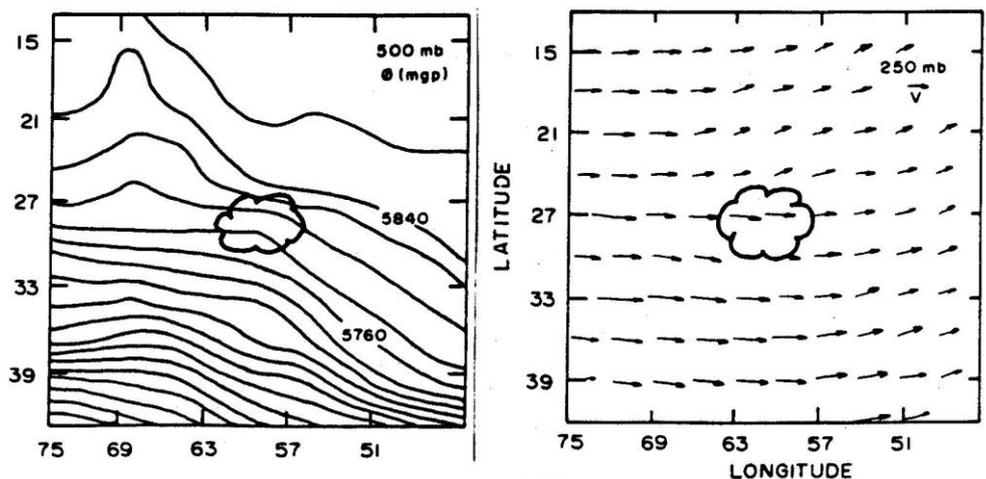


Figura 5: Campos meteorológicos obtidos por composição com relação ao centro dos CCMs da Figura 3, no horário das 12 TMG em que o sistema está maduro. (d) Geopotencial em 500 mbar. (e) Campo de vento em 250 mbar. Fonte: Guedes e Silva Dias, 1984.

- Forte advecção de ar quente e úmido pelo JBN em 850hPa, proveniente da região amazônica;
- Presença de advecção de vorticidade ciclônica em 500hPa devido a um cavado de onda curta;
- Em 250hPa, aparece um JAN ao sul do CCM.

Acoplamento entre JBN e JAN:

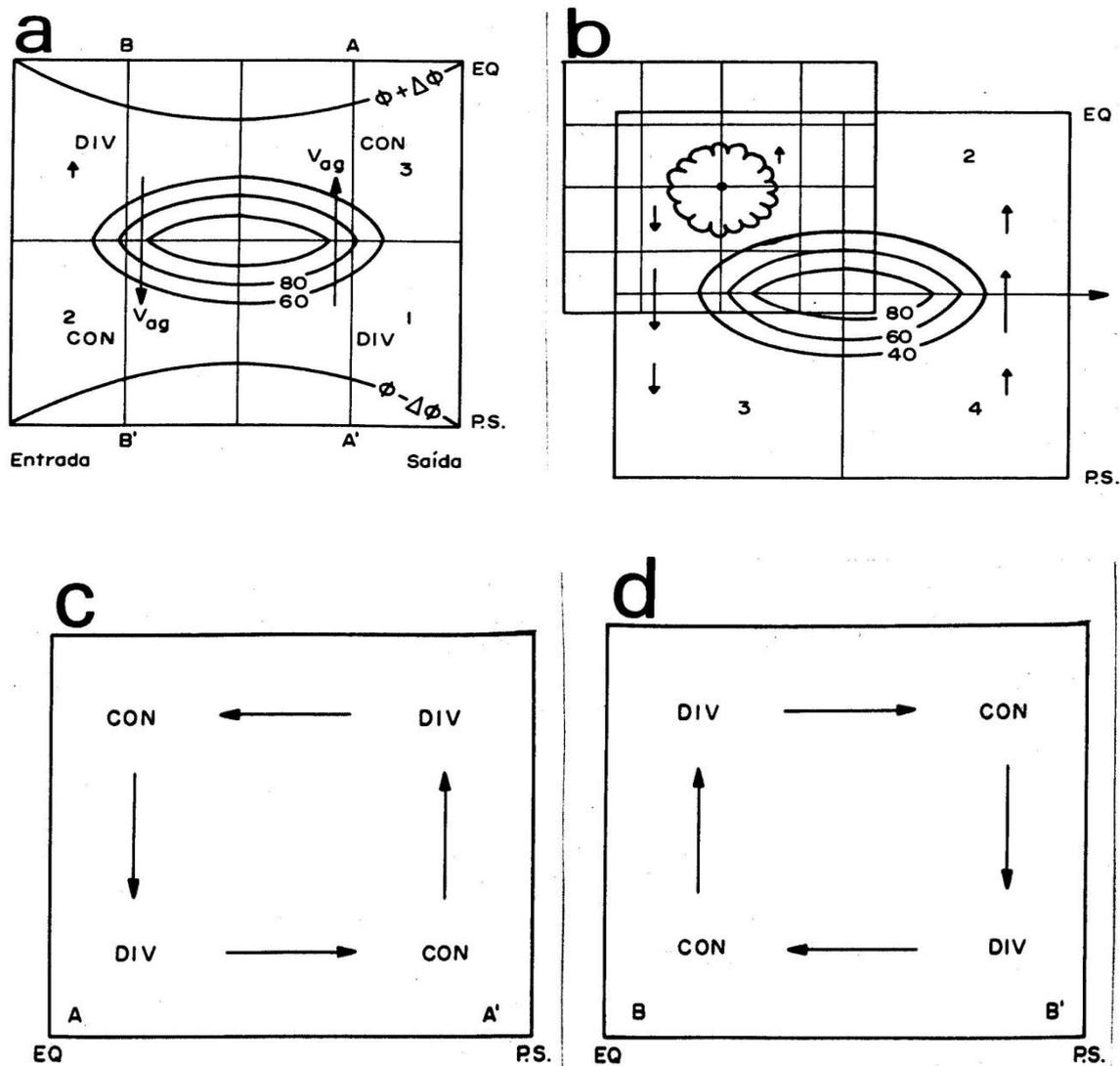


Figura 6: Esquema de circulação em torno de um jato num plano horizontal na alta troposfera. (b) Localização do CCM com relação ao modelo de Sechrist e Whittaker (1979). (c) Esquema de circulação vertical indireta ao longo de AA' indicado em (a). (d) Esquema de circulação vertical direta ao longo de BB' indicado em (a).

Fonte: Guedes e Silva Dias, 1984.

- A maioria dos CCMs se forma ao entardecer e primeiras horas da noite, o que indica que é necessário um mecanismo de modulação diurna para acionar o gatilho da convecção, desde que a atmosfera esteja condicionalmente estável do ponto de vista termodinâmico.
- Além disso, o fato dos CCMs se originarem a sotavento das montanhas aponta para a modulação provocada pela brisa vale-montanha como um dos principais mecanismos de formação.

Velasco e Fritsch (1987)

- Documenta as ocorrências, frequências e características de CCMs em latitudes médias sobre a América do Sul;
- Fornece uma base climatológica adicional para quantificar o impacto global dos CCMs;
- Fornece uma base de dados para comparações de CCM sobre o continente e sobre o oceano e também entre latitudes médias e trópicos;
- Fornece uma base climatológica e sinótica para promover o entendimento e eventualmente a previsão de sistemas atmosféricos nas latitudes médias na América do Sul durante os meses quentes do ano;
- Utiliza critérios semelhantes aos de Maddox (1980), porém com limiares de temperaturas um pouco diferentes (-40° a -42°C ao invés de -32°C e -62° a -64°C ao invés de -52°C); quanto às áreas, os valores são os mesmos.
- Com o uso de satélites geoestacionários amostrando continuamente a partir da década de 70, o estudo de sistemas convectivos teve um salto de qualidade; neste estudo, por exemplo, foram usados 2 anos de imagens de satélite em intervalos regulares de 1 hora (maio de 81 a maio de 1983).

- Para os propósitos deste trabalho, a região ao sul de 20°S na AS foi considerada como sendo latitudes médias.

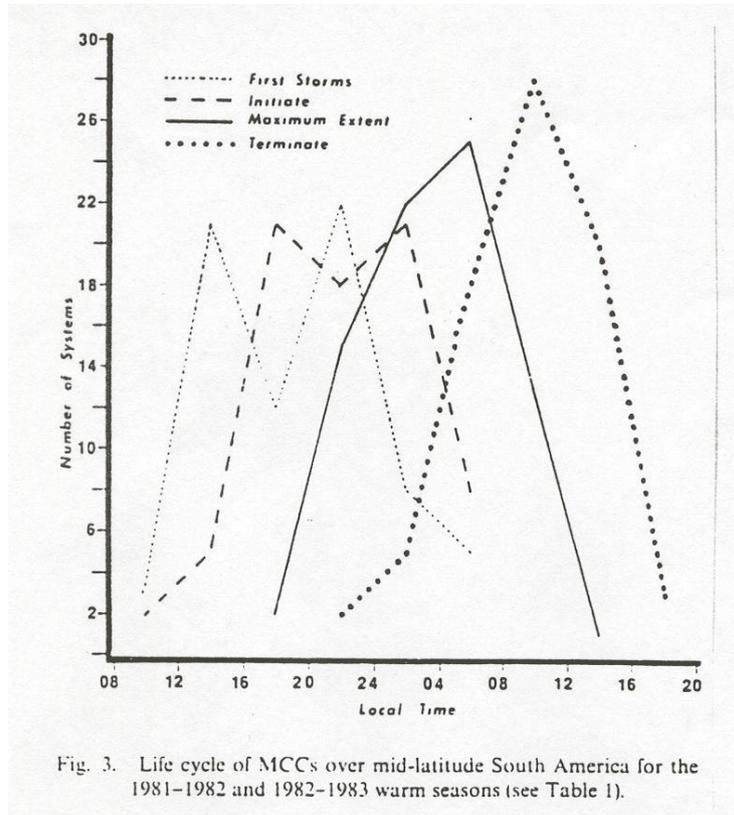


Fig. 3. Life cycle of MCCs over mid-latitude South America for the 1981-1982 and 1982-1983 warm seasons (see Table 1).

Figura 7

Resultados:

Em 1981 foram classificados 22 sistemas enquanto que em 1983 houveram 56 ocorrências; o mesmo ocorre ao comparar o mesmo mês em anos consecutivos, o que sugere que determinados padrões de grande-escala são mais favoráveis para a geração de CCMs do que outros (a alta incidência em 1983 deve-se ao fenômeno El-Niño).

Outra característica do levantamento é que as primeiras tempestades tipicamente se desenvolvem durante o começo da noite (19 HL) e a transição para um grande sistema de mesoescala altamente organizado

usualmente ocorre algumas horas depois (tipicamente 21:30 HL); a maioria dos sistemas atingiram máxima extensão após a meia-noite (cerca de 03 HL) e persistem até as primeiras horas da manhã (o horário médio de término é 09 HL).

- Embora os horários de ocorrência variem significativamente, é evidente que muitos sistemas são predominantemente noturnos e podem ser responsáveis pelo máximo de convecção e tempestades sobre o norte e leste da Argentina, Paraguai e sul do Brasil.
- Além disso, nota-se um duplo pico no horário das primeiras "tempestades" e no "início", o que sugere dois mecanismos diferentes de início das tempestades: o primeiro relacionado ao ciclo diurno de aquecimento e o segundo pode estar ligado à convergência noturna no vale do Rio Paraná fortalecida pelos ventos catabáticos dos Andes.

As trajetórias dos CCMs na AS durante o período de estudo:

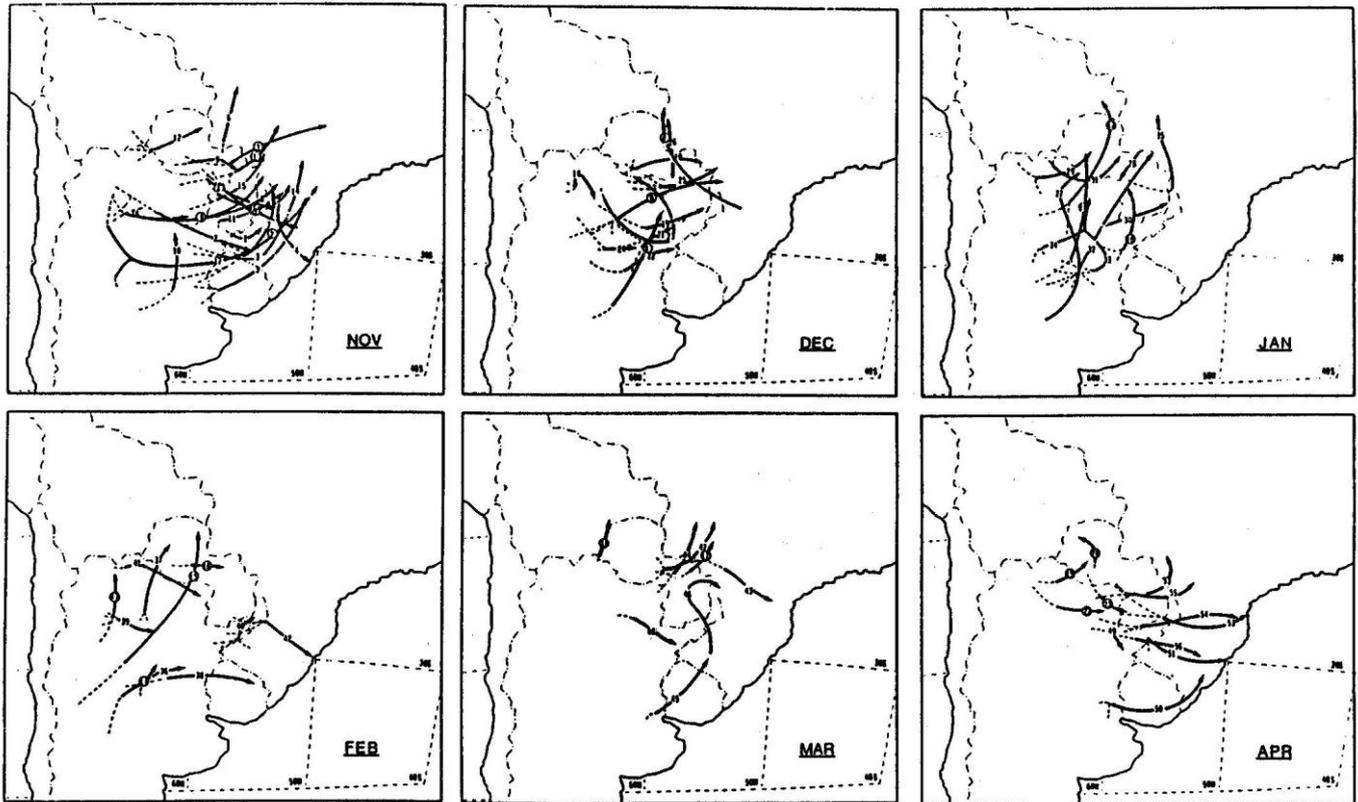


Fig. 9. Tracks of mid-latitude South American MCCs. Numbers correspond to systems listed in Table 1; circled numbers indicate systems from 1981-1982; uncircled numbers are 1982-1983. The location of the numbers along the tracks indicates the location of the centroid of the MCC cold-cloud shield at the time of maximum extent. Dashed lines indicate regions and movements of first thunderstorms.

Figura 8

Movimento quase zonal de oeste para leste no final da primavera, mais em direção ao equador durante o verão e retornando para oeste-leste no meio do outono.

Para ambos os continentes, algumas observações genéricas adicionais podem ser enfatizadas:

- Muitos dos sistemas resultam de pequenas tempestades desenvolvidas em diferentes locais que interagem entre si e se mergem;
- A região favorável para ocorrência de CCMs se desloca para oeste no final da primavera;

- A convenção mais intensa ocorre tipicamente nas porções oeste e equatorial dos complexos;
- Além dos efeitos em superfície, os CCMs também produzem grandes perturbações anticiclônicas no escoamento de larga-escala nas vizinhanças da tropopausa acima do complexo convectivo;

Comparação com os CCMs dos EUA:

TABLE 2. Comparison of Satellite Characteristics of U.S. and South American Mid-Latitude MCCs

	Number of Systems	Time, local				Area, $\times 10^3 \text{ km}^2$		
		First Storms	Initiate	Maximum Extent	Terminate	Duration, hours	Shield	Active Core
United States (1978)	43	1400	1930	0130	0630	11.0	308	139
United States (1981)	23	1640	2300	0300	0730	8.5	310	192
United States (1982)	37	1530	2100	0100	0530	8.5	281	181
Mid-latitude South America (1981-1982)	22	1830	2030	0200	0800	11.5	397	189
Mid-latitude South America (1982-1983)	56	1930	2200	0330	0930	11.5	519	187

Mid-latitude South America is south of 20° S. Cold cloud shield area is for $T \leq -32^\circ \text{C}$ for U.S. systems. For all other systems it is $T \leq -40^\circ$ and 42°C for 1981-1982 and 1982-1983, respectively. T core is $\leq -52^\circ \text{C}$ for U.S. systems. For all other systems it is $T \leq -60^\circ$ and 64°C for 1981-1982 and 1982-1983, respectively. Times are rounded to the half hour.

Figura 9

- Os CCMs da AS se desenvolvem um pouco mais tarde e duram um pouco mais;
- Cerca de 30% dos CCMs na AS são inicialmente detectados na encosta leste dos Andes, e o restante se desenvolve sobre a planície; para os EUA, 25-30% se desenvolvem na encosta das Rochosas
- Apesar de serem semelhantes em vários aspectos, os CCMs da AS são, na média, 60% maiores do que os dos EUA.

No horário da máxima extensão ($< -40^{\circ}\text{C}$) a área na AS vale cerca de 500000 km^2 enquanto que nos EUA vale 300000 km^2 .

Além disso, a frequência de eventos muito grandes na AS é bem maior do que nos EUA; de fato, alguns sistemas da AS são aproximadamente 30% maiores do que o maior CCM documentado nos EUA (910000 km^2 , 07 de Maio de 78).

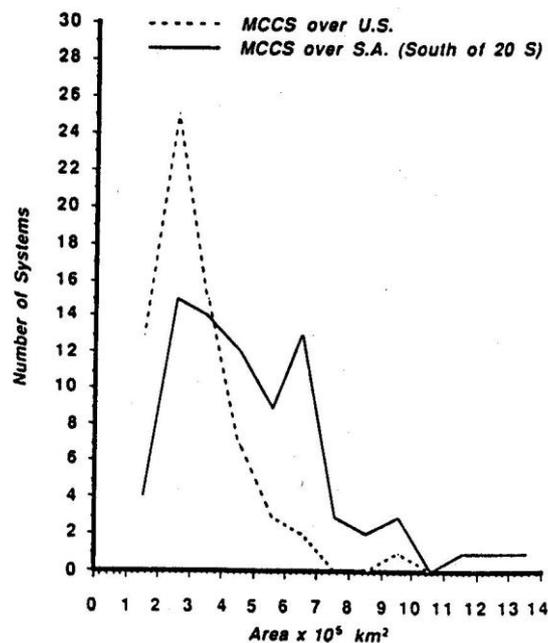


Fig. 8. Frequency distribution of MCC cold-cloud shield areas for United States and South American mid-latitude (south of 20°S) MCCs. See section 2 for definition of areas.

Figura 10

- Outra razão pode estar ligada ao fato de que o combustível para a convecção no caso da AS é oriundo da bacia amazônica e da bacia do Rio Paraná, cujo conteúdo de umidade é bem maior do que no caso dos EUA; assim a instabilidade potencial para desenvolvimento de convecção profunda sobre a AS é levemente maior do que nos EUA;

- Outra razão ainda pode ser que a Cordilheira dos Andes é mais elevada e possui encosta leste mais inclinada do que as Montanhas Rochosas.
- Uma das diferenças mais óbvias entre as populações de CCMs está na extensão latitudinal de atividade; enquanto que nos EUA os CCMs ocorrem entre 30° e 50°N e ocasionalmente entre 55° e 60°N, na AS os CCMs raramente ocorrem ao sul de 35°S.

Esta diferença está relacionada à diferença em migração latitudinal dos ventos de oeste e no ar úmido da camada limite que alimenta a convecção profunda (esta migração dos westerlies deve-se principalmente à maior proporção continente-oceano no HN e a conseqüente maior variabilidade sazonal de temperatura).

- Uma comparação da distribuição mensal da ocorrência de CCMs indica que o estabelecimento de condições favoráveis se dá similarmente em ambos os hemisférios; por outro lado, na AS existem ocorrências até o final do outono, o que não acontece nos EUA.

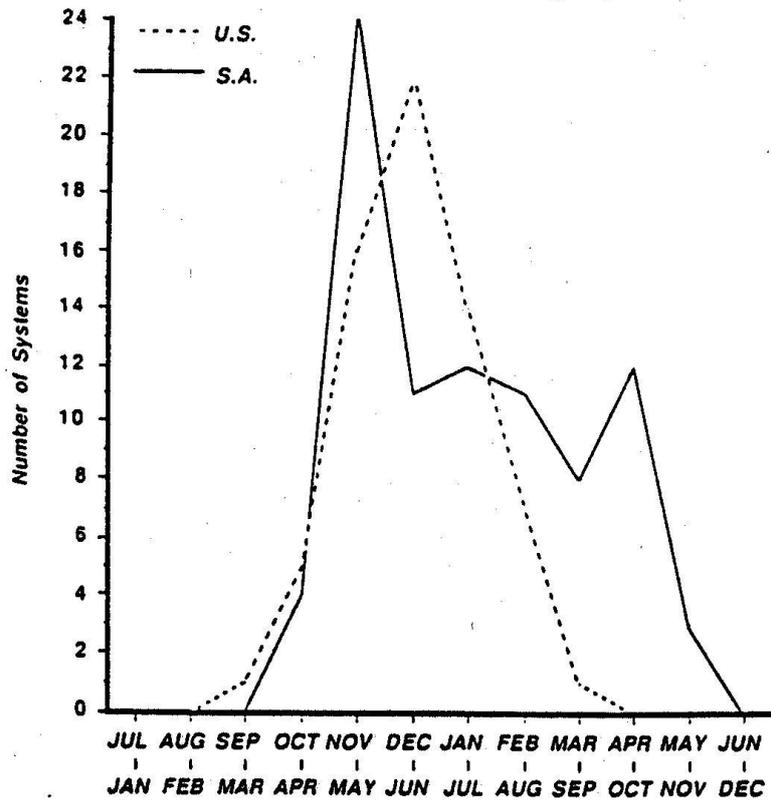


Fig. 12. Monthly distribution of MCCs in mid-latitude South America and in the United States. U.S. sample is from 1978 and 1981; South American sample is from May 1981 to May 1983.

Figura 11

- Isso pode estar ligado ao fato de que o HS é mais dominado por oceanos e a mudança entre estações do ano ocorre de maneira mais gradativa do que no HN.
- Outra razão pode se dever ao fato de se estar considerando como latitudes médias a região ao sul de 20°S, o que eventualmente pode computar sistemas de características mais tropicais.
- Apesar de sua relação com a passagem de distúrbios nos westerlies, os CCMs não necessariamente necessitam de condições baroclínicas para se desenvolver; além disso, estudos anteriores comprovam que os efeitos da liberação de calor latente são os mais importantes e que

o desenvolvimento dos sistemas é favorecido em ambientes mais barotrópicos.

- Sendo assim, os CCMs podem aparecer em grande número nos trópicos e no período de estudo, 115 CCMs foram detectados na faixa tropical da América:

Suas características e ciclo de vida são semelhantes aos sistemas de latitudes médias;

Os sistemas se iniciam mais tarde (+/- 4h de diferença) e duram menos (1 a 3 horas a menos) do que os da AS;

Tem aproximadamente o mesmo tamanho dos CCMs dos EUA;

Somente 15% se moveram mais do que 200 km sendo que o restante apresentou apenas movimento aparente pela expansão da nebulosidade ou junção com outras tempestades;

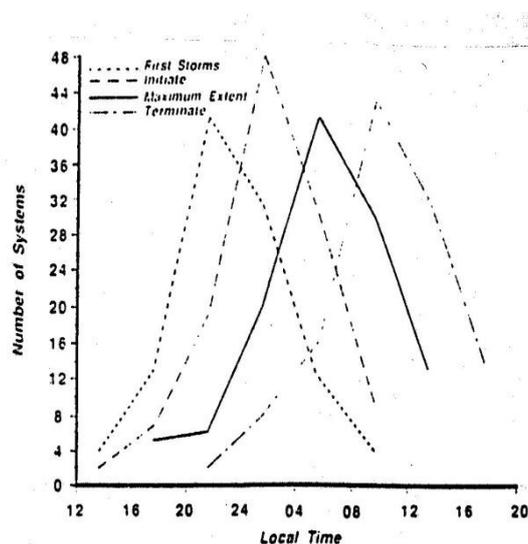


Fig. 13. Life cycles of low-latitude MCCs for the period May 1981 through April 1983.

Figura 12

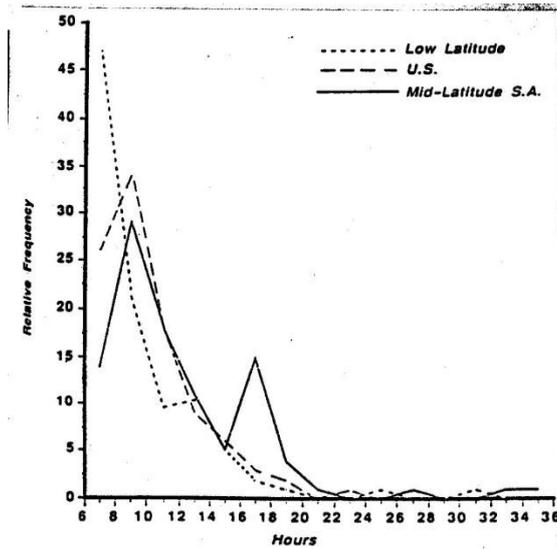


Fig. 14. Duration of MCCs over the United States, low-latitudes, and mid-latitude South America. U.S. sample is from 1978 and 1981; mid-latitude South American population is for the November–April periods of 1981–1982 and 1982–1983; low-latitude population is from May 1981 to April 1983.

Figura 13

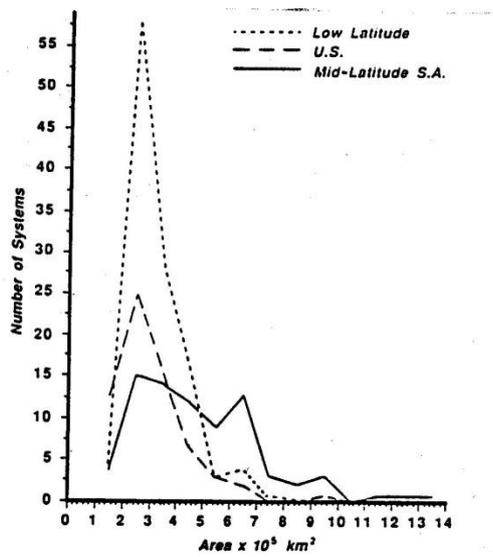


Fig. 15. Frequency distribution of MCC cold-cloud shield maximum area. See text for cold-cloud shield definitions and Figure 14 caption for sample periods.

Figura 14

TABLE 3. Summary of MCC Characteristics for Systems in and Around the Americas

	Average Systems per Season	Time, local				Duration, hours	Area of Shield, $\times 10^3 \text{ km}^2$
		First Storms	Initiate	Maximum Extent	Terminate		
U.S. (1978, 1981, 1982)	34	1500	2100	0130	0630	9.5	299
Mid-latitude South America	39	1900	2130	0300	0900	11.5	485
Low-latitude	57	2300	0200	0530	1030	8.5	320
over land	28	2230	0100	0530	0930	8.5	323
over sea*	29	0000	0230	0630	1130	9.0	316
Total: U.S., low-latitude, and mid-latitude South America	130	2000	2300	0400	0900	10:00	364

Mid-latitude South America is south of 20 S.

*Includes 10 systems that formed along coastlines and four that became tropical storms.

Figure 15

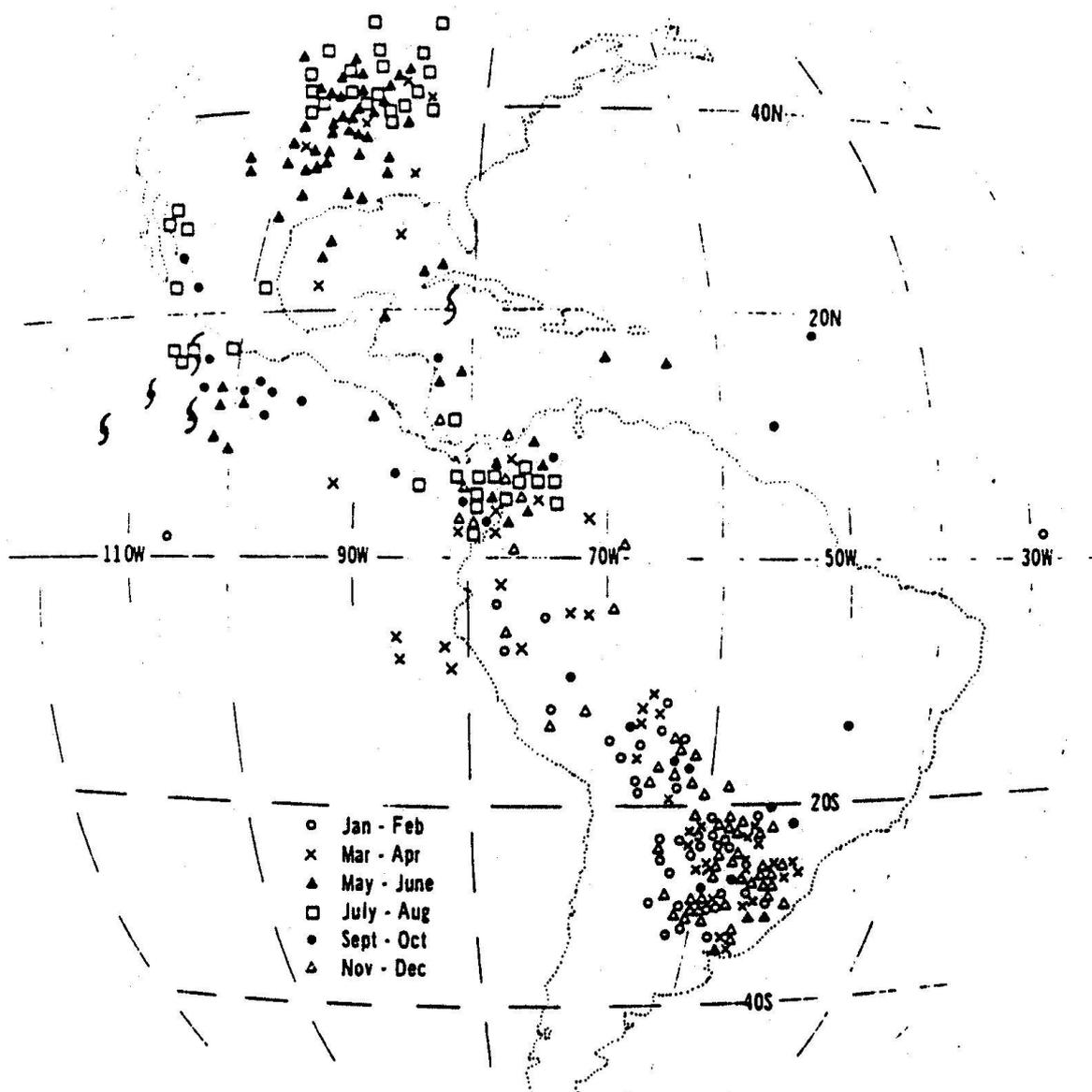


Fig. 17. Geographic and monthly distribution of MCCs in and around the Americas. Locations are for the MCC cold-cloud shields at the time of maximum extent. See Figure 14 caption for sample periods. Hurricane symbols indicate an MCC that developed into a tropical storm. Systems that were first a tropical storm and then an MCC are not shown.

Figura 16: Distribuição geográfica de ocorrência dos CCMs sobre as Américas

- A maioria dos CCMs ocorre sobre o continente;
- Vários dos CCMs que ocorrem sobre o oceano se desenvolvem em tempestades tropicais;
- Uma grande população de CCMs ocorre em cada porção fisiograficamente similar em médias latitudes na AS e AN;

- Pouquíssimos CCMs ocorrem sobre a Bacia Amazônica ou sobre o sudeste dos EUA;
- Os sistemas tendem a se concentrar imediatamente corrente abaixo das principais cadeias de montanhas nos cinturões de latitude com máximos de componentes zonais, isto é, do lado leste das maiores montanhas perpendiculares aos westerlies nas latitudes médias e do lado oeste das montanhas perpendiculares aos easterlies;
- De uma maneira geral, as características físicas, a geografia e as distribuições sazonais dos CCMs sugerem que são sistemas predominantemente barotrópicos e fortemente guiados pela liberação de calor latente; Embora eles não dependam de baroclinia como fonte de energia, ambientes baroclínicos podem prover e sustentar o fluxo de ar com grande teor de umidade (alto θ_e).
- Cabe enfatizar que embora existam sistemas na região tropical classificados como CCMs segundo esta metodologia, suas estruturas de nebulosidade são substancialmente diferentes dos sistemas de latitudes mais altas, parecendo mais com aglomerados de grandes tempestades do que sistemas quase simétricos organizados em mesoescala; de qualquer forma, eles tem grande relevância para os balanços globais de massa, umidade, energia e momento.

Questionário

- 1) Quais condições satisfazem a formação do CCM?
- 2) Localmente, quais os tipos de CCM observados?
- 3) Sintetize o ciclo de vida do CCM?
- 4) O que ocorre com o CCM quando a convergência de umidade em mesoescala desintensifica?
- 5) Como a larga escala ajuda a escala convectiva para a formação do CCM? E como a mesoescala modifica a larga escala?
- 6) De que maneira a topografia influencia a escala convectiva?
- 7) Quais os campos que você analisaria para prever um CCM?
- 8) Qual a região do jato de altos níveis propícia para a formação do CCM?
- 9) Em termos topográficos, por que a região a leste dos Andes contribui para a formação do CCM (em baixos e altos níveis)?
- 10) Por que os limiares térmicos de Velasco & Fritsch (1987) são mais frios que os de Madox?
- 11) Por que em anos de El Niño ocorrem mais CCM?
- 12) Qual o período característico para a ocorrência de chuvas em Assuncion e em SP?
- 13) Qual a época do ano típica para a ocorrência de CCM?
- 14) Pela figura 17, nota-se que o CCM ocorre preferencialmente sobre os continentes. Por que?

Referências

MADDOX, R. A., 1980: Mesoscale Convective Complexes. Bull. Am. Meteorol. Soc., 61, 1374-1387.

MADDOX, R. A., 1983: Large-scale meteorological conditions associated with midlatitude, Mesoscale Convective Complexes. Mon. Wea. Rev., 111, 1475-1493.

SILVA DIAS, M. A. F., 1987: Sistemas de mesoescala e previsão de tempo a curto prazo. Rev. Brasil. Meteor., 2, 133-150.

VELASCO, I. e J. M. FRITSCH, 1987: Mesoscale Convective Complexes in the Americas. J. Geoph. Res., 92 (D8), 9591-9613.