

CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS DOS SISTEMAS CONVECTIVOS ASSOCIADOS À PROPAGAÇÃO MERIDIONAL DA CONVECÇÃO NA AMÉRICA DO SUL

José Ricardo Siqueira
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - CPTEC/INPE
Av. dos Astronautas, 1758, Jardim da Granja, São José dos Campos-SP, 12227-010
e-mail: jricardo@cptec.inpe.br

William B. Rossow
Goddard Institute for Space Studies - GISS/NASA
Broadway Avenue, 2880, New York-NY, 10025
e-mail: wrossow@giss.nasa.gov

Luiz Augusto Toledo Machado
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - CPTEC/INPE
Rodovia Presidente Dutra, km 40, Cachoeira Paulista-SP, 12630-000
e-mail: machado@cptec.inpe.br

ABSTRACT

Using ISCCP cloud data and TRMM precipitation data from 1998 to 2000 we have described the structural characteristics of the convective systems associated to the meridional propagation of convection over South America. An austral wet season climatology of the cloud and rain properties of the convective systems formed during the occurrences of three important types of meridional propagation of convection was done using collocated images from different types of sensors. Results show that these three types of meridional propagation of convection modulate strongly the convective cloudiness and rainfall regimes over South America and exhibit significant structural differences between their convective systems during their stages of most intense convective development.

1 - INTRODUÇÃO

Os diferentes tipos de sistemas convectivos (SCs) existentes no cinturão tropical da América do Sul (AS) foram intensivamente estudados por Machado e Rossow (1993) e Machado et al. (1998) utilizando um conjunto de imagens fornecidas por diferentes tipos de sensores a bordo de satélites geostacionários coletadas pelo International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP) nas faixas espectrais do visível (VIS) e do infravermelho termal (IR). Machado e Rossow (1993) observaram que os SCs tropicais são constituídos basicamente por dois tipos de nuvem: o primeiro, com topos mais altos, maior espessura ótica e associado com a convecção profunda em escala local; e, o segundo, com topos mais baixos, espessura ótica reduzida e associado com nebulosidade estratiforme estendendo-se em mesoescala. Por sua vez, Machado et al. (1998) promoveram o rastreamento de diferentes tipos de SCs e estimaram a evolução temporal de importantes propriedades físicas inerentes a cada SC, tal como seu raio, sua forma geométrica aproximada, sua direção e velocidade de propagação, sua área de maior atividade convectiva, sua temperatura do topo, e outras. Neste estudo notou-se uma relação direta entre o raio e o tempo de duração dos SCs, além de variações semelhantes das suas propriedades físicas durante o ciclo de vida de cada SC.

Uma extensa descrição das propriedades de precipitação dos SCs sobre a região Amazônica foi realizada por Morales et al. (2003), que combinaram perfis verticais de precipitação do Precipitation Radar (PR) a bordo do satélite Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) com imagens do Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES) durante o experimento da Large-scale Biosphere Atmosphere (LBA). Os autores observaram uma forte dependência da atividade dos SCs com respeito ao tempo de duração e ao raio de cada SC, tal que os SCs mais longos e com maior extensão apresentavam um desenvolvimento inicial mais intenso. No presente trabalho é apresentada uma descrição das propriedades de nuvem e precipitação dos SCs associados com a propagação meridional da convecção sobre a AS durante a sua estação úmida (verão, outono e primavera austral) entre 1998 e 2000. Para

tanto, foram utilizadas propriedades de nuvem fornecidas pelas imagens DX do ISCCP, propriedades de precipitação derivadas do PR a bordo do satélite TRMM e análises estatísticas.

2 - DADOS E METODOLOGIA

Os dados utilizados neste estudo foram: temperatura do topo, pressão do topo e espessura ótica de nuvens fornecidas pelo estágio DX do ISCCP, e classificação da precipitação e perfis verticais das taxas de precipitação derivados do PR a bordo do satélite TRMM, ambos para o período de 1998-2000. Os dados do estágio DX do ISCCP são derivados das medidas de radiâncias de banda estreita no VIS e no IR feitas pelo Visible Infrared Spin Scan Radiometer (VISSR) a bordo do satélite GOES-EAST, com uma resolução espacial de 7 km e gerados para cada 3 horas, (Rossow e Schiffer, 1999). O PR é um radar meteorológico operando na faixa espectral das microondas em torno de 13,8 GHz e imageia o globo terrestre com uma resolução horizontal de 4,3 km e vertical de 250 m (Kummerow et al, 1998). A sensibilidade do radar é tal que o mínimo sinal detectado é de aproximadamente 20 dBZ (equivalente a cerca de 0,7 mm h⁻¹ em taxa de precipitação). Os produtos 2A25 e 2A23 do PR foram empregados no estudo. O 2A25, que é um produto de perfis verticais de taxas de precipitação corrigidos pelo efeito de atenuação, baseia-se num método híbrido que consiste no arranjo iterativo de Hitschfeld-Bordan e um método de referência de superfície. O produto 2A23 é uma classificação de chuva baseada nas características horizontais e verticais da precipitação. Um perfil de precipitação é classificado como estratiforme se o PR detecta uma banda de brilho próxima ao nível de resfriamento (isoterma de 273 K). Se nenhuma banda de brilho é detectada e qualquer valor de refletividade do radar excede 39 dBZ, o perfil de precipitação é classificado como convectivo.

O primeiro procedimento realizado no estudo foi identificar todo tipo de evento de propagação meridional da convecção na AS ocorrido entre Janeiro de 1998 e Dezembro de 2000. Para tanto, foram aplicados diagramas de Hovmoller às porcentagens de cobertura de nuvens frias altas do ISCCP sobre a janela longitudinal entre 48,75° W e 58,75° W para o período completo de dados. A porcentagem de cobertura de nuvens frias altas é definida pela razão (multiplicada por 100) entre o número de pixels de nuvem do DX com temperatura do topo inferior a 245 K e o número total de pixels do DX dentro da janela longitudinal de 10°. Com base nesta ferramenta foi possível observar a existência de três importantes tipos de propagação meridional da convecção na AS e identificar de forma objetiva todos os seus respectivos eventos, conforme ilustrado na Figura 1. O tipo 1 enfoca as frequentes penetrações de sistemas frontais vindos dos subtropicais ou latitudes médias que organizam a atividade convectiva nos trópicos e propagam-se meridionalmente para norte com a convecção em direção ao equador. A ocorrência de um evento é observada entre os dias 15 e 19 de abril. Já o tipo 2 é caracterizado por uma organização da atividade convectiva nos trópicos aparentemente devido a sistemas frontais e à formação sinótica da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), e está associado com uma intensificação e uma aparente propagação meridional da convecção dos trópicos para os subtropicais ou latitudes médias. A ocorrência de um evento deste tipo é observada entre os dias 20 e 22. Os sistemas frontais que pouco interagem com a convecção tropical e exibem propagação quasi-estacionária (com respeito à direção meridional) com a convecção sobre os subtropicais e latitudes médias são classificados como do tipo 3, com a ocorrência de um evento podendo ser observada entre os dias 9 e 12. Um total de 77, 15 e 33 eventos foi identificado para as propagações meridionais da convecção dos tipos 1, 2 e 3, respectivamente.

Na etapa seguinte do estudo foi feita a identificação e a descrição das propriedades de nuvem de todos os SCs sobre a região continental da AS entre 5° S a 40° N e a leste de 30° W que se originaram entre os dias -2 e +2 da data central de ocorrência dos eventos de propagação meridional da convecção dos tipos 1, 2 e 3 na estação úmida da AS. Para tanto, foi aplicado um método de rastreamento de nuvens no IR desenvolvido por Machado et al. (1998) às imagens IR do estágio DX do ISCCP. Este método determina as trajetórias de SCs com base na similaridade das características morfológicas e da área de superposição entre os SCs em imagens de satélite sucessivas mediante a utilização de dois limiares de temperatura de brilho. A identificação dos SCs foi feita utilizando os seguintes limiares de temperatura do topo de nuvem: 245 K (primeiro), equivalente às nuvens frias altas; e 220 K (segundo), equivalente a nuvens frias altas que estão mais frequentemente relacionadas com os processos convectivos. De acordo com Machado et al. (1998), um grupo de nuvens frias altas que contém um grupo de nuvens com topos ainda mais frios e mais diretamente associados à convecção em algum instante durante o seu ciclo de vida é definido como um sistema convectivo. Como resultado, foram identificados 3369 SCs durante os eventos do tipo 1 (69% nos trópicos e 31% nos subtropicais/latitudes médias), 947 SCs durante os eventos tipo 2 (92% nos trópicos e 8% nos subtropicais/latitudes médias), e 570 SCs durante os

eventos tipo 3 (37% nos trópicos e 63% nos subtropicais/latitudes médias). Também foram aplicadas análises estatísticas à temperatura e pressão do topo de nuvens do DX corrigidas no VIS, bem como à espessura ótica de nuvem do DX inferida no VIS. As principais propriedades estimadas para cada SC foram: tempo de duração, raio efetivo (assumindo uma forma circular para cada SC), tempo da fase de maturação (hora local de maior área convectiva do SC), direção de propagação, porcentagens de cobertura de nuvens de convecção profunda, temperatura mínima do topo e espessura ótica da nebulosidade de convecção profunda. A nebulosidade de convecção profunda é definida como sendo todo tipo de nuvem com temperatura do topo < 260 K e espessura ótica > 23 (Rossow e Schiffer, 1999) e abrange nuvens de forte desenvolvimento vertical, tais como cumulonimbus e cumulus congestus. Com o intuito de limitar a análise aos SCs dentro de uma organização de grande escala por sistemas sinóticos, foram selecionados somente os SCs com raio efetivo acima de 90 km.

Na última etapa do estudo foram estimadas as propriedades de precipitação dos SCs aplicando análises estatísticas aos produtos de precipitação 2A23 e 2A25 do PR. Para tanto, foram selecionados todos os pixels do PR e do DX coincidentes mediante a identificação de todos os pixels do PR com centros no interior dos pixels do DX durante um intervalo de tempo de $\pm 1,5$ hora do instante de cada SC. Uma população de pixels do PR equivalente a pelo menos metade da área de cada um dos SCs foi exigida para possibilitar uma descrição consistente dos SCs pelas variáveis do PR, resultando em cerca de 0.8 a 3.9 % do total de SCs identificados na etapa anterior com medidas de precipitação do PR disponíveis para cada grupo de SCs identificados na AS. Todos os pixels do PR e do DX coincidentes foram extraídos para estimar as distribuições estatísticas das seguintes variáveis, para as componentes de chuva estratiforme e convectiva de cada SC: porcentagem total de chuva, porcentagem do tipo de chuva, perfis verticais médios das taxas de precipitação, e máximas taxas de precipitação.

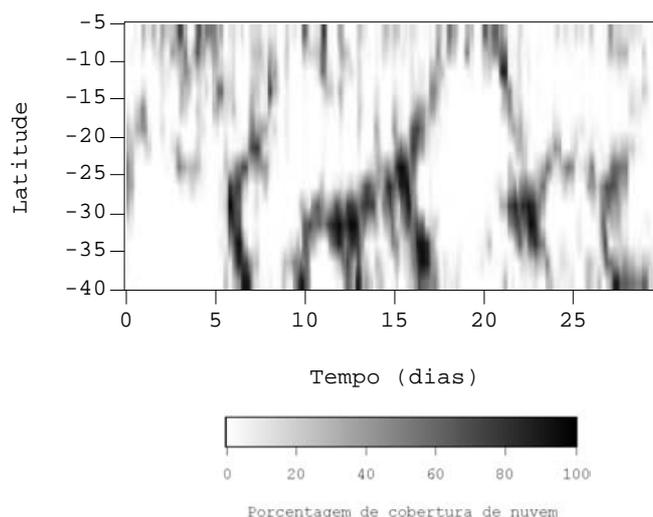


Figura 1 - Diagrama de Hovmoller construído para as porcentagens de cobertura de nuvens frias altas na janela longitudinal de 48,75° W a 58,75° W durante o mês de abril de 1998, para cada 3 horas.

3 - CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS DOS SISTEMAS CONVECTIVOS NA AMÉRICA DO SUL

Nesta seção são apresentadas as principais propriedades de nuvem e precipitação dos SCs associados com os três tipos de propagação meridional da convecção sobre a AS durante as suas fases de maior desenvolvimento convectivo (maturação). Para o tipo 1, que contém uma grande população de SCs sobre os trópicos e os subtropicais/latitudes médias, os resultados são apresentados para ambas as bandas latitudinais. Para o tipo 2, cuja população de SCs sobre os trópicos é muito maior que sobre os subtropicais, os resultados são apresentados apenas para os trópicos. Devido ao tipo 3 estimular pouco a convecção tropical, os resultados referentes a este tipo são apresentados apenas para os subtropicais/latitudes médias. Análises comparativas entre a estrutura dos SCs são discutidas para os SCs nos trópicos (SCs do tipo 1 TD e SCs do tipo 2 TD) e os SCs nos subtropicais/latitudes médias (SCs do tipo 1 SD e SCs do tipo 3 SD).

3.1 - Trópicos

A Figura 2 ilustra as distribuições cumulativas do número de SCs em função do tempo de maturação, do tempo de duração e do raio efetivo para os quatro grupos de SCs estudados. A maioria dos SCs tropicais adquire sua maior área convectiva no final da tarde e no início da noite, consistente com o ciclo diurno da convecção profunda sobre regiões tropicais continentais. Os SCs tropicais duram principalmente 3 a 6 h (75% dos SCs); porém, alguns SCs apresentam durações entre 9 e 24 h. Os SCs tropicais são em mesoescala e exibem raios efetivos predominantemente entre 90-150 km (86% dos SCs). Estes resultados mostram a importância das frentes frias que avançam em direção ao equador e da formação da ZCAS na produção de SCs de mesoescala com durações intradiurnas nos trópicos. Embora a organização da atividade convectiva em escala sinótica nos trópicos pelas frentes frias que se movem em direção ao equador (tipo 1) e pela formação sinótica da ZCAS (tipo 2) seja nas direções sudeste-nordeste e sudeste-noroeste (tipo 1) e noroeste-sudeste (tipo 2), respectivamente, a organização da atividade convectiva em mesoescala por estes dois importantes mecanismos ocorre principalmente ao redor da direção zonal sobre a região tropical da AS (não mostrado).

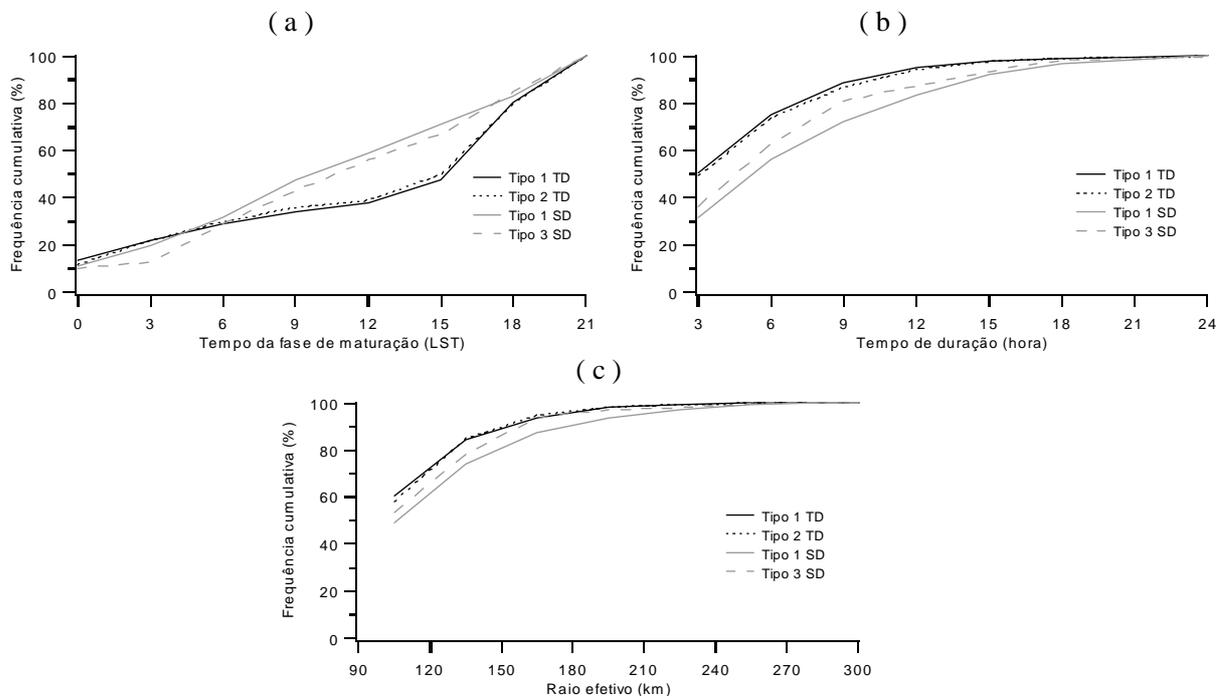


Figura 2 - Distribuição cumulativa do número de SCs em função do tempo da fase de maturação (a), do tempo de duração do ciclo de vida (b) e do raio efetivo durante a maturação (c) derivados da aplicação do método de rastreamento de SCs aos pixels do DX no IR para os quatro grupos de SCs estudados. A estatística é feita para intervalos de tempo de 3 horas e para intervalos de raio de 30 km.

Os SCs tropicais também são constituídos por grandes porcentagens de cobertura de nuvens de convecção profunda na fase de maturação, conforme ilustrado na Figura 3. Cerca de 72-79% dos SCs tropicais contêm porcentagens de cobertura de nuvens de convecção profunda $> 30\%$ (maior para os SCs do tipo 2). Portanto, os SCs tropicais produzidos por frentes frias que avançam em direção ao equador e os SCs tropicais associados com a formação da ZCAS são constituídos por porcentagens significativas de nuvens com forte desenvolvimento vertical como cumulonimbus e cumulus congestus, sendo maiores nos SCs produzidos ao longo da formação da ZCAS. A distribuição cumulativa do número de SCs como função da temperatura mínima do topo das nuvens de convecção profunda e a distribuição cumulativa do número de pixels dos SCs característicos de nuvens de convecção profunda como função da sua espessura ótica são também ilustradas na Figura 3. Nessa Figura observa-se que as menores

temperaturas mínimas exibidas pelos SCs tropicais estão entre 186-210 K. Machado e Rossow (1993) identificaram valores médios de temperatura mínima para os SCs tropicais intermediários aos do presente estudo. Uma porcentagem significativamente maior de SCs com temperaturas do topo mínimas < 198 K (> 198 K) pode ser notada nos SCs do tipo 1 (tipo 2). Um comportamento semelhante pode ser também observado na distribuição das espessuras óticas de nuvens de convecção profunda nos SCs tropicais, com os SCs do tipo 1 contendo nuvens de convecção profunda óticamente mais espessas que os SCs do tipo 2 no intervalo entre 63-123. Isto caracteriza os SCs tropicais produzidos ao longo da formação da ZCAS como SCs com maiores porcentagens de cobertura de nuvens de convecção profunda; porém, com desenvolvimento vertical e espessura um tanto menor que os SCs tropicais produzidos por frentes frias que se movem em direção a latitudes tropicais mais baixas.

A convecção profunda na região Amazônica exerce um importante papel na intensificação da convecção sobre o centro e o sudeste da AS durante os episódios de ZCAS e parece ser responsável pelas porcentagens maiores de cobertura de nuvens de convecção profunda nos SCs do tipo 2, estimulando a convecção sobre áreas maiores. Entretanto, a maior organização de grande escala das nuvens de convecção profunda sobre a região tropical da AS pela ZCAS tende a estabelecer uma distribuição mais uniforme deste tipo de nuvem e com menos episódios de convecção mais intensa nos trópicos. Além disto, as frentes frias que se movem em direção a latitudes tropicais mais baixas interagem e estimulam mais diretamente a convecção profunda nos trópicos que as frentes frias que propiciam o padrão de ZCAS, que permanecem quasi-estacionárias no sudeste da AS ou até atuam na região tropical da AS mas somente no início dos eventos do tipo 2. Esta diferença tende também a favorecer os episódios de convecção mais intensa observados nos SCs tropicais do tipo 1.

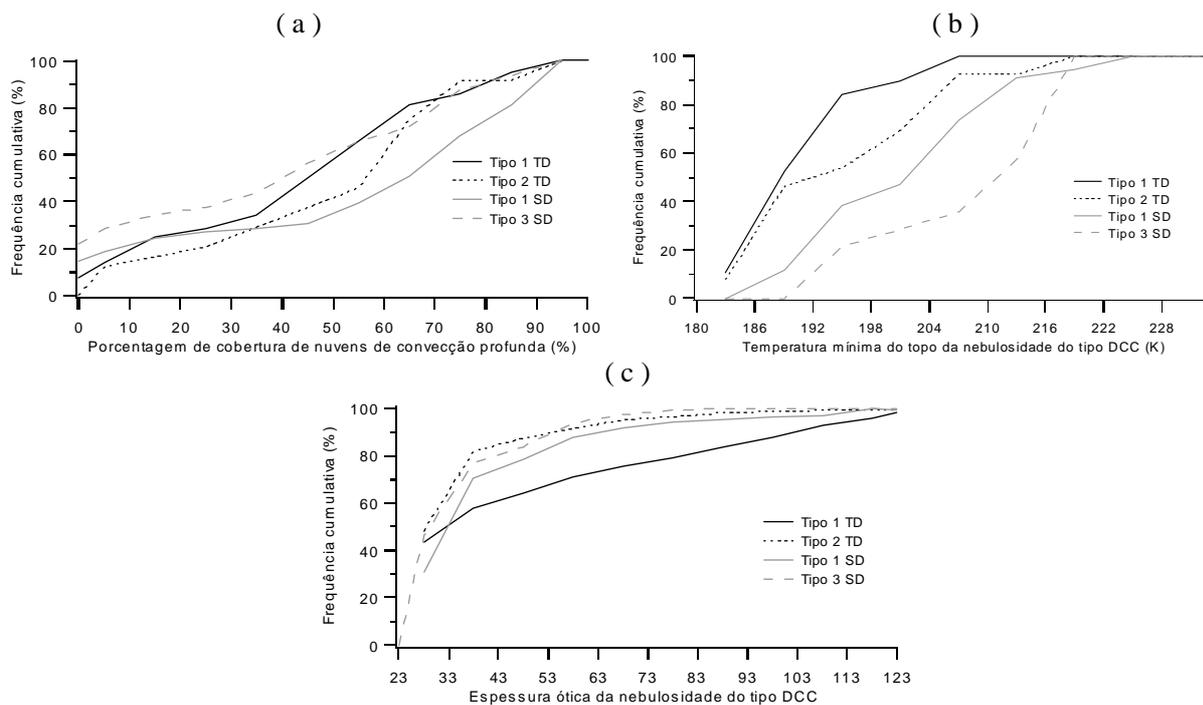


Figura 3 - Distribuição cumulativa do número de SCs em função das porcentagens de cobertura de nuvens de convecção profunda (a), da temperatura mínima do topo da nebulosidade (b) e do número de pixels DX no VIS em função da espessura ótica da nebulosidade de convecção profunda (c) derivados dos pixels DX no VIS para os quatro grupos de SCs estudados durante a maturação. A estatística é feita para intervalos de porcentagem de 10%, intervalos de temperatura de 6 K e de espessura ótica de 10 unidades.

Na Figura 4 são mostradas as distribuições cumulativas do total de SCs como função das porcentagens de chuva e de chuva convectiva. Porcentagens de chuva $> 30\%$ podem ser observadas para 54-67% dos SCs tropicais durante a maturação. Os SCs do tipo 2 exibem as maiores porcentagens de chuva nos trópicos. A componente convectiva da

chuva é também notável nos SCs tropicais durante a maturação, tal que 22-39% dos SCs exibem porcentagens de chuva convectiva > 30%. As maiores porcentagens de chuva convectiva sobre os trópicos são encontradas nos SCs do tipo 1. Estes resultados confirmam a importância das frentes frias que avançam em direção a latitudes tropicais mais baixas e da formação da ZCAS na frequência de precipitação sobre os trópicos. Um outro resultado importante é a relação verificada entre algumas propriedades de nuvem dos SCs derivadas do DX no VIS e as medidas de precipitação derivadas do PR, que foi comprovada por meio de correlação linear. Os SCs com maiores áreas de convecção profunda exibem as maiores áreas sob influência de precipitação, enquanto os SCs com maior desenvolvimento vertical produzem convecção mais intensa e exibem maiores áreas influenciadas por chuva convectiva. Logo, a formação da ZCAS produz SCs com maiores porcentagens de cobertura de nuvens de convecção profunda e maiores porcentagens de chuva sobre os trópicos, enquanto as frentes frias que avançam em direção ao equador formam SCs com maior desenvolvimento vertical e maiores porcentagens de chuva convectiva.

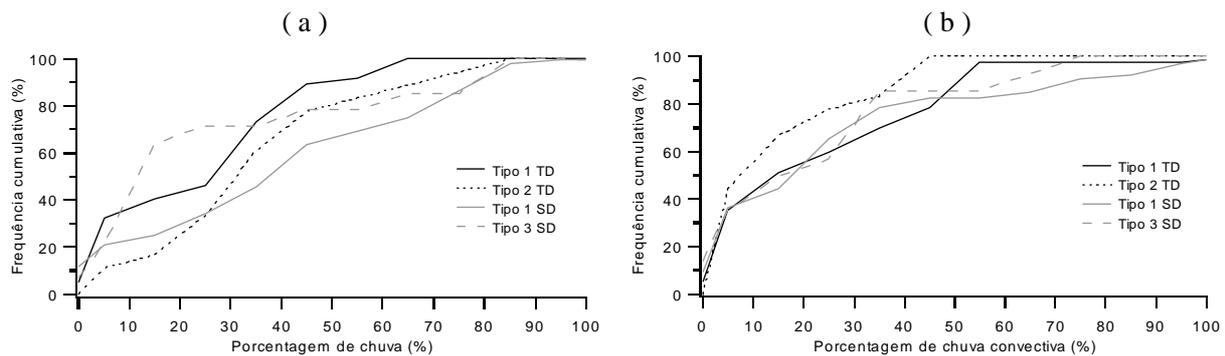


Figura 4 - Distribuição cumulativa do número de SCs em função das porcentagens de chuva total (a) e convectiva (b) durante a maturação derivada dos pixels PR do TRMM para os quatro grupos de SCs estudados. A estatística é feita para intervalos de porcentagem de 10%.

Os perfis verticais médios das taxas de precipitação estratiforme e convectiva obtidos para cada um dos quatro grupos de SCs são ilustrados na Figura 5. O perfil vertical médio de precipitação estratiforme dos SCs tropicais consiste de taxas de precipitação entre 1,8-2 mm/h no nível de 2 km e máximas taxas de precipitação de 2,3-2,8 mm/h entre 4-4,3 km (os SCs do tipo 1 exibem as maiores taxas de precipitação). Embora não existam diferenças substanciais entre os perfis estratiformes dos SCs tropicais dos tipos 1 e 2 (< 0,5 mm/h), é interessante notar que as maiores taxas de precipitação estratiforme exibidas pelos SCs do tipo 1 estão relacionadas a um maior conteúdo de gelo atmosférico dos níveis mais altos que se funde próximo ao nível de resfriamento durante a ocorrência de precipitação estratiforme e caracteriza a existência da banda de brilho. Este resultado pode estar diretamente relacionado ao maior desenvolvimento vertical das nuvens de convecção profunda que foi observado nos SCs do tipo 1, que gera nebulosidade com topos mais frios e tende a produzir um maior conteúdo de gelo nos níveis atmosféricos mais altos sobre os trópicos (Figura 3). O perfil vertical médio de precipitação convectiva dos SCs tropicais é caracterizado por taxas de precipitação entre 12,3-14 mm/h no nível de 2 km e máximas taxas de precipitação de 12-14,2 mm/h entre 3-3,8 km. Os SCs do tipo 2 exibem taxas de precipitação convectiva médias cerca de 2 mm/h maiores que as dos SCs do tipo 1 entre 2-4 km. Entretanto, os SCs do tipo 1 exibiram os maiores máximos individuais de taxa de precipitação convectiva (não mostrado). Com base nas altas taxas de precipitação convectiva média e individual que foram observadas para os SCs tropicais, nota-se a importância das frentes frias que avançam em direção a latitudes tropicais mais baixas e a formação da ZCAS no regime de precipitação da região tropical da AS durante a sua estação úmida.

Com o intuito de investigar possíveis relações entre as taxas de precipitação convectiva e as propriedades de nuvem dos SCs, calculou-se a integral média das taxas de precipitação convectiva acima do nível de 2 km para todos os SCs identificados durante a sua maturação e o coeficiente de correlação linear desta propriedade com respeito à espessura óptica média das nuvens de convecção profunda para cada SC. Uma correlação de +0,5 foi encontrada entre ambas as propriedades dos SCs (diretamente proporcionais), sugerindo que as maiores taxas e as ocorrências mais intensas (profundas) de precipitação convectiva na atmosfera são geralmente produzidas pelos SCs com maior desenvolvimento vertical de nuvens de convecção profunda. Como os SCs do tipo 2 exibem máximas taxas de precipitação convectiva

médias ligeiramente superiores às do tipo 1 nos trópicos, é possível que as condições de maior instabilidade troposférica geralmente presentes nos SCs com maior desenvolvimento vertical (tipo 1) resultem em uma distribuição menos uniforme da extensão vertical da nebulosidade convectiva e das taxas de precipitação convectiva nos SCs. Estes SCs (tipo 1) tendem a produzir as maiores taxas de precipitação convectiva individuais; porém, com valores médios algumas vezes comparáveis ou até mesmo abaixo aos dos SCs com menor desenvolvimento vertical (tipo 2). A hipótese anterior, que é baseada no fato de que os regimes de chuva convectiva são associados com forte turbulência na nebulosidade e intensa variabilidade do conteúdo de água líquida principalmente nos níveis mais baixos da atmosfera (Houze, 1993), é consistente com a distribuição mais uniforme da extensão vertical das nuvens de convecção profunda dos SCs associados à formação da ZCAS nos trópicos que foi observada anteriormente (Figura 3). Como resultado, os SCs associados à formação da ZCAS formam-se com maiores porcentagens de cobertura de nuvens de convecção profunda; porém, com menor desenvolvimento vertical que os SCs tropicais produzidos por frentes frias movendo-se em direção a latitudes tropicais mais baixas e produzindo taxas de precipitação convectiva médias (individuais) ligeiramente maiores (menores) e situadas em níveis mais baixos.

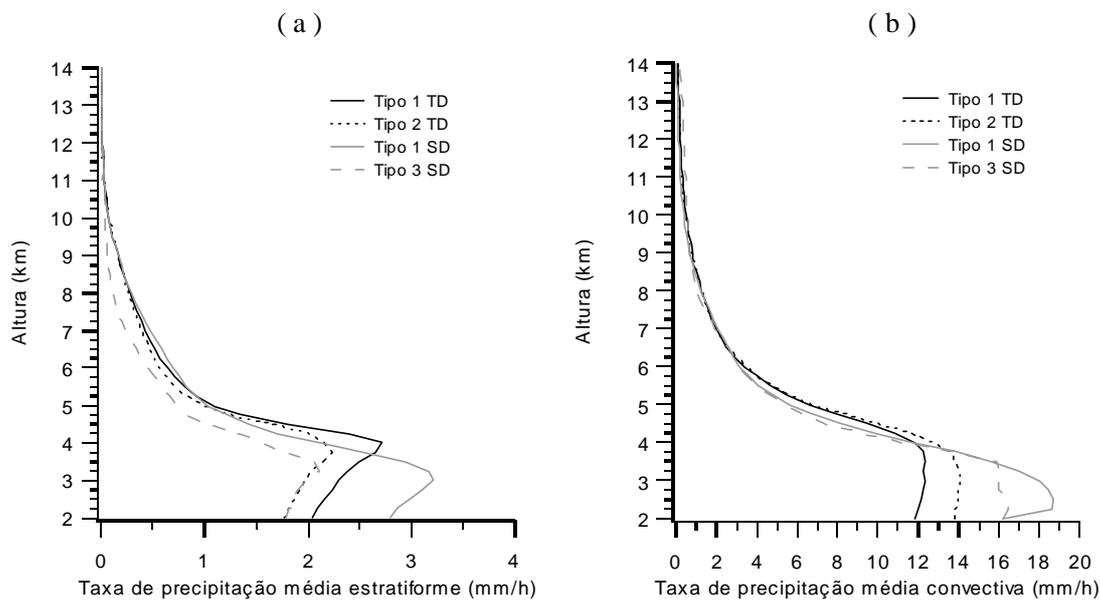


Figura 5 - Perfis verticais médios das taxas de precipitação estratiforme (a) e convectiva (b) durante a fase de maturação dos SCs para cada 0,25 km (acima de 2 km) derivados dos pixels do PR para os quatro grupos de SCs estudados.

3.2 - Subtrópicos e latitudes médias

Os SCs sobre os subtrópicos/latitudes médias adquirem suas maiores áreas convectivas de forma distribuída ao longo do dia, exibindo tempos de maturação principalmente no final da tarde, no início da noite e durante a madrugada (Figura 2). Este resultado está provavelmente relacionado com uma atividade mais intensa de frentes frias nos subtrópicos e latitudes médias, o que acaba estimulando a atividade convectiva em diferentes horários do dia sobre aquelas regiões. Os SCs sobre os subtrópicos/latitudes médias são caracterizados por tempos de duração predominantemente entre 3-6 h (57-63% dos SCs) e raios efetivos preferencialmente entre 90-150 km (75-80% dos SCs). Os SCs do tipo 1 contêm durações mais longas e raios efetivos maiores que os SCs do tipo 3. Estes resultados mostram que as frentes frias movendo-se em direção ao equador e as frentes frias quasi-estacionárias contribuem para a formação de SCs em mesoescala sobre a AS subtropical com dimensões significativas. Entre os SCs que duram mais de 6 h e atingem sua maturação durante a madrugada (menos de 30% dos SCs dos tipos 1 e 3), surgem os Complexos Convectivos de Mesoescala, que são produzidos no leste da Cordilheira dos Andes pelo Jato de Baixos Níveis, são aparentemente estimulados por frentes frias e movem-se em direção ao sudeste da AS. A organização da atividade convectiva em mesoescala nos subtrópicos e latitudes médias pelas frentes frias quasi-estacionárias e pelas frentes frias que se movem em direção ao equador também é predominantemente ao redor da direção zonal (não mostrado).

Porcentagens significativas da cobertura de nuvens de convecção profunda também são notadas nos SCs, com 62-73% dos SCs contendo porcentagens de cobertura $> 30\%$ (Figura 3). Como os SCs do tipo 1 exibem as maiores porcentagens de cobertura de nuvens de convecção profunda, as frentes frias sobre os subtrópicos que avançam em direção ao equador são responsáveis pela maior presença deste tipo de nuvem, enquanto as frentes frias quasi-estacionárias sobre os subtrópicos têm uma presença consideravelmente maior de nuvens do tipo estratiforme. As nuvens de convecção profunda que constituem os SCs nos subtrópicos/latitudes médias exibem temperaturas mínimas de topo predominantemente entre 192-222 K, com os topos mais frios (< 210 K) ocorrendo nos SCs do tipo 1. As diferenças de espessura ótica das nuvens de convecção profunda entre os SCs dos tipos 1 e 3 são pouco significativas; porém, são consistentes com as diferenças observadas entre as suas temperaturas mínimas de topo. Estes resultados mostram que as frentes frias movendo-se em direção ao equador nos subtrópicos produzem SCs com maior cobertura, maior desenvolvimento vertical e maior espessura de nuvens de convecção profunda que os SCs formados por frentes frias quasi-estacionárias nos subtrópicos. Como as frentes frias que se movem em direção ao equador caracterizam-se por incursões mais frequentes das massas de ar frio e seco de origem polar sobre as massas de ar quente e úmido de origem tropical que compõem a sua zona frontal, estas tendem a organizar a nebulosidade convectiva sobre áreas maiores e com desenvolvimento vertical mais intenso nos subtrópicos que as frentes frias quasi-estacionárias.

Os SCs sobre os subtrópicos/latitudes médias também exibem porcentagens de chuva e de chuva convectiva significativas, com cerca de 28-65% dos SCs exibindo porcentagens de chuva $> 30\%$ e 29-38% dos SCs contendo porcentagens de chuva convectiva $> 30\%$ (Figura 4). As maiores porcentagens de chuva são exibidas pelos SCs do tipo 1. A distribuição das porcentagens de chuva confirma uma presença significativa de precipitação nos SCs dos tipos 1 e 3 e também mostra uma relação direta com respeito à distribuição das porcentagens de cobertura de nuvens de convecção profunda dos SCs dos tipos 1 e 3 nos subtrópicos/latitudes médias. O número de SCs do tipo 1 contendo porcentagens de chuva convectiva $> 70\%$ é maior (+8%) que o do tipo 3, e corresponde diretamente aos SCs com nuvens de convecção profunda de topos mais frios que foram observados nos subtrópicos/latitudes médias (Figura 3). Portanto, as frentes frias que se movem em direção ao equador produzem SCs com maior cobertura de nuvens de convecção profunda e de chuva nos subtrópicos, além de nuvens de convecção profunda com maior desenvolvimento vertical e maiores porcentagens de chuva convectiva comparadas às dos SCs formados por frentes frias quasi-estacionárias nos subtrópicos.

O perfil vertical médio de precipitação estratiforme dos SCs sobre os subtrópicos/ latitudes médias é caracterizado por taxas de precipitação entre 1,8-2,8 mm/h no nível de 2 km e máximas taxas de precipitação entre 2,3-3,3 mm/h próximo ao nível de resfriamento (3,3 km), conforme ilustrado na Figura 5. As diferenças entre os perfis estratiformes dos SCs dos tipos 1 e 3 são pouco substanciais (< 1 mm/h); porém, são maiores que as observadas entre os SCs tropicais. As maiores taxas de precipitação estratiforme nos subtrópicos/latitudes médias são exibidas pelos SCs do tipo 1, e podem estar relacionadas a um maior conteúdo de gelo atmosférico dos níveis mais altos que se funde próximo ao nível de resfriamento durante a ocorrência de precipitação estratiforme e caracteriza a existência da banda de brilho. Este resultado pode estar diretamente relacionado ao maior desenvolvimento vertical das nuvens de convecção profunda que foi observado nos SCs do tipo 1 nos subtrópicos/latitudes médias, que gera nebulosidade com topos mais frios e tende a produzir um maior conteúdo de gelo nos níveis atmosféricos mais altos sobre os subtrópicos e latitudes médias (Figura 3). O perfil vertical médio de precipitação convectiva é representado por taxas de precipitação em torno de 16 mm/h no nível de 2 km e máximas taxas de precipitação entre 16-18 mm/h abaixo do nível de resfriamento, em cerca de 2,5 km. Os SCs do tipo 1 exibem taxas de precipitação convectiva média cerca de 2 mm/h maiores que os SCs do tipo 3 abaixo do nível de 4 km. Os maiores máximos individuais de taxa de precipitação convectiva nos subtrópicos/latitudes médias também foram identificados para os SCs do tipo 1 (não mostrado).

As significativas taxas de precipitação convectiva médias produzidas pelos SCs dos tipos 1 e 3 mostram o impacto das frentes frias que se movem em direção ao equador ou permanecem quasi-estacionárias nos subtrópicos sobre o regime de precipitação da AS nos subtrópicos durante a estação úmida austral (Figura 5). Analogamente ao que foi observado para os SCs tropicais, os SCs nos subtrópicos/latitudes médias contendo um maior desenvolvimento vertical de nuvens de convecção profunda (maiores espessuras óticas médias) apresentam as maiores taxas e as ocorrências mais intensas de precipitação convectiva na atmosfera. Portanto, os SCs formados por frentes frias que se movem em direção ao equador, com maior cobertura e maior desenvolvimento vertical de nuvens de convecção profunda que os SCs

formados por frentes frias quasi-estacionárias nos subtropicais, exibem os maiores valores médios e os maiores valores individuais de taxa de precipitação convectiva sobre aquela região.

4 - DISCUSSÃO

Este trabalho mostra que a interação das frentes frias com a convecção tropical favorece a ocorrência de três importantes tipos de propagação meridional da convecção que exercem grande influência sobre a nebulosidade convectiva e o regime de chuvas na América do Sul. Nos trópicos, os sistemas convectivos produzidos por frentes frias que se deslocam em direção ao equador (tipo 1) têm maior desenvolvimento vertical, menores áreas de convecção profunda e maiores taxas de precipitação (individuais) que os produzidos durante a formação sinótica da ZCAS (tipo 2), provavelmente em virtude de uma presença mais ativa das frentes frias nos trópicos durante os eventos tipo 1 e da maior organização da nebulosidade convectiva de grande escala pela ZCAS nos eventos tipo 2. Nos subtropicais e nas latitudes médias, os sistemas convectivos produzidos por frentes frias que se movem em direção ao equador (tipo 1) exibem maior desenvolvimento vertical, maiores áreas de convecção profunda e maiores taxas de precipitação que os sistemas convectivos produzidos por frentes frias quasi-estacionárias, que são caracterizadas por incursões menos frequentes das massas de ar frio e seco de origem polar sobre as massas de ar quente e úmido de origem tropical que compõem a sua zona frontal e conseqüentemente estimulam menos convecção nos subtropicais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP (Projeto 1999/06045-7 e Projeto Temático 1996/1403-4), e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq (REF. 300692/95-1.).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- HOUZE, R.A. **Cloud dynamics**. Academic Press, 1993. 573p.
- KUMMEROW, C.; BARNES, W.; KOZU, T.; SHIUE, J.; SIMPSON, J. The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Sensor Package. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, V. 15, p. 809-817. 1998.
- MACHADO, L.A.T.; ROSSOW, W.B. Structural characteristics and radiative properties of tropical cloud clusters. **Monthly Weather Review**, V. 121, p. 3234-3260. 1993.
- MACHADO, L.A.T.; ROSSOW, W.B.; GUEDES, R.L.; WALKER, A.W. Life cycle variations of mesoscale convective systems over the Americas. **Monthly Weather Review**, V. 126, p. 1630-1654. 1998.
- MORALES, C.; MACHADO, L.A.T.; LAURENT, H. Preliminary results of 3D rainfall structure characteristics of the MCS observed in the Amazon during the LBA field campaign. Submitted to **Monthly Weather Review**. 2003.
- ROSSOW, W.B.; SCHIFFER, R.A. Advances in understanding clouds from ISCCP. **Bulletin of American Meteorological Society**, V. 80, p. 2261-2287. 1999.