

## CLIMATOLOGIA DAS PERTURBAÇÕES CONVECTIVAS INICIADAS NA COSTA NORTE DO BRASIL

ROBSON LOPES BARBOSA<sup>1</sup>, MARCOS DAISUKE OYAMA<sup>1,\*</sup> e  
LUIZ AUGUSTO TOLEDO MACHADO<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Centro Técnico Aeroespacial, Instituto de Aeronáutica e Espaço, Divisão de Ciências Atmosféricas, Pça Marechal Eduardo Gomes, 50, Vila das Acácias, 12228-904, São José dos Campos, SP.

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos, Divisão de Satélites Ambientais, Rodovia Presidente Dutra, km 40, SP-RJ, 12630-000, Cachoeira Paulista, SP.

\* Autor para correspondência. Email: oyama@iae.cta.br.

Recebido Janeiro 2005 - Aceito Outubro 2005

### RESUMO

Perturbações convectivas (PC) representam a convecção em escala sinótica. Neste trabalho, identificaram-se as seqüências de PC iniciadas na Costa Norte do Brasil (CNB) de 1984 a 1998 através de um procedimento objetivo de identificação e acompanhamento de PC. Para a identificação das PC, utilizaram-se dados de fração de nuvens associadas à convecção na resolução horizontal de 2,5° e temporal de 3 h. As seqüências de PC foram divididas em pontuais e não-pontuais. No caso de seqüências pontuais, i.e., as que se iniciam em um dado instante, mas não continuam na imagem subsequente, cerca de 95% das seqüências apresentou-se com tamanho inferior a 4 setores (um setor corresponde a uma área de 2,5° de latitude por 2,5° de longitude), e a sua ocorrência mostrou uma menor variação sazonal que as PC não pontuais. A iniciação foi máxima (mínima) às 18 UTC (12 UTC), sugerindo que o ciclo diurno de aquecimento solar e a circulação de brisa devem ser os principais mecanismos de formação das seqüências pontuais. As seqüências de PC não-pontuais, i.e., as que possuem duração superior a 3 h, foram classificadas em função de seu deslocamento. As seqüências curtas, confinadas à CNB, apresentaram pequeno deslocamento (< 150 km), duração abaixo de 6 h, iniciação preferencial às 21 UTC, velocidade média abaixo de 4 m s<sup>-1</sup> e tamanhos inferiores a 4 setores. As seqüências longas, que se propagam continente adentro, mostraram deslocamento por grandes distâncias (> 150 km), duração média entre 6 e 12 h, iniciação preferencial às 18 UTC, velocidade média entre 4 e 8 m s<sup>-1</sup>, e tamanho entre 4 e 8 setores. Tanto nas seqüências curtas quanto nas longas, a direção de propagação preferencial foi para oeste, e a ocorrência foi maior (menor) em MAM (SON). O seguinte modelo conceitual foi proposto: dada uma PC no CNB, iniciada por fatores locais (aquecimento e brisa), se a convecção é intensificada por alguma forçante de escala sinótica (Zona de Convergência Intertropical, distúrbio ondulatório de leste, etc.), então a PC ganha grande extensão horizontal e se propaga continente adentro.

**Palavras-chave:** perturbação convectiva, linha de instabilidade, acompanhamento de perturbações convectivas.

### ABSTRACT: CLIMATOLOGY OF THE CONVECTIVE PERTURBATIONS INITIATED IN THE NORTHERN COAST OF BRAZIL

Convective perturbations (CP) represents the convection on synoptic scale. In this work, CP sequences initiated in the Northern Coast of Brazil (NCB) from 1984 to 1998 were identified by using an objective tracking method. Cloud fraction associated to convective processes data at 2.5° (3 h) horizontal (temporal) resolution were used. The CP sequences were classified as single (SI) and multi-image (MI) sequences. SI sequences take place in a single satellite image (i.e., its lifetime is less than 3 h). About 95% of SI sequences showed size of less than 4 sectors (sector is a 2.5° latitude x 2.5° longitude area), and the seasonality of SI sequences occurrence is weaker than MI. The initiation was maximum (minimum) at 18 UTC (12 UTC), and this result suggests that the diurnal cycle of heating and breeze

circulation could be the main local mechanisms that favor the onset of SI sequences. The MI sequences take place in more than one image (i.e., its lifetime is greater than 3 h) and are grouped according to its propagation. The shorter MI sequences (which are confined to CNB) showed little propagation (< 150 km), lifetime of less than 6 h, preferential initiation at 21 UTC, average velocity of less than  $4 \text{ m s}^{-1}$  and size of less than 4 sectors. The longer MI sequences (which propagate inland) showed large propagation (> 150 km), lifetime between 6 and 12 h, preferential initiation at 18 UTC, average velocity between 4 and  $8 \text{ m s}^{-1}$ , and size between 4 and 8 sectors. The majority of MI sequences (both shorter and longer) showed westward propagation, and the maximum (minimum) occurrence took place in MAM (SON). Based on the results, the following conceptual model was proposed: for a given CP in NCB, initiated by local mechanisms (diurnal heating and breeze), if convection is enhanced by synoptic scale forcings (such as Intertropical Convergence Zone, easterly wave, etc.), then the CP undergoes a marked horizontal expansion and propagates inland.

**Keywords:** convective perturbation, squall line, tracking.

## 1. INTRODUÇÃO

A convecção na Costa Norte do Brasil (CNB) organiza-se em diferentes escalas. Em escala local, a região sofre influência da circulação de brisa; em mesoescala, da formação de linhas de instabilidade (LI); e, em escala sinótica, da migração latitudinal da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), da ação de distúrbios ondulatórios de leste (DOL) e da penetração de vórtices ciclônicos em altos níveis. Todos esses sistemas (revisão em Molion e Bernardo, 2002) organizam a convecção na CNB. Quanto às LI, Cohen et al. (2004) sugerem classificá-las em dois tipos: LI de origem costeira, que se formam paralelamente à CBN; e de origem continental, que se formam no interior do continente (entre os Estados do Pará e Maranhão) e se orientam quase perpendicularmente à CNB. Para a CNB, a convecção deve estar mais associada às LI de origem costeira do que às de origem continental; por isso, neste trabalho, enfocam-se somente as LI de origem costeira (doravante chamadas somente de LI).

Em escala sinótica, perturbações convectivas (PC) – conceito introduzido por Guedes e Machado (2003) e que representa a organização da convecção entre as escalas ‘meso- $\alpha$ ’ e ‘macro’ (Cf. Orlanski, 1975) – podem se iniciar na CNB e propagar continente adentro (p.ex., Figura 2a de Guedes e Machado, 2003). Iniciação e propagação semelhantes são também verificadas para as LI, sugerindo que LI e PC devem estar relacionadas. Isso é também justificado considerando que, na fase madura de LI que se propagam continente adentro, a convecção pode se organizar em escala sinótica (Garstang et al., 1994).

Para as LI, a iniciação na CNB está associada à circulação de brisa (Cavalcanti et al., 1982) (em imagens de satélite, é comum observar a intensificação da convecção na CNB em torno de 21 UTC e a consequente formação de uma LI), enquanto a propagação continente adentro se deve a fatores sinóticos, tais como ação de DOL e/ou a presença de fonte de calor (convecção) na Amazônia (como sugerido por Cohen et al., 1995), e está associada a um forte cisalhamento do vento em baixos níveis

(Garstang et al., 1994). A propagação da convecção continente adentro é um mecanismo importante para a precipitação no leste da Amazônia; por exemplo, estima-se que cerca de 45% da precipitação no leste paraense decorra da ação de LI (Cohen et al., 1989, p.34).

Embora PC e LI sejam relacionadas e possuam características comuns, há importantes diferenças entre elas. Em primeiro lugar, as PC são fenômenos em escala sinótica, enquanto as LI são de mesoescala (entre as escalas ‘meso- $\beta$ ’ e ‘meso- $\alpha$ ’). Isso significa que, a princípio, para identificar PC (LI), dados de resolução mais baixa (alta) são necessários. Em segundo lugar, PC e LI (embora relacionadas entre si) não possuem correspondência biunívoca. Por um lado, as PC incluem a convecção associada a outros sistemas, tal como os DOL. Por outro lado, as LI de menor cobertura horizontal (p.ex., aquelas da escala ‘meso- $\beta$ ’) descaracterizam-se quando se usam dados de resolução mais baixa, i.e., não podem ser identificadas como PC.

Cohen et al. (1989) utilizando imagens de satélite e uma metodologia subjetiva identificaram as características climatológicas das LI iniciadas na CNB nos anos de 1979 a 1986. As características climatológicas obtidas foram: máxima ocorrência (máximo número de casos) de abril a agosto; propagação continente adentro de cerca de 38% do total de LI; extensão horizontal de 1400 km (comprimento) por 170 km (largura); e velocidade média de propagação de 12 a  $16 \text{ m s}^{-1}$ .

Para as PC iniciadas na CNB, não há uma climatologia disponível. Neste trabalho, objetiva-se preencher essa lacuna. Para identificar as PC e acompanhar a sua propagação, utiliza-se um método objetivo em dados de satélite de baixa resolução (resolução horizontal de  $2,5^\circ$  e temporal de 3 h). Esse método possui características próprias que o distingue de algoritmos utilizados em estudos anteriores (p.ex., Guedes e Machado, 2003). O intuito é verificar quais são as características climatológicas da convecção em escala sinótica (PC) no CNB, e compará-las com as de LI.

O trabalho está organizado da seguinte forma. Na seção 2, apresentam-se os dados utilizados. Na seção 3, descreve-se o algoritmo utilizado para identificar e acompanhar as PC. Na seção 4, apresentam-se as características climatológicas das PC iniciadas na CNB e se discutem as diferenças entre a climatologia de PC e a de LI. Na seção 5, apresentam-se as conclusões.

## 2. DADOS

São utilizados os dados do tipo D1 do "International Satellite Cloud Climatology Project" (ISCCP; <http://isccp.giss.nasa.gov>; Schiffer e Rossow, 1983; Rossow e Schiffer, 1991, 1999) de julho de 1983 a dezembro de 1999. Os dados do tipo D1 integram informações de satélites meteorológicos geostacionários e de órbita polar a cada 3 horas (00, 03, 06, 09, 12, 15, 18 e 21 UTC) e fornecem uma estatística sobre um setor de  $2,5^\circ$  de latitude e longitude. Neste trabalho, utiliza-se a fração de nuvens associadas à convecção (CONVEC), definida como a razão entre a área coberta por nuvens com topo acima de 310 hPa e a área total do setor.

Cabe mencionar que, para o ISCCP, as nuvens convectivas (convecção profunda) são definidas como aquelas com topo alto ( $< 440$  hPa) e grande espessura óptica na faixa do visível ( $> 23$ ). Devido à dependência de imagens no visível, não é possível definir nuvens convectivas durante a noite. Para permitir a identificação de PC durante o período noturno, opta-se por utilizar as *nuvens associadas à convecção*, definidas como aquelas cujo topo encontra-se acima de um certo valor. O valor adotado, de 310 hPa, é mais alto que o utilizado pelo ISCCP para definir nuvens frias e convectivas (440 hPa) e permite reduzir a quantidade de nuvens não-convectivas sem reduzir as áreas de PC de forma excessiva. As PC identificadas com os dados de CONVEC, portanto, compreendem não somente nuvens associadas a precipitação convectiva (Cb), mas também nuvens de topo alto associadas a precipitação estratiforme (Ns).

## 3. METODOLOGIA

### 3.1. Identificação de PC

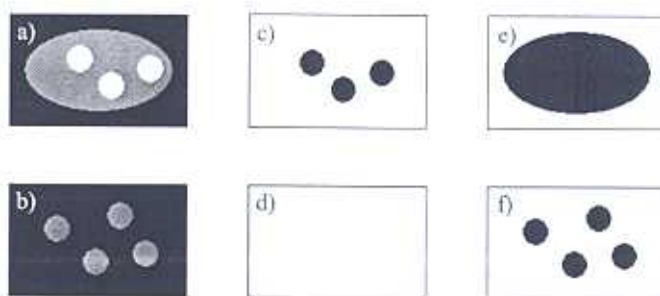
Para campos de TIR (temperatura de brilho no infravermelho) de baixa resolução horizontal, as PC podem ser identificadas como as regiões onde TIR é inferior a 260 K (Siqueira e Machado, 2000; Guedes e Machado, 2003). Obviamente, o limiar depende da resolução horizontal; por exemplo, para identificar sistemas convectivos (SC) em imagens com resolução horizontal de dezenas de quilômetros, Machado et al. (1998) e Vila e Machado (2004) utilizaram o limiar de 245 K. Para as PC iniciadas na CNB, notou-se que a identificação torna-se mais precisa com o uso de dados de CONVEC e limiares dependentes do horário e mês.

A razão da escolha de CONVEC ao invés de TIR pode ser justificada através do seguinte exemplo. Seja um setor ( $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ ) na qual nuvens Cb ocupam 1/3 da área; nos 2/3 restantes, não há nuvens (i.e., as radiâncias são provenientes da superfície). O valor de TIR do setor, que é uma média em área, irá corresponder a uma situação de nuvens entre médias e baixas. No caso de CONVEC, que fornece uma informação na escala do pixel observado pelo satélite, o valor será de 1/3, i.e., mantém-se a informação da escala em que ocorrem os processos convectivos.

A razão da escolha de limiares dependentes do horário e mês pode ser visualizada através de um exemplo esquemático (Figura 1). Nota-se que alto (baixo) valor de CONVEC seria mais adequado para identificar as PC nos períodos de maior (menor) atividade convectiva (Figuras 1a-b). Se um limiar fixo e alto é adotado, as PC desaparecem durante os períodos de menor atividade convectiva (Figura 1d) – mesmo que haja PC em uma identificação subjetiva (Figura 1f). Isso seria claramente desfavorável para o acompanhamento de PC. Por outro lado, se fosse adotado um limiar fixo, mas muito baixo, então há o problema de mesclar PC distintos nos períodos de maior atividade convectiva (Figura 1e). O ideal, portanto, é ter limiares mais altos nos períodos de maior atividade convectiva (final da tarde e estação úmida, Figura 1c), e mais baixos nos de menor atividade (início da manhã e estação seca, Figura 1f).

### 3.2. Calibração dos limiares

Para a calibração dos limiares, utilizam-se os valores de CONVEC na janela compreendida entre  $7^\circ\text{S}$ - $5^\circ\text{N}$  e  $54^\circ\text{W}$ - $38^\circ\text{W}$ . Para um dado limiar, em cada imagem no período de julho de 1983 a dezembro de 1999, obtêm-se as PC; definem-se PC como áreas conexas compostas por setores cujo valor de CONVEC



**Figura 1** – Diagrama esquemático para ilustrar a identificação de PC em imagens com atividade convectiva maior (a) e menor (b) (nesses dois painéis, tons mais brancos representam maior fração convectiva). A identificação é feita com limiar alto (c, d) e baixo (e, f) [as PC identificadas encontram-se em cor preta nos painéis (c, d, e, f)]. É desejável que o procedimento de identificação forneça as PC nos painéis (c) e (f).

é maior que o limiar. Anotam-se o número total de setores associados a PC ( $N_{setores}$ ) e o número de PC ( $N_{PC}$ ). Calcula-se, então, o número de setores por PC ( $r = N_{setores} / N_{PC}$ ), que pode ser interpretado como um tamanho médio das PC (em setores) na dada imagem. Por exemplo, se há 15 setores associados a 3 PC,  $r = 5$  setores/PC. Para um mesmo número de PC, quanto maior (menor) o limiar de CONVEC, menor (maior)  $r$ .

Uma vez calculado  $r$  para cada imagem, obtém-se a climatologia de  $r$  ( $r_{climat}$ ) para cada mês e horário. Utilizando diferentes limiares, obtém-se  $r_{climat} = r_{climat}(h, m, lim)$ , onde  $h$  é o horário;  $m$ , o mês; e  $lim$ , o limiar. Para valores "intermediários" de  $lim$ ,  $\partial r_{climat} / \partial lim$  é negativo, i.e., quanto maior o valor do limiar, menor é  $r_{climat}$ . Para um dado horário (H) e mês (M), os limiares escolhidos (LIM) são tais que  $5 \leq r_{climat}(H, M, LIM) \leq 10$ ; adota-se também que  $LIM \geq 10\%$ . O limitante inferior para LIM corresponde à presença de pelo menos 10 células convectivas entre as escalas 'meso- $\beta$ ' e 'meso- $\gamma$ ' (i.e., células convectivas de área horizontal de 25 km x 25 km) em um setor. Os limiares escolhidos estão mostrados na Tabela 1.

**Tabela 1** – Limiar de fração de nuvens associadas à convecção (%) para cada horário (UTC, 00 a 21 de 3 em 3 h) e mês (jan a dez).

	00	03	06	09	12	15	18	21
jan	30	20	20	15	10	15	25	35
fev	35	30	25	20	15	15	30	40
mar	45	35	30	25	20	20	35	45
abr	40	30	25	20	15	15	30	45
mai	25	15	15	10	10	10	20	30
jun	10	10	10	10	10	10	10	10
jul	10	10	10	10	10	10	10	10
ago	10	10	10	10	10	10	10	10
set	10	10	10	10	10	10	10	10
out	10	10	10	10	10	10	10	10
nov	10	10	10	10	10	10	10	10
dez	15	10	10	10	10	10	15	20

### 3.3. Acompanhamento de PC

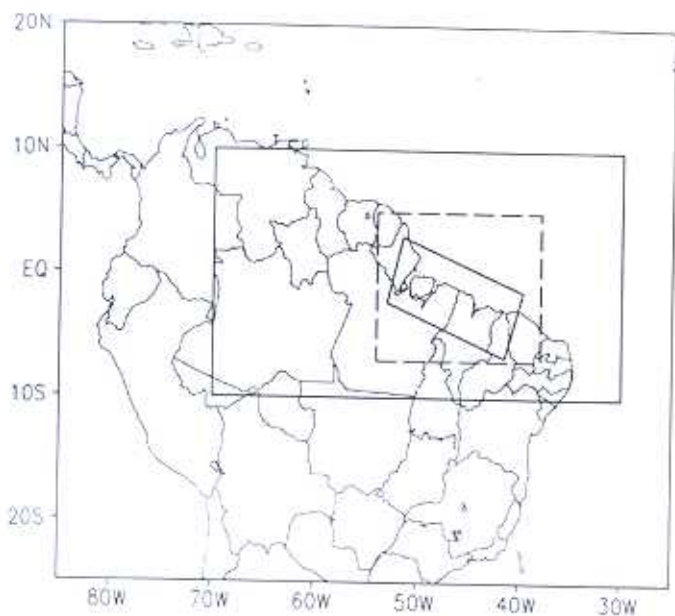
O problema de acompanhamento de PC pode ser formulado da seguinte maneira. Sejam as PC na imagem em  $t_0$  ( $PC_0$ ) e na imagem subsequente, i.e., em  $t_1 = t_0 + 3$  h ( $PC_1$ ). As  $PC_1$  podem ser consideradas como continuação de  $PC_0$ ? Ou seja, existem seqüências de PC que contém  $PC_0$  e  $PC_1$ ? Para responder a essa questão, neste trabalho, utiliza-se o critério de superposição em área (Machado et al., 1998). Inicialmente, calcula-se a superposição em área entre  $PC_0$  e  $PC_1$ . O resultado pode ser colocado na forma matricial: cada elemento da matriz, i.e.,  $s(i, j)$ , representa a superposição entre a  $i$ -ésima  $PC_0$  e a  $j$ -ésima  $PC_1$ .

- Se  $s$  é nula para uma dada linha  $I$  [ $s(I, j) = 0 \forall j$ ], então a  $I$ -ésima  $PC_0$  não possui continuação na imagem subsequente, i.e., ocorre o fim da seqüência que contém a  $I$ -ésima  $PC_0$ .
- Se  $s$  é nula para uma dada coluna  $J$  [ $s(i, J) = 0 \forall i$ ], então a  $J$ -ésima  $PC_1$  inicia uma nova seqüência.
- Para uma dada linha  $I$  (coluna  $J$ ), se há uma única coluna  $J$  (linha  $I$ ) tal que  $s \neq 0$ , então a  $J$ -ésima  $PC_1$  é a continuação da  $I$ -ésima  $PC_0$ .
- Para uma dada linha  $I$ , seja  $s_{max}$  o maior valor de  $s$ . Se em duas ou mais colunas  $s \geq f s_{max}$ , onde  $f$  é um parâmetro entre 0 e 1 (fração mínima de superposição), então ocorre 'split', ou seja, a  $I$ -ésima  $PC_0$  se divide nas  $PC_1$  tal que  $s \geq f s_{max}$ .
- Para uma dada coluna  $J$ , seja  $s_{max}$  o maior valor de  $s$ . Se em duas ou mais linhas  $s \geq f s_{max}$ , então ocorre 'merge', ou seja, as  $PC_0$  tal que  $s \geq f s_{max}$  se mesclam e dão origem à  $J$ -ésima  $PC_1$ .

Neste trabalho, adota-se  $f = 0,75$ . Esse valor foi obtido através de testes com casos de 'split' e 'merge' identificados visualmente (não mostrado). A função de  $f$  (fração mínima de superposição) é selecionar somente valores suficientemente grandes de superposição ( $s$ ) para realizar 'split' ou 'merge'. No limite, se  $f = 1$ , não há 'split' ou 'merge'; somente a  $PC_1$  com superposição máxima é escolhida para continuar uma dada  $PC_0$ . Por outro lado, se  $f$  é muito pequeno, então os casos de 'split' e 'merge' tornam-se excessivamente numerosos, levando a seqüências de duração (artificialmente) muito longas. O valor (intermediário) adotado neste trabalho evita esses extremos.

Em Machado et al. (1998) e Guedes e Machado (2003), há outras restrições (velocidade de propagação, aumento de área, tamanho e duração mínimos, existência de núcleos convectivos, etc.) para construir as seqüências de PC. Uma das conseqüências é que somente as seqüências de maior tamanho e duração são construídas. Por exemplo, na Figura 2 de Guedes e Machado (2003), pode-se notar que há somente poucas PC iniciadas na CNB em janeiro e fevereiro de 1987. No presente trabalho, não se impõem outras restrições além da superposição em área. O intuito é levantar o maior número de seqüências e classificá-las em nível de pós-processamento (i.e., não se filtram seqüências no próprio algoritmo).

O acompanhamento de PC é realizado somente na janela entre 10°S-10°N e 70°W-30°W (Figura 2), pois o ciclo diário/sazonal do limiar de CONVEC não deve ser válido para regiões afastadas da CNB. Os resultados mostrados a seguir são válidos para os anos de 1984 a 1998. Os resultados referentes a julho-dezembro de 1983 e janeiro-dezembro de 1999 não foram levados em conta para evitar o efeito de "borda" (p.ex., cometer-se-ia o erro de não incluir as seqüências iniciadas em junho de 1983 e terminadas em julho de 1983).

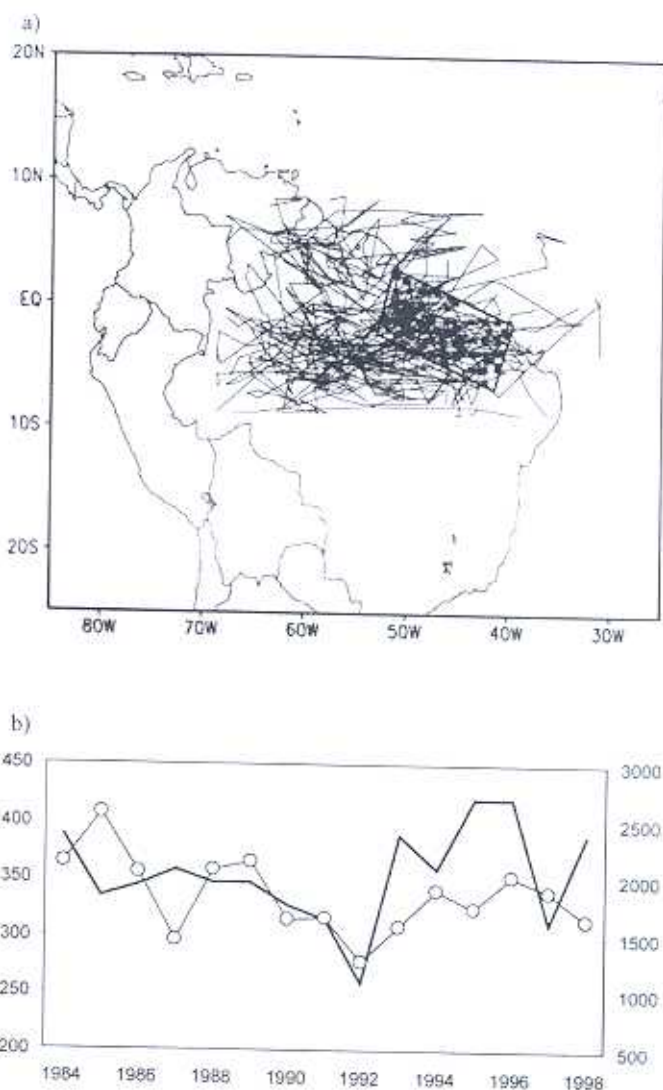


**Figura 2** – O acompanhamento de PC é realizado na janela maior (10°S-10°N e 70°W-30°W). Fora dessa janela, atribui-se um valor indefinido para fração de nuvens associadas à convecção (CONVEC). A definição dos limiares de CONVEC é feita na janela em linha tracejada (7°S-5°N e 54°W-38°W). No pós-processamento, as seqüências de PC cuja iniciação ocorre na menor janela (cobrindo a CNB) são selecionadas.

#### 4. RESULTADOS

A título de ilustração, a Figura 3a mostra as trajetórias das seqüências de PC que se iniciam na CNB em 1987 (358 seqüências no total). Em geral, pode-se notar que existe preferência para a propagação continente adentro (em direção à Amazônia), embora, na maior parte dos casos, as seqüências fiquem confinadas à CNB. Esse padrão se repete para os demais anos (não mostrado). Na Figura 3b, mostra-se o total anual de seqüências de 1984 a 1998. A média (o desvio-padrão) é de 350 (50) seqüências ano<sup>-1</sup>; logo, o coeficiente de variação interanual (desvio-padrão dividido pela média) é de 14%. A variabilidade interanual do total de seqüências segue, de forma aproximada, a da precipitação nas áreas continentais da janela compreendida entre 7°S-5°N e 54°W-38°W (janela em linha tracejada na Figura 2); p.ex., o mínimo de seqüências coincide com o mínimo de precipitação em 1992. Uma análise mais detalhada da variabilidade interanual das seqüências de PC e de sua relação com a precipitação são deixadas para trabalhos futuros.

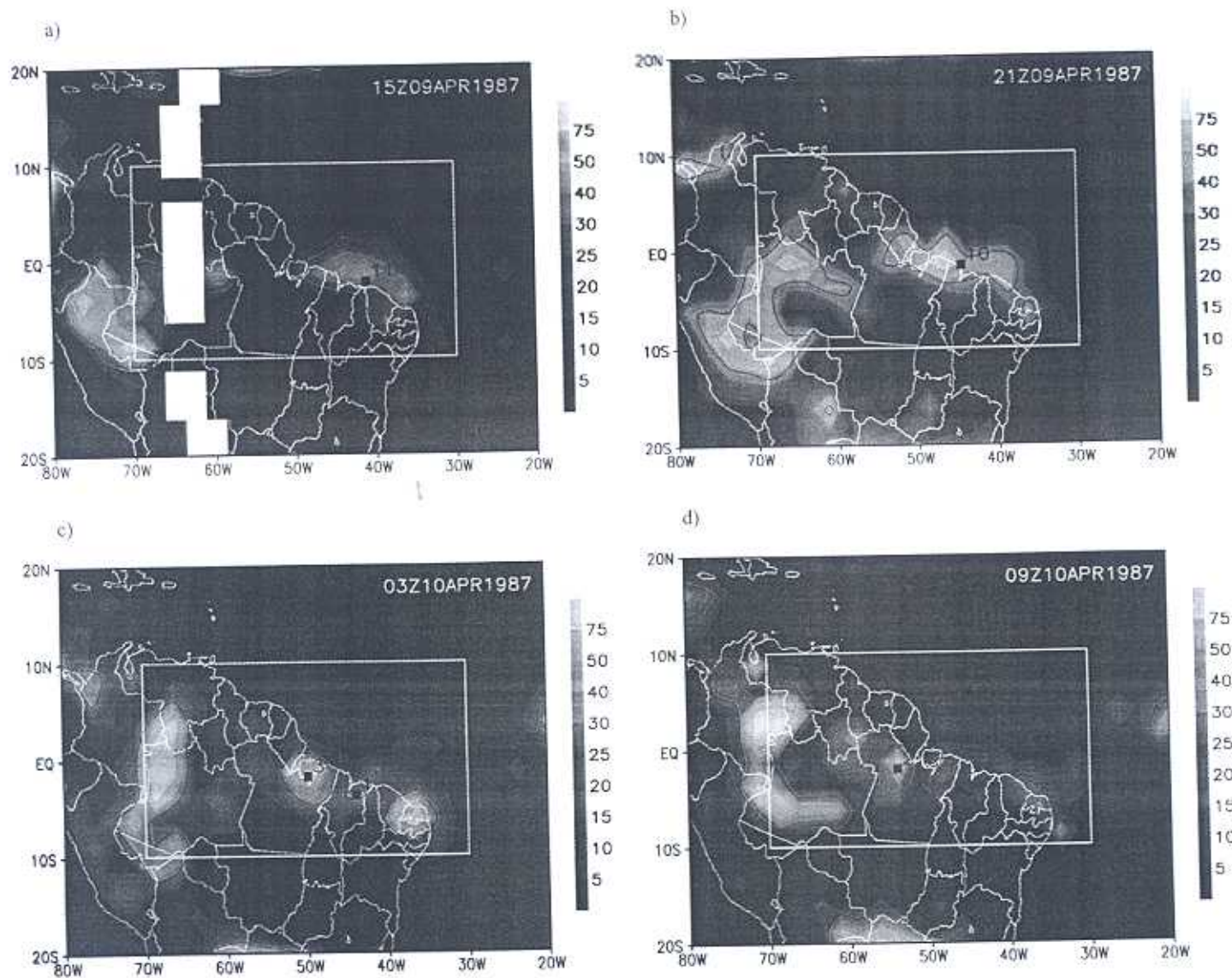
Na Figura 4, mostra-se uma seqüência de PC obtida pelo algoritmo de acompanhamento de PC. A seqüência se inicia ao meio-dia (15 UTC, Figura 4a). Durante a tarde, a seqüência se desloca para oeste e a convecção é intensificada (21 UTC,



**Figura 3** – (a) Trajetórias das seqüências de PC iniciadas na CNB em 1987 (358 seqüências no total). Os retângulos vermelhos indicam o local de iniciação; as linhas azuis, a trajetória. (b) Total anual de seqüências (linha com círculos, eixo das ordenadas à esquerda) e precipitação anual média em mm (linha sem marcadores, eixo das ordenadas à direita) nas áreas continentais da janela compreendida entre 7°S-5°N e 54°W-38°W (janela em linha tracejada na Figura 2) no período de 1984 a 1998. Os dados de precipitação provêm de <http://climate.geog.udel.edu/climate/>.

Figura 4b). À meia-noite (03 UTC, Figura 4c), com o enfraquecimento da convecção, ocorre 'split': a seqüência se divide em dois ramos. Durante a madrugada, um dos ramos se desloca para oeste enquanto o outro se dissipa (09 UTC, Figura 4d).

As características climatológicas das seqüências de PC são apresentadas a seguir. Cabe salientar que as climatologias se referem ao período de 1984 a 1998 (média de 15 anos).



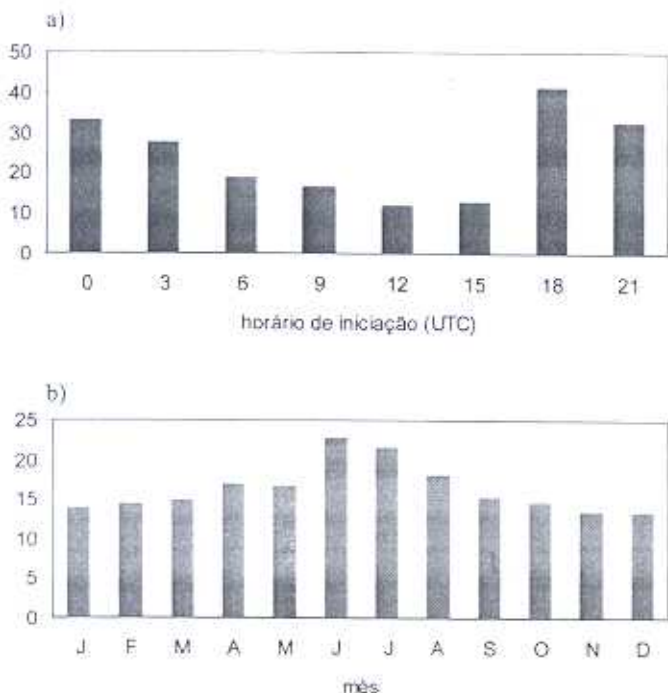
**Figura 4** – Exemplo de seqüência de PC. As isolinhas em vermelho correspondem ao limiar de fração de nuvens associadas à convecção. Os pontos representam o centro da PC; o número de setores correspondente à PC está mostrada acima do ponto. Às 03 UTC de 10/04/1987, ocorre ‘split’ da seqüência em dois ramos. O ramo representado pela PC cujo centro está em cor azul dissipa-se durante a madrugada (não aparece na imagem de 09 UTC).

As seqüências de PC são divididas em duas categorias. Na primeira, consideram-se as seqüências cuja duração é inferior a 3 horas, ou seja, tratam-se de PC que se iniciam em um dado instante mas não continuam na imagem subsequente. Essas seqüências são doravante chamadas de **pontuais**. Cerca de 95% das seqüências pontuais possui tamanho inferior a 4 setores (Tabela 2). A iniciação é mínima (máxima) às 12 UTC (18 UTC); e o número de casos aumenta abruptamente entre 15 e 18 UTC (Figura 5a). Esse ciclo diário sugere que o aquecimento solar e a circulação de brisa devem ser os principais mecanismos de formação das seqüências pontuais. Há variação sazonal na ocorrência de seqüências pontuais (Figura 5b): de pouco mais

de 20 seqüências em junho-julho (máximo) a pouco menos de 15 em novembro-dezembro (mínimo). Contudo, como será mostrado a seguir, essa sazonalidade é relativamente pequena quando comparada com seqüências de PC não-pontuais.

**Tabela 2** – Distribuição de seqüências pontuais entre 1984 e 1998 em função do tamanho médio de PC (em setores de  $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ ).

Tamanho (setores)	Número de seqüências por ano
0 a 4	184
4 a 8	9
8 a 12	2
12 a 16	< 1
acima de 16	0



**Figura 5** – Distribuição de seqüências pontuais em função de: (a) horário de iniciação (número de seqüências por ano); (b) mês (número de seqüências por mês). Os resultados referem-se ao período de 1984 a 1998.

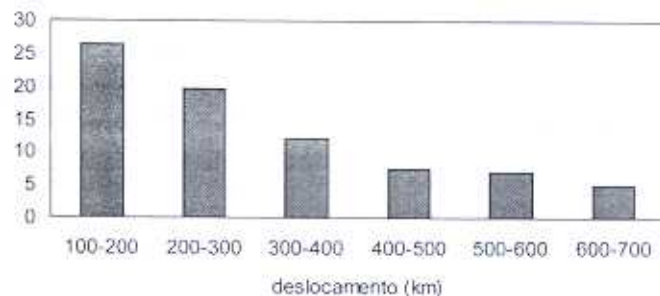
Na segunda categoria, têm-se as seqüências cuja duração é superior a 3 horas. Essas seqüências, chamadas de **não-pontuais**, são classificadas em função de seu deslocamento (i.e., distância entre o local de iniciação e dissipação). Na Figura 6, mostra-se que o número de seqüências não-pontuais diminui com o aumento do deslocamento: cerca de 45% deslocam-se abaixo de 200 km; cerca de 25%, entre 200 e 500 km; e cerca de 35%, acima de 500 km. Logo, enquanto quase a metade das seqüências não pontuais se desloca no máximo até 200 km da CNB, a outra metade desloca-se acima deste valor continente adentro. Cohen et al. (1989) mostram que 62% das LI deslocam-se abaixo de 170 km (LI costeiras), e a fração restante (38%) propaga-se continente adentro. As LI que se propagam continente adentro estão provavelmente associadas a seqüências não-pontuais de maior deslocamento.

A Figura 7 mostra a distribuição mensal das seqüências não-pontuais. Para toda a população de seqüências, o maior (menor) número de seqüências ocorre no trimestre MAM (SON), com máximo (mínimo) em abril (outubro). Esse comportamento independe do deslocamento – embora seja mais nítida nas seqüências de maior deslocamento – e se assemelha ao ciclo anual de precipitação (p.ex., Rao e Hada, 1990) e da ZCIT no Atlântico (Waliser e Gautier, 1993). Em julho, há um máximo relativo quando se leva em conta todas as seqüências não-pontuais. Isso é reflexo do comportamento das seqüências

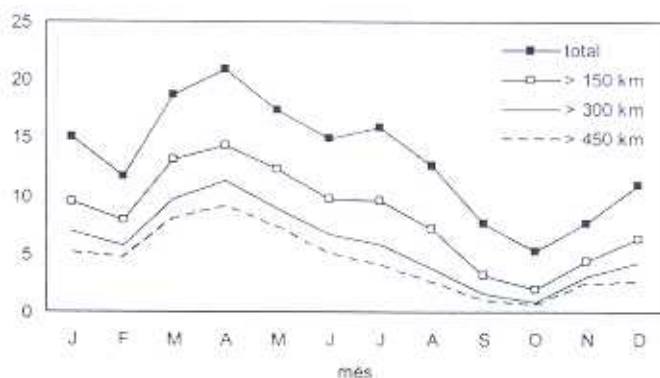
de menor deslocamento, pois, nas de maior deslocamento, as ocorrências em julho não são maiores que as em junho. Para as LI, a máxima ocorrência de LI costeiras ocorre em abril; as que se propagam continente adentro, em julho (Cohen et al., 1989). A mudança do mês de máxima ocorrência com o aumento de deslocamento não ocorre para as seqüências não-pontuais.

A Figura 8 mostra que as seqüências não-pontuais se propagam predominantemente nas direções (azimute) de 270° a 315° (maior número de seqüências) e de 225° a 270° (segundo maior número). Esse comportamento independe do deslocamento e ratifica a direção preferencial das trajetórias para oeste mostradas na Figura 3. O quadrante de 225° a 315° contém mais de 50% das seqüências. Logo, a maior parte das seqüências não-pontuais que se iniciam na CNB propagam-se para oeste, continente adentro.

A Figura 9 mostra que a maior parte das seqüências não-pontuais possui duração (tempo de vida) entre 3 e 6 h (i.e., aparecem somente em duas imagens sucessivas). Nas seqüências de maior deslocamento, no entanto, a duração preferencial é de 6 a 12 h, passando para 12 a 18 h em de seqüências de deslocamento acima de 500 km. Logo, duração entre 3 e 6 h é esperado para



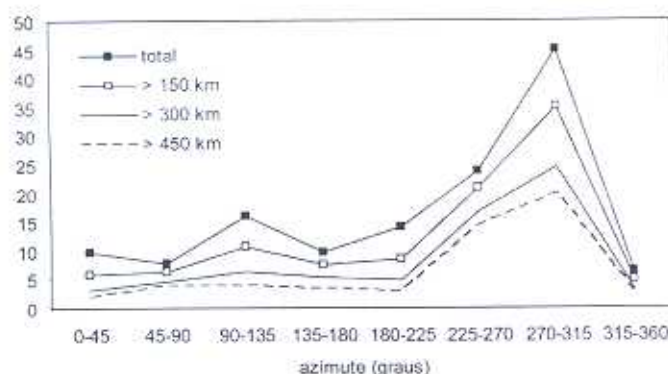
**Figura 6** – Distribuição de seqüências não-pontuais (número de seqüências por ano) em função do deslocamento. Há 44 seqüências (por ano) com deslocamento entre 0 e 100 km, e 38 acima de 700 km (não mostrado). Os resultados referem-se ao período de 1984 a 1998.



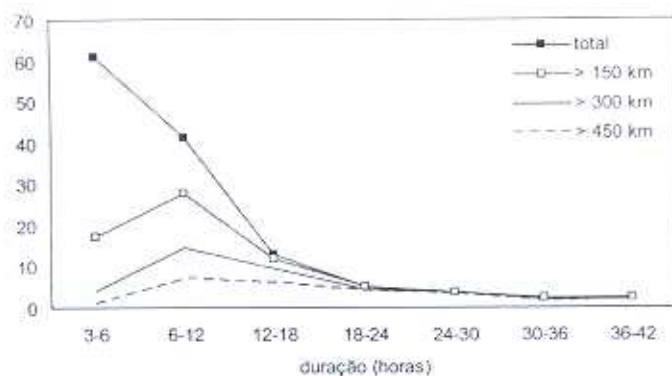
**Figura 7** – Distribuição mensal (número de seqüências por mês) de seqüências não-pontuais. Os resultados referem-se ao período de 1984 a 1998.

as seqüências confinadas à CNB. Cohen et al. (1989) obtiveram duração de 9 a 16 h para as LI. Esses limites concordam em parte com os obtidos aqui para seqüências não-pontuais que se propagam continente adentro (6 a 18 h).

A Figura 10 mostra o número de seqüências não-pontuais em função da velocidade média de propagação. O máximo ocorre entre 0 e 4 m s<sup>-1</sup>. Para seqüências de maior deslocamento, o máximo ocorre em velocidades médias maiores (entre 4 e 8 m s<sup>-1</sup>). No entanto, esses valores são ainda inferiores às velocidades médias de propagação de LI obtidas por Cohen et al. (1989), que varia de 12 e 16 m s<sup>-1</sup>. A diferença de velocidades entre LI e PC pode ser explicada devido à escala. Considerando uma LI contida em uma PC, a LI pode estar se movendo mesmo que o centro de massa da PC esteja estacionário (velocidade nula), pois a PC pode estar cobrindo uma grande extensão horizontal. Nesse caso, a duração da LI deve ser suficientemente pequena para que haja dissipação antes da LI atingir a borda da PC, e a velocidade de PC é inferior à de LI. Por outro lado, uma PC que contém uma LI de grande propagação deve ter também

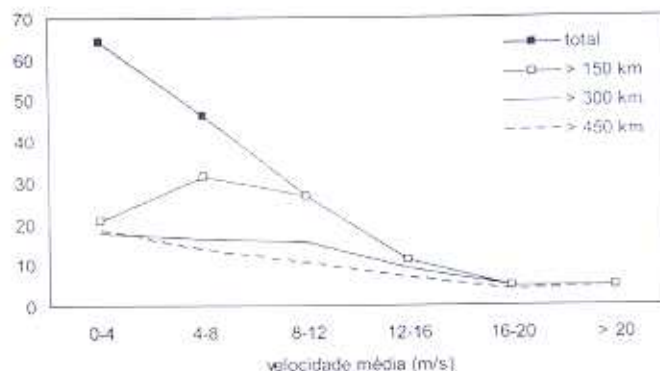


**Figura 8** – Distribuição de seqüências não-pontuais (número de seqüências por ano) em função da direção de deslocamento. Os resultados referem-se ao período de 1984 a 1998.



**Figura 9** – Distribuição de seqüências não-pontuais (número de seqüências por ano) em função do tempo de vida (duração). Os resultados referem-se ao período de 1984 a 1998.

um deslocamento maior, i.e., a diferença de velocidades entre LI e PC deve ser menor nesse caso. De fato, a Figura 10 mostra que há uma fração considerável de seqüências de PC de grande deslocamento (> 450 km) cuja velocidade média de propagação é compatível com a de LI (12 e 16 m s<sup>-1</sup>). Além disso, mudanças no formato geométrico das PC podem levar a erros no cálculo de velocidades, pois a posição do centro de massa – que é utilizado para calcular a velocidade – pode variar devido à mudança do formato geométrico das PC, não devido ao deslocamento.

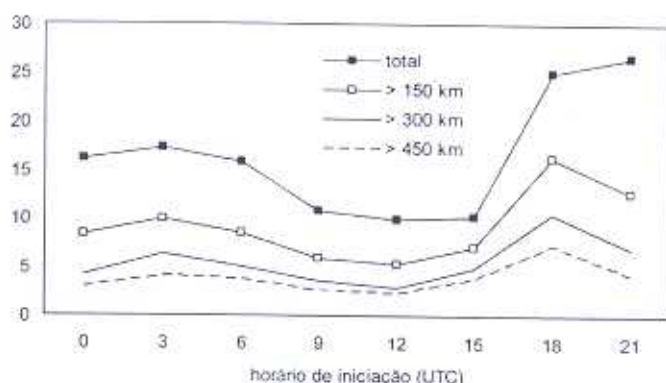


**Figura 10** – Distribuição de seqüências não-pontuais (número de seqüências por ano) em função da velocidade média de propagação (deslocamento dividido pelo tempo de vida). Os resultados referem-se ao período de 1984 a 1998.

A Figura 11 mostra que o horário preferencial de iniciação das seqüências ocorre durante o fim de tarde (21 UTC, i.e., 18 HL), com mínimo na manhã (12 UTC, i.e., 09 HL). Para as seqüências de maior deslocamento, o horário preferencial é o meio da tarde (18 UTC, i.e., 15 HL). Os máximos no fim/meio da tarde sugerem que a iniciação de PC deve estar associada ao ciclo diurno de aquecimento solar e à circulação de brisa – da mesma forma que para seqüências pontuais. Logo, os principais mecanismos de iniciação para ambos os tipos de seqüências (pontuais e não-pontuais) devem ser os mesmos. Considerando que a iniciação ocorre somente às 18 UTC (ou 21 UTC), por simplicidade, pode-se adotar a hipótese de que ocorre somente 1 (uma) iniciação por dia. Isso permite interpretar o número de seqüências em um dado mês como sendo igual ao número de dias do mês em que as seqüências ocorreram. Essa interpretação será utilizada na seção 5. Além disso, a hipótese implica que seqüências pontuais e não-pontuais não podem se iniciar no mesmo dia.

A Figura 11 mostra, também, um máximo relativo às 03 UTC (00 HL). No início da noite, a convecção diurna entra em dissipação, embora haja ainda uma considerável cobertura de nuvens associadas à convecção. Os processos de dissipação se processam através da fragmentação das PC em áreas menores. Nessas áreas menores, CONVEC vai diminuindo gradativamente durante a noite. Se, para um caso particular, o

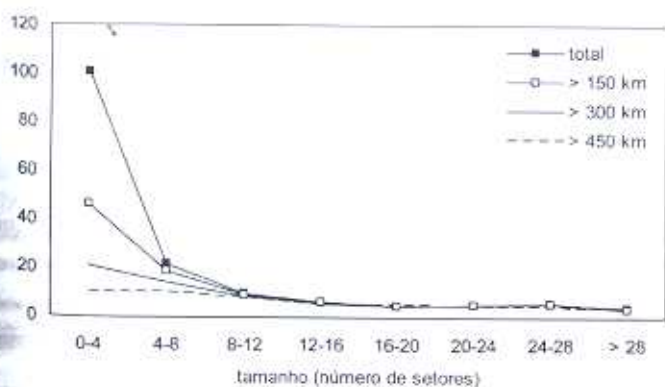




**Figura 11** – Distribuição de seqüências não-pontuais (número de seqüências por ano) em função do horário de iniciação. Os resultados referem-se ao período de 1984 a 1998.

decaimento de CONVEC for mais intensa que o do limiar para identificação de PC, então as áreas menores podem "desaparecer" em um horário e reaparecer na seguinte como novas PC. Logo, o máximo relativo de iniciação às 0300 UTC pode ser devido ao ciclo diário dos limiares adotados, e não a processos físicos de geração de convecção (embora possa haver casos em que a convecção noturna aparece através da interação dos distúrbios em escala sinótica).

A Figura 12 mostra a distribuição de tamanhos (em setores de  $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ ) das seqüências não-pontuais. O número de seqüências diminui com o aumento de tamanho; logo, o máximo ocorre para pequenos tamanhos (entre 0 e 4 setores). No entanto, para as seqüências de maior deslocamento, os tamanhos preferenciais também aumentam; por exemplo, a razão entre o número de seqüências de 4-8 setores e de 0-4 setores aumenta para deslocamentos maiores (ficando próximo de 1 para deslocamento acima de 450 km). Em média, portanto, as seqüências não-pontuais são compostas de PC de tamanho médio de 4 setores, sendo o tamanho maior para as seqüências de maior deslocamento. Em área, esse valor é equivalente ao tamanho médio das LI obtidas por Cohen et al. (1989).



**Figura 12** – Distribuição de seqüências não-pontuais (número de seqüências por ano) em função do tamanho médio (em setores de  $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ ). Os resultados referem-se ao período de 1984 a 1998.

Os resultados sugerem classificar as seqüências não-pontuais em dois tipos. No primeiro, há as seqüências confinadas à CNB, doravante chamadas de **curtas**. As seqüências curtas seriam análogas às LI costeiras de Cohen et al. (1989). Essas seqüências apresentam pequeno deslocamento ( $< 150$  km), duração inferior a 6 h, iniciação preferencial às 21 UTC, velocidade média abaixo de  $4 \text{ m s}^{-1}$  e tamanhos inferiores a 4 setores. No segundo, há as seqüências de maior deslocamento, doravante chamadas de **longas**. As seqüências longas seriam análogas às LI de tipo LIP-1 e LIP-2 de Cohen et al. (1989). Essas seqüências podem se deslocar por grandes distâncias ( $> 150$  km), possuem duração entre 6 e 12 h, iniciação preferencial às 18 UTC, velocidade média entre 4 e  $8 \text{ m s}^{-1}$ , e tamanhos entre 4 e 8 setores. Nos dois tipos, a direção de propagação e o ciclo anual são semelhantes. As características das seqüências curtas e longas estão resumidas na Tabela 3.

**Tabela 3** – Classificação de seqüências não-pontuais que se iniciam na CNB. Seqüências curtas são as confinadas à CNB; longas, as de maior deslocamento.

Classificação	Curtas	Longas
Ciclo anual	Máximo em abril	Máximo em abril
Deslocamento	Pequeno ( $< 150$ km)	Grande ( $> 150$ km)
Direção	$225^\circ$ - $315^\circ$	$225^\circ$ - $315^\circ$
Tempo de vida	$< 6$ h	6 a 12 h
Velocidade média	$< 4 \text{ m s}^{-1}$	$4$ - $8 \text{ m s}^{-1}$
Iniciação	21 UTC	18 UTC
Tamanho	$< 4$ setores	4 a 8 setores

## 5. DISCUSSÃO

Os resultados mostram que há cerca de 15 seqüências não-pontuais por mês, e 20 (7) seqüências não-pontuais em MAM (SON). Como ambos os tipos de seqüências (pontuais e não-pontuais) iniciam-se preferencialmente no mesmo horário, consideremos a hipótese de que ocorre somente 1 (uma) iniciação por dia (ver seção 4). Logo, durante todo o ano, ocorre iniciação de PC no final da tarde ou começo da noite em quase todos os dias: todos os dias do (22 dias por) mês em MAM (SON). A iniciação se deve principalmente ao aquecimento e à circulação de brisa, que são mecanismos presentes durante todo o ano. Em 15 dias do mês, as PC se iniciam, atingem tamanhos pequenos e se dissipam poucas horas após a iniciação (seqüências pontuais). Nos demais dias em que há iniciação de PC, as seqüências possuem maior duração (seqüências não pontuais), e a sazonalidade (maior/menor número de dias em MAM/SON) deve ser resultante da ação da ZCIT. Em metade dos dias que iniciam seqüências não-pontuais, as seqüências possuem duração de algumas horas, atingem tamanhos pequenos e permanecem confinadas à CNB (seqüências curtas) – i.e., são

muito semelhantes às seqüências pontuais. Na metade restante, a duração, o tamanho e o deslocamento (continente adentro) de seqüências são maiores (seqüências longas).

O papel da ZCIT no ciclo anual de ocorrência de seqüências não-pontuais é análogo ao proposto por Cavalcanti (1982) para LI. A ZCIT é uma zona de convergência em baixos níveis. Logo, ao atuar sobre a CNB em MAM, a convecção associada ao ciclo diurno é intensificada, i.e., aumenta-se o número de seqüências não-pontuais na CNB. Em SON, a ZCIT encontra-se na sua posição mais boreal e, portanto, leva a uma divergência em baixos níveis no CNB. Isso inibe uma convecção mais intensa e de maior extensão espacial, i.e., reduz o número de seqüências não-pontuais na CNB.

A propagação preferencial de seqüências não-pontuais é de leste para oeste, acompanhando os ventos alísios. Um problema ainda em aberto é explicar por que algumas seqüências ficam confinadas enquanto outras se propagam continente adentro. Cohen (1996), por meio de simulações numéricas, mostrou que a propagação de LI continente adentro está associada a ondas de gravidade interna que se propagam em um duto confinado entre dois jatos: de leste próximo a 700 hPa e de oeste em 200 hPa. Esse mecanismo dinâmico é importante para explicar a propagação de LI continente adentro. No presente trabalho, os resultados mostram que as seqüências longas estão associadas a PC de tamanhos relativamente grandes (superiores a 4-8 setores). Logo, formula-se a seguinte hipótese (que complementa o mecanismo proposto por Cohen): PC que atingem suficiente extensão horizontal na CNB (fruto de intensa convecção) – o que implica grande expansão em área da PC durante algum momento do seu ciclo de vida – são as que originam seqüências longas. Essa hipótese vai ao encontro de Machado e Laurent (2004). As forçantes para uma convecção mais intensa incluem maior convergência em baixos níveis associada a ZCIT, DOL, e outros sistemas sinóticos, maior umidade disponível para convecção profunda (p.ex., para alimentar os 'updrafts' na dianteira de LI; Figura 15 de Garstang et al., 1994), etc. Portanto, propomos que, dada uma PC no CNB, iniciada por fatores locais (aquecimento e brisa), se a convecção é intensificada por alguma forçante de escala sinótica, então a PC ganha grande extensão horizontal e se propaga continente adentro. Esse modelo conceitual será testado em futuros trabalhos.

## 6. CONCLUSÕES

Identificaram-se as seqüências de perturbações convectivas (PC) iniciadas na costa norte do Brasil (CNB) de 1984 a 1998 através de um procedimento objetivo. Para a identificação das PC, utilizaram-se dados de fração de nuvens associadas à convecção do ISCCP na resolução horizontal de 2,5° e temporal de 3 h. As características climatológicas das seqüências de PC referem-se ao período de 1984 a 1998 (média de 15 anos).

No caso de seqüências de PC **pontuais**, i.e., as que se iniciam em um dado instante, mas não continuam na imagem subsequente, cerca de 95% das seqüências possuem tamanho inferior a 4 setores, e a sua ocorrência possui pouca variação sazonal. A iniciação é máxima (mínima) às 18 UTC (12 UTC), sugerindo que o ciclo diurno de aquecimento solar e a circulação de brisa devem ser os principais mecanismos de formação das seqüências pontuais.

As seqüências de PC **não-pontuais**, i.e., as que possuem duração superior a 3 horas, são classificadas em função de seu deslocamento, de forma análoga à realizada por Cohen et al. (1989) para LI. As seqüências **curtas**, confinadas à CNB, apresentam pequeno deslocamento (< 150 km), duração abaixo de 6 h, iniciação preferencial às 21 UTC, velocidade média abaixo de 4 m s<sup>-1</sup> e tamanhos inferiores a 4 setores. As seqüências **longas**, que se propagam continente adentro, podem se deslocar por grandes distâncias (> 150 km), possuem duração média entre 6 e 12 h, iniciação preferencial às 18 UTC, velocidade média entre 4 e 8 m s<sup>-1</sup>, e tamanhos entre 4 e 8 setores. Tanto nas seqüências curtas quanto nas longas, a direção de propagação preferencial é para oeste, e a ocorrência é maior (menor) em MAM (SON).

As características climatológicas das seqüências longas sugere que a propagação continente adentro das PC iniciadas na CNB estaria associada a um acentuado aumento da extensão horizontal da PC, i.e., à intensificação da convecção. Essa intensificação poderia ser decorrente da ação de sistemas em escala sinótica (tais como ZCIT, DOL, etc.).

## 7. AGRADECIMENTOS

Este trabalho é parte da dissertação de mestrado do primeiro autor (sob orientação do terceiro e co-orientação do segundo autor) desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Meteorologia (PGMET) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Agradecemos aos revisores anônimos as sugestões e os comentários.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CAVALCANTI, I. F. A. **Um estudo sobre interações entre sistemas de circulação de escala sinótica e circulações locais**. 1982. 133 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia)-Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1982. INPE-2494-TDL/097.
- COHEN, J. C. P.; SILVA DIAS, M. A. F.; NOBRE, C. A. Aspectos Climatológicos das Linhas de Instabilidade na Amazônia. **Climanálise**, v. 4, n. 11, p. 34-42, 1989.

- COHEN, J. C. P.; SILVA DIAS M. A. F.; NOBRE, C. A. Environmental Conditions Associated with Amazonian Squall Lines : A Case Study. *Mon. Wea. Rev.*, v. 123, n. 11, p. 3163-3174, 1995.
- COHEN, J. C. P. **Mecanismo de Propagação e Estrutura das Linhas de Instabilidade da Amazônia**. 1996. 173 f. Tese (Doutorado em Meteorologia)-Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.
- COHEN, J. C. P. et al. Linhas de Instabilidade Formadas ao Longo da Costa Atlântica e no Interior do Continente: Estudo de Casos com Modelo de Alta Resolução. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 13., 2004, Fortaleza. **Anais...** Brasília: SBMET, 2004, 1 CD-ROM.
- GARSTANG, M. et al. Amazon Coastal Squall Lines, 1, Structure and Kinematics. *Mon. Wea. Rev.*, v. 122, n. 4, p. 608-622, 1994.
- GUEDES, R. L.; MACHADO, L. A. T. Climatologia da Estrutura Vertical das Perturbações Convectivas sobre a América do Sul e Adjacências. *Rev. Bras. Meteor.*, v. 18, n. 2, p. 215-230, 2003.
- MACHADO, L. A. T. et al. Life Cycle Variations of Mesoscale Convective Systems over the Americas. *Mon. Wea. Rev.*, v. 126, n. 6, p. 1630-1654, 1998.
- MACHADO, L. A. T.; LAURENT, H. The Convective System Area Expansion over Amazonia and Its Relationships with Convective System Life Duration and High-Level Wind Divergence. *Mon. Wea. Rev.*, v. 132, n. 3, p. 714-725, 2004.
- MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S. O. Uma Revisão da Dinâmica das Chuvas no Nordeste Brasileiro. *Rev. Bras. Meteor.*, v. 17, n. 1, p. 1-10, 2002.
- ORLANSKI, I. A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, v. 56, n. 5, p. 527-530, 1975.
- ROSSOW, W. B.; SCHIFFER, R. A. ISCCP Cloud Data Products. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, v. 72, n. 1, p. 2-20, 1991.
- ROSSOW, W. B.; SCHIFFER, R. A. Advances in Understanding Clouds from ISCCP. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, v. 80, n. 11, p. 2261-2287, 1999.
- SCHIFFER, R. A.; ROSSOW, W. B. The International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP): the First Project of the World Climate Research Programme. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, v. 64, n. 7, p. 779-784, 1983.
- SIQUEIRA, J. R.; MACHADO, L. A. T. Variações Sinóticas das Trajetórias de Perturbações Sinóticas na América do Sul e em Áreas Oceânicas Adjacentes. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11., 2000, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBMET, 2000. p. 1036-1043.
- RAO, V. B.; HADA, K. Characteristics of Rainfall over Brazil: Annual Variations and Connections with the Southern Oscillation. *Theor. Appl. Climatol.*, v. 42, n. 2, p. 81-91, 1990.
- VILA, D. A.; MACHADO, L. A. T. Shape and Radiative Properties of Convective Systems Observed from Infrared satellite Images. *Int. J. Rem. Sens.*, v. 25, n. 21, p. 4441-4456, 2004.
- WALISER, D. E.; GAUTIER, C. A Satellite-derived Climatology of the ITCZ. *J. Climate*, v. 6, n.11, p. 2162-2174, 1993.