

CONVECÇÃO ÚMIDA NA AMAZÔNIA: IMPLICAÇÕES PARA MODELAGEM NUMÉRICA

DAVID KENTON ADAMS¹, ENIO PEREIRA DE SOUZA², ALEXANDRE ARAÚJO COSTA^{3,4}

¹Universidade do Estado do Amazonas/Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – (UEA/INPA)

²Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas Universidade Federal de Campina Grande – (UFCG)

³Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME)

⁴Departamento de Ciências Físicas Aplicadas – Universidade Estadual do Ceará (UECE)

dadams@inpa.gov.br, esouza@dca.ufcg.edu.br, alex@funceme.br

Recebido Abril 2008 - Aceito Fevereiro 2009

RESUMO

Apresenta-se uma revisão de literatura sobre convecção na Amazônia, com foco na sua parametrização em modelos numéricos. Estudos baseados em dados observacionais obtidos durante campanhas de campo são examinados. As características básicas da convecção profunda na Amazônia, sua variabilidade temporal e geográfica são discutidas, com foco nas dificuldades que as parametrizações de convecção têm em capturar essa variabilidade, particularmente o ciclo diurno. O papel de variáveis termodinâmicas, como: CAPE e CIN é discutido por serem variáveis críticas na compreensão das deficiências em se reproduzir adequadamente o ciclo diurno da convecção. Outros elementos da física dos modelos, relevantes para parametrizações convectivas, particularmente aquelas relacionadas com os fluxos de energia da superfície e com o desenvolvimento da camada limite são também considerados. A interação de convecção rasa com radiação é apresentada. Superparametrização, como ferramenta para representação explícita da convecção, é revisada, uma vez que representa uma possível futura direção para a representação da convecção em modelos numéricos. Na conclusão fazem-se várias sugestões para estudos futuros, visando assim um melhor entendimento de processos convectivos e a sua parametrização.

Palavras-chave: convecção, parametrização, modelagem, Amazônia.

ABSTRACT: MOIST CONVECTION IN AMAZONIA: IMPLICATIONS FOR NUMERICAL MODELLING

A review of the literature on convection in Amazonia, with a focus on its parameterization in numerical models, is presented here. Studies based on observational data obtained during field campaigns are examined. The basic characteristics of deep convection in the Amazon, its temporal and geographical variability are discussed focusing on the difficulties convective parameterizations have in capturing this variability, particularly the diurnal cycle. The role of thermodynamic variables such as CAPE and CIN are argued to be critical in understanding the deficiencies in properly representing the diurnal cycle of convection. Other elements of the model physics relevant to convective parameterization, particularly those related to surface energy fluxes and development of the boundary layer are also considered. The interaction of shallow convection with radiation is presented. Superparameterization, as a tool for explicitly representing convection is reviewed as it is a possible future direction for the simulation of convective effects in numerical models. To conclude, various suggestions are made for future studies in order to better our understanding of convective processes and their parameterizations.

Keywords: convection, parameterization, modeling Amazonia

1. INTRODUCTION

O fenômeno da convecção atmosférica domina as condições de tempo e clima da Amazônia. A convecção rasa (não precipitante, seguindo a divisão tradicional de parametrizações convectivas) e a convecção profunda (precipitante) estão entre os principais componentes do balanço de energia local. Além disso, a convecção precipitante é essencial no ramo atmosférico do ciclo hidrológico, influencia a dinâmica tropical de grande escala e exerce um papel fundamental no balanço de energia da circulação geral do planeta. Conseqüentemente, relacionar a natureza local da convecção e sua interação com a atmosfera em grande escala tem sido um dos principais desafios da meteorologia tropical por décadas.

Os movimentos ascendentes e descendentes no interior de torres convectivas individuais são da ordem de 1 km ou menos (Byers e Braham, 1948; LeMone e Zipser, 1980) e a subsidência, que os compensam, cobre distâncias muito maiores [de 10 km até muito mais de 100 km, dependendo do raio de deformação (Bretherton, 1993; Mapes, 1998)]. Esses movimentos correspondem a circulações cujas escalas, tão desiguais, os impedem de ser explicitamente resolvidos nos modelos numéricos de previsão de tempo e clima com as resoluções atuais. Para complicar ainda mais essa dificuldade em resolver movimentos convectivos está o fato de as nuvens convectivas poderem gerar circulações de meso-escala (resolvidas ou não nos modelos), e que atuam para organizar complexos convectivos (Molinari e Dudek, 1992). Segundo Cotton e Anthes (1989), o problema da parametrização da convecção consiste em relacionar a convecção e os transportes associados a ela, que não podem ser resolvidos, com as variáveis de maior escala, estas sim, previstas pelo modelo, o que, em determinadas circunstâncias, pode constituir um problema não condicionado. Nos Modelos de Circulação Geral da Atmosfera (MCGAs) ou Modelos Regionais de Previsão de Tempo, os efeitos da convecção atmosférica devem ser necessariamente levados em conta. Contudo, as parametrizações convectivas tipicamente usadas nesses modelos de grande escala têm experimentado dificuldades em simular os efeitos dos processos convectivos em todas as regiões tropicais e, particularmente, em representar o ciclo diurno (Lin et al. 2000; Yang e Slingo, 2001).

A Bacia Amazônica tem-se mostrado uma região particularmente desafiadora para teste de parametrizações convectivas, uma vez que experimenta uma ampla gama de regimes convectivos e interações complexas entre a superfície e a atmosfera. Para compreender melhor as complexas ligações entre convecção, fluxos de energia em superfície e forçamento de grande escala, vários estudos observacionais intensivos na Amazônia, incluindo experimentos de campo e sensoriamento

remoto, foram conduzidos [e.g., ABLE2B, ABRACOS, WETAMC/LBA, TRMM/LBA, LBA dry-to-wet (Garstang et al., 1990; Silva Dias et al., 2002)]. Dados dessas campanhas propiciaram uma vasta gama de estudos que tinham entre seus objetivos a redução das deficiências na modelagem da convecção.

Nesta revisão de literatura, serão examinadas as dificuldades que a região amazônica, com seus vários regimes convectivos, apresenta para a modelagem da convecção atmosférica. Mais especificamente, serão examinadas as deficiências nas parametrizações de convecção, que levam a uma simulação deficiente do ciclo diurno da convecção. Essas dificuldades são particularmente evidentes, quando se trata de retratar com fidelidade o crescimento da camada limite convectiva e a transição gradual da convecção rasa para a profunda. As limitações, na simulação das características termodinâmicas da camada limite convectiva, têm implicações cruciais quanto ao instante (acionamento da convecção) e quanto à intensidade (fechamento) nos esquemas de parametrização convectiva. A convecção rasa, que representa um processo intermediário entre a convecção não saturada da camada limite e a convecção profunda, também exerce um papel fundamental nesse processo.

Inicialmente será examinada a natureza dos vários regimes convectivos com foco no padrão espaço-temporal e na morfologia da convecção (Secção 2). Em seguida, será feita uma discussão do papel da estabilidade termodinâmica nesses regimes convectivos, e nas dificuldades que isso representa para as parametrizações convectivas (Secção 3). Estudos numéricos dedicados à avaliação dessas parametrizações são revisados (Secção 4). Aspectos da convecção rasa serão discutidos em seguida (Secção 5). Na seqüência será devotada uma secção à representação explícita da convecção e superparametrização (Secção 6). Por fim, serão sumarizados os principais desafios ligados a representação da convecção nos modelos numéricos para a Amazônia. No texto, as abreviaturas e acrônimos serão mantidos em inglês, por serem mais comumente usados. Embora esta revisão se baseie na literatura internacional em inglês, é recomendado ao leitor ler a literatura ampla em português, que é citada em vários artigos revisados neste trabalho.

2. REGIMES CONVECTIVOS DA BACIA AMAZÔNICA

O ambiente convectivo na Amazônia é bastante complexo e heterogêneo, e não está categorizado como representativo de nenhum regime convectivo clássico (e.g., continental tropical) (Williams et al., 2002). A evolução temporal, a frequência e a morfologia da convecção profunda podem variar enormemente, dependendo do regime. Por exemplo: alguns

regimes experimentam freqüentemente sistemas convectivos organizados, tais como: linhas de instabilidade lineares e complexos convectivos de meso escala, enquanto outros experimentam um forte ciclo diurno de células convectivas não organizadas. Sazonalmente, a natureza do regime convectivo pode ser muito variável, dependendo se a estação é chuvosa, seca ou de transição. Por exemplo, a convecção da estação chuvosa apresenta características de regimes tropicais marítimos (i.e., menor energia potencial convectiva disponível – CAPE, correntes ascendentes mais fracas e reduzida atividade elétrica nas nuvens) (Williams et al., 2002; Petersen et al., 2002; Petersen et al., 2006). Já as estações de transição apresentam valores mais elevados de CAPE, convecção mais intensa e maior freqüência de linhas de instabilidade (Cohen et al., 1995; Li e Fu, 2006). A variabilidade intra-sazonal (variabilidade da ordem de dias a semanas) pode, também, modular as características termodinâmicas do ambiente convectivo, levando a mudanças na hora de ocorrência e freqüência da precipitação, bem como na morfologia das nuvens (Petersen e Rutledge, 2001; Petersen et al., 2006). Grande parte dessa variabilidade está associada com mudanças nos padrões de circulação em escala continental, tais como: incursões dos limites frontais que se estendem Amazônia a dentro, ao longo da Zona de Convergência da Atlântico do Sul (SACZ) (Rickenback et al., 2002; Halverson et al., 2002; Siqueira e Machado, 2004) e/ou mudanças nos padrões de escoamento das monções (Jones e Carvalho, 2002) em escala de tempo sinótica (Petersen et al., 2002; Rickenback et al., 2002; Siqueira e Machado, 2004; Li e Fu, 2006).

Há também, dentro da própria bacia amazônica diferenças regionais nos regimes convectivos (e.g., áreas costeiras versus Amazônia central), que se refletem na distribuição sazonal das chuvas e no caráter dos eventos convectivos que respondem por essa distribuição (Garstang et al., 1990; Greco et al., 1990; Garstang et al., 1994; Greco et al., 1994; Cohen et al., 1995; Fu et al., 1999; Petersen et al., 2002; Petersen et al., 2006). Um aspecto convectivo notável da Bacia Amazônica são as linhas de instabilidade em escalas de meso para sinótica que respondem por uma porção considerável da precipitação anual. Greco et al. (1990) classificam a convecção amazônica em três categorias distintas, a saber: Sistemas Ocorrentes na Costa (COS), Sistemas Ocorrentes na Bacia (BOS) e Sistemas Ocorrentes Localmente (LOS). As principais diferenças entre esses sistemas são: localização geográfica, propagação e ciclo de vida. As linhas de instabilidade categorizadas como COS, representam os sistemas de maior extensão geográfica e duração. Essas linhas são tipicamente geradas ao longo da região costeira do nordeste da Amazônia como resultado da convergência da brisa marítima ao atingir o continente em virtude da diferença de rugosidade (Garstang et al., 1994). Com orientação norte-sul e noroeste-sudeste as linhas se propagam para oeste, alongando-se por mais

de 1000 km em comprimento horizontal e durando por mais de 48 horas (Garstang et al., 1994). Elas ocorrem preferencialmente entre abril e agosto (estação de transição de chuvosa para seca). Essas linhas de instabilidade aparentemente produzem uma porção apreciável da precipitação total da parte central da Bacia Amazônica (Garstang et al., 1994). Os sistemas das categorias BOS e LOS tendem a ser sistemas numerosos, de menor duração e comprimento horizontal; são tipicamente distribuídos por uma vasta região ao longo da Bacia Amazônica e através de condições sinóticas variadas (Greco et al., 1990). Os sistemas da categoria BOS, em comparação com os LOS, tendem, também, a formar linhas de instabilidade. Já os LOS se organizam mais livremente, freqüentemente dentro de um ciclo diurno.

Mais para o interior (sudoeste da Amazônia), regimes convectivos diferentes de “leste” e de “oeste” exibem mudanças na estabilidade atmosférica (CAPE e energia de inibição convectiva – CIN), na organização da convecção, no fracionamento da precipitação entre convectiva e estratiforme e na freqüência de relâmpagos, entre outras características proeminentes (Halverson et al., 2002; Laurent et al., 2002; Petersen et al., 2002; Cifelli et al., 2004). A denominação “leste” e “oeste” dos dois regimes dá-se em virtude da direção predominante do vento na baixa troposfera. Os dois regimes estão relacionados com pequenos deslocamentos da Alta Subtropical do Atlântico (regime de leste) e a intrusão de zonas frontais oriundas das latitudes médias (regime de oeste) (Rickenback et al., 2002). Rickenbach (2004) encontrou que as linhas de instabilidade propagantes, que modulam o instante e a intensidade da convecção, são mais freqüentes durante o regime de leste. A convecção noturna, associada com essas linhas, também atua para retardar o ciclo convectivo do dia seguinte através do resfriamento e da secagem da camada limite, causada por correntes descendentes de meso escala. O regime de oeste está associado com o chamado regime do “oceano verde”, de menores valores de CAPE (1500 Jkg^{-1} no regime de leste, 1000 Jkg^{-1} regime do oeste), cisalhamento vertical mais fraco, torres convectivas mais rasas e atividade elétrica da atmosfera mais reduzida (Roberts et al., 2001; Halverson et al., 2002; Williams et al., 2002; Cifelli et al., 2004). É de particular importância, para a modelagem da convecção, compreender como a estabilidade termodinâmica varia de regime para regime e como isso se reflete na simulação da convecção profunda.

3. CONVECÇÃO E O AMBIENTE TERMODINÂMICO DA AMAZÔNIA

A evolução do ambiente termodinâmico e sua relação com convecção têm sido investigadas na Amazônia. Duas importantes variáveis que moldam a estabilidade local do perfil termodinâmico são a CAPE e a CIN. Elas desempenham um

papel importante no acionamento e na intensidade da convecção. Na escala sazonal, Fu et al. (1999) mostraram que a CIN é muito importante para o início da convecção em diferentes regiões da Bacia Amazônica. Eles encontraram que a crescente desestabilização da atmosfera em virtude do aquecimento da superfície e o aumento da advecção de umidade de julho para agosto, no sul da Bacia Amazônica, não levam, necessariamente, a mais atividade convectiva. Valores elevados de CIN (30-60 Jkg^{-1}), devidos a uma inversão térmica, impedem a formação de convecção profunda. Conseqüentemente, apenas após um umedecimento extra dos baixos níveis da atmosfera a convecção se inicia. Em outras regiões da Amazônia, é o aumento da umidade dos baixos níveis que reduz a CIN (25 Jkg^{-1} na região centro-sul, 30-40 Jkg^{-1} na bacia equatorial); mesmo com a presença de instabilidade (i.e. $\text{CAPE} > 0$), os processos convectivos intensos parecem ser controlados pela CIN (Fu et al., 1999). O papel de CIN em modular a ocorrência de convecção nos trópicos foi também anotado nos trabalhos observacionais de Williams e Rennó (1993) e teóricos de Raymond (1995) e Mapes (2000).

Encontram-se notáveis diferenças na atividade convectiva nas escalas sinótica e intra-sazonal, dependendo do regime convectivo dominante, conforme foi mencionado na seção anterior. Durante o regime de leste, os valores de CAPE e de CIN ($> 20 \text{ kg}^{-1}$) são maiores, o que é consistente com a observação de sistemas convectivos mais intensos durante esse regime (Halverson et al., 2002, Cifelli et al., 2004). Examinando a energética do ciclo diurno convectivo local durante o experimento WETAMC/LBA, Machado et al. (2002) encontraram que a CAPE aumentou muito rapidamente entre a manhã e o início da tarde. A falta da cobertura de nuvens implica em um maior fluxo solar atingindo a superfície, o que aumenta CAPE de forma bastante rápida. Concomitantemente, os valores de CIN diminuíram em virtude do abaixamento do nível de convecção espontânea (NCE), à medida que a superfície se aquecia. Com o desenvolvimento da convecção profunda e precipitação à tarde, a camada limite se resfria através de correntes descendentes convectivas. O fluxo de umidade da camada limite então diminui, o perfil atmosférico segue aproximadamente uma adiabática úmida e, conseqüentemente, torna-se neutro para convecção. A convecção é, portanto, diminuída, completando o ciclo. Dessa discussão, fica evidente que para entender a evolução de CIN/CAPE e o tempo de início e ciclo da convecção, o papel do aquecimento da superfície, os fluxos de umidade, correntes descendentes convectivas e subsidência de grande escala devem ser examinados cuidadosamente particularmente com respeito ao forçamento da camada limite e à grande escala.

Uma série de estudos recentes tem mostrado que em regiões tropicais continentais, como a Amazônia, a maior

parte da variação na CAPE está associada, primariamente, com forçamento da camada limite (McBride e Frank, 1999; Machado et al., 2002; Donner e Phillips, 2003; Zhang, 2003a, Adams e Souza, 2009). Mudanças na CAPE devidas ao forçamento de grande escala acima da camada limite são muito menores. Machado et al. (2002), examinando o ciclo diurno na região do TRMM/LBA WETAMC, mostraram que a CAPE é muito sensível à umidade e à temperatura da camada limite, enquanto que a troposfera superior tem menos influência. Isso implica que a CAPE é controlada substancialmente pela evolução da camada limite, isto é, por mudanças nos fluxos de calor e umidade (Donner e Phillips, 2003; Zhang, 2003a,b). Isso tem importantes implicações para parametrizações de cúmulos baseadas no princípio do quase equilíbrio ou esquemas com fechamentos baseados em CAPE (Donner e Phillips, 2003). Portanto, uma simulação apropriada da camada limite é crucial para modelagem de convecção na Amazônia.

4. PARAMETRIZAÇÃO DE CONVECÇÃO E ESTUDOS NUMÉRICOS

O modo como as parametrizações convectivas tratam a relação entre a estabilidade termodinâmica e a ativação e intensidade da convecção determina a natureza da precipitação simulada em regimes convectivos profundos, como o da Amazônia. Na realidade, como já mostrado, instabilidade termodinâmica não é o único fator que determina o surgimento da convecção profunda. O cisalhamento do vento, a dinâmica de pequena e de grande escala e as linhas de instabilidade podem exercer papéis fundamentais na ativação e na supressão de elementos convectivos. Esses fatores, contudo, são tipicamente desprezados em parametrizações convectivas.

O número de estudos, com foco exclusivo em parametrizações convectivas em modelos de grande escala na Amazônia, é bastante limitado na literatura formal. Os principais serão revisados aqui. Deve-se notar também, que na grande maioria dos modelos numéricos de previsão de tempo ou clima usam alguma parametrização de convecção profunda, baseada em fluxo de massa e com um fechamento baseado em algum esquema “quase equilíbrio”, seja com CAPE ou com forçante de grande escala (e.g., Arakawa e Schubert 1974). Alguns modelos numéricos, como o BRAMS (*Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System*), oferecem ao usuário diferentes opções na parametrização de convecção profunda. Primeiramente, serão examinados os modelos tridimensionais (3D) de grande e meso escalas, seguido pela revisão de modelos de coluna (SCM), que servem como uma versão econômica dos modelos 3D que eles representam.

4.1. Modelos Tri-Dimensionais

Betts e Jakobs (2002a) demonstraram que o modelo de previsão do ECMWF falhava em reproduzir apropriadamente um ciclo diurno realista para a convecção observada durante a campanha do WETAMC-LBA em Rondônia. Do experimento WETAMC-LBA, a evolução da camada limite mostra que uma camada noturna, fortemente estável, apesar de rasa, é erodida lentamente (na ordem de poucas horas) devido ao fluxo de calor que se segue ao amanhecer (Betts et al. 2002a). A erosão dessa camada estável leva a uma fase de convecção rasa, na qual a umidade é transportada para fora da camada limite convectiva, à medida que se aprofunda. Chuvas rápidas se formam por volta do meio-dia, seguido da organização de convecção profunda no início da tarde (aproximadamente 14 horas local), com alguma dependência do regime de vento da baixa troposfera. A camada limite é então estabilizada pela intrusão de ar com baixa temperatura potencial equivalente, trazida para baixo nas correntes descendentes sub-saturadas. Após o resfriamento radiativo durante a noite, a camada nas proximidades da superfície torna-se bastante estável. Embora a precipitação média produzida no modelo de previsão se aproxime daquela observada durante o período de observação, o modelo do ECMWF falhou (em geral adiantou) em reproduzir o instante inicial, a variabilidade convectiva e os processos físicos corretos, responsáveis pelo ciclo diurno observado.

Bechtold et al. (2004), também utilizando o modelo global de previsão do ECMWF, examinaram o ciclo diurno sobre o sudoeste da Amazônia. Assim como em estudos anteriores, os autores encontraram que a convecção da Amazônia ocorreu muito cedo no ciclo diurno. Os autores também notaram, que o comportamento diurno de CIN, CAPE e precipitação foi aproximadamente idêntico ao observado em regiões continentais de latitudes médias. Não obstante, algumas melhorias no processo de atrasar a convecção foram realizadas através da modificação com mecanismo de acionamento da convecção e na taxa de entranhamento do fechamento (dependente da CAPE) do esquema tipo fluxo de massa.

Um modelo regional de meso escala (Fifth Generation Mesoscale Model, MM5) com uma estrutura de grade aninhada foi empregado por Warner et al. (2003) e Mapes et al. (2003) para examinar o padrão diurno da precipitação no noroeste da América do Sul. Embora o foco fosse especificamente no ciclo diurno do terreno complexo da Colômbia e Panamá, eles mostraram que o esquema do tipo fluxo de massa (com fechamento baseado na CAPE) interagiu com as ondas de gravidade geradas pelo modelo para produzir aspectos, que muito se assemelham às linhas de instabilidade de longa duração que ocorrem na Bacia Amazônica. Contudo, eles também notaram que esse aspecto desapareceu quando o mecanismo de acionamento (uma perturbação na velocidade vertical) utilizado na parametrização de convecção foi desativado. Algumas

das deficiências em modelar o ciclo diurno da precipitação convectiva, nesse caso, para topografia complexa, também foram observadas.

4.2. Estudos com Modelos de Coluna

Esse ponto fraco em reproduzir apropriadamente o ciclo diurno nas regiões tropicais continentais não é exclusivo dos modelos do ECMWF ou MM5, mas é também encontrada na maior parte dos GCMs e modelos regionais e de meso-escala (Yang e Slingo, 2001). Dada a complexidade da versão 3D desses modelos numéricos, é vantajoso isolar o erro devido à parametrização convectiva. Modelos de uma coluna (SCMs), que representam versões 1D dos modelos de grande escala, têm sido largamente usados para investigar esse problema. Com respeito à Amazônia, existe uma série de estudos de modelagem usando SCMs com base em campanhas observacionais do ciclo diurno da Amazônia (Betts e Jakob, 2002b; Bechtold et al., 2004; Grabowski et al., 2006).

Os resultados de Betts e Jakob (2002b) confirmam o que já foi reconhecido para outros continentes no verão: a parametrização de convecção usada tende a estabelecer convecção muito cedo no dia. Betts e Jakob (2002b) e Grabowski et al. (2006) examinaram também o comportamento do ciclo diurno da convecção amazônica, reproduzido por vários SCMs utilizando diferentes parametrizações convectivas do tipo fluxo de massa com fechamentos baseados na CAPE ou quase equilíbrio. Em casos com e sem forçamento de grande escala e independentemente do esquema convectivo empregado, a precipitação foi produzida muito cedo no dia. A transição abrupta de uma camada noturna estável para convecção profunda sem a fase de transição representada pelos cúmulos rasos foi a principal causa para a evolução encontrada na CAPE e na CIN. A convecção profunda ocorre nos SCMs quando CIN é eliminada e CAPE está presente, dados os fechamentos baseados na CAPE, usados nesses modelos. A precipitação do fim da manhã, portanto, foi observada em fase com a eliminação da CIN e a presença de CAPE nas simulações. Dentro dos SCMs, esse intercâmbio entre CAPE/CIN e precipitação é inteiramente consistente internamente, mas não reproduz as observações. Os valores de CAPE encontrados foram muito grandes, inclusive no início do dia. Isso resultou em convecção por causa do mecanismo de acionamento da convecção baseado em CAPE, presente na maioria das parametrizações.

Os resultados desses estudos indicam que a parametrização de convecção contribui mais decisivamente para o erro do modelo, um erro que pode ser atribuído ao mecanismo de acionamento ou à limitação em representar apropriadamente a mistura na atmosfera em virtude da convecção (Bechtold et al., 2004). Os resultados acima sugerem que a camada limite estável

noturna não é tão estável em simulações de modelo, quanto o é na natureza. Na natureza, uma forte estabilização resulta, freqüentemente, das correntes descendentes sub-saturadas de meso escala associadas com convecção organizada da tarde e da noite anteriores (Betts e Jakob, 2002a,b; Rickenbach, 2004). Da mesma forma, a convecção noturna associada com linhas de instabilidade propagantes, também pode suprimir a precipitação do dia seguinte (Rickenbach 2004). Parece que nenhum desses processos estabilizantes está bem representado nos modelos.

4.3. Cape, Cin e Parametrizações Convectivas

Dentro da abordagem dos SCM, a transição lenta da camada limite noturna estável para uma camada convectiva bem misturada com a conseqüente convecção rasa, não está presente. Especificamente, a camada bem misturada faz a transição para convecção profunda à medida que o perfil termodinâmico possa estar instável para a parcela de ar proveniente da camada próxima à superfície (Betts e Jakob, 2002b; Betts et al., 2002; Grabowski et al., 2006). Para esquemas de convecção que têm como único mecanismo acionador a existência da CAPE positiva (ou se outros eventuais critérios são atingidos) para ativar convecção profunda, esta pode acontecer irrealistamente cedo. Esse tipo de erro do ciclo diurno da precipitação em regiões tropicais continentais tem sido observado em grande número de modelos regionais e globais, correntemente em uso (Wang et al., 2007).

Como os estudos acima sugerem, a evolução da CAPE e da CIN na camada limite da Amazônia aparenta ser a dificuldade que delinea a deficiência de replicar o ciclo diurno da convecção. Embora a relação real entre convecção, CAPE e CIN seja internamente consistente dentro dos modelos, os instantes de acionamento e o ciclo da convecção não se refletem nas observações (Bechtold et al. 2004). Várias possíveis soluções emergiram desses estudos para melhor simular a convecção em modelos numéricos. Um possível mecanismo para eliminar o pico de precipitação que ocorre cedo da manhã, foi obtido ao aumentar o entranhamento para as parametrizações de convecção rasa e profunda (Bechtold et al. 2004; Grabowski et al. 2006). Acredita-se que o aumento do entranhamento atua para reduzir o elevado valor da CAPE pela manhã, atrasando, então, o desenvolvimento da convecção profunda.

5. CONVECÇÃO RASA E PARAMETRIZAÇÃO

Se a convecção profunda é muito dependente dos processos de grande escala, a freqüência e a intensidade da convecção rasa são bastante sensíveis a fatores locais, como cobertura vegetal, topografia, etc. A convecção rasa, além de influenciar definitivamente o perfil termodinâmico da

camada onde atua, exerce um papel fundamental no balanço de energia da superfície e da camada limite convectiva. A presença de cúmulos rasos implica em vários mecanismos de retro-alimentação. Stull (1985) enumera alguns desses mecanismos: a retro-alimentação dinâmica implica que o movimento ascendente dentro da nuvem transporta uma perturbação negativa de entalpia e o movimento descendente, na periferia dos cúmulos, transporta uma perturbação positiva de entalpia. A retro-alimentação termodinâmica implica em aquecimento, devido à condensação, na região inferior da nuvem e resfriamento evaporativo na parte superior. A retro-alimentação radiativa implica em aquecimento na base, devido à absorção de radiação de onda longa, e resfriamento no topo, devido à emissão. Esse aquecimento na parte inferior da nuvem e o resfriamento da parte superior implicam em instabilização termodinâmica da camada de cúmulos rasos. O efeito completo da convecção rasa se completa com a radiação de onda curta. A atenuação da radiação solar em virtude da convecção rasa, que pode superar 60 % de cobertura sobre regiões continentais (Wetzel et al., 1996), é de grande importância para a obtenção de simulações mais realistas.

A existência de uma cobertura apreciável de cúmulos rasos modula definitivamente, o balanço de energia em superfície. A ausência desse processo de interação entre convecção rasa e radiação faz com que o saldo de energia à superfície seja superestimado nos modelos. Segundo Betts et al. (1996), a principal conseqüência desse excesso de energia em superfície é uma secagem irrealista dos modelos no início da simulação. Como a umidade do solo não é repostada adequadamente, a razão de Bowen aumenta com o tempo, afetando todos os processos da camada limite. Isso ocorre porque, à medida que o solo seca o fluxo de calor sensível aumenta e o de calor latente diminui, o que implica em uma representação inadequada da evolução da camada limite. Note-se que esse excesso de evaporação no início afeta, diretamente, a evolução da CAPE e da CIN, com implicações sobre o desenvolvimento da convecção profunda, já discutidas acima. O excesso de evaporação no início tende a aumentar a CAPE e diminuir a CIN, o que causa acionamento da convecção nos esquemas, cujos fechamentos dependem de CAPE e CIN. O contrário ocorre à medida que a superfície do modelo seca de forma irrealista. Portanto, não só a representação apropriada dos processos termodinâmicos associados à convecção rasa, como a definição correta da sua cobertura e interação com a radiação, são desafios postos para a melhoria do processo de modelagem na Amazônia.

Ao mesmo tempo em que a convecção rasa (quando existente) influencia o balanço de energia da superfície, um aspecto que condiciona o montante e a intensidade da convecção rasa é a sua relação com a própria superfície, isto é, como a convecção rasa é fortemente dependente dos processos locais,

o tipo de cobertura da superfície também influencia a sua frequência e intensidade. Usando imagens de satélite, Rabin et al. (1990) observaram que cúmulos rasos formam-se mais cedo sobre áreas de trigo já colhidas do que sobre regiões adjacentes, com grande cobertura vegetal. Eles aventaram a hipótese de que nuvens rasas apresentam maior cobertura em regiões de razão de Bowen relativamente maior. Cutrin et al. (1995), usando método similar ao de Rabin et al. (1990), observaram um aumento na frequência de cúmulos rasos em regiões desmatadas da Amazônia. Eles mostraram, que durante o mês de agosto de 1988, a região desmatada de Rondônia apresentou maior frequência de cúmulos rasos do que a floresta adjacente e que esse efeito era mais evidente por volta das 14 horas local. Esse realce da cobertura de cúmulos rasos sobre a Amazônia pode também ser inferido a partir de outros trabalhos. Bastable et al. (1993) observaram que o fluxo de energia solar médio atingindo a superfície sobre uma região desmatada, era ligeiramente inferior ao observado sobre uma região de floresta adjacente, depois do meio-dia local. A partir daí, outro desafio que se coloca é o de se modelar bem a heterogeneidade relacionada à distribuição espaço temporal da convecção rasa sobre a Amazônia.

6. REPRESENTAÇÃO EXPLÍCITA DA CONVECÇÃO E SUPERPARAMETRIZAÇÃO

Uma vez que as escalas permitidas em um modelo dependem essencialmente de seu espaçamento de grade, é de se

esperar que a relação entre as escalas resolvida e não-resolvida variem de acordo com a resolução do modelo. Por conta disso, considera-se que a parametrização da convecção é um problema bem condicionado apenas na grande e meso-escalas. Modelos cujo espaçamento de grade visa representar a meso-escala se encontram em uma situação limítrofe: a resolução ainda não é fina o suficiente, como nos modelos de nuvens, para representar explicitamente as circulações em escala convectiva, mas a malha da grade já não é grande o suficiente para que uma representação estatística da convecção possa ser usada.

Em suma, é possível dizer que a representação dos processos em escala convectiva é bem estabelecida em dois limites: em espaçamentos de grade abaixo de aproximadamente 1-2 km, a convecção é explicitamente resolvida; acima de 20 km, as parametrizações de convecção, baseadas em propriedades médias/estatísticas adquirem validade. Entre estes limites, porém, não há uma metodologia bem estabelecida, criando uma “zona cinza” (Figura 1).

Considerando que, mesmo na previsão operacional de tempo e clima, até os modelos de circulação geral se aproximam da fronteira da chamada “zona cinza”, tratar a convecção nessa faixa de resoluções espaciais é um dos desafios da modelagem nos dias de hoje. De fato, em muitos modelos usados operacionalmente para fins de previsão de tempo, o espaçamento de grade é igual ou inferior a 20 km, mas ainda muito maior do que 1 km. A coluna de grade do modelo de mesoescala, nesse caso, não oferece a possibilidade de resolver explicitamente



Figura 1 – Sumário da representação da convecção dependente da escala.

a convecção nem contém um número de “realizações” da convecção suficiente para ter significado estatístico.

De um lado, o avanço exponencial da capacidade computacional disponível vem permitindo, que o mais óbvio dos caminhos seja trilhado: melhorar a resolução espacial ao ponto de dispensar inteiramente as parametrizações, mesmo em simulações da circulação geral. Isso foi o que se obteve, por exemplo através do Earth Simulator, em que simulações globais com espaçamento de grade de 3,5 km foram realizadas com êxito (Tomita et al., 2005).

Não obstante o êxito em simular corretamente aspectos da circulação geral e da interação desta com as nuvens em modelos de alta resolução, alguns pontos precisam ser discutidos acerca da representação explícita da convecção em modelos de grande escala: 1) a resolução da ordem de 3 km ainda é insuficiente para proporcionar uma representação de fato adequada dos sistemas de nuvens, visto que, geralmente é admitido que isso só é possível para espaçamentos de grade iguais ou inferiores a ~1km; 2) o esforço computacional é extremamente elevado e recursos computacionais são usados de maneira ineficiente em regiões nas quais sistematicamente não há formação de convecção; e 3) o uso de modelos de circulação geral em alta resolução ainda é limitado a simulações de curto prazo e/ou a uma única realização (o uso de ensemble ainda é proibitivo), sujeito a fortes incertezas nas condições iniciais e fora do alcance de muitos institutos meteorológicos e centros de pesquisa.

Portanto, outras estratégias têm de ser seguidas para permitir contornar as limitações características das parametrizações tradicionais de convecção e/ou obter resultados em alta resolução em regiões de interesse.

Uma delas é o uso de modelos de conjunto de nuvens na construção de parametrizações de convecção. Definidos como “modelos capazes de resolver nuvens individuais, cujo domínio é grande o suficiente para conter várias nuvens e cujo tempo de execução é longo o suficiente para conter vários ciclos de vida de nuvens” (Randall et al., 1996). Os modelos de conjunto de nuvens encontram usos variados, dentre eles, contornar a chamada “via empírica” para construção de parametrizações, adotando uma “via física” (Randall et al., 1996, Moncrieff et al., 1997).

Outros autores propuseram (e implementaram) o uso de modelos de ensemble de nuvens em substituição direta das parametrizações de convecção, constituindo a chamada superparametrização (Randall et al. 2003; Khairoutdinov e Randall, 2001; Grabowski, 2001, 2003). Na superparametrização, a coluna do modelo de maior escala (MCGA ou mesoescala), é substituída por um modelo de conjunto de nuvens, geralmente bidimensional, que passa a responder pelo conjunto dos processos físicos em escala de sub-grade. De imediato, a interação das nuvens com a radiação, o efeito de rajadas de

sistemas precipitantes sobre os fluxos de superfície, o transporte de energia, momentum e água por tais sistemas e o cálculo da precipitação são todos representados de forma coerente entre si, por meio de um único modelo físico e não através de parametrizações que não se intercomunicam. Aliás, essa ausência de conexão física entre a convecção, a cobertura de nuvens e a radiação e a representação da camada limite, é possivelmente uma das principais razões pelas quais modelos com convecção parametrizada não têm obtido sucesso na representação do ciclo diurno. Segundo Khairoutdinov e Randall (2001), Grabowski (2003) e Randall et al. (2003), o uso da superparametrização tem assegurado êxito na representação de processos que envolvem a interação entre nuvens e fenômenos de grande escala (como ondas planetárias).

Por fim, outra estratégia é a de lançar mão de refinamentos na grade de modelos de maior escala somente em regiões de interesse, onde a atividade convectiva é crítica para determinar os processos físicos e dinâmicos. No caso de modelos globais, um exemplo é o chamado OLAM – Ocean-Land-Atmosphere Model, que pode ser usado com refinamentos locais de alta resolução (Walko e Avissar, 2008a, b).

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi apresentada uma revisão de literatura sobre a convecção na Amazônia. O objetivo foi o de mostrar os principais problemas que os modeladores têm de focar para melhorar a capacidade de modelagem numérica na região, do ponto de vista da parametrização de convecção. Também foi discutida a superparametrização, que é uma ferramenta que aponta para o futuro dessas pesquisas. Uma das principais melhorias que se espera dos modelos é a correta simulação do ciclo diurno da precipitação convectiva. Como tópicos que devem ser pesquisados nessa linha estão:

- 1) Uma simulação apropriada da camada limite e dos fluxos de energia de superfície é essencial para modelagem de convecção na Amazônia;

- 2) Compreender como a estabilidade termodinâmica varia entre os diferentes regimes de vento e como isso se reflete na simulação da convecção profunda;

- 3) Representar melhor a formação de gelo para o desenvolvimento de precipitação, produzindo um perfil de aquecimento convectivo com um máximo deslocado para cima;

- 4) Representar a forte estabilização que resulta das correntes descendentes sub-saturadas de meso escala associadas com convecção organizada na tarde e na noite;

- 5) Incorporar o efeito estabilizante do cisalhamento do vento na supressão de elementos convectivos;

- 6) Melhorar a representação dos processos termodinâmicos associados à convecção rasa, assim como a definição correta

da sua cobertura e interação com a radiação de onda curta e de onda longa;

7) Reproduzir adequadamente a heterogeneidade relacionada à distribuição espaço-temporal da convecção rasa sobre a Amazônia;

8) Avançar no uso da superparametrização como ferramenta para estudar os processos que envolvem a interação entre nuvens, radiação e fenômenos de grande escala.

8. AGRADECIMENTOS

Queremos agradecer a Sheilla Santana Ribeiro do SIPAM, Manaus, por sua ajuda com este artigo. Agradecemos os comentários dos três revisores e cada uma das nossas instituições pela ajuda material para escrevermos este artigo.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMS, D. K.; SOUZA, E. P. CAPE and convective events over the southwest U. S. during the North American Monsoon. *Monthly Weather Review*, v. 137, p.83-98, 2009.
- BASTABLE, H. G. et al. Observations of climate, albedo, and surface radiation over cleared and undisturbed amazonian forest. *International Journal of Climatology*, v. 13, p. 783-796, 1993.
- BECHTOLD, P., et al. The simulation of the diurnal cycle of convective precipitation over land in a global model. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v.131, p.3119-3137, 2004.
- BETTS, A. K. et al. The land surface-atmosphere interaction. A review based on observational and global modeling perspectives. *Journal of the Geophysical Research*, v. 101, p.7209-7225, 1996.
- BETTS, A.; JAKOBS, C. Evaluation of the diurnal cycle of precipitation, surface thermodynamics, and surface fluxes in the ECMWF model using LBA data. *Journal of the Geophysical Research*, v. 107(D20), doi:10.1029/2001JD000427, 2002a.
- BETTS, A.; JAKOBS, C. Study of diurnal cycle of convective precipitation over Amazonia using a single column model. *Journal of the Geophysical Research*, v. 107(D23), doi:10.1029/2001JD002264, 2002b.
- BETTS A., et al. Surface diurnal boundary layer structure over Rondônia during the rainy season. *Journal of the Geophysical Research*, v.107 (D20), doi:10.1029/2001JD000356, 2002.
- BRETHERTON, C. The nature of adjustment in cumulus clouds fields. Chapter 5, in *The representation of cumulus convection in numerical models*. American Meteorological Society Meteorological Monographs, n. 24, p.63-74. Boston, 1993.
- BYERS, H., R.; BRAHAM, J. R.. Thunderstorm structure and circulation. *Journal of Meteorology*, v. 5, p.71-86, 1948.
- CIFELLI, R. L. et al. An ensemble study of wet season convection in southwest Amazonia: Kinematics and implications for diabatic heating. *Journal of Climate*, v 17, p.4692-4707, 2004.
- COHEN, J.; SILVA DIAS, M. A. F.; NOBRE, C. A.. Environmental conditions associated with Amazonian squall lines: A case study. *Monthly Weather Review*, v. 123, p.3163-3174, 1995.
- COTTON, W.; ANTHES, R.. *Storm and Cloud Dynamics*. Academic Press, International Geophysical Series, vol. 44, 1989. 880p.
- CUTRIN, E.; MARTIN, D. W.; RABIN, R. Enhancement of cumulus clouds over deforested lands in Amazonia. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 76, p.1801-1905, 1995.
- DONNER, L.; PHILLIPS, V. Boundary layer control on convective available potential energy: Implications for cumulus parameterization. *Journal of the Geophysical Research*, v. 108,(D22) doi:10.1029/2003JD003773, 2003.
- FU, R.; ZHU, B.; DICKINSON, R. How do atmosphere and land surface influence seasonal changes of convection in the tropical Amazon. *Journal of Climate*, v. 12, p.1306-1321, 1999.
- GARSTANG, M., COAUTHORS. The Amazon Boundary Layer Experiment (ABLE 2B): A meteorological perspective. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 71, p.19-32, 1990.
- GARSTANG, M. et al. Amazon coastal squall lines. Part I: Structure and kinematics. *Monthly Weather Review*, v. 122, p.608 - 622, 1994.
- GREGORY, D., et al. Revision of convection, radiation, and cloud schemes in the ECMWF Integrated Forecasting System. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 126, p.1685-1710, 2000.
- GRABOWSKI, W. Coupling cloud processes with the large-scale dynamics using the cloud-resolving convection parameterization (CRCP). *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 58, p.978-997, 2001.
- GRABOWSKI, W. MJO-like coherent structures: Sensitivity simulations using the cloud-resolving convection parameterization (CRCP). *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 60, p.847-864, 2003.
- GRABOWSKI, W., et al. Daytime convective development over land: A model intercomparison based on LBA observations. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 132, p.317-344, 2006.
- GRECO, S., et al. Rainfall and surface kinematics conditions

- over central Amazonia during ABLE 2B. *Journal of the Geophysical Research*, v. 95, p.17001-17014, 1990.
- GRECO, S. et al. Amazon coastal squall lines, 2. Heat and moisture transports. *Monthly Weather Review*, v. 122, p.623-635, 1994.
- HALVERSON, J., et al. Environmental characteristics of convective systems during TRMM-LBA. *Monthly Weather Review*, v. 130, p.1493-1509, 2002.
- HERDIES, D., et al. Moisture budget of the bi-modal pattern of the summer circulation over South America, *Journal of the Geophysical Research*, v. 107, p.LBA 42-1, DOI 10.1029/2001JD000997, 2002.
- JONES, C., CARVALHO, L. Active and break phases in the South American monsoon system. *Journal of Climate*, v. 15, p.905-914, 2002.
- KHAIROUTDINOV, M.; RANDALL, D. Cloud-resolving modeling of the ARM summer 1997 IOP: Model formulation, results, uncertainties and sensitivities. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 60, p.607-625, 2003.
- LEMONE, M.; ZIPSER, E. Cumulonimbus vertical velocity events in GATE. Part I: Diameter, intensity and mass flux. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 37, p. 2444-2457, 1980.
- LI, W.; FU, R. Influences of cold air intrusions on the wet season onset over Amazonia. *Journal of Climate*, v. 19, p.257-275, 2006.
- LIN, X.; RANDALL, D.; FOWLER, L. Diurnal variability of the hydrological cycle and radiative fluxes: Comparisons between observations and a GCM. *Journal of Climate*, v. 13, 4159-4179, 2000.
- LAURENT, H. et al. Characteristics of the Amazonian mesoscale convective systems observed from satellite and radar during the WETAMC/LBA experiment. *Journal of the Geophysical Research*, v. 107, 8064, DOI:10.1029/2001JD000337, 2002.
- MACHADO, L.; LAURENT, H.; LIMA, A. Diurnal march of the convection observed during TRMM-WETAMC/LBA. *Journal of the Geophysical Research*, v.107, p.8064, DOI:10.1029/2001JD000338, 2002.
- MAPES, B. The large-scale part of mesoscale convective system circulations: a linear two vertical spectral bands model. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, v. 76, p.29-55, 1998.
- MAPES, B. Convective inhibition, subgrid-scale triggering energy, and stratiform instability in a toy tropical wave model, *Journal of the Atmospheric Sciences*, v.57, p. 1515-1535, 2000.
- MCBRIDE, J.; FRANK, W. Relationships between stability and monsoon convection. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 56, p.24-36, 1999.
- MOLINARI, J.; DUDEK, M. Parameterization of convection precipitation in mesoscale numerical models: A critical review. *Monthly Weather Review*, v.120, p.326-344, 1992.
- MONCRIEFF, M. W. et al. cloud system study (GCSS) working group 4: precipitating convective cloud systems. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v.78, p.831-845, 1997.
- PETERSEN, W.; RUTLEDGE, S. Regional variability in tropical convection: Observations from TRMM. *Journal of Climate*, v. 14, p.3566-3586, 2001.
- PETERSEN, W. et al. TRMM observations of intraseasonal variability in convective regimes over the Amazon. *Journal of Climate*, v. 15, p.1278-1294, 2002.
- PETERSEN, W. et al. Intraseasonal forcing of convection and lightning activity in the southern Amazon as a function of cross equatorial flow. *Journal of Climate*, v. 19, p.3180-3196, 2006.
- RABIN, R., et al. Observed effects of landscape variability on convective clouds. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 71, p.272-280, 1990.
- RANDALL, D. A. et al. Single-column models and cloud ensemble models as links between observations and climate models. *Journal of Climate*, v. 9, p.1583-1697, 1996.
- RAYMOND, D. Regulation of moist convection over the west Pacific warm pool. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 52, p.3945-3959, 1995.
- RICKENBACH, T. et al. Cloud and rain processes in a biosphere atmosphere interaction context in the Amazon region. *Journal of the Geophysical Research*, v. 107, p.8040, doi:10.1029/2001JD000263, 2002.
- RICKENBACH, T. Nocturnal cloud systems and the diurnal variation of clouds and rainfall in Southwestern Amazonia. *Monthly Weather Review*, v. 132. p. 1201-1219, 2004.
- ROBERTS, G. M. ANDREAE, J. ZHOU, P. ARTAXO. Cloud condensation nuclei in the Amazon Basin: "Marine" conditions over a continent? *Geophysical Research Letters*, v. 28, p. 2807-2810, 2001.
- SILVA DIAS, M. et al. Cloud and rain processes in a biosphere atmosphere interaction context in the Amazon region. *Journal of the Geophysical Research*, v. 107, p.8072, doi:10.1029/2001JD000335, 2002.
- SILVA DIAS, M., FERREIRA, R. N. Application of a linear spectral model to the study Amazonian squall lines during GTE/ABLE 2B. *Journal of the Geophysical Research*, v.71, p.20405-20419, 1992.
- SIQUEIRA, J., T. MACHADO. Influence of the frontal systems on the day-to-day convection variability over South America. *Journal of Climate*, v.17, p.1754-1766, 2004.
- STULL, R. B. A fair-weather cumulus cloud classification scheme for mixed-layer studies. *Journal of Climate and*

- Applied Meteorology, v. 24, p.49-56, 1985.
- THOMPSON, R. et al. Structure and properties of synoptic scale wave disturbances in the intertropical convergence zone of the eastern Atlantic. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 36, p.53-72, 1979.
- TOMITA, H. et al. A global cloud-resolving simulation: preliminary results from an aqua planet experiment, *Geophysical Research Letters*, v. 32, L08805, doi:10.1029/2005GL022459, 2005.
- WALKO, R. L.; AVISSAR, R.: The Ocean-Land-Atmosphere Model (OLAM). Part I: Shallow-water tests. *Monthly Weather Review*, v. 136, p.4033-4044, 2008a.
- WALKO, R. L.; AVISSAR, R.: The Ocean-Land-Atmosphere Model (OLAM). Part II: Formulations and tests of the nonhydrostatic dynamic core. *Monthly Weather Review*, v. 136, p.4045-4062, 2008b.
- WANG, Y., L. ZHOU, K. HAMILTON. Effect of convective entrainment/entrainment on the simulation of the tropical precipitation diurnal cycle. *Monthly Weather Review*, v. 135, p.567-585, 2007.
- WARNER, T.; MAPES, B.; XU, M.. Diurnal patterns of rainfall in northwestern South America. Part II. Model simulations. *Monthly Weather Review*, v.131, p.813-829, 2003.
- WETZEL, P. J.; ARGENTINI, S.; BOONE, A. Role of land surface in controlling daytime cloud amount: Two case studies in GCIP-SW area. *Journal of the Geophysical Research*, v. 101, p.7359-7370, 1996.
- WILLIAMS, E., N. RENNO. An analysis of the conditional instability of the tropical atmosphere. *Monthly Weather Review*, v. 121, n. 1, p.21-36, 1993
- WILLIAMS, E., et al. Contrasting convective regimes over the Amazon: Implications for cloud electrification. *Journal of the Geophysical Research*, v. 107, doi:10.1029/2001JD000380, 2002.
- YANG, G., J. SLINGO. The diurnal cycle in the tropics. *Monthly Weather Review*, v. 129, p.784-801, 2001.
- ZHANG, G.. Convective quasi-equilibrium in the tropical western Pacific: comparison with midlatitude. *Journal of the Geophysical Research*, v. 108, (D19), doi:10.1029/2003JD003520, 2003a.
- ZHANG, G.. Roles of tropospheric and boundary layer forcing in the diurnal cycle of convection in the U.S. southern Great Plains. *Geophysical Research Letters*, v. 30, doi:10.1029/2003JD018554, 2003b.