

## COMPARAÇÃO DOS ESQUEMAS DE CONVECÇÃO KUO E RAS USANDO O MODELO ATMOSFÉRICO GLOBAL DO CPTEC DURANTE O EXPERIMENTO WETAMC/LBA

MARIA AURORA SANTOS DA MOTA<sup>1</sup> e ANTÔNIO MARCOS MENDONÇA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Departamento de Meteorologia.  
Rua Augusto Corrêa, 1, Campus Básico, Guamá, CEP 666075-900

Fone: (91) 3201-7410, E-mail:aurora@ufpa.br

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC).  
E-mail: mendonca@cptec.inpe.br.

Recebido Maio 2005 - Aceito Agosto 2006

### RESUMO

Foram realizadas simulações numéricas com o modelo de circulação geral da atmosfera (MCGA) do CPTEC, com as parametrizações de convecção Kuo e Arakawa-Schubert Relaxada (RAS), para determinação da precipitação e comparação com as observações feitas durante a campanha do WetAMC/LBA (10/01 a 28/02 de 1999). É enfatizado o persistente erro sistemático do MCGA: subestimativa dos totais de precipitação durante a estação chuvosa da maior parte da Amazônia (verão do Hemisfério Sul) e superestimativa das chuvas no Nordeste Brasileiro (NEB). Para o esquema RAS foi modificada a forma de calcular o topo e a base da nuvem e o perfil de eficiência das nuvens. As simulações do total de precipitação diária apresentaram discreta melhoria na distribuição espacial e na quantidade de precipitação, porém o erro sistemático do modelo na simulação do ciclo diurno da precipitação continuou, isto é, a tendência da maioria dos modelos, incluindo o MCGA do CPTEC, de colocar os máximos de precipitação no período diurno na Amazônia. Os resultados encontrados sugerem que o MCGA com o esquema RAS modificado pode contribuir para melhoria da previsão, diminuindo, por exemplo, o erro sistemático de superestimativa de chuvas no nordeste brasileiro. Entretanto, os erros sistemáticos associados ao ciclo diurno da precipitação necessitam de investigação mais profunda, possivelmente através de esquemas de convecção mais sofisticados e novas parametrizações da camada limite.

**Palavras-chave:** região Amazônica, convecção, precipitação, parametrização RAS, Modelo de Circulação Geral.

**ABSTRACT:** EVALUATION OF THE RAS AND KUO CONVECTIVE PARAMETERIZATION USING THE CPTEC AGCM DURING WetAMC/LBA CAMPAIGN.

Numeric simulations were performed with CPTEC atmospheric general circulation model (AGCM) using Kuo and Relaxed Arakawa-Schubert (RAS) convective parameterizations in order to stabilize the precipitation for comparing with the observations from WetAMC/LBA Campaign (10Jan1999 to 28Feb1999) and investigating why the AGCM underestimates the precipitation values at the Amazonian basin and dislocates the maximum of precipitation for the Northeastern Brazil (NEB). The RAS scheme was modified changing the way of calculate the cloud bottom and top and changed the cloud efficiency profile. Improvements on the horizontal distribution and intensity can be noted at the daily precipitation simulations, however the systematic model error in the precipitation diurnal cycle simulation remains. The results suggest that modified RAS contributes to improve the forecasts, but the precipitation diurnal cycle simulation needs more investigation, possibly through implementation of more sophisticated convection schemes and new boundary layer parameterizations.

**Keywords:** Amazon region, free convection, precipitation, RAS parameterization, Atmospheric General Circulation Models.

## 1. INTRODUÇÃO

A região Amazônica é caracterizada por forte atividade convectiva. Essa convecção afeta toda a profundidade da troposfera e serve para unir a camada limite com o restante da atmosfera. Já o estado termodinâmico e dinâmico da circulação de grande escala é vital para o crescimento, desenvolvimento e manutenção dessa convecção. De modo geral, os modelos numéricos apresentam dificuldade em prever adequadamente a precipitação que ocorre na Amazônia, em parte, devido aos esquemas de parametrização de convecção profunda empregados.

Uma parametrização adequada da convecção cúmulos para os Trópicos é de importância primária para os modelos de previsão numérica de tempo. Moorthi e Suarez (1992) desenvolveram um esquema que utiliza a teoria do “quase-equilíbrio” de Arakawa e Schubert (1974), entretanto é mais simples do que aquela implementada por Lord et al. (1982), chamado de “Relaxed Arakawa-Schubert” (RAS) pelos autores. O quase-equilíbrio assume que o conjunto de nuvens cúmulos responde suficientemente rápido aos efeitos desestabilizantes do escoamento de grande escala mantendo o equilíbrio. As duas principais simplificações do RAS em relação à formulação original do esquema de Arakawa-Schubert (1974) são: a) modificação na razão de entranhamento, ou seja, o fluxo de massa normalizado na base da nuvem, que é uma função exponencial da altura no original, é substituído por uma função linear com a altura; b) a parametrização “relaxa” a atmosfera de grande escala em direção ao “quase-equilíbrio”, ao invés de assumir as interações instantâneas da versão original.

O modelo de circulação geral da atmosfera do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (MCGA-CPTEC) possui implementado dois esquemas de parametrização de convecção profunda. O esquema utilizado operacionalmente, que é baseado nos trabalhos de Kuo (1965, 1974) e Anthes (1977), e o esquema RAS. Estes dois esquemas diferem quanto à forma de fazer o ajuste convectivo. O esquema Kuo-Anthes considera a presença de um único tipo de nuvem para cada ponto de grade do modelo e utiliza, como mecanismo principal para disparar a convecção, a convergência de umidade. Por outro lado, o esquema RAS considera um conjunto de nuvens, e o cálculo das propriedades das nuvens é baseado na energia potencial disponível da coluna.

DeWitt (1996) em seu estudo sobre o efeito da parametrização de convecção cúmulos no MCG do Center of Ocean, Land and Atmosphere Studies (COLA), testou três diferentes esquemas de convecção: Kuo-Anthes, Betts-Miller (Betts e Miller, 1986) e RAS. Ele concluiu que os gradientes de precipitação e o cisalhamento do vento zonal são melhores simulados pelo RAS em comparação as simulações utilizando os outros dois

esquemas, principalmente em junho/julho/agosto nos trópicos, mostrando que existe uma forte correlação entre o cisalhamento do vento zonal e o gradiente leste-oeste de precipitação. Porém, tanto o esquema Kuo quanto o esquema RAS simulam áreas com pouca precipitação para a América do Sul em janeiro/fevereiro/março, além disso as áreas de máxima precipitação são deslocadas para leste. Essa situação foi confirmada por Rocha (2001), que usou o modelo CPTEC/COLA com esquema Kuo-Anthes para analisar o balanço de umidade sobre a Amazônia, ou seja, áreas com precipitações mais intensas foram deslocadas para leste (Maranhão) e valores pluviométricos inferiores aos observados foram simulados no centro da bacia Amazônica.

Entretanto, apesar da dificuldade em se isolar os erros causados pela parametrização de cumulus dos erros de outras parametrizações, devido ao alto grau de complexidade dos modelos numéricos, é possível que alguns ajustes nos esquemas de convecção possam contribuir para melhorar o desempenho dos modelos. Desta forma, procurou-se neste trabalho avaliar o desempenho do MCGA-CPTEC com os esquemas Kuo e RAS (original) e propor alguns ajustes no esquema RAS para tentar reduzir o erro sistemático de simular o centro da Amazônia com pouca chuva e partes do nordeste brasileiro (NEB) com núcleos muito fortes de chuva, durante o verão.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Modelo de Circulação Geral da Atmosfera do CPTEC

O modelo de circulação geral da atmosfera (MCGA) em uso no CPTEC foi originalmente desenvolvido pelo National Meteorological Center (NMC) e posteriormente modificado pelo Center for Ocean, Land and Atmosphere Studies (COLA). A versão do COLA foi adaptada para as necessidades operacionais do CPTEC e hoje é utilizada tanto para previsão de tempo operacional quanto para previsão climática sazonal.

A resolução do modelo usada neste trabalho foi T62L28, ou seja, modelo espectral com truncamento triangular na onda zonal de número 62 e 28 níveis na vertical (Bonatti, 1996), o que equivale a uma resolução horizontal de aproximadamente 200 X 200 km próximo ao equador ou aproximadamente 1.9° de latitude por 1.9° de longitude.

### 2.2. Esquema de convecção Kuo

Neste esquema os processos convectivos são resolvidos segundo a metodologia desenvolvida por Kuo (1965), e modificado por Anthes (1977). Uma atmosfera condicionalmente instável e uma fonte de umidade positiva devido à soma da convergência de umidade e evaporação dentro da coluna são as condições necessárias para ocorrência da convecção profunda.

Nas colunas para a qual a convecção profunda é diagnosticada, parte do excesso de umidade é utilizado para aquecer o ambiente (produzindo chuva) e parte é utilizada para umedecer o ambiente.

A temperatura e a umidade específica da nuvem são determinadas pelo levantamento da parcela de ar, a partir da camada mais baixa do modelo, pela adiabática seca até o nível de condensação por levantamento (base da nuvem), e então pela adiabática úmida até o nível onde a temperatura da nuvem é igual à temperatura do ambiente (topo da nuvem).

### 2.3. Esquema de Convecção RAS

A implementação do RAS no modelo global do CPTEC/COLA assume que a camada sub-nuvem é composta pela média ponderada da massa dos dois níveis mais baixos do modelo (Kinter III et al., 1997). Cada vez que a convecção cúmulos é acionada, todos os níveis acima da camada sub-nuvem são verificados para obter a possibilidade de convecção. Nuvens com a mesma base, e diferentes níveis de desentranhamento (topo das nuvens), são classificadas como diferentes tipos de nuvens. No esquema RAS, a convecção cúmulos ocorre para aqueles tipos de nuvens nos quais a função trabalho da nuvem excede um valor crítico, determinado empiricamente. A função trabalho da nuvem é uma medida integrada da diferença entre a energia estática úmida na nuvem e aquela do ambiente. Para tipos de nuvem em que a função trabalho da nuvem excede a função trabalho crítica, é determinado o fluxo na base da nuvem necessário para restaurar a função trabalho da nuvem para seu valor crítico. Esse fluxo de massa é usado para resolver as equações em escala de grade, incluindo os efeitos da convecção na temperatura e na umidade específica. Na implementação do RAS no modelo, a precipitação convectiva torna a reevaporar dentro do ambiente, segundo uma versão modificada de Sud e Molod (1988).

### 2.4. Condições Iniciais

As condições iniciais utilizadas para produzir as simulações numéricas foram as análises diárias do National Center for Environmental Prediction (NCEP) que estão disponíveis no acervo de condições iniciais espectrais do CPTEC.

### 2.5. Dados Observacionais

Para avaliação das simulações do MCGA-CPTEC são utilizados os dados de precipitação obtidos durante a campanha do Wet Season Atmospheric Mesoscale Campaign do Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia (Wet-AMC/LBA), realizada no período de 10 de janeiro a 28 de fevereiro de 1999 no Estado de Rondônia. As medidas de preci-

pituação foram realizadas em 4 redes de estações pluviométricas, assim localizadas: Aeroporto de Ji-Paraná com 13 pluviômetros; EMATER com 13 pluviômetros; Fazenda Triângulo com 5 pluviômetros e Fazenda São José com 5 pluviômetros. Além das redes citadas, pluviômetros foram instalados na Fazenda Nossa Senhora e na Fazenda Rancho Grande. As localizações desses pontos são mostradas na Figura 1. A estimativa da precipitação média para a região do experimento, utilizada na pesquisa, é a média entre as redes coletoras e a estação da Fazenda Nossa Senhora. Primeiro foi calculada a média entre os diversos pluviômetros para cada rede, e posteriormente a média entre a Fazenda Nossa Senhora e as redes coletoras.

Também foram utilizados os dados de precipitação acumulada em 24 horas, as 12:00 UTC, sobre o Brasil, obtidos da rede de estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), disponíveis no CPTEC. Estes dados, originalmente localizados nos pontos das estações, foram interpolados para uma grade similar à do modelo.

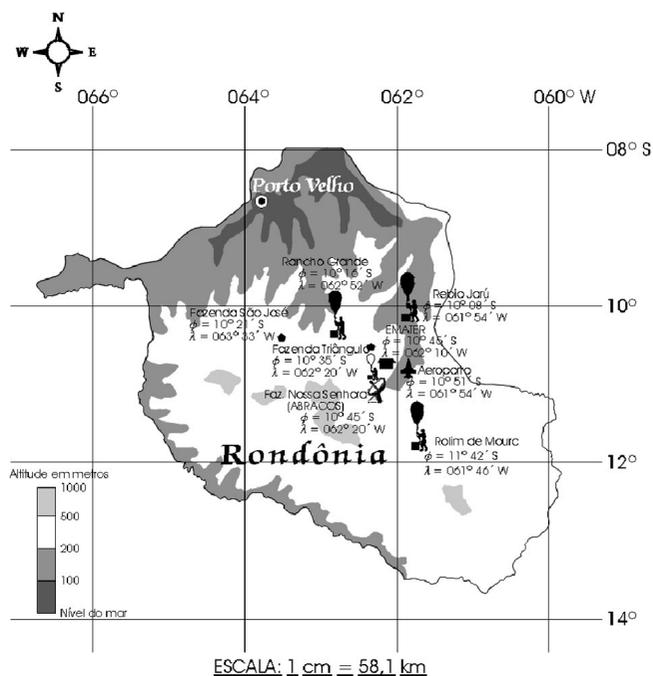


Figura 1 – Localização dos sites de observação de radiossondagem e precipitação durante a campanha do Wet -AMC/LBA.

### 2.6. Caracterização dos períodos de estudo

Segundo Rickenbach et al. (2002), o experimento (Wet-AMC/LBA) pode ser dividido em períodos caracterizados pelo regime de vento zonal na baixa troposfera, conforme a Tabela 1. Desta forma, foram definidos seis regimes, sendo três denominados de regimes de oeste (W1, W2 e W3, associados à presença de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) bem formada) e três de regime de leste (E1, E2 e E3, períodos sem 'ZCAS').

**Tabela 1** – Período do regime de Vento Zonal.

Regime (E= de leste; W= de oeste)	Período
E1- período ‘sem ZCAS’	11 de janeiro 00Z–14 de janeiro 00Z
W1- período de ‘ZCAS’	14 de janeiro 00 Z–19 de janeiro 00 Z
E2- período ‘sem ZCAS’	19 de janeiro 00Z–29 de janeiro 00 Z
W2- período de ‘ZCAS’	29 de janeiro 00Z–08 de fevereiro 00Z
E3- período ‘sem ZCAS’	08 de fevereiro 00Z–22 de fevereiro 00Z
W3- período de ‘ZCAS’	22 de fevereiro 00Z–01 de março 00Z

FONTE: Adaptada de Rickenbach et al. (2001).

Os períodos escolhidos para serem avaliados entre os seis regimes, foram:

- i. Regime E2. Rutledge et al. (2000) descreveram este regime, como regime de “quebra”. Neste regime, a convecção se desenvolveu numa atmosfera mais seca do que aquelas do regime de oeste, com desenvolvimento vertical acentuado e alta eletrificação. Essa atividade convectiva coincidiu com escoamento de leste nos baixos níveis e a passagem de uma linha de instabilidade sobre a região. No dia 26/01 ocorreu uma forte precipitação na região do experimento, no sítio Fazenda Nossa Senhora a precipitação foi de 66,5 mm em apenas 3 horas (Tota et al., 2001);
- ii. Regime W3. Este regime foi denominado de “regime de monção” por Rutledge et al. (2000). A característica do período foi de escoamento de superfície de oeste e noroeste, com a troposfera relativamente úmida, com fraco desenvolvimento vertical, fraca eletrificação e presença de ZCAS no Brasil. Forte precipitação ocorreu na região do experimento, no dia 25/02, chovendo cerca de 112,5 mm em Ouro Preto d’Oeste durante 7 horas.

## 2.7. Simulações Numéricas

Como simulações numéricas, são utilizadas as previsões do MCGA-CPTEC iniciadas a partir das análises do NCEP, com

as parametrizações de convecção profunda Kuo-Anthes (controle), RAS original e RAS modificada. As integrações foram realizadas para os períodos definidos no subitem 2.6).

As simulações foram realizadas no modo previsão de tempo, com saídas a cada 6 e 3 horas. As saídas a cada 6 horas foram obtidas para as simulações de curto prazo (24, 48 e 72 horas) válidas para cada dia da precipitação observada, por exemplo, as simulações para 24, 48 e 72 horas da precipitação do dia 23 foram feitas utilizando as condições de contorno e iniciais do dia 20 (simulação para 72 horas), 21 (simulação para 48 horas) e 22 (simulação para 24 horas). Cada período (E2 e W3) foi subdividido com simulações para 3 dias, com início e fim às 12:00 UTC, para os esquemas de convecção Kuo e RAS original. Já as saídas a cada 3 horas foram para simulações estendidas (6 dias), iniciando e finalizando às 00:00 UTC para os esquemas RAS original e modificado. A finalidade destas simulações estendidas, com frequência maior de “saídas” do modelo, é avaliar qualitativamente os erros do modelo, em relação à previsão do ciclo diurno da precipitação. A Tabela 2 mostra os experimentos numéricos realizados neste estudo.

Os resultados destas simulações são comparados com os dados observacionais de precipitação descritos no subitem 2.5.

**Tabela 2** – Experimentos Numéricos Realizados.

Período analisado	Parametrização Utilizada no Experimento	Simulação	Saída
E2 – sem ZCAS 23 a 29/01/1999	Kuo-Anthes RAS	24-48-72 horas	6 em 6 horas
W3 – com ZCAS 22 a 28/02/1999	Kuo-Anthes RAS	24-48-72 horas	6 em 6 horas
E2 – sem ZCAS 23 a 29 de janeiro	Kuo-Anthes RAS RAS_base RAS_Perfil	6 dias	3 em 3 horas
W3 com ZCAS 22 a 28 de fevereiro	Kuo-Anthes RAS RAS_base RAS_Perfil	6 dias	3 em 3 horas

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Comparação dos esquemas de convecção Kuo e RAS

##### 3.1.1. Simulações para 24, 48 e 72 horas - período E2.

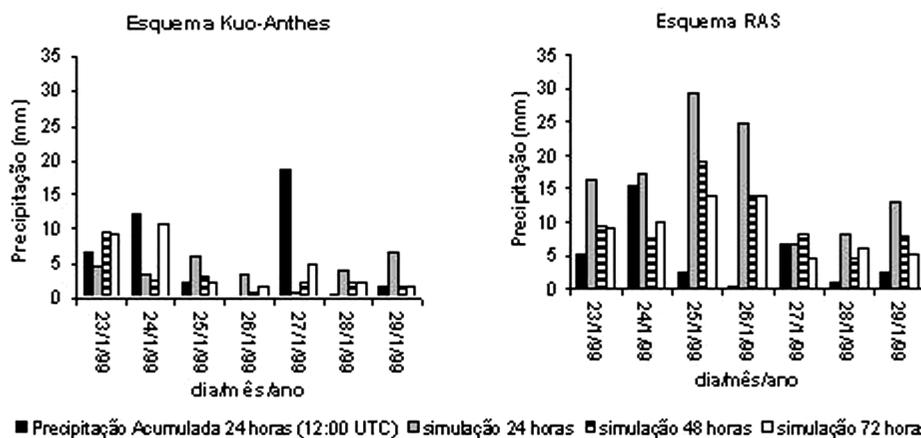
As precipitações observada e previstas pelo modelo, com os esquemas Kuo-Anthes e RAS, média na região e acumulada em 24 horas (12:00 UTC), para o período E2 são apresentadas na Figura 2. Os valores médios das precipitações simuladas são obtidos como a média entre os pontos de grade mais próximos da região do experimento, ou seja, entre 61° e 63° W e 10° e 12° S. Observa-se que o esquema de controle simula precipitação de pouca intensidade (< 7mm) para 24, e inferior a 10 mm para 48 e 72 horas na região de Rondônia. A precipitação de maior intensidade durante o E2, ocorrida no dia 27, não foi prevista pelo modelo. Simulações de precipitação intensa são obtidas para os dias em que os dados observados indicam precipitações fracas.

Utilizando o modelo com o esquema RAS para o mesmo período, observa-se que os valores das precipitações previstas são maiores do que os simulados pelo esquema controle para a região de Rondônia. Alguns casos de forte precipitação foram previstos nas simulações de 24, 48 e 72 horas (Fig. 2), porém é previsto forte precipitação para o dia 26/01, quando a chuva foi fraca. Embora a previsão para o dia 27/01 seja maior que a prevista com o esquema Kuo-Anthes, a intensidade da precipitação ainda fica abaixo do observado nas três simulações, 24, 48 e 72 horas. É interessante ressaltar que a precipitação intensa observada, nesse período, ocorreu no dia 26/01, entre 16 e 19 horas local (HL) (20 e 23 horas UTC), mas como a precipitação é acumulada às 12 UTC, o máximo de precipitação aparece no dia 27.

A Figura 3 mostra as saídas do modelo para previsão de 24 horas com esquema Kuo-Anthes e com o esquema RAS para os dias 25, 26, 27 e 28 de janeiro às 12:00 UTC e a precipitação

observada em 24 horas no mesmo horário. Nota-se que o modelo controle (com esquema Kuo-Anthes) prevê centros de máxima precipitação no NEB, secando o centro da Amazônia em dias de chuva nesta região. Estas características que podem ser observadas, por exemplo, no dia 25/01, quando o centro da Amazônia está seco e o NEB tem núcleos de precipitação. Um outro dia interessante a ser observado é o dia 26/01, o núcleo de máxima precipitação observada está a noroeste do estado do Amazonas, enquanto o modelo prevê um núcleo de máxima precipitação entre os Estados do Maranhão e Piauí. Quando são analisadas as saídas do modelo com a parametrização RAS, verifica-se que, apesar de simular núcleos de precipitação mais intensos para a Amazônia, persiste o erro sistemático do modelo de colocar áreas de máxima precipitação no NEB, como no dia 28/01 em que aparece um núcleo de forte precipitação entre os Estados do Maranhão, Piauí e Tocantins, deixando de simular o núcleo de máxima precipitação, no estado de Rondônia.

A maior parte das precipitações durante o E2 ocorreram entre 14 e 18 HL (18:00 e 00:00 UTC), como descrito por Tota et al. (2001), e foram caracterizadas como quase puramente convectivas, indicando que a forçante termodinâmica foi mais importante do que a forçante dinâmica. Essa situação gera nuvens de grande desenvolvimento vertical, com eletrificação, chuva de poucas horas, ocorrendo à tarde ou início da noite, como descrito por Rutledge et al. (2000). Isto pode explicar a falta de sensibilidade do modelo com o esquema Kuo-Anthes em prever as precipitações, pois o esquema usa a convergência de umidade para disparar a convecção, que depende de valores elevados da advecção de grande escala. Por outro lado, o modelo com o esquema RAS se mostrou mais sensível para essa situação, pois considera a energia potencial disponível para convecção (CAPE) para calcular as propriedades da nuvem e disparar a convecção, isto é, a forçante termodinâmica deve ser ativa.



**Figura 2** - Variação diária da precipitação observada média das estações, e previsões feitas pelo Modelo para 24, 48 e 72 horas usando os esquemas Kuo Anthes (esquerda) e RAS (direita), para o período E2-sem ZCAS .

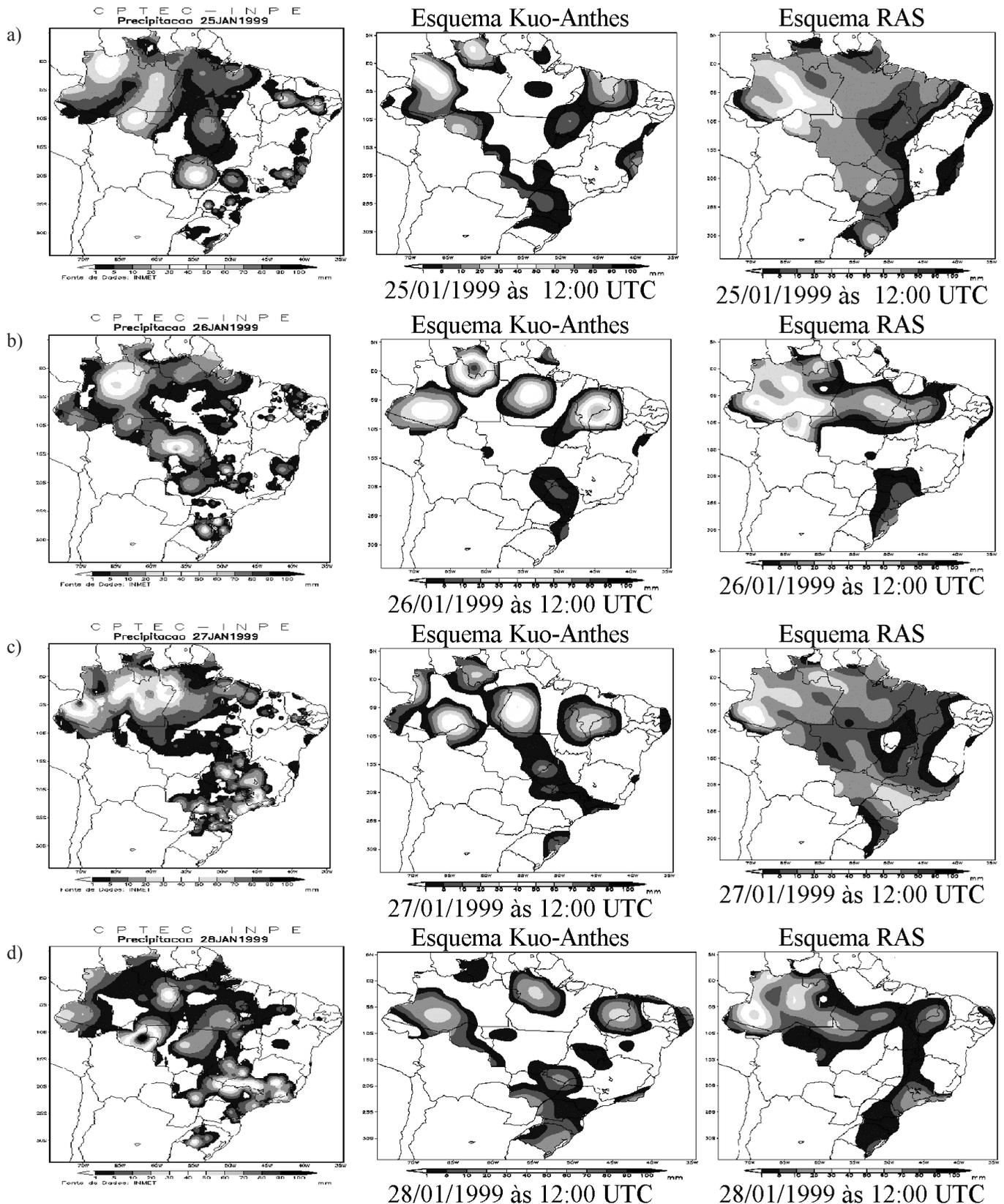


Figura 3 – Precipitação acumulada em 24 horas (12:00 UTC) para dados observados (coluna da esquerda) e previsões para 24 horas usando os esquemas Kuo-Anthes (coluna do meio) e RAS (coluna da direita); (a) dia 25/01, (b) dia 26/01; (c) dia 27/01 e (d) dia 28/01.

**3.1.2- Simulações para 24, 48 e 72 horas - período W3.**

Para o período W3, as previsões de 24 horas do modelo com esquema Kuo-Anthes são melhores do aquelas no período E2. As intensidades são maiores, com valores entre 5 e 10 mm para 24 horas, entre 2 e 9 mm para 48 horas e entre 6 e 16 mm para 72 horas. Desta forma, em alguns dias, nota-se que o modelo apresenta bom desempenho em prever a intensidade da chuva. Entretanto, o modelo não consegue simular a intensidade da forte precipitação que ocorreu no dia 26/02, embora tenha previsto a ocorrência de chuva para este dia, simula cerca de 3 mm, enquanto foi observado 30 mm (Figura 4).

O modelo com esquema RAS tende a simular uma maior quantidade de chuva para região do que com esquema Kuo-Anthes, tanto na previsão de 24 horas quanto na de 48 e 72 horas, similar ao que ocorreu no período E2. Todavia, apresenta superestimativas para os eventos com pouca precipitação (dia 23/02 e 25/02), quando as simulações de 24 horas indicam valores quase 20 vezes maiores do os valores observados. A forte precipitação do dia 26/02 é simulada pelo modelo com o esquema RAS para a previsão de 24 horas. Para as simulações de 48 e 72 horas os valores são menores, tornando essas simulações melhores para eventos de menor intensidade (Figura 4).

O erro sistemático de “secar” a Amazônia e superestimar a precipitação (máximos de precipitação) para o NEB, como no período E2, permanece neste período (W3), nas simulações feitas pelo modelo com o esquema controle. Por exemplo, dia 25/02 não é prevista precipitação para o centro da Amazônia, mas um núcleo de forte precipitação no oeste do Pará e no Amazonas pode ser observado na Fig. 5. A presença da ZCAS influenciou as precipitações que ocorreram no norte do país, gerando eventos de chuva à noite e madrugada na região. Essa situação favorece a correta simulação do modelo com o esquema Kuo-Anthes em prever os casos de precipitação, já que a advecção de umidade da grande escala acentua a convergência de umidade desencadeando os processos de precipitação.

O modelo com o esquema RAS apresenta um melhor desempenho na simulação de chuva na região Amazônica uma vez que o centro da Amazônia não está “seco”, contudo os núcleos de forte precipitação para o NEB continuam, como o caso do dia 27, que apresenta um núcleo forte entre os Estados do Maranhão, Piauí e Norte da Bahia, sendo que a precipitação observada nessa região foi leve (1-5 mm). Na simulação com o esquema Kuo-Anthes este núcleo de máxima precipitação está localizado entre os Estados do Maranhão e Piauí, e da mesma forma, a precipitação observada foi leve (Figura 5).

É provável que as diferenças entre as previsões usando o modelo com o esquema Kuo-Anthes e o esquema RAS esteja relacionada à questão das forçantes termodinâmica e dinâmica. O RAS usa a CAPE para disparar a convecção. Arakawa e Schubert (1974) notaram que os processos energéticos que agem mais rapidamente em nuvens convectivas são a conversão da energia potencial disponível em energia cinética e a dissipação da energia cinética. A CAPE, por outro lado, é maior durante o dia e menor ou inexistente durante a noite. Ou seja, as nuvens tipicamente se desenvolvem e decaem em escala de tempo de algumas horas, e as previsões dos maiores valores de precipitação devem ser para os horários da tarde e início da noite, em que a CAPE é sempre maior. Contudo, apesar da forçante termodinâmica apresentar-se significativa, pois a CAPE nesse período foi em média de 1600 J/kg (Mota, 2004), fica evidente que a forçante dinâmica está atuando devido à presença da ZCAS, gerando nuvens de pouco desenvolvimento vertical, mas com chuvas abundantes, pois o desenvolvimento começa convectivo pelo aquecimento diabático e gradualmente se torna estratiforme. A chuva dura mais tempo e pode se formar a qualquer hora do dia, podendo inclusive ocorrer em horários de pouco aquecimento diabático. Essa situação foi observada durante o W3, e a forte precipitação do dia 25/02 teve duração de aproximadamente 7 horas com ocorrência de 112,5 mm em Ouro Preto d’Oeste (Tota et al., 2001).

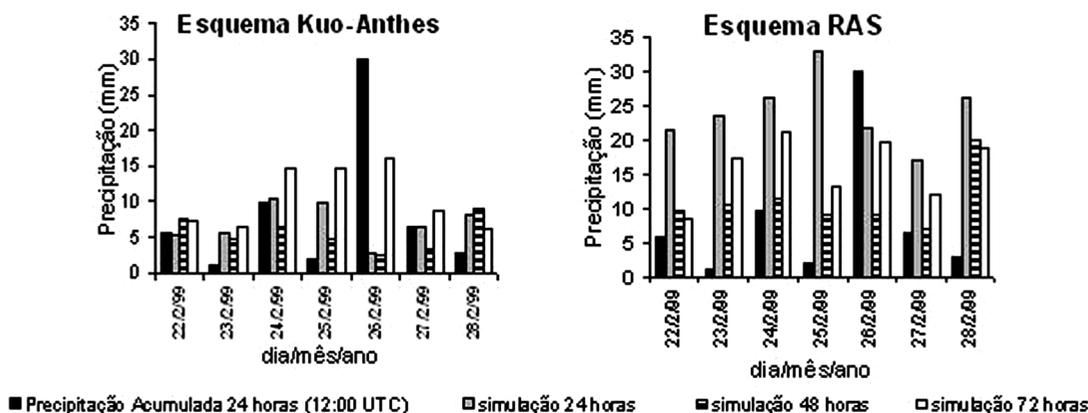
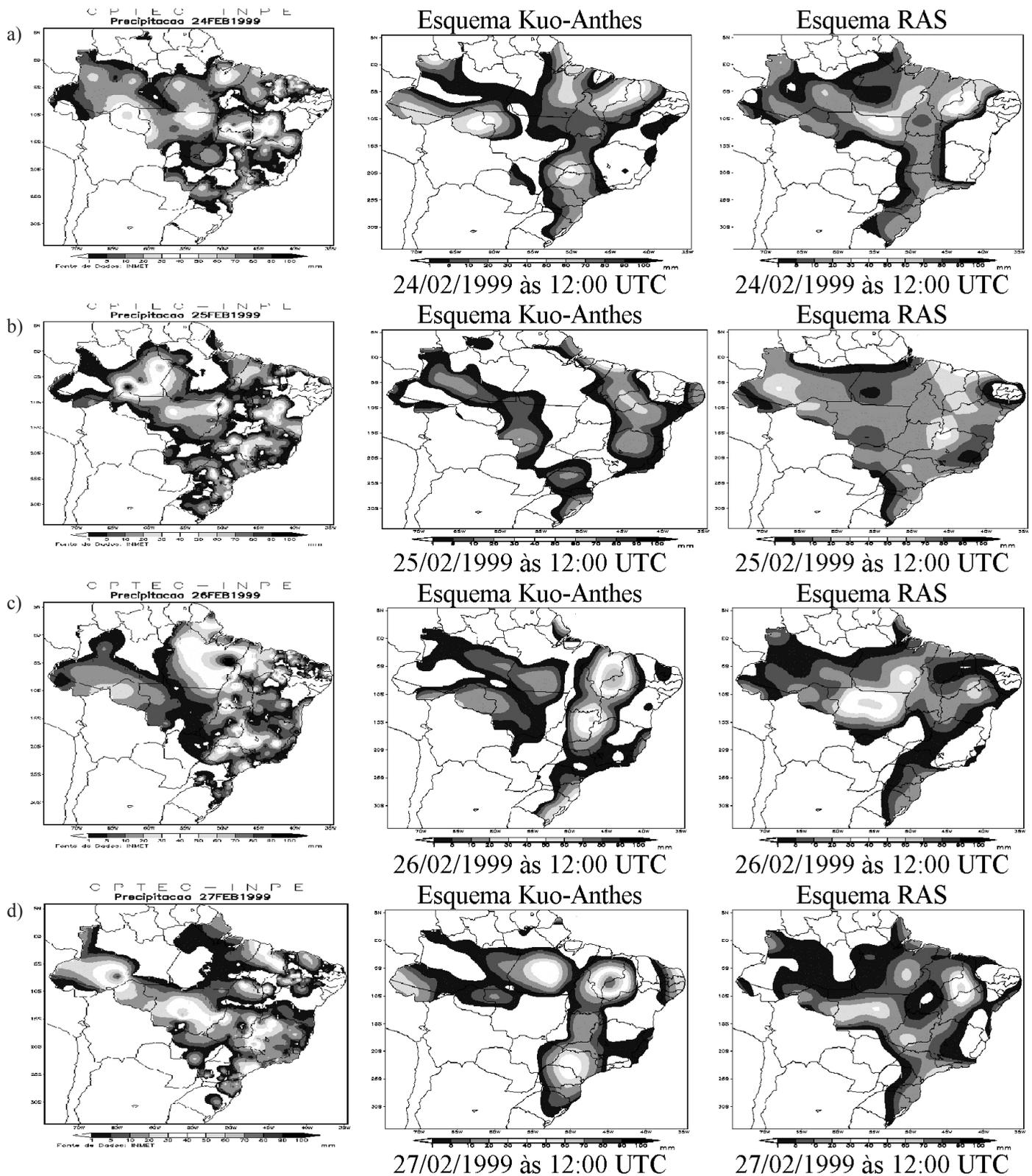


Figura 4 – Variação diária da precipitação observada, média das estações, e previsões feita pelo Modelo para 24, 48 e 72 horas pelo Modelo usando os esquemas Kuo-Anthes (direita) e RAS (esquerda), período W3.



**Figura 5** – Precipitação acumulada em 24 horas (12:00 UTC) para dados observados (coluna da esquerda) e previsões para 24 horas usando os esquemas Kuo-Anthes (coluna do meio) e RAS (coluna da direita); (a) dia 24/02, (b) dia 25/02; (c) dia 26/02 e (d) dia 27/02.

### 3.2. Simulação com a Parametrização RAS Modificada

Os resultados obtidos nos experimentos do item 3.1 mostram que os esquemas de convecção Kuo e RAS original apresentaram deficiência quanto à previsão da precipitação na região tropical, e em particular na região de Rondônia. Embora a convecção cúmulos ocorra em uma escala de grade menor que as típicas resoluções espaciais utilizadas em modelos globais de previsão de tempo, isto é, em escalas de sub-grade, a circulação de grande escala pode depender fortemente dos efeitos coletivos da convecção cúmulos. Convecção cúmulos muito forte afeta a profundidade inteira da troposfera e serve para unir a camada limite com o resto da atmosfera. Já o estado termodinâmico e dinâmico da circulação de grande escala é vital para o crescimento, desenvolvimento e manutenção dessa convecção. Dessa forma, a modelagem da convecção para escala sub-grade do modelo torna-se importante para entender como as nuvens convectivas afetam coletivamente a estrutura cinética e termodinâmica da atmosfera e como elas respondem quando são afetadas pela circulação da escala maior. Uma parametrização adequada da convecção profunda é de importância primária para os modelos de previsão numérica de tempo nos trópicos, de forma a descrever essa interação. Com o intuito de tentar melhorar o desempenho do modelo, as seguintes modificações no esquema RAS foram testadas: (a) mudança na base e topo das nuvens e (b) inclusão de um novo perfil vertical da eficiência das nuvens, considerando a mudança (a). O esquema Kuo é relativamente simples e permite poucos ajustes na sua formulação, por isso ele não será modificado.

O esquema RAS implementado no MCGA-CPTEC considera uma única base para todas as nuvens do modelo. Além disso, a eficiência das nuvens baixas tem um valor percentual alto (0,8). Esses fatores foram considerados passíveis de modificações que podem interferir na qualidade das previsões. Se todas as nuvens têm a mesma base, nuvens rasas terão possibilidade de ocorrência de precipitação. Com a eficiência alta, nuvens convectivas de bom tempo, como as que ocorrem no NEB, com quantidade significativa de água precipitável, podem resultar em forte precipitação, ou seja, precipitação de nuvens baixas ainda na parte da manhã (12:00 UTC) sobre a Amazônia e muita chuva no NEB. Desse modo, o esquema RAS foi modificado para variar a base das nuvens ao invés de mantê-las fixas no terceiro nível sigma do modelo, daqui por diante denominado RAS\_base. A mudança na eficiência da nuvem, que é definida como a razão entre a água precipitável e a água condensada nas correntes ascendentes como função de  $C_0$  (coeficiente de auto conversão), foi modificada segundo o trabalho de Silva Dias (1977), como mostrado na Fig. 6, chamado de RAS\_perfil. Na Fig. 6 o tipo de nuvem é indicado pela

pressão no topo da nuvem (eixo das abscissas) e a eficiência é apresentada em percentual (eixo das ordenadas). Pode-se notar que a eficiência das nuvens baixas e médias (topo abaixo de 500 hPa) foi bastante reduzido.

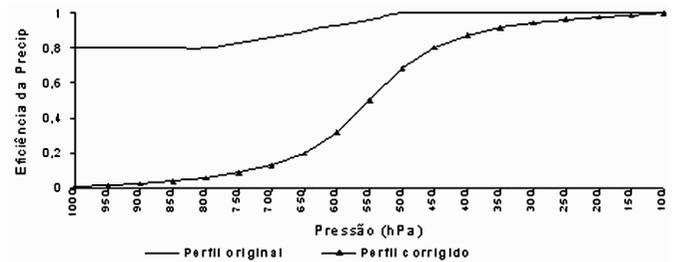


Figura 6 – Eficiência da precipitação como função do tipo de nuvem.

#### 3.2.1. Simulação para o período E2

Na Fig. 7 são apresentados os resultados das simulações com as modificações no esquema de parametrização, para o período E2. No primeiro caso, mudando a base das nuvens, RAS\_base, ocorreu diminuição da quantidade de precipitação prevista para região, apresentando uma pequena melhoria na simulação dos horários de ocorrência de precipitação. Quando é adicionada a mudança do perfil, RAS\_perfil, a eficiência do modelo melhora pouco, pois a diferença entre RAS\_base e RAS\_perfil é pequena, aparecendo somente a partir do dia 25/01, já que nos dois primeiros dias as curvas se apresentam muito próximas. O ciclo diurno da precipitação não é bem simulado pelo modelo e a maior quantidade de precipitação sempre é prevista para o horário das 15:00 UTC (11:00 HL), com quase 3 horas de antecedência em relação ao horário de ocorrência da precipitação observada. Estas simulações parecem repetir os erros sistemáticos das simulações com o esquema RAS original, já que este período foi assinalado com fortes precipitações no horário da tarde e início da noite, entre 14:00 e 20:00 HL (18:00 e 00:00 UTC).

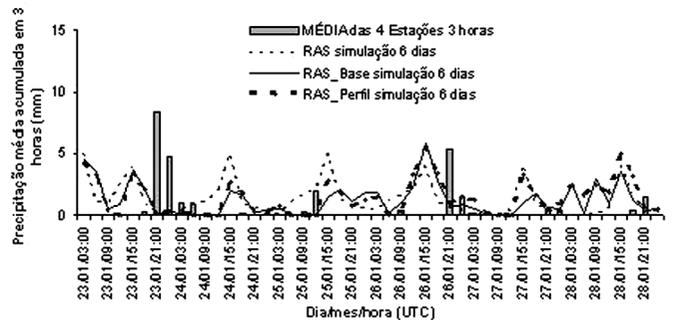


Figura 7 – Variação temporal da precipitação observada média das estações de observação dos experimentos, e previsão para 156 horas a partir de 23/01 as 00:00 UTC feita pelo modelo usando o esquema RAS\_base e RAS\_perfil, saída a cada 3 horas, para o período E.2-sem ZCAS.

A Fig. 8 apresenta as precipitações acumulada em 24 horas (12:00 UTC), observada e as simuladas pelo modelo (24, 48 e 72 horas), com os esquemas RAS\_base e RAS\_perfil, média na região de Rondônia para o período E2. Nota-se que nestas simulações houve uma redução nos valores da precipitação, mostrando uma melhoria significativa na simulação da precipitação para 24, 48 e 72 horas em relação às simulações do modelo com o esquema RAS original.

Um melhor desempenho do modelo com os esquemas RAS\_base e RAS\_perfil é observado para a região Amazônica e NEB. Na Amazônia verifica-se simulação de núcleos de precipitação mais intensos para a região, não ocorrendo casos do centro da Amazônia ficar “seco”. Os núcleos de precipitação intensa não foram deslocados, porém a previsão de chuvas na região entre os estados do Maranhão e Piauí continuou (quando não ocorreu), embora em menor intensidade do que aquelas das simulações controle e com o esquema RAS original (Fig. 9).

### 3.2.2. Simulação para o período W3

Na análise do período W3, a simulação da quantidade de precipitação é maior em quase todos os horários do período com relação ao RAS original (Fig. 10). O RAS\_perfil apresenta maior magnitude de precipitação do que o RAS\_base em alguns horários, porém as diferenças entre as simulações com os dois perfis são pequenas. Desde que ocorreu precipitação à noite e na

madrugada devido ao regime de oeste com a presença de ZCAS, o modelo modificado simula alguns eventos de precipitação, porém com subestimativa da magnitude, na maioria dos casos. A característica do erro sistemático, em colocar os maiores valores de chuva às 15:00 UTC permanece.

Para o período de regime W3, as simulações para 24, 48 e 72 horas do modelo com os esquemas RAS\_base e RAS\_perfil, são apresentados na Fig. 11. Da mesma forma que no período E2, há uma melhoria significativa na previsão da precipitação para 24, 48 e 72 horas em relação a simulação do modelo com o RAS original. Além dos valores nesta simulação serem menores do que os simulados com o esquema RAS original, verifica-se uma boa performance do modelo para a previsão de 24 horas, válida para o dia 26/02, quando foi observado forte precipitação.

Na questão do erro sistemático do modelo com esquema RAS\_base e RAS\_perfil na simulação da precipitação sobre a região Amazônica e NEB, em comparação com o modelo com o esquema RAS original, observa-se que, nesse período, houve uma diminuição da precipitação na Amazônia e núcleos fortes aparecem no Centro-Oeste do Brasil (Fig. 12). Além disso, não há redução da superestimativa de precipitação no NEB. Isso leva a questionar a eficiência do esquema para a situação de regime de ventos de oeste, pois no regime de vento de leste (E2) as simulações foram melhores que nesse período.

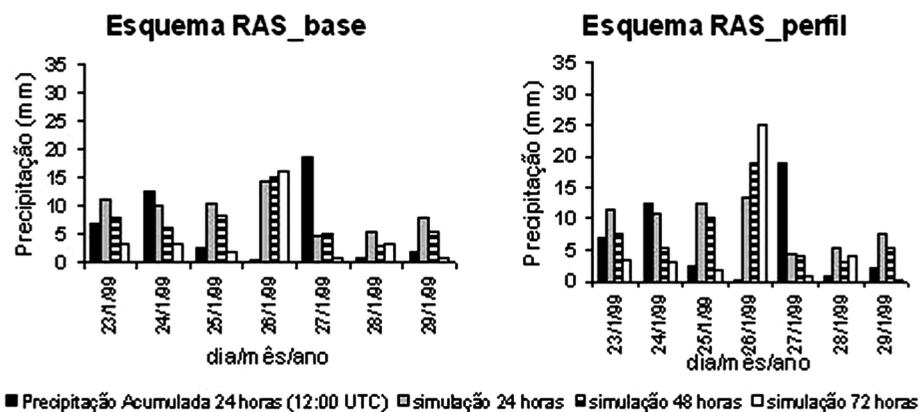
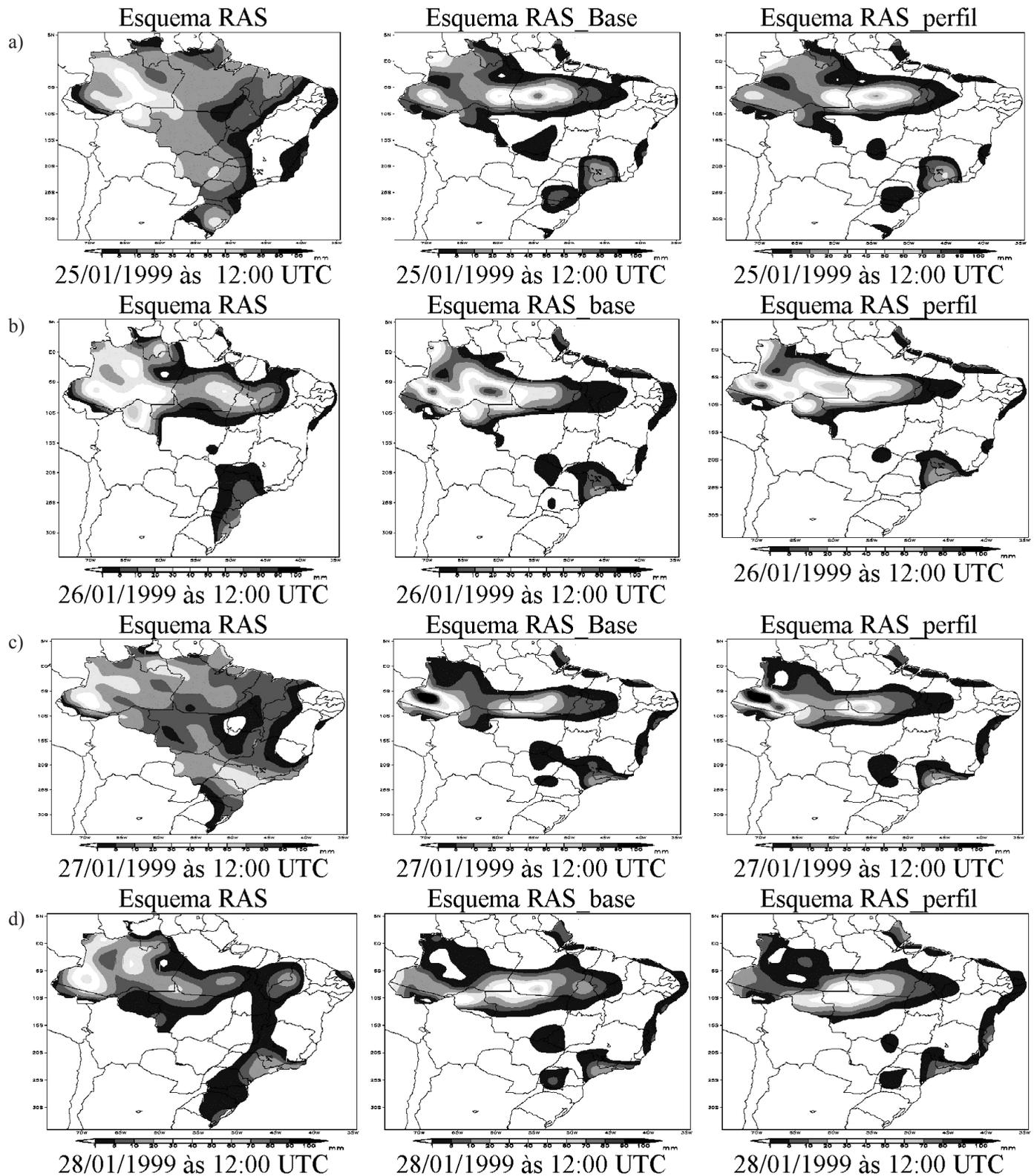
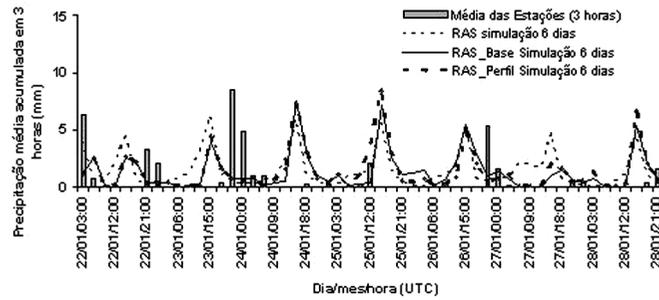


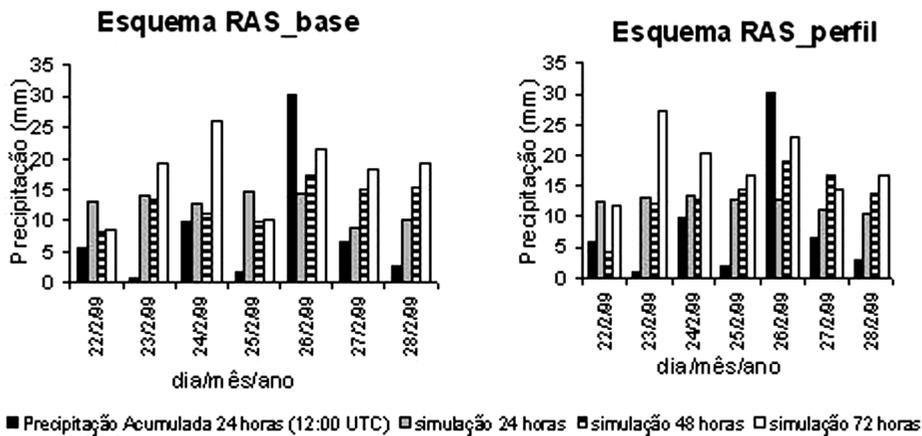
Figura 8 – Variação diária da precipitação observada média das estações, e previsões feitas pelo Modelo para 24, 48 e 72 horas usando os esquemas RAS\_base (esquerda) e RAS\_perfil (direita), para o período E2.



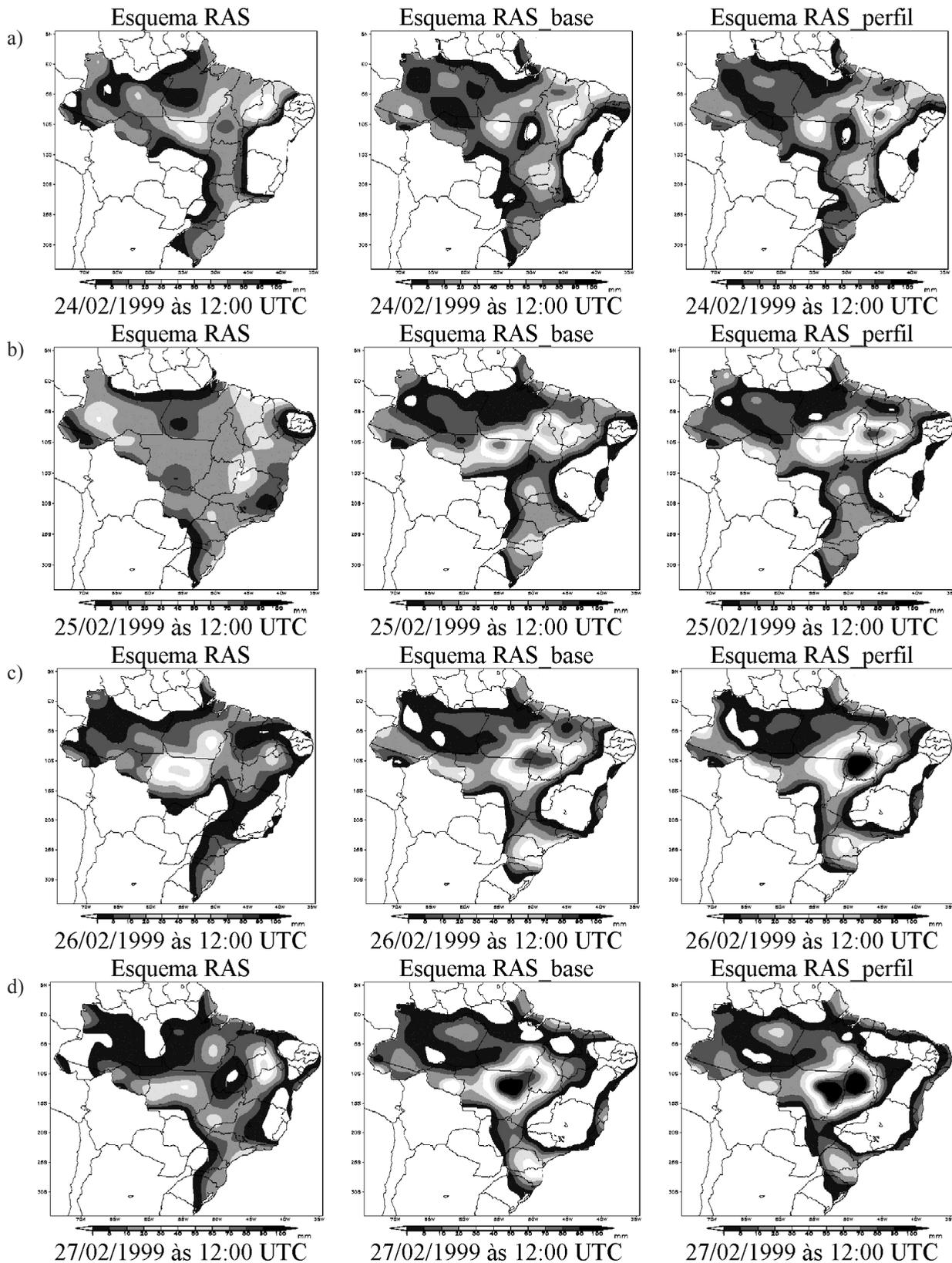
**Figura 9** – Precipitação acumulada em 24 horas (12:00 UTC) para as previsões com os esquemas RAS (coluna da esquerda) e RAS\_base (coluna do meio) e RAS\_perfil (coluna da direita); (a) dia 25/01, (b) dia 26/01, (c) dia 27/01 e (d) dia 28/01.



**Figura 10** – Variação temporal da precipitação observada média das estações, e previsão para 156 horas a partir de 22/02 às 00:00 UTC feita pelo modelo usando o esquema RAS\_base e RAS\_perfil, saída a cada 3 horas, para o período W3.



**Figura 11** – Variação diária da precipitação observada média das estações, e previsões feitas pelo Modelo para 24, 48 e 72 horas usando os esquemas RAS\_base (esquerda) e RAS\_perfil (direita), para o período W3.



**Figura 12** – Precipitação acumulada em 24 horas (12:00 UTC) para as previsões com os esquemas RAS (coluna da esquerda) e RAS\_base (coluna do meio) e RAS\_perfil (coluna da direita); (a) dia 24/02, (b) dia 25/02; (c) dia 26/02 e (d) dia 27/02.

#### 4. CONCLUSÃO

Os testes de sensibilidade da previsão de precipitação utilizando o MCGA-CPTEC com resolução T62L28 com esquema RAS, e com o esquema Kuo-Anthes como simulação de controle, para os regimes E2 e W3, indicaram que o erro sistemático de subestimar a precipitação para a Amazônia e superestimar a precipitação do Nordeste brasileiro persiste no modelo com o esquema RAS. Embora a simulação de ocorrência de precipitação para região Amazônica mantenha o padrão da precipitação espacial observada, a magnitude foi geralmente superestimada em todos os horários. Essa superestimativa da intensidade da precipitação pode ser uma consequência da parametrização RAS utilizada no modelo não incluir as correntes descendentes. A inclusão das correntes descendentes diminui bastante a quantidade de convecção rasa diagnosticada pelo esquema RAS. Os movimentos descendentes, induzidos pela própria convecção profunda, aquecem e secam o ambiente, o que implica na evaporação de água da chuva na troposfera ou abaixo da base da nuvem.

No intuito de melhorar o desempenho do modelo utilizando o esquema RAS, foram realizadas duas modificações no esquema. No primeiro, modificou-se a forma como a base das nuvens são calculadas, e no segundo foi incluída uma modificação no perfil vertical de eficiência da nuvem.

Os resultados das simulações do modelo com esquema RAS modificado indicaram melhorias na previsão de chuva para a região Amazônica e para o NEB, no regime de leste. Porém não houve melhorias significativas quando o regime foi de oeste. No primeiro caso, houve uma diminuição na quantidade de precipitação prevista para a região, sendo que os horários de ocorrência de precipitação foram melhores simulados, incluindo o episódio de chuva intensa.

Como na pesquisa de Grell e Dévény (2002), os resultados indicam que a parametrização RAS tem boa correlação com a atividade convectiva observada, porém as propriedades termodinâmicas das nuvens, calculadas nos modelos, não representam o decaimento dessas nuvens. Contudo, os resultados indicam que a inclusão da nova forma de calcular a base das nuvens, bem como, um perfil vertical da eficiência da nuvem modificado, podem contribuir para melhorar a previsão da precipitação pelo MCGA-CPTEC utilizando o esquema RAS.

É interessante notar que o modelo com esquema RAS ou mesmo com o RAS modificado, apesar de indicar concordância razoável na simulação da precipitação acumulada em 24 horas, na região de Rondônia, apresenta uma característica em simular muita chuva nos horários da manhã principalmente às 12:00 UTC e 15:00 UTC, horários nos quais na maior parte das vezes não ocorreu precipitação. Além disso, sistematicamente, não simula a precipitação nos horários da tarde, quando ocor-

reu a maior parte da precipitação na região de Rondônia. Para melhor simular o ciclo diurno da precipitação nesta região, talvez seja necessário implementar versões mais sofisticadas do esquema RAS, já que a versão utilizada neste trabalho é bastante simplificada. Esse tipo de erro sistemático do modelo na simulação do ciclo diurno da precipitação encontrado neste trabalho também foi observado por Betts e Jakob (2002). Eles avaliaram o ciclo diurno da precipitação da Amazônia usando igualmente os dados do WetAMC/LBA a partir das análises observacionais descritas em Betts et al. (2002) e o modelo de previsão de tempo de curto prazo do ECMWF, com truncamento triangular T319 e resolução vertical de 60 níveis, e concluíram que esse erro se deve ao fato de que a camada limite da região Amazônica tem uma evolução diurna que as parametrizações não representam satisfatoriamente, atuando negativamente no desenvolvimento das nuvens cúmulos.

#### 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anthes, R.A. A cumulus parameterization scheme utilizing a one-dimensional cloud model. **Monthly Weather Review.**, v. 105, n. 3, p. 270-286, 1977.
- Arakawa, A. e Schubert, W. H. Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large-scale environment, part I. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 31, n. 3, p.674- 701, 1974.
- Betts, A.K.; Miller, M.J. A new convective adjustment scheme. 2. Single column tests using GATE WAVE, BOMEX, ATEX and ARCTIC AIR-MASS data sets. **Quarterly Journal Royal Meteorological Society**, v 112, n. 473, p. 693-709, 1986.
- Betts, A.K.; Pittsford, V.T.; Jakob, C. Evaluation of the diurnal cycle of precipitation, surface thermodynamics and surface fluxes in the ECMWF model using LBA data. **Journal of Geophysical Research**, v.107, n. D20 (8064), LBA 12.1-12.8, 2002
- Betts, A.K.; Fuentes, J.D.; Garstang, M.; Ball, J.H. Surface diurnal cycle and boundary layer structure over Rondônia during the rain season. **Journal of Geophysical Research.**, v. 107, n. D20 (8064), LBA 32-1- 32-14, 2002.
- Bonatti, J.P. Modelo de circulação geral atmosférico do CPTEC. **Climanálise-Boletim de Monitoramento e Análise Climática**. CPTEC/INPE. Edição Especial, 1996.
- DeWitt, D. G. **The effect of the cumulus convection scheme on the climate of the COLA general circulation model**. Calverton, MD: Institute of Global Environment and Society, 27, 43 p., Center for Ocean-Land-Atmosphere Technique Report, 1996.

- Grell, G.A. e Dévény. **A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques.** *Geophysical Research Letters*, v. 29, n. 14, 38.1-38.4, 2002.
- Kinter III, J.L.; DeWitt, D.; Dirmeyer, P.A.; Fennessy, M.J.; Kirtman, B.P.; Larry, M.; Schneider, E.K.; Shukla, J.; Straus, D.M. **The COLA atmosphere-biosphere general circulation model-volume 1: formulation**, 46 p. Calverton, MD: Institute of Global Environment and Society, Inc., Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies, 1997.
- Kuo, H.L. On formation and intensification of tropical cyclones through latent heat release by cumulus convection. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 22, n. 1, p. 40-63, 1965.
- Kuo, H.L. Further studies of the parameterization of the influence of cumulus convection on large-scale flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 31, n. 5, p. 1232-1240, 1974.
- Lord, S. J.; Chao, W.C. e Arakawa, A. Interaction of cumulus clouds ensemble with the large-scale environment. part IV: discrete model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 39, n. 1, p. 104-113, 1982.
- Moorthi, S. e Suarez, M.J. Relaxed Arakawa-Schubert: a parameterization of moist convection for general circulation models. *Monthly Weather Review*, v. 120, n. 6, p. 978-1002, 1992.
- Mota, M.A.S. **Convecção na Amazônia: variabilidade, efeitos e respostas na circulação de grande escala.** São José dos Campos, 166 p. Tese (doutorado em Meteorologia), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2004.
- Rickenbach, T.A.; Ferreira, R.N.; Halverson, J.; Silva Dias, M.A.F. Modulation of convection in the southwestern Amazon basin by extratropical stationary fronts. *Journal of Geophysical Research*, v.107, n. D20 (8064), LBA 7.1-7.13, 2002
- Rocha, E.J.P. **Balanco da umidade e influência de condições de contorno superficiais sobre a precipitação da Amazônia.** São José dos Campos, 170 p. Tese (Doutorado em Meteorologia), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001.
- Rutledge, S.A.; Petersen, W.A.; Cifelli, R.C.; Carey, L.D. Early results from TRMM-LBA: Kinematic and microphysical characteristics of convection in distinct meteorological regimes. In: **Conf. On Hurricanes and Tropical Meteorology**, 24., 2000. **Proceedings...** Lauderdale, FL: AMS, 2000.
- Silva Dias, P. L. **Experiment with the Arakawa-Schubert cumulus parameterization theory.** MSc. Dissertation, Atmospheric Science Department, Pap. No. 275, Colorado State University, 132 pp., 1977.
- Sud Y. e Molod, A. The roles of dry convection, cloud radiation feedback processes, and the influence of recent improvements in the parameterization of convection in the GLA GCM. *Monthly Weather Review*, v. 116, n. 11, p. 2366-2387, 1988.
- Tota, J.; Fisch, G.; Oliveira, P.J.; Garstang, M.; Heitz, R.; Sigler, J. Análise da variabilidade diária da precipitação em área de pastagem para a época chuvosa de 1999-projeto TRMM-LBA, *Acta Amazônica*, v. 30, n.4, p. 305-318, 2000.