

MARIA JOSEANE FELIPE GUEDES

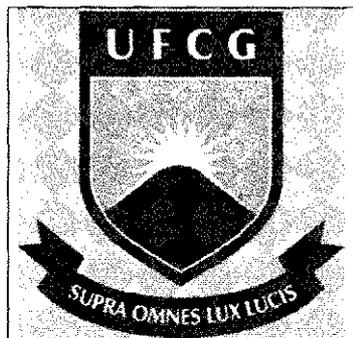
**TESTES DOS ESQUEMAS DE PARAMETRIZAÇÃO DE
CÚMULOS NO MODELO BRAMS: SENSIBILIDADE À
RESOLUÇÃO HORIZONTAL**

Dissertação apresentada ao Curso de
Mestrado em Meteorologia da
Universidade Federal de Campina Grande
em cumprimento às exigências para a
obtenção do grau de mestre.

Área de concentração: Meteorologia de Meso e Grande Escalas
Subárea: Climatologia e Modelagem Numérica do Tempo

Orientador: Dr. Enio Pereira de Souza

Campina Grande – PB
Fevereiro de 2004



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS

MESTRADO EM METEOROLOGIA

**TESTES DOS ESQUEMAS DE PARAMETRIZAÇÃO
DE CÚMULOS NO MODELO BRAMS:
SENSIBILIDADE À RESOLUÇÃO HORIZONTAL**

MARIA JOSEANE FELIPE GUEDES

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ORIENTADOR: Dr. Enio Pereira de Souza

CAMPINA GRANDE – PB

Fevereiro de 2004

MARIA JOSEANE FELIPE GUEDES

TESTES DOS ESQUEMAS DE PARAMETRIZAÇÃO DE CÚMULOS NO
MODELO BRAMS: SENSIBILIDADE À RESOLUÇÃO HORIZONTAL

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 04/3/2004

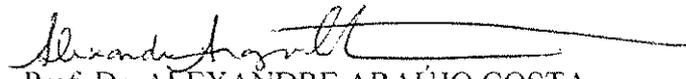
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. ENIO PEREIRA DE SOUZA
Departamento de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. ENILSON PALMEIRA CAVALCANTI
Departamento de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. ALEXANDRE ARAÚJO COSTA
Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos

DEDICATÓRIA

Dedico esta grande vitória por mim conquistada à minha família, em especial aos meus pais, Tiana e Guedes, porque tudo que sou devo a eles.

Aos meus avós maternos, Erotides e José, e aos meus avós paternos, Maria e Luiz (in memoriam).

Ao meu noivo pelo seu amor, dedicação e incentivo para a conclusão dessa etapa da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus pela graça de mais uma etapa vencida e por me dar forças para superar todos os obstáculos.

Ao curso de Mestrado em Meteorologia do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande pela oportunidade de realização deste curso.

À Coordenação de Aperfeiçoamento do Pessoal de Ensino Superior (CAPES) pelo suporte financeiro.

Ao meu orientador, Dr. Enio Pereira de Souza, pela orientação no decorrer deste curso.

Aos professores do Departamento de Ciências Atmosféricas, em especial ao Dr. Vicente de Paulo Rodrigues da Silva com quem dei os primeiros passos na pesquisa científica.

Aos funcionários do Departamento de Ciências Atmosféricas, em especial a Eyres Diana V. Silva e Divanete C. Rocha pela disposição em ajudar e pela amizade.

A toda a minha família pelo carinho e incentivo que recebi no decorrer de minha carreira acadêmica.

Ao meu noivo pelas inúmeras vezes que me ajudou, pelo carinho e paciência e confiança em mim depositados.

A Gilberto, pela valiosa ajuda que me prestou quando muito precisei.

Aos meus amigos que estiverem sempre presentes nessa caminhada, e pelos que mesmo à distância sempre torceram por mim. E a todos que direta ou indiretamente contribuíram.

RESUMO

Esta pesquisa teve como objetivo analisar a sensibilidade do modelo “*Brazilian Regional Atmospheric Modeling System*” – BRAMS aos diferentes tipos de fechamentos associados ao esquema de parametrização convectiva Grell e ao esquema de parametrização convectiva padrão do BRAMS, o esquema Kuo, na tentativa de avaliar qual o melhor esquema de parametrização convectiva para o modelo BRAMS na região tropical. Também foi analisada a sensibilidade de cada fechamento à resolução horizontal a partir de experimentos com resoluções de 80 e 20 km. Foram feitas integrações de 96 horas com inicialização em 20 de janeiro de 1999, utilizando os dados do *Large-Scale Biosphere Atmosphere* (LBA), para a região de Rondônia.

Os resultados mostraram que os esquemas de parametrização apresentaram uma grande diversidade no comportamento da precipitação ao longo da simulação e que o esquema Kuo apresentou valores de precipitação muito menores que os observados. Com relação ao fluxo de calor latente à superfície o esquema AS apresentou os valores mais próximos da média observada. Finalmente os fechamentos de convergência de umidade e Grell mostraram os melhores resultados (menor sensibilidade) ao se variar a resolução horizontal do modelo.

ABSTRACT

This study investigates the sensitivity of the model "*Brazilian Regional Atmospheric Modeling System*" – BRAMS to the several different kinds of closure associated to the convective parameterization of Grell and to the standard BRAMS convective parameterization, a Kuo-type cumulus parameterization scheme. The purpose is to evaluate which scheme gives BRAMS a better performance in the tropical region. The sensitivity of each closure to horizontal resolution is also studied through experiments with resolutions of 80 and 20 km. The results are based on 96-hour simulations starting at 00 UTC of 20 January 1999 for Rondônia (Brazil). The data are from the *Large-Scale Biosphere Atmosphere* (LBA),

It is shown that the convective parameterizations resulted in a wide variety of rainfall behaviors during the simulation and that the Kuo scheme showed much smaller values of precipitation than those observed. The Arakawa-Schubert closure showed good agreement with the observed values of the surface latent heat flux. Finally the moisture convergence and Grell closures showed the best results (smaller sensitivity) when the model's horizontal resolution varies.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	VIII
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	01
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	05
CAPÍTULO 3 - MATERIAL E MÉTODOS.....	13
3.1 Descrição do Esquema Kuo.....	13
3.2 Descrição do Esquema Arakawa-Schubert.....	15
3.3 Descrição do Esquema Grell.....	20
3.3.1 Controle Estático e Realimentação.....	20
3.3.2 Controle Dinâmico.....	21
3.4 Descrição da Parametrização de Convecção Rasa.....	23
3.5 Descrição do Modelo Utilizado.....	24
3.6 Descrição dos Experimentos.....	25
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	28
4.1 Comparação entre os Esquemas de Parametrização Convectiva para a Grade 1 da Simulação.....	29
4.2 Comparação entre os Esquemas de Parametrização Convectiva para a Grade 2 da Simulação.....	64
4.3 Comparação entre as duas Grades para um mesmo Esquema de Parametrização Convectiva.....	81
4.4 Considerações Finais.....	85
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES.....	88
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Figura esquemática mostrando a interação entre processos convectivos úmidos e de grande escala (<i>fonte: Emanuel & Raymond, 1993</i>).....	02
Figura 2	Área da grade 1 da simulação.....	29
Figura 3	Área da grade 2 da simulação, tendo ao centro o estado de Rondônia.....	29
Figura 4	Evolução temporal da precipitação convectiva acumulada (mm) para os experimentos EXPEN1 (azul escuro), EXPGR1 (verde), EXPLO1 (vermelho), EXPMC1 (amarelo), EXPSC1 (rosa), EXPAS1 (azul claro) e EXPKUO1 (cinza).....	30
Figura 5	Evolução temporal da diferença da precipitação entre os experimentos, EXPEN1-EXPKUO1 (azul escuro), EXPGR1-EXPKUO1 (verde), EXPLO1-EXPKUO1 (vermelho), EXPMC1-EXPKUO1 (amarelo), EXPSC1-EXPKUO1 (rosa) e EXPAS1-EXPKUO1 (azul claro).....	31
Figura 6	Ciclo diurno da taxa de precipitação (mm/h) média observada em Rondônia (adaptada de Betts & Jakob, 2002).....	32
Figura 7	Evolução temporal da taxa de precipitação convectiva (mm/h) para os experimentos EXPAS1 (azul claro), EXPEN1 (azul escuro) e EXPKUO1 (cinza) na grade 1 da simulação.....	33
Figura 8	Evolução temporal da taxa de precipitação convectiva (mm/h) para os experimentos EXPGR1 (verde), EXPLO1 (vermelho) e EXPKUO1 (cinza) na grade 1 da simulação.....	34
Figura 9	Evolução temporal da taxa de precipitação convectiva (mm/h) para os experimentos EXPMC1 (amarelo), EXPSC1 (rosa) e EXPKUO1 (cinza) na grade 1 da simulação.....	35
Figura 10	Fluxo de calor latente médio observado na superfície (Wm^{-2}) em Rondônia (adaptada de Betts & Jakob, 2002).....	36

Figura 11	Evolução temporal do fluxo de calor latente à superfície (W/m ²) para os experimentos EXPEN1 (azul escuro), EXPGR1 (verde), EXPLO1 (vermelho), EXPMC1 (amarelo), EXPSC1 (rosa), EXPAS1 (azul claro) e EXPKUO1 (cinza) na grade 1.....	37
Figura 12	Fluxo de calor sensível médio observado à superfície (Wm-2) em Rondônia (adaptada de Betts & Jakob, 2002).....	37
Figura 13	Evolução temporal do fluxo de calor sensível à superfície (W/m ²) para os experimentos EXPEN1 (azul escuro), EXPGR1 (verde), EXPLO1 (vermelho), EXPMC1 (amarelo), EXPSC1 (rosa), EXPAS1 (azul claro) e EXPKUO1 (cinza) na grade 1.....	39
Figura 14	Evolução temporal da radiação de onda longa à superfície (W/m ²) para os experimentos EXPEN1 (azul escuro), EXPGR1 (verde), EXPLO1 (vermelho), EXPMC1 (amarelo), EXPSC1 (rosa), EXPAS1 (azul claro) e EXPKUO1 (cinza) na grade 1.....	39
Figura 15	Evolução temporal da radiação de onda curta à superfície (W/m ²) para os experimentos EXPEN1 (azul escuro), EXPGR1 (verde), EXPLO1 (vermelho), EXPMC1 (amarelo), EXPSC1 (rosa), EXPAS1 (azul claro) e EXPKUO1 (cinza) na grade 1.....	41
Figura 16	Evolução temporal da taxa de aquecimento devida à convecção profunda (K/dia) para o experimento EXPKUO1 na grade 1 da simulação.....	41
Figura 17	Evolução temporal da diferença da taxa de aquecimento devida à convecção profunda (K/dia) entre os experimentos EXPAS1 e EXPKUO1 na grade 1 da simulação.....	43
Figura 18	Evolução temporal da diferença da taxa de aquecimento devida à convecção profunda (K/dia) entre os experimentos EXPEN1 e EXPKUO1 na grade 1 da simulação.....	43
Figura 19	Evolução temporal da diferença da taxa de aquecimento devida à convecção profunda (K/dia) entre os experimentos EXPGR1 e EXPKUO1 na grade 1 da simulação.....	44
Figura 20	Evolução temporal da diferença da taxa de aquecimento devida à convecção profunda (K/dia) entre os experimentos EXPLO1 e EXPKUO1 na grade 1 da simulação.....	45

Figura 21	Evolução temporal da diferença da taxa de aquecimento devida à convecção profunda (K/dia) entre os experimentos EXPMC1 e EXPKUO1 na grade 1 da simulação.....	46
Figura 22	Evolução temporal da diferença da taxa de aquecimento devida à convecção profunda (K/dia) entre os experimentos EXPSC1 e EXPKUO1 na grade 1 da simulação.....	46
Figura 23	Evolução temporal da taxa de umedecimento devida à convecção profunda [(g/kg)/dia] para o experimento EXPKUO1 na grade 1 da simulação.....	47
Figura 24	Evolução temporal da diferença da taxa de umedecimento devida à convecção profunda [(g/kg)/dia] entre os experimentos EXPAS1 e EXPKUO1 na grade 1 da simulação.....	48
Figura 25	Evolução temporal da diferença da taxa de umedecimento devida à convecção profunda [(g/kg)/dia] entre os experimentos EXPEN1 e EXPKUO1 na grade 1 da simulação.....	49
Figura 26	Evolução temporal da diferença da taxa de umedecimento devida à convecção profunda [(g/kg)/dia] entre os experimentos EXPGR1 e EXPKUO1 na grade 1 da simulação.....	50
Figura 27	Evolução temporal da diferença da taxa de umedecimento devida à convecção profunda [(g/kg)/dia] entre os experimentos EXPLO1 e EXPKUO1 na grade 1 da simulação.....	50
Figura 28	Evolução temporal da diferença da taxa de umedecimento devida à convecção profunda [(g/kg)/dia] entre os experimentos EXPMC1 e EXPKUO1 na grade 1 da simulação.....	51
Figura 29	Evolução temporal da diferença da taxa de umedecimento devida à convecção profunda [(g/kg)/dia] entre os experimentos EXPSC1 e EXPKUO1 na grade 1 da simulação.....	52
Figura 30	Evolução temporal da taxa de aquecimento radiativo (K/dia) para o experimento EXPKUO1 na grade 1 da simulação.....	53
Figura 31	Evolução temporal da diferença da taxa de aquecimento radiativo (K/dia) entre os experimentos EXPAS1 e EXPKUO1 na grade 1 da simulação	54

Figura 32	Evolução temporal da diferença da taxa de aquecimento radiativo (K/dia) entre os experimentos EXPGR1 e EXPKUO1 na grade 1 da simulação.....	54
Figura 33	Evolução temporal da taxa de aquecimento devida à convecção rasa (K/dia) para o experimento EXPKUO1 na grade 1 da simulação.....	55
Figura 34	Evolução temporal da taxa de aquecimento devida à convecção rasa (K/dia) para o experimento EXPAS1 na grade 1 da simulação.....	56
Figura 35	Evolução temporal da taxa de aquecimento devida à convecção rasa (K/dia) para o experimento EXPEN1 na grade 1 da simulação.....	57
Figura 36	Evolução temporal da taxa de aquecimento devida à convecção rasa (K/dia) para o experimento EXPLO1 na grade 1 da simulação.....	57
Figura 37	Evolução temporal da taxa de aquecimento devida à convecção rasa (K/dia) para o experimento EXPGR1 na grade 1 da simulação.....	58
Figura 38	Evolução temporal da taxa de aquecimento devida à convecção rasa (K/dia) para o experimento EXPMC1 na grade 1 da simulação.....	59
Figura 39	Evolução temporal da taxa de aquecimento devida à convecção rasa (K/dia) para o experimento EXPSC1 na grade 1 da simulação.....	59
Figura 40	Vetor vento médio (m/s) para o experimento EXPAS1 na grade 1 da simulação.	60
Figura 41	Vetor vento médio (m/s) para o experimento EXPEN1 na grade 1 da simulação.....	61
Figura 42	Vetor vento médio (m/s) para o experimento EXPGR1 na grade 1 da simulação.....	61
Figura 43	Vetor vento médio (m/s) para o experimento EXPMC1 na grade 1 da simulação.....	62
Figura 44	Vetor vento médio (m/s) para o experimento EXPSC1 na grade 1 da simulação.....	62
Figura 45	Vetor vento médio (m/s) para o experimento EXPLO1 na grade 1 da simulação.....	63
Figura 46	Vetor vento médio (m/s) para o experimento EXPKUO1 na grade 1 da simulação.....	64

Figura 47	Evolução temporal da precipitação convectiva acumulada (mm) para EXPEN2 (azul escuro), EXPGR2 (verde), EXPLO2 (vermelho), EXPMC2 (amarelo), EXPSC2 (rosa), EXPAS2 (azul claro) e EXPKUUO2 (cinza) na grade 2 da simulação.....	65
Figura 48	Evolução temporal da diferença da precipitação entre os experimentos, EXPEN2-EXPKUUO2 (azul escuro), EXPGR2-EXPKUUO2 (verde), EXPLO2-EXPKUUO2 (vermelho), EXPMC2-EXPKUUO2 (amarelo), EXPSC2-EXPKUUO2 (rosa) e EXPAS2-EXPKUUO2 (azul claro) na grade 2 da simulação.....	66
Figura 49	Evolução temporal da taxa de precipitação (mm/h) para os experimentos EXPAS2 (azul claro), EXPEN2 (azul escuro) e EXPKUUO2 (cinza) na grade 2 da simulação.....	67
Figura 50	Evolução temporal da taxa de precipitação (mm/h) para os experimentos EXPGR2 (verde), EXPLO2 (vermelho) e EXPKUUO2 (cinza) na grade 2 da simulação.....	68
Figura 51	Evolução temporal da taxa de precipitação (mm/h) para os experimentos EXPMC2 (amarelo), EXPSC2 (rosa) e EXPKUUO2 (cinza) na grade 2 da simulação.....	68
Figura 52	Evolução temporal do fluxo de calor latente à superfície (W/m^2) para os experimentos EXPEN2 (azul escuro), EXPGR2 (verde), EXPLO2 (vermelho), EXPMC2 (amarelo), EXPSC2 (rosa), EXPAS2 (azul claro) e EXPKUUO2 (cinza) na grade 2.....	69
Figura 53	Evolução temporal do fluxo de calor sensível à superfície (W/m^2) para os experimentos EXPEN2 (azul escuro), EXPGR2 (verde), EXPLO2 (vermelho), EXPMC2 (amarelo), EXPSC2 (rosa), EXPAS2 (azul claro) e EXPKUUO2 (cinza) na grade 2.....	70
Figura 54	Evolução temporal da radiação de onda longa à superfície (W/m^2) para os experimentos EXPEN2 (azul escuro), EXPGR2 (verde), EXPLO2 (vermelho), EXPMC2 (amarelo), EXPSC2 (rosa), EXPAS2 (azul claro) e EXPKUUO2 (cinza) na grade 2.....	71

Figura 55	Evolução temporal da radiação de onda curta à superfície (W/m^2) para os experimentos EXPEN2 (azul escuro), EXPGR2 (verde), EXPLO2 (vermelho), EXPMC2 (amarelo), EXPSC2 (rosa), EXPAS2 (azul claro) e EXPKUO2 (cinza) na grade 2.....	72
Figura 56	Evolução temporal da taxa de aquecimento devida à convecção profunda (K/dia) para o experimento EXPKUO2 na grade 2 da simulação.....	72
Figura 57	Evolução temporal da diferença da taxa de aquecimento devida à convecção profunda (K/dia) entre os experimentos EXPAS2 e EXPKUO2 na grade 2 da simulação.....	73
Figura 58	Evolução temporal da diferença da taxa de aquecimento devida à convecção profunda (K/dia) entre os experimentos EXPEN2 e EXPKUO2 na grade 2 da simulação.....	74
Figura 59	Evolução temporal da diferença da taxa de aquecimento devida à convecção profunda (K/dia) entre os experimentos EXPGR2 e EXPKUO2 na grade 2 da simulação.....	74
Figura 60	Evolução temporal da diferença da taxa de aquecimento devida à convecção profunda (K/dia) entre os experimentos EXPLO2 e EXPKUO2 na grade 2 da simulação.....	75
Figura 61	Evolução temporal da diferença da taxa de aquecimento devida à convecção profunda (K/dia) entre os experimentos EXPMC2 e EXPKUO2 na grade 2 da simulação.....	76
Figura 62	Evolução temporal da diferença da taxa de aquecimento devida à convecção profunda (K/dia) entre os experimentos EXPSC2 e EXPKUO2 na grade 2 da simulação.....	76
Figura 63	Vetor vento médio (m/s) para o experimento EXPAS2 na grade 2 da simulação.....	77
Figura 64	Vetor vento médio (m/s) para o experimento EXPEN2 na grade 2 da simulação.....	78
Figura 65	Vetor vento médio (m/s) para o experimento EXPGR2 na grade 2 da simulação.....	78

Figura 66	Vetor vento médio (m/s) para o experimento EXPMC2 na grade 2 da simulação.....	79
Figura 67	Vetor vento médio (m/s) para o experimento EXPSC2 na grade 2 da simulação.....	79
Figura 68	Vetor vento médio (m/s) para o experimento EXPLO2 na grade 2 da simulação.....	80
Figura 69	Vetor vento médio (m/s) para o experimento EXPKUO2 na grade 2 da simulação.....	80
Figura 70	Evolução temporal da taxa de precipitação convectiva (mm/h) para os experimentos EXPAS1 (azul claro) e EXPAS2 (preto).....	81
Figura 71	Evolução temporal da taxa de precipitação convectiva (mm/h) para os experimentos EXPEN1 (azul escuro) e EXPEN2 (preto).....	82
Figura 72	Evolução temporal da taxa de precipitação convectiva (mm/h) para os experimentos EXPGR1 (verde) e EXPGR2 (preto).....	83
Figura 73	Evolução temporal da taxa de precipitação convectiva (mm/h) para os experimentos EXPKUO1 (cinza) e EXPKUO2 (preto).....	83
Figura 74	Evolução temporal da taxa de precipitação convectiva (mm/h) para os experimentos EXPLO1 (vermelho) e EXPLO2 (preto).....	84
Figura 75	Evolução temporal da taxa de precipitação convectiva (mm/h) para os experimentos EXPMC1 (amarelo) e EXPMC2 (preto).....	84
Figura 76	Evolução temporal da taxa de precipitação convectiva (mm/h) para os experimentos EXPSC1 (rosa) e EXPSC2 (preto).....	85

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

A convecção-cúmulos tem um papel fundamental na determinação da estrutura vertical dos campos de temperatura e umidade da atmosfera e, portanto, deve ser representada adequadamente em modelos de grande escala e meso escala, como os usados para estudos de circulação geral e previsão de tempo. Já que esses modelos resolvem apenas fenômenos de escala muito maior que a escala de cúmulos, só é possível representar o efeito coletivo das nuvens cúmulos pela parametrização. A parametrização de cúmulos, embora geralmente considerada importante para a simulação de escoamentos de grande escala, em particular nas regiões tropicais, continua bastante incerta e pode contribuir amplamente para erros de previsão, apesar dos progressos mais recentes (Tiedtke, 1989).

Um importante problema na previsão numérica de tempo global é estimar os efeitos físicos dos movimentos na escala temporal e espacial da convecção cúmulos, não resolvidos diretamente pelo modelo, através de relações quantitativas entre os efeitos das nuvens e os parâmetros da escala da grade, conhecidos pelo modelo. Esse conceito de parametrização nos modelos numéricos não é limitado apenas à convecção cúmulos, incluindo outros processos físicos importantes como transporte

vertical de calor, umidade e momentum pelos turbilhões na camada limite planetária, transferência de energia e momentum entre a superfície terrestre e a atmosfera, aquecimento e resfriamento radiativo pela radiação de onda longa e onda curta e sua interação com as nuvens. Isso tudo mostra a importância dos esquemas de parametrização existentes nos modelos de previsão numérica. De acordo com o objetivo deste trabalho, o foco será mantido apenas na parametrização de cúmulos.

O problema da parametrização de cúmulos é relacionar a condensação convectiva e os transportes de calor, umidade e momentum pelas nuvens cúmulos, os quais não podem ser resolvidos explicitamente no modelo de grande escala. Existem dois aspectos importantes da convecção cúmulos. Um é a modulação da convecção pelo forçante de grande escala, que está relacionada à taxa de precipitação total. O outro é a realimentação da convecção cúmulos em seu ambiente, a qual está relacionada à distribuição vertical de calor latente nas nuvens e aos transportes verticais de calor, umidade e momentum (ver Figura 1). Para a parametrização ser possível deve existir uma relação entre a convecção cúmulos e a circulação de grande escala (Arakawa & Schubert, 1974). Um bom esquema de parametrização requer conhecimento das interações mútuas entre convecção cúmulos e seu ambiente nas diferentes escalas temporal e espacial.

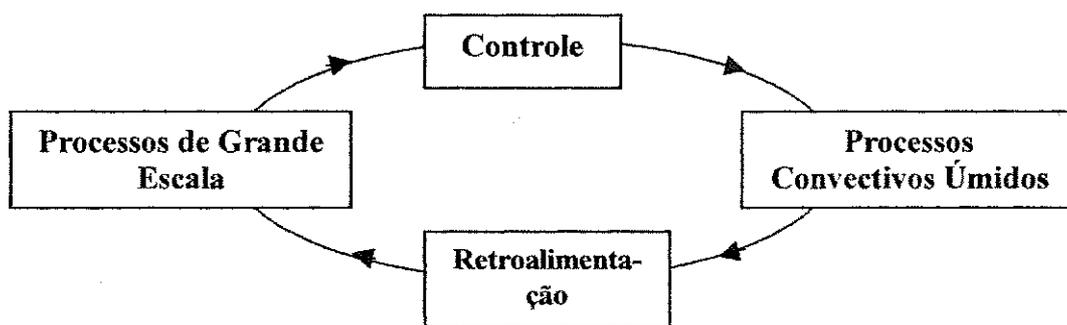


Fig. 1 – Figura esquemática mostrando a interação entre processos convectivos úmidos e de grande escala (fonte: Emanuel & Raymond, 1993)

A modelagem numérica da atmosfera constitui-se em uma poderosa ferramenta operacional e de pesquisa. Atualmente, é possível fazer simulações numéricas em resoluções grandes o suficiente de modo que se possam estudar fenômenos de meso-escala típicos da região Nordeste do Brasil – NEB (Cavalcanti, 2001; Souza et al. 2001; Souza & Silva, 2003).

Para que um modelo tenha um bom desempenho em simulações para uma região, é necessário que seja testado para diferentes situações e que sua física seja calibrada para uma melhor destreza. O modelo em uso no DCA, o *Brazilian Regional Atmospheric Modeling System* – BRAMS, que é a versão brasileira do modelo RAMS, tem como parametrização de convecção profunda um esquema do tipo Kuo (1974). Embora esquemas tipo Kuo apresentem um bom desempenho, sua base física é fruto de críticas freqüentes (Emanuel et al., 1994). A solução, portanto, parece apontar na direção de esquemas tipo fluxo de massa, que são a base do esquema de Arakawa & Schubert (1974). Grell & Dévényi (2002) apresentaram um esquema, no qual encontram-se disponíveis fechamentos para cálculo do fluxo de massa convectivo baseados em esquemas de vários tipos. Esse esquema permite que o fluxo de massa seja calculado com base em apenas um fechamento ou a combinação de vários fechamentos. Esse esquema é simplificado para uma única nuvem, podendo ser ampliado para mais de um tipo de cúmulos.

Este trabalho tem como objetivo testar o desempenho de algumas parametrizações de convecção. O esquema tipo Kuo, que é considerado o esquema padrão do BRAMS, será comparado, para uma mesma situação, com o esquema Grell. A abordagem principal será feita com base na previsão do ciclo diurno de precipitação com cada esquema de parametrização mencionado.

Um objetivo específico deste trabalho é avaliar qual é o melhor esquema para o modelo BRAMS na região tropical. Estudos desse tipo podem antecipar a solução de problemas que podem surgir ao longo de atividades rotineiras de previsão.

CAPÍTULO 2

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A parametrização convectiva continua sendo um dos aspectos mais controversos da modelagem numérica da atmosfera, especialmente para a previsão numérica de tempo e previsão climática global. Vários esquemas de parametrização de cúmulos têm sido desenvolvidos ao longo dos anos [Manabe et al. (1965), Kuo (1974), Arakawa & Schubert (1974), Fritsch & Chappell (1980), Betts (1986), Frank & Cohen (1987), Grell & Dévényi (2002), entre outros].

Nos ajustamentos convectivos úmidos (Manabe et al., 1965), todo o vapor condensado é simplesmente removido da coluna sem re-evaporação. Existem muitas variantes do esquema Kuo, mas elas geralmente dão uma aproximação muito simples para o particionamento entre o umedecimento convectivo e a precipitação, representando tipicamente o particionamento por um único parâmetro, deixando de lado a atenção aos processos microfísicos da formação de precipitação.

Alguns estudos mostraram que o efeito da convecção cúmulos nos campos de umidade e calor de grande escala é, predominantemente, de aquecimento e secagem

como resultado da subsidência induzida pelos cúmulos no ambiente (Yanai et al., 1973; Ogura & Cho, 1973).

Inicialmente, a aproximação de Kuo (1974), que incorpora os efeitos de escala de sub grade da convecção cúmulos foi muito usada em modelos de previsão numérica de tempo. Porém, tinha uma incapacidade de produzir perfis verticais observados de fonte aparente de calor e sumidouro aparente de umidade, propostos por Yanai et al. (1973).

Arakawa & Schubert (1974) desenvolveram uma teoria da interação mútua de um conjunto de nuvens cúmulos com a grande escala do ambiente. Nessa teoria, a grande escala do ambiente foi dividida em duas camadas: a camada de mistura sob as nuvens e a região acima. Na camada de mistura, a convecção cúmulos não afeta diretamente os campos de temperatura e umidade, mas sua profundidade é modificada através da subsidência induzida pelos cúmulos e, conseqüentemente, isto reduz o problema da parametrização à determinação das distribuições verticais do fluxo de massa total do conjunto e das propriedades termodinâmicas do ar desentranhado. Nesse esquema, o conjunto de nuvens cúmulos foi dividido em subconjuntos de acordo com a taxa fracional de entranhamento. Eles mostraram que as equações de balanço dos subconjuntos determinam as propriedades termodinâmicas de cada um deles em todos os níveis, na medida em que as condições no topo da camada de mistura são conhecidas. A mudança no ambiente provocada pela convecção cúmulos é devida a dois fatores: o desentranhamento do ar nas nuvens, causando um resfriamento e umedecimento do ambiente, e os movimentos compensativos induzidos entre as nuvens, causando um aquecimento e secagem do ambiente.

Segundo Betts (1975), balanços de quantidades convectivas são fundamentais para o desenvolvimento de modelos numéricos de circulação global ou

tropical, já que esses modelos devem parametrizar termos de fontes de transportes convectivos que ocorrem em escalas não resolvidas pela grade numérica. Nesse estudo, ele objetiva mostrar que os transportes termodinâmicos pelo campo dos ventos alísios podem ser representados, igualmente bem ou talvez mais simplesmente, com um modelo conceitual diferente envolvendo um único tipo de nuvem, que entranha e desentranha em todos os níveis durante seu ciclo de vida. A população de nuvens pode ser representada por um fluxo de massa decrescendo com a altura, indicando que a quantidade de nuvem decresce com a altura e se torna zero no topo da inversão dos alísios. Foi mostrado que enquanto uma camada inteira de nuvens é umedecida (desentranhamento de água das nuvens dominantes sobre o efeito de secagem da subsidência de cúmulos induzidos), a parte mais baixa da camada é aquecida e a parte superior é resfriada.

O entranhamento de ar nas nuvens é um dos parâmetros importantes nos esquemas de parametrização de nuvens cúmulos. Paluch (1979) analisou propriedades do ar claro e nas nuvens com o objetivo de determinar a altitude de origem do ar que se mistura com nuvens cúmulos. O método utilizado só é aplicado a regiões de nuvens que não contém quantidades significantes de gelo ou gotas precipitáveis. Ela concluiu que a maior parte do ar entranhado origina-se no topo das nuvens. Esses resultados têm sido sustentados por análises termodinâmicas similares registradas por Boatman & Auer (1983), Jensen et al. (1985) e Blyth & Latham (1985), todos mostraram que ocorre mistura predominantemente entre dois níveis. Outros trabalhos mostram que, especialmente em condições de forte cisalhamento e em sistemas mais profundos, o ar é entranhado pela lateral Squires & Turner (1962).

Betts (1982a) aplicou o esquema das análises do ponto de saturação (SP) aos processos de mistura ou entranhamento em cúmulos. A vantagem desse esquema é que as variáveis termodinâmicas conservativas para ascensão úmida e movimento descendente

seco são completamente especificadas por um único parâmetro, nível de saturação. Betts (1982b) aplicou a técnica de análises SP para um estudo de caso analisado por Cotton (1975a), e fez algumas aproximações para estimar a taxa de entranhamento lateral que se aproximasse mais dos valores observados. Ele conclui que uma combinação do entranhamento lateral e no topo da nuvem é provável em cúmulos tal que possivelmente as correntes ascendentes, flutuação positiva, e descendentes, flutuação negativa, possam coexistir.

Molinari (1985) apresentou uma forma geral da parametrização cúmulos de Kuo, que foi testada na previsão de um complexo convectivo de meso-escala (CCM). Essa aproximação generalizada eliminou o paradoxo presente nas formulações anteriores de Kuo, de maneira que a escala de grade da advecção vertical de temperatura aparece explicitamente, enquanto a advecção vertical de umidade aparece apenas de forma integrada. Embora limitada fisicamente, essa aproximação satisfaz arbitrariamente os perfis verticais de fontes e sumidouros de calor e umidade, tendo benefícios significativos com relação à simplicidade para reproduzir qualquer perfil desejado.

Um esquema de ajuste convectivo, baseado em relaxamentos simultâneos nos campos de temperatura e umidade, sobre estruturas termodinâmicas observadas no quase-equilíbrio foi proposto por Betts (1986) e Betts & Miller (1986). O objetivo desse esquema foi manter as estruturas verticais locais de temperatura e umidade, que são modificadas naturalmente pela presença de convecção. A essência desse ajuste consiste em separar os campos de temperatura e umidade em duas tendências, implicando na determinação do transporte vertical de calor e de umidade para os campos convectivos.

Betts & Miller (1986) desenvolveram dois esquemas de ajuste para convecção rasa e profunda separadamente. Esses esquemas foram introduzidos no modelo global do ECMWF e testados com um conjunto de dados experimentais do GATE (*Global*

Atmospheric Research Program Atlantic Tropical Experiment), BOMEX e ATEX. Eles encontraram uma boa resposta e mostraram que, em previsões globais, os esquemas causam mudanças significativas nos fluxos de superfície e nas tendências médias de temperatura e de umidade na região tropical, quando comparados ao esquema de convecção Kuo (1974).

Estudos observacionais indicam que a aproximação do fluxo de massa pode prover um arcabouço realístico para parametrizações cúmulos, em modelos de grande escala. Mas essa aproximação, pela introdução de um conjunto espectral de nuvem, resulta normalmente em esquemas bastante complexos. Tiedtke (1989) apresentou uma parametrização mais simples que produziu campos realísticos de aquecimento convectivo. As suposições de fechamento utilizadas para o fluxo de massa foram que a convecção profunda é mantida pela convergência de umidade de grande escala e a convecção rasa pelo suprimento de umidade devido à evaporação da superfície. Mas não encontrou a resposta para o melhor fechamento. Os fluxos de massa não são observados e difíceis para diagnosticar, mas algumas estimativas são disponíveis (Cho & Ogura, 1974; Johnson, 1976, 1980; Chen, 1985). Porém, alguns trabalhos mostram que os fluxos de massa podem ser gerados por modelos de nuvens, Randall et al. (1995).

Yano (1999) indicou haver uma inconsistência na formulação original da teoria do quase-equilíbrio de Arakawa & Schubert. Porém Adams & Rennó (2003) demonstraram que essa inconsistência resultou apenas de uma confusão na definição dos ajustamentos convectivo e efetivo das escalas de tempo, τ_{ADJ} e τ_{EFF} . De maneira que foi usado o ajustamento da escala de tempo convectiva local τ_{ADJ}^{AS} sobre toda a grade, ao invés de um ajustamento efetivo da escala de tempo. Isso implica que Arakawa & Schubert assumiram incorretamente que o conjunto de elementos convectivos num quadrado da

grade é ajustado na mesma escala de tempo de um único elemento convectivo. Essa inconsistência desapareceu quando os ajustamentos foram propriamente definidos.

Grell & Devenyi (2002) desenvolveram uma nova parametrização convectiva, que faz uso de uma grande variedade de suposições previamente introduzidas nas formulações de alguns esquemas. Essas suposições são escolhidas de tal modo que geram uma grande dispersão na solução. Utilizam-se dois métodos estatísticos: estatística simples e função densidade de probabilidade. Nesses fechamentos as técnicas de assimilação de dados e conjunto podem ser usadas no intuito de encontrar o melhor valor para a realimentação do modelo. Com relação ao controle dinâmico, foi feito uso de alguns esquemas de parametrização convectiva existentes na literatura.

O esquema Kain-Fritsch (Kain & Fritsch, 1992) consiste numa parametrização do fluxo de massa, que usa o método lagrangeano da parcela (Simpson & Wiggert, 1969; Kreitzberg & Perkey, 1976), incluindo o movimento vertical dinâmico (Donner 1993), para estimar a existência de instabilidades que se tornaram disponíveis para o crescimento da nuvem (Kain, 2002). Esse esquema é utilizado como base para um dos fechamentos do esquema Grell (Grell & Dévényi, 2002). Outros esquemas são utilizados como base para os fechamentos do esquema Grell [Arakawa & Schubert (1974), Kuo (1974), Krishnamurti et al. (1983), Brown (1979), Frank & Cohen (1987)].

Souza (1999) propôs uma parametrização simples para convecção de cúmulos rasos que se apresentou como uma boa ferramenta para a representação da interação da convecção rasa com os processos de superfície e com a convecção profunda. O esquema combina o esquema de nuvens proposto por Arakawa & Schubert (1974) com a formulação do fluxo de massa que segue a teoria da máquina térmica de Rennó & Ingersol (1996). A determinação do fluxo de massa se baseia na hipótese de que o fluxo é

forçado por uma máquina térmica convectiva, que é alimentada por fluxos energéticos provenientes da superfície.

Souza & Silva (2003) investigaram o impacto da implementação da parametrização de cúmulos rasos (Souza, 1999) no modelo de meso-escala RAMS (*Regional Atmospheric Modeling System*). Os resultados mostraram que o esquema de Souza (1999) causou um impacto significativo nos perfis termodinâmicos (temperatura e umidade) da atmosfera. E a precipitação convectiva aumentou substancialmente, como resultado do aumento do fluxo de calor latente na superfície.

Silva Dias et al. (2002) realizaram um estudo de caso do desenvolvimento convectivo no Sudoeste do Amazonas durante o WETAMC/LBA (*Wet Season Atmospheric Mesoscale Campaign / Large-Scale Biosphere-Atmosphere*) e o experimento TRMM-LBA (*Tropical Rainfall Measuring Mission / Large-Scale Biosphere-Atmosphere*). Mostraram que apenas umas poucas células convectivas intensas e profundas são necessárias para explicar toda a formação da linha de precipitação, e que a propagação discreta e o acoplamento com a circulação atmosférica superior podem explicar a presença de várias linhas. A simulação numérica indica que a topografia deve ser a causa do desenvolvimento convectivo inicial, embora depois a linha convectiva estivesse paralela ao cisalhamento em níveis médios. Houve indicações de que o desflorestamento em pequena escala teve um efeito no aumento de precipitação na estação úmida quando o forçante de grande escala estava muito fraco.

Betts & Jakob (2002) analisaram o ciclo diurno de precipitação, superfícies termodinâmicas e fluxos de superfície no modelo ECMWF, usando dados do LBA. Eles detectaram uma falha no modelo no ciclo de precipitação diurno sobre Rondônia. Por volta das 8 HL, o modelo detectou um máximo de precipitação, enquanto que, nos dados observados, o que se verificou foi um mínimo para aquele mesmo horário. Concluíram que

embora o ciclo diurno termodinâmico do modelo, próximo à superfície, esteja bastante próximo do observado, ele é reproduzido no modelo por uma mistura dos processos de superfície e camada limite diferentes, principalmente mais evaporação de chuva e menos convecção cúmulos rasa do que é geralmente observado.

Carvalho et al. (2002) fizeram uma investigação ligando a variabilidade intra sazonal de grande escala com os regimes de vento de baixos níveis e a atividade convectiva de meso-escala na América do Sul tropical (TSA). Os resultados indicaram que a região noroeste da TSA apresentou contrastes significativos nas características dos sistemas convectivos como mudanças no regime dos ventos. Durante os regimes dos ventos de oeste, as anomalias do vento cruzaram o equador na direção sul passando sobre Rondônia na direção sudeste do Brasil e fecharam com as anomalias da circulação ciclônica na costa da Argentina e Uruguai. Durante os regimes dos ventos de leste, alguns padrões opostos são observados na circulação em baixos níveis e nas anomalias de ROL. Isso inclui anomalias de circulação anticiclônicas na costa da Argentina e Uruguai, com anomalias do vento penetrando no sudeste do Brasil, estendendo-se sobre Rondônia e então cruzando o equador.

Vários esquemas de parametrização convectiva foram, e continuam sendo elaborados e/ou aprimorados ao longo do tempo. O problema da parametrização convectiva em modelos de grade e meso escalas geralmente é direcionada à simulação da precipitação convectiva e do aquecimento associado da atmosfera. Fazendo-se uso de alguns esquemas de parametrização convectiva existentes na literatura, pretende-se aqui avaliar qual o melhor esquema de parametrização convectiva acoplado ao modelo BRAMS para a região tropical do Brasil.

CAPÍTULO 3

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Descrição do Esquema Kuo

Estudos mostram que existe uma forte correlação entre a precipitação convectiva observada e a convergência total de vapor d'água de grande escala numa coluna. Essas observações sugerem que a convergência de grande escala de vapor d'água é uma variável útil para parametrizar os efeitos de convecção em modelos de grande escala, e muitas parametrizações cúmulos têm-se baseado nessa relação entre precipitação convectiva e convergência de umidade de grande escala. Esses esquemas são chamados *esquemas Kuo* devido ao trabalho de Kuo (1965). Existem várias versões do Kuo (1965), como Kuo (1974), Anthes (1978), Krisnamurti et al. (1976, 1980, 1983) e Molinari (1982).

Esquemas do tipo Kuo (1965; 1974) apresentam os termos de aquecimento e de umedecimento devidos à convecção profunda, respectivamente, na forma:

$$\left. \frac{\partial \bar{s}}{\partial t} \right|_{CP} = (1-b) \frac{(s_n - \bar{s})}{\langle s_n - \bar{s} \rangle} L \left\langle \left(\frac{\partial q}{\partial t} \right)_{GE} \right\rangle \quad (1)$$

e

$$\left. \frac{\partial \bar{q}_t}{\partial t} \right)_{CP} = b \frac{(q_n - \bar{q})}{\langle q_n - \bar{q} \rangle} \left\langle \left(\frac{\partial q}{\partial t} \right)_{GE} \right\rangle \quad (2)$$

com

$$\langle \chi \rangle = \frac{1}{\Delta z} \int_{nuvem} \chi dz$$

Nas Equações (1) e (2) o termo b é a fração da convergência do vapor d'água que é usada para umedecer a coluna atmosférica. Conseqüentemente, a outra fração $(1-b)$ é usada para aquecer a coluna, através da liberação de calor latente.

Outro termo importante é $\left\langle \left(\frac{\partial q}{\partial t} \right)_{GE} \right\rangle$ que representa a convergência total de

umidade em uma coluna atmosférica. Esse termo é o resultado da convergência total de umidade que é a soma da geração local (evapotranspiração) mais a convergência de grande escala. Essa dependência dos esquemas do tipo Kuo na convergência de grande escala faz que com eles sejam incluídos na categoria de esquemas tipo CISK (Instabilidade Condicional de Segundo Tipo, Charney & Eliassen, 1965).

Um dos pontos-chave no fechamento de um esquema do tipo Kuo é a determinação do parâmetro b . A forma atual do esquema do BRAMS é uma função de algumas variáveis tais como: umidade relativa, cisalhamento vertical do vento, etc.. Uma revisão das várias proposições para o cálculo de b pode ser encontrada em Cotton & Anthes (1989). Tipicamente, o valor de b deve ser pequeno (Kuo, 1974; Molinari, 1985).

3.2 Descrição do Esquema Arakawa-Schubert

Arakawa & Schubert (1974) desenvolveram um sofisticado esquema de parametrização cúmulos, principalmente para uso em modelos de circulação geral. Em particular, é considerado um espectro de tipos de nuvens e as funções do forçante de grande escala envolvem advecção horizontal e vertical, radiação e fluxos de calor e umidade à superfície.

O esquema Arakawa-Schubert (AS) assume que um conjunto de nuvens cúmulos afeta o ambiente de duas maneiras: (1) induzindo a subsidência entre as nuvens que aquecem e secam o ambiente, e (2) através do desentranhamento do ar saturado que contém água líquida desde o topo da nuvem. A evaporação da água da nuvem desentranhada causa um resfriamento e umedecimento do ambiente. Para determinar esses efeitos quantitativamente, deve-se determinar a distribuição vertical do fluxo de massa total pelas nuvens, o desentranhamento da massa da nuvem, a temperatura, vapor d'água e conteúdo de água líquida do ar desentranhado.

O fluxo de massa da nuvem é determinado assumindo que uma propriedade da atmosfera de grande escala, chamada função trabalho da nuvem, está num estado de quase equilíbrio, determinado por um balanço aproximado entre processos de grande escala e efeitos da convecção cúmulos. A função trabalho da nuvem é uma medida integral da força de empuxo nas nuvens.

Nesse esquema as equações prognósticas da energia estática seca s e da razão de mistura r_v , equações básicas usadas para descrever as variações temporais dos campos de umidade e temperatura de grande escala, são dadas por:

$$\rho \frac{\partial \bar{s}}{\partial t} = D(\hat{s} - \bar{s} - L\hat{l}) + M_c \frac{\partial \bar{s}}{\partial z} - \rho \bar{v} \cdot \nabla \bar{s} - \rho \bar{\omega} \frac{\partial \bar{s}}{\partial z} + \bar{Q}_R \quad (3)$$

em que,

$$\bar{Q}_R \equiv \tilde{Q}_R + \sum_{d.c.} Q_{Ri}$$

$$\hat{s} \equiv \bar{s} - \frac{LE}{1 + \gamma E \delta} [\delta(\bar{q}^* - \bar{q}) - \hat{l}]$$

e

$$\rho \frac{\partial \bar{q}}{\partial t} = D(\hat{q}^* + l - \bar{q}) + M_c \frac{\partial \bar{q}}{\partial z} - \rho \bar{v} \cdot \nabla \bar{q} - \rho \bar{\omega} \frac{\partial \bar{s}}{\partial z} \quad (4)$$

em que ,

$$\hat{q}^* \equiv \bar{q}^* - \frac{\gamma E}{1 + \gamma E \delta} [\delta(\bar{q}^* - \bar{q}) - \hat{l}]$$

Os termos com barra (-) indicam a média, com asterisco (*) denotam o valor à saturação e com o sinal til (~) indicam os termos referentes ao ambiente.

As equações (3) e (4) mostram que as propriedades do conjunto de cúmulos devem ser encontradas para prever os campos de grande escala de temperatura e umidade. A modificação dos campos de grande escala pela convecção cúmulos depende de: 1) fluxo de massa total nas nuvens, $M_c(z)$, 2) desentranhamento total das nuvens no ambiente, $D(z)$, e 3) razão de mistura da água líquida num nível sem empuxo, $l(z)$. Conseqüentemente, o problema da parametrização da convecção cúmulos se reduz à relação dessas propriedades do conjunto de nuvens cúmulos com os campos de temperatura, umidade e velocidade. (Em adição, as nuvens cúmulos modificam a temperatura de grande escala através de $\sum_{d.c.} Q_{Ri}$, aquecimento radiativo). O termo \bar{Q}_R é o forçante radiativo e é calculado no modelo através da parametrização de radiação de conda longa e de onda curta. Como se deseja um prognóstico, os termos de tendência de grande escala são precisamente o que se quer obter da parametrização da convecção cúmulos.

Os efeitos das nuvens representados pelos dois primeiros termos no lado direito das equações (3) e (4) são o aquecimento e secagem adiabáticos associados com a subsidência compensatória e os efeitos de calor desentranhado, vapor d'água e água líquida do topo das nuvens.

No esquema de parametrização cúmulos AS, um único parâmetro λ caracteriza cada tipo de nuvem, em que λ é uma taxa fracional de entranhamento de massa que é constante com a altura (para um dado tipo de nuvem).

O fluxo de massa é escrito como uma função do fluxo de massa na base da nuvem $m_B(\lambda)$

$$m(z, \lambda) = m_B(\lambda) \eta(z, \lambda) \quad (5)$$

Em que a base da nuvem é suposta estar no nível de condensação por levantamento.

A função trabalho da nuvem $A(\lambda)$ é a geração de energia cinética por unidade de $m_B(\lambda)d\lambda$, e é uma integral da medida da força de empuxo associada com nuvens com entranhamento variando de λ até $\lambda+d\lambda$

$$A(\lambda) = \int_{z_B}^{z_D(\lambda)} \frac{g}{c_p \bar{T}(z)} \eta(z, \lambda) [s_{vc}(z, \lambda) - \bar{s}_v(z)] dz \quad (6)$$

Em que $\eta(z, \lambda)$ é o fluxo de massa normalizado e $g[s_{vc}(z, \lambda) - \bar{s}_v(z)] / (c_p \bar{T})$ a força de empuxo. Portanto, $A(\lambda)$ é uma medida integral da força de flutuação ponderada por $\eta(z, \lambda)$. Dessa maneira, a função trabalho da nuvem é apenas uma propriedade do ambiente que influencia a geração de energia cinética de nuvens do tipo λ . Para $\lambda=0$, $\eta(z, \lambda)=1$ e $A(\lambda)$ na Equação (6) é a definição clássica da energia potencial convectiva disponível (CAPE).

A precipitação convectiva instantânea nos trópicos não é muito relacionada com o grau de instabilidade; assim para um dado valor de $A(\lambda)$ não se deve esperar uma relação próxima com a atividade convectiva. Em vez disso, a atividade convectiva é

relacionada com a taxa temporal de mudança de $A(\lambda)$. Assim, a derivada temporal da função trabalho da nuvem pode ser expressa como o somatório dos termos da nuvem e dos termos de grande escala, como:

$$\frac{dA(\lambda)}{dt} = \left[\frac{dA(\lambda)}{dt} \right]_C + \left[\frac{dA(\lambda)}{dt} \right]_{LS} \quad (7)$$

em que os subscritos C e LS denotam, respectivamente, os termos da nuvem e os termos de grande escala. Os termos de grande escala são chamados de forçante $F(\lambda)$. $F(\lambda)$ positivo indica uma taxa positiva de aumento da função trabalho da nuvem (desestabilização), para nuvens do tipo λ , pelos processos de grande escala. A contribuição total para a mudança de $A(\lambda)$ por todas as nuvens é obtida pela integração sobre todo λ :

$$\frac{dA(\lambda)}{dt} = \left[\frac{dA(\lambda)}{dt} \right]_C + F(\lambda) \quad (8)$$

Em que,

$$\left[\frac{dA(\lambda)}{dt} \right]_C = \int_0^{\lambda_{max}} K(\lambda, \lambda') m_B(\lambda') d\lambda' \quad (9)$$

O núcleo $K(\lambda, \lambda')$, que depende das propriedades da nuvem, incluindo o fluxo de massa em cada nível e a taxa de desentranhamento, é tipicamente negativo. Então $K(\lambda, \lambda') m_B(\lambda') d\lambda'$ é a taxa de decréscimo (estabilização) da função trabalho da nuvem para as nuvens do tipo λ através da modificação do ambiente pelas nuvens tipo λ' .

O efeito mais predominante do forçante na camada de nuvens parece ser o aumento da função trabalho da nuvem devido ao resfriamento do ambiente acima da camada de mistura pelos processos de grande escala, tipicamente pelo resfriamento adiabático devido ao movimento ascendente de grande escala. Ou seja, a grande escala age para instabilizar o ambiente devido ao resfriamento adiabático no movimento ascendente.

O efeito principal no núcleo do fluxo de massa vertical é tipicamente o decréscimo da função trabalho da nuvem, para as nuvens do tipo λ , através do aquecimento adiabático do ambiente devido à subsidência induzida pelas nuvens tipo λ' . Ou seja, as nuvens agem para estabilizar o ambiente por meio da liberação líquida de calor latente através das nuvens precipitantes, para as quais $C > E$. A função do forçante de grande escala $F(\lambda)$ inclui advecção horizontal e vertical, fluxos de calor sensível e latente desde a superfície e efeitos radiativos.

A suposição do quase equilíbrio é dada por:

$$\left| \frac{dA(\lambda)}{dt} \right| \ll \left[\left[\frac{dA(\lambda)}{dt} \right]_c \right] \approx |F(\lambda)| \quad (10)$$

E geralmente é usada para obter uma equação integral diagnóstica para o fluxo de massa na base da nuvem, como:

$$\int_0^{\lambda_{\max}} K(\lambda, \lambda') m_B(\lambda') d\lambda' + F(\lambda) = 0 \quad (11)$$

A equação (11) deve valer cada tipo de nuvem para qual $m_B(\lambda) > 0$. Não existem nuvens [$m_B(\lambda) = 0$] se $A(\lambda)$ ou $dA(\lambda)/dt$ é negativo. A Equação (11) pode ser resolvida por um esquema iterativo para $m_B(\lambda)$, determinado o forçante de grande escala $F(\lambda)$. A expressão para $F(\lambda)$ é complicada (Arakawa & Schubert, 1974), mas em um modelo numérico ele pode ser estimado simplesmente da mudança prevista no modelo em $A(\lambda)$ devido a todos os efeitos da grande escala $(\Delta A/\Delta t)_{LS}$ sobre um passo de tempo. Calculando primeiro essa contribuição de grande escala para $dA(\lambda)/dt$, os processos da escala de nuvem podem ser calculados de $(\Delta A/\Delta t)_{LS}$, que tenderá a trazer $A(\lambda)$ ao seu valor original.

3.3 Descrição do Esquema Grell

Há uma gama de fechamentos diferentes para determinar a quantidade e localização da convecção. Alguns desses fechamentos são utilizados no esquema Grell (Grell & Dévényi, 2002) com o objetivo de determinar o fluxo de massa na base da nuvem m_b . Na versão atual do BRAMS o Grell está com os seguintes esquemas disponíveis: Ensemble (EN), Grell (GR), Low Level Omega (LO), Moisture Convergence (MC), Kain Fritsch (SC) e Arakawa-Schubert (AS).

3.3.1 Controle Estático e Realimentação

Aqui são escolhidas suposições que influenciam diretamente a redistribuição vertical de calor e umidade ou a taxa de precipitação.

A hipótese do entranhamento é feita da seguinte maneira:

$$\mu_{ue}(z, \lambda) - \mu_{ud}(z, \lambda) = \frac{1}{m_u(z, \lambda)} \frac{\partial m_u(z, \lambda)}{\partial z} \quad (12)$$

em que μ_{ue} e μ_{ud} são, respectivamente, as taxas de entranhamento e desentranhamento fracional brutos, m é o fluxo de massa, u designa propriedade de corrente ascendente e o símbolo λ é usado para denotar o tipo de nuvem. Cada subconjunto é normalizado pelo fluxo de massa à base da nuvem (m_b) por:

$$m_u(z, \lambda) = m_b(\lambda) \eta_u(z, \lambda) \quad (13)$$

Em que η_u é o fluxo de massa normalizado, já definido na Equação (5).

Supondo-se que parte do total condensado é evaporado na corrente descendente, a dependência do fluxo de massa ascendente sobre o descendente é dada por:

$$m_0(\lambda) = \beta(\lambda) \frac{I_1(\lambda)}{I_2(\lambda)} m_b(\lambda) \quad (14)$$

Em que, $I_1(\lambda)$ e $I_2(\lambda)$ são a condensação e evaporação normalizadas associadas ao ar ascendente e descendente do conjunto λ , respectivamente, e β é a parcela armazenada para umedecer a coluna.

3.3.2 Controle Dinâmico

O primeiro tipo de fechamento é baseado em um tipo de equilíbrio de estabilidade. É usada a definição da função trabalho da nuvem A , uma medida integral da força de empuxo associada com o subconjunto de nuvem λ , que foi visto primeiro por Arakawa & Schubert (1974), já mostrado acima. Na implementação original do esquema Grell, um equilíbrio entre o forçante de grade escala e a resposta da nuvem é assumido como:

$$-\frac{A'(\lambda) - A(\lambda)}{dt} = \frac{A''(\lambda) - A(\lambda)}{m'_b(\lambda)dt} m_b(\lambda) \quad (15)$$

Em que $A'(\lambda)$ é a função trabalho da nuvem que foi calculada usando os campos termodinâmicos modificados pelos termos do forçante, e $A''(\lambda)$ é a função trabalho da nuvem calculada usando os campos termodinâmicos modificados pela nuvem, com $m'_b(\lambda)dt$. No esquema Grell, A é calculado localmente, enquanto que para o outro fechamento AS é utilizado um valor climatológico de A , encontrado no artigo original de Arakawa & Schubert (1974).

Um outro esquema simula um fechamento no qual a instabilidade é simplesmente removida pela convecção (como assumido por Kain e Fritsch, 1992).

Assume-se que:

$$\frac{A(\lambda)}{(dt)_c} = \frac{A''(\lambda) - A(\lambda)}{m'_b(\lambda) dt} m_b(\lambda) \quad (16)$$

De maneira que $m_b(\lambda)$ seja forte o suficiente para remover a instabilidade disponível em um período de tempo específico $(dt)_c$.

Outro grupo amplamente usado de suposições de fechamentos é baseado na convergência de umidade [como Kuo (1974), Molinari (1982), Krishnamurti et al.(1983)]. Mas a suposição escolhida para esse esquema foi introduzida por Krishnamurti et al. (1983), em que a precipitação total R é assumida ser proporcional à advecção de umidade integrada verticalmente M_{iv} , por:

$$R = M_{iv} (1 + f_{emp}) (1 - b) \quad (17)$$

Em que b é o parâmetro de umedecimento Kuo, e f_{emp} é uma constante empírica. E a precipitação do subconjunto é definida como:

$$R(\lambda) = I_1(\lambda) (1 - \beta) m_b(\lambda) \quad (18)$$

As equações (17) e (18) podem ser usadas para calcular m_b .

Um fechamento adicional que foi primeiramente introduzido por Brown (1979), e assume que o fluxo de massa na base da nuvem é proporcional ao fluxo de massa do ambiente \tilde{M} em algum nível inferior da troposfera l_t , que pode ser dado como o topo da altura da Camada Limite Planetária, o nível de convecção livre ou o nível de origem de corrente ascendente do ar. O fechamento de Brown foi modificado por Frank e Cohen (1987), assumindo:

$$m_b(\lambda) = m_u(l_t, \lambda) = \tilde{M}(l_t) - m_d(l_t, t - \Delta t) \quad (19)$$

Em que $m_d(l, t - \Delta t)$ é o fluxo de massa descendente em um passo de tempo anterior.

3.6 Descrição da Parametrização de Convecção Rasa

De acordo com Yanai *et al.* (1973) e Betts (1975), os transportes turbulentos de calor e de umidade podem ser parametrizados como:

$$\overline{w's'_t} = \frac{M_c}{\rho} (s_{in} - \bar{s}) = \frac{M_c}{\rho} (s_n - L_{q_{in}} - \bar{s}) \quad (20)$$

e

$$\overline{w'q'_t} = \frac{M_c}{\rho} (q_{in} - \bar{q}_t) = \frac{M_c}{\rho} (q_{vn} + q_{in} - \bar{q}_t) \quad (21)$$

em que ρ é a densidade do ar, o subscrito c representa variáveis referentes à nuvem, a barra representa os valores médios do ambiente, e M_c é o fluxo de massa convectivo (Yanai *et al.*, 1973), dado por:

$$M_c = \rho \sigma w_c \quad (22)$$

em que σ é a área fracional coberta por correntes ativas dentro da nuvem e w_c é a velocidade vertical correspondente.

No esquema proposto por Souza (1999), o fluxo de massa convectivo foi determinado a partir do princípio da convecção como uma máquina térmica (Rennó & Ingersoll, 1996), que se baseia no fato de que as circulações convectivas são forçadas por uma máquina operando entre dois reservatórios de calor: um quente (superfície da terra) e outro frio (região da atmosfera onde o calor é rejeitado). O fechamento desse esquema se baseia na segunda lei da termodinâmica e considera os fluxos convectivos como resultado

da conversão de calor em trabalho. Detalhes da derivação podem ser encontrados em Souza (1999). O fluxo de massa convectivo na base da nuvem pode ser escrito na forma:

$$M_c = \frac{\eta F_{ab}}{TCAPE} \quad (23)$$

em que η é a eficiência termodinâmica de uma máquina de Carnot, operando entre os reservatórios quente (a superfície) e frio (a camada convectiva). F_{ab} é o forçante convectivo e é dado pela soma dos fluxos de calor latente e de calor sensível à superfície. $TCAPE$ é o empuxo total das parcelas em convecção.

O raciocínio por trás da Equação (23) é que a energia disponibilizada pela máquina térmica convectiva é usada para gerar empuxo que, por sua vez, é usado para vencer o efeito da dissipação.

Uma vez que a base e o topo da nuvem são determinados, o fluxo de massa em qualquer nível pode ser obtido interpolando-se o fluxo de massa do seu valor na base, dado pela equação (23), para zero no topo da nuvem.

3.5 Descrição do Modelo Utilizado

O modelo numérico usado neste trabalho é o “*Brazilian Regional Atmospheric Modeling System*” – BRAMS, na versão 2.04, que foi desenvolvido a partir do RAMS cuja estrutura básica é descrita por Pielke *et al.* (1992). Uma descrição sucinta e objetiva desse modelo pode ser encontrada em Cavalcanti (2001), em versão anterior.

O BRAMS é um modelo regional de mesoescala que se baseia nas equações básicas da dinâmica dos movimentos atmosféricos juntamente com as equações que regem a termodinâmica e a continuidade de massa da atmosfera. O modelo é integrado na versão

não-hidrostática e inclui no seu código várias opções de parametrizações físicas, tais como: a de radiação de onda longa e de onda curta, que segue a formulação de Chen & Cotton (1983). A turbulência na Camada Limite Planetária é calculada segundo Mellor & Yamada (1986). A microfísica segue o esquema descrito por Walko et al. (1995) e Meyess et al. (1997). A convecção profunda que é do tipo Kuo (Kuo, 1965; 1974), modificada por Molinari (1985) e Molinari & Corsetti (1985). Também está disponível, para essa versão do BRAMS, a parametrização de convecção do tipo Grell (Grell & Dévényi, 2002), a qual dispõe de uma gama de opções de esquemas de parametrização. São eles, ensemble (EN), grell (GR), low level omega (LO), moisture convergence (MC), Kain Fritsch (SC) e Arakawa-Schubert (AS). A parametrização da convecção rasa foi desenvolvida e implementada por Souza (1999), descrita anteriormente.

3.6 Descrição dos Experimentos

Esta pesquisa objetiva analisar qual o melhor esquema de parametrização de cúmulos para a região tropical do Brasil, em termos da previsão do ciclo diurno de precipitação e da evolução temporal de outras variáveis como fluxos de calor latente e sensível, radiação de onda longa e onda curta, taxas de aquecimento devida à convecção rasa e profunda e o vetor vento. Na realização dessas simulações numéricas, o modelo BRAMS foi iniciado, às 00:00 UTC do dia 20 de janeiro de 1999, e integrado durante um período de 96 horas, ou seja, até as 00:00 UTC do dia 24 de janeiro de 1999. A integração foi feita para duas grades, a primeira com uma resolução de 80 km e a segunda (aninhada à primeira) com uma resolução de 20 km, $\frac{1}{4}$ da primeira. A região de estudo, para a primeira grade, corresponde a área de 80°W à 29°W e 38°S à 5°N abrangendo todo o Brasil, e para a

segunda grade corresponde a 70°W à 56°W e 18°S à 4°S. Os dados utilizados para a inicialização do modelo são do *Large-Scale Biosphere Atmosphere* (LBA), para a região de Rondônia.

O número de pontos de grade nos eixos x e y foram 62, para a grade de 80 km, e 82, para a grade de 20 km e o passo de tempo foi de 60 s. O “nudging”, forçante nos pontos laterais, teve escala de tempo de 1/2 hora e não foi aplicado no centro do domínio. O solo é do tipo franco, contendo 7 camadas. Durante essas simulações, a microfísica de nuvens no modelo foi ativada apenas no segundo nível, implicando em uma remoção de supersaturação de grande escala. As simulações foram feitas desta forma para todos os experimentos. Foram realizados 7 experimentos, dos quais 7 saídas foram feitas para a primeira grade (EXPEN1, EXPGR1, EXPLO1, EXPMC1, EXPSC1, EXPAS1, EXPKUO1) e 7 saídas para a segunda grade (EXPEN2, EXPGR2, EXPLO2, EXPMC2, EXPSC2, EXPAS2, EXPKUO2). A diferença entre cada um deles foi o esquema de parametrização convectiva utilizado e a resolução da grade. Os experimentos EXPKUO1 e EXPKUO2 foram feitos utilizando-se o esquema de parametrização convectiva padrão do BRAMS, o esquema Kuo, nas grades 1 e 2, respectivamente. No restante dos experimentos o esquema de parametrização convectiva utilizado foi o Grell, porém à ele foram associados fechamentos que se baseiam em esquemas tipo Arakawa & Schubert (1974), determinação do fluxo de massa, ou esquemas tipo Kuo, relação entre convergência de vapor em grade escala e precipitação convectiva, por exemplo. A Tabela 1 mostra o esquema de parametrização convectiva utilizado e a equação correspondente para cada fechamento para todos os experimentos realizados.

Tabela 1 – Descrição do fechamento de cada experimento realizado

Experimento		Esquema de Parametrização Utilizado	Equação correspondente para cada fechamento
Grade1 (80km)	Grade2 (20km)		
EXPEN1	EXPEN2	Ensemble	Média aritmética dos outros fechamentos do Grell
EXPGR1	EXPGR2	Grell	Equação (15), onde <i>A</i> é calculado localmente
EXPLO1	EXPLO2	Low Level Omega	Equação (19)
EXPMC1	EXPMC2	Moisture Convergence	Equações (17) e (18)
EXPSC1	EXPSC2	Kain Fritsch	Equação (16)
EXPAS1	EXPAS2	Arakawa-Schubert	Equação (15), onde usa-se valor climatológico de <i>A</i>
EXPKUO1	EXPKUO2	Kuo	Equações (1) e (2)

A discussão será baseada em uma média de 4 por 4 graus, correspondente a área entre 64°W e 60°W e 13°S e 9°S, que abrange quase todo o estado de Rondônia, região Norte. Para as variáveis fluxo de calor latente, fluxo de calor sensível, radiação de onda longa e radiação de onda curta, e precipitação essa média foi feita para o nível de 1000mb, obtendo-se, dessa maneira, uma evolução temporal destes campos. Com relação às taxas de aquecimento/umedecimento, devidas à convecção profunda e convecção rasa, obteve-se a evolução temporal dos perfis verticais médios na área. Para os campos do vetor vento foi feita uma média temporal, durante todo o período da simulação.

CAPÍTULO 4

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os efeitos de cada esquema de parametrização de convecção serão estudados com base na precipitação convectiva e outras variáveis como as taxas de aquecimento e umedecimento devidas à convecção rasa e devidas à convecção profunda, vetor vento, fluxos de calor latente e sensível, radiação de onda longa e onda curta, produzidas ao longo da integração de 96h. Os experimentos realizados foram descritos anteriormente. Os campos utilizados neste estudo foram analisados de duas maneiras: 1) comparando-se cada esquema de parametrização convectiva com o esquema Kuo, para uma mesma grade da simulação; 2) comparando-se as duas grades para um mesmo esquema. As grades utilizadas neste estudo são mostradas nas Figuras 2 e 3, e são referenciadas como grade 1 e grade 2, respectivamente.

O primeiro dia da simulação não será discutido com profundidade porque grande parte do efeito pode ser atribuída ao processo de ajuste do modelo numérico às condições iniciais e não ao impacto da parametrização em si.

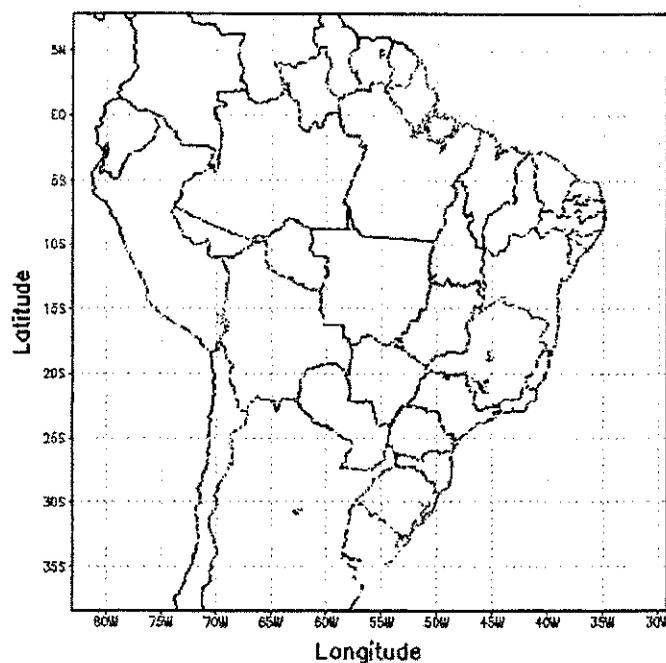


Fig. 2 – Área da grade 1 da simulação

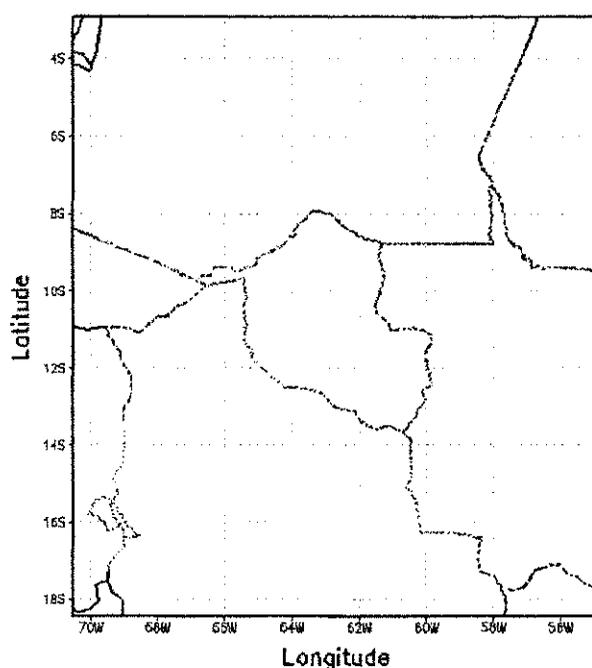


Fig. 3 – Área da grade 2 da simulação, tendo ao centro o estado de Rondônia.

4.1 Comparação entre os Esquemas de Parametrização Convectiva para a Grade 1:

A Figura 4 mostra a evolução temporal da precipitação convectiva acumulada (mm) para cada experimento realizado durante o período de quatro dias e para a

grade 1. Com relação à proximidade entre os valores das curvas, observam-se dois grupos distintos. O primeiro grupo, composto pelos experimentos EXPGR1, EXPMC1, EXPSC1 e EXPLO1, apresenta valores máximos de precipitação acumulada variando entre 60mm, com o EXPLO1, e 90mm, com o EXPGR1. O segundo grupo, composto pelos experimentos EXPEN1, EXPKUO1 e EXPAS1, apresentou valores máximos de precipitação acumulada variando entre 18mm com os experimentos EXPAS1 e EXPKUO1 e 30mm com o EXPEN1. Todos os experimentos apresentam valores de precipitação acumulada muito maiores que o esquema Kuo, exceto o EXPAS1. Note-se também que as inclinações das curvas tendem a ser diferentes para cada esquema, o que ressalta a diversidade de comportamento entre eles ao longo da simulação.

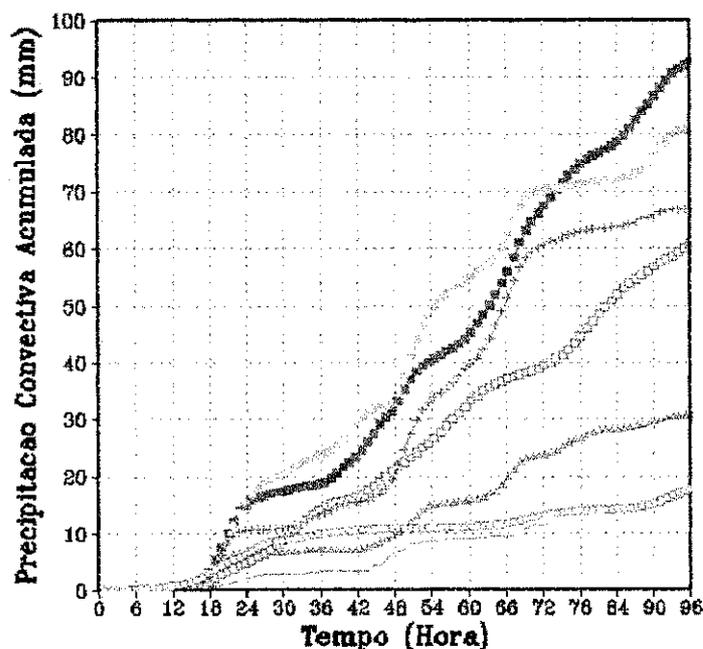


Fig. 4 - Evolução temporal da precipitação convectiva acumulada (mm) para os experimentos EXPEN1 (azul escuro), EXPGR1 (verde), EXPLO1 (vermelho), EXPMC1 (amarelo), EXPSC1 (rosa), EXPAS1 (azul claro) e EXPKUO1 (cinza)

A evolução temporal da diferença da precipitação entre cada esquema de parametrização com o esquema Kuo é mostrada na Figura 5. Observam-se diferenças bastante significativas entre os experimentos. O experimento que se distanciou mais do

esquema Kuo foi o EXPGR1, que apresentou cerca de 75mm a mais que o EXPKUO1. O experimento que mais se aproximou do esquema Kuo foi o EXPAS1, que praticamente não apresentou diferença. Nos dias 21 e 22 o EXPAS1 apresentou valores de precipitação menores que o esquema Kuo, cuja diferença chega à cerca de 8 mm no dia 21. Os valores da diferença de precipitação para os demais experimentos foram aproximadamente: 65mm para EXPMC1, 50 mm para EXPSC1, 42 mm para EXPLO1 e 14 mm para EXPEN1.

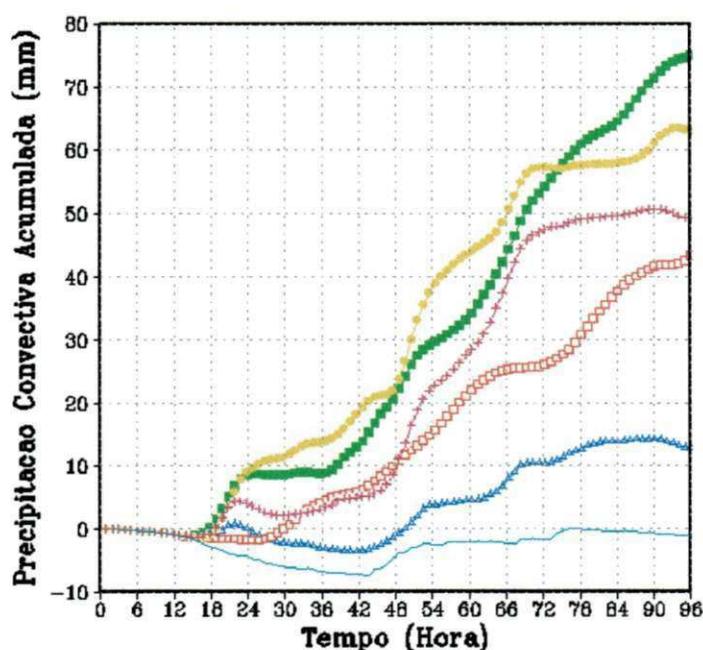


Fig. 5 – Evolução temporal da diferença da precipitação entre os experimentos, EXPEN1-EXPKUO1 (azul escuro), EXPGR1-EXPKUO1 (verde), EXPLO1-EXPKUO1 (vermelho), EXPMC1-EXPKUO1 (amarelo), EXPSC1-EXPKUO1 (rosa) e EXPAS1-EXPKUO1 (azul claro)

A Figura 6 é adaptada de Betts & Jakob (2002) e mostra o ciclo diurno médio da taxa de precipitação observada (mm/h). A linha cheia corresponde a média entre os dias 20 e 28 de janeiro de 1999, período de domínio dos ventos de leste. A linha pontilhada corresponde à média dos dias 20, 24, 30, 31, 38, 44 e 48, que coincidem com a passagem de uma forte banda de precipitação no local de medição. Os valores observados mostram um valor mínimo de precipitação entre as 12 e 18 UTC (8 e 14 horas local), de 0

mm/h, ou seja, não há precipitação nesse intervalo. Após as 17 UTC (13 horas local) há um aumento da taxa de precipitação, com um máximo de aproximadamente 1,3 mm/h entre as 21 e 22 UTC. O que se pretende é comparar as taxas de precipitação dos esquemas utilizados nas simulações com esses valores médios.

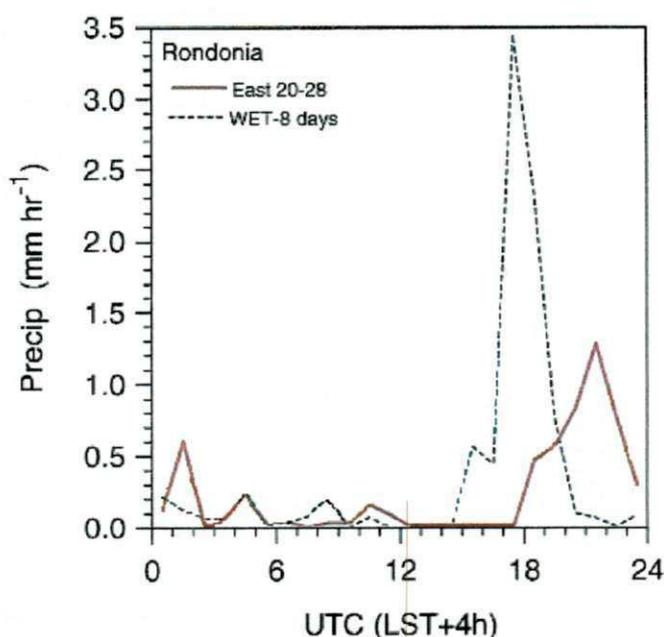


Fig. 6 – Ciclo diurno da taxa de precipitação (mm/h) média observada em Rondônia (adaptada de Betts & Jakob, 2002)

As Figuras 7 a 9 mostram a evolução temporal da taxa de precipitação (mm/h) para os sete experimentos realizados. Com o objetivo de comparar cada esquema de parametrização convectiva com o esquema padrão do RAMS, o esquema Kuo está presente nas três figuras.

A Figura 7 mostra a evolução temporal da taxa de precipitação para os experimentos EXPAS1, EXPEN1 e EXPKUO1. O esquema AS apresenta uma grande oscilação entre máximos e mínimos no decorrer do seu ciclo diurno. É interessante observar que o esquema Kuo apresenta valores de uma ordem de magnitude menor que os esquemas AS e EN em alguns intervalos de tempo. Entre as 42 e 54 horas os experimentos EXPAS1 e EXPEN1 apresentam valores máximos que variam entre 1,0 e 1,2 mm,

enquanto que o EXPKUO1 não detecta precipitação. Os três experimentos apresentam as maiores taxas de precipitação no período de tarde, o que concorda com o observado na Figura 6. E embora o primeiro dia da simulação não seja muito confiável foi ele que melhor representou esse ciclo diurno caracterizando inclusive o aumento da precipitação após as 17 UTC, quando o EXPEN1 se aproximou mais do valor observado, com cerca de 1,5 mm/h e uma queda desse valor logo após as 21 UTC. O EXPKUO1 subestimou os valores de precipitação observados durante os quatro dias. No último dia da simulação o EXPKUO1 apresentou um comportamento semelhante ao observado na Figura 5, porém com magnitude inferior.

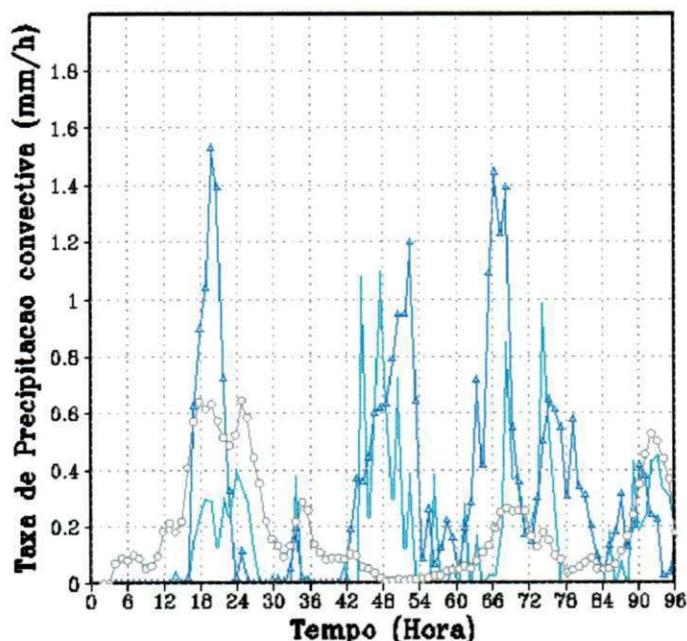


Fig. 7 – Evolução temporal da taxa de precipitação convectiva (mm/h) para os experimentos EXPAS1 (azul claro), EXPEN1 (azul escuro) e EXPKUO1 (cinza) na grade 1 da simulação

A Figura 8 mostra a evolução temporal da taxa de precipitação (mm/h) para os experimentos EXPGR1, EXPLO1 e EXPKUO1. O EXPLO1 apresentou valores máximos de precipitação justamente quando não é observada precipitação (ver Figura 6). O EXPGR1 superou a precipitação dos experimentos EXPLO1 e EXPKUO1, além da média observada. É interessante observar a grande diferença entre o EXPGR1 e

EXPKUO1, que por volta de 69 horas chega a cerca de 2,3 mm/h. Nota-se também que sempre onde o EXPGR1 e o EXPKUO1 registram um valor máximo o EXPLO1 registra um mínimo, e vice-versa. Isso indica que o esquema LO não está reproduzindo bem o ciclo diurno de precipitação.

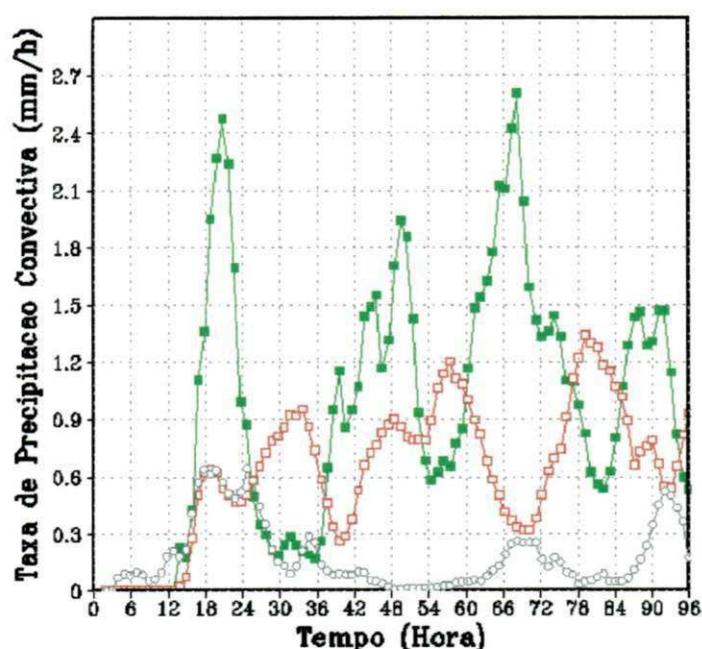


Fig. 8 – Evolução temporal da taxa de precipitação convectiva (mm/h) para os experimentos EXPGR1 (verde), EXPLO1 (vermelho) e EXPKUO1 (cinza) na grade 1 da simulação

A Figura 9 mostra a evolução temporal da taxa de precipitação para os experimentos EXPSC1, EXPMC1 e EXPKUO1. Os experimentos EXPMC1 e EXPSC1 apresentam valores próximos, entre eles, e muito maiores que o esquema Kuo. Entre 48 e 54 horas de simulação, os experimentos EXPMC1 e EXPSC1 apresentam os maiores valores de toda a simulação, cerca de 3,5 e 2,8 mm/h respectivamente, enquanto que o esquema Kuo não causa precipitação. Como esse período se trata das 0 às 6 UTC do dia 22, na média dos valores observados é visto que há um registro de pouca precipitação nesse horário, com um máximo de 0,6mm/h. No último dia da simulação, entre 72 e 96 horas, o EXPMC1 foi o experimento que mais se aproximou do ciclo diurno médio observado, para o período dos ventos de leste. Os experimentos EXPMC1 e EXPSC1

apresentaram valores próximos à média observada com relação aos dias úmidos (linha tracejada, ver Figura 6).

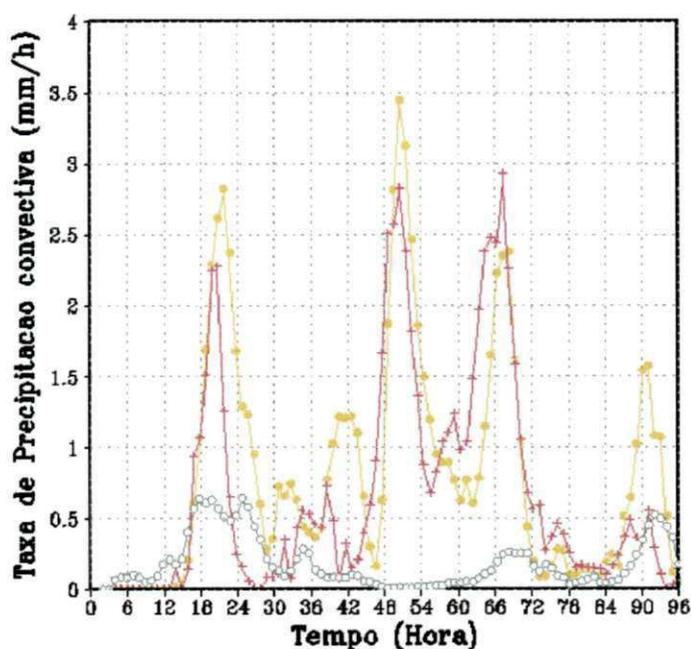


Fig. 9 – Evolução temporal da taxa de precipitação convectiva (mm/h) para os experimentos EXPMC1 (amarelo), EXPSC1 (rosa) e EXPKUO1 (cinza) na grade 1 da simulação

A Figura 10 mostra o ciclo diurno médio, entre os dias 20 e 28 de janeiro de 1999, do fluxo de calor latente à superfície, adaptada de Betts & Jakob (2002). O valor máximo do fluxo de calor latente ocorre entre 16 e 17 UTC (12 e 13 horas local), com aproximadamente 400 Wm^{-2} . O período em que o fluxo de calor latente é positivo é das 6 às 18 horas local.

A Figura 11 mostra a evolução temporal do fluxo de calor latente na superfície para os sete experimentos realizados na grade 1 da simulação. O EXPGR1 mostrou os maiores valores de fluxo de calor latente, aproximadamente 650 Wm^{-2} nos dias 21 e 22 e 540 Wm^{-2} no dia 23, por volta das 14 horas local (18 UTC) em todos os dias. O EXPMC1 apresentou valores próximos do EXPGR1 no dia 21, com um pico em torno de 600 Wm^{-2} , mas nos dois últimos dias da simulação esse valor caiu cerca de 200 Wm^{-2} , aproximando-se assim dos valores médios observados (ver Figura 10). O EXPLO1

mostrou um pico de aproximadamente 550W/m^2 no dia 21, seguido de uma queda de quase 300W/m^2 nos dois últimos dias. Os experimentos EXPSC1 e EXPAS1 tiveram valores próximos no dia 21, com pico em torno de 450W/m^2 . Mas nos dois últimos dias esses experimentos se distanciaram, de modo que o EXPAS1 manteve o seu valor máximo, sendo assim o experimento que mais se aproximou dos valores observados durante os quatro dias. O EXPEN1 mostrou valores muito próximos das médias observadas nos dias 21 e 23, apesar de apresentar cerca de 180W/m^2 a mais que a média observada no dia 22. O EXPKUO1 apresentou o menor valor no dia 21, aproximadamente 250W/m^2 , tendo um ligeiro aumento nos dois últimos dias, onde se tornou o mais próximo da média observada, com aproximadamente 350W/m^2 no último dia. Em geral o esquema Kuo apresentou valores muito menores que os outros experimentos e a média. No último dia os experimentos ficaram mais próximos entre si e da média. De forma geral, os fechamentos associados ao esquema Grell apresentaram picos de fluxo de calor latente acima do observado (Figura 10). O resultado mais aproximado foi o do EXPAS1.

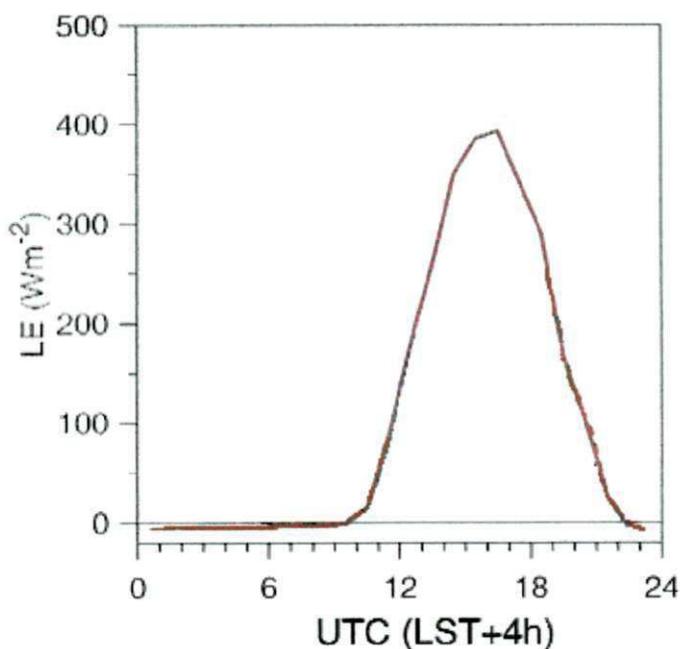


Fig. 10 – Fluxo de calor latente médio observado na superfície (Wm^{-2}) em Rondônia (adaptada de Betts & Jakob, 2002)

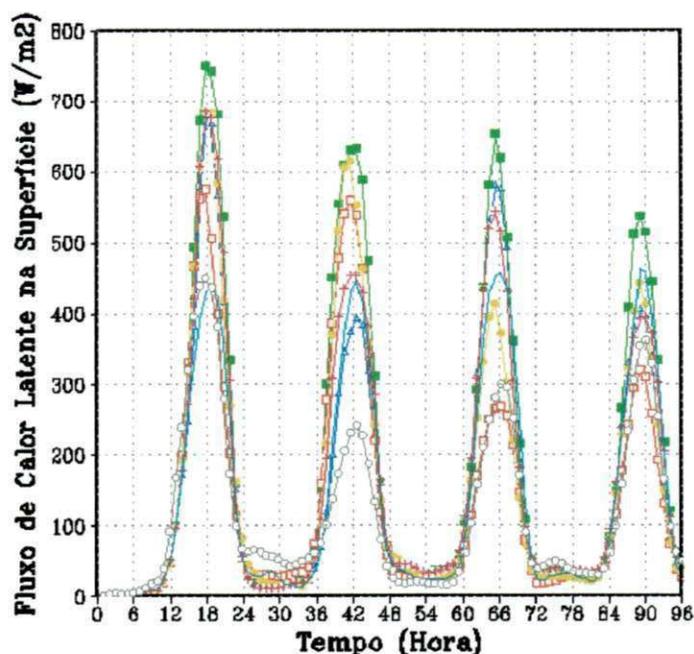


Fig. 11 – Evolução temporal do fluxo de calor latente à superfície (W/m^2) para os experimentos EXPEN1 (azul escuro), EXPGR1 (verde), EXPLO1 (vermelho), EXPMCI1 (amarelo), EXPSC1 (rosa), EXPAS1 (azul claro) e EXPKUO1 (cinza) na grade 1

A Figura 12 mostra o ciclo diurno médio observado do fluxo de calor sensível à superfície, adaptada de Betts & Jakob (2002). Os valores positivos de calor sensível ocorrem entre 6 e 18 horas local, com pico entre 11 e 13 hora local (15 e 17 UTC) de aproximadamente $175Wm^{-2}$.

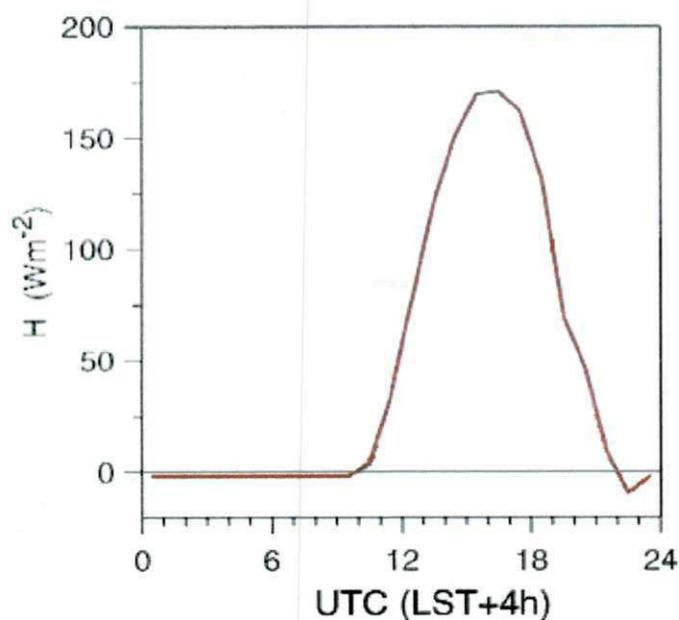


Fig. 12 – Fluxo de calor sensível médio observado à superfície (Wm^{-2}) em Rondônia (adaptada de Betts & Jakob, 2002)

A evolução temporal do fluxo de calor sensível à superfície para os sete experimentos da grade 1 da simulação pode ser vista na Figura 13. O experimento EXPAS1 apresentou os maiores valores de fluxo de calor sensível, cerca de 330 Wm^{-2} nos três últimos dias. O experimento que apresentou os menores valores foi o EXPKUO1, com cerca de 60 Wm^{-2} nos dias 21 e 22 e aproximadamente 100 Wm^{-2} no dia 23. O EXPSC1 apresentou um valor máximo de aproximadamente 360 Wm^{-2} no dia 21, enquanto que nos dias 22 e 23 apresentou valores bem menores, cerca de 80 e 40 Wm^{-2} , respectivamente. O EXPLO1 mostrou cerca de 180 Wm^{-2} no dia 21, sendo que esse valor caiu para aproximadamente 30 Wm^{-2} nos dois últimos dias. Nenhum experimento apresentou valores próximos da média em todos os dias, havendo apenas casos isolados. No dia 21 os esquemas que mais se aproximaram da média foram o EXPLO1 e EXPGR1, nos dias 22 e 23 foi apenas o EXPEN1 que se aproximou da média observada. A Figura 13 mostra também que, dependendo do fechamento usado, existe a diferença de até duas horas entre alguns esquemas, em relação ao valor de pico.

A Figura 14 mostra a evolução temporal da radiação de onda longa para os sete experimentos na grade 1 da simulação. Observa-se que o experimento EXPKUO1 apresenta o mesmo comportamento, porém mantém-se distante dos outros experimentos durante os quatro dias da simulação, apresentando picos de aproximadamente 445 W/m^2 nos dois últimos dias. Por outro lado, EXPAS1 apresenta os maiores valores entre os experimentos com aproximadamente 480 W/m^2 e 485 W/m^2 nos dias 22 e 23, exceto no dia 21 em que o EXPSC1 o ultrapassa. Os outros experimentos apresentam evolução temporal com valores razoavelmente próximos entre eles. Isso mostra que não há, em média, muito impacto entre os fechamentos associados ao esquema Grell na configuração

do campo de radiação emitida pela superfície, porém comparados ao esquema padrão Kuo vê-se algum impacto. A maior diferença é vista entre os esquemas AS e Kuo.

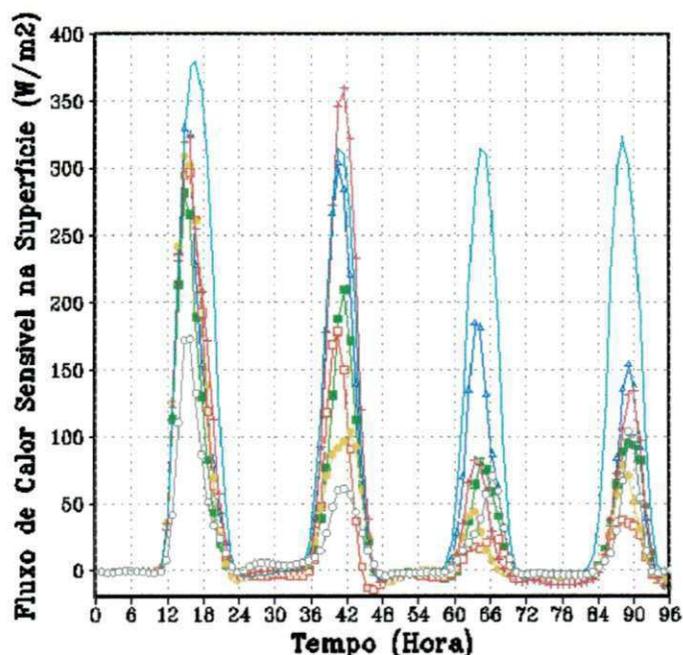


Fig. 13 – Evolução temporal do fluxo de calor sensível à superfície (W/m^2) para os experimentos EXPEN1 (azul escuro), EXPGR1 (verde), EXPLO1 (vermelho), EXPMC1 (amarelo), EXPSC1 (rosa), EXPAS1 (azul claro) e EXPKUO1 (cinza) na grade 1

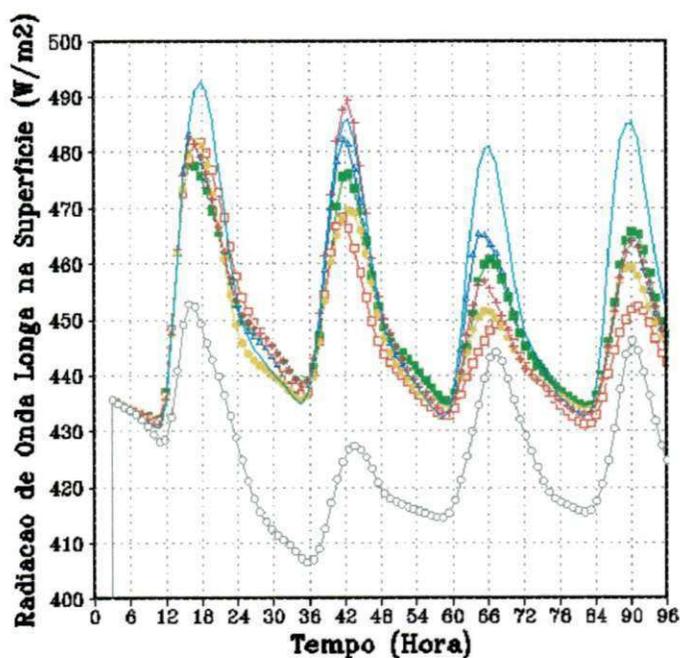


Fig. 14 – Evolução temporal da radiação de onda longa à superfície (W/m^2) para os experimentos EXPEN1 (azul escuro), EXPGR1 (verde), EXPLO1 (vermelho), EXPMC1 (amarelo), EXPSC1 (rosa), EXPAS1 (azul claro) e EXPKUO1 (cinza) na grade 1

A Figura 15 mostra a evolução temporal da radiação de onda curta à superfície para os sete experimentos na grade 1 da simulação. No dia 21 observa-se que os experimentos EXPGR1 e EXPSC1 estão muito próximos, e apresentam o maior pico, com cerca de 950 W/m^2 . O menor valor para esse dia é apresentado pelo EXPKUO1 que se mantém muito distante dos demais experimentos, com um pico de aproximadamente 350 W/m^2 . Os demais experimentos apresentam valores próximos entre eles, com pico variando entre 750 e 800 W/m^2 nesse dia. Nos dois últimos dias da simulação o EXPLO1 apresenta os menores valores, cerca de 330 e 400 W/m^2 para os dias 22 e 23. No último dia da simulação todos os experimentos apresentam valores mais próximos do que nos dias anteriores, embora ainda tenha uma grande margem de variação, onde o EXPLO1 apresenta o menor pico, cerca de 400 W/m^2 e o EXPAS1 apresenta o maior pico, cerca de 820 W/m^2 . A Figura 15 mostra a eficiência do esquema Grell em reciclar o vapor atmosférico. Com isso, há menos atenuação da radiação de onda curta em comparação com o EXPKUO1, que, por remover menos vapor, faz com que haja mais condensação na escala da grade e essa água condensada atenua mais fortemente a radiação solar.

A Figura 16 mostra a evolução temporal da taxa de aquecimento devida à convecção profunda para o experimento EXPKUO1 na grade 1 da simulação. Observa-se que a atmosfera é aquecida até aproximadamente 200 hPa nos dias 20 e 23 e, nos dias 21 e 22, até aproximadamente 300 hPa . Entre 1000 e 950 hPa observa-se uma forte taxa de aquecimento, entre 24 e 36 horas, que corresponde ao período noturno. É interessante observar que nesse mesmo intervalo de tempo foi registrado pelo esquema Kuo uma grande queda de radiação de onda longa (ver Figura 14). Nos dois últimos dias não se observa aquecimento tão intenso no período noturno, exceto a partir do final da tarde do último dia da simulação. É interessante notar que há uma região de aquecimento negativo

por volta de 900 hPa. Essa região é, tipicamente associada com energia de inibição convectiva.

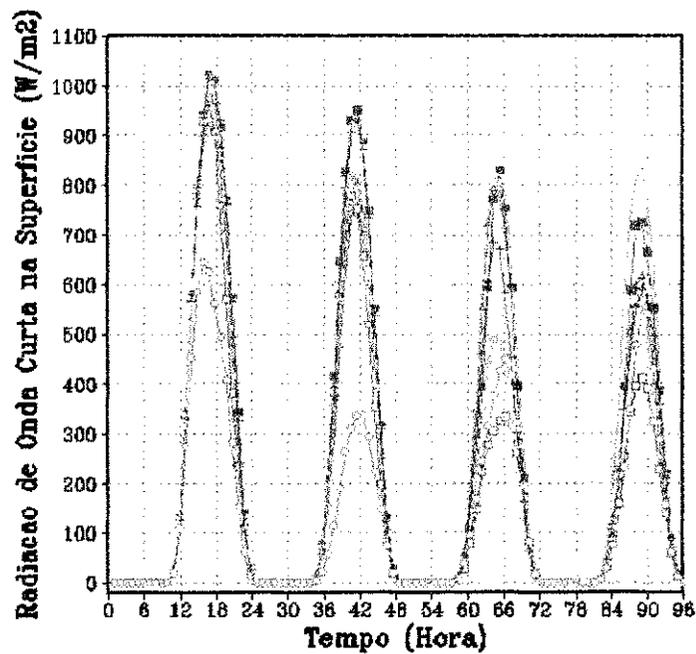


Fig. 15 – Evolução temporal da radiação de onda curta à superfície (W/m^2) para os experimentos EXPEN1 (azul escuro), EXPGR1 (verde), EXPLO1 (vermelho), EXPMC1 (amarelo), EXPSC1 (rosa), EXPAS1 (azul claro) e EXPKUU1 (cinza) na grade 1

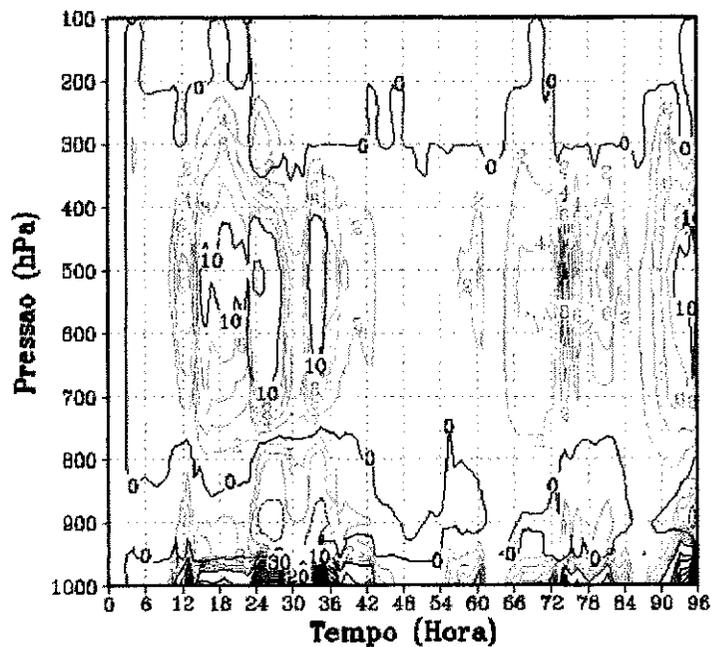


Fig. 16 – Evolução temporal da taxa de aquecimento devido à convecção profunda (K/dia) para o experimento EXPKUU1 na grade 1 da simulação

As Figuras 17 a 22 mostram a evolução temporal da diferença da taxa de aquecimento devida à convecção profunda (K/dia) entre cada experimento e o esquema Kuo, na grade 1 da simulação.

A evolução temporal da diferença da taxa de aquecimento devida à convecção profunda entre os experimentos EXPAS1 e EXPKUO1 na grade 1 da simulação é vista na Figura 17: Observa-se que próximo à superfície, entre 1000 e 900 hPa, o esquema Kuo aqueceu mais que o AS, mais de 10K/dia, nos dias 21 e 23, sendo que abrange uma área maior no dia 21. No dia 22 os dois esquemas se aproximam nos níveis mais baixos. Numa pequena faixa vertical do dia 21, entre aproximadamente 900 e 800 hPa, o esquema AS aquece mais que o Kuo, cerca de 4 K/dia. Nos dias 21 e 23, entre aproximadamente 700 e 300mb, é o esquema Kuo que aquece mais a atmosfera, cerca de 4 K/dia. Isso é resultado direto do fato de a precipitação no esquema Kuo ter sido maior que a do AS nos primeiros dias (ver Figura 5). É interessante observar que nesses dois dias o esquema Kuo apresentou um maior fluxo de calor latente e sensível na superfície, e uma radiação de onda longa menor nesse horário. No dia 22 o esquema AS aquece mais que o esquema Kuo, cerca de 6 K/dia.

A Figura 18 mostra a evolução temporal da taxa de aquecimento devida a convecção profunda entre os experimentos EXPEN1 e EXPKUO1 na grade 1 da simulação. Entre 1000 e 900 hPa o esquema Kuo aqueceu mais que o EN no dia 21 e após as 92 horas, no dia 23, cerca de 10 K/dia. As Figuras 17 e 18 apresentam configurações parecidas, conseqüentemente, os esquemas EXPAS1 e EXPEN1 também apresentam uma estrutura vertical de aquecimento devido da convecção profunda semelhante. Contudo o EXPEN1 apresenta um aquecimento mais profundo que o Kuo e o AS, chegando a aproximadamente 100 hPa. No dia 21 o esquema Kuo aqueceu cerca de 4 K/dia a mais que o esquema AS, enquanto que nos dias 22 e 23 o esquema AS aqueceu mais, cerca de 6 e 10

K/dia respectivamente. Isso também é visto na taxa de precipitação, visto que o EXPEN1 apresentou mais precipitação que os experimentos EXPAS1 e EXPKUO1.

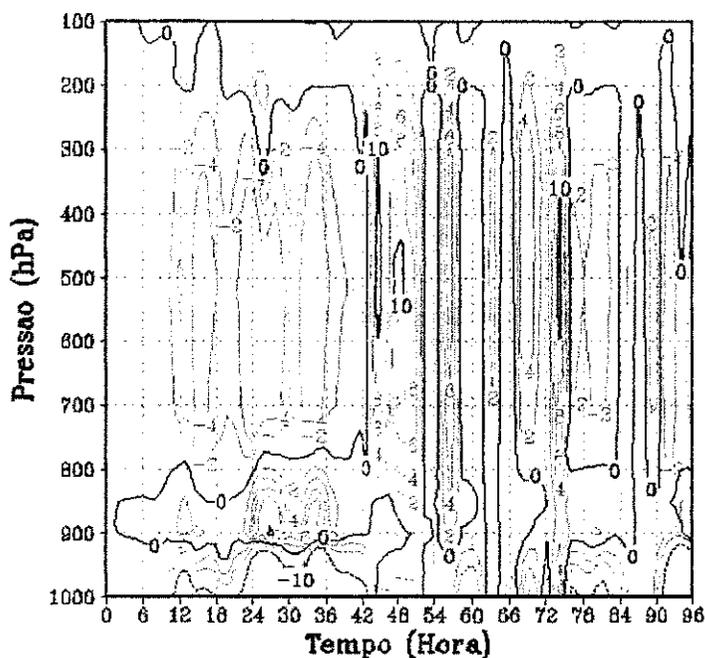


Fig. 17 – Evolução temporal da diferença da taxa de aquecimento devida à convecção profunda (K/dia) entre os experimentos EXPAS1 e EXPKUO1 na grade 1 da simulação

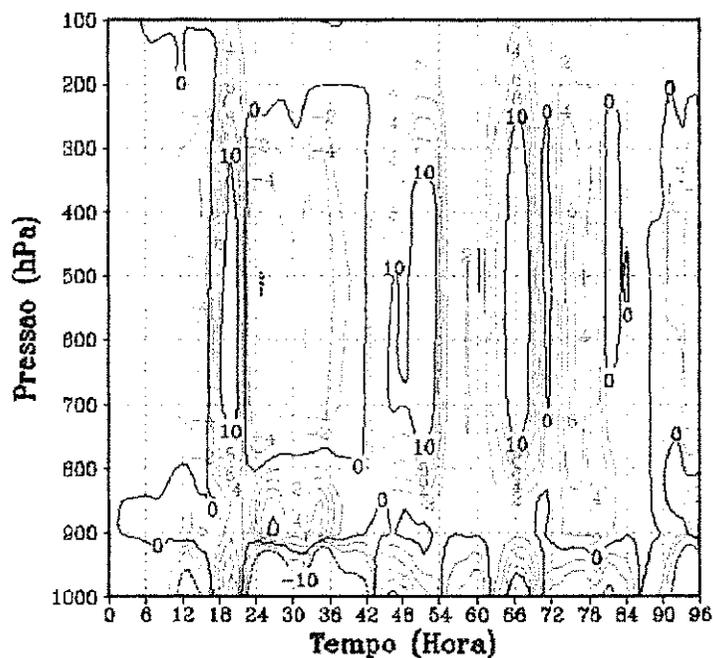


Fig. 18 – Evolução temporal da diferença da taxa de aquecimento devida à convecção profunda (K/dia) entre os experimentos EXPEN1 e EXPKUO1 na grade 1 da simulação

A evolução temporal da diferença da taxa de aquecimento devida à convecção profunda entre os experimentos EXPGR1 e EXPKUO1 é vista na Figura 19. O esquema Kuo aquece mais próximo à superfície no dia 21 e após as 92 horas de integração (20 horas local do dia 23), semelhante às duas figuras anteriores. Acima de 900 hPa o EXPGR1 aqueceu muito mais do que o esquema Kuo, cerca de 20 K/dia após as 12 UTC do dia 21, 30 K/dia após as 12 UTC do dia 22 e 10 K/dia após as 12 UTC do dia 23. O EXPGR1 apresentou um aquecimento devido à convecção profunda muito maior do que os experimentos anteriores, além desse aquecimento atingir altos níveis, até cerca de 100 hPa. Voltando aos fluxos, vale salientar que o EXPGR1 também apresenta os maiores valores de fluxo de calor latente e sensível (ver Figuras 11 e 13) além de obter a maior precipitação acumulada entre os demais esquemas (ver Figura 4).

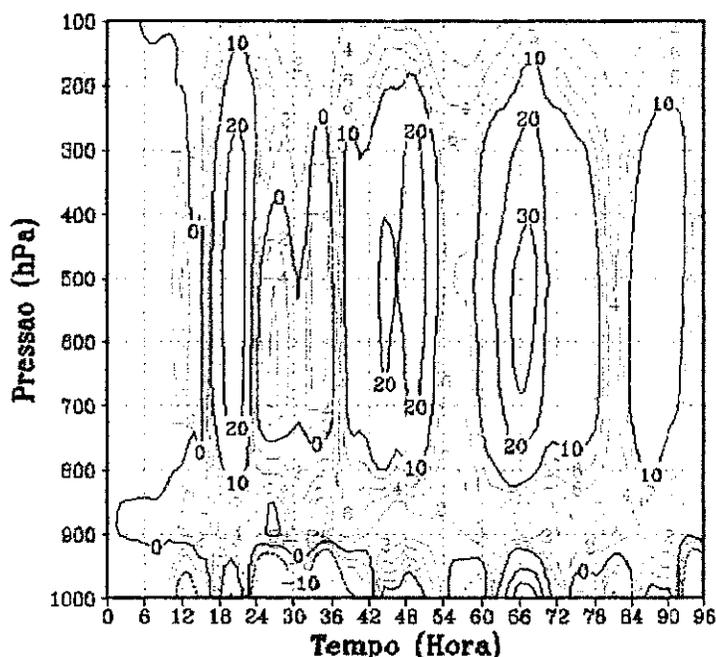


Fig. 19 – Evolução temporal da diferença da taxa de aquecimento devida à convecção profunda (K/dia) entre os experimentos EXPGR1 e EXPKUO1 na grade 1 da simulação

A Figura 20 mostra a evolução temporal da diferença da taxa de aquecimento devida à convecção profunda entre os experimentos EXPLO1 e EXPKUO1. No dia 21 o esquema Kuo aqueceu mais que o EXPLO1 cerca de 10 K/dia, entre a

superfície e 900 hPa. Acima de 900 hPa o EXPLO1 aqueceu mais que o esquema Kuo, cerca de 10 K/dia, durante todos os dias da simulação, embora não tenha apresentado diferenças tão grandes quanto o EXPGR1. É interessante observar que os fluxos de calor latente e sensível não acompanharam esse comportamento do aquecimento devido à convecção profunda.

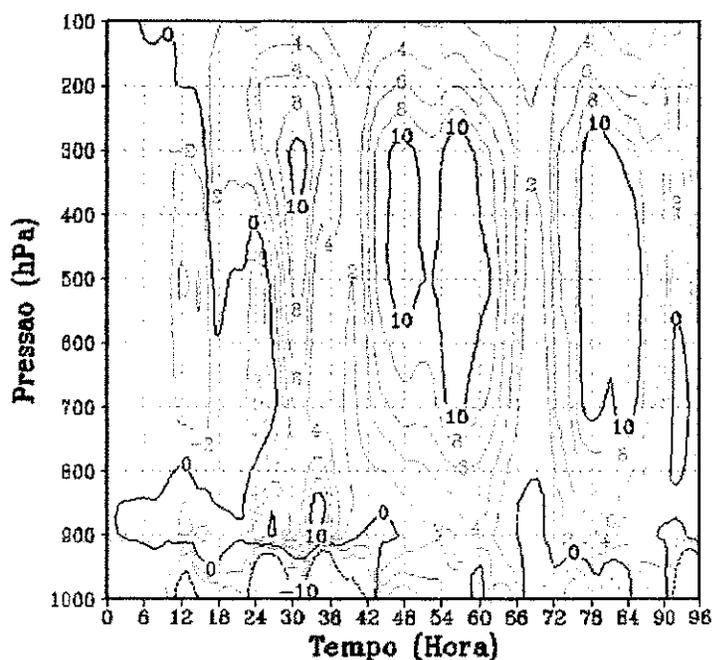


Fig. 20 – Evolução temporal da diferença da taxa de aquecimento devida à convecção profunda (K/dia) entre os experimentos EXPLO1 e EXPKUO1 na grade 1 da simulação

A Figura 21 mostra a evolução temporal da diferença da taxa de aquecimento devida à convecção profunda entre os experimentos EXPMC1 e EXPKUO1. O EXPMC1 é o experimento que apresenta a maior diferença da taxa de aquecimento devida à convecção profunda com relação ao esquema Kuo, chegando a aquecer 40K/dia a mais como mostrado entre 48 e 54 horas, até altos níveis. Abaixo de 900 hPa o esquema Kuo aquece mais nos dias 21 e 23, enquanto que o esquema MC aquece mais no dia 22.

A Figura 22 mostra a evolução temporal da diferença da taxa de aquecimento devida à convecção profunda entre os experimentos EXPSC1 e EXPKUO1 na grade 1 da simulação. Essa figura é semelhante à anterior. A diferença entre os

experimentos nos dias 21 e 22 é pequena, porém durante todo o dia 22 o EXPSC1 aqueceu mais que o esquema Kuo, chegando a valores máximos de cerca de 30 K/dia. Esse aquecimento é distribuído até 100 hPa.

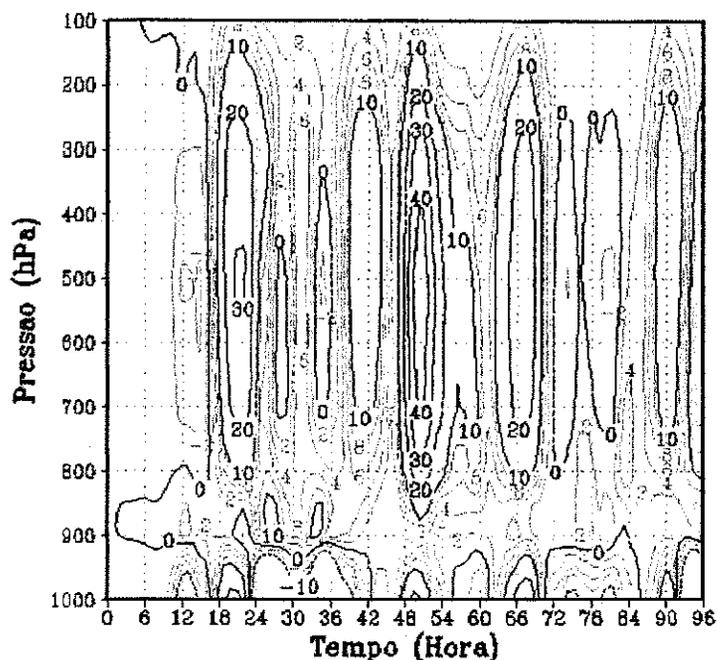


Fig. 21 – Evolução temporal da diferença da taxa de aquecimento devida à convecção profunda (K/dia) entre os experimentos EXPSC1 e EXPKUO1 na grade 1 da simulação

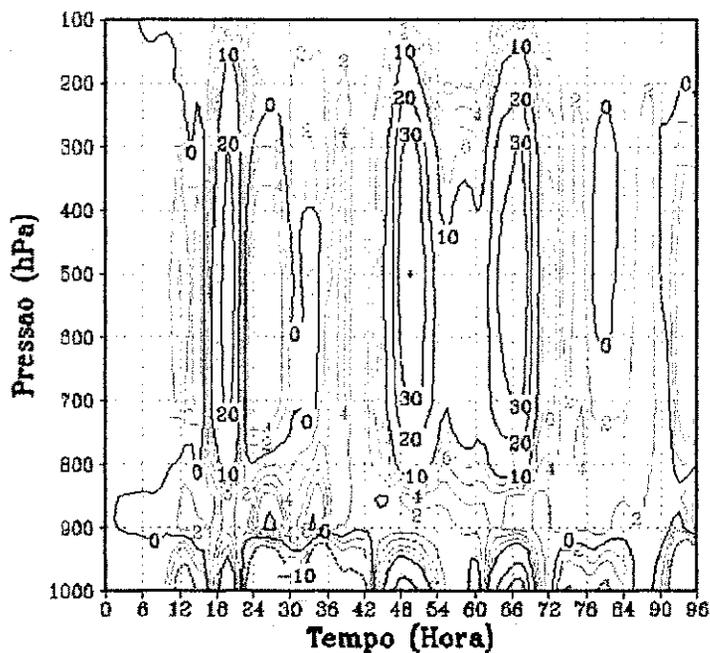


Fig. 22 – Evolução temporal da diferença da taxa de aquecimento devida à convecção profunda (K/dia) entre os experimentos EXPSC1 e EXPKUO1 na grade 1 da simulação

A Figura 23 mostra a evolução temporal da taxa de umedecimento devida à convecção profunda para o esquema Kuo na grade 1 da simulação. Observa-se que o efeito da convecção profunda é de secagem da atmosfera. O esquema Kuo apresentou uma resposta pequena da atmosfera com relação ao efeito da convecção profunda, havendo uma secagem de cerca de 4 [(g/kg)/dia] nos baixos níveis da atmosfera, entre aproximadamente 950 hPa e 750 hPa. Acima desse nível praticamente não se vê efeito da convecção profunda sobre a atmosfera, registrada pelo esquema padrão do modelo BRAMS. Entre a superfície e 950 hPa há um umedecimento da atmosfera, chegando a 10[(g/kg)/dia] após as 12 UTC (8 hora local) dos dois últimos dias da simulação. Esse efeito deve estar relacionado à reevaporação de parte da chuva antes de atingir o solo.

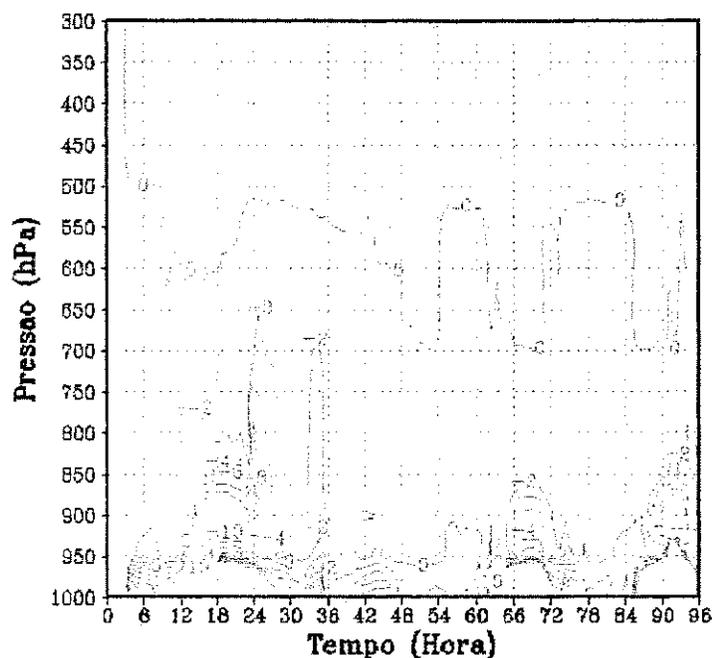


Fig. 23 – Evolução temporal da taxa de umedecimento devida à convecção profunda [(g/kg)/dia] para o experimento EXPKUO1 na grade 1 da simulação

As Figuras a seguir mostram a evolução temporal da diferença da taxa de umedecimento devida à convecção profunda entre cada esquema utilizado nesse estudo e o esquema padrão do BRAMS, o Kuo, cuja configuração é vista na figura anterior.

A evolução temporal da diferença da taxa de umedecimento devida à convecção profunda entre os experimentos EXPAS1 e EXPKUO1 na grade 1 da simulação é vista na Figura 24. Observa-se que o esquema AS secou mais a atmosfera do que o esquema Kuo, com núcleos máximos de cerca de $-6[(g/kg)/dia]$ entre 48 e 54 horas (21 horas local do dia 21 e 2 horas local do dia 22) e 72 e 78 horas (20HL do dia 22 e 2HL do dia 23). O esquema AS atingiu um nível mais profundo da atmosfera, chegando até aproximadamente 450 hPa. Após esse nível o efeito é praticamente nulo.

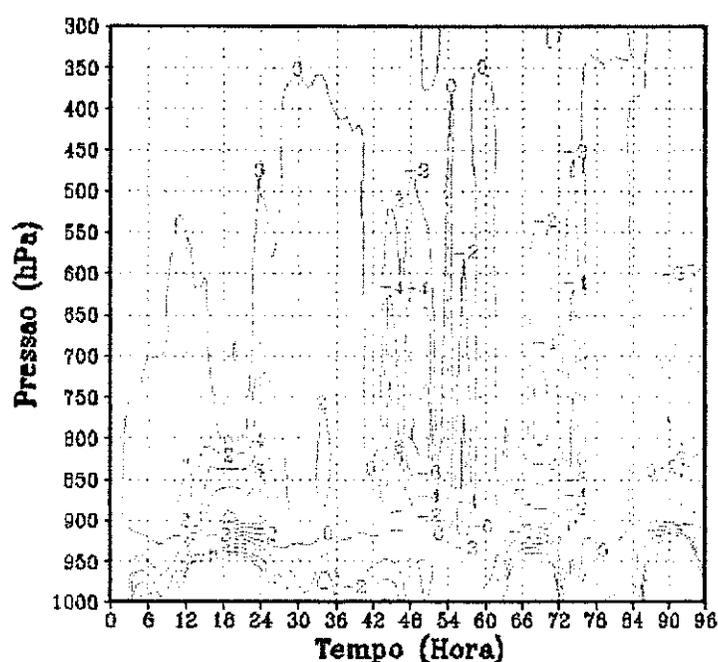


Fig. 24 – Evolução temporal da diferença da taxa de umedecimento devida à convecção profunda $[(g/kg)/dia]$ entre os experimentos EXPAS1 e EXPKUO1 na grade 1 da simulação

A Figura 25 mostra a evolução temporal da diferença da taxa de umedecimento devida à convecção profunda entre os experimentos EXPEN1 e EXPKUO1 na grade 1 da simulação, e apresenta uma configuração semelhante a Figura 24. O esquema EN também secou mais que o esquema Kuo, principalmente nos médios e baixos níveis, chegando esse efeito até por volta do nível de 400 hPa no dia 22. As maiores diferenças são encontradas após as 12 UTC (8 hora local) no dia 22.

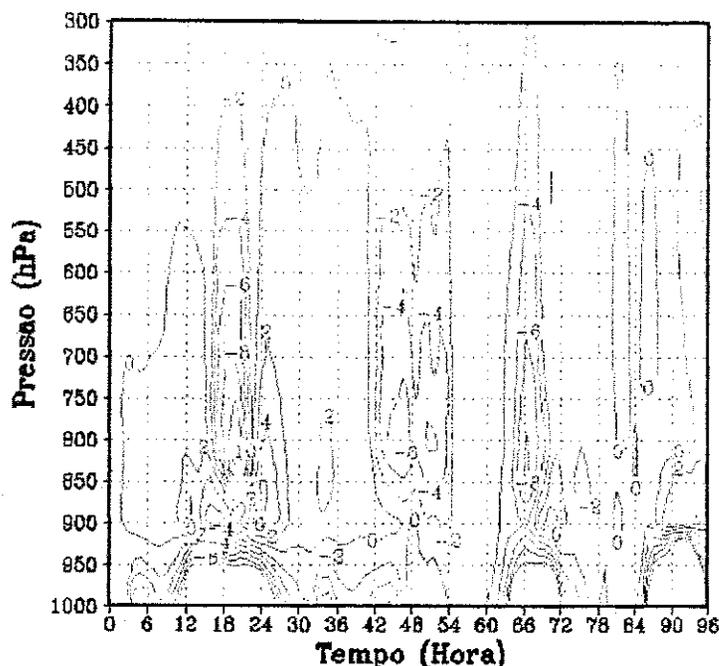


Fig. 25 – Evolução temporal da diferença da taxa de umedecimento devida à convecção profunda [(g/kg)/dia] entre os experimentos EXPEN1 e EXPKUO1 na grade 1 da simulação

A Figura 26 mostra a evolução temporal da diferença da taxa de umedecimento devida à convecção profunda entre os experimentos EXPGR1 e EXPKUO1 na grade 1 da simulação. O EXPGR1 secou mais a atmosfera do que o esquema Kuo e os esquemas vistos anteriormente em níveis médios a altos, causando efeito até cerca de 300 hPa. Nos dias 21 e 22 o esquema Grell secou mais, aproximadamente 10[(g/kg)/dia] após as 12 UTC de cada dia. No último dia da simulação o efeito de secagem é mais intenso próximo à superfície, chegando a 10[(g/kg)/dia] após 12 UTC entre a superfície e 900 hPa.

A Figura 27 mostra a evolução temporal da diferença da taxa de umedecimento devida à convecção profunda entre os experimentos EXPLO1 e EXPKUO1 na grade 1 da simulação. O esquema LO é o que mais se aproxima do esquema Kuo, apresentando a menor diferença no dia 21, com apenas cerca de 2[(g/kg)/dia] de secagem a mais que o Kuo. Nos dois últimos dias da simulação essa diferença aumenta para 4[(g/kg)/dia]. Além de atingir apenas os níveis baixos e médios da atmosfera, onde produz efeito até cerca de 450 hPa.

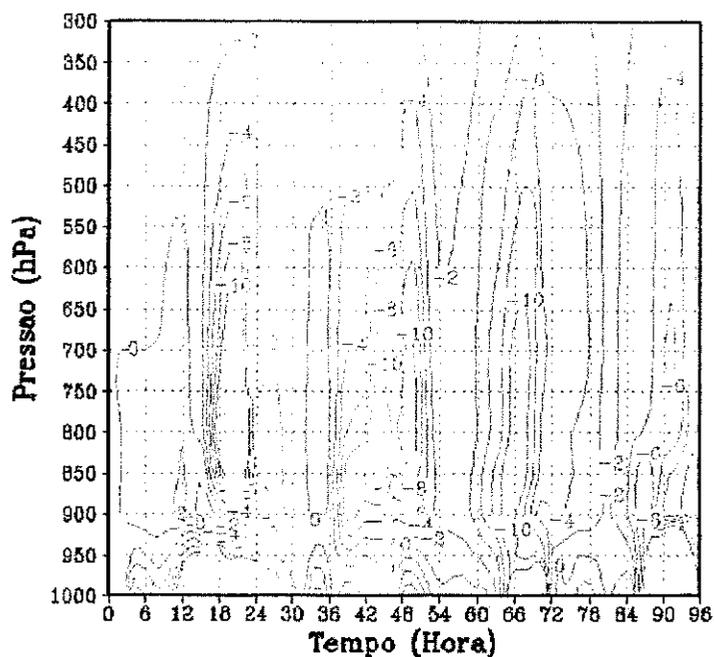


Fig. 26 – Evolução temporal da diferença da taxa de umedecimento devida à convecção profunda [(g/kg)/dia] entre os experimentos EXPGR1 e EXPKUO1 na grade 1 da simulação

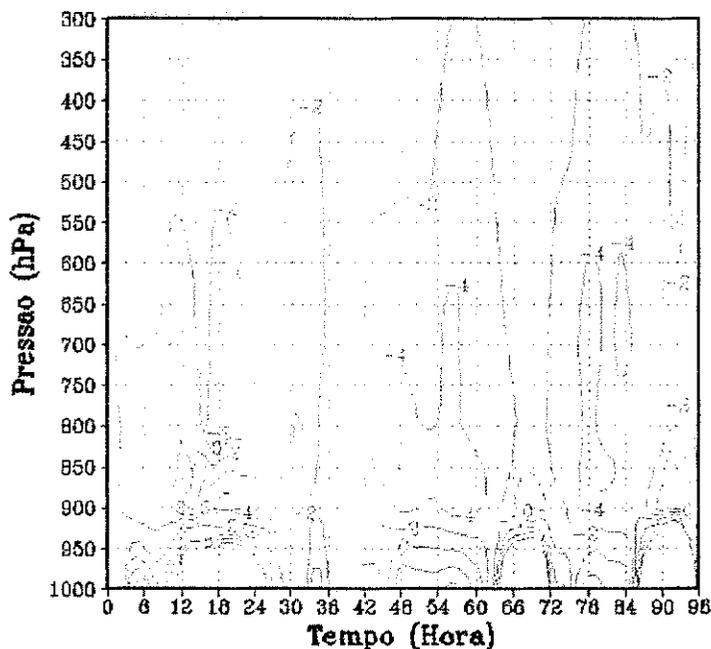


Fig. 27 – Evolução temporal da diferença da taxa de umedecimento devida à convecção profunda [(g/kg)/dia] entre os experimentos EXPLO1 e EXPKUO1 na grade 1 da simulação

As Figuras 28 e 29 mostram a evolução temporal das diferenças das taxas de umedecimento devidas à convecção profunda [(g/kg)/dia] entre os experimentos EXPMC1-EXPKUO1 e EXPSC1-EXPKUO1, respectivamente. Observa-se que os experimentos MC e SC provocam uma secagem da atmosfera bem maior que o esquema Kuo e os esquemas anteriores. Os esquemas MC e SC apresentam cerca de 20[(g/kg)/dia] e 10[(g/kg)/dia] de secagem a mais que o esquema Kuo entre as 48 e 54 horas (20 HL do dia 21 e 2 HL do dia 22), respectivamente. No dia 22 os esquemas MC e SC também secam cerca de 10[(g/kg)/dia] a mais que o esquema Kuo, entre as 18 e 24 UTC (14 e 20 HL). No último dia da simulação o esquema MC seca mais que o esquema Kuo cerca de 6[(g/kg)/dia] após as 12 UTC, enquanto que o esquema SC praticamente não apresenta diferença do esquema Kuo, exceto próximo a superfície entre 1000 e 900 hPa. Esses dois esquemas provocam efeito até cerca de 300 hPa.

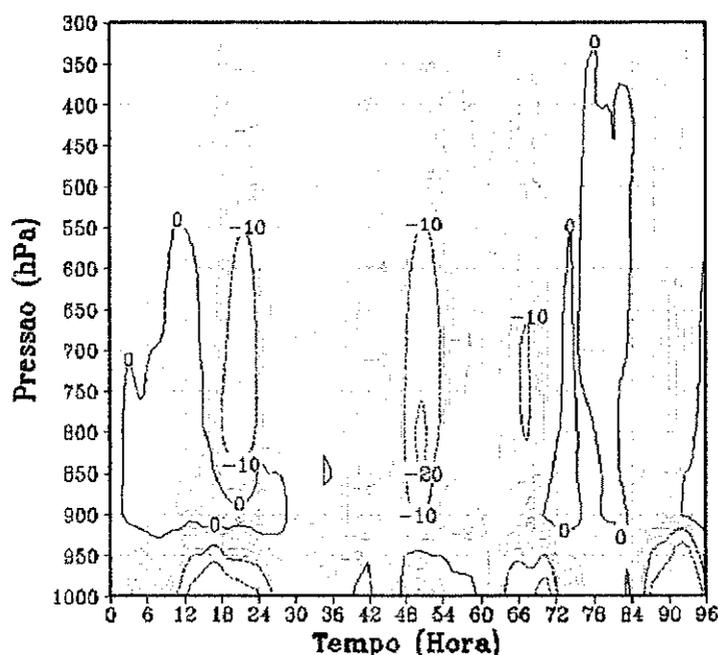


Fig. 28 – Evolução temporal da diferença da taxa de umedecimento devida à convecção profunda [(g/kg)/dia] entre os experimentos EXPMC1-EXPKUO1 na grade 1 da simulação

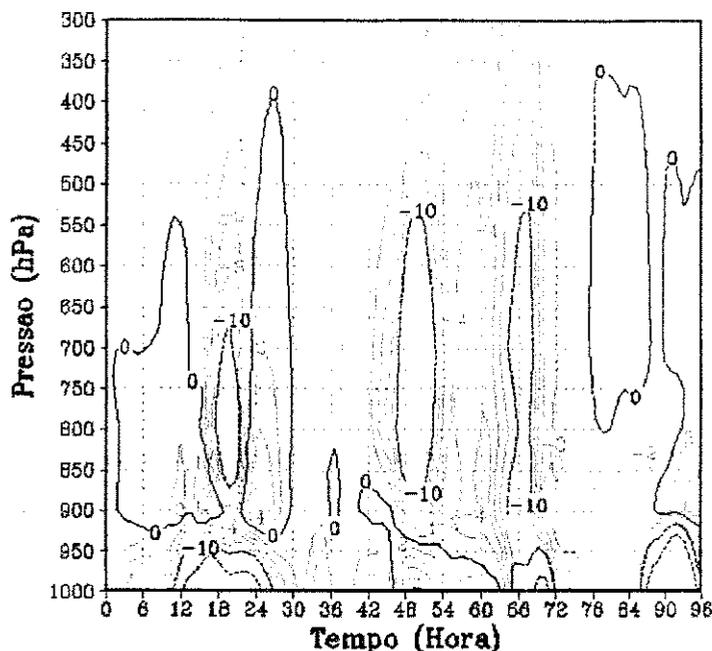


Fig. 29 – Evolução temporal da diferença da taxa de umedecimento devida à convecção profunda [(g/kg)/dia] entre os experimentos EXPSC1 e EXPKUO1 na grade 1 da simulação

Diante da variabilidade das taxas de aquecimento e de umedecimento convectivos discutidos acima, é interessante ter-se uma idéia de como se dá o balanço de radiação da atmosfera em resposta ao perfil vertical determinado por cada fechamento. A Figura 30 mostra a evolução temporal da taxa de aquecimento radiativo da atmosfera para o EXPKUO1. Na atmosfera livre, acima de 900 hPa, os valores são, em módulo, menores que 4 K/dia. Os valores nessa região são tipicamente negativos, indicando divergência de radiação. Entretanto, são observados valores positivos, em altos níveis, a partir do segundo dia de integração. Por tratar-se de um período úmido, é possível que haja alguma condensação na escala da grade e a absorção naquele nível supere a emissão. Com isso, é observado algum aquecimento. Abaixo de 900 hPa, o resfriamento é mais significativo e representa situações que comumente ocorrem dentro da camada limite convectiva (Garratt, 1992).

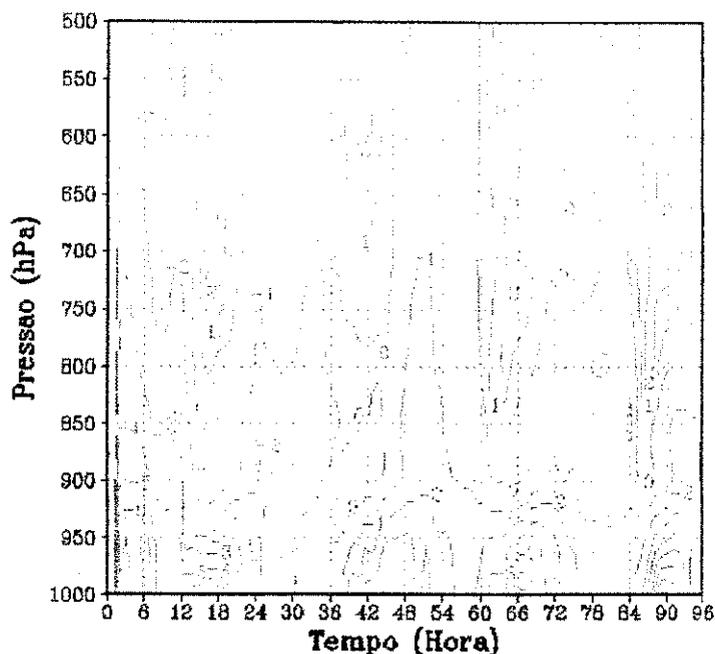


Fig. 30 - Evolução temporal da taxa de aquecimento radiativo (K/dia) para o experimento EXPKUO1 na grade I da simulação

A Figura 31 mostra evolução da diferença das taxas de aquecimento radiativo entre o EXPAST e EXPKUO1. No geral, os dois experimentos fornecem taxas de aquecimento radiativo bastante similares. Deve ser lembrado que a precipitação acumulada entre os dois experimentos não foi muito diferente ao longo da simulação (Figura 5). A Figura 32 mostra evolução da diferença das taxas de aquecimento radiativo entre o EXPGR1 e EXPKUO1. A diferença entre os experimentos, ao longo de toda a simulação e em toda a troposfera, mostra que a taxa de aquecimento/resfriamento radiativo não varia muito (é da mesma ordem de magnitude) de acordo com o fechamento escolhido. Note-se que, de acordo com a Figura 5, o EXPGR1 foi o que causou a maior taxa de precipitação acumulada. Essa pouca sensibilidade da radiação também foi verificada para os outros experimentos (não mostrado).

Os resultados acima mostram que, apesar de a convecção causar taxas de aquecimento convectivos que variam de uma ordem de magnitude entre os experimentos, a taxa de aquecimento/resfriamento radiativo não tem a mesma característica.

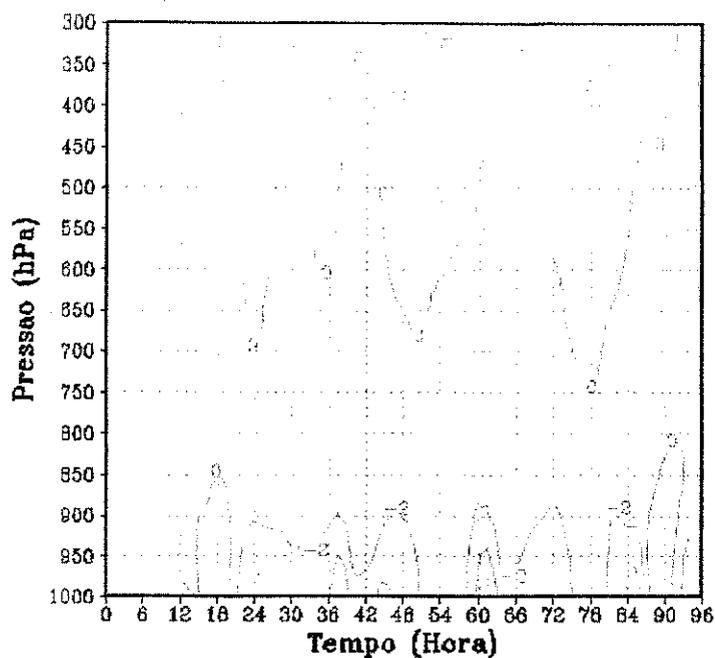


Fig. 31 - Evolução temporal da diferença da taxa de aquecimento radiativo (K/dia) entre os experimentos EXPAS1 e EXPKUO1 na grade 1 da simulação

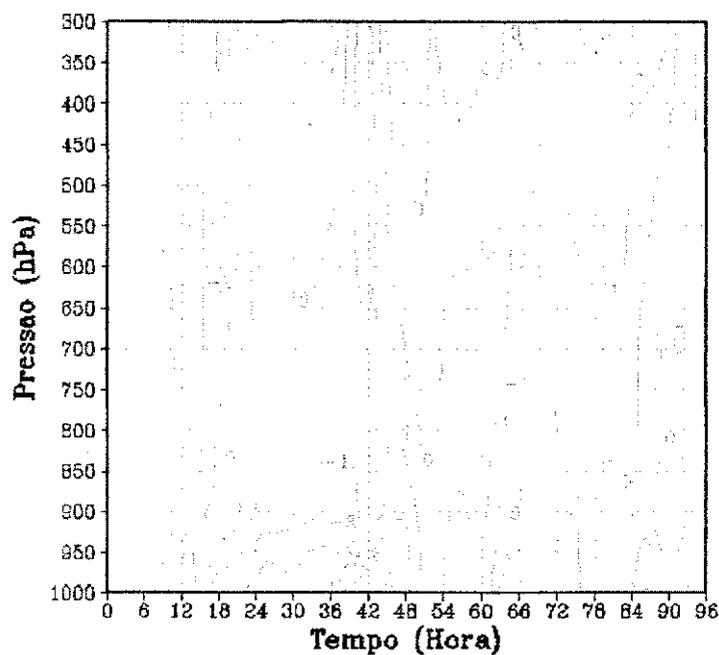


Fig. 32 - Evolução temporal da diferença da taxa de aquecimento radiativo (K/dia) entre os experimentos EXPGR1 e EXPKUO1 na grade 1 da simulação

Sabe-se que, na região onde os cúmulos não precipitantes atuam, o desentranhamento e a subsequente reevaporação causam resfriamento e umedecimento da parte superior da nuvem (Yanai et al., 1973). As Figuras 33 a 39 mostram as taxas de aquecimento devidas à convecção rasa (K/dia) para cada experimento na grade 1 da

simulação. Note-se que o esquema de convecção rasa é o mesmo (Souza, 1999). As taxas observadas são fruto da maneira como a convecção rasa reage ao ambiente modificado pela convecção profunda em virtude de cada fechamento.

A Figura 33 mostra a evolução temporal da taxa de aquecimento devida à convecção rasa para o EXPKUO1 na grade 1 da simulação. O EXPKUO1 apresenta uma configuração de aquecimento abaixo de aproximadamente 750 hPa e resfriamento acima desse nível, caracterizando assim o resfriamento na parte superior da nuvem. Esse resfriamento é mais intenso nos dois últimos dias da simulação, chegando a 10 K/dia entre 750 e 550 hPa. No dia 21 o EXPKUO1 praticamente não apresenta taxa de aquecimento devida à convecção rasa, apresentando pequenos núcleos de 2 K/dia. Esses valores máximos de aquecimento ou resfriamento ocorrem entre 12 e 18 UTC (8 e 14 HL) em todos os dias da simulação.

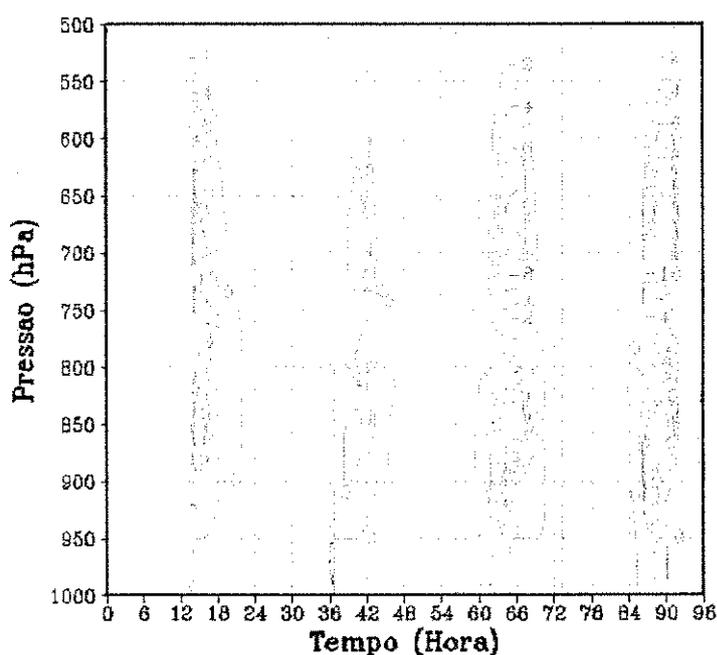


Fig. 33 – Evolução temporal da taxa de aquecimento devida à convecção rasa (K/dia) para o experimento EXPKUO1 na grade 1 da simulação

As Figuras 34 e 35 mostram a evolução temporal das taxas de aquecimento devida à convecção rasa para os EXPAS1 e EXPEN1, respectivamente. O EXPAS1 tanto

aqueceu mais abaixo de 750 hPa quanto resfriou mais acima desse nível do que o EXPKUO1. E ao contrário do EXPKUO1 o EXPAS1 apresentou taxas de aquecimento significantes no dia 21. O EXPEN1 apresentou configuração semelhante ao EXPAS1, com taxas de aquecimento em torno de 10 K/dia nos três últimos dias abaixo de 750 hPa, e taxas de resfriamento de cerca de 10 K/dia nos dias 21 e 22, para os dois esquemas, e aproximadamente 15 K/dia no último dia do EXPEN1, entre 750 e 550 hPa. Em todos os dias da simulação as taxas de aquecimento ocorrem após as 12 UTC.

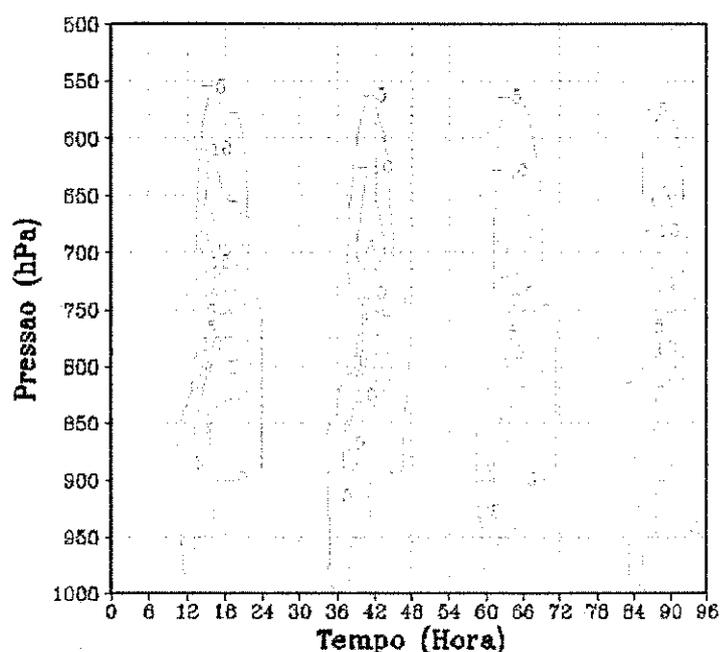


Fig. 34 – Evolução temporal da taxa de aquecimento devida à convecção rasa (K/dia) para o experimento EXPAS1 na grade 1 da simulação

O EXPLO1 mostra uma evolução temporal da taxa de aquecimento devida à convecção rasa com uma configuração diferente dos esquemas vistos acima (ver Figura 36). Observa-se que a taxa de resfriamento acima de 750 hPa, e, portanto, aquecimento abaixo de 750 hPa, é mais intensa no dia 21 com aproximadamente 8 K/dia e no dia 23 com cerca de 4 K/dia. Entretanto, no dia 22 praticamente não se observa resposta da convecção rasa com relação à saída da convecção profunda do EXPLO1, registrando pequenas taxas de aproximadamente 2 K/dia.

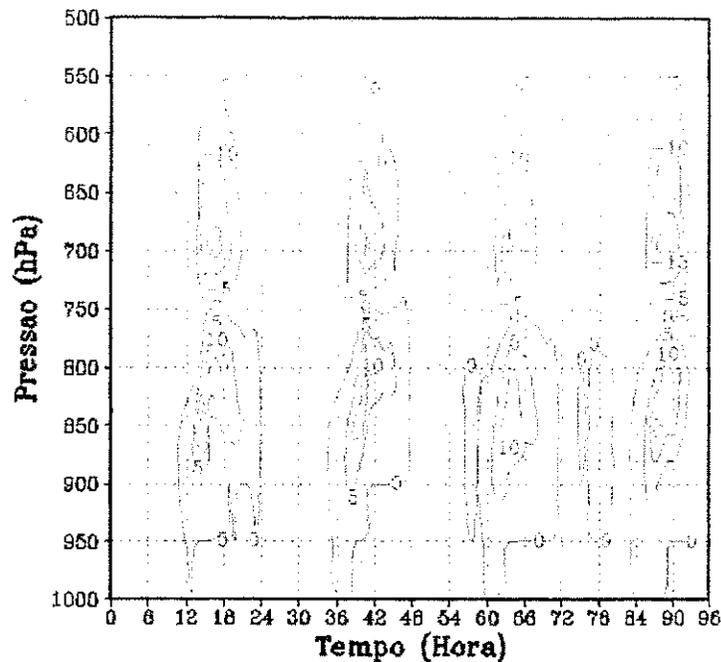


Fig. 35 – Evolução temporal da taxa de aquecimento devida à convecção rasa (K/dia) para o experimento EXPEN1 na grade 1 da simulação

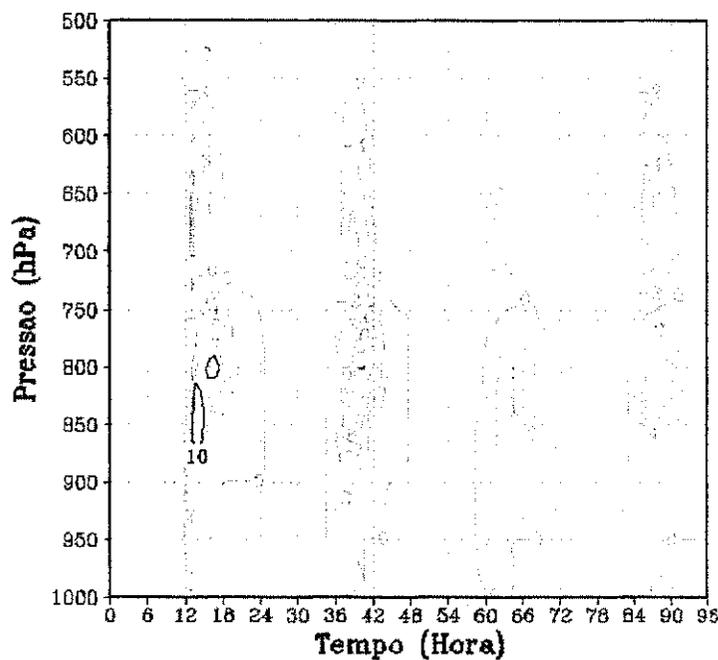


Fig. 36 – Evolução temporal da taxa de aquecimento devida à convecção rasa (K/dia) para o experimento EXPLO1 na grade 1 da simulação

A evolução temporal da taxa de aquecimento devida à convecção rasa para o EXPGR1 pode ser vista na Figura 37. O EXPGR1 apresenta taxas de aquecimento, abaixo de 750 hPa, de cerca de 10 K/dia, nos dias 21 e 22, e 15 K/dia no dia 23. E acima de 750 hPa, apresenta um resfriamento de aproximadamente 10 K/dia nos dias 21 e 22 e 15 K/dia

no dia 23. O EXPGR1 supera o esquema Kuo, durante toda a simulação e apresenta uma configuração semelhante aos esquemas EXPEN1 e EXPAS1.

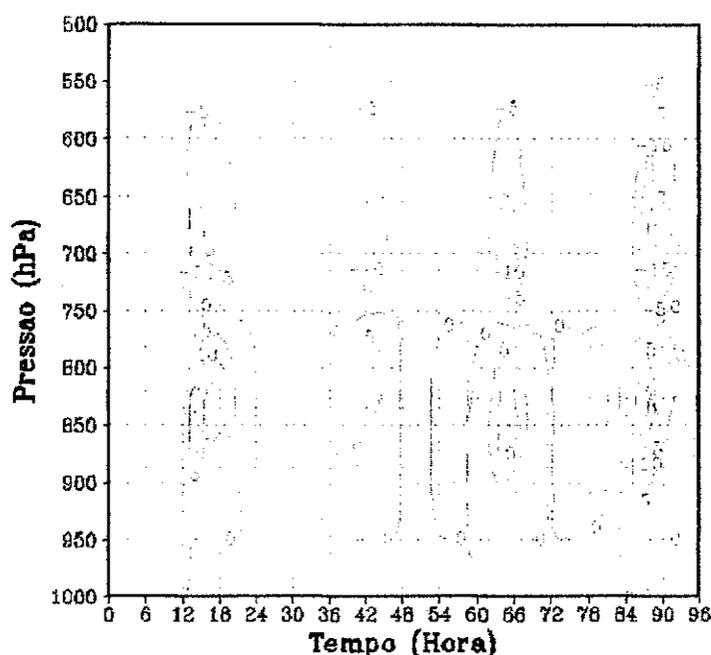


Fig. 37 – Evolução temporal da taxa de aquecimento devida à convecção rasa (K/dia) para o experimento EXPGR1 na grade 1 da simulação

A evolução temporal das taxas de aquecimento devidas à convecção rasa para os experimentos EXPMC1 e EXPSC1 são vistas nas Figuras 37 e 38, respectivamente. Os dois experimentos apresentaram configurações semelhantes, porém o esquema SC mostrou taxas de aquecimento raso mais intensas que o MC. E os dois esquemas apresentaram taxas de aquecimento raso maiores que o esquema Kuo, onde o EXPMC1 mostrou uma taxa de aquecimento de cerca de 10K/dia e o EXPSC1 mostrou cerca de 15K/dia, no dia 23. Acima de 750 hPa os dois esquemas tiveram configurações muito semelhantes, onde o esquema SC continuou sendo mais intenso.

Os resultados mostram que o esquema Souza (1999) apresenta uma boa interface também com o esquema Grell & Dévényi (2002) seja qual for o fechamento. Essa característica é bastante desejável quando se pensa em desenvolvimento futuro de qualquer modelo.

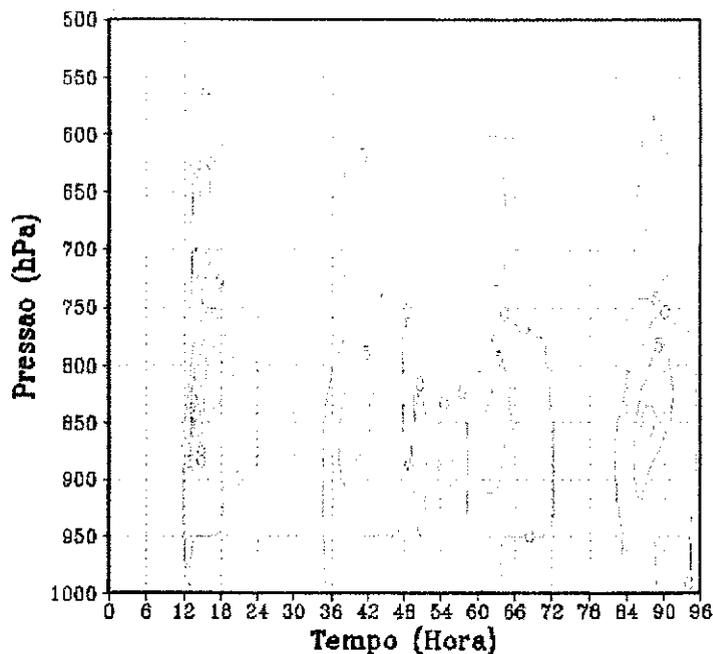


Fig. 38 – Evolução temporal da taxa de aquecimento devida à convecção rasa (K/dia) para o experimento EXPMC1 na grade 1 da simulação

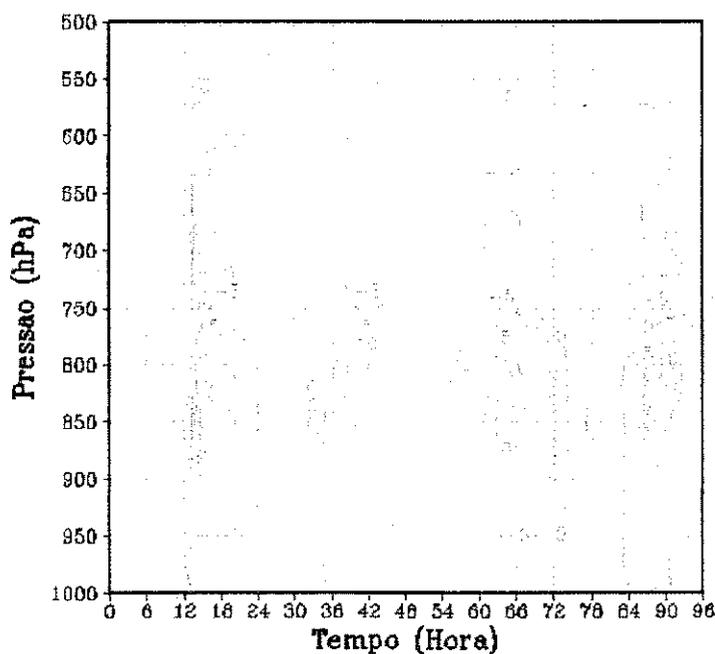


Fig. 39 – Evolução temporal da taxa de aquecimento devida à convecção rasa (K/dia) para o experimento EXPSC1 na grade 1 da simulação

As Figuras 40 a 46 mostram o vetor vento médio (ms^{-1}) para o nível de 850 hPa para cada esquema de parametrização convectiva, na grade 1 da simulação. O período em estudo refere-se ao domínio dos ventos de leste na região de Rondônia, o que foi detectado em alguns experimentos (Carvalho et al., 2002). A região Nordeste do Brasil

apresentou, em sua totalidade, escoamento de leste em todos os experimentos, o que está de acordo com Carvalho et al., (2002).

A Figura 40 mostra o vetor vento médio para o experimento EXPAS1. Na costa leste do Sudeste do Brasil encontra-se um anticiclone, com núcleo sobre o oceano Atlântico. No Estado de Rondônia há predominância de ventos de leste na parte sul, e ventos de norte e noroeste na parte norte. Também é detectado um ciclone, que se encontra à oeste de Rondônia e norte da Bolívia, com núcleo centrado em torno de 68°W e 12°S .

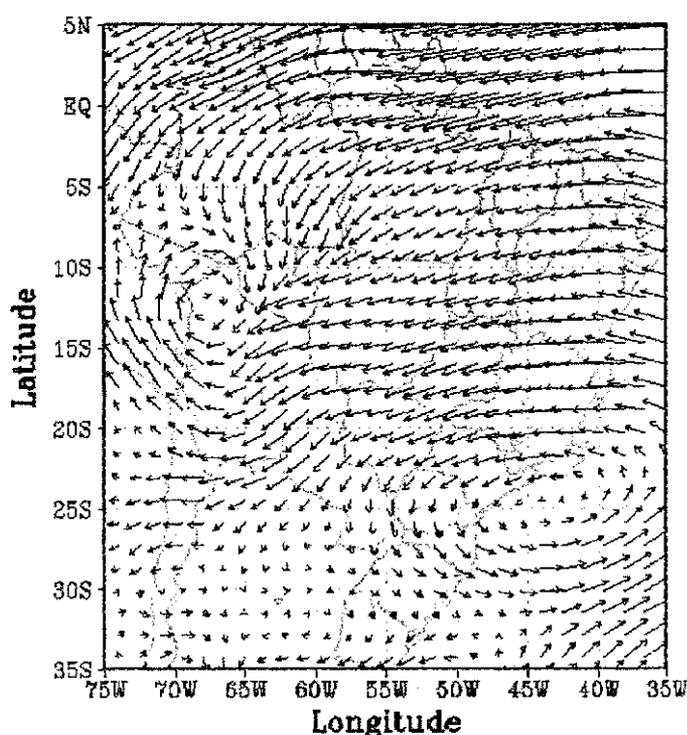


Fig. 40 – Vetor vento médio (m/s) para o experimento EXPAS1 na grade 1 da simulação

As Figuras 41, 42, 43 e 44 mostram o vetor vento médio para os experimentos EXPEN1, EXPGR1, EXPMC1 e EXPSC1, respectivamente. As configurações são semelhantes a da Figura 40, apresentando também o anticiclone na costa leste do Sudeste do Brasil, na mesma posição da figura anterior. O ciclone, situado ao oeste de Rondônia, encontra-se mais intenso nessas figuras, e há uma zona de convergência que se estende de sudoeste do Amazonas até Rondônia. No Estado de Rondônia há

predominância de ventos de nordeste na parte sul, e ventos de norte e noroeste na parte norte.

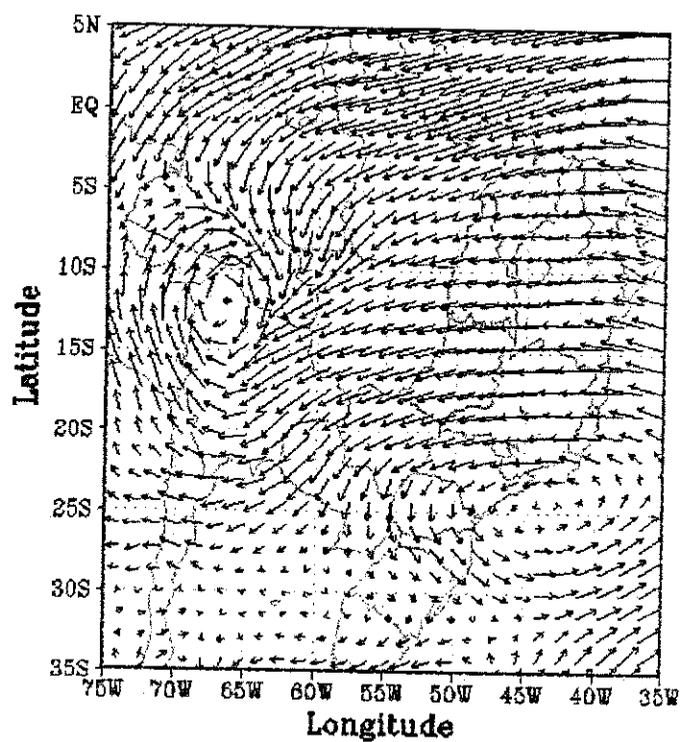


Fig. 41 – Vetor vento médio (m/s) para o experimento EXPEN1 na grade 1 da simulação

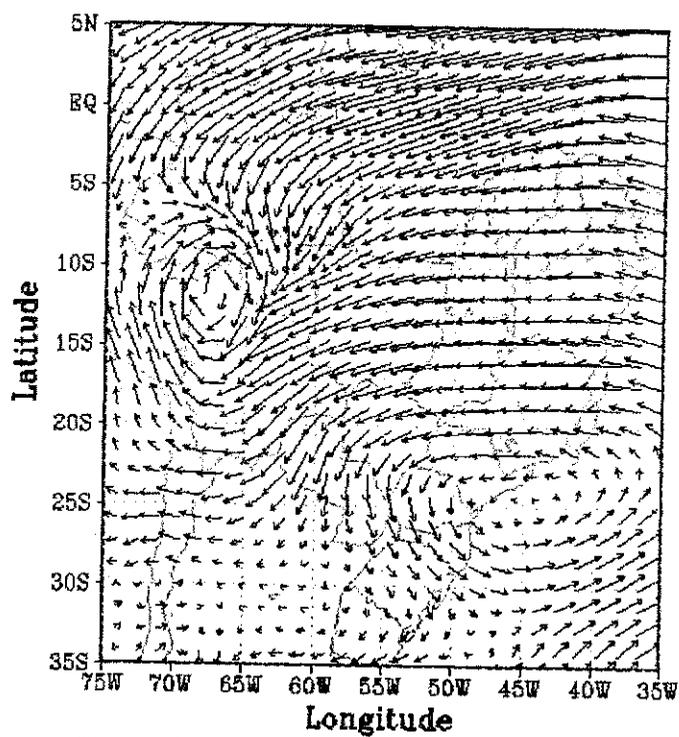


Fig. 42 – Vetor vento médio (m/s) para o experimento EXPGR1 na grade 1 da simulação

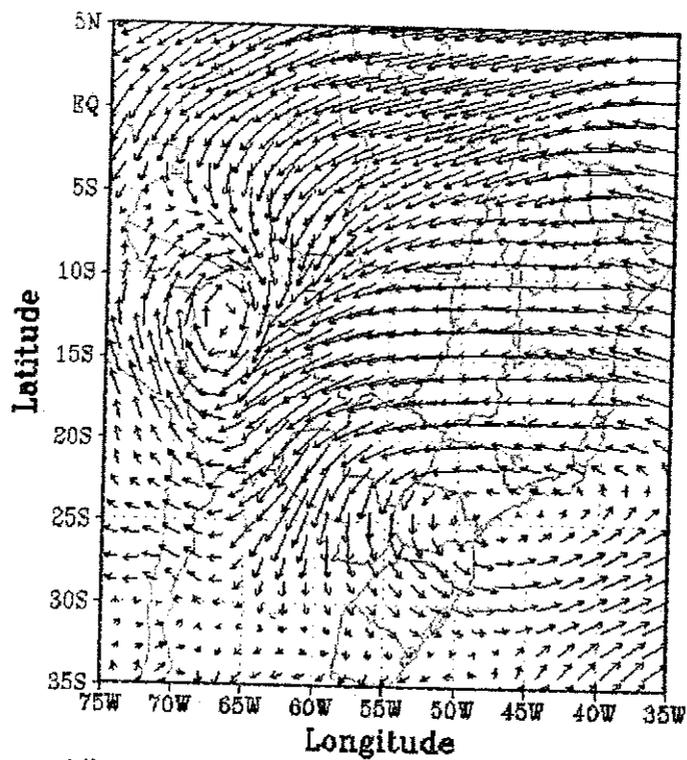


Fig. 43 – Vetor vento médio (m/s) para o experimento EXPMC1 na grade 1 da simulação

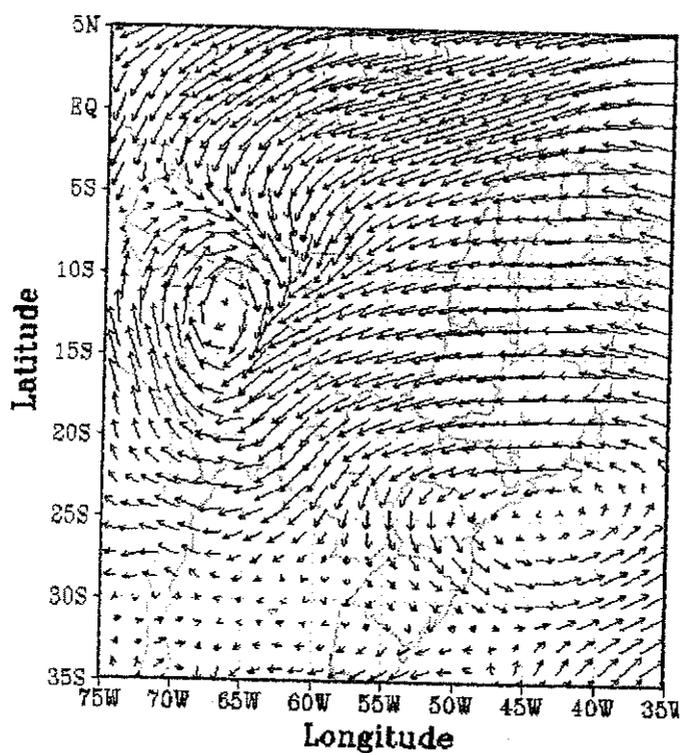


Fig. 44 – Vetor vento médio (m/s) para o experimento EXPSC1 na grade 1 da simulação

A Figura 45 mostra o vetor vento médio para o experimento EXPLO1. Observa-se que o anticiclone detectado nas figuras anteriores está mais a oeste do que os esquemas anteriores, com seu núcleo sobre os Estados brasileiros do Paraná e São Paulo.

Observa-se, também, a zona de convergência mais a oeste, entre Rondônia e Amazonas. O ciclone, à oeste de Rondônia, está menos intenso e mais deslocado para oeste, com núcleo na costa oeste da América do Sul, abrangendo o sul do Acre e o norte da Bolívia. Os ventos em todo o Estado de Rondônia são predominantemente de leste.

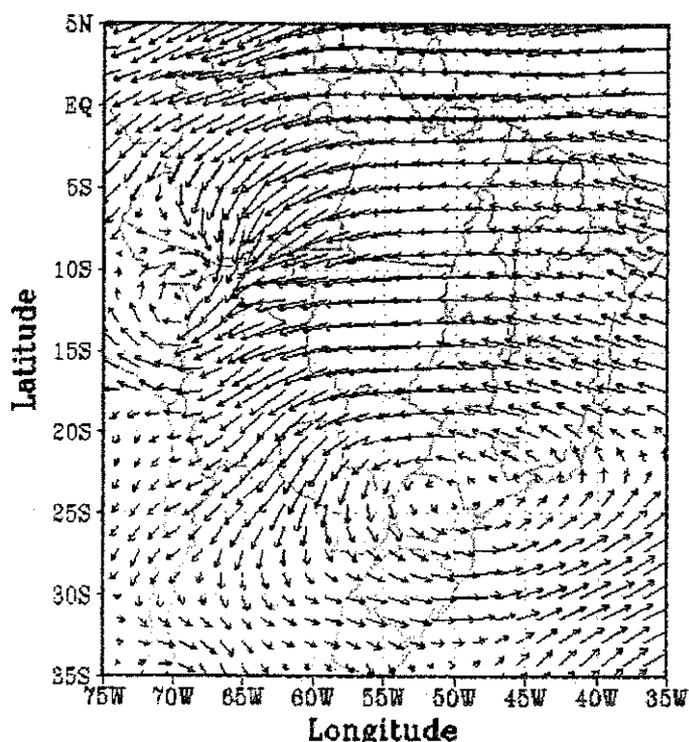


Fig. 45 – Vetor vento médio (m/s) para o experimento EXPLO1 na grade 1 da simulação

A Figura 46 mostra o vetor vento médio para o experimento EXPKUO1. Diferentemente dos esquemas anteriores, o esquema Kuo não mostrou o ciclone à oeste de Rondônia, e toda essa região foi caracterizada com escoamento de leste. Também não foi detectada a zona de convergência como nos esquemas anteriores. O anticiclone foi detectado na mesma posição do experimento EXPLO1, sobre o Paraná e São Paulo, discordando dos experimentos anteriores.

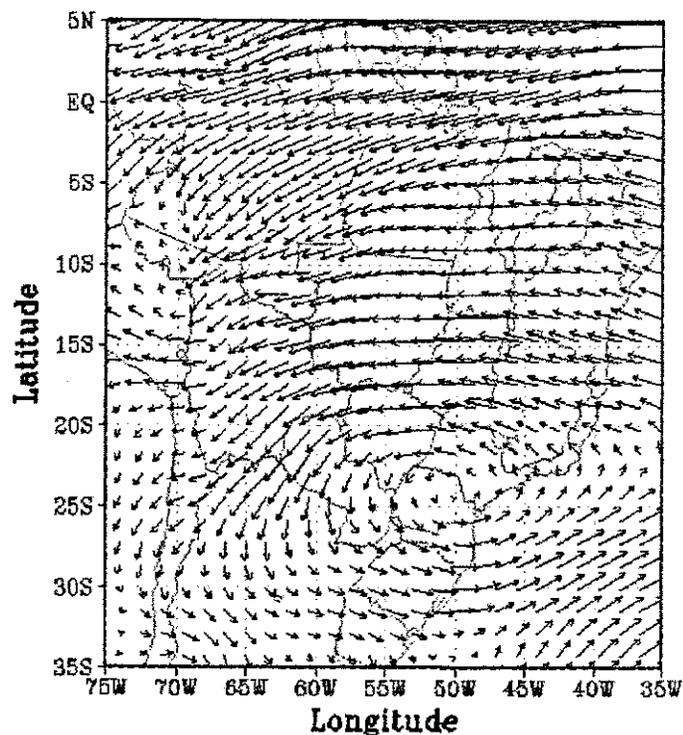


Fig. 46 – Vetor vento médio (m/s) para o experimento EXPKUO1 na grade 1 da simulação

4.2 Comparação entre os Esquemas de Parametrização Convectiva para a Grade 2:

Nesta seção as variáveis em estudo são analisadas para a grade 2 da simulação. A Figura 47 mostra a evolução temporal da precipitação convectiva acumulada dos sete experimentos realizados para a grade 2 da simulação. Observa-se que os experimentos se agrupam em três grupos distintos: o primeiro grupo é formado pelos experimentos EXPGR2, EXPSC2, EXPMC2 e EXPEN2; o segundo é formado pelos experimentos EXPLO2 e EXPAS2; e no último grupo encontra-se isolado o experimento EXPKUO2. Esses grupos foram caracterizados de acordo com a proximidade entre os valores. O experimento EXPKUO2 foi o que apresentou os menores valores de precipitação acumulada, com uma diferença bastante significativa dos outros experimentos. No segundo grupo, os experimentos apresentaram valores de precipitação

acumulada em torno de 60 mm. Os experimentos que obtiveram os maiores valores de precipitação acumulada foram os pertencentes ao primeiro grupo, que apresentaram valores em torno de 90 mm.

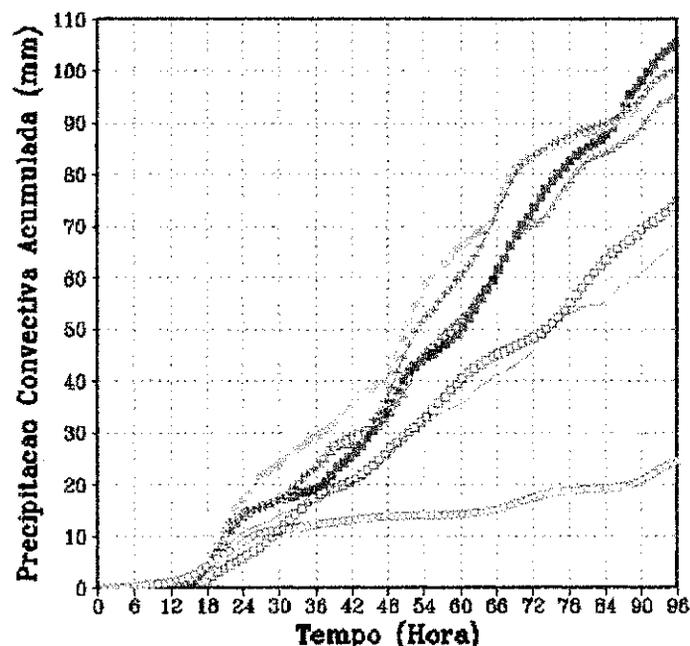


Fig. 47 – Evolução temporal da precipitação convectiva acumulada (mm) para EXPEN2 (azul escuro), EXPGR2 (verde), EXPLO2 (vermelho), EXPMC2 (amarelo), EXPSC2 (rosa), EXPAS2 (azul claro) e EXPKUUO2 (cinza) na grade 2 da simulação

A evolução temporal da diferença de precipitação acumulada entre cada esquema de parametrização com o esquema Kuo para a grade 2 é mostrada na Figura 48. Observam-se diferenças bastante significativas, os experimentos que apresentaram uma maior diferença do esquema Kuo foram: o EXPGR2, com cerca de 80 mm a mais de precipitação, os experimentos EXPSC2 e EXPMC2, com aproximadamente 75 mm a mais, e o EXPEN2, com cerca de 70 mm a mais. Em seguida estão os experimentos que resultaram numa menor discordância do esquema Kuo, porém não pequena: o EXPLO2, com cerca de 50 mm a mais, e o EXPAS2 com aproximadamente 40 mm a mais que o esquema Kuo. Nota-se que essas diferenças, quando comparadas a grade 1 da simulação, são bastante diferentes para alguns esquemas. Para os esquemas AS e EN, chega a ter uma diferença de aproximadamente 40 e 60mm, comparando-se as duas grades. Isso indica que

esses esquemas tiveram um grande impacto com relação à grade escolhida, e que esse impacto não foi tão intenso no esquema Kuo.

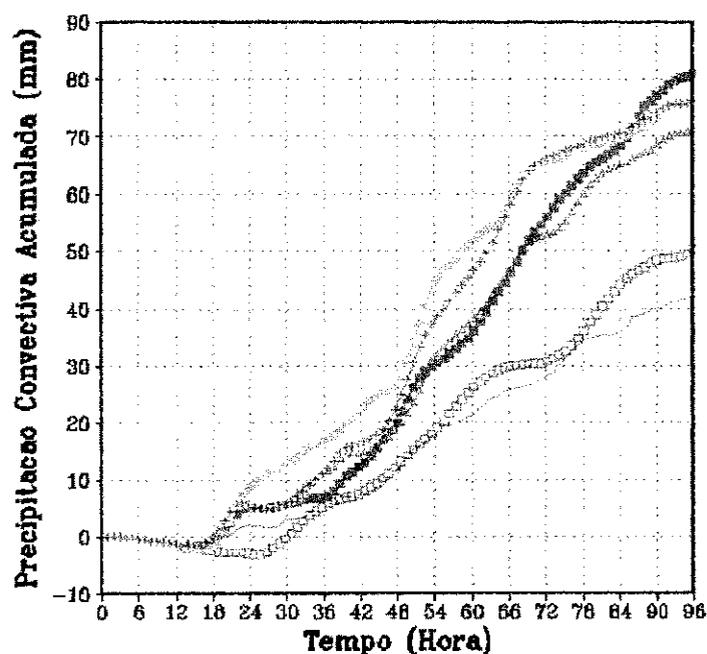


Fig. 48 – Evolução temporal da diferença da precipitação entre os experimentos, EXPEN2-EXPKUO2 (azul escuro), EXPGR2-EXPKUO2 (verde), EXPLO2-EXPKUO2 (vermelho), EXPMC2-EXPKUO2 (amarelo), EXPSC2-EXPKUO2 (rosa) e EXPAS2-EXPKUO2 (azul claro) na grade 2 da simulação

A Figura 49 mostra a evolução da taxa de precipitação (mm/h) para os experimentos EXPAS2, EXPEN2 e EXPKUO2 na grade 2 da simulação. O esquema EN apresentou os maiores valores de taxa de precipitação entre os três esquemas, seguido do esquema AS e por último o esquema Kuo, que apresentou valores de precipitação distantes dos esquemas presente nessa figura. É interessante observar que no intervalo entre 42 e 66 horas (14 HL do dia 21 e 14 HL do dia 22) os esquemas EN e AS apresentam valores máximos, com picos em torno de 2,7 mm/h e 1,5 mm/h respectivamente, enquanto o esquema Kuo não detecta precipitação. De fato, os valores observados (ver Figura 6) não detectam precipitação em uma faixa desse intervalo, mas não no todo. Nos dois últimos dias da simulação o esquema Kuo apresentou configuração semelhante à média observada,

mas com magnitude diferente, cerca de uma ordem de grandeza menor. Nenhum dos três esquemas apresentou comportamento semelhante à média observada.

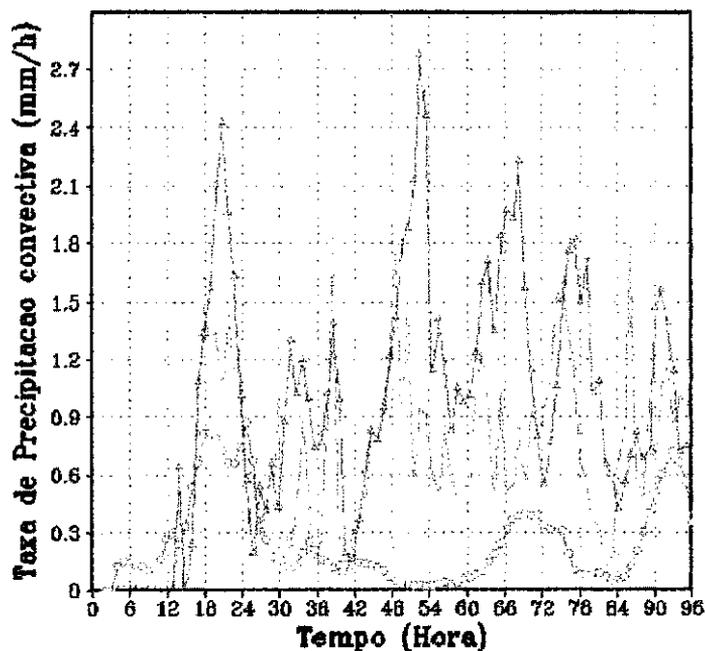


Fig. 49 – Evolução temporal da taxa de precipitação (mm/h) para os experimentos EXPAS2 (azul claro), EXPEN2 (azul escuro) e EXPKUO2 (cinza) na grade 2 da simulação

A Figura 50 mostra a evolução temporal da taxa de precipitação (mm/h) para os experimentos EXPGR2, EXPLO2 e EXPKUO2 na grade 2 da simulação. O EXPGR1 apresentou maiores taxas de precipitação que os esquemas LO e Kuo. É interessante observar que entre 60 e 78 horas ocorre a mesma configuração da taxa de precipitação para esses esquemas na grade 1 da simulação. O esquema LO tende a apresentar valores máximos justamente quando os esquemas Kuo e GR apresentam valores mínimos e vice-versa, como visto na grade 1 da simulação.

A Figura 51 mostra a evolução temporal da taxa de precipitação para os experimentos EXPSC1, EXPMC1 e EXPKUO1 na grade 2 da simulação. Note-se que os esquemas MC e SC mantêm valores próximos, de maneira que os dois esquemas apresentam taxas de precipitação muito maiores que o esquema Kuo, chegando a

apresentarem picos em torno de 3 mm/h enquanto o esquema Kuo não apresenta precipitação no intervalo de tempo respectivo, como visto para a grade 1 da simulação.

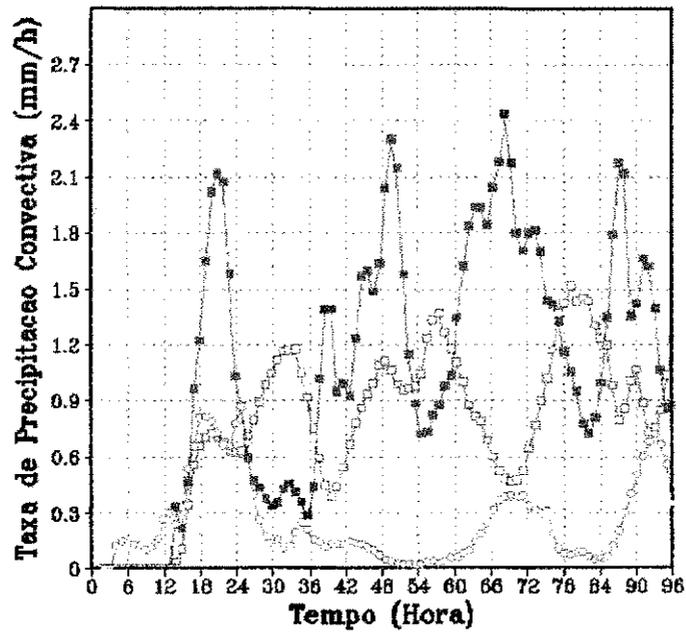


Fig. 50 – Evolução temporal da taxa de precipitação (mm/h) para os experimentos EXPGR2 (verde), EXPLO2 (vermelho) e EXPKUU2 (cinza) na grade 2 da simulação

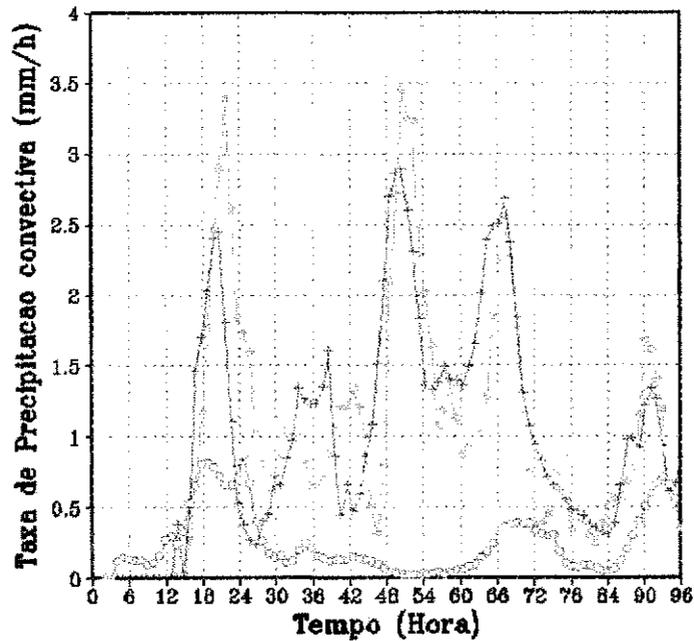


Fig. 51 – Evolução temporal da taxa de precipitação (mm/h) para os experimentos EXPMC2 (amarelo), EXPSC2 (rosa) e EXPKUU2 (cinza) na grade 2 da simulação

A Figura 52 mostra a evolução temporal do fluxo de calor latente à superfície para os sete experimentos na grade 2 da simulação. Essa figura apresenta uma configuração bastante semelhante ao fluxo de calor latente à superfície para a grade 1. No dia 21 os esquemas apresentaram praticamente os mesmos valores mostrados na grade 1, no dia 22 apenas o esquema Kuo apresentou um aumento significativo de aproximadamente 80 W/m^2 da grade 1 para a grade 2. Porém no último dia da simulação todos os esquemas apresentaram um aumento com relação à grade 1, chegando a aproximadamente 100 W/m^2 à exemplo do esquema Kuo. Os valores máximos também foram detectados por volta das 18 UTC (14 hora local). Com a resolução de 20 km , o esquema AS ficou um pouco mais distante dos valores médios observados.

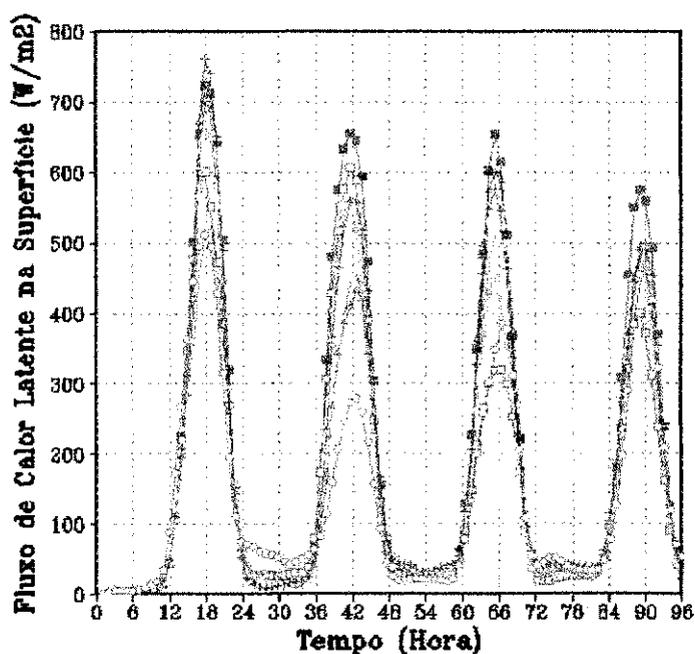


Fig. 52 – Evolução temporal do fluxo de calor latente à superfície (W/m^2) para os experimentos EXPEN2 (azul escuro), EXPGR2 (verde), EXPLO2 (vermelho), EXPMC2 (amarelo), EXPSC2 (rosa), EXPAS2 (azul claro) e EXPKUU2 (cinza) na grade 2

A Figura 53 mostra a evolução temporal do fluxo de calor sensível à superfície para os sete experimentos realizados na grade 2 da simulação. O experimento EXPAS2 mostra-se muito distante dos outros experimentos, porém com uma diferença menor do que na

grade 1 e com valores máximos em torno de 270 W/m^2 nos três últimos dias da simulação. No dia 21 o EXPKUO2 também se mantém distante dos outros experimentos, apresentando assim o menor pico com aproximadamente 90 W/m^2 , mas nos dias 22 e 23 se aproximou um pouco mais dos outros experimentos. No dia 23, com exceção do EXPAS2, os experimentos ficaram mais próximos entre eles, com uma variação cerca de 50 W/m^2 entre o menor e maior valor. Essa figura mostrou uma configuração semelhante ao fluxo de calor sensível na grade 1 da simulação, porém com valores um pouco mais distantes da média observada.

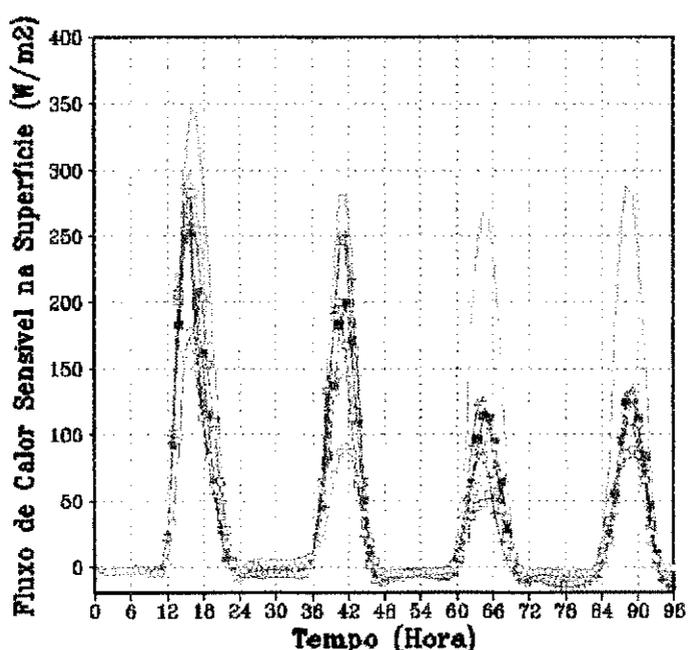


Fig. 53 – Evolução temporal do fluxo de calor sensível à superfície (W/m^2) para os experimentos EXPEN2 (azul escuro), EXPGR2 (verde), EXPLO2 (vermelho), EXPMC2 (amarelo), EXPSC2 (rosa), EXPAS2 (azul claro) e EXPKUO2 (cinza) na grade 2

A evolução temporal da radiação de onda longa à superfície para os sete experimentos na grade 2 da simulação é vista na Figura 54 que apresenta configuração bastante semelhante à da grade 1 da simulação, mostrando inclusive valores muito próximos de radiação de onda longa à superfície entre as duas resoluções das grades. Isso

indica que a radiação de onda longa à superfície não se mostrou sensível ao esquema de parametrização cúmulos escolhido.

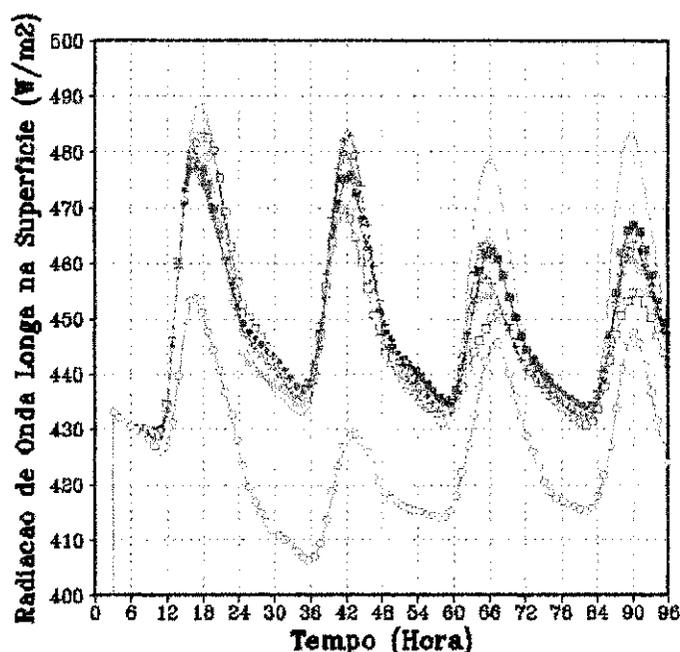


Fig. 54 – Evolução temporal da radiação de onda longa à superfície (W/m^2) para os experimentos EXPEN2 (azul escuro), EXPGR2 (verde), EXPLO2 (vermelho), EXPMC2 (amarelo), EXPSC2 (rosa), EXPAS2 (azul claro) e EXPKUU2 (cinza) na grade 2

A Figura 55 mostra a evolução temporal da radiação de onda curta à superfície para os sete experimentos realizados na grade 2 da simulação. Nota-se que com relação à radiação de onda curta os esquemas não mostram muita sensibilidade com relação à escala da grade em questão, pois os esquemas apresentaram valores de radiação de onda curta próximos aos da grade 1 para os sete esquemas de parametrização. Isso é interessante porque o forçante convectivo para as duas grades tende a ser praticamente o mesmo. Portanto comparações entre as duas grades podem ser feitas e eventuais diferenças devem estar relacionadas com outros fatores.

A Figura 56 mostra a evolução temporal da taxa de aquecimento devida à convecção profunda para o esquema Kuo na grade 2 da simulação. Esse esquema mostra taxas de aquecimento mais profundas próximo à superfície, entre 1000 e 900 hPa,

principalmente nos dias 20 e 23. Há alguns núcleos de aquecimento em torno de 500 hPa nos dias 21 e 23, de aproximadamente 10 K/dia. O dia 22 apresenta pequenas taxas de aquecimento devidas à convecção profunda. Essa figura apresenta uma configuração muito próxima à grade 1.

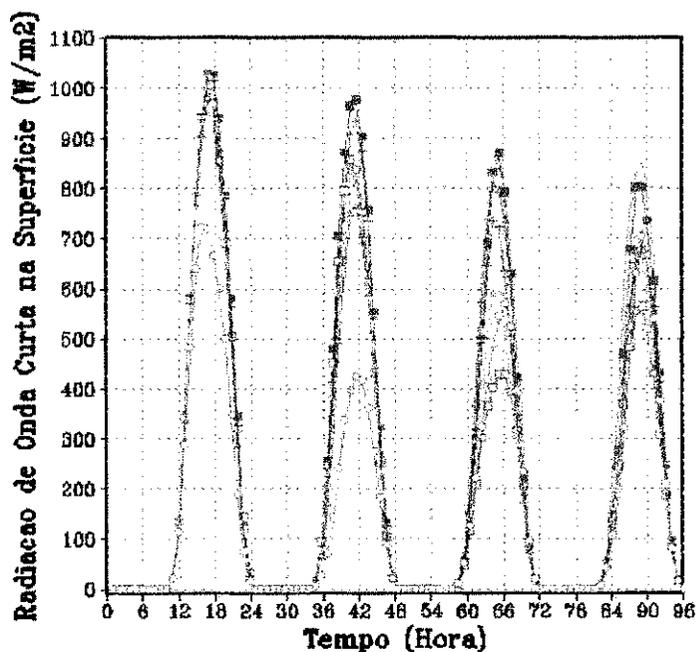


Fig. 55 – Evolução temporal da radiação de onda curta à superfície (W/m^2) para os experimentos EXPEN2 (azul escuro), EXPGR2 (verde), EXPLO2 (vermelho), EXPMC2 (amarelo), EXPSC2 (rosa), EXPAS2 (azul claro) e EXPKUO2 (cinza) na grade 2

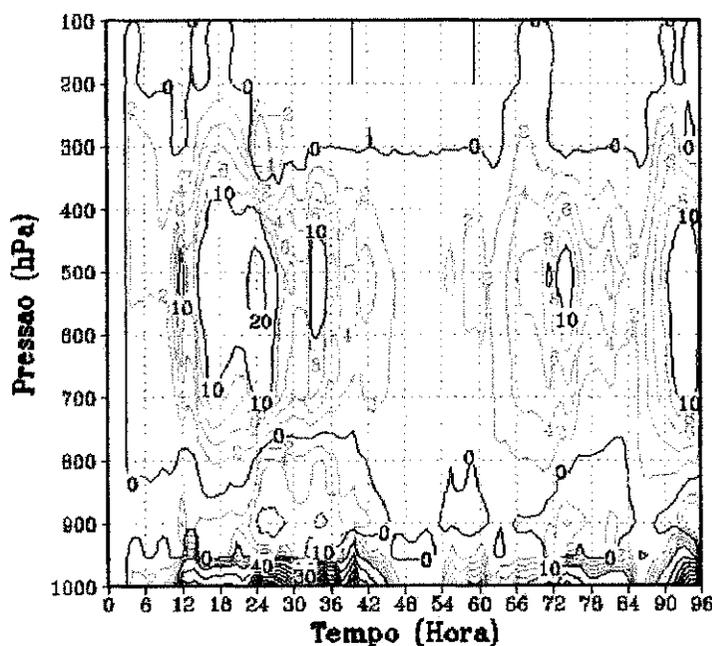


Fig. 56 – Evolução temporal da taxa de aquecimento devida à convecção profunda (K/dia) para o experimento EXPKUO2 na grade 2 da simulação

A Figura 57 mostra a evolução temporal da diferença da taxa de aquecimento devida à convecção profunda entre os esquemas EXPAS2 e EXPKUO2 na grade 2 da simulação. A diferença da taxa de aquecimento entre os esquemas AS e Kuo é maior na grade 2. Apresentando-se mais intensa no dia 21, com núcleo de cerca de 20 K/dia, e esse aquecimento se estende desde, aproximadamente, 850 a 200 hPa.

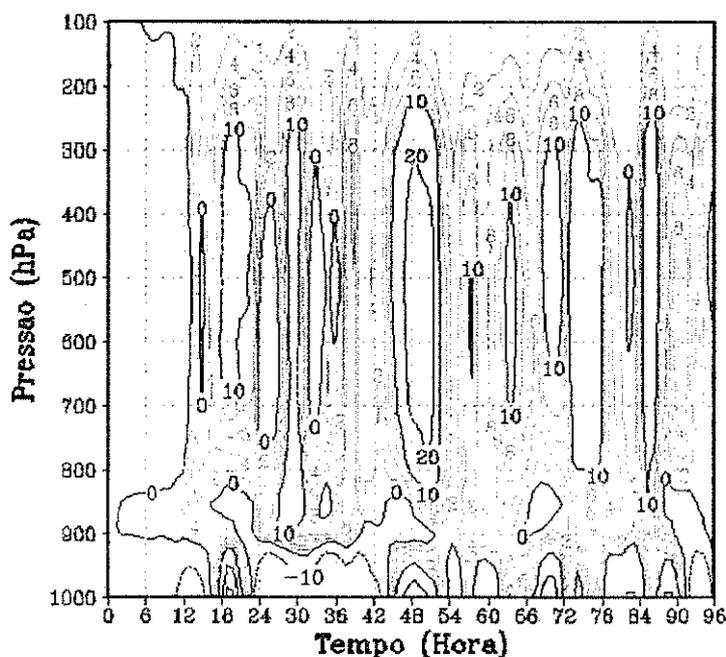


Fig. 57 – Evolução temporal da diferença da taxa de aquecimento devida à convecção profunda (K/dia) entre os experimentos EXPAS2 e EXPKUO2 na grade 2 da simulação

A evolução temporal da diferença da taxa de aquecimento devida à convecção profunda entre os experimentos EXPEN2 e EXPKUO2 pode ser vista na Figura 58. O esquema EN aqueceu mais a atmosfera na grade 2 da simulação do que na grade 1. Por exemplo, entre os dias 21 e 22, o esquema EN aquece cerca de 30 K/dia a mais que o Kuo, enquanto que na grade 1 essa diferença chegou até cerca de 10K/dia.

A Figura 59 mostra a evolução temporal da taxa de aquecimento devida à convecção profunda entre os experimentos EXPGR2 e EXPKUO2. Observa-se que o

esquema Grell aqueceu mais que o esquema Kuo em médios e altos níveis durante toda a simulação, e esse aquecimento foi um pouco maior na grade 2 da simulação.

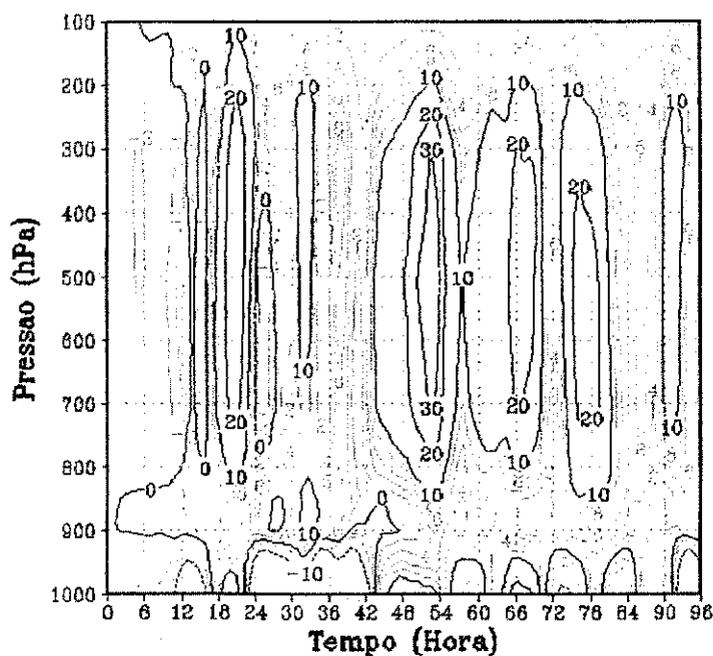


Fig. 58 – Evolução temporal da diferença da taxa de aquecimento devida à convecção profunda (K/dia) entre os experimentos EXPEN2 e EXPKUO2 na grade 2 da simulação

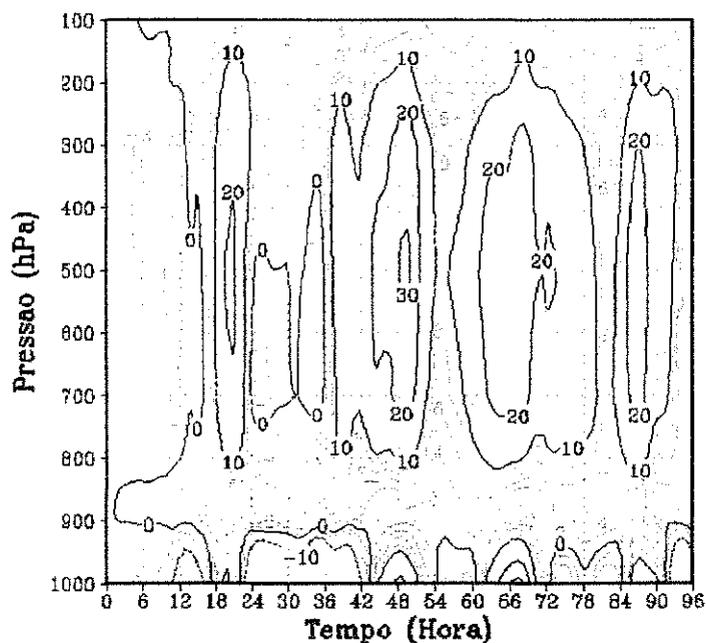


Fig. 59 – Evolução temporal da diferença da taxa de aquecimento devida à convecção profunda (K/dia) entre os experimentos EXPGR2 e EXPKUO2 na grade 2 da simulação

A Figura 60 mostra a evolução temporal da taxa de aquecimento devida à convecção profunda entre os experimentos EXPLO2 e EXPKUU2. O esquema LO aqueceu cerca de 10 K/dia a mais que o esquema Kuo acima de 800 hPa, tendo influências até cerca de 100 hPa. Mas esse aquecimento foi semelhante ao obtido na grade 1, ou seja, o esquema LO não apresentou muita sensibilidade com relação à resolução, com respeito a taxa de aquecimento devida à convecção profunda. Nos níveis próximos à superfície foi o esquema Kuo que aqueceu mais, cerca de 10 K/dia, nos dias 21 e 23.

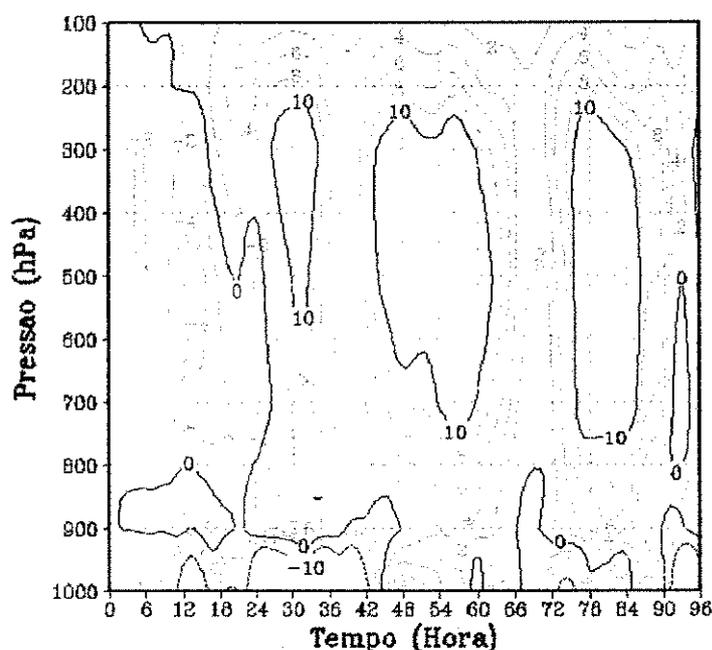


Fig. 60 -- Evolução temporal da diferença da taxa de aquecimento devida à convecção profunda (K/dia) entre os experimentos EXPLO2 e EXPKUU2 na grade 2 da simulação

As Figuras 61 e 62 mostram a evolução temporal da diferença da taxa de aquecimento devida à convecção profunda entre os experimentos EXPMC2-EXPKUU2 e EXPSC2-EXPKUU2. Note-se que os dois esquemas, MC e SC, aquecem significativamente mais que o esquema Kuo, além de apresentarem valores semelhantes aos obtidos na grade 1 da simulação, ou seja, os esquemas MC e SC não apresentam muita sensibilidade com relação à resolução da grade.

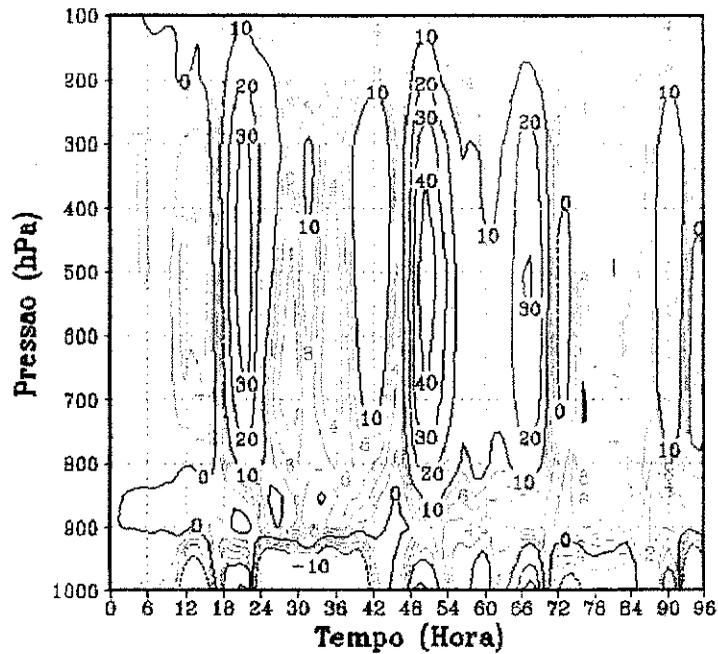


Fig. 61 – Evolução temporal da diferença da taxa de aquecimento devida à convecção profunda (K/dia) entre os experimentos EXPMC2 e EXPKUO2 na grade 2 da simulação

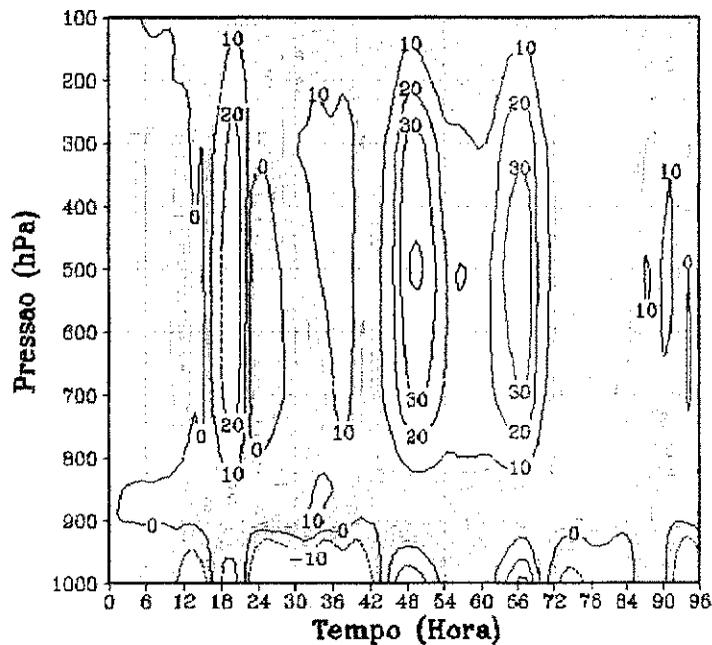


Fig. 62 – Evolução temporal da diferença da taxa de aquecimento devida à convecção profunda (K/dia) entre os experimentos EXPSC2 e EXPKUO2 na grade 2 da simulação

As Figuras 63 a 69 mostram o vetor vento médio para os sete experimentos na grade 2 da simulação, no nível de 850 hPa.

As Figuras 63 a 67, que mostram o vetor vento médio correspondente aos respectivos experimentos EXPAS2, EXPEN2, EXPGR2, EXPMC2 e EXPSC2, detectaram um ciclone à oeste de Rondônia e ventos de norte sobre o Estado. A Figura 63 não deixa a zona de convergência sobre Rondônia bem caracterizada, ao contrário das outras figuras. A parte norte do de Rondônia é caracterizada por ventos de norte e a parte sul por ventos de leste. Toda essa configuração é semelhante ao ocorrido na grade 1 da simulação. É interessante observar que, na Figura 67, o esquema SC apresenta na parte norte de Rondônia ventos de noroeste.

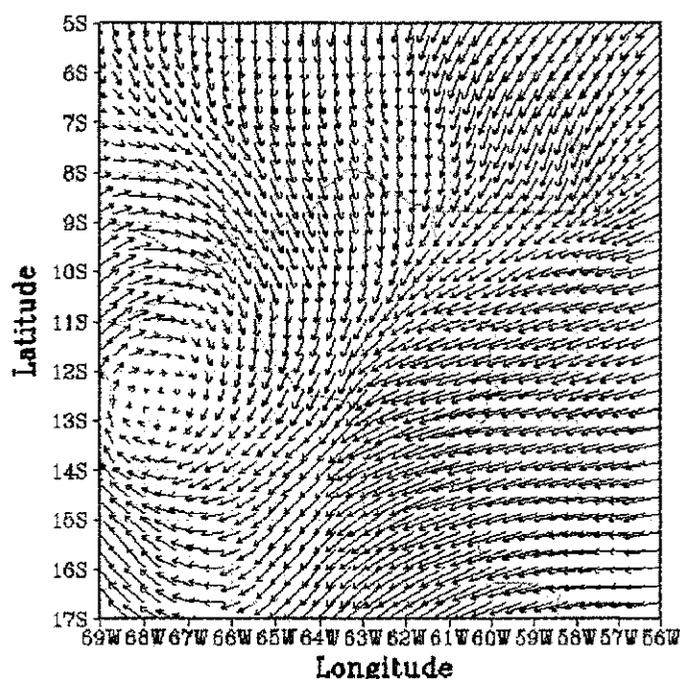


Fig. 63 – Vetor vento médio (m/s) para o experimento EXPAS2 na grade 2 da simulação

Na Figura 68, que mostra o vetor vento médio para o experimento EXPLO2, o ciclone está muito deslocado para oeste, tanto que quase não é detectado na figura, ficando apenas o seu lado leste. A Estado de Rondônia ficou caracterizado por escoamento de leste na parte sul e escoamento de nordeste no extremo norte.

A Figura 69 mostra o vetor vento médio para o experimento EXPKUUO2, que não detectou o ciclone à oeste de Rondônia como nos outros experimentos, e apresentou escoamento de leste em todo o Estado de Rondônia.

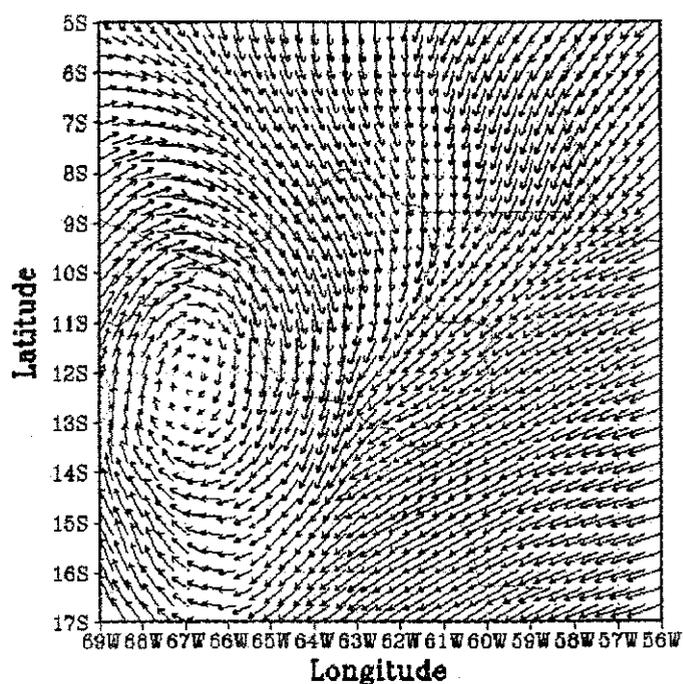


Fig. 64 – Vetor vento médio (m/s) para o experimento EXPEN2 na grade 2 da simulação

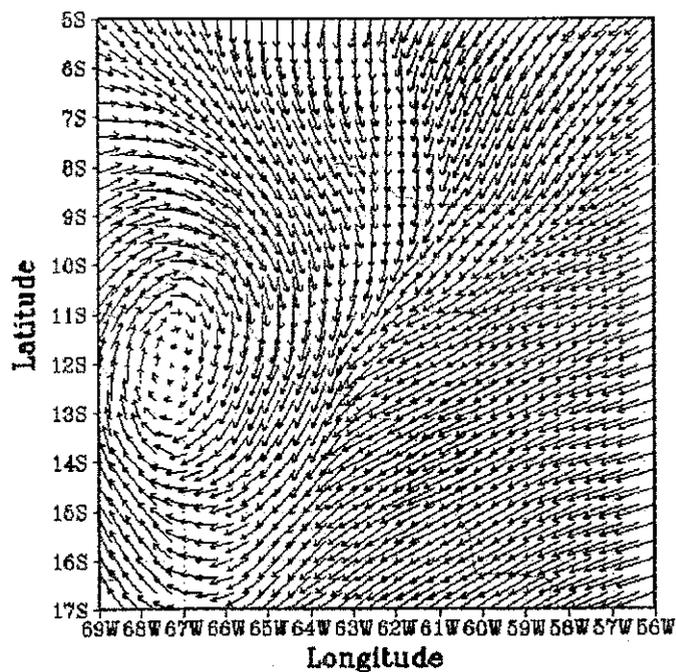


Fig. 65 – Vetor vento médio (m/s) para o experimento EXPGR2 na grade 2 da simulação

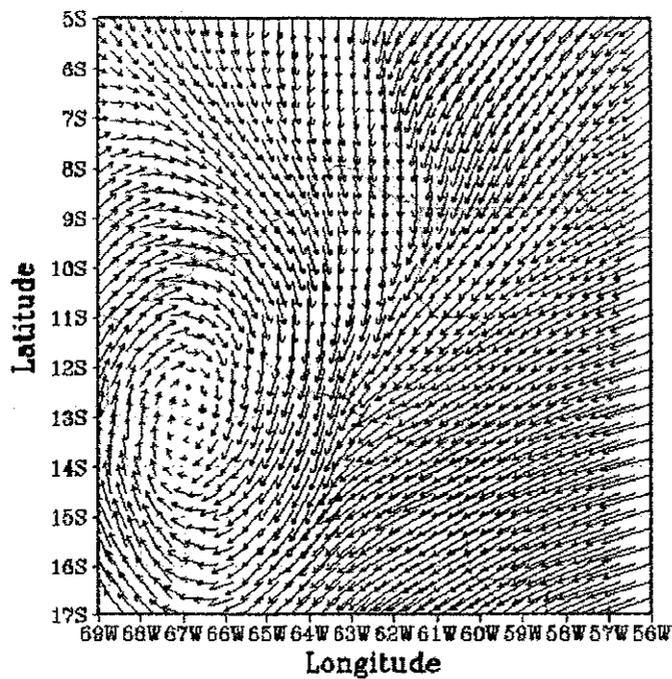


Fig. 66 – Vetor vento médio (m/s) para o experimento EXPMC2 na grade 2 da simulação

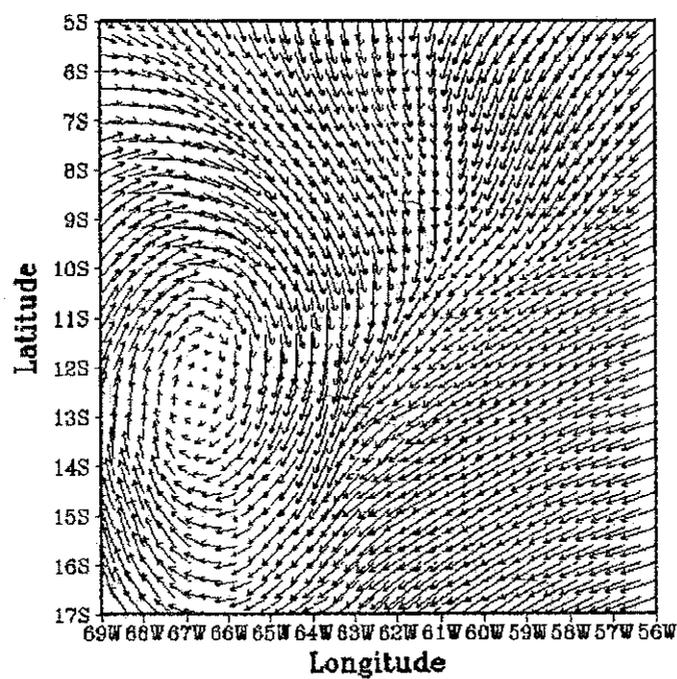


Fig. 67 – Vetor vento médio (m/s) para o experimento EXPSC2 na grade 2 da simulação

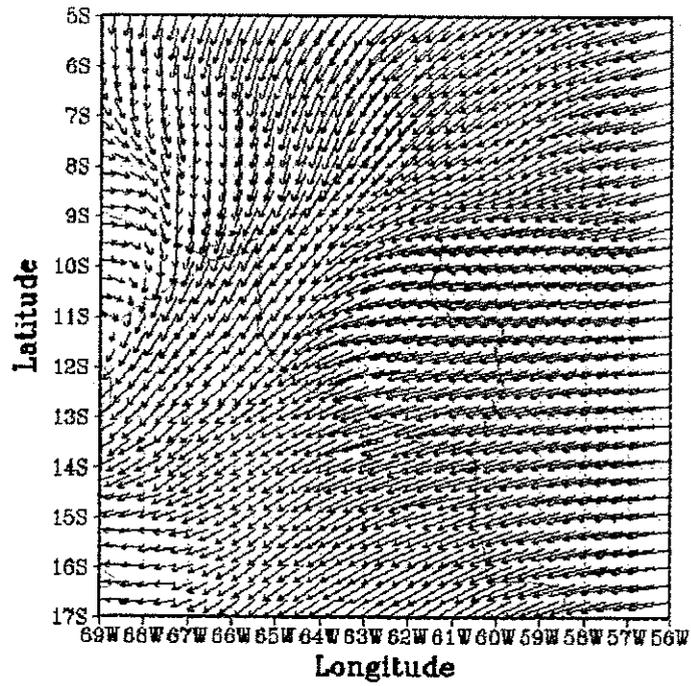


Fig. 68 – Vetor vento médio (m/s) para o experimento EXPLO2 na grade 2 da simulação

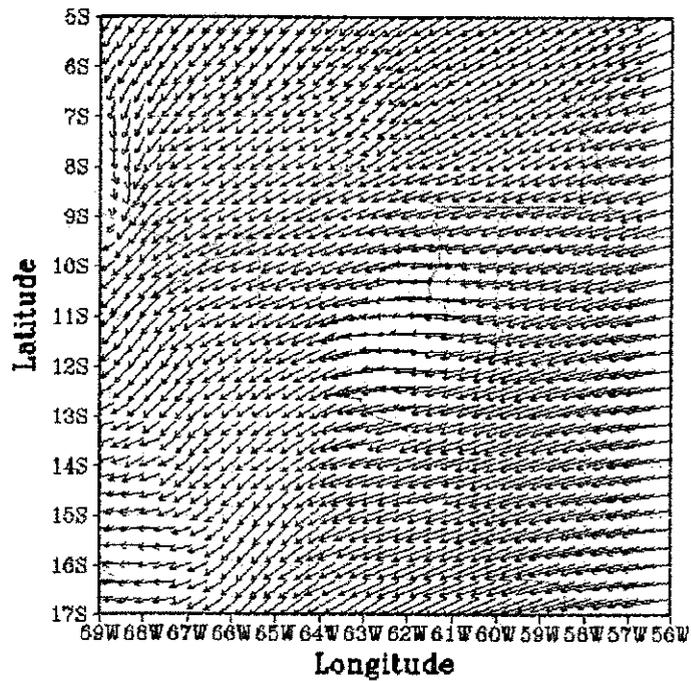


Fig. 69 – Vetor vento médio (m/s) para o experimento EXPKUO2 na grade 2 da simulação

4.3 Comparação entre as duas Grades para um mesmo Esquema de Parametrização

Convectiva:

Nesta seção a única variável utilizada para análises será a taxa de precipitação (mm/h), com o objetivo de verificar se há diferenças significativas entre um mesmo esquema de parametrização convectiva em virtude da resolução escolhida para a grade.

A Figura 70 mostra a evolução temporal da taxa de precipitação do esquema AS para as grades 1 e 2 da simulação. Observa-se que durante os quatro dias da simulação o esquema AS produziu mais precipitação na grade 2 da simulação. Apresentando diferenças de quase 1mm/h, entre 48 e 66 horas. Dessa maneira, o esquema AS se mostrou muito sensível à resolução.

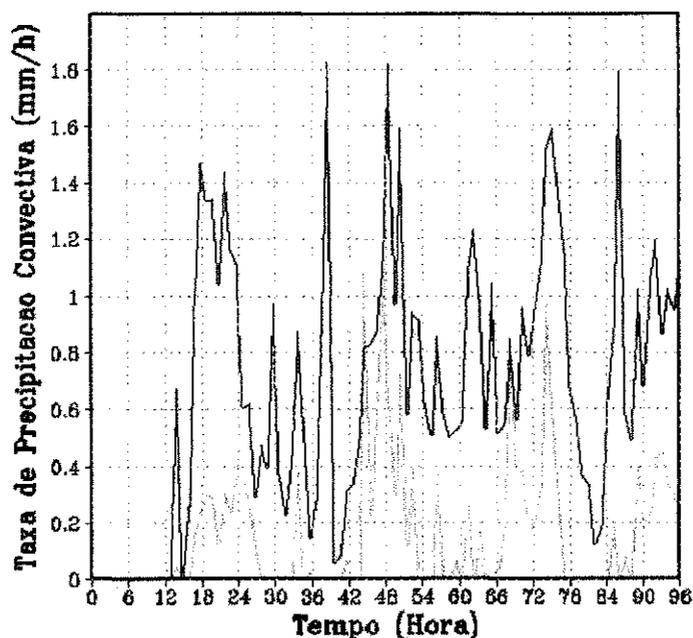


Fig. 70 – Evolução temporal da taxa de precipitação convectiva (mm/h) para os experimentos EXPAS1 (azul claro) e EXPAS2 (preto)

A Figura 71 mostra a evolução temporal da taxa de precipitação convectiva para o esquema EN nas grades 1 e 2 da simulação. O esquema EN também produziu mais

precipitação na grade 2 da simulação, apresentado uma diferença maior entre as duas grades entre 48 e 66 horas, de aproximadamente 0,6 mm/h.

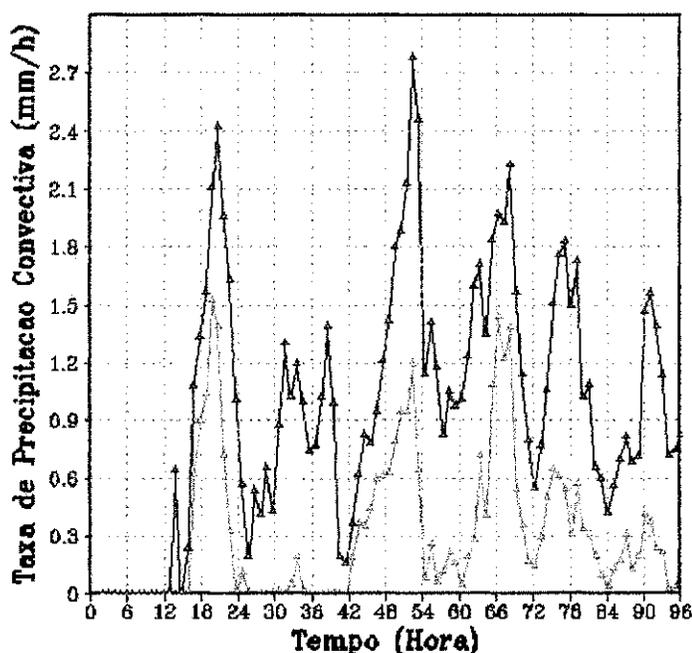


Fig. 71 – Evolução temporal da taxa de precipitação convectiva (mm/h) para os experimentos EXPEN1 (azul escuro) e EXPEN2 (preto)

As Figuras 72 a 76 mostram a evolução temporal da taxa de precipitação convectiva para os experimentos EXPGR, EXPKUO, EXPLO, EXPMC e EXPSC para as duas grades da simulação. Esses esquemas apresentaram valores bem mais próximos entre as duas grades do que os dois esquemas das figuras anteriores. Os esquemas AS e EN apresentaram maior sensibilidade à resolução da escala do que os outros esquemas. Os esquemas MC e GR apresentam valores mais próximos de taxa de precipitação entre as duas grades das simulações, dando um indicativo de que esses esquemas sofrem uma influência menor com relação a grade escolhida. Contudo, observando a precipitação acumulada para as grades 1 e 2 (ver Figuras 4 e 47) vê-se que os esquemas Kuo, LO e MC apresentam diferenças menores entre as duas grades.

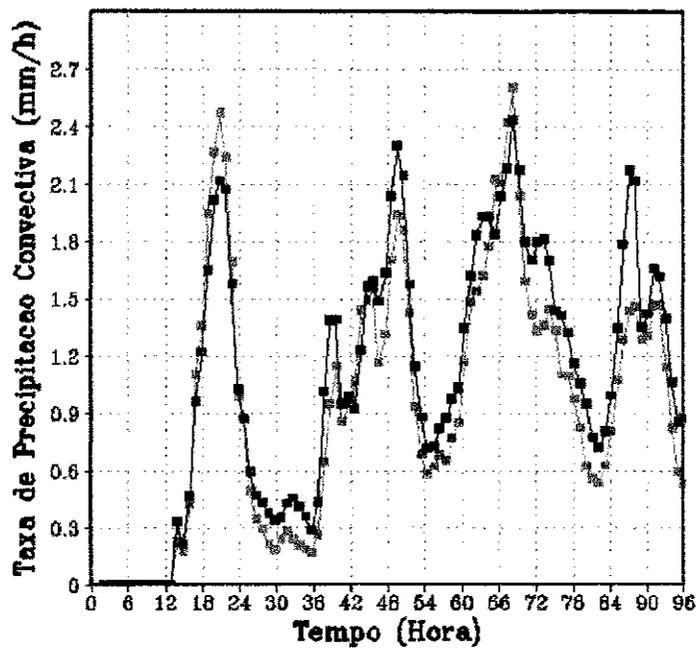


Fig. 72 – Evolução temporal da taxa de precipitação convectiva (mm/h) para os experimentos EXPGR1 (verde) e EXPGR2 (preto)

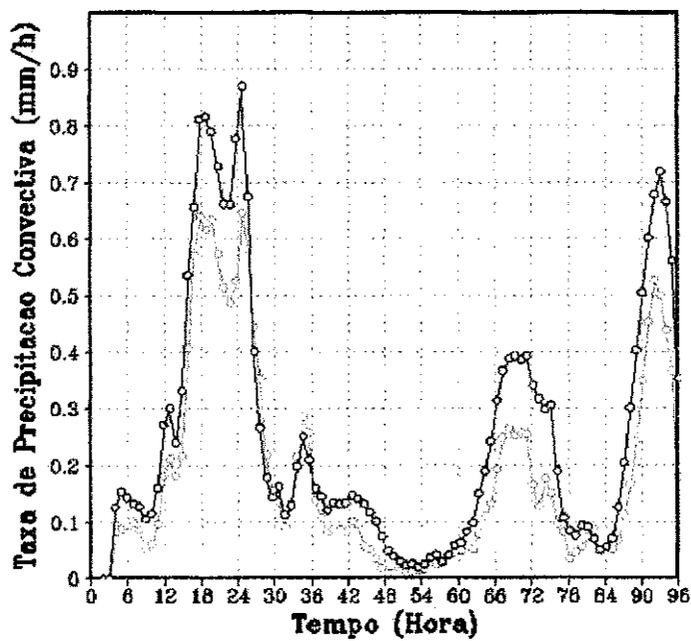


Fig. 73 – Evolução temporal da taxa de precipitação convectiva (mm/h) para os experimentos EXPKUO1 (cinza) e EXPKUO2 (preto)

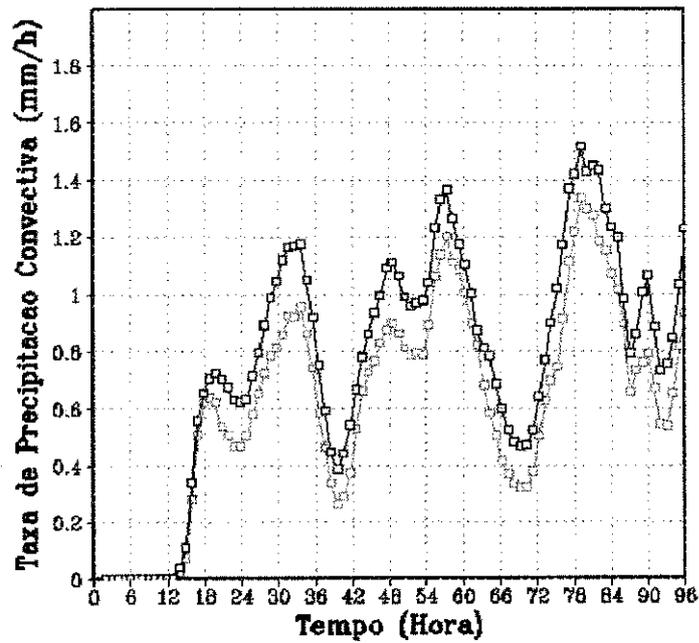


Fig. 74 – Evolução temporal da taxa de precipitação convectiva (mm/h) para os experimentos EXPLO1 (vermelho) e EXPLO2 (preto)

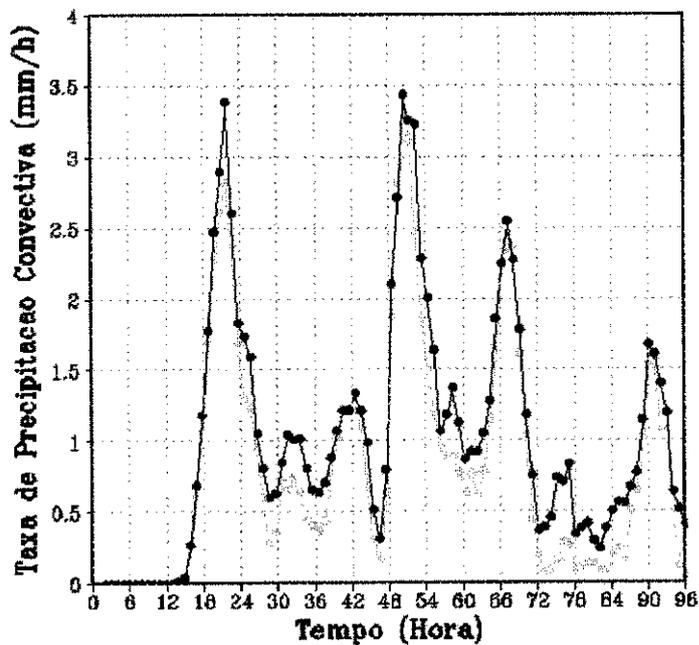


Fig. 75 – Evolução temporal da taxa de precipitação convectiva (mm/h) para os experimentos EXPMC1 (amarelo) e EXPMC2 (preto)

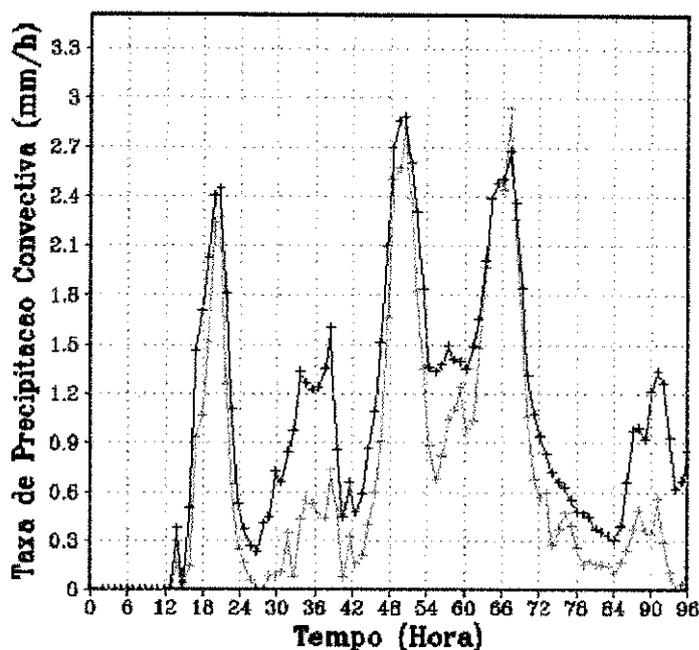


Fig. 76 – Evolução temporal da taxa de precipitação convectiva (mm/h) para os experimentos EXPSC1 (rosa) e EXPSC2 (preto)

4.4 Considerações Finais

Apesar dos fechamentos GR, AS e LO, associados ao esquema Grell, serem baseados no cálculo do fluxo de massa, é interessante observar que eles produzem efeitos significativamente diferentes, um exemplo disso é o que é visto na precipitação convectiva acumulada. A convecção, nesses esquemas, é modulada pela atmosfera de maneira muito diferente entre eles, como visto nos fluxos de calor latente e sensível à superfície. E, conseqüentemente, a atmosfera também é modulada, pela convecção produzida por esses esquemas, de maneira significativamente diferente. Isso mostra que esses fechamentos são muito sensíveis à maneira como suas variáveis são calculadas, pois no esquema GR a função trabalho da nuvem A é calculada localmente, enquanto que no esquema AS é utilizado um valor climatológico de A e no esquema LO o fluxo de massa na base da nuvem é proporcional ao fluxo de massa do ambiente no nível de convecção livre.

Com relação aos esquemas MC e Kuo, apesar dos dois serem baseados na relação entre a convergência total de umidade e a precipitação convectiva, produzem valores de precipitação acumulada bastante diferentes. Essa diferença também é observada na taxa de precipitação convectiva e nas taxas de umedecimento e aquecimento devidas à convecção profunda, onde se detectou a maior diferença. Por outro lado, esquemas baseados em tipos de fechamentos diferentes apresentam valores próximos, a exemplo dos esquemas GR e MC que mostram valores de precipitação acumulada próximos.

A diferença entre os experimentos, ao longo de toda a simulação e em toda a troposfera, mostra que a taxa de aquecimento/resfriamento radiativo não varia muito, pois é da mesma ordem de magnitude, independente do fechamento escolhido. A variação vista nas taxas de aquecimento convectivo não se refletiu nas taxas de aquecimento/resfriamento radiativo. Isso implica em grande diferença na forma como a convecção vai interagir com a grande escala e tem importante impacto, por exemplo, na maneira de como a energia potencial disponível da atmosfera vai ser gerada, acumulada e transformada em energia cinética. Note-se que essa energia, no final das contas, vai ser a fonte para os sistemas de latitudes médias (Holton, 1992). Para estudar esse impacto de forma mais coerente, seriam necessários experimentos com um modelo de circulação global, de modo que pudessem ser estudadas a energia das ondas longas e sua interação com a convecção. Isso tudo implica em diferentes processos de ajuste ao equilíbrio quase geostrófico para a região tropical. Seria interessante, por exemplo, verificar a interação entre modos, a partir de cada fechamento, para um estudo de ondas tropicais como o de Silva Dias et al. (1983), por exemplo.

Com relação ao campo do vento médio, os esquemas EN, GR, MC e SC apresentaram configurações semelhantes. O esquema LO apresentou uma configuração similar, porém deslocada para oeste. Contudo, o esquema Kuo apresentou uma

configuração diferente, pois não produziu um ciclone à oeste de Rondônia como visto nos outros esquemas.

Houve uma grande dificuldade em se detectar o melhor esquema de parametrização convectiva para o modelo BRAMS na região tropical do Brasil. Em virtude da falta de dados observados disponíveis e à grande variação vista entre os esquemas de parametrização. Contudo, esse estudo aponta para uma vasta gama de opções por fechamentos que produzam boas simulações para situações específicas. Com isso, há um grande potencial de ajuste para o BRAMS para uso operacional na região tropical.

A idéia do trabalho de Grell & Dévényi (2002) é que os esquemas sejam testados e que, no final, o fluxo médio seja ponderado de modo que maior peso seja dado aos fechamentos que se mostrem mais eficientes para uma determinada região. Na versão atual, o fluxo médio, na opção EN, é calculado através de uma média aritmética entre todos os fluxos. Essa perspectiva de ajuste abre uma grande possibilidade de uso de BRAMS, quando comparada com o esquema de Kuo, cuja capacidade de desenvolvimento é bastante limitada.

CAPÍTULO 5

5 CONCLUSÕES

Foram realizadas simulações com o esquema de parametrização convectiva Kuo, padrão do BRAMS, e com os fechos associados ao esquema de parametrização convectiva Grell, disponíveis no BRAMS por um período de 96 horas. O objetivo do trabalho foi analisar os efeitos causados pelos diferentes fechamentos dos esquemas de parametrização convectiva com relação aos campos das variáveis em estudo, ao mesmo tempo em que foi comparado cada fecho associado ao esquema Grell com o esquema Kuo, na tentativa de avaliar qual o melhor esquema de parametrização convectiva para o modelo BRAMS na região tropical. Também foi analisada a sensibilidade de cada fechamento à resolução horizontal a partir de experimentos com resoluções de 80 e 20 km.

Com base nos resultados obtidos, têm-se como principais conclusões:

O esquema Kuo apresentou os menores valores da taxa precipitação durante toda a simulação.

Os esquemas de parametrização apresentaram uma grande diversidade no comportamento da precipitação ao longo da simulação.

O experimento que mais se distanciou do esquema Kuo foi o esquema Grell, chegando a apresentar 75 mm de precipitação acumulada a mais que o Kuo durante o período da simulação. E o experimento que se aproximou mais do esquema Kuo foi o AS, com relação a precipitação.

Os esquemas AS e EN apresentaram comportamento da taxa de precipitação semelhante à média observada no período dos ventos de leste, porém não durante toda a simulação.

Na grade 1 da simulação os esquemas GR, LO, MC e SC apresentaram valores máximos de precipitação entre 12 e 18 UTC, período em que não foi detectada precipitação nos valores médios observados para o período dos ventos de leste, porém detectou-se precipitação nesse intervalo na média observada dos dias em que passou uma banda de precipitação sobre a região em estudo. Na grade 2 a maioria dos experimentos também detectaram precipitação nesse intervalo.

O único esquema que apresentou comportamento diurno semelhante aos valores médios observados para o período de leste durante toda a simulação foi o Kuo, porém com valores significativamente menores.

O experimento EXPMCI foi o que mais se aproximou do ciclo diurno médio observado, porém apenas no último dia da simulação.

Com relação ao fluxo de calor latente à superfície o esquema que se aproximou mais da média observada foi o EXPAS.

Não foi verificado, em média, muito impacto dos fechamentos na configuração do campo de radiação emitida pela superfície.

Observa-se que o esquema AS secou mais a atmosfera do que o esquema Kuo. O esquema AS atingiu um nível mais profundo da atmosfera, chegando até aproximadamente 450 hPa.

Os experimentos, ao longo de toda a simulação e em toda a troposfera, mostraram que a taxa de aquecimento/resfriamento radiativo não varia muito de acordo com o fechamento escolhido. Ao contrário das taxas de aquecimento devidas à convecção.

O esquema Souza (1999) apresentou uma boa interface também com o esquema Grell & Dévényi (2002), independente do fechamento.

Com relação à resolução da grade os melhores esquemas foram o MC e GR, pois praticamente não apresentaram impactos.

Sugestões para trabalhos futuros:

- Testar o desempenho do BRAMS com o fluxo médio do esquema Grell sendo calculado a partir de média ponderada entre os fechamentos.
- Testar a sensibilidade de cada fechamento a resoluções horizontais distintas das deste trabalho.
- Testar a sensibilidade de cada fechamento a resoluções separadas, sem ser grades aninhadas, a fim de evitar a influência de uma grade na outra.
- Fazer esse estudo aplicado à região Nordeste do Brasil, a fim de verificar se serão obtidos resultados semelhantes.
- Testar o impacto da implementação de um esquema como o Grell no processo de ajuste geostrófico da atmosfera, com ênfase à energética das ondas geradas durante os eventos convectivos, em modo climático.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS, D. K.; RENNO, N. O. Remarks on Quasi-Equilibrium Theory. **Journal of the Atmospheric Sciences**. V. 60, 178-181, 2003.

ANTHES, R. A.; WARNER, T. T. Development of Hydrodynamic Models Suitable for Air Pollution and other Mesometeorological Studies. **Monthly Weather Review**. V. 106, 1045-1078, 1978.

ARAKAWA, A.; SCHUBERT W. H. Interaction of a Cumulus Cloud Ensemble with the Larger-Scale Environment. Part I. **Journal of the Atmospheric Sciences**. V. 31, 674-701, 1974.

BETTS, A. K. Parametric Interpretation of Trade-Wind Cumulus Budget Studies. **Journal of the Atmospheric Sciences**. V. 32, 1934-1945, 1975.

_____. A New Convective Adjustment Scheme. Part I: Observational and Theoretical Basis. **Quarterly Journal of Royal Meteorological Society**. V. 112, 677-691, 1986.

_____; MILLER, M.J. A New Convective Adjustment Scheme. Part II: Single Column Tests using GATE wave, BOMEX, ATEX and Arctic Air_Mass data set. **Journal of the Atmospheric Sciences**. V. 112, 693-709, 1986.

_____. Saturation Point Analysis of Moist Convective Overturning. **Journal of the Atmospheric Sciences**. V. 39, 1484-1504, 1982a.

_____. Cloud Thermodynamic Models in Saturation Point Coordinates. **Journal of the Atmospheric Sciences**. V. 39, 2182-2191, 1982b

_____; 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, nº D20, 2002.

BLYTH, A. M.; LATHAM, J. An Airborne Study of Vertical Structure and Microphysical Variability within a Small Cumulus. **Quarterly Journal of Royal Meteorological Society**. V. 111, 773-792, 1985.

- BOATMAN, J. F.; AUER, A. H. The Role of Cloud Top Entrainment in Cumulus Clouds. **Journal of the Atmospheric Sciences**. v. 40, 1517-1534, 1983.
- BROWN, J. M. Mesoscale Unsaturated Downdrafts Driven by Rainfall Evaporation: A Numerical Study. **Journal of the Atmospheric Sciences**. v.36, 313-338, 1979.
- CAVALCANTI, E. P. **Teor e Transporte de Vapor d' Água na Atmosfera do Nordeste do Brasil**. 2001. 115p. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande.
- CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; SILVA DIAS, M. A. F. Intraseasonal Large-Scale Circulations and Mesoscale Convective Activity in Tropical South America during the TRMM-LBA Campaign. **Journal of Geophysical Research**. v. 107, N° D20, 2002.
- CHEN, F.; COTTON, W. R. A One-Dimensional Simulation of the Stratocumulus Capped Mixed Layer. **Boundary-Layer Meteorology**. v. 25, 289-321, 1983.
- CHO, H.; OGURA, Y. A Relationship Between Cloud Activity and the Low-Level Convergence as Observed in Reed-Recker's Composite Easterly Waves. **Journal of the Atmospheric Sciences**. v. 31, 2058-2065, 1974.
- COTTON, W. R. On Parameterization of Turbulent Transport in Cumulus Clouds. **Journal of the Atmospheric Sciences**. v. 32, 548-564, 1975.
- COTTON, W. R.; ANTHES, R. A. **Storm and Cloud Dynamics**, Academic Press Inc., San Diego, 883p. 1989.
- DONNER, L. J. A Cumulus Parameterization Including Mass Fluxes, Vertical Momentum Dynamics, and Mesoscale Effects. **Journal of Atmospheric Sciences**. v. 50, 889-906, 1993.
- EMANUEL, K. A.; RAYMOND, D. J. **The Representation of Cumulus Convection in Numerical Models**. American Meteorological Society. v. 24, N° 46, 1993.
- EMANUEL, K. A. **Atmospheric Convection**. Oxford University Press. 580p., 1994.
- EMANUEL, K. A.; NEELIN, J. D.; BRETHERTON, C. S. On Large-Scale Circulations in Convecting Atmospheres. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.120, 1111-1143, 1994.
- FRANK, W. M.; COHEN, C. Simulation of Tropical Convective Systems. Part I: A Cumulus Parameterization. **Journal of Atmospheric Sciences**. v. 44, 3787-3799, 1987.
- FRITSCH, J. M.; CHAPPELL, C. F. Numerical Prediction of Convectively Driven Mesoscale Pressure Systems. Part I: Convective Parameterization. **Journal of Atmospheric Sciences**. v. 37, 1722-1733, 1980.

GARRATT, J. R. *The Atmospheric Boundary Layer*, Ed. Jonh Houghton, Michael Rycroft & Alexander Dessler, **Cambridge University Press**, 316p., 1992.

GRELL, G. A.; DÉVÉNYI, D. A New Approach to Parameterizing Convection Using Ensemble and Data Assimilation Techinques. **Geophysical Research Lettes**. V. 29. Art. N° 1693, 2002

HOLTON J. R., **An Introduction to Dynamic Meteorology**. 3rd. Ed. Academic Press, Inc., 511 p. 1992

JENSEN, J. B. AUSTIN, P. H.; BLYTH, A. M. Turbulent Mixing, Spectral Evolution and Dynamics in a Warm Cumulus Cloud. **Journal of the Atmospheric Sciences**. V.42, 173-192, 1985.

JOHNSON, R. H. The Role of Convective-Scale Precipitation Downdrafts in Cumulus and Synoptic-Scale Interactions. **Journal of the Atmospheric Sciences**. V. 33, 1890-1910, 1976.

_____, R. H. Diagnosis of Convective and Mesoscale Motions During Phase III of GATE. **Journal of the Atmospheric Sciences**. V. 37, 733-753, 1980.

KAIN, J. S.; FRITSCH, J. M. The Role of the Convective "Trigger Function" in Numerical Forecasts of Mesoscale Convective Systems, **Meteorological Atmospheric Physics**. V. 49, 93-106, 1992.

KREITZBERG, C. W.; PERKEY, D. J. Release of potential instability: Part I. A Sequential Plume Model within a Hydrostatic Primitive Equation Model. **Journal of the Atmospheric Sciences**. V.33, 456-475, 1976.

KRISHNAMURTI, T. N.; KANAMITSU, M.; GODBOLE, R.; CHANG, C. B.; CARR, F.; CHOW, J. Study of a Monsoon Depression (II). Dynamical Structure. **Journal of the Meteorological Society**. V. 54, 208-225, 1976.

KRISHNAMURTI, T. N; RAMANATHAN, Y.; PAN, H. -L.; PASCH, R.; MOLINARI, J. Cumulus Parameterization and Rainfall Rates I. **Monthly Weather Review**. V. 108, 465-472, 1980.

_____; LAM, S. -L.; PASCH, R. Cumulus Parameterization and Rainfall Rates II. **Monthly Weather Review**. V. 111, 815-828, 1983.

KUO, H.-L. On Formation and Intensification of Tropical Cyclones though Latent Heat Release by Cumulus Convection. **Journal of the Atmospheric Sciences**. V. 22, 40-63, 1965.

_____. Further Studies of the Parameterization of the Influence of Cumulus Convection on Large-Scale Flow. **Journal of the Atmospheric Sciences**. V. 31, 1232-1240, 1974.

_____; ANTHES, R. A. Mesoscale Budgets of Heat and Moisture in a Convective System over the Central United States. **Monthly Weather Review**. V. 112, 1482-1497, 1984c.

MANABE, S.; SMAGORINSKY, J.; STRICKLER, R. F. Simulated Climatology of a General Circulation Model with a Hydrological Cycle. **Monthly Weather Review**. V. 93, 769-798, 1965.

MELLOR, G; YAMADA, T. Development of a turbulence closure model for use in geophysical fluid problems. **Reviews of Geophysics and Space Physics**, v.20, 851-857, 1982.

MOLINARI, J. A Method for Calculating the Effects of Deep Cumulus Convection in Numerical Model. **Monthly Weather Review**. V. 110, 1527-1534, 1982.

MOLINARI, J. A General Form of Kuo's Cumulus Parameterization. **Monthly Weather Review**. V. 113, 1411-1416, 1985.

MOLINARI, J.; CORSETTI, T. Incorporation of Cloud-Scale and Mesoscale Downdrafts into a Cumulus Parameterization: Results of One-and Three-Dimensional Integrations. **Monthly Weather Review**. V. 113, 485-501, 1985.

OGURA, Y.; CHO, H. -R. Diagnostic Determination of Cumulus Populations from Large-Scale Variables. **Journal of the Atmospheric Sciences**. V. 30, 1276-1286, 1973.

PALUCH, I. R. The Entrainment Mechanism in Colorado Cumuli. **Journal of the Atmospheric Sciences**. V. 36, 2467-2478, 1979.

PIELKE, R. A.; COTTON, W. R.; WALKO R. L.; TREMBACK, C. J.; LYONS, W. A.; GRASSO, L. D.; NICHOLS, M. E.; MORAN, M. D.; WESLEY, D. A.; LEE, T. J.; COPELAND J. H. A Comprehensive Meteorological Modeling System-RAMS. **Meteorology and Atmospheric Physics**. V. 49, 69-91, 1992.

RENNÓ, N. O.; INGERSOLL, A. P. Natural Convection as a Heat Engine: A Theory for CAPE. **Journal of the Atmospheric Sciences**. V. 53, 572-585, 1996.

SIMPSON, J.; WIGGERT, V. Models of Precipitating Cumulus Tower. **Monthly Weather Review**. V. 97, 471-489, 1969.

SILVA DIAS, M. A. F.; PETERSEN, W.; DIAS, P. L. S.; CIFELLI, R.; BETTS, A. K.; LONGO, M.; GOMES, A. M.; FISCH, G.F.; LIMA, M. A.; ANTONIO, M. A., ALBRECHT, R. I. A Case Study of Convective Organization into Precipitating Lines in the Southwest Amazon during the WETAMC and TRMM-LBA. **Journal of Geophysical Research**. V. 107, D20, 2002.

SQUIRES, P.; TURNER, J. S. An Entraining Jet Model for Cumulonimbus Updraughts. **Tellus**. V. 14, 422-434, 1962.

SOUZA, E. P. **Estudo Teórico e Numérico da Relação entre Convecção e Superfícies Heterogêneas na Região Amazônica**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 121p., 1999.

SOUZA, E. P.; SILVA, E. M. Impacto da Implementação de uma Parametrização de Convecção Rasa em um Modelo de Mesoescala. Descrição e Testes de Sensibilidade do Esquema. **Revista Brasileira de Meteorologia**. V. 18 n.1, 33-42, 2003.

SOUZA, E. P.; RAO, T. V. R.; PRESTE, A. C. A. Contribuições dos Efeitos Locais e Advectivos para a Precipitação no Nordeste do Brasil em dois Períodos Chuvosos Contrastantes. **Revista Brasileira de Meteorologia**. V. 16, n.2, 135-143, 2001.

TIEDTKE, M. A Comprehensive Mass Flux Scheme for Cumulus Parameterization in Large-Scale Models. **American Meteorological Society**. V. 117, 1779-1800, 1989.

WALKO, R. L., et al. New Rams Cloud Microphysics Parameterization. 1. The Single-Moment Scheme. **Atmospheric Research**. V. 38 (1-4), 29-62, 1995.

YANAI, M.; ESBENSEM, S.; CHU, J. -H. Determination of Bulk Properties of Tropical Cloud Clusters from Large-Scale Heat and Moisture Budgets. **Journal of the Atmospheric Sciences**. V. 30, 611-627, 1973.

YANO, J. L. 1999. Scale-Separation and Quasi-Equilibrium Principles in Arakawa and Schubert's Cumulus Parameterization. **Journal of the Atmospheric Sciences**. V. 56, 3821-3823, 1999.