



Universidade Federal de Campina Grande – UFCG
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais – CTRN
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas – UACA
Programa de Pós-Graduação em Meteorologia
Curso de Mestrado

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM ESQUEMA DE CONVECÇÃO RASA
BASEADO EM FECHAMENTO DE PRIMEIRA ORDEM NO BRAMS**

Soetânia Santos de Oliveira
Orientador: Dr. Enio Pereira de Souza

Campina Grande – PB
Março de 2009

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM ESQUEMA DE CONVECÇÃO RASA
BASEADO EM FECHAMENTO DE PRIMEIRA ORDEM NO BRAMS**

Soetânia Santos de Oliveira

Orientador: Dr. Enio Pereira de Souza

Campina Grande – PB

Março de 2009

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

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM ESQUEMA DE CONVECÇÃO RASA
BASEADO EM FECHAMENTO DE PRIMEIRA ORDEM NO BRAMS**

Área de concentração: Meteorologia de Meso e Grande Escalas

Subárea: Modelagem Numérica da Atmosfera

Campina Grande – PB

Março de 2009

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

O48i Oliveira, Soetânia Santos de.
2009 Implementação de um esquema de convecção rasa baseado em
 fechamento de primeira ordem no BRAMS / Soetânia Santos de Oliveira.
 — Campina Grande, 2009.
 78 f.: il.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de
Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

Referências.

Orientador: Prof. Dr. Enio Pereira de Souza.

1. Convecção Rasa Noturna. 2. Parametrização. 3. BRAMS. I. Título.

CDU - 551.576:531-142.3(043)

SOETÂNIA SANTOS DE OLIVEIRA

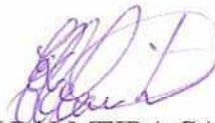
IMPLEMENTAÇÃO DE UM ESQUEMA DE CONVECÇÃO RASA BASEADO EM
FECHAMENTO DE PRIMEIRA ORDEM NO BRAMS

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 05/03/2009

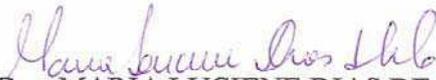
BANCA EXAMINADORA



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



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



Profa. Dra. MARIA LUCIENE DIAS DE MELO
Instituto de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Alagoas

*Este trabalho é dedicado à minha
família, por essa ser o meu bem
mais precioso.*

AGRADECIMENTOS

A Deus pela alegria de viver e continuar aprendendo constantemente, e pela força que me deu para enfrentar as dificuldades que surgiram.

Aos meus amados pais, Maria de Lourdes S. Oliveira e Francisco Carlos de Oliveira, pela confiança, credibilidade e o carinho que me dedicaram em todos os momentos da vida.

Aos meus irmãos, Suetônio e Suênio, e aos demais familiares e amigos que sempre me apoiaram e torceram pelo meu sucesso.

A Herlanderson, que com seu carinho e dedicação me ajudou a superar os momentos mais difíceis, e cujo sorriso me traz imensa alegria.

Ao meu orientador, Dr. Enio Pereira de Souza, por ter acreditado no meu potencial e pela dedicação e paciência com que me orientou.

Aos membros da banca examinadora, pela colaboração na melhoria e engrandecimento deste trabalho.

Aos colegas do curso de Pós-Graduação em Meteorologia pela convivência em todos os momentos. Agradeço em especial a Leandro Velez, Ailton, Taciana e Cícera por se fazerem presentes nos momentos alegres e difíceis durante este tempo de estudo.

A Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, pela oportunidade de realizar este curso.

Aos professores, cujo empenho em transmitir conhecimento de forma clara facilitou bastante meu aprendizado ao longo do curso.

Aos funcionários da Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, em particular a Divanete e Eyres, que se mostraram sempre dispostas a ajudar quando precisei.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq) pelo suporte financeiro.

Em fim, muitas foram as pessoas que me ajudaram, direta e indiretamente, na realização deste trabalho, citar todas aqui não seria possível, porém deixo aqui registrada a minha profunda gratidão a todas elas.

IMPLEMENTAÇÃO DE UM ESQUEMA DE CONVECÇÃO RASA BASEADO EM FECHAMENTO DE PRIMEIRA ORDEM NO BRAMS

RESUMO

Neste trabalho, um esquema de parametrização de convecção rasa foi implementado no modelo BRAMS. O esquema é baseado em um fechamento de turbulência de primeira ordem e o foco principal é a representação da convecção noturna. Foram realizados experimentos variando a resolução de grade do modelo e o tipo de parametrização de convecção profunda para testar a sensibilidade do novo esquema de parametrização quanto à resolução de grade e ao tipo de parametrização de convecção profunda usados. O modelo foi integrado para um período de 96 horas a partir da 00:00 UTC do dia 23 de março de 2004. Os resultados mostram um impacto mais significativo nos três primeiros dias de simulação para os parâmetros analisados. Além disso, o novo esquema de parametrização de convecção rasa mostrou-se mais sensível ao tipo de convecção profunda usada do que a resolução de grade. De forma geral, o impacto da convecção rasa noturna sobre os parâmetros analisados, foi mais expressivo quando o modelo foi integrado com a parametrização de convecção profunda do tipo Grell, em comparação com a parametrização do tipo Kuo. Quanto à resolução de grade, os resultados mostraram que o comportamento da parametrização é pouco sensível, no intervalo de 20 a 50 km.

Palavras-chave: Convecção rasa noturna. Parametrização. BRAMS.

IMPLEMENTING A SHALLOW-CONVECTION SCHEME BASED ON A FIRST ORDER CLOSURE IN BRAMS

ABSTRACT

In this work, a parameterization scheme for shallow-cumulus convection is implemented in the BRAMS model. The scheme is based on a first-order closure for turbulence, and the main focus of the study is the nocturnal convection. We performed several experiments varying both the model's grid resolution and the deep-convection parameterization type in order to test the sensitivity of the new scheme to model resolution and deep-convection. The model was run for a 96-hours period, starting at 00:00 UTC of 23 Mar 2004. Results show a more evident impact in the first three day of simulation. Furthermore the new shallow-convection scheme showed more sensitivity to the deep-convection scheme type than to the model resolution. In general the impact of the nocturnal shallow convection was more remarkable when the Grell scheme was used, in comparison with the Kuo-type scheme. On the other hand, the results suggest that the parameterization shows low sensitivity to the resolution in the 20 to 50 km interval.

Key words: Nocturnal shallow convection. Parameterization. BRAMS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Precipitação acumulada (mm) para o experimento ECR2G, durante o período de 96 horas de integração do modelo.....	35
Figura 2	– Tendência de temperatura (°C/dia) devido à convecção rasa para o experimento ECR2GC, ao longo das 96 horas de integração do modelo.....	37
Figura 3	– Tendência de umidade [g/(kg.dia)] devido à convecção rasa para o experimento ECR2GC, ao longo das 96 horas de integração do modelo.....	38
Figura 4	– Precipitação convectiva acumulada (mm) para o experimento ECR2GC, ao longo das 96 horas de integração do modelo.....	39
Figura 5	– Fluxos de energia na superfície (W/m^2) para o experimento ECR2GC, ao longo das 96 horas de integração do modelo. Saldo de radiação (círculo aberto), fluxo de calor sensível (quadrado aberto), fluxo de calor latente (círculo fechado).....	40
Figura 6	– Tendência de temperatura (°C/dia) devido à convecção rasa para o experimento ECR2GO, ao longo das 96 horas de integração do modelo.....	41
Figura 7	– Tendência de umidade [g/(kg.dia)] devido à convecção rasa para o experimento ECR2GO, ao longo das 96 horas de integração do modelo.....	42
Figura 8	– Precipitação convectiva acumulada (mm) para o experimento ECR2GO, ao longo das 96 horas de integração do modelo.....	43
Figura 9	– Fluxos de energia na superfície (W/m^2) para o experimento ECR2GO, ao longo das 96 horas de integração do modelo. Saldo de radiação (círculo aberto), fluxo de calor sensível (quadrado aberto), fluxo de calor latente (círculo fechado).....	44
Figura 10	– Precipitação acumulada (mm) para o experimento ECR5G durante o período de 96 horas de integração do modelo.....	45
Figura 11	– Tendência de temperatura (°C/dia) devido à convecção rasa para o experimento ECR5GC, ao longo das 96 horas de integração do modelo.....	46
Figura 12	– Tendência de umidade [g/(kg.dia)] devido à convecção rasa para o experimento ECR5GC, ao longo das 96 horas de integração do modelo.....	46
Figura 13	– Precipitação convectiva acumulada (mm) para o experimento ECR5GC, ao longo das 96 horas de integração do modelo.....	47
Figura 14	– Fluxos de energia na superfície (W/m^2) para o experimento ECR5GC, ao longo das 96 horas de integração do modelo. Saldo de radiação (círculo aberto), fluxo de calor sensível (quadrado aberto), fluxo de calor latente (círculo fechado).....	48
Figura 15	– Tendência de temperatura (°C/dia) devido à convecção rasa para o experimento ECR5GO, ao longo das 96 horas de integração do modelo.....	49
Figura 16	– Tendência de umidade [g/(kg.dia)] devido à convecção rasa para o experimento ECR5GO, ao longo das 96 horas de integração do modelo.....	50
Figura 17	– Precipitação convectiva acumulada (mm) para o experimento ECR5GO, ao longo das 96 horas de integração do modelo.....	51
Figura 18	– Fluxos de energia na superfície (W/m^2) para o experimento ECR5GO, ao longo das 96 horas de integração do modelo. Saldo de radiação (círculo aberto), fluxo de calor sensível (quadrado aberto), fluxo de calor latente (círculo fechado).....	52
Figura 19	– Precipitação acumulada (mm) para o experimento ECR2K, ao longo das 96 horas de integração do modelo.....	55

Figura 20	– Tendência de temperatura (°C/dia) devido à convecção rasa para o experimento ECR2KC, ao longo das 96 horas de integração do modelo.....	56
Figura 21	– Tendência de umidade [g/(kg.dia)] devido à convecção rasa para o experimento ECR2KC, ao longo das 96 horas de integração do modelo.....	57
Figura 22	– Precipitação convectiva acumulada (mm) para o experimento ECR2KC, ao longo das 96 horas de integração do modelo.....	58
Figura 23	– Fluxos de energia na superfície (W/m ²) para o experimento ECR2KC, ao longo das 96 horas de integração do modelo. Saldo de radiação (círculo aberto), fluxo de calor sensível (quadrado aberto), fluxo de calor latente (círculo fechado).....	59
Figura 24	– Tendência de temperatura (°C) para o experimento ECR2KO, ao longo das 96 horas de integração do modelo.....	60
Figura 25	– Tendência de umidade [g/(kg.dia)] devido à convecção rasa para o experimento ECR2KO, ao longo das 96 horas de integração do modelo.....	60
Figura 26	– Precipitação convectiva acumulada (mm) para o experimento ECR2KO, ao longo das 96 horas de integração do modelo.....	61
Figura 27	– Fluxos de energia na superfície (W/m ²) para o experimento ECR2KO, ao longo das 96 horas de integração do modelo. Saldo de radiação (círculo aberto), fluxo de calor sensível (quadrado aberto), fluxo de calor latente (círculo fechado).....	62
Figura 28	– Tendência de temperatura (°C) devido à convecção rasa para o experimento ECR5KC, ao longo das 96 horas de integração do modelo.....	63
Figura 29	– Tendência de umidade [g/(kg.dia)] devido à convecção rasa para o experimento ECR5KC, ao longo das 96 horas de integração do modelo.....	64
Figura 30	– Precipitação convectiva acumulada (mm) para o experimento ECR5KC, ao longo das 96 horas de integração do modelo.....	65
Figura 31	– Fluxos de energia na superfície (W/m ²) para o experimento ECR5KC, ao longo das 96 horas de integração do modelo. Saldo de radiação (círculo aberto), fluxo de calor sensível (quadrado aberto), fluxo de calor latente (círculo fechado).....	66
Figura 32	– Tendência de temperatura (°C) devido à convecção rasa para o experimento ECR5KO, ao longo das 96 horas de integração do modelo.....	67
Figura 33	– Tendência de umidade [g/(kg.dia)] devido à convecção rasa para o experimento ECR5KO, ao longo das 96 horas de integração do modelo.....	67
Figura 34	– Precipitação convectiva acumulada (mm) para o experimento ECR5KO, ao longo das 96 horas de integração do modelo.....	68
Figura 35	– Fluxos de energia na superfície (W/m ²) para o experimento ECR5KO, ao longo das 96 horas de integração do modelo. Saldo de radiação (círculo aberto), fluxo de calor sensível (quadrado aberto), fluxo de calor latente (círculo fechado).....	69

LISTA DE SIGLAS

AGCM4	– Atmospheric General Circulation Model
ATEX	– Atlantic Trade Wind Experiment
ATMET	– Atmospheric, Meteorological, and Environmental Technologies
BOMEX	– Barbados Oceanographic and Meteorological Experiment
BRAMS	– Brazilian Developments on the Regional Atmospheric Modelling System
CAPE	– Energia Potencial Convectiva Disponível
CISK	– Instabilidade Condicional de Segunda Espécie
CLT	– Camada Limite Turbulenta
CPTEC	– Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CRSMs	– Cloud-system-resolving models
ECMWF	– European Center for Medium-Range Forecast
ECR2GC	– Experimento com a nova parametrização ativada em associação a parametrização de convecção profunda do tipo Grell com resolução de grade de 20 km, análise sobre uma área no continente
ECR5GC	– Experimento com a nova parametrização ativada em associação a parametrização de convecção profunda do tipo Grell com resolução de grade de 50 km, análise sobre uma área no continente
ECR2GO	– Experimento com a nova parametrização ativada em associação a parametrização de convecção profunda do tipo Grell com resolução de grade de 20 km, análise sobre uma área no oceano
ECR5GO	– Experimento com a nova parametrização ativada em associação a parametrização de convecção profunda do tipo Grell com resolução de grade de 50 km, análise sobre uma área no oceano
ECR2KC	– Experimento com a nova parametrização ativada em associação a parametrização de convecção profunda do tipo Kuo com resolução de grade de 20 km, análise sobre uma área no continente
ECR5KC	– Experimento com a nova parametrização ativada em associação a parametrização de convecção profunda do tipo Kuo com resolução de grade de 50 km, análise sobre uma área no continente
ECR2KO	– Experimento com a nova parametrização ativada em associação a parametrização de convecção profunda do tipo Kuo com resolução de grade de 20 km, análise sobre uma área no oceano
ECR5KO	– Experimento com a nova parametrização ativada em associação a parametrização de convecção profunda do tipo Kuo com resolução de grade de 50 km, análise sobre uma área no oceano
EULAG	Eulerian/semi-Lagrangian fluid solver
FINEP	– Financiadora de Estudos e Projetos
GAMIL	– Grid-point Atmospheric Model
GARP	– Global Atmospheric Research Programme
GATE	– Atlantic Tropical Experiment
IAP	– Institute of Atmospheric Physics
INDOEX	– Indian Ocean Experiment
INPE	– Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ITCZ	– Intertropical Convergence Zone
LASG	– State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics
LES	– Large-Eddy Simulation

LMDZ4	–	Climate Model of Laboratoire de Météorologie Dynamique
MCG	–	Modelo de Circulação Geral
NCL	–	Nível de condensação por levantamento
PCA	–	Precipitação Convectiva Acumulada
RAMS	–	Regional Atmospheric Modelling System
TCAPE	–	Energia Potencial Convectiva Disponível Total
TSM	–	Temperatura de superfície do mar
UTC	–	Coordinate Universal Time
4DDA	–	Assimilação de Dados em 4 Dimensões

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	13
CAPÍTULO 2 – REVISÃO DE LITERATURA.....	16
CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA.....	26
3.1. Modelo Numérico Atmosférico.....	26
3.2. Parametrizações físicas nos modelos atmosféricos.....	27
3.3. Parametrização de Cúmulos Rasos.....	28
3.3.1. Parametrização de convecção rasa segundo Tiedtke et al. (1988).....	28
3.4. Descrição do Modelo Numérico Utilizado.....	31
3.5. Implementação do esquema.....	32
3.6. Descrição dos Experimentos.....	32
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	35
4.1. Modelo integrado com a parametrização de convecção profunda do tipo Grell	35
4.1.1. Caso I: Experimento com resolução de grade de 20 km (ECR2G).....	35
4.1.1.1. Análise sobre uma área no continente (ECR2GC).....	36
4.1.1.2. Análise sobre uma área no oceano (ECR2GO).....	40
4.1.2. Caso II: Experimento com resolução de grade de 50 km (ECR5G).....	44
4.1.2.1. Análise sobre uma área no continente (ECR5GC).....	45
4.1.2.2. Análise sobre uma área no oceano (ECR5GO).....	48
4.2. Modelo integrado com a parametrização de convecção profunda do tipo Kuo	54
4.2.1. Caso III: Experimento com resolução de grade de 20 km (ECR2K).....	54
4.2.1.1. Análise sobre uma área no continente (ECR2KC).....	55
4.2.1.2. Análise sobre uma área no oceano (ECR2KO).....	59
4.2.2. Caso IV: Experimento com resolução de grade de 50 km (ECR5K).....	62
4.2.2.1. Análise sobre uma área no continente (ECR5KC).....	62
4.2.2.2. Análise sobre uma área no oceano (ECR5KO).....	66
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES.....	71
5.1. Sugestões.....	72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

As nuvens afetam a atmosfera de várias formas. Elas absorvem, emitem e refletem radiação, modificam a temperatura do ar, a pressão e a circulação, produzem precipitação, misturam ar e gases rapidamente na vertical, removem gases e partículas do ar, alteram os coeficientes de fotólise, interferem nos movimentos atmosféricos através de processos físicos como a liberação de calor latente e a redistribuição de água na atmosfera, entre outros. Portanto, as nuvens desempenham um papel fundamental nos processos físicos que ocorrem na atmosfera, refletindo diretamente no estado do tempo local.

As nuvens existem devido ao processo de condensação, que ocorre em resposta aos processos dinâmicos que, por sua vez, incluem as correntes de movimentos verticais de ar, convecção e mistura, tendo sua estrutura e sua forma influenciadas pela estabilidade, convergência e proximidade das frentes e ciclones. Elas se formam principalmente na troposfera. Nos trópicos, as mais altas estendem-se até aproximadamente 18 km de altitude. Nas latitudes médias e nos pólos, elas alcançam uma altitude máxima de aproximadamente 13 km e 8 km, respectivamente.

Em 1803, Luke Howard escreveu a obra *On the modification of clouds* (Sobre a modificação das nuvens), na qual ele propôs um esquema alternativo de identificação das nuvens, e cujos nomes dados à elas são usados até hoje. Segundo Souza Echer et al. (2006), a classificação internacional das nuvens foi publicada em 1896 e tem sido, desde então, revisada periodicamente. A última revisão define e descreve dez tipos de nuvens, que são classificadas de acordo com características físicas como altitude e forma. Estes incluem cirros, cirrocúmulos, cirrostratos, altocúmulos, altostratos, nimbostratos, stratocúmulos, stratos, cúmulos e cumulonimbos.

Dentre os vários tipos de nuvens destacam-se os cúmulos, cujas bases formam-se geralmente próximo dos 900 m de elevação, podendo crescer até elevações superiores a 1200 m, seja por convecção térmica ou pela ação de uma frente, liberando grandes quantidades de energia através da condensação de vapor de água dentro da própria nuvem. Os cúmulos podem ser classificados como profundos (precipitantes) ou rasos (não-precipitantes). Neste estudo o foco será posto nos cúmulos rasos.

Os cúmulos rasos, conhecidos também como cúmulos não precipitantes, são assim chamados porque geralmente não precipitam, ou seja, uma vez formados este tipo de cúmulos tende a se dissolver no ambiente. Estes se formam em massas de ar com alguma instabilidade, quando a umidade é relativamente baixa e a temperatura é relativamente alta. Surgem com frequência em dias de céu claro, quando o aquecimento desigual da superfície da Terra faz com que bolhas de ar flutuantes ascendam por convecção acima do nível de condensação por levantamento (NCL), dando-se a condensação de gotículas.

De acordo com os estudos de Yanai et al. (1973) e Betts (1973) os cúmulos rasos têm uma importante função na manutenção dos campos de temperatura e umidade na baixa troposfera, tendo em vista que estes retiram umidade dos baixos níveis e a transportam para os altos, proporcionando um equilíbrio natural nestes campos. Na região da camada de mistura, essas nuvens criam uma fonte de calor e um sumidouro de umidade, causando aquecimento e secagem na região em torno da base das nuvens (Souza e Silva, 2002).

Devido ao fato de os cúmulos rasos não precipitarem, a reevaporação causa resfriamento e umedecimento da parte superior da nuvem. Com isso, há um transporte líquido de calor para baixo e de umidade para cima, na região em que a convecção rasa atua (Betts, 1973). Fica claro, então, que a convecção rasa influencia a configuração do perfil de estabilidade da atmosfera. Por estes motivos, sua representação é amplamente reconhecida como um aspecto fundamental do desenvolvimento de modelos de previsão e simulação do tempo e do clima (Tiedtke et al., 1988).

De acordo com Silva (2001), um grande problema encontrado nas simulações com modelos numéricos é estimar os efeitos físicos da convecção de cúmulos, representando realisticamente fenômenos de condensação, transporte de calor, de umidade e de momentum nas nuvens. Os efeitos da convecção rasa são incorporados nesses modelos através de parametrização. A necessidade de parametrizar a convecção rasa se deve ao fato da maioria dos modelos apresentarem uma resolução horizontal que implica em truncamentos em escalas maiores que a escala dos cúmulos rasos.

Os estudos de Wilde et al. (1984) mostraram a existência de uma correlação entre o ciclo diurno da convecção rasa e o dos processos de superfície. Diante disto, Souza (1999) propôs uma parametrização simples de cúmulos rasos capaz de representar o ciclo diurno da convecção não precipitante sobre o continente e sua interação com a superfície, bem como uma melhor configuração do perfil termodinâmico da atmosfera, o que possibilitou uma melhoria na capacidade de previsão do tempo e do clima gerada pelos modelos numéricos.

O esquema de Souza (1999) apresenta um bom desempenho na representação da convecção diurna, forçada termicamente. Por outro lado, a convecção noturna, que deve sua origem, principalmente, ao forçamento mecânico não é bem representada. No entanto, apesar de ser de intensidade menor, o efeito da convecção rasa noturna no fim da noite e início do dia é importante para o começo da formação da camada limite turbulenta (CLT). Para simulações do ciclo diurno do balanço de energia em superfície é necessário, portanto, que o modelo seja capaz de representar bem essa convecção na transição da noite para o dia (Lopes, 2005).

No Brasil um dos modelos numéricos utilizados para realizar simulações e previsões de tempo é o BRAMS – *Brazilian Developments on the Regional Atmospheric Modelling System*. Este modelo foi derivado da versão mais recente do modelo RAMS e vem sendo aprimorado no decorrer dos anos pelos pesquisadores brasileiros. Assim, tendo em vista a importância e influência dos cúmulos rasos para os processos atmosféricos, este trabalho tem como objetivo principal investigar o impacto da implementação de uma nova opção de parametrização de convecção rasa no BRAMS. Para isso foi implementado no BRAMS o esquema de parametrização de cúmulos rasos proposto por Tiedtke et al. (1988). Condições foram estipuladas para que a convecção sobre o continente seja ativada preferencialmente no período noturno. A nova parametrização poderá ser usada como uma opção a mais no modelo, visando uma melhoria ainda maior nos resultados das previsões e das simulações de tempo e clima.

Em uma segunda etapa, foram realizadas simulações com o modelo utilizando a nova parametrização de cúmulos rasos e as parametrizações já existentes. Em seguida, realizou-se uma análise comparativa entre os resultados destas simulações.

No capítulo 2 tem-se uma revisão de literatura a cerca de estudos que enfatizaram a parametrização e a importância da convecção de cúmulos rasos na compreensão do comportamento térmico da atmosfera terrestre. No capítulo 3 são apresentados a descrição do esquema de parametrização, do modelo BRAMS e dos experimentos realizados.

No capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados das simulações numéricas realizadas neste estudo para áreas sobre o continente e sobre o oceano. E, por fim, no capítulo 5 têm-se as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

CAPITULO 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Um problema meteorológico de grande importância está em entender os processos de transporte convectivo a fim de incorporá-los parametricamente nos modelos numéricos de grande escala (Betts, 1973). As primeiras tentativas de incorporar os efeitos da convecção nos modelos numéricos de simulação e previsão do tempo surgiram na década de 1960, desde então vários esquemas foram propostos.

Estudando o desenvolvimento de furacões, Charney e Eliassen (1964) propuseram um modelo de interação entre a escala convectiva e a grande escala no qual, em uma área com instabilidade condicional, a convecção está acoplada à convergência de grande escala em baixos níveis. Este acoplamento recebeu o nome de CISK – Instabilidade Condicional de Segunda Espécie.

De acordo com Manabe et al. (1965) o ajustamento convectivo é a maneira mais simples de parametrização de cúmulos. Neste esquema ajusta-se o *lapse rate* da atmosfera, que é a taxa de variação vertical da temperatura, de modo a remover instabilidades. Assim, quando não há saturação ajusta-se apenas o campo de temperatura. Quando há supersaturação, além do campo de temperatura, o campo de umidade é também alterado.

Estudando o transporte termodinâmico de calor, de água líquida e de vapor d'água pela convecção de cúmulos não-precipitantes, Betts (1973) mostrou que, devido à mistura entre o ar das nuvens e do ambiente ser irreversível, há um transporte descendente de entalpia na camada de cúmulos e que o tempo de desenvolvimento da camada de cúmulos depende do movimento vertical médio de grande escala, das variações da taxa de resfriamento nas nuvens e do fluxo de calor sensível na superfície.

Segundo Cho e Ogura (1974) a geração e manutenção de cúmulos rasos e profundos são controladas por mecanismos diferentes. Então, devido às restrições impostas à formação dos cúmulos profundos serem maiores do que aos cúmulos rasos, as parametrizações dos cúmulos rasos devem ser mais simples.

Arakawa e Schubert (1974) observaram que a convecção de cúmulos modifica os campos de temperatura e umidade de grande escala. Essa modificação dá-se em primeiro lugar devido ao desentranhamento do ar nas nuvens, que causa um resfriamento e umedecimento do ambiente, e em segundo lugar, por causa dos movimentos compensativos

induzidos entre as nuvens, que causam um aquecimento e uma secagem do ambiente. Neste estudo eles apresentaram ainda uma teoria da interação do conjunto de nuvens cúmulos com o meio ambiente, na qual o controle deste mecanismo é formulado através do forçamento de grande escala. Dessa forma, o problema da parametrização da convecção de cúmulos reduziu-se a determinação de alguns parâmetros como, por exemplo, a distribuição vertical do fluxo total de massa pelo conjunto, o total do desentranhamento de massa proveniente das nuvens e as propriedades termodinâmicas desta massa de ar. Entretanto, a implantação do esquema de Arakawa e Schubert (1974) não é simples e formulações simplificadas foram aplicadas para problemas práticos (Albrecht et al., 1986; Silva, 2001).

O entranhamento de ar nas nuvens é um parâmetro importante nos esquemas de parametrização de nuvens cúmulos. Buscando confirmar a hipótese de que o entranhamento de ar nas nuvens ocorre na porção superior da nuvem, próximo ao topo, Paluch (1979) analisou propriedades do ar nas nuvens e no ambiente, utilizando, para isto, um método aplicado somente a regiões de nuvens que não contenham quantidade significativa de gelo ou de gotas precipitáveis, e concluiu que a maior parte do entranhamento origina-se no topo das nuvens, concordando com o mecanismo descendente penetrante de Squires (1958).

O método sugerido por Paluch (1979) juntamente com dados coletados por aviões em vários níveis das nuvens e com dados coletados em sondagens de dias com céu claro, foi utilizado em um estudo realizado por LaMontagne e Telford (1983). Neste estudo eles verificaram valores menores de razão de mistura de água líquida nas nuvens, o que indicava um entranhamento de ar seco nessa região. Diante disso, eles concluíram que o entranhamento de ar seco no topo das nuvens é o principal mecanismo de diluição de conteúdo de água líquida dentro de pequenos cúmulos. No entanto, alguns autores mostram uma teoria mais moderna que se refere a modelos de entranhamento do ar nas nuvens. Para Cotton e Anthes (1989) essa teoria consiste em ser o entranhamento nas nuvens um produto da turbulência, sendo, portanto discreto e heterogêneo, e tendo sua maior parte no flanco das nuvens, na direção do vetor cisalhamento do vento.

Um esquema para a convecção rasa, no qual o efeito líquido dos cúmulos rasos foi atribuído aos fluxos turbulentos de calor e umidade foi proposto por Tiedtke (1984). Tais fluxos foram parametrizados com base na teoria do comprimento de mistura, e ao coeficiente de difusividade atribuiu-se um valor constante dentro da camada com nuvens. Uma melhoria significativa na definição do escoamento de baixos níveis foi observada após a implementação deste esquema no modelo do *European Center for Medium-Range Forecast* – ECMWF.

Usando imagens de satélite para estudar o ciclo da convecção na região amazônica durante o mês de novembro, Minnis e Harrison (1984) encontraram valores máximos de nuvens rasas por volta do meio dia local. Porém, o método utilizado por eles incluía também nuvens estratiformes, cujos valores máximos de cobertura foram registrados durante a manhã. Baseados nessas observações, eles concluíram que o máximo de cobertura encontrado nas primeiras horas da tarde corresponde à presença de cúmulos rasos.

O estudo de Wilde et al. (1984), no qual eles documentaram a variação do nível de condensação por levantamento NCL do ar na camada superficial de mistura e determinaram a variação da altura desse nível, centrada na altura média, mostraram que a cobertura de cúmulos rasos é proporcional à diferença de altura entre a zona de entranhamento e a zona do NCL, e que os cúmulos rasos forçados termicamente só formam-se quando a zona de entranhamento torna-se mais alta que a zona do NCL.

Albrecht et al. (1986) propuseram uma parametrização que consiste basicamente na representação do fluxo de massa convectivo médio nas nuvens cúmulos, através de fluxos convectivos de calor e umidade, e da representação do aquecimento adiabático úmido, através da liberação do calor latente e da remoção da umidade pelos processos de precipitação. Além disso, o fechamento do esquema supõe que a convecção atua para remover umidade da camada de mistura sempre que a umidade relativa ultrapassar um determinado valor crítico. A partir daí foram comparadas simulações realizadas com o esquema contendo a parametrização de cúmulos com simulações contendo um esquema padrão de ajuste convectivo úmido. Os resultados mostraram simulações mais realistas da distribuição de precipitação nas regiões tropicais, e sugerem que a troposfera tropical média é submetida a um certo tipo de ajuste radiativo-convectivo, quando esta é perturbada.

Betts (1986) e Betts e Miller (1986) propuseram um esquema de ajustamento convectivo, que se baseava em relaxamentos simultâneos nos campos de temperatura e de umidade, sobre estruturas termodinâmicas observadas em quase equilíbrio. Tal esquema teve como princípio manter a estrutura vertical local de temperatura e de umidade, que são modificadas naturalmente pela presença de convecção. Para ajustar parte dessas estruturas atmosféricas de temperatura e umidade foi projetada uma parametrização em resposta à presença dos processos convectivos e radiativos de grande escala, para a estrutura termodinâmica de referência, em quase equilíbrio. Esse ajuste consistiu em separar os campos de temperatura e umidade em duas tendências, o que implicava na determinação do transporte vertical de calor e umidade para os campos convectivos.

Betts e Miller (1986) desenvolveram, separadamente, dois esquemas de ajuste para convecção rasa e profunda, que foram introduzidos no modelo global do ECMWF e testados com um conjunto de dados experimentais. Os resultados por eles obtidos foram satisfatórios e mostraram que em previsões globais estes esquemas causam mudanças significativas nos fluxos de superfícies e nas tendências médias de temperatura e de umidade nas regiões tropicais, quando comparados com o esquema de convecção de Kuo (1974). Mostraram ainda que o esquema de convecção rasa, no qual é introduzida a hipótese de que todos os níveis de condensação por levantamento localizam-se sobre a mesma linha, ou seja, sobre a linha de mistura, tem grande importância nessas mudanças pelo fato de transportar umidade para cima e para fora da camada de nuvens, o que causa um aumento do fluxo de calor latente à superfície.

Buscando melhorar a qualidade da previsão operacional do modelo do ECMWF para regiões tropicais, Tiedtke et al. (1988) realizaram mudanças no código da parametrização de convecção de cúmulos rasos e profundos deste modelo. Os resultados mostraram que as melhorias nas previsões para regiões tropicais devem-se principalmente à redução dos erros sistemáticos como resposta a um forçamento adiabático mais realista nos trópicos, resultante da parametrização de cúmulos rasos que, por sua vez, aumentou o fluxo de umidade saindo da camada limite nessas regiões.

Segundo Tiedtke (1989) a aproximação do fluxo de massa nas nuvens pode produzir parametrizações realistas em modelos numéricos. Neste mesmo trabalho ele discute um esquema de parametrização muito simples que produz valores significativos do forçante térmico pela convecção. Embora seja simples, esta parametrização gera campos bastante realistas do aquecimento convectivo na atmosfera.

Siebesma e Cuijpers (1995), no intuito de estudar a convecção rasa durante um período não perturbado do experimento BOMEX, utilizaram um modelo de simulação de grandes turbilhões – LES (sigla em inglês para *Large-Eddy Simulation*). Um LES fornece informações detalhadas da dinâmica das nuvens rasas, além de ser usado para verificar parametrizações básicas dos fluxos turbulentos e taxas de entranhamento e desentranhamento, utilizados em modelos de grande escala. Os resultados encontrados foram bem realistas para evaporação à superfície, principalmente nas áreas correspondentes aos oceanos, mostrando que o transporte de calor e umidade, devido a essas nuvens aumenta a evaporação da superfície, em particular nas superfícies oceânicas. Além disso, eles verificaram que a razão de desentranhamento é sistematicamente maior que a razão de entranhamento nas nuvens, implicando que o fluxo de massa decresce da base em direção ao topo das nuvens e que o

fluxo de massa convectivo vai para zero no topo da nuvem porque a área fracional coberta por nuvens vai para zero.

Haiden (1996) ao investigar a parametrização diagnóstica do total de nuvens cúmulos baseada no decaimento do material passivo das nuvens, mostrou que suposições feitas anteriormente nas formulações dos esquemas podem ser relaxadas pelo cálculo da quantidade de calor liberada nos processos de decaimento e que o efeito da quantidade de nuvens e da razão de resfriamento por radiação, dentro da estrutura da parametrização, são equivalentes para uma região com déficit de saturação no ambiente.

Rennó e Ingerssol (1996) desenvolveram uma teoria para calcular a quantidade de CAPE (*Energia Potencial Convectiva Disponível*) para a atmosfera terrestre em equilíbrio radiativo-convectivo. Para isso, eles associaram a convecção atmosférica com uma máquina térmica natural que pode operar baseada no princípio da máquina de Carnot. Associaram também o fluxo de massa convectivo necessário para manter o equilíbrio radiativo-convectivo da atmosfera com variáveis como a eficiência termodinâmica e o forçamento convectivo de superfície. Foram eles também que introduziram o conceito de Energia Potencial Convectiva Disponível Total – TCAPE.

Siebesma e Holtslag (1996) avaliaram um esquema de parametrização de fluxo de massa para convecção de cúmulos rasos utilizando simulação de LES e observações resultantes do experimento BOMEX. O esquema de fluxo de massa foi embutido em um modelo de uma coluna com forçamento de grande escala prescrito. Os resultados do LES mostraram que para conjuntos de nuvens de cúmulos rasos as taxas de entranhamento e desentranhamento (lateral) são tipicamente uma ordem de magnitude maior que os valores usados na maioria dos esquemas de parametrização operacionais e que a taxa de desentranhamento é sistematicamente maior que a taxa de entranhamento. Quando as taxas são aumentadas, o esquema de fluxo de massa produz fluxos de massa realistas e valores excessivos de umidade e calor para nuvens e é então capaz de manter o estado estacionário como observado durante o BOMEX.

Souza (1999) propôs uma parametrização simples para convecção de cúmulos rasos. Esta parametrização mostrou-se uma boa ferramenta na representação da interação da convecção rasa com os processos de superfície e com a convecção profunda. O esquema é do tipo fluxo de massa e combina o modelo de nuvens proposto por Arakawa e Schubert (1974), e o princípio da convecção como uma máquina térmica sugerido por Rennó e Ingerssol (1996). O fluxo de massa é determinado seguindo o raciocínio de que esse fluxo é forçado por uma máquina térmica convectiva alimentada por fluxos energéticos provenientes da

superfície. Souza (1999) usou esse esquema para explicar o aumento da cobertura de cúmulos rasos em uma porção da floresta desmatada em relação às regiões de floresta adjacentes, durante um período seco na Floresta Amazônica.

Souza et al. (2000) desenvolveram uma teoria termodinâmica para explicar a manutenção das circulações locais em estado quase estacionário, e mostraram que essa teoria é capaz de prever a queda de pressão causada por uma superfície heterogênea de desmatamento na Amazônia.

Silva (2001) estudando o impacto da implementação da parametrização de cúmulos rasos de Souza (1999) no RAMS, verificou que a implementação deste esquema causa um impacto apreciável nos perfis termodinâmicos (temperatura e umidade) da atmosfera ao longo do período de integração. Ele mostrou que a precipitação convectiva na região do domínio do modelo aumenta substancialmente, como resultado do aumento do fluxo de calor latente à superfície. Além disso, Silva (2001) observou que o modelo é mais sensível a variações no entranhamento que produzam nuvens mais rasas, enquanto que tende a ser menos sensível a variações que produzam nuvens mais profundas. Em adição, mostrou que modificações no valor do empuxo total são importantes pelo fato de intensificarem ou atenuarem áreas de aquecimento e de resfriamento, situadas próximo às nuvens, alterando a estabilidade atmosférica.

Nesta mesma linha de pesquisa, Souza e Silva (2002) verificaram que, com a implementação da parametrização de cúmulos rasos de Souza (1999) no modelo RAMS é possível obter uma boa representação do ciclo diurno da convecção rasa e que modificações nos parâmetros característicos do esquema estabelecem um intervalo para o fluxo de massa convectivo, que permite uma ampla faixa de ajustes para o uso operacional.

Em estudos sobre parametrizações de convecção rasa para modelos de Mesoescala, Deng et al. (2003), por meio de verificações do desenvolvimento da área da nuvem, da altura da base, da profundidade da nuvem e da trajetória de água líquida, mostraram que o esquema de convecção rasa pode adaptar-se a diferentes ambientes sinóticos, e rapidamente variar as condições associadas aos fortes fluxos de superfície. Neste estudo eles realizaram várias experiências adicionais para investigar a sensibilidade do modelo para vários fatores indispensáveis e encontraram que, para o esquema de nuvens rasas, o fechamento híbrido do fluxo de massa comportou-se regularmente, até mesmo se o número de correntes ascendentes calculadas em uma célula da grade fosse arbitrariamente dobrado ou reduzido à metade. Nestes casos, o módulo de convecção desenvolveu tendências compensatórias para a velocidade vertical que tendia a abrandar o impacto do fluxo de massa total na base da nuvem.

Bretherton et al. (2004) testaram uma nova parametrização de convecção de cúmulos rasos que consiste em um esquema de fluxo de massa baseado em uma escolha de fluabilidade e no modelo de entranhamento-desentranhamento em plumas. Esse esquema de fluxo de massa foi acoplado a um modelo de fechamento de turbulência de ordem 1.5 com um fechamento de entranhamento para camada limite convectiva. Eles puderam observar através dos resultados obtidos que as taxas de mistura, cobertura de nuvem, e perfil de fluxo vertical, são bem reproduzidos pela nova parametrização em comparação as simulações do LES.

Von Salzen et al. (2005) usaram o Centro Canadense para Modelagem Climatológica e análises do Modelo de Circulação Geral Atmosférica (sigla em inglês AGCM4) para estudar o papel da convecção rasa nos ciclos hidrológicos e da energia da atmosfera. Os testes de sensibilidade com o AGCM4 mostraram um efeito marcante da parametrização de convecção rasa no modelo. Eles verificaram que a parametrização de convecção rasa produz um aumento considerável na mistura vertical e diminui as quantidades de nuvens estratiformes na baixa atmosfera subtropical sobre os oceanos, e que as taxas de precipitação são consideravelmente reduzidas para nuvens estratiformes e aumentadas para nuvens convectivas nos sub-trópicos se a parametrização de convecção rasa é incluída no modelo.

Szoeke et al. (2006) investigando o efeito de convecção rasa de grande escala no clima do Pacífico Tropical Oriental com um modelo oceano-atmosférico acoplado, observaram que desabilitando a parametrização de convecção rasa, experimento chamado por eles de noSC, a fração de nuvens estratiformes aumenta e a radiação solar à superfície diminui. Verificaram também que a temperatura de superfície do mar (TSM) esfria em média 2 °C e que no experimento noSC este esfriamento é maior abaixo da coberta de nuvem no sul do equador que no norte, resultando em um aumento na assimetria meridional climática.

Estudando o crescimento da camada de convecção de cúmulos não precipitantes Steven (2007) verificou que as simulações feitas com o modelo LES mostram que muitas das propriedades bem conhecidas do topo dos cúmulos na camada limite (inclusive uma camada de sub-nuvem bem misturada, uma camada de transição da base da nuvem, uma camada de nuvem condicionalmente instável e uma camada de inversão) surgem naturalmente nas simulações. Ele verificou ainda que o transporte descendente associado de ar seco e quente resulta em uma diminuição significativa na razão de Bowen à superfície e que o crescimento linear no tempo da camada de nuvem é o resultado do transporte e subsequente evaporação de água líquida na camada de inversão.

Deb et al. (2007) para estudar a sensibilidade das monções indianas ao entranhamento e desentranhamento em esquemas de fluxo de massa, usou o esquema de parametrização de

cúmulos proposto por Tiedke (1989) comparando-o a um outro esquema de fluxo de massa proposto por Emanuel e Rothman (1999). As simulações das monções indianas com esquemas de parametrizações de cúmulos diferentes foram integradas no modelo de circulação geral LMDZ4 com condições de contorno prescritas. Avaliando os resultados das simulações eles observaram que as variações espaciais e temporais, de toda chuva de monções na Índia, são sensíveis à formulação de entranhamento e desentranhamento em um esquema de fluxo de massa. Segundo Deb et al. (2007), a formulação do perfil de entranhamento/desentranhamento apresentada pode ser implementada em um Modelo de Circulação Geral (MCG) que use um esquema de fluxo de massa para representar a convecção de cúmulos no modelo.

Li et al. (2007) investigando melhorias para simulação de clima com modificações na parametrização convectiva de Tiedtke (1989) no ponto de grade do modelo atmosférico IAP LASG (GAMIL), propuseram, para reduzir as tendências sistemáticas, várias modificações no esquema de Tiedtke (1989) usado no modelo GAMIL, incluindo (1) um aumento na taxa de entranhamento/desentranhamento convectivo lateral para convecção rasa, (2) inclusão de uma umidade relativa inicial ativada pela convecção profunda, e (3) uma eficiência reduzida para a conversão de água de nuvem em água de chuva no esquema de convecção. Duas experiências, uma com o esquema original de Tiedtke (1989) usado no GAMIL e outra com o esquema modificado, foram realizadas para avaliar o desempenho do esquema modificado neste estudo. Os resultados mostraram que o estado climatológico, como a precipitação, a temperatura, a umidade específica, e a variabilidade interanual foram melhoradas nas simulações geradas pelo modelo com o uso destas modificações no esquema. Resultados de várias experiências adicionais mostraram que as melhorias no desempenho do modelo em diferentes regiões resultam principalmente da introdução da umidade relativa inicial ativada pela convecção profunda ou pela convecção rasa, suprimida devido ao aumento das taxas de entranhamento/desentranhamento convectivo lateral.

Frierson (2007) utilizou um modelo de circulação geral (MCG) para avaliar os efeitos dos esquemas de convecção na circulação geral tropical média zonal. Ele realizou simulações sem o esquema de convecção (isto é, somente com a condensação de grande escala), com a parametrização de ajuste convectivo úmido, e com vários conjuntos de formulações e parâmetros no esquema simplificado de Betts e Miller (1986), e em seguida comparou os resultados destas simulações, verificando, com isso, que o transporte de massa na circulação de Hadley, assim como a precipitação de ITCZ, aparece significativamente reduzido nas simulações com o esquema de Betts e Miller (1986), e que um fator importante na

determinação deste comportamento é a parametrização de convecção rasa, pois sem convecção rasa, o esquema de convecção é largamente ineficaz para impedir a convecção de acontecer na escala de grade. Ele verificou ainda que as simulações foram, notavelmente, insensíveis ao tempo de relaxamento convectivo, e apenas ligeiramente sensíveis à umidade relativa do perfil de referência, contanto que a condensação de grande escala não aconteça.

Piriou et al. (2007) apresentaram uma aproximação para a parametrização convectiva na qual os termos da microfísica e do transporte são usados separadamente na parametrização das equações do balanço de escala da grade. Esta separação foi usada como uma maneira de introduzir na parametrização uma ligação causal mais explícita entre todos os processos envolvidos e como um veículo para uma representação mais fácil da memória de células convectivas. Eles observaram que a parametrização das equações torna-se mais próxima daquelas de modelos de resolução de convecção [por exemplo, modelos de resolução de sistemas de nuvens (CRSMs) e de simulações de grandes turbilhões (LES)], facilitando os processos do desenvolvimento da parametrização e de validação contra um balanço detalhado destes modelos de alta resolução, e que os resultados obtidos com o novo esquema são próximos àqueles dos esquemas tradicionais em casos convectivos muito úmidos [tal como o Programa de Pesquisas Atmosféricas Global (GARP), Experimentos do Atlântico Tropical (GATE) fase III, 1974]. Eles observaram ainda que uma relação prognóstica entre o entranhamento na nuvem e a evaporação da precipitação melhorou a previsão da retardação de fase do ciclo diurno convectivo sobre a terra no que diz respeito ao forçamento de calor de superfície.

Wang e McFarquhar (2008), usando um modelo não-hidrostático 3-D (EULAG), com microfísica de chuva quente, para estudar o ciclo diurno da convecção rasa e da nebulosidade na camada limite dos ventos alísios sobre o Oceano Índico, verificaram através de simulações, iniciadas com sondagens, obtidas durante o INDOEX que, na ausência diurna da variável forçante de grande escala, os ciclos diurnos simulados das velocidades verticais, dos fluxos turbulentos, da taxa de condensação e da nebulosidade foram caracterizados por reduções distintas do dia. O aquecimento solar na camada limite estabilizou o ar, diminuindo a umidade relativa e, conseqüentemente, suprimiu a turbulência da camada de nuvem e a convecção de cúmulos rasos. Em consequência, a taxa de condensação e a quantidade de nuvem foram reduzidas. As correntes térmicas mais fortes e os fluxos turbulentos causados pelo aquecimento solar na camada de mistura provocaram a recuperação da nebulosidade na tarde em que a instabilidade na camada da nuvem aumentou. No entanto, eles afirmam que, dependendo de seu sentido e valor, o movimento vertical em grande escala pode modular

muito o ciclo diurno conduzido pelo aquecimento solar, implicando em uma grande incerteza em representar o ciclo diurno de cúmulos rasos.

Jonker et al. (2008) baseados em uma análise geométrica direta dos resultados da simulação de LES de nuvens cúmulos rasas, verificaram que o transporte de massa ascendente pelas nuvens é dominado fortemente por regiões próximas à borda das nuvens em comparação as região de núcleo das nuvens, e que o transporte de massa descendente é dominado por processos que ocorrem apenas fora da nuvem. Esta última descoberta contradiz a visão admitida de um ambiente seco uniformemente descendente. Eles defendem uma visão refinada que distinga entre o ambiente próximo e o distante da nuvem. Segundo Jonker et al. (2008) o ambiente próximo a nuvem é caracterizado por movimentos descendentes coerentes, visto que o ambiente distante é bastante tranquilo e não representa um papel significativo no transporte vertical.

Rooy e Siebesma (2008), baseados em resultados de experiências com modelos LES, desenvolveram uma nova parametrização mais flexível para o desentranhamento em cúmulos rasos. Todos os esquemas de fluxo de massa atuais ignoram a dependência da altura da nuvem, o que, evidentemente, conduz a grandes discrepâncias em relação aos perfis de fluxo de massa observados. A formulação da nova parametrização de desentranhamento trata desta dependência considerando o perfil de fluxo de massa de um modo não dimensionalizado. Outra influência levada em consideração, na nova parametrização, é a que a umidade relativa do ar ambiente e o excesso de flutuabilidade da corrente de ar ascendente exercem sobre a taxa de desentranhamento e, portanto, nos perfis de fluxo de massa. Diante dos resultados das simulações feitas com o modelo LES eles concluíram que, com o parâmetro de tamanho, os efeitos de condições ambientais sobre a taxa de desentranhamento fracionário podem ser descrito com precisão. Segundo Rooy e Siebesma (2008) a parametrização proposta é uma alternativa atraente para esquemas de mistura mais complexos, baseados na escolha da flutuabilidade, podendo esta ser incorporada facilmente nos esquemas de fluxo de massa atuais.

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGIA

Neste capítulo, serão mostradas a descrição geral do que é um modelo numérico atmosférico e das parametrizações físicas existentes nesses modelos. Em seguida será mostrada a descrição do esquema de parametrização de convecção rasa proposto por Tiedtke et al. (1988). E por fim, serão mostradas uma breve descrição do modelo numérico utilizado neste estudo, além da implementação do novo esquema de convecção rasa e dos experimentos realizados.

3.1. Modelo numérico atmosférico

Os modelos numéricos atmosféricos são códigos computacionais complexos, alguns com mais de 100 mil linhas de instrução, e com representações numéricas aproximadas das equações matemáticas. Tais equações representam as Leis da Física que, por sua vez, governam os movimentos na atmosfera e as interações com a superfície.

À medida que os computadores evoluíram foram surgindo modelos físico-matemáticos mais complexos, partindo de modelos válidos apenas para certas regiões do globo e chegando, hoje, a modelos globais fisicamente muito abrangentes, diminuindo assim a margem de erros para as previsões de tempo e clima. A inovação tecnológica, o conhecimento observacional e o entendimento teórico, além da construção de supercomputadores, permitiram o desenvolvimento de modelos cada vez mais rápidos e com maior precisão.

O modelo numérico é uma ferramenta poderosa e fundamental no auxílio à pesquisa e para dar suporte à previsão do tempo, dado o fato destes estarem em sincronia com as necessidades da região para a qual estão sendo executados. Estes são usados para fazer previsões de tempo e clima e/ou realizar simulações numéricas com o objetivo de investigar, analisar e explicar os fenômenos que ocorrem na atmosfera.

No Brasil os centros de referência em pesquisas de tempo e clima, a exemplo do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, utilizam, entre outros, o modelo BRAMS – *Brazilian Developments on the Regional Atmospheric Modelling System*, para gerar as previsões de tempo e clima. O BRAMS é um modelo numérico que simula circulações atmosféricas em

área geográfica limitada. Este teve como base de desenvolvimento o modelo RAMS – *Regional Atmospheric Modelling System*, um modelo atmosférico desenvolvido por cientistas da Universidade do Estado do Colorado - EUA e ATMET.

3.2. Parametrizações físicas nos modelos atmosféricos

Diante do avanço tecnológico os pesquisadores buscam melhorar os programas computacionais de previsão e simulação de tempo e clima. A necessidade da melhoria destes programas é cada vez maior dada à importância de prever fenômenos meteorológicos com uma margem de acertos ainda maior que as atuais. Sabe-se que uma boa previsão numérica depende de vários fatores, dentre os quais da parametrização do modelo.

Para representar na grade dos modelos numéricos os processos que não são explicitamente representados pelas variáveis dinâmicas e termodinâmicas nas equações básicas (movimento, continuidade, termodinâmica, equação do estado), faz-se necessário incluí-las por meio de parametrizações, ou seja, os processos que ocorrem na escala sub-grade são modelados por parametrizações.

Existem três tipos de processos que precisam ser parametrizados:

- Os processos que ocorrem em escalas menores do que a escala da grade, os quais por esta razão não são explicitamente representados, como os processos de convecção, fricção e turbulência na camada limite, e arrasto das ondas de gravidade. Todos envolvem o transporte vertical de momentum e muitos também envolvem o transporte de calor, água e traçadores (ex.: químicos, aerossóis).
- Os processos que contribuem para o aquecimento interno (não-adiabático), a exemplo dos processos de transferência radiativa e precipitação. Ambos requerem a previsão da cobertura de nuvens.
- Os processos que envolvem variáveis adicionais para as variáveis básicas do modelo, por exemplo, os processos superficiais, ciclo de carbono, aerossóis, etc.

De acordo com Grell (1993), comumente, três diferentes métodos são usados para testar esquemas de parametrização, são eles: o teste diagnóstico, o semi-prognóstico e o prognóstico completo.

A alta complexidade dos modelos de prognóstico atmosférico torna dificultoso, até mesmo quase impossível, isolar erros causados pela parametrização de cúmulos de erros causados por outros componentes do modelo. Uma maneira qualitativa de contornar esse problema é testar os esquemas diagnosticamente, observando a correlação entre a atividade

convectiva, medida em termos de precipitação pluvial, e várias propriedades como convergência de umidade e instabilidade. No entanto, mesmo fornecendo uma boa ajuda na identificação das relações entre os dados realistas e os simulados pelas hipóteses de fechamento, esse tipo de teste é susceptível a influência de outras parametrizações, como por exemplo, as parametrizações de radiação de onda longa ou curta, esquema de difusão turbulenta, microfísica, dentre outros, no comportamento de muitos campos atmosféricos. Para fins prognósticos, existe a alternativa de rodar uma parametrização sobre um intervalo de tempo pré-determinado e, posteriormente, repetir o teste com outra parametrização, ou conjunto de parametrizações, no mesmo intervalo (Prognóstico Completo).

De acordo com Alonso (2006) ainda que haja um crescimento significativo quantitativo e qualitativo nas parametrizações de fenômenos ocorridos em escalas menores às resolvidas pelos modelos, poucos testes sistemáticos têm sido feitos sobre suas estruturas.

3.3. Parametrização de convecção rasa

O fato dos cúmulos rasos se dissolverem na atmosfera, depois de formados, faz com que eles exerçam um papel de grande importância na estrutura vertical da camada com nuvem. Eles causam diminuição da umidade e aquecimento devido aos processos de condensação e à subsidência de ar seco na parte inferior desta camada, e umedecimento e resfriamento devido à reevaporação na parte superior. Em outras palavras, a convecção rasa atua transportando calor para baixo e vapor de água para cima, mantendo a estrutura termodinâmica da baixa troposfera. Por isso, os cúmulos rasos são extremamente importantes na definição do escoamento de grande escala, e para que um modelo numérico seja o mais realista possível, deve ter a convecção rasa incorporada em seu código.

3.3.1. Parametrização de convecção rasa segundo Tiedtke et al. (1988)

De acordo com Tiedtke et al. (1988) e Betts (1975) os efeitos da convecção de cúmulos não precipitante sobre o balanço médio de calor e umidade, na área da grade, são devidos a fluxos turbulentos de calor sensível e a processos de umedecimento e condensação. Desta forma, as equações para energia estática seca, para umidade específica e para conteúdo de água líquida da nuvem podem ser escritas, respectivamente, da seguinte forma:

$$\left(\frac{\partial \bar{s}}{\partial t}\right)_{cu} = -\frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial}{\partial z} (\overline{\rho w' s'})_+ L(C - E) \quad (1)$$

$$\left(\frac{\partial \bar{q}}{\partial t}\right)_{cu} = -\frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial}{\partial z} (\overline{\rho w' q'})_-(C - E) \quad (2)$$

$$\left(\frac{\partial \bar{l}}{\partial t}\right)_{cu} = -\frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial}{\partial z} (\overline{\rho w' l'})_+(C - E) \quad (3)$$

em que s = energia estática seca, q = umidade específica, l = água líquida da nuvem, C = taxa de condensação, E = taxa de evaporação, L = calor latente de condensação, w = velocidade vertical, ρ = densidade, t = tempo, z = altura. A barra e a linha sobre as variáveis indicam, respectivamente, valores médios da área da grade e flutuações de escala convectiva, e $(\partial/\partial t)_{cu}$ é a tendência local devida à convecção.

Para a convecção de cúmulos rasos o tempo de mudança e a advecção de água líquida (l) das nuvens pelos fluxos de grande escala são tipicamente pequenos. A consequência disso é que o balanço é entre o transporte turbulento de água líquida da nuvem e o resultado dos processos de condensação e de evaporação:

$$C - E = \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial}{\partial z} (\overline{\rho w' l'}) \quad (4)$$

Substituindo-se a Equação (5) nas Equações (1) e (2), vem:

$$\left(\frac{\partial \bar{s}}{\partial t}\right)_{cu} = -\frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial}{\partial z} [\overline{\rho w' (s' - Ll')}] \quad (5)$$

$$\left(\frac{\partial \bar{q}}{\partial t}\right)_{cu} = -\frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial}{\partial z} [\overline{\rho w' (q' + l')}] \quad (6)$$

De acordo com a teoria K, os fluxos turbulentos de energia estática da água líquida $w'(s'-Ll')$ e de umidade específica total $w'(q'+l')$ podem ser representados por um fechamento de primeira ordem na forma:

$$\overline{w'(s'-Ll')} = -K \frac{\partial}{\partial z} (\bar{s} - L\bar{l}) \quad (7)$$

$$\overline{w'(q'+l')} = -K \frac{\partial}{\partial z} (\bar{q} + \bar{l}) \quad (8)$$

Portanto, substituindo-se as Equações (7) e (8) nas Equações (5) e (6) respectivamente, o efeito da convecção de cúmulos rasos pode ser descrito por:

$$\left(\frac{\partial \bar{s}}{\partial t} \right)_{cu} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} \left[\bar{\rho} K \frac{\partial}{\partial z} (\bar{s} - L\bar{l}) \right] \quad (9)$$

$$\left(\frac{\partial \bar{q}}{\partial t} \right)_{cu} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} \left[\bar{\rho} K \frac{\partial}{\partial z} (\bar{q} + \bar{l}) \right] \quad (10)$$

Tendo em vista que a maior dificuldade deste tipo de parametrização encontra-se na especificação do coeficiente de difusão turbulenta K e no conteúdo de água líquida da área média da grade, Tiedtke et al. (1988) propõe que o transporte de água líquida da nuvem seja desprezado, pois segundo Soong e Ogura (1980) este é muito menor que o transporte turbulento de umidade. Já para o coeficiente de difusão turbulenta K , ele propõe que o mesmo seja considerado constante ao longo da camada de nuvem ativa, ou seja, ao longo da camada de nuvem flutuante e que este seja dependente da distribuição de umidade na camada de nuvem passiva (a camada sobre o nível de empuxo nulo) que contém a camada de inversão, sendo zero em qualquer outra parte. Desta maneira, o coeficiente de difusão turbulenta K obedece às seguintes condições:

$$K = \begin{cases} K_0 & \text{camada de nuvem ativa} \\ K_0 = \left(\frac{RH - 0.8}{0.2} \right) \Delta RH & \text{camada de inversão} \\ 0 & \text{qualquer outra parte} \end{cases}$$

Em que o valor de $K_0 = 10 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ foi determinado pelos dados dos experimentos BOMEX e ATEX; o RH é a umidade relativa (entre 0 e 1) abaixo da camada de inversão e ΔRH o salto da umidade relativa pela inversão.

Segundo Tiedtke et al. (1988), embora este esquema seja bastante simples e não descreva os vários processos envolvidos na convecção de cúmulos rasos, ele produz um aquecimento diabático líquido realista e taxas de umedecimento para o ambiente em grande escala. Devido ao efeito da convecção de cúmulos rasos no ambiente estar diretamente redistribuindo calor e umidade pode ser parametrizada por um simples processo de difusão.

3.4. Descrição do modelo numérico utilizado

Neste trabalho o modelo numérico utilizado foi o BRAMS, na versão 4.2. Este modelo foi desenvolvido a partir do Modelo RAMS, que tem sua estrutura básica descrita por Pielke et al. (1992). Porém uma descrição objetiva e sucinta deste modelo pode ser encontrada em Cavalcanti (2001).

O BRAMS é o resultado de um Projeto de Pesquisa patrocinado pela Financiadora de Estudos e Projetos - FINEP entre os anos de 2002 e 2003, cujo principal objetivo era prover um único modelo para os centros regionais de previsão do tempo do Brasil. O projeto visava produzir uma versão sob medida do RAMS para regiões tropicais, que pudesse ser explorada por esses centros e usada nas pesquisas de universidades brasileiras. Em 2007, foi liberada uma nova versão do BRAMS: a versão 4.2, resultado das melhorias, computacionais e meteorológicas, feitas na versão anterior do BRAMS e mais algumas correções baseadas no RAMS 6.0.

Este modelo possui um completo e sofisticado conjunto de parametrizações físicas para simular os processos governantes da evolução do estado atmosférico. Ele contém em seu código várias opções de parametrizações físicas. Entre as utilizadas neste trabalho estão as

parametrizações: de onda longa e de onda curta propostas por Chen e Cotton (1983), a de convecção profunda do tipo Kuo (Kuo, 1965; 1974), modificada por Molinari (1985) e Molinari e Corsetti (1985) e a de Grell e Dévényi (2002) e a de convecção rasa desenvolvida e implementada por Souza (1999). A turbulência na camada limite planetária é calculada segundo Mellor e Yamada (1982) e a microfísica segue o esquema descrito por Walko et al. (1995).

O BRAMS é um modelo numérico de mesoescala, que tem um vasto espectro de aplicações, tais como: simulações de grandes turbilhões, de tempestades, de dispersão atmosférica e de fenômenos de mesoescala. A condição inicial pode ser definida a partir de vários conjuntos de dados observacionais e, como condição de contorno, o modelo tem o esquema 4DDA (assimilação de dados em 4 dimensões) o qual permite que a solução do sistema de equações seja confiante com dados analisados de escala maior, como as análises atmosféricas de modelos globais.

3.5. Implementação do esquema

O novo esquema de parametrização de convecção rasa foi inserido no código do BRAMS utilizando uma série de rotinas de cálculos, desenvolvidas em linguagem de programação Fortran 90. Após sua implementação uma sucessão de rodadas foram realizadas para testar o funcionamento do esquema no modelo e ajustar alguns parâmetros a fim de validá-lo.

Diante dos resultados dos testes de funcionamento da parametrização, fizeram-se necessários alguns ajustes no que diz respeito ao perfil do coeficiente de difusão K . Os resultados mais satisfatórios foram obtidos quando o perfil de K foi disposto da seguinte forma: $K = 1,5 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ para as duas primeiras camadas, $K = 2,0 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ nas camadas intermediárias e, por fim, $K = 0,5 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ nas duas últimas camadas.

Como critério de ativação, as nuvens foram condicionadas a terem suas bases abaixo de 1 km e a profundidade da nuvem inferior a 600 m. Esse critério foi estipulado aleatoriamente para garantir apenas a ativação de nuvens noturnas sobre o continente.

3.6. Descrição dos experimentos

A parametrização de cúmulos deve ser estudada, preferivelmente, utilizando dados de regiões onde estes sejam mais característicos. O Nordeste Brasileiro apresenta atividade

convectiva não precipitante abundante, e por isso acredita-se que essa região seja uma boa opção de estudo. Desta forma, alguns experimentos foram realizados sobre essa área no intuito de analisar o impacto da implementação do novo esquema de parametrização de convecção rasa no Modelo BRAMS.

O modelo foi iniciado a 00:00 UTC do dia 23 de março de 2004, e integrado por um período de 96 horas, ou seja, até a 00:00 UTC do dia 27 de março de 2004. Este período foi escolhido porque a atmosfera apresentava-se bastante perturbada, além da disponibilidade de dados obtidos a partir do banco de dados do CPTEC. A integração do modelo foi de forma heterogênea, na horizontal, com reanálise do modelo do CPTEC. A resolução vertical iniciava-se com 20 m e vai aumentando por um fator de 1,2 até atingir 1 km. As coordenadas centrais da grade com 80 pontos nas direções x e y e 42 na direção z, espaçadas de 20 e 50 km, foram de 7°S a 36°W. O *nudging* utilizado foi de 3 horas no centro do domínio e de meia hora nas laterais. A microfísica de nuvens foi ativada apenas no segundo nível durante as simulações, implicando na remoção de supersaturação de grande escala. A integração do modelo se deu dessa forma para todos os experimentos realizados neste estudo.

Inicialmente foram realizados experimentos com o modelo em sua forma original, ou seja, com as parametrizações já existentes ativadas, mas sem convecção rasa. Em seguida o modelo foi integrado para as mesmas condições que o experimento anterior, porém com a nova parametrização de convecção rasa ativada. A partir daí foram realizados experimentos variando a resolução de grade do modelo e o tipo de parametrização de convecção profunda para testar a sensibilidade da nova parametrização quanto à resolução de grade e ao tipo de parametrização de convecção profunda utilizados.

O primeiro experimento com a nova parametrização ativada foi realizado juntamente com a parametrização de convecção profunda do tipo Grell e o segundo com a parametrização de convecção profunda do tipo Kuo. Para cada tipo de parametrização de convecção profunda foi realizada uma integração com resolução de grade de 20 km (ECR2G, ECR2K), e outra com 50 km (ECR5G, ECR5K). Em seguida, áreas distintas, escolhidas aleatoriamente, sobre o continente e sobre o oceano foram tomadas como referência e mantidas fixas para melhor analisar os resultados dessas simulações. Na Tabela 1 tem-se um resumo dos experimentos realizados.

Tabela 1 – Resumo dos experimentos realizados.

Experimentos com o novo esquema de convecção rasa ativado	Parametrização de Convecção Profunda	Resolução (km)
ECR2G	Grell	20
ECR5G	Grell	50
ECR2K	Kuo	20
ECR5K	Kuo	50

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Modelo integrado com a nova parametrização ativada em associação a parametrização de convecção profunda do tipo Grell

4.1.1. Caso I: Experimento com resolução de grade de 20 km (ECR2G)

Inicialmente é mostrado na Figura 1 o campo de precipitação acumulada durante o período de 96 horas de integração do modelo no experimento com resolução de grade de 20 km. Nesse experimento o modelo foi integrado com a nova parametrização de convecção rasa associada à parametrização de convecção profunda do tipo Grell (ECR2G).

Verifica-se na Figura 1 uma grande variação nos valores de precipitação acumulada sobre o continente, com núcleos de 200 mm na porção noroeste do estado do Ceará e em parte do sudoeste da Bahia. Sobre o oceano foram encontrados valores de precipitação convectiva acumulada superiores a 50 mm, com vários núcleos de 150 mm no norte do oceano Atlântico.

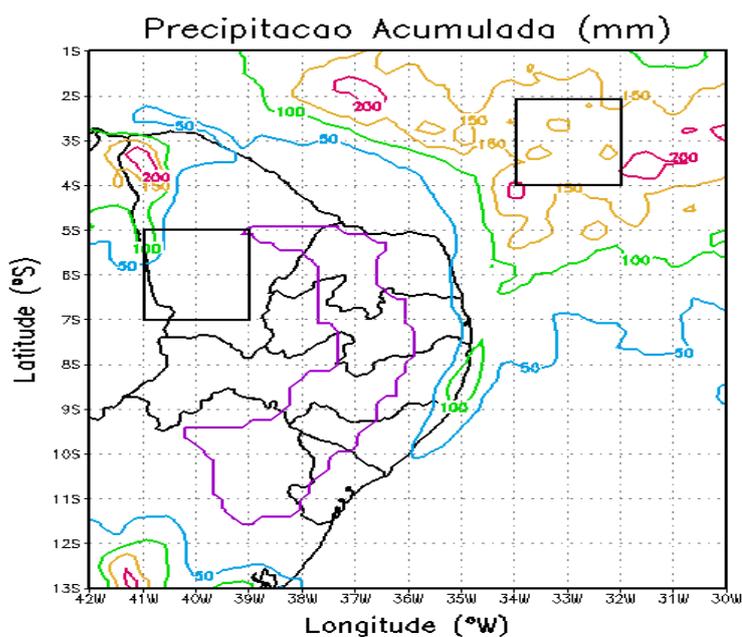


Figura 1 – Precipitação acumulada (mm) para o experimento ECR2G, durante o período de 96 horas de integração do modelo.

Para uma melhor compreensão do desempenho do novo esquema de parametrização de convecção rasa ao longo da simulação, médias de alguns parâmetros característicos do esquema serão obtidas a partir de áreas de 2 x 2 graus, uma sobre o continente e outra sobre o oceano mostradas como quadrados na Figura 1. No caso da análise sobre o continente, esta área está situada sobre grande parte do estado do Ceará e uma pequena porção do estado do Piauí. A análise sobre o oceano se dará para uma área localizada na porção norte do oceano Atlântico. Essas áreas serão mantidas em todos os experimentos para que se possa comparar os resultados obtidos.

4.1.1.1. Análise sobre uma área no continente (ECR2GC)

No intuito de tornar a visualização das figuras mostradas aqui mais compreensível, estas foram plotadas com dados de altura em metros na escala vertical e tempo em horas na escala horizontal.

Serão apresentados aqui ciclos diários médios das tendências de temperatura e de umidade em virtude da convecção rasa. Portanto, tem-se na Figura 2 o ciclo diário médio da tendência de temperatura devido à convecção rasa para o experimento ECR2GC, ao longo do período de integração do modelo. É possível observar, pela Figura 2, que as regiões de aquecimento máximo ocorrem por volta dos 800 m nos três primeiros dias de simulação e em torno dos 1000 m no último dia. Já as regiões de máximo resfriamento ocorrem em torno dos 1300 m nos dois primeiros dias de simulação e por volta dos 1600 m no último dia. Tanto os valores de máximo resfriamento quanto os de máximo aquecimento são observados por volta das 6 UTC (Coordinated Universal Time), aproximadamente 3 HL (horas local), para os quatro dias de simulação do modelo.

Nota-se que o esquema aqui apresentado atua, principalmente, durante o período noturno (da forma como é definido pela condição de acionamento), diferentemente do esquema desenvolvido por Souza (1999), que é mais representativo durante o período diurno. Assim, a implementação desta nova parametrização proporciona um avanço para a modelagem numérica, pois torna possível a representação da convecção rasa noturna no modelo, que por sua vez, passa a gerar simulações mais realistas no que diz respeito aos efeitos desse tipo de convecção sobre as variáveis atmosféricas.

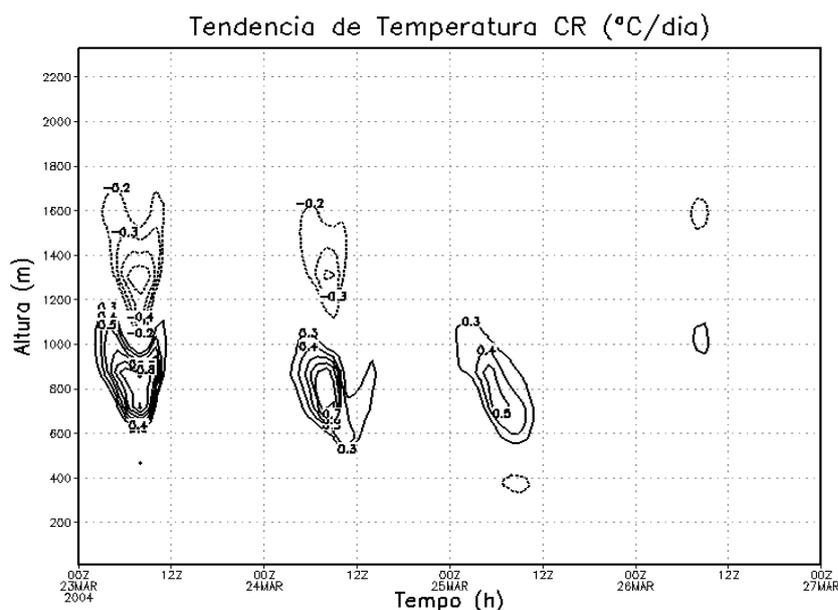


Figura 2 – Tendência de temperatura ($^{\circ}\text{C}/\text{dia}$) devido à convecção rasa para o experimento ECR2GC, ao longo das 96 horas de integração do modelo.

Segundo Souza (1991) os cúmulos rasos atuam como uma difusão extra, realizando uma secagem do topo da camada de mistura, onde geralmente estão as bases dessas nuvens, e um umedecimento logo acima, próximo aos seus topos. Este fenômeno pode ser observado na Figura 3 que traz a tendência de umidade devido à convecção rasa para o continente.

Verifica-se na Figura 3 a existência de uma simetria, em termos de sinal, em comparação à tendência de temperatura mostrada na Figura 2. Tal fato pode ser explicado devido a regiões de aquecimento corresponderem a regiões de secagem e regiões de resfriamento a regiões de umedecimento. Além disso, não é possível visualizar regiões de umedecimento nos dois últimos dias.

O aprofundamento observado na parte superior dos ciclos de tendência de temperatura e umidade, principalmente no primeiro dia, é devido ao fato de a noite as nuvens tendem a ser mais rasas que durante o dia.

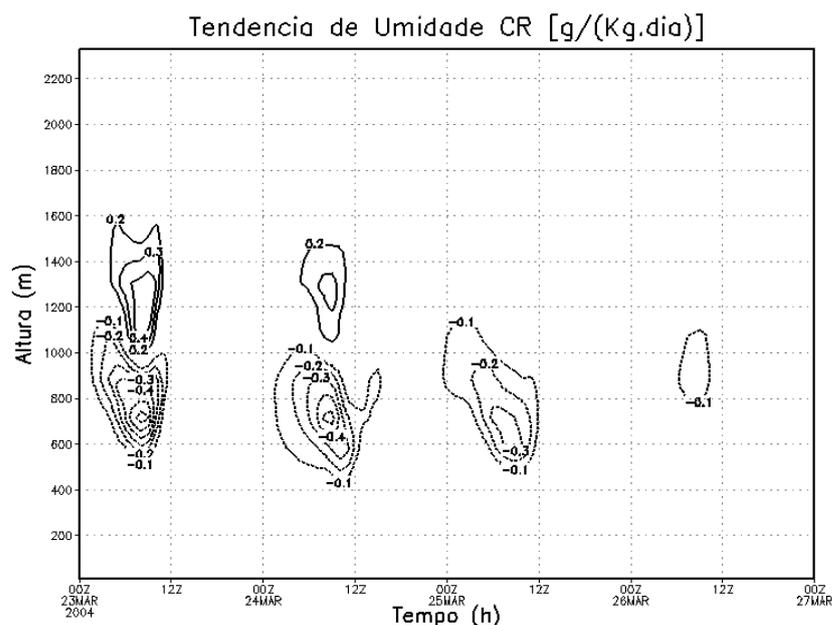


Figura 3 – Tendência de umidade [g/(kg.dia)] devido à convecção rasa para o experimento ECR2GC, ao longo das 96 horas de integração do modelo.

Um aspecto importante de uma parametrização de convecção rasa é sua interação com o esquema de convecção profunda, uma vez que os dois processos estão relacionados (Yanai et al., 1973), mas são parametrizados separadamente.

A precipitação convectiva acumulada (PCA) no experimento ECR2GC é mostrada na Figura 4. Pode-se ver que essa tem início por volta das 20 UTC (~17 horas local) do primeiro dia de simulação. No intervalo que vai das 8 HL até aproximadamente às 12 HL do segundo dia é notório um salto no valor da precipitação convectiva acumulada. Esse valor continua crescendo no terceiro dia, quando atinge pouco mais de 12 mm e se torna constante até o final da simulação.

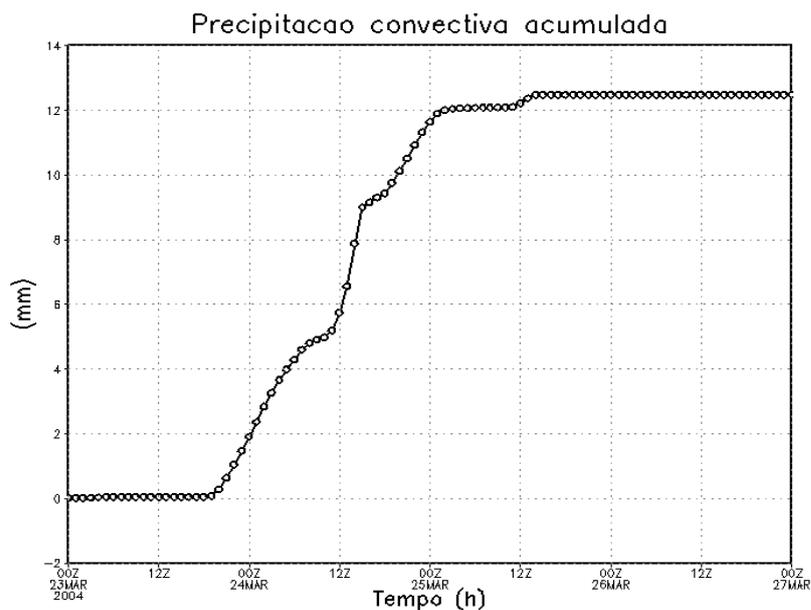


Figura 4 - Precipitação convectiva acumulada (mm) para o experimento ECR2GC, ao longo das 96 horas de integração do modelo.

Os processos radiativos exercem um papel fundamental no balanço térmico da atmosfera. Durante o dia a atmosfera vai acumulando energia nas formas de calor sensível e latente, ou seja, parte da energia solar é convertida em calor sensível, associada à contínua elevação da temperatura do ar após a aurora, e em calor latente, na presença de umidade na superfície. À noite, ao perder energia para o espaço, a atmosfera resfria-se.

O saldo de radiação e os fluxos de calor sensível e latente na superfície são apresentados na Figura 5. O saldo de radiação, representado pela linha com círculo aberto, apresenta valores acima de 700 W/m^2 por volta do meio dia local para todo o período de integração do modelo, exceto para o segundo dia, quando se verificou uma pequena queda nessa quantidade. O fluxo de calor sensível, representado pela linha com quadrado aberto na Figura 5, tem seu valor máximo no primeiro dia de simulação, valor este próximo dos 630 W/m^2 .

Quanto ao fluxo de calor latente, representado na Figura 5 pela linha com o círculo fechado, verifica-se que este apresenta valor mínimo de aproximadamente 40 W/m^2 por volta das 17 HL do primeiro dia. Ao contrário do fluxo de calor sensível, o valor máximo do fluxo de calor latente ocorre no segundo dia de simulação por volta das 11 HL, quando atinge cerca de 210 W/m^2 . Nos dias de simulação que se seguem essa quantidade vai diminuindo de forma

acentuada. A combinação do comportamento dos fluxos de calor sensível e latente denota um aumento da razão de Bowen, à medida que o solo se torna mais seco.

O objetivo de mostrar os fluxos de energia na superfície foi verificar se o esquema de convecção rasa implementado no modelo gerava ou não anomalias nesses fluxos ao longo das simulações. De forma geral, os fluxos que forçam a convecção rasa, observados na Figura 5, apresentam comportamento típico e tendem a manter a amplitude, tanto do saldo de radiação quanto dos fluxos de energia.

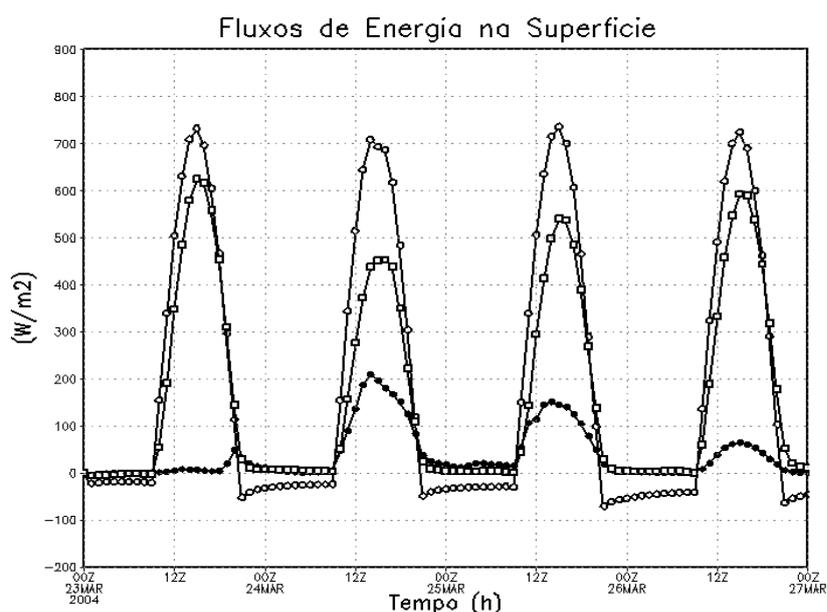


Figura 5 – Fluxos de energia na superfície (W/m^2) para o experimento ECR2GC, ao longo das 96 horas de integração do modelo. Saldo de radiação (círculo aberto), fluxo de calor sensível (quadrado aberto), fluxo de calor latente (círculo fechado).

4.1.1.2. Análise sobre uma área no oceano (ECR2GO)

A Figura 6 traz a tendência de temperatura devido à convecção rasa ao longo das 96 horas de integração do modelo. Pode-se ver que as regiões de aquecimento máximo ocorrem por volta dos 700 m mantendo o mesmo padrão durante os quatro dias de simulação. As regiões de máximo resfriamento, assim como para o continente, ocorrem em torno dos 1300 m. Alguns ciclos de resfriamento abaixo das regiões de aquecimento entre os dias 24 e 26 podem ser vistos na Figura 6, provavelmente associados a alguma inversão no perfil local. No entanto, os valores mais significativos são visualizados no primeiro dia de simulação. Esses

valores ocorrem aproximadamente às 3 UTC, isto é, por volta da 00 HL, sendo este horário comum as regiões de máximo aquecimento e resfriamento.

Na Figura 7 tem-se a tendência de umidade para a área sobre o oceano devido à convecção rasa. Pela Figura 7 verifica-se que, de forma geral, as regiões de umedecimento ocorrem acima dos 800 m até cerca de 1400 m, e as de secagem ficam entre os 600 m e os 800 m. Aqui é possível observar também uma região de secagem por volta dos 500 m no primeiro dia de simulação.

Note que tanto a tendência de temperatura quanto a de umidade para o experimento ECR2GO não apresentaram ciclos diurno distintos, o que é algo comum de acontecer, pois sobre o oceano a troca de calor entre a superfície e o ar próximo a ela é menos intensa do que a que ocorre no continente, tendo em vista que a temperatura da superfície do oceano apresenta uma variação diurna bem menor que a do continente ocasionando a não formação destes ciclos.

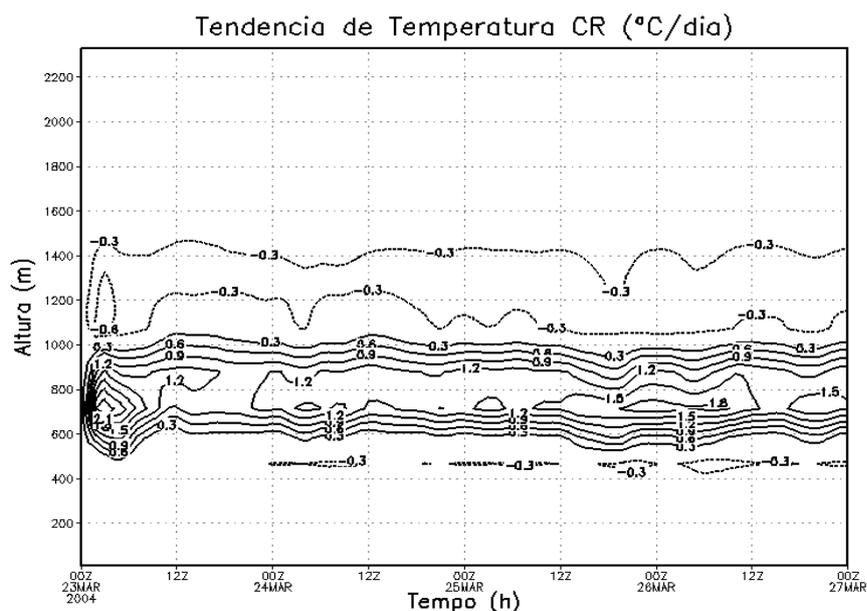


Figura 6 – Tendência de temperatura (°C/dia) devido à convecção rasa para o experimento ECR2GO, ao longo das 96 horas de integração do modelo.

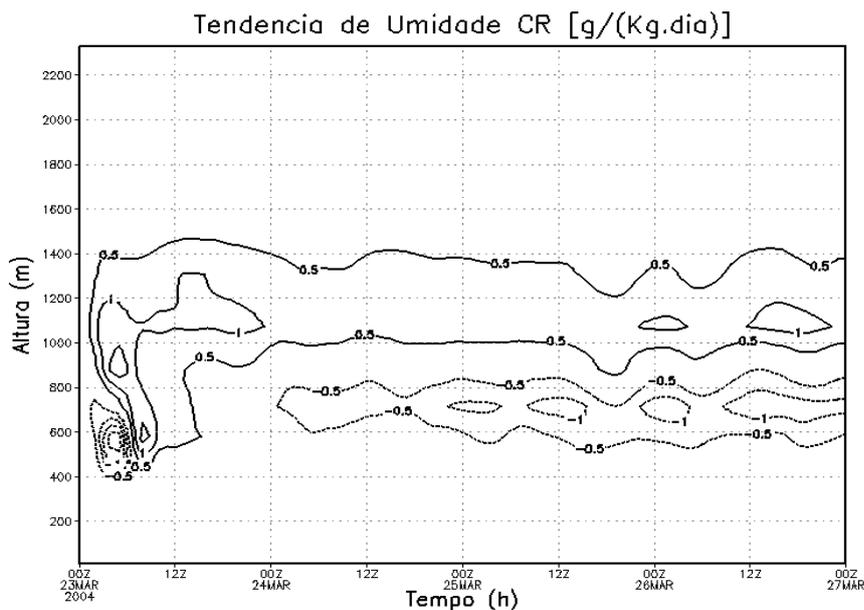


Figura 7 – Tendência de umidade [g/(kg.dia)] devido à convecção rasa para o experimento ECR2GO, ao longo das 96 horas de integração do modelo.

A Figura 8 traz a precipitação convectiva acumulada ao longo das 96 horas de simulação. Nota-se um aumento constante na quantidade da precipitação convectiva acumulada a partir das primeiras horas do primeiro dia de simulação. Após as 12 UTC, aproximadamente 9 HL, do segundo dia observa-se que a precipitação convectiva acumulada cresce em média 20 mm a cada 12 horas. Essa taxa de crescimento é mantida até as 12 UTC do dia 25. A partir daí, a taxa de crescimento cai um pouco. No entanto, no último dia ela chega a aproximadamente 170 mm.

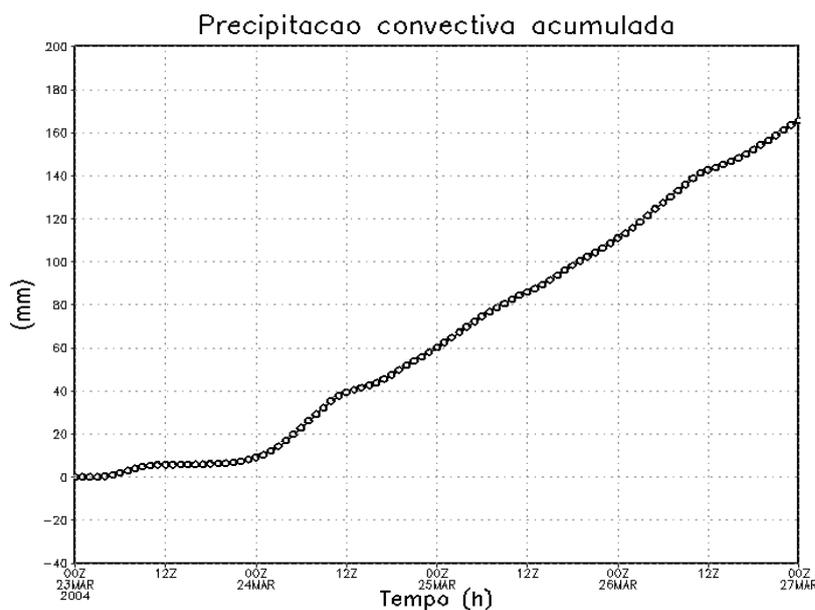


Figura 8 - Precipitação convectiva acumulada (mm) para o experimento ECR2GO, ao longo das 96 horas de integração do modelo.

O saldo de radiação e os fluxos de energia na superfície para o experimento ECR2GO são apresentados na Figura 9. O saldo de radiação (círculo aberto) teve seu valor máximo próximo dos 950 W/m^2 . Esse valor é observado no primeiro dia por volta das 15 UTC, ou seja, meio dia local. Nos demais dias os valores decaíram um pouco em comparação ao primeiro, porém mantiveram-se acima dos 700 W/m^2 .

Sabe-se que a temperatura da superfície do mar apresenta uma variação geralmente muito pequena em comparação à variação que ocorre no continente. No modelo BRAMS, que não tem acoplamento com o oceano, este valor é mantido constante. Isto explica o fato dos valores do fluxo de calor sensível serem bem menores para o oceano do que para o continente. Sobre o oceano os valores do fluxo de calor sensível (quadrado aberto) são praticamente constantes.

Na Figura 9 pode ser visto também o fluxo de calor latente (círculo fechado), onde observa-se valores máximos próximo dos 115 W/m^2 as 11 HL do segundo dia. Nota-se que o valor mínimo do fluxo de calor latente é encontrado no dia 25, coincidindo com o dia em que ocorre o menor valor do saldo de radiação. O pequeno ciclo diurno que se observa está relacionado à pequena variação da temperatura do ar e nos valores do vento.

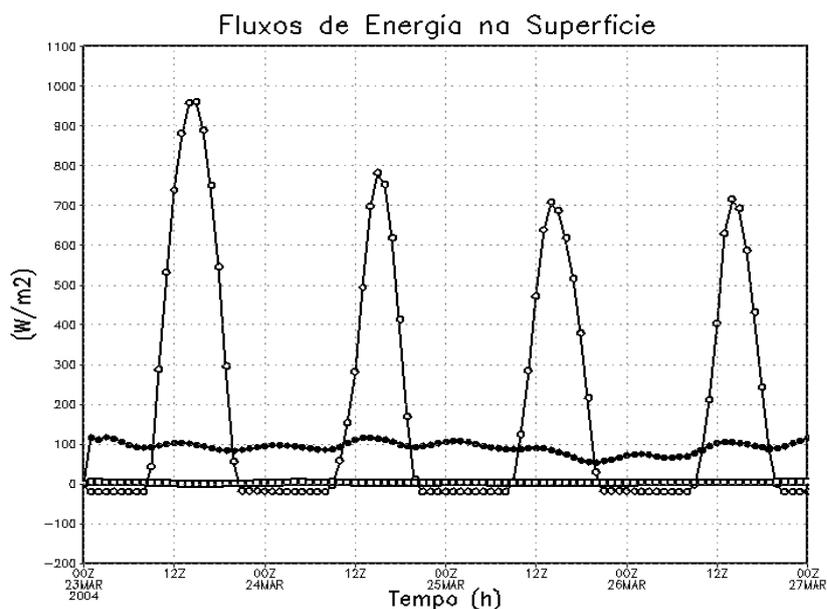


Figura 9 – Fluxos de energia na superfície (W/m^2) para o experimento ECR2GO, ao longo das 96 horas de integração do modelo. Saldo de radiação (círculo aberto), fluxo de calor sensível (quadrado aberto), fluxo de calor latente (círculo fechado).

4.1.2. Caso II: Experimento com resolução de grade de 50 km (ECR5G)

A precipitação acumulada para o experimento ECR5G é visualizada na Figura 10. Núcleos de 200 mm são observados na região norte do oceano, enquanto sobre o continente não é possível ver núcleos bem definidos. Comparando a Figura 10 e a Figura 1, nota-se que a quantidade de precipitação acumulada no experimento ECR5G é menor do que a simulada no experimento ECR2G. A Figura 1 mostra o quanto uma maior resolução define melhor os núcleos de precipitação, principalmente sobre o continente.

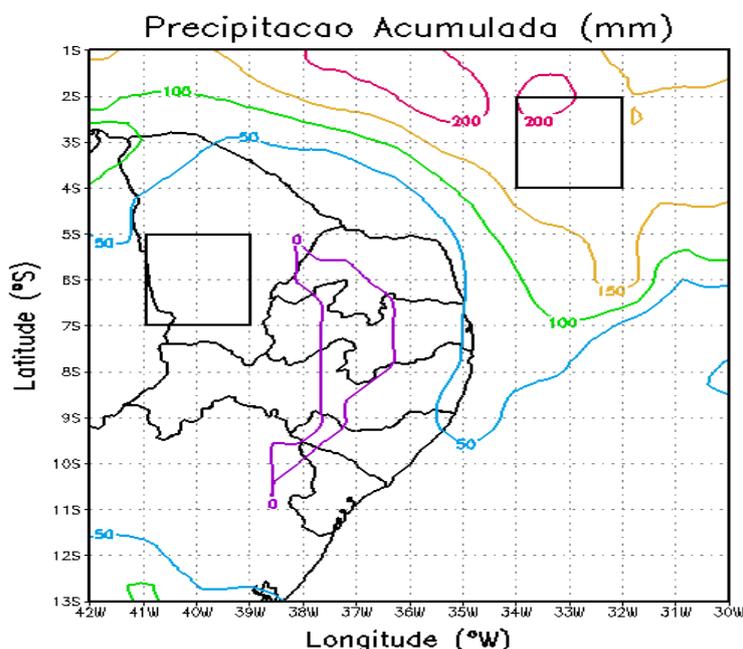


Figura 10 – Precipitação acumulada (mm) para o experimento ECR5G durante o período de 96 horas de integração do modelo.

4.1.2.1. Análise sobre uma área no continente (ECR5GC)

A Figura 11 traz o ciclo diário médio da tendência de temperatura devido à convecção rasa para o experimento ECR5GC. Neste caso, verifica-se que as regiões de aquecimento máximo tendem a ocorrer em níveis mais altos a cada dia de simulação, assim como as regiões de máximo resfriamento, exceto nos dois primeiros dias. Nos dias 23 e 24 as regiões de aquecimento máximo são visualizadas por volta dos 800 m. No último dia esta região é observada em torno dos 1000 m. Enquanto isso, as regiões de máximo resfriamento ocorrem por volta dos 1300 m no primeiro dia, chegando aos 1600 m no último dia. Os valores encontrados aqui estão na mesma ordem dos encontrados no experimento ECR2GC.

Na Figura 12 tem-se a tendência de umidade para o experimento ECR5GC, ao longo das 96 horas de integração do modelo. Nessa figura, observa-se que as regiões de umedecimento ocorrem acima dos 1200 m e, ao contrário do obtido no experimento ECR2GC (Figura 3), estas são visualizadas nos quatro dias de simulação. As regiões de secagem ocorrem por volta dos 700 m nos dois primeiros dias e 900 m nos dois últimos. Neste caso, os resultados encontrados no experimento ECR2GC e os encontrados aqui são semelhantes em termos quantitativos, isso para os dias 23 e 24.

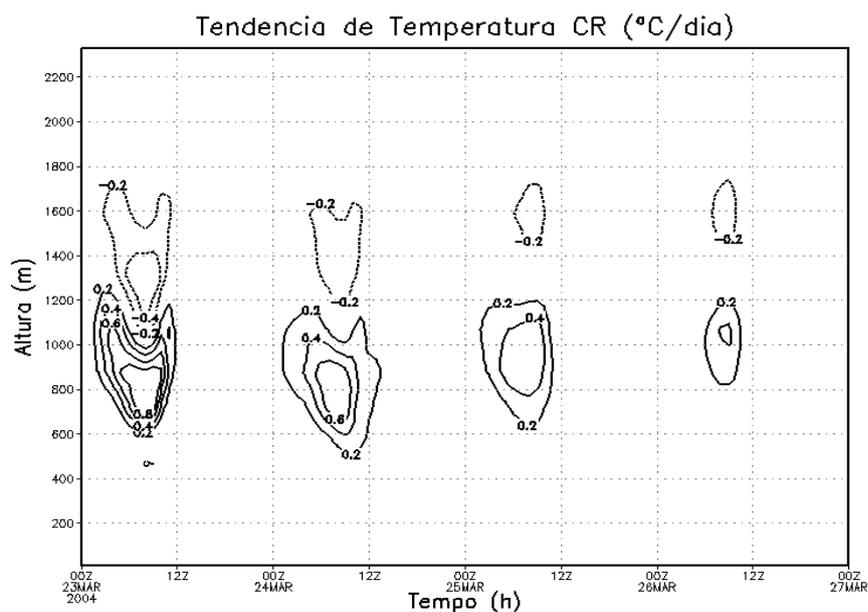


Figura 11 – Tendência de temperatura ($^{\circ}\text{C}/\text{dia}$) devido à convecção rasa para o experimento ECR5GC, ao longo das 96 horas de integração do modelo.

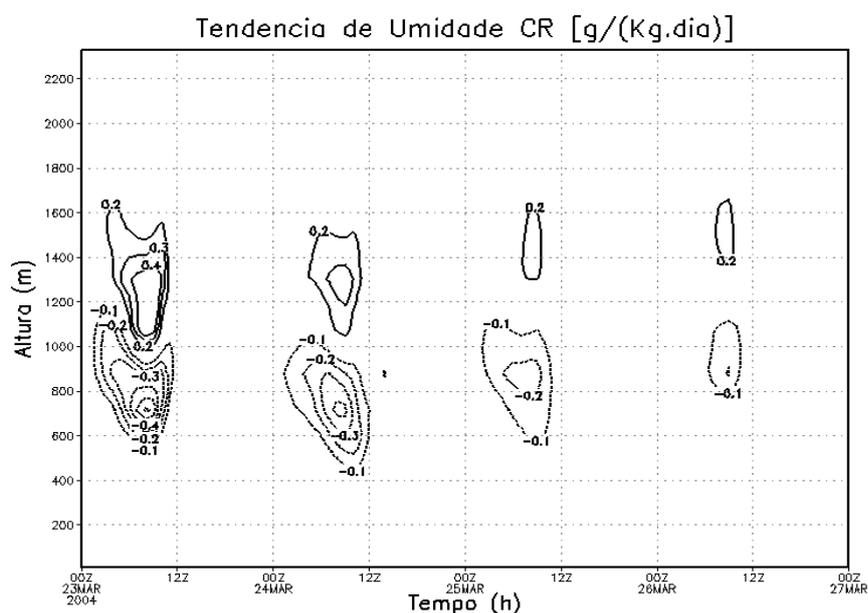


Figura 12 – Tendência de umidade [$\text{g}/(\text{kg}.\text{dia})$] devido à convecção rasa para o experimento ECR5GC, ao longo das 96 horas de integração do modelo.

Na Figura 13 é mostrada a precipitação convectiva acumulada para o experimento ECR5GC. Assim como no experimento ECR2GC, a precipitação convectiva inicia-se por volta das 20 UTC do primeiro dia. Observa-se, nessa figura, que no segundo dia há um

aumento considerável nessa quantidade entre as 10 UTC e as 15 UTC, ou seja, entre 7 HL e 12 HL, seguido por uma pausa neste aumento até as 15 HL. Depois disso os valores da precipitação convectiva acumulada continuam crescendo até às 10 HL do dia 25. A partir daí a precipitação atinge pouco mais de 3,5 mm e torna-se constante até o final da simulação.

Embora os gráficos da precipitação convectiva acumulada mostrados nas Figuras 4 e 13 tenham praticamente a mesma forma, percebe-se que há uma grande sensibilidade do esquema à resolução de grade a julgar-se pelos valores encontrados, tendo em vista que no experimento ECR2GC o valor da precipitação convectiva acumulada no último dia é pouco mais que o triplo do valor obtido no experimento ECR5GC para o mesmo dia.

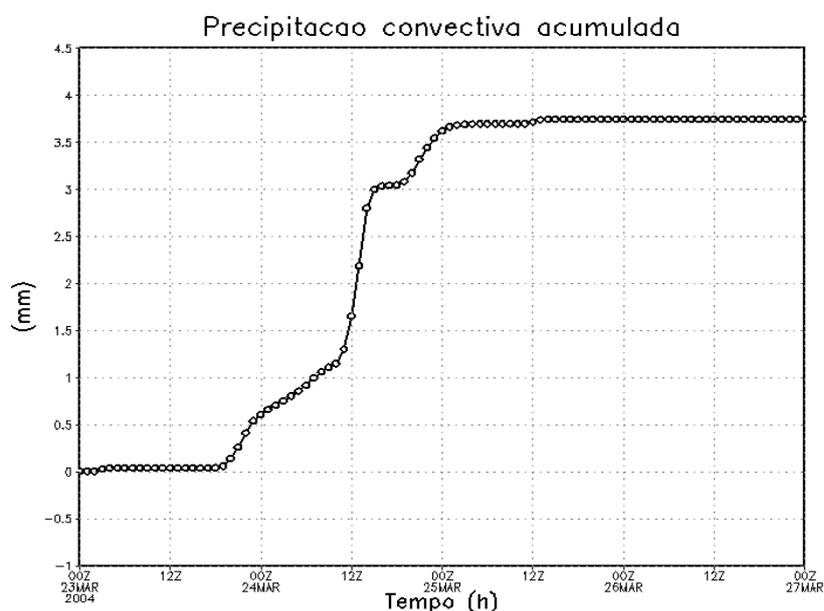


Figura 13 – Precipitação convectiva acumulada (mm) para o experimento ECR5GC, ao longo das 96 horas de integração do modelo.

Na Figura 14 são apresentados o saldo de radiação e os fluxos de calor sensível e de calor latente na superfície para o experimento ECR5GC.

Observa-se pela Figura 14 que o saldo de radiação (círculo aberto) apresenta valores máximos acima de 700 W/m^2 por volta do meio dia local. Esses resultados seriam semelhantes, em termos qualitativos, aos resultados do experimento ECR2GC para todo o período de simulação não fosse pelo fato do menor valor, neste caso, ser observado no último dia, enquanto que no experimento ECR2GC este valor foi observado no segundo dia.

O fluxo de calor sensível (quadrado aberto), assim como no experimento ECR2GC, tem seu valor máximo, cerca de 650 W/m^2 , observado no primeiro dia de simulação. No caso

do menor pico, este é observado no segundo dia por volta das 16 UTC, aproximadamente 13 HL. Nos dias seguintes, o fluxo de calor sensível aumenta notoriamente. Já o fluxo de calor latente (círculo fechado) atinge seu máximo por volta das 11 HL do segundo dia. Este valor é de aproximadamente 110 W/m^2 . Não diferente do experimento ECR2GC, o fluxo de calor latente tende a diminuir com o passar dos dias simulados.

Note-se que os valores de fluxo de calor latente encontrados neste caso são menos acentuados que os encontrados no experimento ECR2GC (Figura 5) mostrando mais uma evidência de sensibilidade à resolução de grade. Porém, o saldo de radiação e o fluxo de calor sensível são aproximadamente iguais àqueles encontrados no experimento ECR2GC apresentando um comportamento típico ao longo da simulação.

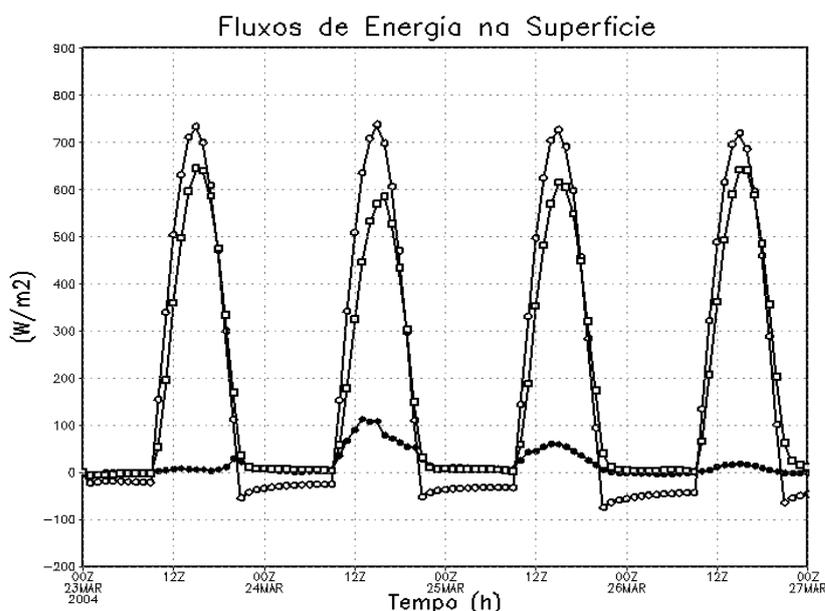


Figura 14 – Fluxos de energia na superfície (W/m^2) para o experimento ECR5GC, ao longo das 96 horas de integração do modelo. Saldo de radiação (círculo aberto), fluxo de calor sensível (quadrado aberto), fluxo de calor latente (círculo fechado).

4.1.2.2. Análise sobre uma área no oceano (ECR5GO)

Tem-se na Figura 15 a tendência de temperatura para o experimento ECR5GO. Nota-se que os resultados da tendência de temperatura para este experimento são semelhantes aos resultados obtidos no experimento ECR2GO (Figura 6). Aqui também as regiões de máximo aquecimento ocorrem por volta dos 700 m e as de máximo resfriamento ocorrem em torno

dos 1300 m. Pequenos ciclos de resfriamento são observados abaixo das regiões de aquecimento desde a tarde do primeiro dia até o último dia de simulação. Mas no geral, os valores obtidos estão na mesma ordem dos encontrados no experimento anterior para o oceano.

A tendência de umidade para o oceano no experimento ECR5GO, observado na Figura 16, é mais significativa no primeiro dia. Os valores encontrados são muito próximos dos obtidos no experimento ECR2GO. Nota-se, pela Figura 16, que as regiões onde se concentram os valores máximos de umidade para o primeiro dia ocorrem acima dos 900 m, nos dias seguintes essas regiões ficam na faixa que vai dos 1000 m até cerca de 1400 m. Já as regiões de secagem ficam acima dos 400 m no primeiro dia com um ciclo diurno bem nítido próximo dos 600 m. Nos outros três dias estas regiões são visualizadas entre os 600 e os 800 m.

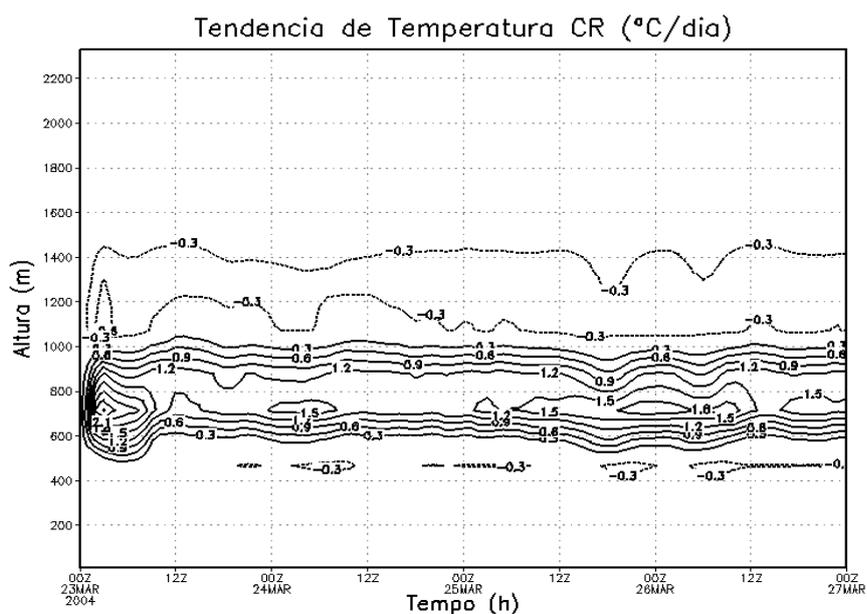


Figura 15 – Tendência de temperatura (°C/dia) devido à convecção rasa para o experimento ECR5GO, ao longo das 96 horas de integração do modelo.

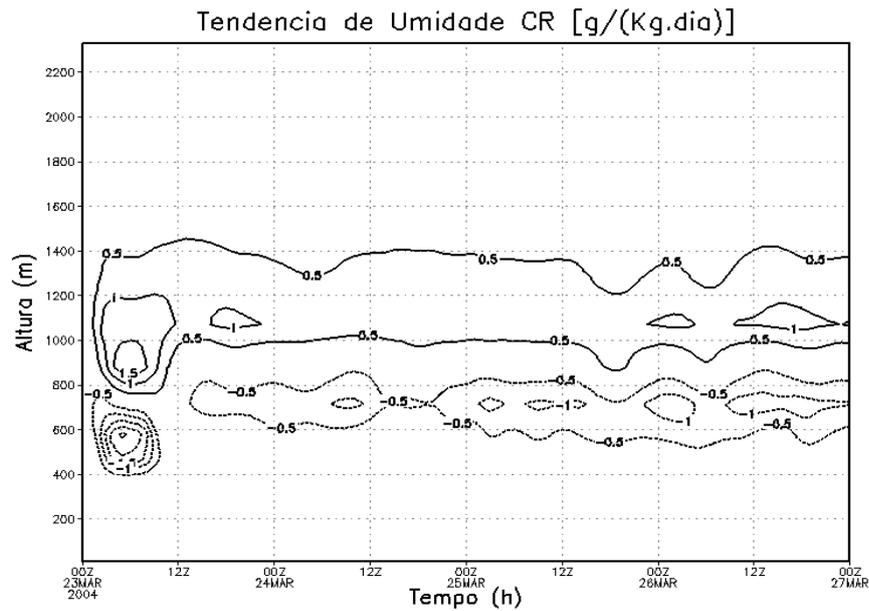


Figura 16 – Tendência de umidade [g/(kg.dia)] devido à convecção rasa para o experimento ECR5GO, ao longo das 96 horas de integração do modelo.

A precipitação convectiva acumulada para este experimento é mostrada na Figura 17. Esta, por sua vez, se comparada à precipitação convectiva acumulada no experimento ECR2GO (Figura 8), apresentou-se de forma mais linear. No entanto, a taxa de crescimento foi semelhante para ambos os experimentos. Após as 18 HL do último dia a precipitação convectiva acumulada atinge os 190 mm. No caso do experimento ECR2GO o valor obtido foi um pouco mais baixo, cerca de 170 mm. Estes valores sugerem, mais uma vez, a sensibilidade do esquema quanto ao tipo de resolução usado.

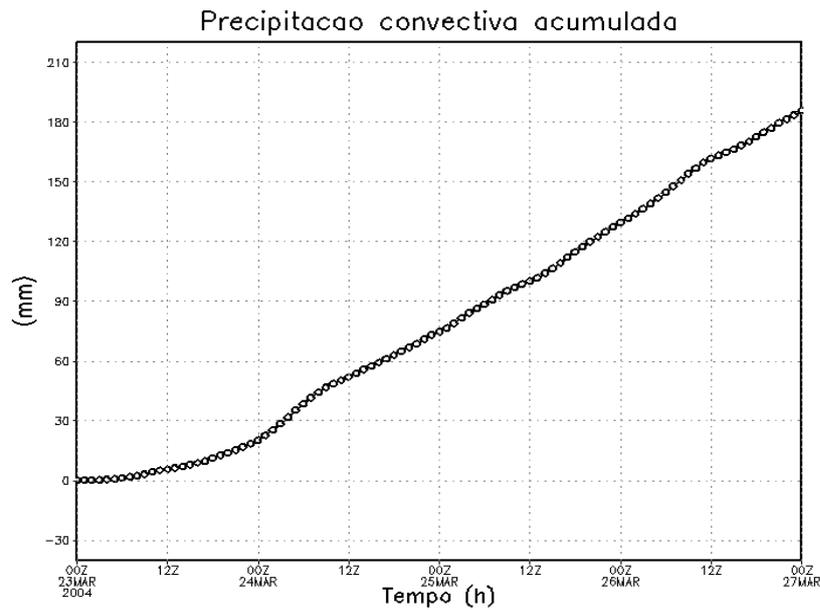


Figura 17 – Precipitação convectiva acumulada (mm) para o experimento ECR5GO, ao longo das 96 horas de integração do modelo.

Na Figura 18 têm-se o saldo de radiação e os fluxos de calor sensível e calor latente para o experimento ECR5GO. Assim, o saldo de radiação (círculo aberto) obtido ao longo da simulação, apresenta picos por volta das 15 UTC, ou seja, ao meio dia local, cujo valor máximo é de aproximadamente 940 W/m^2 encontrado no primeiro dia de simulação. Nos dias seguintes esses valores vão diminuindo até chegar a pouco menos de 700 W/m^2 no último dia. Algo semelhante é observado na Figura 9 (experimento ECR2GO).

No caso do fluxo de calor sensível (quadrado aberto), este se mostra praticamente constante ao longo da simulação, como visualizado na Figura 18. O mesmo acontece para o experimento ECR2GO (Figura 9). Já para o fluxo de calor latente (círculo fechado) o valor máximo, cerca de 130 W/m^2 , é visualizado por volta das 10 HL do segundo dia, e o mínimo no dia 25. Comparando as Figuras 9 e 18, nota-se que os valores de fluxo de calor latente obtidos aqui, comportam-se de forma semelhante aqueles encontrados no experimento ECR2GO.

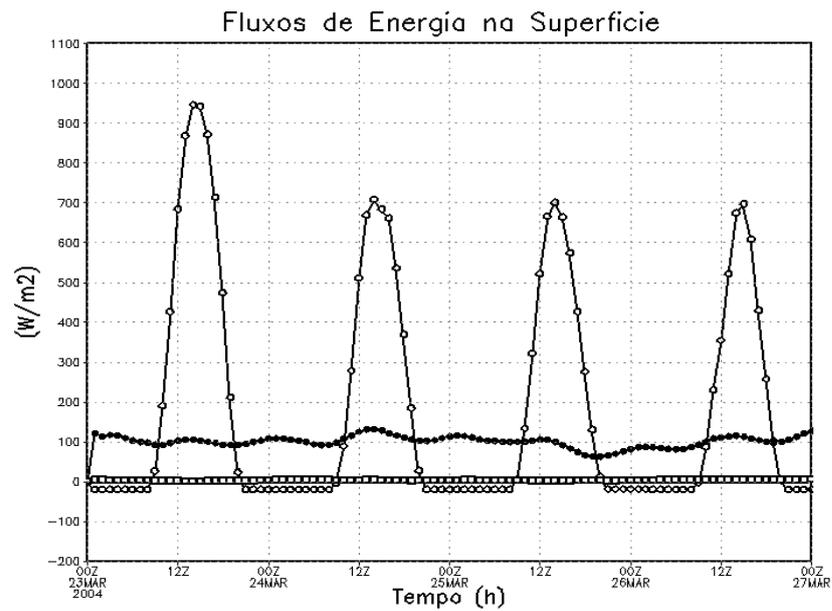


Figura 18 – Fluxos de energia na superfície (W/m^2) para o experimento ECR5GO, ao longo das 96 horas de integração do modelo. Saldo de radiação (círculo aberto), fluxo de calor sensível (quadrado aberto), fluxo de calor latente (círculo fechado).

Para que se possa ter uma noção geral do desempenho do esquema, quando o modelo é integrado em associação com a parametrização de convecção do tipo Grell, um resumo dos valores médios dos parâmetros característicos encontrados nos experimentos realizados é mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Resumo dos valores médios dos parâmetros característicos encontrados nos experimentos realizados com Grell.

Parâmetros		Experimentos com Grell			
		Análise sobre o Continente		Análise sobre o Oceano	
		ECR2GC	ECR5GC	ECR2GO	ECR5GO
Tendência de Temperatura		-----	-----	-----	-----
Altura de ocorrência (m)	Aquecimento máximo	800	800	700	700
	Resfriamento máximo	1.300	1.300	1.300	1.300
Tendência de Umidade		-----	-----	-----	-----
Altura de ocorrência (m)	Umedecimento máximo	~1.250	1.200	1.200	1.200
	Secagem máxima	700	700	700	700
PCA no último dia (mm)		~13	~3,7	~170	~190
Saldo de Radiação Máximo (W/m²)		740	750	950	940
Fluxo de Calor Sensível Máximo (W/m²)		630	650	~constante	~constante
Fluxo de Calor Latente Máximo (W/m²)		210	120	115	130

4.2. Modelo integrado com a nova parametrização ativada em associação a parametrização de convecção profunda do tipo Kuo

4.2.1. Caso III: Experimento com resolução de grade de 20 km (ECR2K)

Neste experimento o modelo é integrado usando o novo esquema de convecção rasa associado ao esquema de convecção profunda do tipo Kuo. Porém, todas as condições iniciais usadas nos experimentos ECR2G foram mantidas.

O campo de precipitação acumulada obtido neste experimento, mostrado na Figura 19, apresenta poucos núcleos que são visualizados apenas sobre o continente. Comparando a Figura 19 e a Figura 1, obtida no experimento ECR2G, vê-se uma grande diferença entre os valores de precipitação acumulada quando o tipo de parametrização profunda é mudado. Assim, enquanto no experimento realizado com a parametrização do tipo Grell (ECR2G) a precipitação acumulada variou de 50 mm a 200 mm tanto sobre o continente como sobre o oceano, nesse experimento a precipitação acumulada apresentou uma pequena variação, entre 50 mm e 100 mm, observados apenas sobre o continente. Essa diferença entre as quantidades de precipitação acumulada sugere a sensibilidade do esquema ao tipo de parametrização de convecção profunda usada. No entanto, a localização dos núcleos de precipitação acumulada mais significativos sobre o continente é praticamente a mesma para ambos os experimentos apesar do esquema Kuo tender a produzir menos precipitação que o esquema Grell.

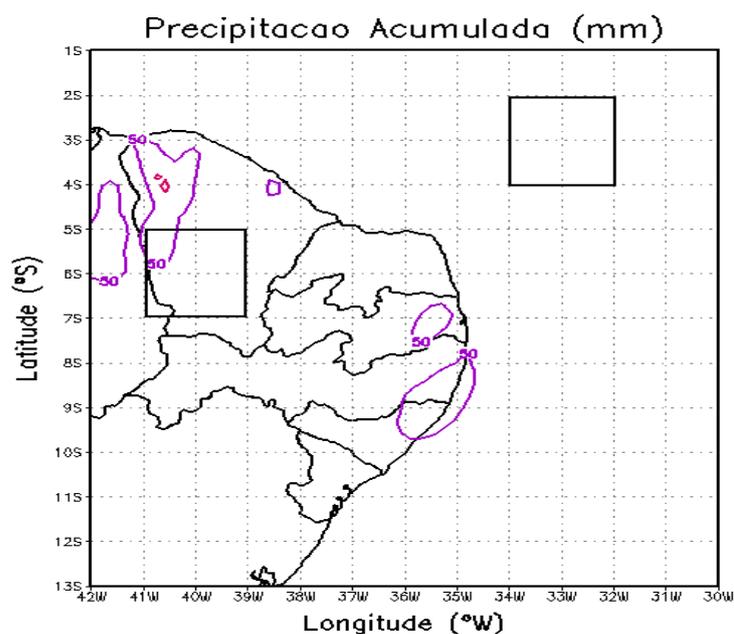


Figura 19 – Precipitação acumulada (mm) para o experimento ECR2K, ao longo das 96 horas de integração do modelo.

4.2.1.1. Análise sobre uma área no continente (ECR2KC)

Assim como para o experimento realizado com a convecção profunda do tipo Grell, aqui também serão apresentados ciclos diários médios, obtidos para uma área sobre o continente, das tendências de temperatura e de umidade, no intuito de testar e analisar o impacto gerado pela parametrização de convecção rasa sobre esses campos quando esta é associada a parametrização de convecção profunda do tipo Kuo.

Na Figura 20 é visualizado o ciclo diário médio da tendência de temperatura devido à convecção rasa durante o período de integração do modelo, onde verifica-se que as regiões de aquecimento bem com as de resfriamento acontecem em níveis bem mais baixos que as obtidas no experimento ECR2GC. As regiões de aquecimento máximo, neste caso, ocorrem em torno dos 200 m nos três primeiros dias. Nessa figura não é possível visualizar uma região de aquecimento no último dia da simulação. Já as regiões de máximo resfriamento são visíveis acima dos 450 m em todos os dias de simulação. No entanto, o segundo dia torna-se mais significativo que os demais por apresentar ciclos distintos tanto para regiões de aquecimento como de resfriamento e cujos valores máximos ocorrem por volta das 5 HL.

A tendência de umidade para o experimento ECR2KC é visualizada na Figura 21. Diferentemente do experimento ECR2GC não é possível verificar a existência de uma simetria, em termos de sinal, quando se compara esta figura a Figura 20. Contudo, a tendência de umidade é mais representativa nos dia 24 e 25, com valores máximos ocorrendo por volta das 7 HL e das 2 HL, respectivamente. As regiões de umedecimento e secagem encontradas nesse experimento ocorrem em níveis mais baixos que as obtidas no experimento ECR2GC (Figura 3). Neste caso, os resultados sugerem, portanto, que há uma sensibilidade significativa do esquema de convecção rasa implementado em relação ao tipo de parametrização de convecção profunda usado.

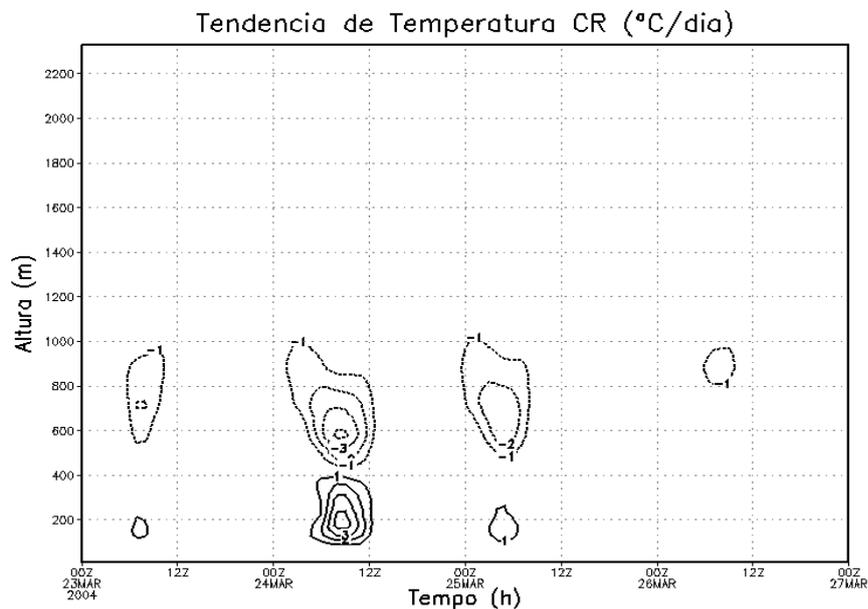


Figura 20 – Tendência de temperatura ($^{\circ}\text{C}/\text{dia}$) devido à convecção rasa para o experimento ECR2KC, ao longo das 96 horas de integração do modelo.

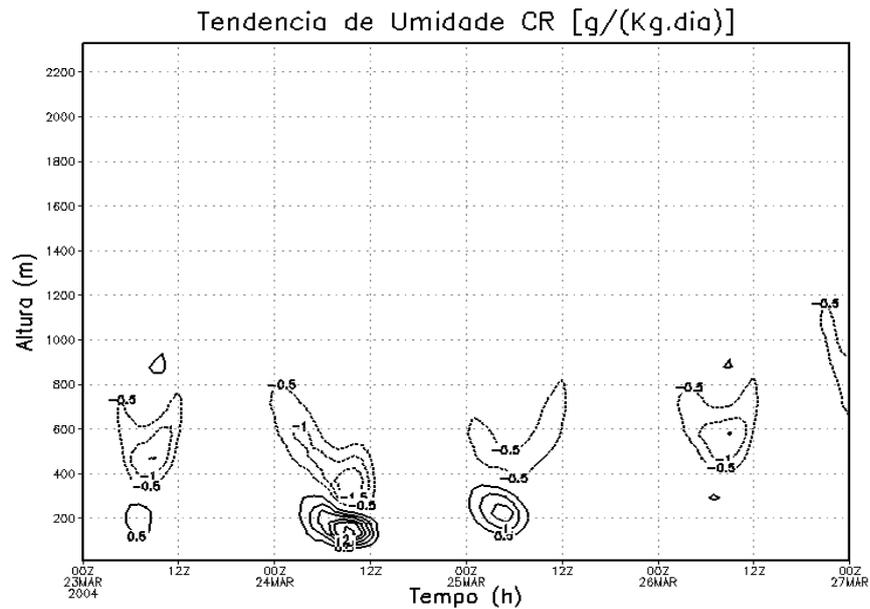


Figura 21 – Tendência de umidade [g/(kg.dia)] devido à convecção rasa para o experimento ECR2KC, ao longo das 96 horas de integração do modelo.

Na Figura 22 é mostrada a precipitação convectiva acumulada para o experimento ECR2KC, ao longo das 96 horas de simulação. Nessa figura observa-se um aumento da precipitação convectiva acumulada bem maior do que o encontrado no experimento ECR2GC. Outra coisa interessante de se observar é que a taxa de crescimento dessa quantidade torna-se relativamente pequena entre as 7 HL e as 14 HL do primeiro dia. Um salto no valor da precipitação convectiva acumulada é observado entre as 14 HL e as 21 HL do segundo dia, quando a precipitação passa dos 17 mm para os 25 mm. Os valores da precipitação convectiva acumulada continuam crescendo até o último dia de simulação quando, então, chega aos 40 mm a 00 UTC, aproximadamente 21 HL. Este valor é aproximadamente três vezes maior que o encontrado no experimento ECR2GC.

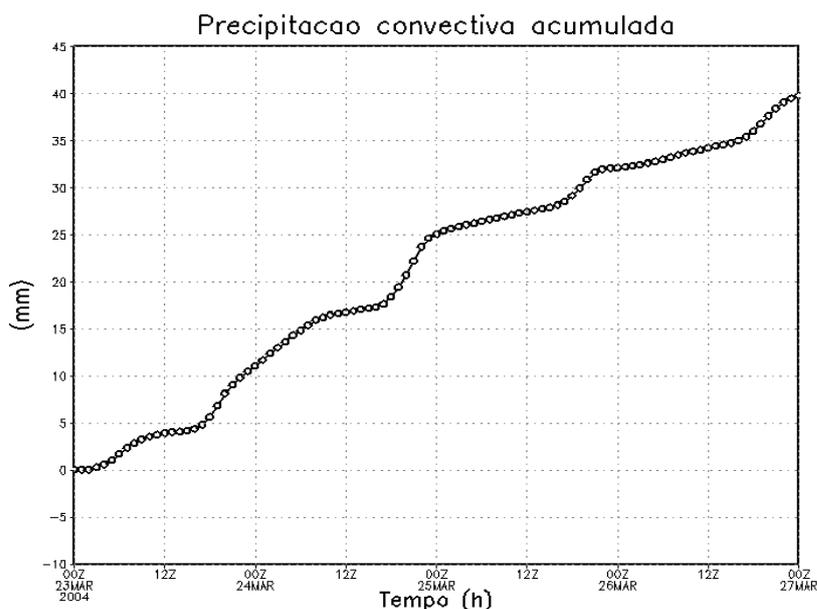


Figura 22 – Precipitação convectiva acumulada (mm) para o experimento ECR2KC, ao longo das 96 horas de integração do modelo.

Têm-se na Figura 23 o saldo de radiação e os fluxos de calor sensível e de calor latente na superfície para o experimento ECR2KC. O saldo de radiação e os fluxos de calor sensível e latente são representados da mesma forma que nos experimentos anteriores.

O saldo de radiação (círculo aberto) obtido neste experimento comporta-se de maneira semelhante ao obtido no experimento ECR2GC, ou seja, os picos têm valores que estão acima de 700 W/m^2 e ocorrem por volta do meio dia local para todo o período de integração do modelo. Seu valor máximo está próximo dos 800 W/m^2 e é visualizado no segundo dia.

O fluxo de calor sensível (quadrado aberto) tem seu valor máximo, cerca de 500 W/m^2 , obtido logo no primeiro dia de simulação e o valor mínimo no terceiro dia. No entanto, ambos ocorrem no mesmo horário, por volta do meio dia local.

Quanto ao fluxo de calor latente (círculo fechado), este obteve valor mínimo nas primeiras horas de simulação. No terceiro dia o fluxo de calor latente obteve seu máximo ao meio dia local, esse valor ficou próximo dos 600 W/m^2 . Comparando os resultados encontrados no experimento ECR2GC e os obtidos aqui, nota-se que o fluxo de calor sensível é inferior e que o valor máximo do fluxo de calor latente é cerca de três vezes maior que valor máximo encontrado no experimento ECR2GC (Figura 5). Isso é justificado pelo fato da precipitação convectiva acumulada, mostrada na Figura 22, ter alcançado um valor bem mais alto que a encontrada no experimento realizado com a parametrização de Grell.

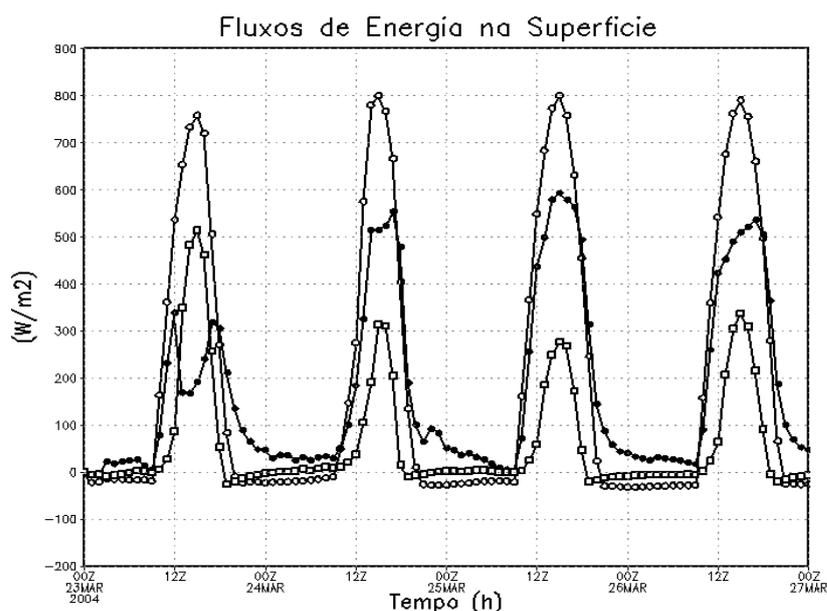


Figura 23 – Fluxos de energia na superfície (W/m^2) para o experimento ECR2KC, ao longo das 96 horas de integração do modelo. Saldo de radiação (círculo aberto), fluxo de calor sensível (quadrado aberto), fluxo de calor latente (círculo fechado).

4.2.1.2. Análise sobre uma área no oceano (ECR2KO)

A tendência de temperatura para o oceano devido à convecção rasa no experimento ECR2KO, ao longo das 96 horas de integração do modelo, é mostrada na Figura 24. Nessa figura é possível observar regiões de aquecimento máximo por volta dos 700 m, com destaque para os núcleos formados no primeiro e no terceiro dia. No primeiro dia as regiões de máximo resfriamento foram obtidas aos 1200 m, cerca de 100 m abaixo do nível em que essas regiões foram encontradas no experimento ECR2GO. No primeiro dia as regiões de máximo aquecimento e resfriamento ocorrem aproximadamente as 3 UTC, ou seja, por volta da 00 HL. No entanto, como no experimento ECR2GO, aqui também não houve a formação de ciclos diurnos bem definidos durante os quatro dias de simulação.

Na Figura 25 tem-se a tendência de umidade para a área do oceano no experimento ECR2KO. Observa-se pela Figura 25 que tanto as regiões de umedecimento máximo como as de secagem máxima ocorrem em níveis mais abaixo do que as regiões de máximo aquecimento e resfriamento, vistas na Figura 24. Observa-se ainda, que para cada dia de simulação há uma região de secagem bem definida próximo dos 600 m, enquanto que as regiões de umedecimento são mais bem visualizadas nos dias 23 e 25.

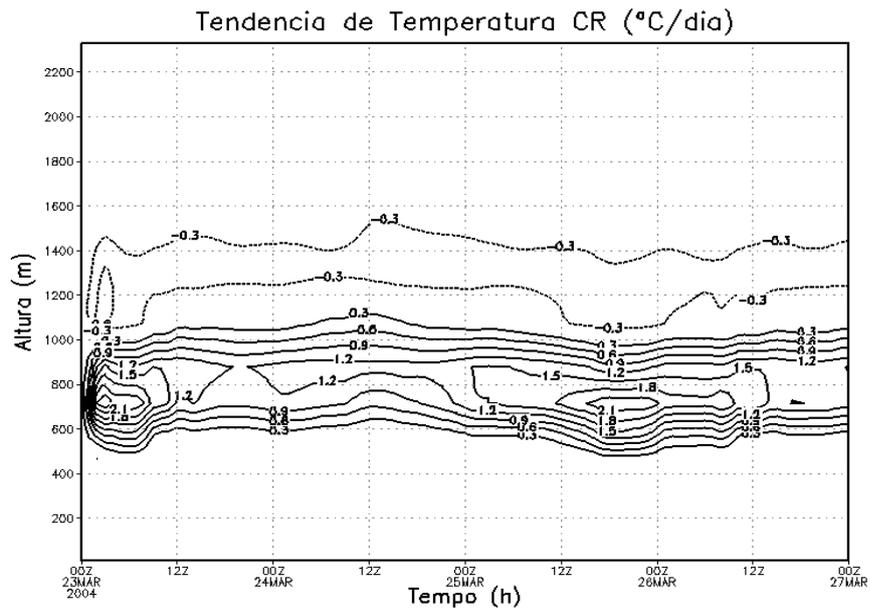


Figura 24 – Tendência de temperatura ($^{\circ}\text{C}/\text{dia}$) devido à convecção rasa para o experimento ECR2KO, ao longo das 96 horas de integração do modelo.

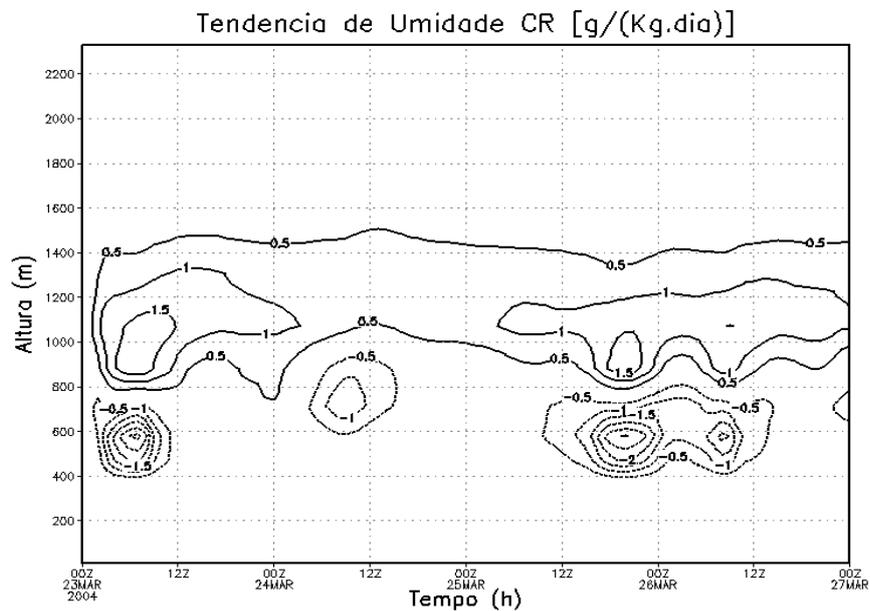


Figura 25 – Tendência de umidade [$\text{g}/(\text{kg}.\text{dia})$] devido à convecção rasa para o experimento ECR2KO, ao longo das 96 horas de integração do modelo.

A precipitação convectiva acumulada para este experimento, mostrada na Figura 26, tem início após as 9 HL do primeiro dia. Essa quantidade sofre uma pequena desaceleração

em seu crescimento entre a 00 HL e as 15 HL do dia 25 quando volta a crescer, chegando aos 8 mm no último dia. Note que esse valor é bem menor que o encontrado no experimento ECR2GO para o mesmo.

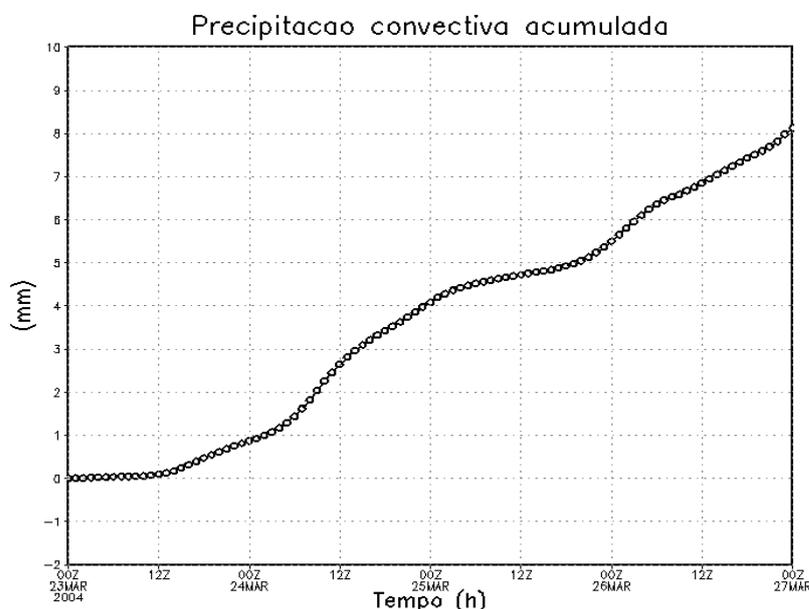


Figura 26 – Precipitação convectiva acumulada (mm) para o experimento ECR2KO, ao longo das 96 horas de integração do modelo.

Os fluxos de energia na superfície para o experimento ECR2KO são mostrados na Figura 27. Os valores do saldo de radiação (círculo aberto), para todo período de integração do modelo, estão acima dos 900 W/m^2 . O valor máximo, próximo dos 980 W/m^2 , foi obtido ao meio dia local do primeiro dia de simulação, sendo este um pouco maior que o máximo obtido no experimento ECR2GO. Já o valor mínimo, obtido no segundo dia, foi de cerca de 950 W/m^2 .

O fluxo de calor sensível (quadrado aberto) apresenta comportamento quase constante, com uma variação extremamente pequena entre seus valores máximo e mínimo. De forma geral, os resultados obtidos aqui para o fluxo de calor sensível foram semelhantes aos encontrados no experimento ECR2GO. Quanto ao fluxo de calor latente (círculo fechado) observa-se, ainda pela Figura 27, que este obteve um valor máximo em torno de 125 W/m^2 por volta das 10 HL do segundo dia. O valor mínimo foi encontrado no terceiro dia. O mesmo foi observado no experimento ECR2GO (Figura 9).

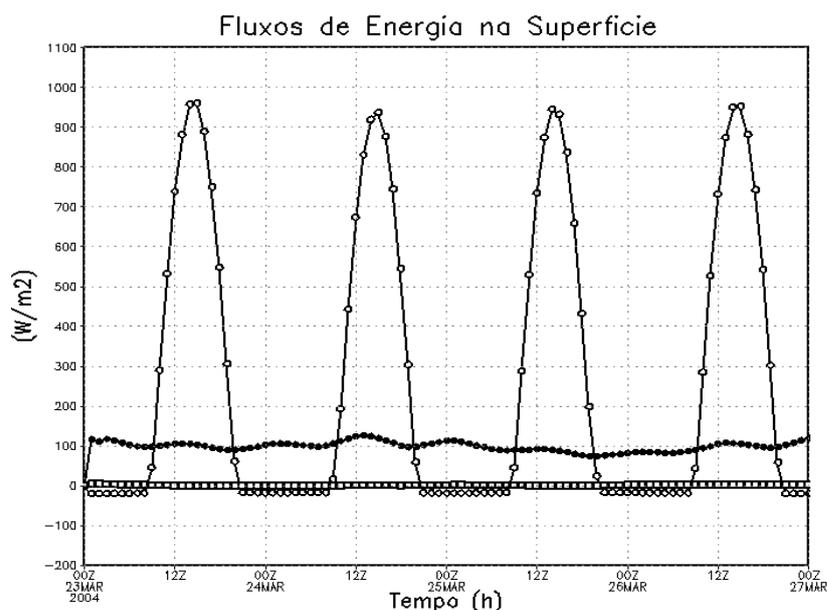


Figura 27 – Fluxos de energia na superfície (W/m^2) para o experimento ECR2KO, ao longo das 96 horas de integração do modelo. Saldo de radiação (círculo aberto), fluxo de calor sensível (quadrado aberto), fluxo de calor latente (círculo fechado).

4.2.2. Caso IV: Experimento com resolução de grade de 50 km (ECR5K)

Nesse experimento o modelo é integrado com todas as condições iniciais de temperatura e umidade usadas nos experimentos anteriores. Porém, neste caso, o modelo foi rodado usando a nova parametrização de convecção rasa associada à parametrização de convecção profunda do tipo Kuo, sendo a resolução de grade utilizada de 50 km.

A precipitação acumulada para esse experimento obteve resultados, em todos os aspectos, bastante semelhantes aos encontrados para o experimento ECR2K mostrado na Figura 19. Por este motivo e para não tornar a leitura deste trabalho enfadonha, optou-se por não mostrá-la aqui.

4.2.2.1. Análise sobre uma área no continente (ECR5KC)

Na Figura 28 é mostrada a tendência de temperatura devido à convecção rasa para o experimento ECR5KC. Verifica-se nessa figura que as regiões de aquecimento e resfriamento são encontradas em níveis mais baixos se comparadas àquelas encontradas nos experimentos ECR2GC e ECR5GC. Para esse experimento as regiões de aquecimento máximo ocorrem em

torno dos 200 m nos dois primeiros dias de simulação e um pouco mais abaixo no terceiro dia. Assim como no experimento ECR2KC, no último dia da simulação não é visualizada nenhuma região de aquecimento. As regiões de máximo resfriamento ocorrem por volta dos 600 m nos três primeiros dias de simulação. No último dia essa região é observada em torno dos 900 m. De forma geral, o segundo dia é o mais significativo por apresentar ciclos distintos tanto para regiões de aquecimento como de resfriamento com valores máximos ocorrendo por volta das 5 HL.

Na Figura 29 tem-se a tendência de umidade para o experimento ECR5KC. Nota-se que para os dois primeiros dias as regiões de máximo umedecimento ocorrem abaixo dos 200 m e as de máxima secagem ocorrem próximas dos 350 m. No terceiro dia as regiões de umedecimento e secagem são observadas em níveis mais altos. No último dia verifica-se apenas uma região de secagem por volta dos 500 m, e uma pequena região de umedecimento logo acima. Esse mesmo padrão é observado na Figura 21. Além disso, aqui também não há simetria entre os campos de temperatura e umidade.

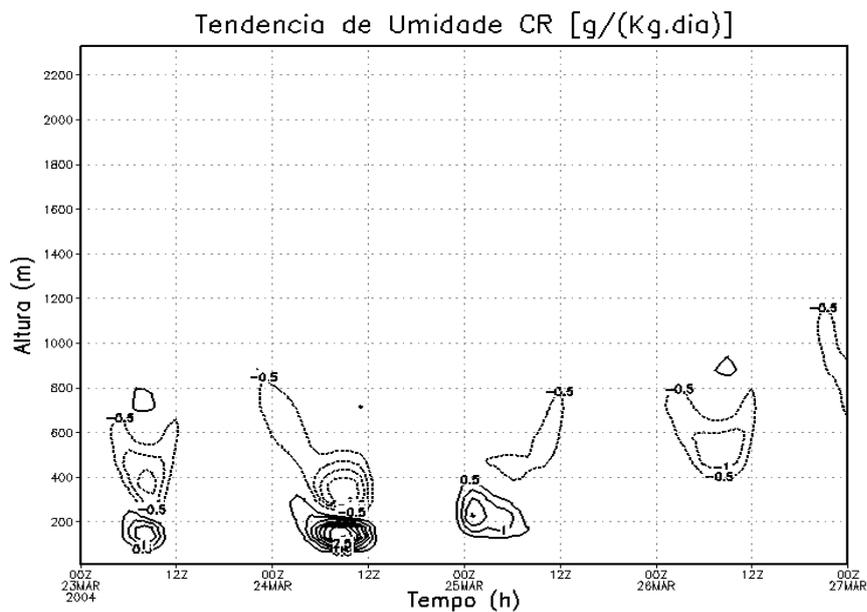


Figura 28 – Tendência de temperatura ($^{\circ}\text{C}/\text{dia}$) devido à convecção rasa para o experimento ECR5KC, ao longo das 96 horas de integração do modelo.

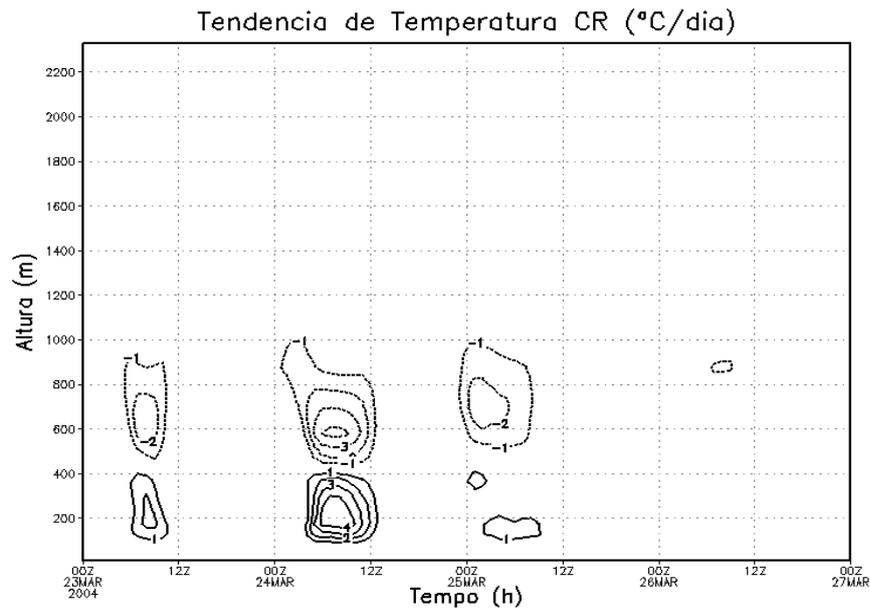


Figura 29 – Tendência de umidade [g/(kg.dia)] devido à convecção rasa para o experimento ECR5KC, ao longo das 96 horas de integração do modelo.

A precipitação convectiva acumulada para o experimento ECR5KC, visualizada na Figura 30, tem início por volta das 3 UTC do primeiro dia. Verifica-se pela Figura 30, um aumento de cerca de 6 mm entre as 14 HL e as 21 HL do segundo dia. Durante toda a simulação esses valores continuam crescendo e chegam a pouco mais de 40 mm a 00 UTC (~ 21 HL) do último dia.

A diferença entre os valores acumulados no último dia de simulação é pequena em relação ao encontrado no experimento ECR2KC (40 mm). No entanto, se comparado ao valor encontrado no experimento ECR5GC (~3,7 mm), a diferença é bastante grande. Com isso, percebe-se a sensibilidade do esquema quanto ao tipo de parametrização de convecção profunda usada.

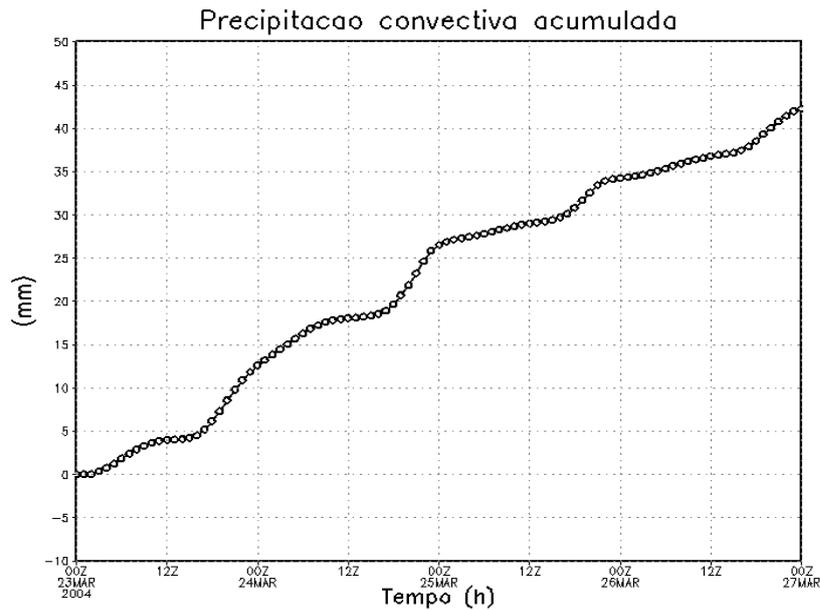


Figura 30 – Precipitação convectiva acumulada (mm) para o experimento ECR5KC, ao longo das 96 horas de integração do modelo.

O saldo de radiação, o fluxo de calor sensível e o fluxo de calor latente na superfície para o experimento ECR5KC são visualizados na Figura 31. Nessa figura vê-se que o saldo de radiação (círculo aberto), ao longo dos quatro dias de simulação, apresentou picos superiores a 750 W/m^2 , todos por volta do meio dia local. No entanto o maior valor obtido neste experimento é algo em torno dos 800 W/m^2 , visualizado no dia 24. Os valores de saldo de radiação para este experimento são muito próximos aos encontrados no experimento ECR2KC.

Como observado no experimento ECR2KC, o fluxo de calor sensível (quadrado aberto) atinge seu máximo, cerca de 500 W/m^2 , por volta das 12 HL do dia 23. O valor mínimo, pouco menos de 300 W/m^2 , é obtido no terceiro dia de simulação, coincidindo com o encontrado no experimento ECR2KC. O fluxo de calor latente (círculo fechado) obteve valor mínimo no primeiro dia de simulação e máximo, próximo dos 600 W/m^2 , ao meio dia local do dia 25. Neste caso também, os valores encontrados coincidem com os obtidos no experimento ECR2KC.

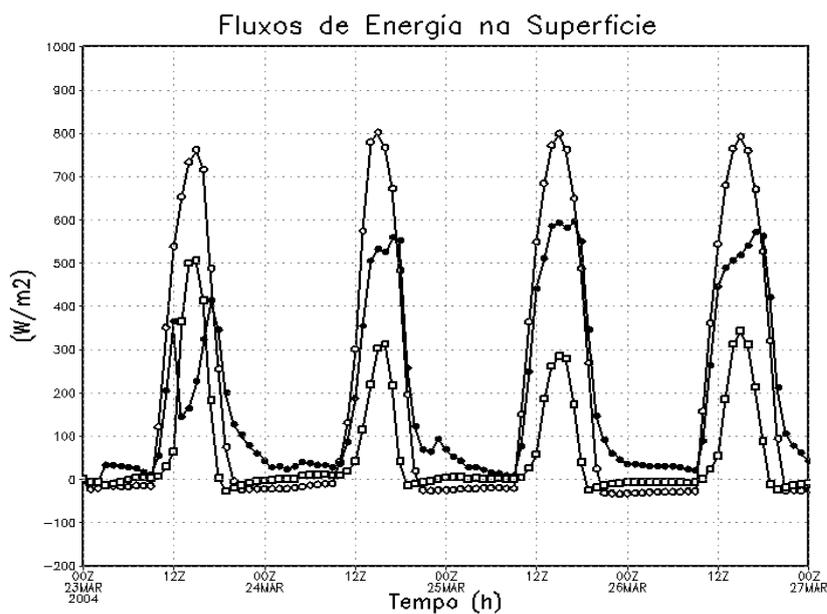


Figura 31 – Fluxos de energia na superfície (W/m^2) para o experimento ECR5KC, ao longo das 96 horas de integração do modelo. Saldo de radiação (círculo aberto), fluxo de calor sensível (quadrado aberto), fluxo de calor latente (círculo fechado).

4.2.2.2. Análise sobre uma área no oceano (ECR5KO)

Na Figura 32 tem-se a tendência de temperatura para o experimento ECR5KO. Esta por sua vez, não é muito diferente daquela encontrada no experimento ECR2KO, tendo em vista que as regiões de aquecimento máximo também são encontradas em torno dos 700 m, com ciclos bem definidos formados por volta da 00 HL e das 17 HL do primeiro e do terceiro dia, respectivamente. As regiões de máximo resfriamento foram obtidas acima dos 1000 m, apresentando-se menos intensas que as de aquecimento. Os resultados no caso da tendência de temperatura para o oceano em comparação ao continente, são menos sensíveis a resolução e ao tipo de parametrização profunda usada.

A tendência de umidade para o experimento ECR5KO é visualizada na Figura 33. Comprando as Figura 25 e a Figura 33, vê-se que as regiões de umedecimento assim como as de secagem são encontradas em torno dos mesmos níveis de altura. As regiões de secagem apresentam ciclos diurnos consistentes, pelo menos nos três primeiros dias de simulação. Note-se que a região de secagem no primeiro dia, entre 400 m e 600 m, pode ser encontrada em todos os experimentos analisados sobre o oceano com alguma pequena variação de altura de experimento para experimento (ECR2GO, ECR5GO, ECR2KO e ECR5KO).

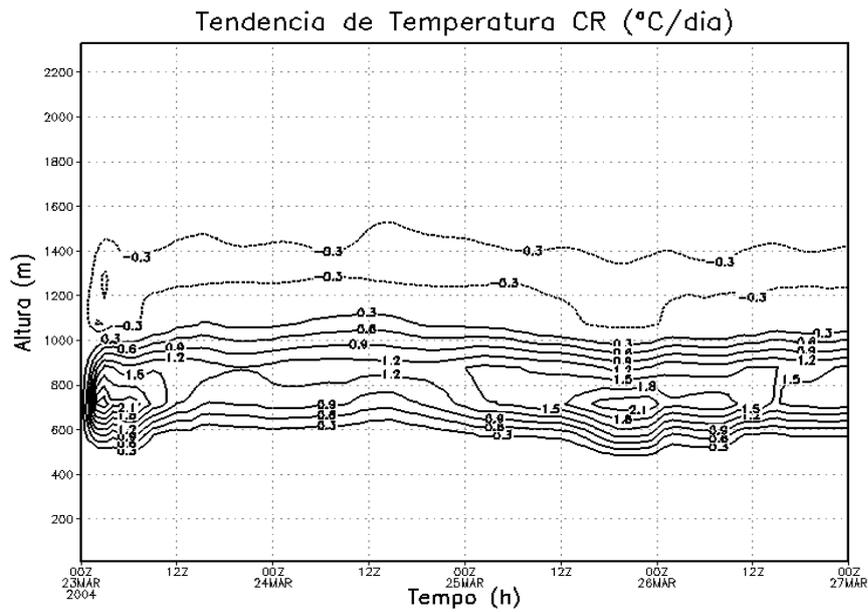


Figura 32 – Tendência de temperatura ($^{\circ}\text{C}/\text{dia}$) devido à convecção rasa para o experimento ECR5KO, ao longo das 96 horas de integração do modelo.

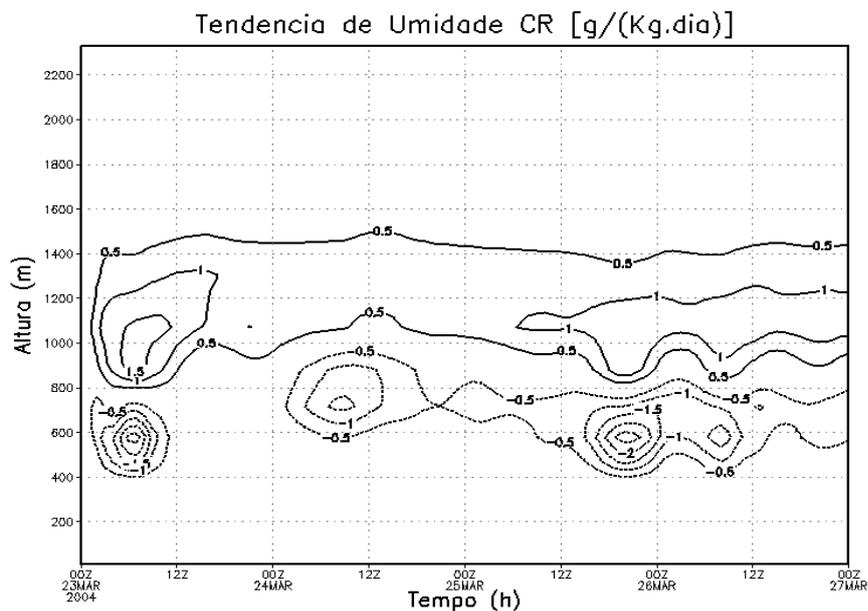


Figura 33 – Tendência de umidade [$\text{g}/(\text{kg}.\text{dia})$] devido à convecção rasa para o experimento ECR5KO, ao longo das 96 horas de integração do modelo.

Na Figura 34 é observada a precipitação convectiva acumulada para este experimento. A precipitação convectiva acumulada devida à convecção rasa para este experimento

comporta-se de forma semelhante aquela encontrada no experimento ECR2KO. A diferença entre elas encontra-se na taxa de crescimento, uma vez que neste experimento essa taxa é um pouco maior do que no experimento ECR2KO, como pode ser comprovado ao comparar-se o total acumulado ao final da simulação para cada experimento. Assim enquanto neste experimento o valor para o último dia é de 10,5 mm, para o experimento ECR2KO foi 8 mm.

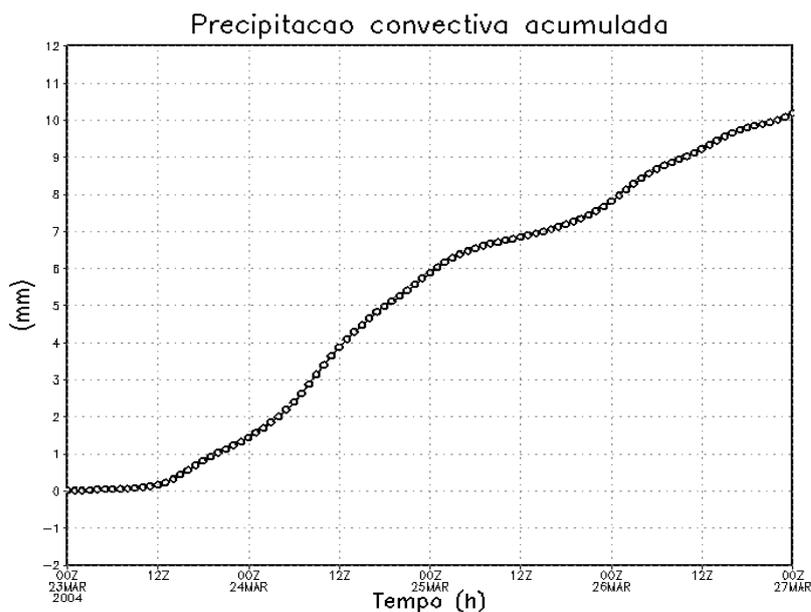


Figura 34 – Precipitação convectiva acumulada (mm) para o experimento ECR5KO, ao longo das 96 horas de integração do modelo.

A Figura 35 traz os fluxos de energia na superfície para o experimento ECR5KO. Os valores do saldo de radiação (círculo aberto) estão acima dos 900 W/m^2 , exceto para o segundo dia que, assim como no experimento ECR2KO, apresentou valor mínimo de saldo de radiação. Quando se compara os resultados obtidos nos experimentos com a parametrização de Kuo e com a de Grell, os valores encontrados com a parametrização de Grell tendem a diminuir com o passar das horas de forma mais acentuada que no esquema de Kuo.

O comportamento do fluxo de calor sensível (quadrado aberto) observado na Figura 35, assim como o observado no experimento ECR2KO, é semelhante ao comportamento encontrado nos experimentos realizados anteriormente para o oceano com a parametrização de Grell.

O fluxo de calor latente (círculo fechado) para o experimento ECR5KO também é mostrado na Figura 35. Este por sua vez, obteve um valor máximo de cerca de 130 W/m^2 por

volta das 10 HL do dia 24, e o mínimo no terceiro dia de simulação. Os valores do fluxo de calor latente e seus respectivos horários de ocorrência, estão muito próximos dos encontrados no experimento ECR2KO e ECR5GO.

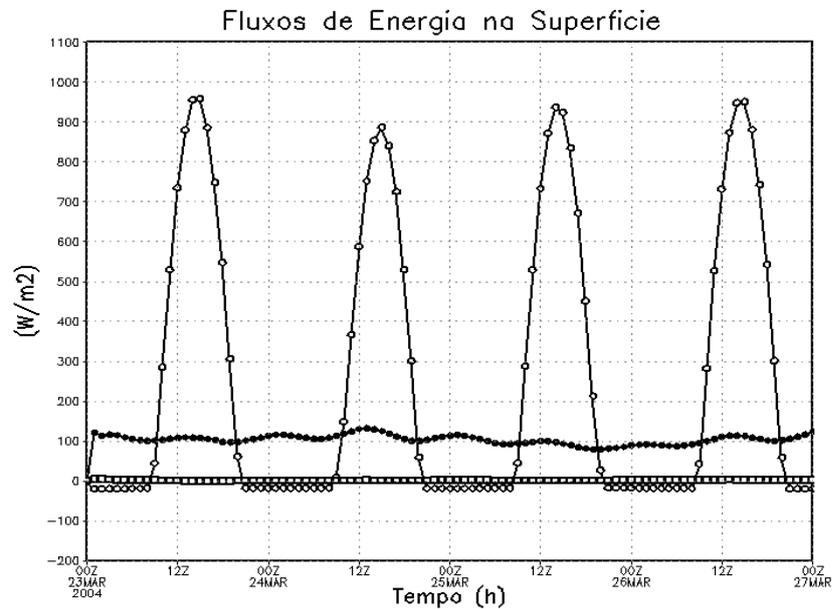


Figura 35 – Fluxos de energia na superfície (W/m^2) para o experimento ECR5KO, ao longo das 96 horas de integração do modelo. Saldo de radiação (círculo aberto), fluxo de calor sensível (quadrado aberto), fluxo de calor latente (círculo fechado).

Na Tabela 3 são mostrados os valores médios dos parâmetros característicos encontrados nos experimentos realizados quando o modelo é integrado com a nova parametrização ativada em associação a parametrização de convecção do tipo Kuo.

Tabela 3 – Resumo dos valores médios dos parâmetros característicos encontrados nos experimentos realizados com Kuo

Parâmetros		Experimentos com Kuo			
		Análise sobre o continente		Análise sobre o Oceano	
		ECR2KC	ECR5KC	ECR2KO	ECR5KO
Tendência de Temperatura		-----	-----	-----	-----
Altura de ocorrência (m)	Aquecimento máximo	200	200	700	700
	Resfriamento máximo	700	600	1.200	1.300
Tendência de Umidade		-----	-----	-----	-----
Altura de ocorrência (m)	Umedecimento máximo	200	150	1.100	1.100
	Secagem máxima	500	400	600	600
PCA no último dia (mm)		40	~43	~8	~10,5
Saldo de Radiação Máximo (W/m^2)		800	800	980	960
Fluxo de Calor Sensível Máximo (W/m^2)		500	~500	~constante	~constante
Fluxo de Calor Latente Máximo (W/m^2)		600	600	125	130

Os resultados obtidos neste trabalho sugerem que a convecção rasa noturna influencia diretamente os processos atmosféricos, e por isso deve fazer parte dos mecanismos a constar nos modelos de mesoescala. No entanto, é conveniente ter-se cautela em relação ao tipo de parametrização de convecção profunda e a resolução de grade usadas em associação a este esquema tendo em vista que, para alguns parâmetros analisados, os resultados mostraram uma grande sensibilidade de experimento para experimento.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSÕES

Esse estudo teve como objetivo principal a implementação, no modelo BRAMS versão 4.2, de um esquema de parametrização de convecção rasa proposta por Tiedke et al. (1988). O modelo foi integrado para uma área que engloba o Nordeste e parte do Atlântico. Os experimentos realizados tiveram o propósito de investigar o impacto da convecção rasa sobre as tendências de temperatura e umidade para o Nordeste Brasileiro.

As principais conclusões desse estudo foram:

A implementação do novo esquema de parametrização de convecção rasa no Modelo BRAMS gerou nuvens que atuam no período noturno (principalmente sobre o continente), tornando possível a representação dos efeitos da convecção rasa noturna no modelo.

O impacto da convecção rasa noturna sobre as tendências de temperatura e de umidade foi mais significativo nos três primeiros dias de simulação, tendo em vista que nesses dias foram encontrados ciclos diurnos bem definidos com valores simétricos, em termos de sinal, ocorrendo em média acima da base das nuvens cúmulos para os experimentos ECR2GC e ECR5GC.

Os resultados obtidos nos experimentos realizados com a parametrização profunda do tipo Kuo, analisados sobre o continente (ECR2KC e ECR5KC), mostraram ciclos de tendência de temperatura e de umidade formados em níveis muito baixo comparados aos encontrados nos experimentos realizados com a parametrização profunda do tipo Grell (ECR2GC e ECR5GC). Embora durante a noite a base das nuvens cúmulos seja observada em níveis mais baixos que durante o dia, os valores encontrados nestes experimentos não foram condizentes com a realidade.

Sobre o oceano as simulações mostraram padrões muito parecidos de tendência de temperatura, independente da resolução de grade usada e do tipo de parametrização de convecção profunda. Quanto à tendência de umidade, apesar da semelhança de padrões, os resultados obtidos nos experimentos com a parametrização de Kuo apresentaram regiões de secagem mais bem definidas que os experimentos realizados com a parametrização de Grell. Isto foi observado tanto para experimentos com resolução de 20 km como para os realizados com resolução de 50 km.

Os resultados da precipitação convectiva acumulada sobre o continente nos experimentos ECR2GC e ECR5GC revelam a sensibilidade do esquema à resolução de grade, apesar da semelhança na forma como estes são dispostos. Os valores obtidos nos experimentos ECR2KC e ECR5KC são muito elevados em relação aos obtidos nos experimentos ECR2GC e ECR5GC, chegando a ser três vezes maior no final da simulação.

Sobre o oceano acontece o contrário, os valores de precipitação acumulada para os experimentos ECR2GO e ECR5GO, cerca de 20 vezes maior que os valores obtidos nos experimentos ECR2KO e ECR5KO. No geral, os padrões de precipitação convectiva acumulada são muito distintos de experimento para experimento, levando em consideração o tipo de parametrização com que o modelo foi integrado.

De forma geral, os experimentos realizados com a parametrização do tipo Kuo apresentaram resultados bem diferentes daqueles encontrados nos experimentos realizados com a parametrização do tipo Grell, ou seja, o impacto da convecção rasa noturna sobre os parâmetros analisados, foi mais expressivo quando o modelo foi integrado com a parametrização de convecção profunda do tipo Grell. Quanto à resolução de grade, os resultados foram semelhantes para os experimentos realizados com o mesmo esquema de parametrização de convecção profunda, mostrando que o comportamento da parametrização é pouco sensível, no intervalo de 20 a 50 km.

5.1 - Sugestões

A implementação desse esquema de parametrização de convecção rasa no BRAMS cria novas possibilidades de melhorias nas previsões e simulações de tempo e clima. Desta forma, são deixadas aqui algumas questões que surgiram ao longo deste trabalho e servem como sugestões para trabalhos futuros.

Novos experimentos poderão ser realizados com condições iniciais diferentes das utilizadas aqui, a fim de se testar o desempenho do modelo. Outra sugestão é que, a sensibilidade do novo esquema seja testada para outros parâmetros, além disso, recomendam-se também testes de sensibilidade num período.

Por fim, seria interessante investigar a possibilidade de esse esquema passar a ser integrado no modelo juntamente com o esquema desenvolvido por Souza (1999) de forma que nas simulações os dois fossem rodados simultaneamente, tornando assim o modelo mais realista.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBRECHT, B.A., RAMANATHAN, V., BOVILLE, B.A. The effects of cumulus moisture transports on the simulation of climate with a general circulation model. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 43, p. 2443-2462. 1986.

ALONSO, M.F. **Estudo da eficiência das Parametrizações Convectivas na simulação de eventos severos ocorridos no Brasil, utilizando o BRAMS**. 162 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2006.

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, p. 674-701, 1974.

BETTS, A.K. Non-precipitating cumulus convection and its parameterization. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 99, p. 178-196, 1973.

BETTS, A.K. Parametric interaction of trade-winde cumulus budget studies. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 32, p. 1934-1945, 1975.

BETTS, A.K. A new convective adjustment scheme. Part I: Observational and theoretical basis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 112, p. 677-691, 1986.

BETTS, A.K., MILLER, M.J. A new convective adjustment scheme. Part II: Single column test using GATE wave, BOMEX, ATEX and arctic air mass data set. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 112, p. 693-709, 1986.

BRETHERTON, C.S., McCAA, J.R., GRENIER, H. A new parameterization for shallow cumulus convection and its application to marine subtropical cloud-topped boundary layers. Part I: Description and 1D results. **Monthly Weather Review**, v. 132, nº 4, p. 864-882, 2004.

CAVALCANTI, E.P. **Teor e transporte de vapor d'água na atmosfera do Nordeste do Brasil**. 112 f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 2001.

CHARNEY, J.G., ELIASSEN, A. On the growth of the hurricane depression. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 21 (1), p. 68-75, 1964.

CHEN, F., COTTON, W.R. A one-dimension simulation of the stratocumulus capped mixed layer. **Boundary- Layer Meteorology**, v. 25, p. 289-321, 1983.

CHO, H.R., 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(8), p. 2058-2065, 1974.

COTTON, W.R., ANTHES, R.A. **Storm and cloud dynamics**. 883 f. Academic Press. Inc., San Diego, 1989.

CENTRO DE PESQUISAS ESPACIAIS. First Time User Guide, Version 5, March/2007. BRAMS Version 4.0: History of BRAMS. Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br/brams/brams3.2/index.shtml>>. Acesso: 08 out. 2007.

DEB, S.K., UPADHYAYA, H.C., SHARMA, O.P., GRANDPEIX, J.Y. Sensitivity of Indian Monsoon to Entrainment and Detrainment in Mass Flux Schemes. **Pure and Applied Geophysics**, v.164, p. 1667-1681, 2007.

DENG, A., SEAMAN, N.L., KAIN, J.S. A Shallow-Convection Parameterization for Mesoscale Models. Part II: Verification and Sensitivity Studies. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 60, p. 57-78, 2003.

EMANUEL, K.A., ROTHMAN, M.Z. Development and evaluation of a convective scheme for use in climate models. **Journal Atmospheric Sciences**, v. 56, p. 1766–1782. 1999.

FRIERSON, D.M.W. The Dynamics of Idealized Convection Schemes and Their Effect on the Zonally Averaged Tropical Circulation. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 64, nº 6, p. 1959-1976, 2007.

GRELL, G.A. Prognostic Evaluation of Assumptions used by Cumulus Parameterization. **Monthly Weather Review**, v. 121, p. 1164-1178, 1993.

GRELL, G.A., DEVENYI, D. A new approach to parameterizing convection using ensemble and data assimilation techniques. **Geophysical Research Letters**. v. 29, 1693, 2002.

HADEN, T. Generalization of Albrecht's cumulus cloud amount parameterization. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 53, p.3164-3167, 1996.

JONKER, H.J.J., HEUS, T., SULLIVAN, P.P. A refined view of vertical mass transport by cumulus convection. **Geophysical Research Letters**. v. 35, nº 7, L07810, 2008. Disponível em: <<http://www.agu.org/pubs/crossref/2008/2007GL032606.shtml>>. Acesso: 15 out. 2008.

KUO, H.L. On formation and intensification of tropical cyclones through latent heat convection on large-scale flow. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 22, p. 40-63, 1965.

KUO, H.L. Further studies of the parameterization of the influence of cumulus convection on large-scale flow. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 31, p. 1232-1240, 1974.

LAMONTAGNE, R.G, TELFORD, J.W. Cloud top mixing in small cumuli. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 40, p. 2148-2156, 1983.

LI, L.J., WANG, B., WANG, Y., WAN, H. Improvements in climate simulation with modifications to the Tiedtke convective parameterization in the grid-point atmospheric model of IAP LASG (GAMIL). **Advances in Atmospheric Sciences**, v. 24, nº 2, p. 323-335, 2007.

LOPES, Z.F. **Estudo numérico da interação entre convecção rasa e radiação com ênfase no ciclo diurno do balanço de energia à superfície**. 82 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2005.

MANABE, S., SMAGORINSKY, J., STRICKLER, R.F. Simulated climatology of a general circulation model with a hydrologic cycle. **Monthly Weather Review**, v. 93 (12): p. 769-798, 1965.

MARK, Z.J. Cloud Thermodynamics and Dynamics. In: _____ **Fundamentals of atmospheric modeling**. Cambridge University Press, p. 227-244, 1999.

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

MINNIS, P., HARRISON, E.F. Diurnal variability of regional cloud and clear-sky radiative parameters derived from GOES data. Part II: November 1978 cloud distribution. **Journal Climate and Applied Meteorology**, v. 23, p. 1012- 1031, 1984.

MOLINARI, J. A general form of Kuo's cumulus parameterization. **Monthly Weather Review**, v. 113, p. 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, p. 485-501, 1985.

PALUCH, I.R. The entrainment mechanism in Colorado cumuli. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 36, p. 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. **Meteorological and Atmospheric Physical**, v.49, p. 69-91, 1992.

PIRIOU, J., M., REDELSPERGER, J.L., GELEYN, J.F., LAFORE, J.P., GUICHARD, F. An approach for convective parameterization with memory: Separating microphysics and transport in grid-scale equations. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 64, n° 11, p.4127-4139, 2007.

RENNÓ, N.O., INGERSSOL, A.P. Natural convection as a heat engine: A theory for CAPE. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 53, p. 572-585, 1996.

ROOY, W.C., SIEBESMA, A.P. A Simple Parameterization for Detrainment in Shallow Cumulus. **Monthly Weather Review**, v. 136, n° 2, p. 560-576, 2008.

SAMPAIO, G. Clima e Modelos de Previsão Climática. XXVIII SEMAGEo - UFSC – Florianópolis, Maio-2007. Disponível em: <<http://www.cfh.ufsc.br/~laam/palestra/09.pdf>>. Acesso: 5 jun. 2008.

SIEBESMA, A.P., CUIJPERS, J.W. M. Evaluation of parametric assumptions for shallow cumulus convection. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 52, n° 6, p. 650-666, 1995.

SIEBESMA, A.P., HOLTSLAG, A.A. Model Impacts of Entrainment and Detrainment Rates in Shallow Cumulus Convection. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v.53, n° 16, p. 2354-2364, 1996.

SILVA, E.M. **Impacto da Convecção Rasa em um Modelo de Meso-Escala: Sensibilidade aos Parâmetros do Esquema de Parametrização**. 69 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 2001.

SOONG, S.T., ONGURA, Y. Response of tradewinde cumuli to large-scale processes. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 37, p. 2035-2050, 1980.

SOUZA ECHER, M.P.D., MARTINS, F.R., PEREIRA, E.B. A importância dos dados de cobertura de nuvens e de sua variabilidade: Metodologias para aquisição de dados; **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 28, nº 3, p. 341-352, 2006.

SOUZA, E.P. **Experimentos com parametrizações de cúmulos utilizando um modelo unidimensional**. 113 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, 1991.

SOUZA, E.P. **Estudos teóricos e numéricos da relação entre convecção e superfície heterogêneas na região Amazônica**. 121 f. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Universidade de São Paulo, 1999.

SOUZA, E.P., RENNÓ, N.O., DIAS, M.A.F. Convective circulations induced by superface heterogeneities. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 57, p. 2915-2922, 2000.

SOUZA, E. P., SILVA, E. M. Impacto da implementação de uma parametrização de convecção rasa em um modelo de meso escala. Descrição e testes de sensibilidade do esquema. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 18, nº 1, p. 33-42, 2002.

SQUIRES, P. Penetrative downdraughts in cumuli. **Tellus**, v. 10, p. 381-389, 1958.

STEVEN, B. On the Growth of Layers of Nonprecipitating Cumulus Convection. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 64, nº 8, p. 2916-2931, 2007.

SZOEKE, S.P., WANG, Y.Q., XIE, S.P., MIYAMA, T. Effect of shallow cumulus convection on the eastern Pacific climate in a coupled model. **Geophysical Research Letters**, v. 33, nº 17, L17713. 2006.

TIEDKE, M. The sensivity of the time-mean large-scale flow to cumulus in the ECMWF model. **In**: Workshop on convection in large-scale numerical models, Reading, UK, 28 Nov-01 Dec, 1993. Reading, ECMWF, p. 297-316, 1984.

TIEDTKE, M., HECKLEY, W. A., SLINGO, J. Tropical forecasting at ECMWF: On the influence of physical parameterization on the mean structure of forecasts and analyses. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 114, p. 639-664, 1988.

TIEDTKE, M. A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in largerscale model. **Montly Wearther Review**, v.117, p. 1779-1800, 1989.

VON SALZEN, K., MCFARLANE, N.A., LAZARE, M. The role of shallow convection in the water and energy cycles of the atmosphere. **Climate Dynamics**, vol. 25, no7-8, p. 671-688, 2005.

WALKO, R.L., COTTON, W.R., MEYERS, M.P., HARRINGTON, J.Y. New RAMS cloud microphysics parameterization part I: The single-moment scheme. **Atmospheric Research**, v. 38 (14), p. 29-62, 1995.

WANG, H., MCFARQUHAR, G.M. Large-eddy simulations of the diurnal cycle of shallow convection and cloudiness over the tropical Indian Ocean. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.134, n° 632, p. 643-661, 2008.

WILDE, N.P., STULL, R.B., ELORANTA, E.W. The LCL zone and cumulus onset. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, v. 24, p. 640-657, 1984.

YANAI, M., ESBENSEN, 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, p. 611-627, 1973.