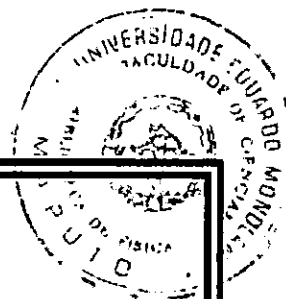


FIS 66



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

FACULDADE DE CIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

Trabalho de Licenciatura

**ESTUDO DO CICLONE TROPICAL ELINE DE FEVEREIRO
DE 2000 UTILIZANDO O MODELO OPERACIONAL E DE
INVESTIGAÇÃO MM5**

Autor: Hipólito da Costa Cardoso

Supervisor: Manuel S. V. F. Pondeca, Ph. D.

Maputo, Outubro de 2003

ESTUDO DO CICLONE ELINE DE
FEVEREIRO DE 2000 UTILIZANDO O
MODELO OPERACIONAL E DE
INVESTIGAÇÃO MM5

HIPÓLITO DA COSTA CARDOSO

7 de Outubro de 2003

Declaração de honra

Declaro que este trabalho é resultado da minha própria investigação, que não foi submetido para outro grau que não seja o indicado - Licenciatura em Meteorologia, da Universidade Eduardo Mondlane.

As ideias originais nele expressas são da inteira responsabilidade do autor.

O Autor

.....
(Hipólito da Costa Cardoso)

Aos meus pais
Domingos e Deolinda

Agradecimento

As palavras não são suficientes para exprimir a minha gratidão a todos aqueles que directa ou indirectamente contribuíram para a existência deste trabalho e pelo sucesso dos meus estudos.

Gostaria de deixar expressa a minha gratidão à essas pessoas, em particular:

- Ao meu supervisor, **Manuel Pondeca, PhD.**, pela orientação científica, dedicação e disposição durante a realização deste trabalho.
- Ao corpo docente do Departamento de Física, em especial ao dr. Queface, Dr. Mavume, Dr. Hogueane, Dr. Rogério Utui, dr. Genito, Dr. Burdeyn, Dr. Rakov, Dr. Maphossa, Dr. Chernych, dr. Saíde pelos conhecimentos transmitidos durante o curso.
- A todos os trabalhadores deste Departamento pela gentileza e colaboração prestada ao longo destes anos de curso.
- Ao Director do INAM, Dr. Lúcio e, por seu intermédio, a todos os funcionários desta Intituição pelo apoio prestado durante o curso.
- Ao dr. Mustafa e a toda equipa técnica do INAM pela colaboração e apoio.
- A todos amigos e colegas do curso, em particular, ao Duvane, Sawanguane, Cláudio Paulo, Iacamurima, Jamal, Luis, Anela, Maparagem, Rego, Zucule, dr. Cháile, dr. Buque, pelo apoio moral prestado durante o curso.

- Ao colega e amigo R. Brito pela colaboração na realização deste trabalho.
- Aos meus pais, Domingos e Deolinda, e aos meus irmãos Olária, Nicolau, Arsénio, Adeláide, Encarnação, Elda, Rúben, Célia, Catarina e Mercês pelo apoio moral e carinho demonstrados durante todos estes anos.

MUITO OBRIGADO!

Resumo

A previsão numérica é a integração das equações de movimento para o sistema atmosférico, como forma de prever o estado futuro da atmosfera. A complexidade e dimensão do problema implica o uso de computadores.

Neste trabalho, faz-se um estudo da sensibilidade do modelo quanto a sua resolução horizontal e, também, da parametrização dos processos físicos nele acoplados.

Para a revisão bibliográfica faz-se a abordagem geral dos ciclones e, também, estudos pormenorizados do MM5.

Foi realizada uma análise comparativa dos resultados obtidos pelo modelo com as observações fornecidas pelo INAM para os cinco dias de integração do modelo. Estes resultados são satisfatórios dado não existirem muitas diferenças.

Lista de símbolos usados

- ρ - Densidade do ar;
- ρ_0 - Densidade de referência do ar;
- γ - Capacidade molar a volume constante;
- P - Pressão total;
- \dot{Q} - Taxa de aquecimento diabático (radiação e calor latente);
- g - Aceleração de gravidade;
- D_θ - Termo associado ao fluxo de calor turbulento;
- T_0 - Temperatura de referência;
- θ_0 - Temperatura potencial;
- c_p - Capacidade molar a pressão constante;
- T - Temperatura;
- P^* - Diferença entre P_s e P_t ;
- P_s - Pressão do ar na superfície;
- R_d - Constantes dos gases para $1kg$ de ar seco;
- P_t - Pressão do ar no topo da atmosfera;
- P_0 - pressão de referência;
- σ - Sistema de coordenada vertical;
- $\dot{\sigma}$ - Velocidade vertical, $\dot{\sigma} = \frac{\partial \sigma}{\partial t}$;
- t - Tempo;
- u, v, w - Componentes zonal, meridional e vertical do vento (Momento),
respectivamente;
- f - Parâmetro vertical da força de Coriolis;
- e - Parâmetro horizontal da força de Coriolis;

D_u , D_v e D_w - São funções das flutuações da velocidade correspondente aos fluxos turbulentos de velocidade, e também, são factores de sub-escala rede nas componentes zonal, meridional e vertical, respectivamente;

Ω - Velocidade angular da terra;

P' - Pressão de perturbação do ar;

T' - Temperatura de perturbação do ar;

ρ' - Densidade de perturbação do ar;

ϕ_c - Longitude central;

λ - Latitude do lugar;

ϕ - Longitude;

α - Diferença entre a longitude e a longitude central;

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Objectivos	2
1.2	Metodologia	2
2	Teoria Geral sobre Ciclones	4
2.1	Ciclones Tropicais	4
2.2	Condições para ocorrência de um ciclone tropical	7
2.3	Ciclones Tropicais em Moçambique	8
2.4	Ciclone Tropical Eline	9
3	Modelo MM5	11
3.1	Breve Descrição do modelo	11
3.1.1	Terrain	12
3.1.2	Regrid	14
3.1.3	Little-r	14
3.1.4	Interpf	15
3.1.5	MM5	15
3.2	Coordenada Vertical σ	15
3.3	Modelo Não - hidrostático	17
3.4	Equações do Modelo	17
3.5	Opções Físicas do Modelo	20
3.5.1	Modelo de Parametrização Cumulus	21
3.5.2	Modelo da Camada Limite Planetária (PBL)	23
3.5.3	Modelo de Humidade Explícita	25

CONTEÚDO

ix

3.5.4	Modelo da Radiação	27
3.5.5	Esquema da Temperatura Superficial	28
4	Discussão dos Resultados	30
4.1	Simulação de Controle	31
4.2	Estudo das configurações usadas durante a simulação	31
4.2.1	Análise da configuração I	32
4.2.2	Análise da configuração II	37
4.2.3	Análise da configuração III	40
4.3	Comparação entre as configurações usadas na simulação	44
5	Conclusões e Recomendações	46
5.1	Conclusões	46
5.2	Recomendações	47
A	Cálculo de erros	i
B	Mapas diários da pressão ao nível do mar	ii
C	Mapas diários da precipitação e ventos à 925 hPa	vii
D	Mapas de campos de diferença da pressão ao nível do mar	ix
E	Mapas de campos de diferença da precipitação acumulada	xi
F	Mapas de campos de diferença da temperatura superficial	xiii
G	Mapas de campos de diferença da humidade relativa à 925 hPa	xv

Lista de Figuras

2.1	Constituição de um ciclone tropical	5
2.2	Trajectória do ciclone Eline	9
3.1	Esquema representativo do modelo MM5	13
3.2	Representação esquemática da coordenada sigma	16
3.3	Interacção entre as parametrizações no MM5	21
B.1	Pressão no dia 19 de Fevereiro de 2000	iii
B.2	Pressão no dia 21 de Fevereiro de 2000	iv
B.3	Pressão no dia 22 de Fevereiro de 2000	v
B.4	Pressão no dia 23 de Fevereiro de 2000	vi
C.1	Precipitação e ventos no dia 21 de Fevereiro de 2000	viii
D.1	Campos de diferença da Pressão	x
E.1	Campos de diferença da Precipitação	xii
F.1	Campos de diferença da Temperatura	xiv
G.1	Campos de diferença da humidade relativa	xvi

Lista de Tabelas

4.1	Definição da configuração I usada nas simulações.	32
4.2	Comparação dos resultados da Pressão (<i>hPa</i>)	34
4.3	Comparação dos resultados da Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	34
4.4	Comparação dos resultados da precipitação total (<i>mm</i>)	35
4.5	Comparação dos resultados da humidade relativa à 925 <i>hPa</i> (%)	35
4.6	Comparação dos resultados da magnitude do vento à 925 <i>hPa</i> (<i>m/s</i>)	36
4.7	Definição da configuração II usada nas simulações.	37
4.8	Comparação dos resultados da pressão (<i>hPa</i>)	38
4.9	Comparação dos resultados da temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	39
4.10	Comparação dos resultados da precipitação total (<i>mm</i>)	39
4.11	Comparação dos resultados da magnitude do vento à 925 <i>hPa</i> (<i>m/s</i>)	40
4.12	Comparação dos resultados da humidade relativa à 925 <i>hPa</i> (%)	40
4.13	Definição da configuração III usada nas simulações.	41
4.14	Comparação dos resultados da pressão (<i>hPa</i>)	42
4.15	Comparação dos resultados da temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	42
4.16	Comparação dos resultados da precipitação total (<i>mm</i>)	43
4.17	Comparação dos resultados da magnitude do vento à 925 <i>hPa</i> (<i>m/s</i>)	44

4.18 Comparação dos resultados da humidade relativa à 925 *hPa*
(%) 44

Capítulo 1

Introdução

A localização geográfica de Moçambique torna o nosso país susceptível ao impacto de calamidades naturais, como por exemplo, os ciclones e as cheias, cuja ocorrência é cíclica na nossa região.

Juntamente com as Maurícias, Madagáscar e Seychelles, entre outros, Moçambique está sujeito à influência de ciclones que anualmente se formam no Oceano Índico, entre os meses de Novembro e Abril. Estes ocorrem com mais frequência nos meses de Janeiro e Fevereiro, e afectam geralmente as zonas Centro e Norte do país (Mustafa, 2000, comunicação pessoal).

São exemplos dessas calamidades, o ciclone Demoína (Janeiro de 1984), Nádia (1994), Eline e Hudah (2000), o ciclone Delfina (2003) e Japhet (2003) que assolaram as regiões Norte, Centro e Sul do país.

De modo a mitigar os efeitos destes desastres naturais, surge a necessidade de se implementar um modelo operacional para a previsão numérica do tempo.

A primeira tentativa de previsão numérica do tempo foi feita em 1922 pelo cientista britânico, L. F. Richardson. Entretanto, viria a ser interrompida, tendo sido retomada após a segunda Guerra Mundial (1945), pois já existia uma rede melhorada de observações meteorológicas que providenciavam muitos dados para as condições iniciais, a par com o surgimento de computadores que resolviam enormes volumes de operações aritméticas requeridas

para uma previsão fiável.

As equações de Richardson incorporavam não só os movimentos meteorológicos importantes, como também incluíam ondas sonoras e gravitacionais de alta velocidade como solução. Estas ondas são geralmente na natureza muito grandes em amplitudes (Holton, 1997).

Em 1948, J. Charney, meteorologista americano, mostrou como as equações dinâmicas poderiam ser simplificadas, tendo introduzido sistematicamente as aproximações geostróficas e hidrostáticas e excluído as oscilações sonoras e gravitacionais.

O modelo usado neste trabalho é o modelo de mesoscala MM5. Este modelo foi desenvolvido, conjuntamente, pelo Pennsylvania State University e pela National Center for Atmospheric Research (NCAR) nos finais dos anos 70. O mesmo é validado e dá-nos bons resultados em diferentes situações (Dudhia, 1993). Actualmente é usado no NCAR para a investigação e previsão meteorológica a tempo quase real. É também usado para a investigação em muitas universidades, como por exemplo, a Universidade de Washington, a Universidade de Utah e a Universidade de Pennsylvania.

1.1 Objectivos

O presente trabalho tem como objectivos a validação do modelo numérico a partir da simulação do ciclone Eline. A ênfase deste trabalho consistirá no estudo da sensibilidade dos resultados do modelo quanto a:

- Parametrização dos processos físicos do modelo;

1.2 Metodologia

Para a realização deste trabalho foram feitas consultas bibliográficas sobre a teoria da previsão numérica do tempo, do modelo de mesoscala MM5, das opções físicas do modelo, sobre os ciclones tropicais, dos pacotes de visualização de gráficos, GrADS e Ncar-Graphics. As condições iniciais e de

fronteira foram fornecidas pelo supervisor. Far-se-á a comparação dos resultados obtidos pelo modelo com os dados fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INAM).

Para a concretização deste trabalho usou-se um computador Pentium 4 com uma frequência de 1.4Ghz. E o sistema operativo usado foi o Red Hat Linux 7.1.

Capítulo 2

Teoria Geral sobre Ciclones

2.1 Ciclones Tropicais

Os ciclones são áreas de baixa pressão em torno das quais o vento sopra no sentido contrário ao dos ponteiros do relógio no hemisfério Norte e no sentido dos mesmos no hemisfério Sul. O sentido de rotação é consequência directa dos efeitos da força de Coriolis, que reflecte a rotação da Terra.

Estas depressões atingem alguns milhares de quilómetros de diâmetro e podem ser tão profundas quanto a troposfera. Com um mínimo de pressão no centro, este fenómeno apresenta uma circulação ciclónica, daí a origem do nome.

Geralmente, os ciclones movem-se para o Oeste, acompanhando os ventos alísios, frequentemente rumam para norte deslocando-se para leste nas latitudes médias. Para além de ventos fortes, estes causam precipitações intensas provocando, por vezes, grandes inundações.

Estes são fenómenos puramente oceânicos que morrem sobre o continente devido ao atrito e à quebra no suprimento de humidade. Seu ciclo de vida é de alguns dias.

O "olho", figura (2.1), é uma região aproximadamente circular de ventos fracos e poucas nuvens são encontradas no centro de um ciclone tropical. As vezes há uma rápida ocorrência de ventos fortes, e pouquíssima precipitação.

Algumas vezes o céu torna-se limpo e as estrelas podem ser vistas.

O olho corresponde à região de pressão de superfície mínima e de maiores temperaturas nos níveis mais altos: 10°C mais quente do que o ambiente a 12 km de altitude, mas apenas 2°C no máximo mais quente ao nível da superfície.

O olho do ciclone varia no tamanho de 8 a 200 km de diâmetro, mas é geralmente de 30 – 60 km de diâmetro (Weatherford e Gray, 1988). O olho é cercado por uma parede, designada *parede do olho*, o qual é uma área aproximadamente circular de convecção profunda, sendo uma zona de ventos de superfície mais elevados no ciclone tropical.

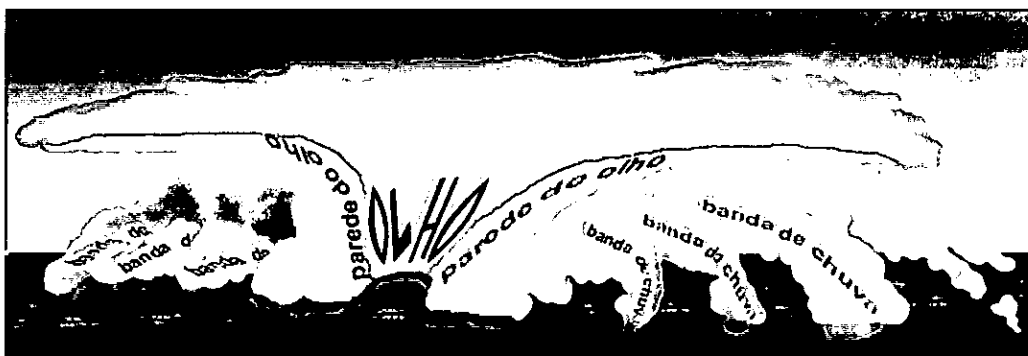


Figura 2.1: Constituição de um ciclone tropical: olho, paredes do olho e as bandas de chuva.

(adaptado do <http://member.tripod.com/meteorologia/furacoes.html>.)

O vácuo existente no centro do ciclone tropical devido a pressão baixa, permite as águas do oceano subir em resposta à pressão baixa não mais que um metro. A convergência dos ventos para o centro do ciclone que faz com que a água se empilhe e o nível alcance o valor de 6 a 10 metros. As temperaturas relativamente altas no olho do ciclone devem-se ao aquecimento compressional de subsidência do ar. A maior parte dos testes feitos no olho mostram uma camada de baixo nível relativamente húmida, mas com uma inversão acima.

Esta característica, que é uma componente fundamental dos líquidos em rotação, deve-se a falta de mudanças de fase da água, isto é, nenhuma nuvem e aquecimento diabático estão envolvidos.

Uma outra característica dos ciclones tropicais que joga um papel importante para manter a forma do olho, é a convecção nas paredes do mesmo. A convecção nos ciclones tropicais é organizada nas longas bandas ou faixas estreitas de chuvas que estão orientadas no mesmo sentido do vento horizontal.

Estas faixas possuem movimentos espirais no centro do ciclone tropical e são chamadas, por vezes, de faixas espirais. Ao longo delas, a convergência de baixo nível é máxima, e conseqüentemente, a divergência em níveis acima é mais pronunciada.

Uma circulação directa do ar quente e húmido converge na superfície e ascende através destas faixas, e diverge no topo, descendo em ambos lados das mesmas. A subsidência é distribuída sobre uma larga área na parte externa da banda de chuva mas concentra-se numa pequena área interna. Enquanto o ar subside, o aquecimento adiabático ocorre e ele seca.

Os ciclones podem ser de dois tipos: tropical ou extratropical.

- Os ciclones tropicais formam-se na cintura tropical, onde geralmente se deslocam, e ocorrem com maior frequência na parte ocidental das regiões tropicais dos oceanos Atlântico e Pacífico, no hemisfério Norte e no oceano Índico, no Hemisfério Sul. A sua energia vem da evaporação do mar e ocorre a condensação em nuvens convectivas concentradas próximo do centro.

- Os ciclones extratropicais, embora menos violentos do que os tropicais, são maiores, duram mais tempo, ocorrem frequentemente nas latitudes médias e elevadas e afectam o estado do tempo em áreas muito mais vastas. Estes ciclones estão associados a frentes frias, os ventos são menos fortes, e a sua energia vem de contrastes térmicos horizontais, isto é, massas de ar frio próximo a uma massa de ar quente.

Os ciclones tropicais são regionalmente denominados da seguinte maneira:

Furacões - no Oceano Atlântico Norte, Oceano Pacífico Nordeste a leste do Meridiano de Greenwich e no Oceano Pacífico Sul a leste da longitude

160°E;

Tufões - no Oceano Pacífico Noroeste a oeste do Meridiano de Greenwich;

Ciclone Tropical - no Oceano Pacífico Sudoeste a oeste da longitude 160°E e no Oceano Índico Sudeste a leste da longitude 90°E. Ocorrem, também, no Oceano Índico Norte e Sudoeste.

As perturbações tropicais, potencialmente mais devastadoras, provocam, muitas vezes, velocidades sensacionais do vento e precipitações muito intensas. A sua designação pode variar, ao longo do seu ciclo de vida, de acordo com a sua velocidade:

Máximo até 17 m/s - *depressões tropicais*;

Máximo entre 18 e 32 m/s - *tempestade tropical*;

Máximo acima de 33 m/s - *furacões, tufões*.

Segundo a Organização Mundial de Meteorologia (OMM), o vento máximo é aquele que é obtido numa média de 10 minutos. No entanto, existem serviços meteorológicos que o definem como uma média num período de 1 minuto. Nas definições acima, utilizamos a convenção da OMM.

2.2 Condições para ocorrência de um ciclone tropical

1. Águas oceânicas quentes (pelo menos 27°C) numa camada suficientemente profunda, na ordem de pelo menos 50 m. Essas águas quentes alimentarão a engrenagem térmica do ciclone tropical.
2. Uma atmosfera que se resfrie rapidamente com a altura para que seja potencialmente instável à convecção da humidade, sendo essa actividade convectiva responsável pela libertação do calor armazenado nas águas para o interior do ciclone.
3. Camadas relativamente húmidas próximo da média troposfera (5km). Níveis médios secos não conduzem ao contínuo desenvolvimento de actividade convectiva numa vasta área.

4. Uma distância mínima de pelo menos 500 km da linha do Equador. Para ocorrer a ciclogênese tropical, há o requisito de uma força de Coriolis não desprezável para que o centro de baixa da perturbação seja mantido.
5. Uma perturbação pré-existente próximo à superfície com vorticidade e convergência suficientes.
6. Valores baixos de cisalhamento vertical de vento entre a superfície e a alta troposfera.

2.3 Ciclones Tropicais em Moçambique

Moçambique é um país propenso à catástrofes naturais, ciclones tropicais, cheias e secas, devido a sua localização geográfica. A época ciclônica inicia no dia 1 de Novembro e termina à 30 de Abril (Mussa Mustafa, 2003, comunicação pessoal), devendo, também, formar-se fora deste período. Estes podem atingir ou mesmo formar-se no Canal de Moçambique, dependendo das condições atmosféricas e do oceano. Os ciclones formados no Canal de Moçambique são menos intensos.

As regiões mais afectadas pelos ciclones tropicais são as zonas costeiras do Norte e Centro do país e norte de Inhambane e, por vezes, podem atingir as zonas do interior (a província de Manica) e na zona sul, tem-se em mente o ciclone Demoína que assolou o país em Janeiro de 1984.

Os ciclones estão associados a chuvas intensas que causam cheias nas zonas costeiras do país e grandes destruições de habitações, estradas, culturas, e até perdas de vidas humanas para além de outros bens da sociedade.

Em média, ocorrem ou atingem o Canal de Moçambique três a cinco ciclones por ano, com máxima frequência nos meses de Janeiro e Fevereiro.

2.4 Ciclone Tropical Eline

O ciclone Eline ocorreu no período de 7 a 25 de Fevereiro 2000, como mostra a figura 2.2. Como ciclone tropical, formou-se no Oceano Índico à leste das Maurícias, no dia 8 de Fevereiro tendo entrado no canal de Moçambique no dia 19 do mesmo mês. Atingiu os distritos de Machanga, Chibabava e Búzi, assim como a cidade da Beira, na tarde de 21 de fevereiro, movendo-se na direcção da província de Manica. Dissipou-se na República do Zimbabwe à 25 do mesmo mês. Este foi um dos mais intensos e violentos ciclones que assolou o país.

Este ciclone também afectou o estado de tempo nos distritos do norte da província de Inhambane - Inhassoro, Vilanculos, Mambone e a cidade de Inhambane, com ocorrência de chuvas intensas.

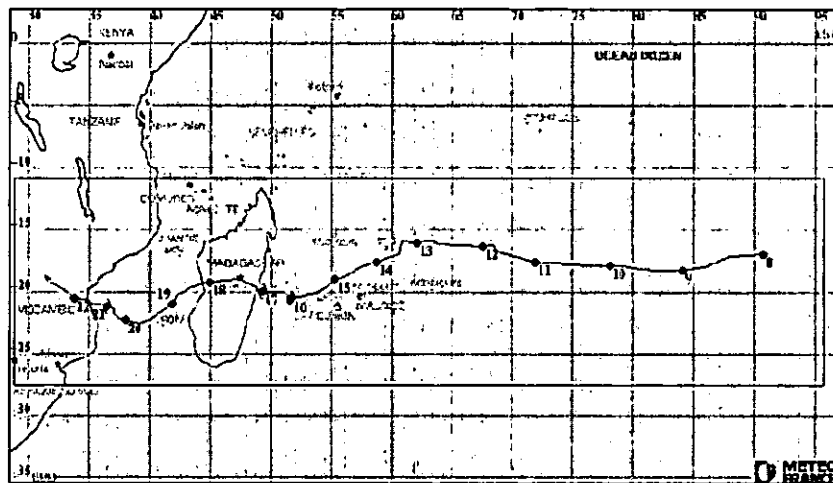


Figura 2.2: Trajectória do Ciclone Eline desde o dia 8 à 23 de Fevereiro de 2000 (fonte: www.weathersa.co.za/stories/Eline.html).

Como conseqüências da passagem deste ciclone pela província de Sofala, os distritos de Machanga, Chibabava, Búzi e a cidade da Beira foram seriamente afectados. Várias casas de construção precária foram destruídas, algumas vias rodoviárias ficaram temporariamente interrompidas e houve

destruição de diversas culturas. Uma pessoa perdeu a vida na cidade da Beira (Mussa Mustafa, 2000, Comunicação pessoal).

Capítulo 3

Modelo MM5

3.1 Breve Descrição do modelo

O modelo MM5 é a quinta geração do modelo regional desenvolvido, conjuntamente, pela Pennsylvania State University e o National Center for Atmospheric Research (NCAR). É um modelo não hidrostático de mesoscala baseado em diferenças finitas e uma coordenada vertical do tipo sigma (σ), definida em termos de estado de base independente do tempo.

O facto do modelo ser não-hidrostático, permite a simulação acurada de fenómenos de mesoscala e de convecção que dependem da topografia do terreno da região (Dudhia 1993, De Pondeva 2001a,2001b). Para além da parte dinâmica, o modelo incorpora várias opções físicas para a modelação dos efeitos da humidade e da camada limite. As variáveis de predição são as componentes zonal u , meridional v e vertical do vento w , a temperatura superficial, a humidade específica, a pressão de perturbação, densidade específica da água da nuvem, da chuva e da neve.

O MM5 usa uma representação tri-dimensional de torque de Coriolis, e não só a componente vertical usada noutros modelos.

Tratando-se de um modelo de área limitada (MAL), para além das condições iniciais, o MM5 precisa de condições de fronteira laterais, pré-escritas com base num modelo global ou de área limitada. Durante o processo de

integração do MM5, a solução na vizinhança da fronteira é definida como uma combinação das condições de fronteira externas e a própria solução do MM5. Esta combinação, faz-se por meio da relaxação da solução do MM5 na direcção das condições de fronteira externas, processo este denominado *Condições de fronteira relaxativas*.

O modelo MM5 possui, também, uma capacidade de aninhamento, que corresponde à capacidade de criação, dentro do domínio do modelo, de sub-domínios de maior resolução nas áreas de interesse, e a movimentação destes durante o tempo de integração. Tal permite seguir, por exemplo, a trajectória de um ciclone, usando a alta resolução na área onde ele se encontra.

O “pacote do MM5”, figura 3.1, incorpora vários pré-programas para a criação das condições iniciais e de fronteira. São eles:

- Terrain
- Regrid
- O Little-r
- Interpf
- Interpb.

3.1.1 Terrain

O pré-programa terrain define os domínios geográficos usados, sua extensão e o número de pontos da malha. Para o domínio mãe o utilizador define a latitude e longitude do ponto central, números de pontos da malha e a distância dos pontos consecutivos da malha.

A relação entre os vários domínios pode ser unidireccional ou bidireccional:

- Unidireccional; onde a informação é transmitida do domínio mãe (maior) para o domínio filho (menor), através das condições de fronteira.

- Bidireccional; onde os resultados do domínio menor substituem os do maior na zona comum. Esta relação dá-nos melhores resultados.

O programa Terrain processa para todos os domínios a informação sobre a topografia, o tipo de vegetação e solo, e interpola horizontalmente para

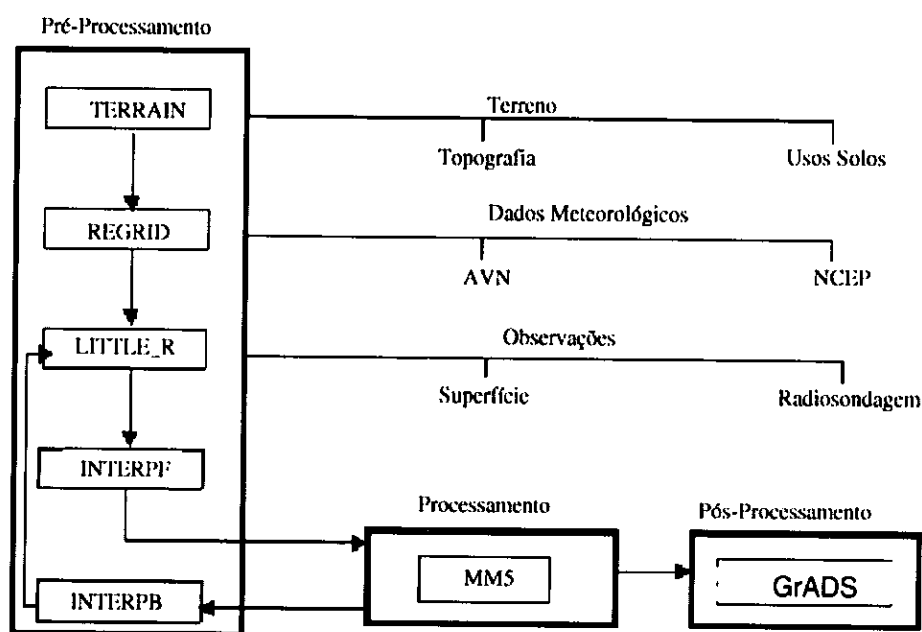


Figura 3.1: Esquema representativo do modelo MM5 (adaptado do Dudhia, 2000)

todos os domínios escolhidos numa malha regular de longitude e latitude. A informação de uso do solo corresponde a uma percentagem para cada tipo de solo, sendo que o tipo de solo controla as propriedades seguintes: albedo, emissividade, disponibilidade de água, inércia térmica e rugosidade.

A interpolação pode ser feita por vários métodos, por exemplo: o método de Cressman, disponível para a topografia e que estipula um raio de influência e a importância dos valores dos pontos dentro dessa área para o ponto que se está a estimar, sendo inversamente proporcional à distância; o método bi-parabólico, disponível para a topografia do terreno e uso de solos, faz um ajuste bidimensional de duas parábolas e considera que o valor para o ponto desejado é uma média pesada dos valores dados pelas duas parábolas.

A escolha dos domínios tem como preocupação o tempo de computação que é importante para a previsão meteorológica em tempo real. O tempo é proporcional ao produto de números de pontos no tempo pelo número de

pontos no espaço. Sendo a relação entre os vários domínios bi-direccional o passo espacial tem que diminuir de 1/3 para cada domínio aninhado em relação ao domínio mãe.

Três malhas aninhadas em dois sentidos com o mesmo número de pontos têm custo computacional de 1:3:9 para um dado período de tempo, o que significa que a malha fina é nove vezes mais "pesada" que a malha maior.

3.1.2 Regrid

Este programa interpola horizontalmente os dados meteorológicos em níveis de pressão ou à superfície para a malha dos diferentes domínios, onde esta é feita pelo método bi-parabólico. Se se acrescentarem mais níveis de pressão aos dados originais a interpolação vertical é feita entre os níveis originais de pressão adjacentes e é linear com a pressão para o vento, humidade relativa e linear com o logaritmo da pressão para a temperatura.

O programa Regrid é constituído por dois subprogramas: o Pregrid, que transforma a informação meteorológica de vários formatos diferentes Grib (Gridded Binary Data) num formato standard (padrão) e o Regridder, que interpola a informação para todos os domínios definidos pelo programa Terrain para todos os níveis de pressão.

O Regridder recebe os seguintes campos em níveis de pressão: temperatura, componentes horizontais de ventos, humidade relativa e altura geopotencial.

3.1.3 Little-r

Este programa permite que as condições iniciais sejam melhoradas com observações de pressão ao nível do mar, velocidade e direcção do vento, temperatura e temperatura de orvalho. A coordenada vertical que referencia estas observações pode ser a pressão ou a altitude. A qualidade das observações é controlada para o instante de referência analisando a relação entre as observações e os pontos da malha mais próximo.

As alterações dos valores referentes aos pontos da malha podem ser feitas pelos esquemas de Cressman - as observações têm um raio de influência que varia de acordo com a velocidade do vento, sendo circular com o vento calmo ($< 5m/s$), elíptico com o vento forte e elíptico curvado em zonas de curvatura; ou Multiquadrático - cada ponto da malha é influenciado por todas as observações, sendo esta influência inversamente proporcional à distância.

3.1.4 Interpf

Cria as condições iniciais e de fronteira que o programa MM5 vai utilizar partindo dos dados do Regrid ou do Little-r. Este programa faz cálculos da superfície sigma (σ) em função da altura geopotencial (z) e faz a interpolação vertical de dados de superfícies isobáricas adjacentes para a superfície sigma constante.

A interpolação vertical é linear com a pressão hidrostática para todas as variáveis, excepto para a temperatura que é linear com o logaritmo da pressão. Calcula também as variáveis adicionais que são a velocidade vertical e a perturbação da pressão. A velocidade vertical é obtida integrando a divergência horizontal.

3.1.5 MM5

O MM5 é o programa que faz a previsão numérica do tempo resolvendo as equações tridimensionais de Navier - Stokes, a equação da termodinâmica e a equação de conservação de água no sistema de coordenadas sigma.

A parametrização dos processos físicos, nuvens, precipitação, camada de fronteira e radiação são definidas neste programa.

3.2 Coordenada Vertical σ

As equações do movimento, que dão a base para todos os modelos de previsão numérica de tempo, têm a forma mais simples em coordenadas de

pressão.

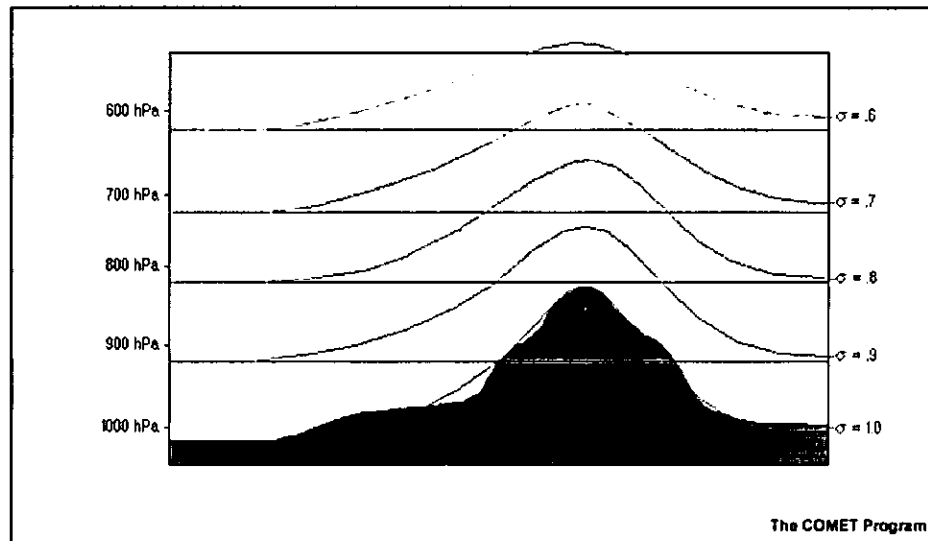


Figura 3.2: Representação esquemática dos níveis σ (Fonte: NWP Course, 1999)

Para resolver o problema de superfícies descontínuas de previsão, Phillips (1957) desenvolveu uma coordenada que segue, na superfície, os contornos do terreno, designada *coordenada sigma* (σ), figura 3.2. Na sua forma mais simples, a coordenada sigma é definida pela equação (3.1). À superfície da terra, o nível da coordenada mais baixa ($\sigma = 1$) segue a configuração real do terreno.

Os níveis intermédios vão se tornando planos a medida que a pressão diminui até atingir a pressão do topo escolhida, que corresponde a coordenada no topo ($\sigma = 0$). A camada superior do modelo é colocada acima da tropopausa. A coordenada vertical sigma pode, também, ser formulada em relação à altura (z), melhor do que pressão.

$$\sigma = \frac{P_0 - P_t}{\underbrace{P_s - P_t}_{P^*}}; \quad P = \sigma P^* + P_t + P' = P_0 + P' \quad (3.1)$$

Onde, P_0 é a pressão de referência, P a pressão total, P_t é a pressão no

topo e P_s a pressão superficial.

3.3 Modelo Não - hidrostático

Na hipótese hidrostática, a aceleração vertical na atmosfera é nula, por isso é que a diferença de pressão entre dois pontos a altitudes diferentes é igual ao peso da coluna de ar entre esses pontos:

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g \quad (3.2)$$

Onde z é a altura geopotencial e g a aceleração de gravidade.

O uso do modelo não-hidrostático é importante quando as acelerações verticais são importantes, isto acontece quando a escala horizontal se aproxima da profundidade dos obstáculos em análise.

No MM5 (Dudhia, 1993) é definido um estado de referência para a pressão, P_0 , temperatura, T_0 , e a perturbação a esse estado, P' e T' , que são as variáveis prognosticadas.

$$P(x, y, z, t) = P_0(z) + P'(x, y, z, t) \quad (3.3)$$

$$T(x, y, z, t) = T_0(z) + T'(x, y, z, t) \quad (3.4)$$

$$\rho(x, y, z, t) = \rho_0(z) + \rho'(x, y, z, t) \quad (3.5)$$

Onde ρ é a densidade do ar.

As variáveis de referência são somente em função da altura z .

3.4 Equações do Modelo

Em termos da coordenada (x, y, σ) que segue a configuração do terreno, estas são as equações para as variáveis básicas do modelo não-hidrostático que excluem a humidade.

Equação Prognóstica da pressão:

$$\frac{\partial P'}{\partial t} + \rho_0 g w + \gamma P \nabla \cdot \mathbf{V} = -\mathbf{V} \cdot \nabla P' + \frac{\gamma P}{T} \left(\frac{\dot{Q}}{c_p} + \frac{T_0}{\theta_0} D_\theta \right) \quad (3.6)$$

Onde:

\dot{Q} - é a taxa de aquecimento devido aos processos diabáticos;

γ - a capacidade molar a volume constante;

c_p - a capacidade molar à pressão constante;

D_θ - termo associado ao fluxo de calor turbulento.

No modelo MM5, os últimos dois termos da equação (3.6) que representam a variação da pressão devido aos fluxos de calor radiativos, latente e turbulentos são desprezados. Klempt e Wilhilnson (1978) provaram que a sua contribuição é muito pequena para a variação da pressão turbulenta (P').

Equações do momento:

Componente zonal x do vento:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{m}{\rho} \left(\frac{\partial P'}{\partial x} - \frac{\sigma}{P^*} \frac{\partial P^*}{\partial x} \frac{\partial P'}{\partial \sigma} \right) = & -\mathbf{V} \cdot \nabla u + v \left(f + u \frac{\partial m}{\partial y} - v \frac{\partial m}{\partial x} \right) - \\ & - ew \cos \alpha - \frac{uw}{r_t} + D_u \end{aligned} \quad (3.7)$$

Componente meridional y do vento:

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{m}{\rho} \left(\frac{\partial P'}{\partial y} - \frac{\sigma}{P^*} \frac{\partial P^*}{\partial y} \frac{\partial P'}{\partial \sigma} \right) = & -\mathbf{V} \cdot \nabla v - u \left(f + u \frac{\partial m}{\partial y} - v \frac{\partial m}{\partial x} \right) + \\ & + ew \sin \alpha - \frac{vw}{r_t} + D_v \end{aligned} \quad (3.8)$$

Componente vertical do vento:

$$\frac{\partial w}{\partial t} - \frac{\rho_0 g}{\rho P^*} \frac{\partial P'}{\partial \sigma} + \frac{gP'}{\gamma P} = -\mathbf{V} \cdot \nabla w + g \frac{P_0 T'}{P T_0} - \frac{g R_d P'}{c_p P} + e(u \cos \alpha - v \sin \alpha) + \frac{u^2 + v^2}{r_t} + D_w \quad (3.9)$$

onde, nas equações (3.7), (3.8) e (3.9) incluem os termos (eu e ew) que representam, geralmente, as componentes negligenciáveis da força de Coriolis, e e é a componente horizontal da força de Coriolis dada por $e = 2\Omega \cos \lambda$, em que $\alpha = \phi - \phi_c$, é a diferença entre a longitude ϕ e a longitude central ϕ_c , λ é a latitude do lugar. D_u , D_v e D_w são termos de sub-escala da rede e funções das flutuações da velocidade correspondentes aos fluxos turbulentos da velocidade e f é a componente vertical da força de Coriolis.

$u \frac{\partial m}{\partial y}$, $v \frac{\partial m}{\partial x}$ e o r_t representam os termos do efeito de curvatura e m é o factor de escala da rede. R_d é a constante dos gases para 1kg de ar seco.

Equação da Termodinâmica Atmosférica

A equação da termodinâmica calcula a variação da temperatura num dado ponto, e tem como resultado das contribuições a advecção do ar com uma temperatura diferente, a pressão, fluxos de calor radiativo e latente e um termo associado aos fluxos de calor turbulentos, D_θ , que corresponde a contribuições das escalas inferiores à escala considerada.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\mathbf{V} \cdot \nabla T + \frac{1}{\rho c_p} \left(\frac{\partial P'}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla P' - \rho_0 g w \right) + \frac{\dot{Q}}{c_p} + \frac{T_0}{\theta_0} D_\theta \quad (3.10)$$

Os *termos da advecção* podem ser expandidos de seguinte modo:

$$\mathbf{V} \cdot \nabla A \equiv mu \frac{\partial A}{\partial x} + mv \frac{\partial A}{\partial y} + \dot{\sigma} \frac{\partial A}{\partial \sigma} \quad (3.11)$$

onde $\dot{\sigma}$, *velocidade vertical*, é dada por:

$$\dot{\sigma} = -\frac{\rho_0 g}{P^*} w - \frac{m\sigma}{P^*} \frac{\partial P^*}{\partial x} u - \frac{m\sigma}{P^*} \frac{\partial P^*}{\partial y} v \quad (3.12)$$

e A é uma função arbitrária.

O termo da divergência da velocidade é expandido em série de Taylor de seguinte modo:

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = m^2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u}{m} \right) - \frac{m\sigma}{P^*} \frac{\partial P^*}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial \sigma} + m^2 \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{v}{m} \right) - \frac{m\sigma}{P^*} \frac{\partial P^*}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial \sigma} - \frac{\rho_0 g}{P^*} \frac{\partial w}{\partial \sigma} \quad (3.13)$$

A equação 3.13 da divergência da velocidade é proporcional à variação da densidade, em que para uma camada da atmosfera a variação da densidade é praticamente nula, o que significa que a divergência da velocidade dada pela soma entre a divergência horizontal e vertical também é nula.

3.5 Opções Físicas do Modelo

No modelo MM5 os processos físicos parametrizados são: microfísica das nuvens, camada limite planetária, umidade explícita, a radiação e a temperatura superficial. A figura 3.3, ilustra as interações entre os diferentes processos físicos parametrizados.

A parametrização da camada limite permite o cálculo dos fluxos de calor sensível e latente que são usados pela parametrização de superfície no cálculo da temperatura à superfície.

O modelo de camada limite permite parametrizar os efeitos de difusão turbulenta de calor, a quantidade de movimento e o vapor de água que irão

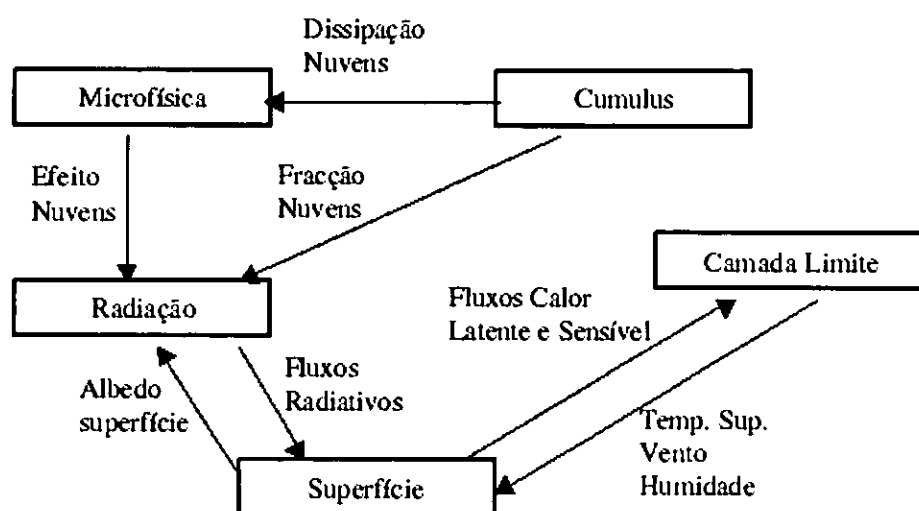


Figura 3.3: Interação entre as parametrizações do modelo MM5 (Dudhia *et al.*, 1993)

determinar os perfis verticais da temperatura, do vento e da humidade na camada limite.

A parametrização das nuvens permite determinar se um dado ponto da malha pertence ou não a uma nuvem, ou seja, se a humidade for de 100%, a parametrização das nuvens é activada, caso contrário é desactivada. A estrutura microfísica das nuvens influencia fortemente o balanço radiativo da nuvem: a reflexão da radiação solar incidente no topo da nuvem é função da concentração e tamanho das gotas de água e da concentração, tamanho e forma dos cristais de gelo.

3.5.1 Modelo de Parametrização Cumulus

A parametrização das nuvens e da microfísica tem como objectivo calcular os fluxos de calor latente necessários às equações dinâmicas e dar como resultado a precipitação e a percentagem de nuvens. De acordo com Cotton e Anthes (1989), a magnitude dos fluxos de energia associados às transformações de fase da água e os fluxos de ar ascendentes e descendentes associados

à convecção nas nuvens, podem ter um efeito muito importante na dinâmica e na energia dos sistemas de larga escala para escalas de tempo no balanço de ordem de horas a dias.

As nuvens mais finas desempenham um papel importante no balanço radiativo para escalas de tempo maiores.

Esquema Anthes - Kuo

Este modelo foi desenvolvido por Kuo (1965, 1974) e Anthes (1974). Baseado na convergência de humidade, largamente aplicado para tamanhos de malhas maiores, superiores à 30 km (Dudhia, 2000). Este esquema é activado quando a atmosfera é condicionalmente instável e quando a convergência horizontal da humidade ultrapassa um certo valor.

Este modelo produz grandes quantidades de precipitação convectiva, menor escala resolvida de precipitação, perfil de aquecimento especificado e dependência de humidade sobre a humidade relativa.

Esquema Grell

Este esquema foi desenvolvido por Grell (1993). Baseia-se na razão de desestabilização ou quasi-equilíbrio, esquemas de nuvens com fluxos ascendentes e descendentes e movimentos de compensação dos perfis de aquecimento/humidificação. É apropriado para tamanhos de malhas menores de 10 - 30 km. Este esquema simula de maneira realista a evolução de um sistema convectivo de mesoscala devido a sua simplicidade (Dudhia, 2000).

Esquema Arakawa - Schubert

Este esquema tem as mesmas características do modelo Grell. No modelo Arakawa - Schubert o controlo dinâmico é feito relacionando a convecção com a desestabilização imposta pela larga escala, considerando que as nuvens respondem às alterações de larga escala, mantêm o nível de instabilidade condicional.

Este modelo pressupõe um conjunto de estados sucessivos de equilíbrio, no qual o sistema convectivo se ajusta rapidamente às alterações lentas do ambiente de larga escala. Grell (1991) afirma que este esquema corrigido permite obter boas distribuições verticais de temperatura e de humidade e permite também simular bem os sistemas convectivos de mesoscala.

Esquema Fritsch - Chappel

Baseia-se na relaxação do perfil devido a ascensão e descensão das propriedades da região de subsidência. O fluxo de massa convectiva remove 50% de energia flutuante disponível no momento de relaxação, com a razão de entrada fixos. É apropriado para escalas que variam entre 20 a 30 km devido a suposição da nuvem e subsidência local (Dudhia, 2000).

Esquema Kain - Fritsch

É similar ao esquema de Fritsch - Chappel. Usa um esquema sofisticado de misturas das nuvens para determinar a entrada e saída, e remove toda a energia flutuante disponível (Dudhia, 2000).

Esquema Bettis - Miller

Baseia-se no ajustamento na relaxação em referência ao perfil termodinâmico pós-convectivo sobre o período dado. Este esquema é apropriado para escalas maiores a 30 km, mas não é apropriado para a convecção severa (Dudhia, 2000).

3.5.2 Modelo da Camada Limite Planetária (PBL)

A Camada Limite Atmosférica é uma camada de ar adjacente ao solo com uma espessura média de cerca de 2 km, mas pode variar entre 200 m a 4 km. Os últimos 200 a 20 metros são a camada superficial onde os fluxos turbulentos são uniformes e constantes em altura. A atmosfera que está por cima é designada por atmosfera livre e é geralmente estável. A

região de transição entre a atmosfera livre e a camada limite é uma região estável de inversão de temperatura. Esta zona de transição existe sempre e é responsável pelo isolamento da camada limite do resto da troposfera.

A camada limite é a região da atmosfera que está sob os efeitos dos fluxos de calor latente e sensível trocados entre o solo e ar e, a água e o ar, e que, por isso, está sujeita aos ciclos diários de temperatura, humidade e solo. A camada limite tem geralmente um comportamento cíclico diário devido à radiação: apresenta-se instável e bem misturada durante o dia e estável com grandes gradientes de temperatura, velocidade do vento e humidade durante a noite. Estes ciclos diários podem ser alterados pela passagem de frentes e ciclones, porque as massas de ar são advectadas para a região.

A camada limite é modelada pelos fenómenos de escala sinóptica nomeadamente os centros de alta e baixa pressão. No centro de alta pressão, o ar diverge junto ao solo e desce verticalmente para o substituir. A subsidência do ar torna a camada limite menos espessa. No centro de baixa pressão o ar converge e ascende eliminando por vezes a separação entre a camada limite e a atmosfera livre permitindo uma renovação do ar da camada limite.

Esquema None (Nenhuma)

Não existe nenhuma camada superficial, pouco realista na simulação de dados reais (Dudhia, 2000).

Esquema Bulk PBL

Apropriado para a resolução vertical na camada limite maior que 250 metros no tamanho vertical da malha, tem dois regimes de estabilidade (dudhia, 2000).

Esquema de Alta Resolução Blackadar PBL

Próprio para a alta resolução PBL, espessura da camada superficial inferior a 100 metros. Possui quatro regimes de estabilidade incluindo a camada de mistura convectiva livre (Dudhia, 2000).

Esquema Burk - Thompson PBL

É apropriado para camadas de fronteira largas, irregulares e de alta resolução. Prevê a energia turbulenta para uso na mistura vertical baseando-se nas fórmulas de Muller - Yamada (Dudhia, 2000).

Esquema MRF

Este modelo usado actualmente nos modelos de previsão AVN/MRF do NCEP, foi desenvolvido por Hong e Pan (1986) e baseia-se na representação de Tröen-Mahrt (1986).

A difusividade na camada limite está de acordo com os resultados de investigação de Large Eddy Simulation (LES), obtido por Tröen e Mahrt (1986). Este esquema determina a altura da camada limite calculando o número global de Richardson e, em seguida, especifica o perfil do coeficiente de difusividade em função da altura da camada limite, determinando os valores dos coeficientes em função dos fluxos à superfície.

Os fluxos de calor sensível e latente são calculados neste esquema de acordo com a teoria de Monin-Obukhov. Neste esquema existe uma parametrização dos fluxos contrários ao gradiente que depende da velocidade convectiva e dos fluxos à superfície. De acordo com Dudhia (2000) este esquema é muito eficiente computacionalmente.

Este esquema é aplicável para a alta resolução na camada limite planetária.

3.5.3 Modelo de Humidade Explícita

As propriedades das nuvens são as mesmas que as do nó da malha e, portanto, sempre que existe saturação num determinado ponto, este modelo é activado. Este modelo simula a escalas maiores a precipitação de origem convectiva.

Hsie *et al.* (1984) apresentam várias vantagens no uso deste modelo; a convecção é resolvida pelo modelo, a distribuição vertical do calor latente

é determinada explicitamente e a evaporação da precipitação é calculada. As desvantagens também são referidas em Hsie *et al.* (1984) que são o tempo computacional extra e a não existência de dados para a inicialização das diferentes variáveis associadas a água. No MM5 as condições iniciais só incluem a quantidade de vapor de água, todas as outras variáveis, como por exemplo, a água das nuvens são inicializadas a zero. No MM5 os esquemas de modelação explícita da precipitação são activados quando a saturação é atingida (Dudhia, 2000).

Esquema Dry

Não existe nenhuma previsão de humidade. O vapor de água é nulo (Dudhia, 2000).

Esquema Precipitação Estável

Precipitação não convectiva com remoção de largas escalas de saturação, sem evaporação da chuva ou previsão de nuvens explícita (Dudhia, 2000).

Esquema Warm Rain

Campos de nuvens e água precipitável previstos explicitamente pelos processos microfísicos. Não existem os processos de fase de gelo (Dudhia, 2000).

Esquema Simple Ice

Adiciona gelo nos processos de fase. Este modelo é pouco eficiente computacionalmente. Segundo Dudhia (1989), os processos associados a fase do gelo são mais importantes numa camada entre 0° e -20°C, onde os movimentos verticais de ascensão são forçados pela libertação do calor latente que resulta da deposição de vapor de água na neve. Os movimentos verticais de subsidência resultam da liquefação e da evaporação da água do gelo e aparecem atrás das zonas convectivas. Este modelo considera as equações de conservação para o vapor de água e gelo na nuvem e para a chuva e neve.

Esquema Mixed - Phase (Reisner)

Adiciona água supercongelada acima e permite uma baixa fusão de neve (Dudhia, 2000).

3.5.4 Modelo da Radiação

A parametrização da radiação no MM5 pode ser feita de acordo com diferentes esquemas (Dudhia, 2000).

A parametrização da radiação tem como objectivo calcular o fluxo radiativo total na superfície para o balanço energético de superfície e a divergência dos fluxos radiativos num volume de ar limpo ou de nuvem necessários ao cálculo do aquecimento/arrefecimento.

Esquema None (Nenhuma)

Nenhuma tendência significativa aplicada para a temperatura da atmosfera, tornando-se irrealístico para longos períodos de simulação (Dudhia, 2000).

Esquema Simple Cooling

A taxa de arrefecimento da atmosfera depende apenas da temperatura. Não existe a interação das nuvens ou ciclos diurnos.

Esquema da Radiação Superficial

Este esquema providencia a variação diurna dos fluxos de ondas curtas e longas à superfície para uso na quantidade de energia superficial. Este fluxo é calculado baseando-se na coluna atmosférica integrada do vapor de água e baixas, médias e altas fracções de nuvens estimadas a partir da humidade relativa (Dudhia, 2000).

Esquema da Radiação nas Nuvens

É um esquema muito sofisticado para a interação das ondas longas e curtas com nuvem explícita e céu limpo. Assim como a tendência atmosférica da temperatura esta fornece os fluxos de radiação à superfície.

Esquema da Radiação CCM2

Possui múltiplas bandas espectrais sobre as ondas curtas e longas, mas as nuvens são simplesmente tratadas como a humidade relativa. Apropriado para escalas de malhas maiores e muito acurado para longos períodos de integração. Também providencia fluxos radiativos à superfície (Dudhia, 2000).

3.5.5 Esquema da Temperatura Superficial

Testes feitos por Zhang e Anthes (1982) verificaram que a parametrização do solo é o aspecto mais importante na determinação do comportamento da camada limite.

No modelo MM5, a temperatura superficial é calculada através do balanço de energia, considerando que em cada passo do tempo a energia à superfície se anula. Na superfície da água a temperatura é considerada fixa durante o tempo de integração (Grell *et al.*, 1995).

Esquema None

Não existe a previsão da temperatura superficial. Com temperatura superficial fixa, é um esquema não realístico (Dudhia, 2000).

Esquema Force/Restore (Blackadar)

Este esquema possui um bloco simples com substratos de temperatura fixos. A temperatura do bloco baseia-se na quantidade e na profundidade de energia e é apropriado para representar a variação diurna da temperatura (aproximadamente entre 10 - 20 cm).

Modelo de cinco camadas

Este modelo usa cinco camadas com espessura de 1, 2, 4, 8 e 16 cm para prever a temperatura e com um substrato abaixo de 31 centímetros de espessura, através da equação de difusão vertical. A inércia térmica é a mesma usada no esquema Force/Restore, mas tem uma capacidade de resolver verticalmente a variação diurna de temperatura permitindo uma resposta rápida para a temperatura de superfície (Dudhia, 2000).

Esta discretização foi comparada com um modelo de 100 camadas com 1 cm de espessura e os resultados foram semelhantes.

As equações usadas neste modelo são semelhantes às do modelo de Blac-kadar. A inicialização da temperatura no solo é feita considerando que as temperaturas obtidas do MM5 para o solo e o subsolo estão, respectivamente, a 1 cm e a 47 cm, e que a variação entre elas é linear. Este modelo não pode ser usado com o esquema Burk - Thomson PBL (IBLTYP=3) (Dudhia, 2000).

Capítulo 4

Discussão dos Resultados

Neste trabalho, foi possível simular o ciclone em estudo para três domínios, com as seguintes resoluções: o maior com 180 km, o intermédio com 60 km e o último, o de maior resolução, de 20 km. Usou-se a interação de dois sentidos entre os domínios (two way nesting). A razão da passagem do domínio mãe para o domínio aninhado é de $\frac{1}{3}$.

Foram usados 15 níveis verticais (Half sigma levels). As condições iniciais e de fronteira foram fornecidas pelo National Centers for Environmental Prediction (NCEP).

Os resultados deste trabalho foram extraídos do terceiro domínio, em que o mapa só mostra as regiões Centro e Sul do país, que foram as mais afectadas pelo ciclone Eline.

As variáveis de predição usadas são as componentes tridimensionais do momento, a perturbação da pressão, a temperatura, a humidade específica, a densidade específica da água da nuvem e da água líquida.

O tempo de integração da simulação foi de cinco dias, de 00Z do dia 18 de Fevereiro de 2000 à 00Z do dia 23 de Fevereiro de 2000, com o passo no tempo de 6 minutos para o domínio exterior. O modelo foi configurado para fazer a emissão dos resultados de 12 em 12 horas.

4.1 Simulação de Controle

O ciclone Eline encontrava-se no dia 18 de Fevereiro de 2000 sobre as Ilhas Malgaxes, tendo entrado no canal de Moçambique no dia 19 do mesmo mês, com ventos fortes ao longo da parede do olho. A pressão no centro do ciclone era de 1006 *hPa*, como ilustra a figura B.1.

No dia 21 de Fevereiro o ciclone Eline intensificou-se, apresentando na superfície uma pressão de 1001 *hPa*, como mostra a figura B.2. A precipitação acumulada varia entre os 20 e 100 *mm* por 24h, válido para este dia, e a magnitude do vento rondava entre 20 – 24 *m/s* (Figura C.1). Os distritos costeiros das Províncias de Sofala e Inhambane começavam a sofrer os efeitos devastadores do ciclone.

Com a entrada do olho ciclone no continente (“landfall”), que aconteceu no dia 22 de Fevereiro, e devido ao atrito e a perda de humidade este começou a enfraquecer-se. Neste dia, o olho do ciclone localizava-se à Norte da Província de Inhambane e a Sul de Sofala, com a pressão de 1003 *hPa*, como ilustra a figura B.3. Neste dia, os ventos ainda eram fortes.

E no dia 23 de Fevereiro o ciclone Eline localiza-se sobre a Província de Manica, com uma pressão de 1005 *hPa*, como mostra a figura B.4.

4.2 Estudo das configurações usadas durante a simulação

As variáveis comparadas são a temperatura superficial, pressão ao nível do mar, precipitação acumulada (dada a partir da soma da precipitação convectiva e não convectiva), magnitude do vento à 925 *hPa* e a humidade relativa, também à 925 *hPa*.

A comparação é feita para duas estações de superfície, porque os dados de observação disponíveis cedidos pelo INAM pertencem a duas estações, a saber, Aeroporto da Beira e Vilanculos.

4.2.1 Análise da configuração I

Para a camada limite usou-se o esquema Blackadar, para a parametrização das nuvens usou-se o esquema Anthes-Kuo para o primeiro e segundo domínios e esquema Grell para o terceiro domínio. Este esquema, ver por exemplo Dudhia (2000), é apropriado para escalas menores entre 10–30 km. Para o tratamento da humidade explícita o modelo usado foi o de Simple Ice para os três domínios.

Para a radiação usou-se o modelo Simple Cooling, no qual o resfriamento não depende da temperatura e também não existe a interação das nuvens ou ciclos diurnos. E para a temperatura do solo o esquema usado foi o de cinco camadas. A tabela 4.1 mostra a configuração I usada nas simulações.

Tabela 4.1: Definição da configuração I usada nas simulações.

Config do domínio com três malhas com 15 níveis verticais			
Malhas	1	2	3
Números de pontos	38 X 31	61 X 52	94 X 64
Resolução da Malha (km)	180	60	20
Passo no Tempo (s)	360	120	40
Aninhamento	two way	two way	two way
Parametrização Cumulus	Anthes-Kuo	Anthes-Kuo	Grell
Camada Limite (PBL)	Blackadar	Blackadar	Blackadar
Humidade Explícita	Simple Ice	Simple Ice	Simple Ice
Radiação	Simple	Simple	Simple
Temperatura no Solo	5 camadas	5 camadas	5 camadas

Desempenho da configuração I

Análise da pressão

O erro médio diário (modelo - observado), ver anexo A, da pressão varia entre 1–6 *hPa*, para a estação da Beira e de 3–19 *hPa* para Vilanculos. Este erro tem uma tendência oscilatória para Beira, onde cresce desde 1.4 *hPa* à 4.9 *hPa* do primeiro dia até ao terceiro e decresce ligeiramente no quarto dia para 3.9 *hPa* tornando a crescer um pouco para 5.1 *hPa* no quinto dia e no sexto decresce muito pouco para 4.5 *hPa*, enquanto que para Vilanculos o erro médio cresce de 3.8 *hPa* no primeiro dia para 17.9 *hPa* no quarto e daí decresce até 4.1 *hPa* no último dia, como mostra a tabela 4.2.

Para as duas estações, os dados obtidos pelo modelo são menores do que os observados.

O erro médio absoluto e a raiz do erro quadrático médio para a cidade da Beira é de 3.8 *hPa* e 4 *hPa*, respectivamente. E para Vilanculos, o erro médio absoluto é de 7.8 *hPa* e a raiz do erro quadrático médio foi de 9.0 *hPa*.

Comparando os dados obtidos pelo modelo e os fornecidos pelo INAM, vê-se que o máximo observado pelo INAM ocorreu no dia 21 de Fevereiro em Vilanculos, sendo de 1021.1 *hPa* e o registado pelo modelo foi de 1013.2 *hPa* na estação da Beira no dia 19 de Fevereiro.

A pressão mínima observada foi de 1010.9 *hPa* na estação da Beira no dia 22 de Fevereiro, ao passo que o modelo regista a mínima de 1003.2 *hPa* na estação de Vilanculos ocorrida no dia 21 de Fevereiro (Tabela 4.2). Neste dia o ciclone Eline já se encontrava sobre o continente.

Análise da temperatura

O erro médio da temperatura varia entre 0.8 – 5.1 °C para Beira e entre 0.7 – 4.7 °C para Vilanculos. Este erro tem uma tendência oscilatória para as duas estações.

O erro médio absoluto para Beira e Vilanculos foi de 3.2 °C e 3.4 °C,

Tabela 4.2: Comparação dos resultados da Pressão (hPa)

Data		18.02	19.02	20.02	21.02	22.02	23.02
Beira	MM5	1011.9	1013.2	1010.5	1007.4	1005.8	1007.9
	INAM	1013.4	1016.4	1015.4	1011.3	1010.9	1012.4
	Erro	1.4	3.2	4.9	3.9	5.1	4.5
Vilanculos	MM5	1012.4	1012.9	1009.1	1003.2	1003.7	1009.3
	INAM	1013.2	1018.3	1016.0	1021.1	1012.2	1013.4
	Erro	3.8	5.4	6.9	17.9	8.5	4.1

respectivamente, e a raiz do erro médio quadrático (RMSE¹) foi de 4 °C para as duas estações.

A temperatura máxima observada pelo INAM foi de 27.7 °C nos dias 22 e 23 de Fevereiro na estação da Beira enquanto que o modelo revela a sua ocorrência no dia 18 de Fevereiro em Vilanculos que foi de 25.6 °C. A temperatura mínima observada foi de 24.9 °C na Beira, no dia 18 de Fevereiro porem, o modelo registou a temperatura mínima no dia 20 de Fevereiro, tendo sido de 22 °C em Vilanculos (tabela 4.3).

Tabela 4.3: Comparação dos resultados da Temperatura (°C)

Data		18.02	19.02	20.02	21.02	22.02	23.02
Beira	MM5	24.1	23.3	22.9	23.4	22.8	22.6
	INAM	24.9	26.3	26.0	26.0	27.7	27.7
	Erro	2.8	9.9	11.5	11.9	19.1	20.6
Vilanculos	MM5	25.6	22.5	22.0	22.9	23.3	22.3
	INAM	26.3	25.1	26.3	26.7	27.3	27.0
	Erro	4.6	7.2	13.3	13.9	16.5	16.3

¹RMSE- Root Mean Square Error

Análise da Precipitação acumulada

A precipitação máxima acumulada para 24h de previsão registada pelo modelo foi de 117.9 *mm*, válida para o dia 23 de Fevereiro na estação de Vilanculos, e a máxima observada pelo INAM foi de 99.8 *mm*, válida para o mesmo dia, tendo ocorrido na mesma estação, como mostra a tabela 4.4.

Tabela 4.4: Comparação dos resultados da precipitação total (*mm*)

Data		18.02	19.02	20.02	21.02	22.02	23.02
Beira	MM5	0.0	1.3	7.2	10.7	63.5	79.9
	INAM	109.6	18.0	7.2	1.5	-	-
	Erro	-	16.7	0.0	9.2	-	-
Vilanculos	MM5	0.0	5.7	13.9	37.7	72.70	117.9
	INAM	43	-	-	-	-	-
	Erro	-	-	-	-	-	-

Análise da humidade relativa

Tabela 4.5: Comparação dos resultados da humidade relativa à 925 *hPa* (%)

Data		18.02	19.02	20.02	21.02	22.02	23.02
Beira	MM5	85.0	99.4	99.3	91.0	90.5	85.1
	INAM	80.0	73.0	83.0	79.0	79.0	80.0
	Erro	6.2	23.6	0.8	15.2	14.6	6.4
Vilanculos	MM5	78.9	99.4	99.7	99.9	93.5	90
	INAM	63.0	57.0	63.0	61.0	64.0	65
	Erro	30.2	54.6	39.7	47.5	43.8	43.1

O erro médio para esta variável oscila entre 15 – 35% para a estação de Vilanculos e de 0.7 – 17.2% para Beira. Para humidade relativa o modelo

registra valores muito altos para Vilanculos, isto é notável no erro médio absoluto que é de 25.7% e a raiz do erro quadrático médio foi de 26%.

Para a cidade da Beira os valores obtidos pelo modelo são um pouco altos relativamente aos observados, sendo o erro médio absoluto e raiz do erro médio quadrático de 8.6% e 10% respectivamente.

A humidade relativa máxima foi observada na estação da Beira no dia 20 de Fevereiro, sendo no valor de 83% e o modelo registou 96% na estação de Vilanculos no dia 21 de Fevereiro e a mínima observada foi de 57% em Vilanculos no dia 19 de Fevereiro, enquanto que o modelo regista a humidade relativa mínima de 79% no dia 18 de Fevereiro na estação de Vilanculos (tabela 4.5).

Análise da magnitude do vento

Tabela 4.6: Comparação dos resultados da magnitude do vento à 925 hPa (m/s)

Data		18.02	19.02	20.02	21.02	22.02	23.02
Beira	MM5	8.7	9.6	14.0	18.9	17.1	8.6
	INAM	10.0	15.0	10.7	18.7	15.4	13.0
	Erro	1.3	5.4	3.3	0.2	1.7	4.4
Vilanculos	MM5	7.6	10.2	13.4	17.4	17.8	16.0
	INAM	8.0	13.5	17.3	18.8	15.4	13.0
	Erro	0.4	3.3	3.6	1.4	2.4	4.1

O erro médio para a magnitude do vento varia entre 0.4 – 4.1 m/s para Vilanculos e entre 0.2 – 5.4 m/s na Beira. O erro médio absoluto para Vilanculos foi de 2.7 m/s e para Beira foi de 2.7 m/s . Para as duas estações a raiz do erro médio quadrático foi de 3.0 m/s .

A magnitude do vento foi registada no nível dos 925 hPa para o modelo, tendo se verificado o máximo no dia 21 de Fevereiro com a magnitude de

18.9 m/s , na estação de Beira e a observada pelo INAM foi de 18.8 m/s no dia 21 de Fevereiro em Vilanculos (tabela 4.6).

4.2.2 Análise da configuração II

As parametrizações das nuvens usadas nesta configuração são, Anthes-Kuo para os domínios um e dois enquanto que para o terceiro domínio usou-se o esquema Grell. Para a camada limite o esquema usado foi o MRF, a parametrização da radiação usada foi o esquema Simple Cooling, para a humidade explícita usou-se o esquema Simple Ice e para a temperatura do solo o esquema usado foi o de 5 camadas, como mostra a tabela 4.7.

Tabela 4.7: Definição da configuração II usada nas simulações.

Config do domínio com três malhas com 15 níveis verticais			
Malhas	1	2	3
Número de pontos	38 X 31	61 X 52	94 X 64
Resolução da Malha (km)	180	60	20
Passo no Tempo (s)	360	120	40
Aninhamento	two way	two way	two way
Parametrização Cumulus	Anthes-Kuo	Anthes-Kuo	Grell
Camada Limite (PBL)	MRF	MRF	MRF
Humidade Explícita	Simple Ice	Simple Ice	Simple Ice
Radiação	Simple	Simple	Simple
Temperatura no Solo	5 camadas	5 camadas	5 camadas

Desempenho da configuração II

Análise da pressão

O erro médio diário da pressão varia entre 1.1 – 4.1 hPa , para a estação da Beira e de 3.9 – 18.2 hPa para Vilanculos. Este erro tem uma tendência

oscilatória para as duas estações, como mostra a tabela 4.8.

O erro médio absoluto e a raiz do erro quadrático médio para a cidade da Beira são de 2.6 *hPa* e 3 *hPa*, respectivamente. E para Vilanculos, o erro médio absoluto é de 7.8 *hPa* e a raiz do erro quadrático médio foi de 9.0 *hPa*.

Tabela 4.8: Comparação dos resultados da pressão (*hPa*)

Data		18.02	19.02	20.02	21.02	22.02	23.02
Beira	MM5	1012.0	1013.4	1011.3	1010.2	1008.5	1008.9
	INAM	1013.4	1016.4	1015.4	1011.3	1010.5	1012.4
	Erro	1.4	3.0	4.1	1.1	2.4	3.5
Vilanculos	MM5	1012.3	1012.7	1009.3	1002.9	1003.8	1009.4
	INAM	1016.2	1018.3	1016.0	1021.1	1012.2	1013.4
	Erro	3.9	5.6	6.7	18.2	8.4	4.0

Análise da temperatura

O erro médio da temperatura varia entre 0.9 – 5.0°C para Beira e entre 0.5 – 4.5°C para a estação de Vilanculos. Este erro tem uma tendência oscilatória para as duas estações, tabela 4.9.

O erro médio absoluto para Beira e Vilanculos foi de 3.2°C, e a raiz do erro médio quadrático foi de 3°C para as duas estações.

Análise da precipitação acumulada

O erro médio da precipitação acumulada durante o tempo de simulação varia entre 19.0 – 33.4 *mm* por 24h para Beira e para Vilanculos, por falta de dados de observação, não foi possível calcular os erros médio e médio absoluto. Este erro tem uma tendência oscilatória para a estação da beira, como mostra a tabela 4.10.

Tabela 4.9: Comparação dos resultados da temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

Data		18.02	19.02	20.02	21.02	22.02	23.02
Beira	MM5	24.0	23.7	23.0	22.9	22.6	22.9
	INAM	24.9	26.3	26.0	26.0	27.7	27.7
	Erro	2.8	9.9	11.5	11.9	19.1	20.6
Vilanculos	MM5	25.0	23.3	22.8	23.0	22.8	22.6
	INAM	25.8	22.6	22.0	22.9	23.8	22.5
	Erro	4.6	7.2	13.3	13.9	16.5	16.3

Tabela 4.10: Comparação dos resultados da precipitação total (mm)

Data		18.02	19.02	20.02	21.02	22.02	23.02
Beira	MM5	0.0	12.0	3.6	14.3	17.3	24.3
	INAM	10.6	18.0	7.2	1.5	-	-
	Erro	-	33.3	19.4	19.7	-	-
Vilanculos	MM5	0.0	5.0	14.7	44.7	77.5	130.0
	INAM	43	-	-	-	-	-
	Erro	-	-	-	-	-	-

Análise da magnitude do vento à 925 hPa

O erro médio da magnitude do vento varia entre 1.2–5.2 m/s para Beira, enquanto para Vilanculos varia entre 0.3 – 4.0 m/s , tabela 4.11.

O erro médio absoluto para Beira e Vilanculos foi de 2.4 m/s e 3.1 m/s , respectivamente, e a raiz do erro médio quadrático foi de 3.0 m/s para as duas estações.

Análise da humidade relativa à 925 hPa

O erro médio da humidade relativa varia entre 8 – 20% para Beira e entre 15 – 42% para Vilanculos, de acordo com a tabela 4.12.

Tabela 4.11: Comparação dos resultados da magnitude do vento à 925 hPa (m/s)

Data		18.02	19.02	20.02	21.02	22.02	23.02
Beira	MM5	7.8	10.7	13.3	17.4	15.5	8.6
	INAM	10.0	15.0	10.7	18.7	15.4	13.0
	Erro	2.2	4.3	1.8	3.7	1.2	5.2
Vilanculos	MM5	7.7	10.2	13.4	16.6	19.2	15.9
	INAM	8.0	13.5	17.3	18.8	15.4	13.0
	Erro	0.3	3.3	3.9	2.2	3.8	3.9

O erro médio absoluto para Beira e Vilanculos foi de 14.0% e 33.0%, respectivamente, e a raiz do erro médio quadrático foi de 16% para Beira e 34% para a estação de Vilanculos.

Tabela 4.12: Comparação dos resultados da humidade relativa à 925 hPa (%)

Data		18.02	19.02	20.02	21.02	22.02	23.02
Beira	MM5	85.0	94.4	85.3	95.4	90.5	85.1
	INAM	80.0	73.0	83.0	79.0	79.0	80.0
	Erro	5.7	21.4	2.3	19.4	20.4	12.5
Vilanculos	MM5	78.3	99.5	99.8	99.9	99.5	90.4
	INAM	63.0	57.0	63.0	61.0	64.0	65
	Erro	15.3	42.4	36.7	38.0	34.0	34.0

4.2.3 Análise da configuração III

Nesta configuração, a parametrização das nuvens usada foi o esquema Grell para os três domínios. Para a camada limite planetária o esquema

usado foi MRF, para a parametrização da radiação usou-se o esquema Cloud Radiation, a parametrização da humidade explícita usou-se o modelo Warm Rain e, finalmente, para a temperatura da superfície usou-se o esquema de 5 camadas. A tabela 4.13 mostra a definição da configuração usada durante a integração.

Tabela 4.13: Definição da configuração III usada nas simulações.

Config do domínio com três malhas com 15 níveis verticais			
Malhas	1	2	3
Número de pontos	38 X 31	61 X 52	94 X 64
Resolução da Malha (km)	180	60	20
Passo no Tempo (s)	360	120	40
Aninhamento	two way	two way	two way
Parametrização Cumulus	Grell	Grell	Grell
Camada Limite (PBL)	MRF	MRF	MRF
Humidade Explícita	Warm Rain	Warm Rain	Warm Rain
Radiação	Cloud	Cloud	Cloud
Temperatura no Solo	5 camadas	5 camadas	5 camadas

Desempenho da configuração III

Análise da pressão

O erro médio da pressão varia entre 3.8 – 18.5 *hPa* para Vilanculos e entre 1.4 – 5.7 *hPa* para a estação da Beira, como mostra a tabela 4.14.

O erro médio absoluto para Beira e Vilanculos foi de 4.4 *hPa* e 7.6 *hPa*, respectivamente, e a raiz do erro médio quadrático foi de 5.0 *hPa* para Beira e 9 *hPa* para Vilanculos.

Tabela 4.14: Comparação dos resultados da pressão (*hPa*)

Data		18.02	19.02	20.02	21.02	22.02	23.02
Beira	MM5	1012.0	1012.6	1010.0	1005.9	1006.3	1006.7
	INAM	1013.4	1016.4	1015.4	1011.3	1010.5	1012.4
	Erro	1.4	3.8	5.4	5.5	4.6	5.7
Vilanculos	MM5	1012.3	1011.9	1007.7	1002.6	1007.5	1009.6
	INAM	1013.2	1018.3	1016.0	1021.1	1012.2	1013.4
	Erro	3.9	6.3	8.3	18.5	4.7	3.8

Análise da temperatura

O erro médio da temperatura varia entre 0.8 – 3.3°C para Beira e 0.5 – 3.1°C para Vilanculos, como se vê na tabela 4.15.

O erro médio absoluto para Beira e Vilanculos foi de 1.9°C e 1.8°C, respectivamente, e a raiz do erro médio quadrático foi de 2°C para as duas estações.

Tabela 4.15: Comparação dos resultados da temperatura (°C)

Data		18.02	19.02	20.02	21.02	22.02	23.02
Beira	MM5	24.1	24.7	24.8	24.6	24.4	24.5
	INAM	24.9	26.3	26.0	26.0	27.7	27.7
	Erro	2.8	9.9	11.5	11.9	19.1	20.6
Vilanculos	MM5	25.0	23.3	22.8	23.0	22.8	22.6
	INAM	25.8	25.7	24.9	24.5	24.2	24.3
	Erro	4.6	7.2	13.3	13.9	16.5	16.3

Análise da precipitação

O erro médio da precipitação varia entre 3.5 – 19.0 mm, para Beira e para Vilanculos não foi possível fazer a comparação dos resultados obtidos pelo modelo por falta de dados de observação. Este erro tem uma tendência oscilatória para a estação da Beira (tabela 4.16).

Tabela 4.16: Comparação dos resultados da precipitação total (mm)

Data		18.02	19.02	20.02	21.02	22.02	23.02
Beira	MM5	0.0	1.0	3.7	20.5	64.7	61.7
	INAM	109.6	18.0	7.2	1.5	-	-
	Erro	-	17.0	3.5	19.0	-	-
Vilanculos	MM5	0.0	2.8	11.7	18.0	33.7	81.8
	INAM	43.0	-	-	-	-	-
	Erro	-	-	-	-	-	-

Análise da magnitude do vento à 925 hPa

O erro médio da magnitude do vento varia entre 1.1 – 5.7 m/s na Beira e 0.1 – 12.7 m/s para Vilanculos, tabela 4.17.

O erro médio absoluto para Beira e Vilanculos foi de 3.2 m/s, e a raiz do erro médio quadrático foi de 4 m/s na Beira e 5 m/s em Vilanculos.

Análise da humidade relativa à 925 hPa

O erro médio da humidade relativa varia entre 5.5 – 11.7% na Beira, enquanto em Vilanculos varia entre 15 – 36%, tabela 4.18.

O erro médio absoluto para Beira e Vilanculos foi de 8% e 31%, respectivamente, e a raiz do erro médio quadrático foi de 8% na Beira e 32% em Vilanculos.

Tabela 4.17: Comparação dos resultados da magnitude do vento à 925 hPa (m/s)

Data		18.02	19.02	20.02	21.02	22.02	23.02
Beira	MM5	7.8	9.3	13.0	17.6	11.2	16.8
	INAM	10.0	15.0	10.7	18.7	15.4	13.0
	Erro	2.2	5.7	2.3	1.1	4.2	3.8
Vilanculos	MM5	7.7	9.6	15.6	6.2	15.3	12.3
	INAM	8.0	15.0	17.3	18.8	19.4	13.0
	Erro	0.3	3.9	1.8	12.7	0.1	0.3

Tabela 4.18: Comparação dos resultados da humidade relativa à 925 hPa (%)

Data		18.02	19.02	20.02	21.02	22.02	23.02
Beira	MM5	85.7	84.7	89.1	86.9	84.5	90.8
	INAM	80.0	73.0	83.0	79.0	79.0	80.0
	Erro	5.7	11.7	6.1	7.9	5.5	10.8
Vilanculos	MM5	78.3	93.4	99.3	93.0	99.9	99.9
	INAM	63.0	57.0	63.0	61.0	64.0	65
	Erro	15.3	36.4	36.3	32.0	35.0	33.7

4.3 Comparação entre as configurações usadas na simulação

A partir do mapa de campos de diferenças, figura F.1 a) e b), constata-se que ao longo do tempo de simulação, a temperatura apresenta valores positivos, dada pela diferença entre a configuração III e a configuração I (de controlo), como mostra a figura F.1 b). E para a diferença entre a configuração II e a configuração I (figura F.1 a)), é negativa, devido aos

valores da configuração de controle são ligeiramente maiores. Neste dia o olho do ciclone encontrava-se no Canal de Moçambique.

A pressão, é a variável importante na simulação do ciclone. Como se sabe, o ciclone é um centro de baixas pressões e, também, que é a variável que melhor mostra a sua trajectória. No entanto, a diferença entre a configuração em estudo e a configuração de controle é que definirá se o ciclone é menos ou muito intenso, em relação a pressão mínima no centro deste.

Se a diferença entre a configuração em estudo for positiva, o ciclone será menos intenso, como mostram as figuras D.1, a). Por outro lado, se esta for negativa dir-se-á, que o ciclone é muito intenso, figura D.1, b).

Quanto a humidade relativa, os campos de diferença mostram que a configuração II possui valores de humidade relativa maiores em relação à configuração I, por isso que a diferença é positiva ao longo da simulação, como mostra a figura G.1 a).

Quanto aos campos de diferenças entre a configuração III e a configuração de controle apresenta valores de diferença negativos, o que significa que a configuração de controle tem valores maiores de humidade em relação à configuração em estudo, como ilustra a figura G.1 b).

Os campos de diferença para a precipitação, figura E.1 a) e b), mostra que a configuração III ao longo da simulação apresenta valores maiores em relação a configuração de controle, pois a diferença entre eles é positiva. A configuração II apresenta valores relativamente maiores do que a configuração de controle, só que esta possui uma área maior com valores menores do que a configuração de controle, apesar desta ter uma vasta área coberta de chuva.

Capítulo 5

Conclusões e Recomendações

5.1 Conclusões

Os objectivos traçados para este trabalho foram alcançados, visto que, se simulou o ciclone Eline à posterior, e fez-se uma análise comparativa com os dados fornecidos pelo INAM, em que os resultados obtidos são satisfatórios. Os resultados obtidos através do modelo não diferem muito dos observados.

Os resultados obtidos pelo modelo pertencem ao domínio de maior resolução, de 20 km. O modelo é muito eficiente para a integração de fenómenos de mesoscala, por exemplo, a trajectória de um ciclone.

O modelo MM5 mostrou-se eficaz na variação dos parâmetros físicos nele incorporados, bem como na resolução horizontal, para o estudo da sua sensibilidade.

Das variações das opções físicas feitas, verificou-se que existe muitas diferenças entre os resultados obtidos, nas configurações usadas, para as variáveis comparadas, a saber, a pressão, temperatura, magnitude do vento à 925 *hPa* e humidade relativa à 925 *hPa*, para as estações em estudo.

A configuração III é a que simula bem o ciclone Eline, pois esta é a que possui valores de pressão à superfície mais baixas em relação as outras configurações.

5.2 Recomendações

- * Recomenda-se o uso do modelo MM5 para a previsão numérica em tempo real no INAM, visto que, ele garante a obtenção de bons resultados.
- * Uma das aplicações futuras que resulta da experiência adquirida no uso deste modelo, seria a comparação de mais casos históricos permitindo, assim, a disponibilidade de uma ferramenta pedagógica importante para os estudantes do curso de Meteorologia, quer na compreensão dos processos meteorológicos quer na aplicação noutras áreas.
- * Recomenda-se que se faça mais estudos de sensibilidade do modelo às diferentes opções físicas e a resolução horizontal, de modo a calibrar-se o modelo para uma previsão acurada.

Bibliografia

- [1] Anthes, R., 1997: *A Cumulus Parameterization scheme utilizing a one-dimension cloud model.*, Monthly Review 105, 270–286.
- [2] Cotton, R.w., Anthes, R., 1989: *Storm and Cloud Dynamics*; Academic Press.
- [3] De Pondeva, M.S.F.V and X. Zou, 2001a: *Moisture retrievals from simulated zenith delay "observation" and their impact on short-range precipitation forecast.* *Tellus*, 53A, 192–214.
- [4] De Pondeva, M.S.F.V and X. Zou, 2001b: *A case study of the variational assimilation of GPS zenith delay observations into a mesoscale model (In. Press, Journal of Applied Meteorology).*
- [5] Doty, B., 1995: *GrADS, The Grid Analysis and Display System.*
- [6] Dudhia, J., 1993: *A nonhydrostatic version of the Penn State-NCAR mesoscale model: Validation test and simulation of Atlantic Cyclone and cold front* Monthly Weather Review, 121, 1493–1513.
- [7] Dudhia, J., Gill, D., Guo, Y., Manning, K., Wang, W., Chiszar, J., 2000: *PSU/NCAR Mesoscale Modeling System Tutorial Class Notes and User's Guide: MM5 Modeling System Version 3.*
- [8] Holton, J., 1992: *An Introduction to Dynamic Meteorology.* Academic Press.
- [9] Mustafa, Mussa, 2000: Comunicação pessoal; INAM.

- [10] NWP Course, 1999: *Numerical Weather Prediction*;
<http://meted.ucar.edu/nwp/course/>.
- [11] Revista QP, Junho 2003, pag. 37.
- [12] <http://www.aoml.noaa.gov/hrd/tcfaq/tcfaqA.html>; october 16,2002.
- [13] <http://www.weathersa.co.za/stories/Eline.html>.
- [14] http://www.iag.usp.br/siae97/meteo/met_fura.htm.

Apêndice A

Cálculo de erros

Os erros foram calculados pelas seguintes fórmulas:

Erro Médio (Modelo - Observado):

$$\delta X_i = |X_i - X_{0i}| \quad (\text{A.1})$$

Erro médio absoluto (MAE):

$$\delta X = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - X_{0i})}{N} \quad (\text{A.2})$$

Raiz do erro quadrático médio (RMSE):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - X_{0i})^2}{N}} \quad (\text{A.3})$$

Erro médio absoluto percentual:

$$E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{X_i - X_{0i}}{X_{0i}} \right| \quad (\text{A.4})$$

Onde:

X_i - Valor obtido pelo modelo;

X_{0i} - Valor diário observado pelo INAM;

N - Número total de observações.

Apêndice B

Mapas diários da pressão ao
nível do mar

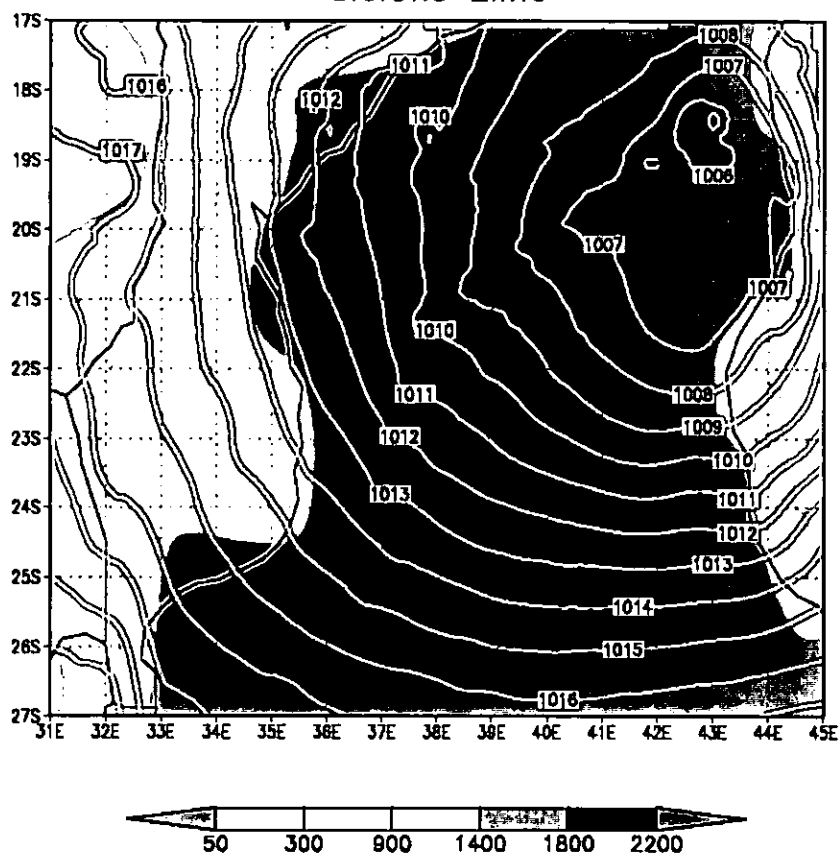
VALIDO 00Z 19 Fev 00

24h - Previsao

Pressao ao Nivel do Mar (hPa)

e terreno (metros)

Ciclone Eline



GRADS: COLA/ICES

Figura B.1: Entrada do ciclone no Canal de Moçambique

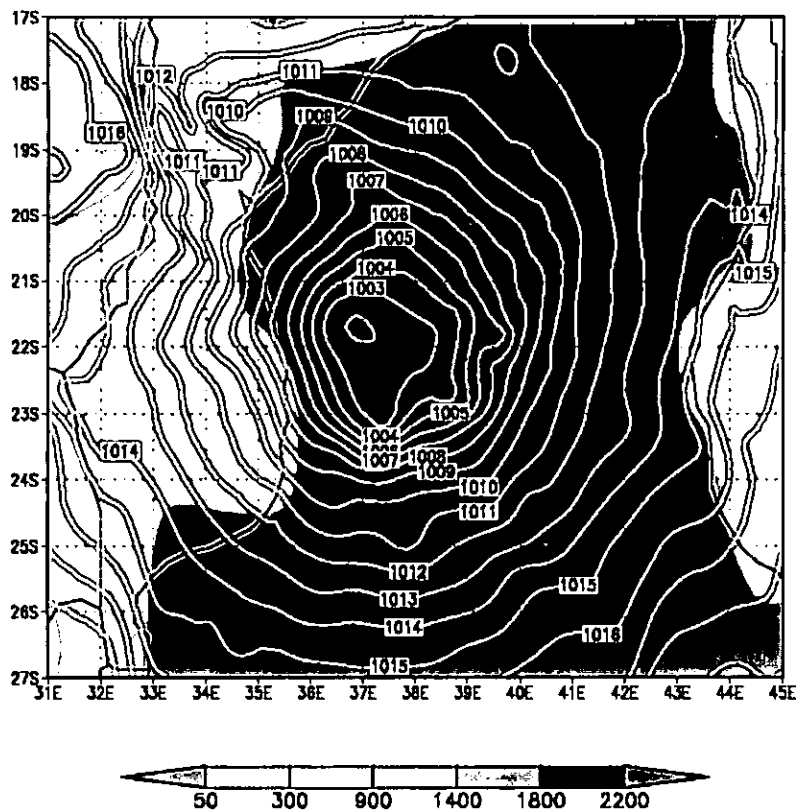
VALIDO 00Z 21 Feb 00

72h - Previsao

Pressao ao Nivel do Mar (hPa)

e terreno (metros)

Ciclone Eline



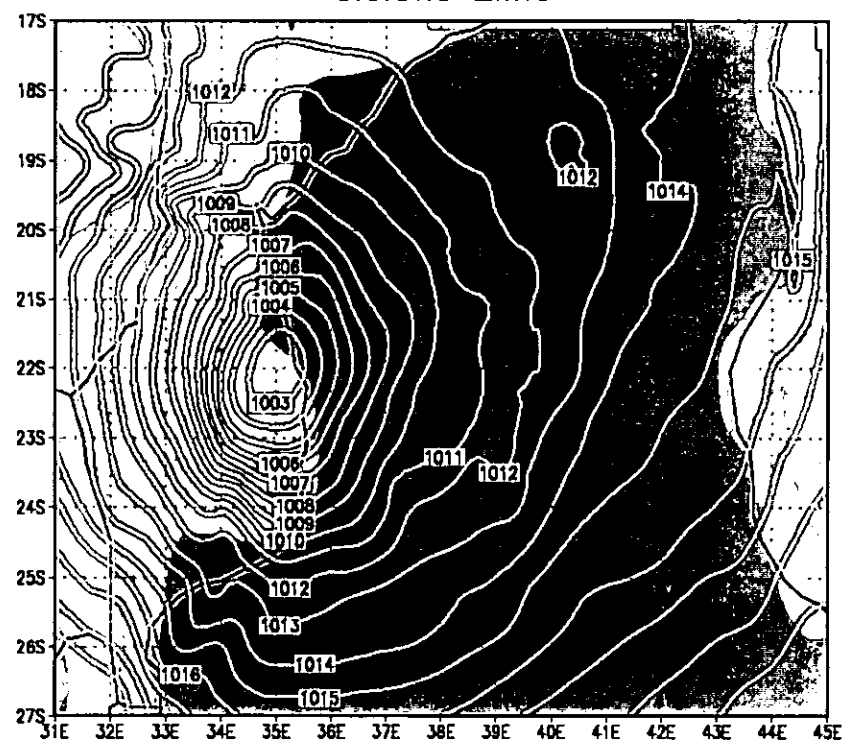
VALIDO 00Z 22 Fev 00

96h - Previsao

Pressao ao Nivel do Mar (hPa)

e terreno (metros)

Ciclone Eline

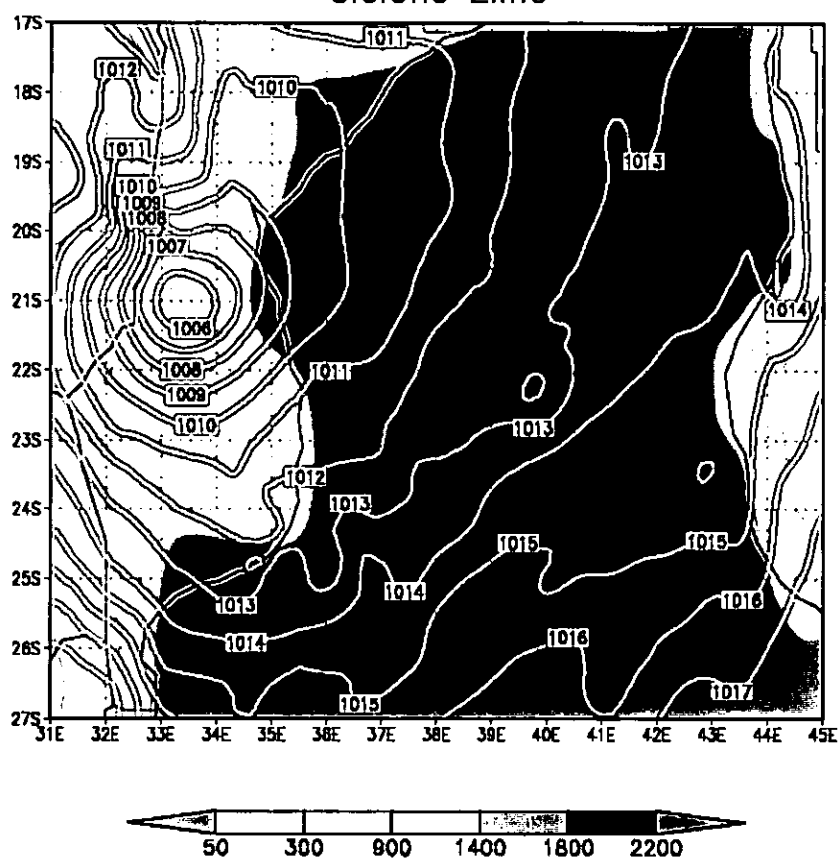


GRADS: COLA/ICES

Figura B.3: "Landfall" do ciclone sobre as Províncias de Sofala e Inhambane.

VALIDO 00Z 23 Fev 00 120h - Previsao
Pressao ao Nivel do Mar (hPa) e terreno (metros)

Ciclone Eline



GRADS: COLA/IGES

Figura B.4: Dissipação do ciclone na República do Zimbabwe

Apêndice C

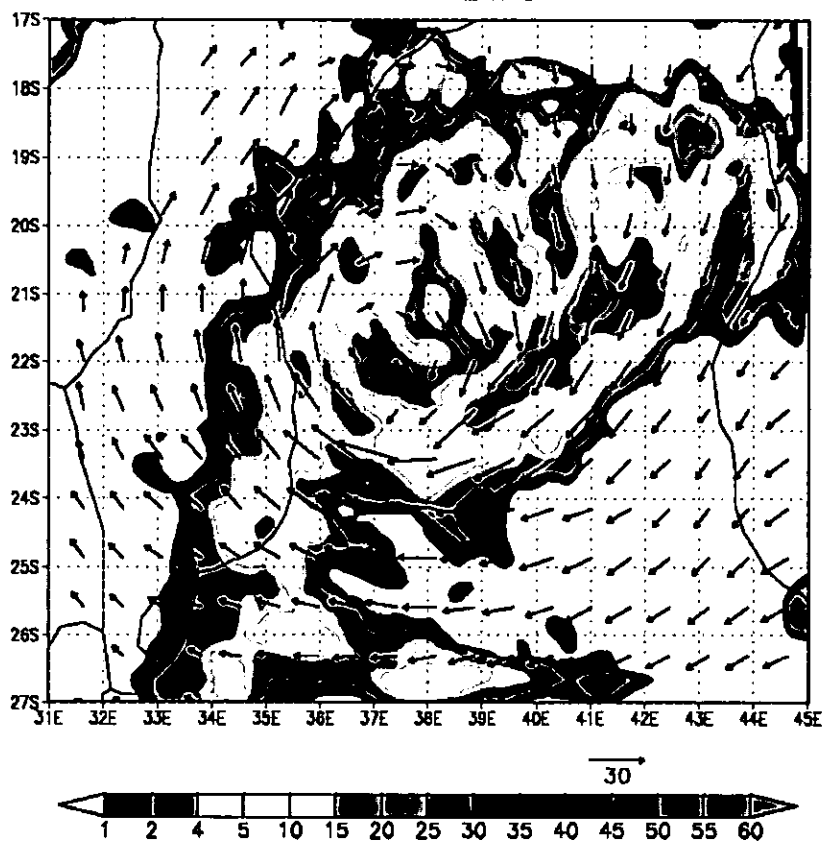
Mapas diários da precipitação e
ventos à 925 hPa

VALIDO 00Z 21 Fev 00

72h - Previsao

Precipitacao Total(cm) e ventos (m/s)

Ciclone Eline



GRADS: COLA/IGES

Figura C.1: As Províncias de Inhambane e Sofala experimentam ventos fortes e grandes quantidades de chuva.

Apêndice D

Mapas de campos de diferença
da pressão ao nível do mar

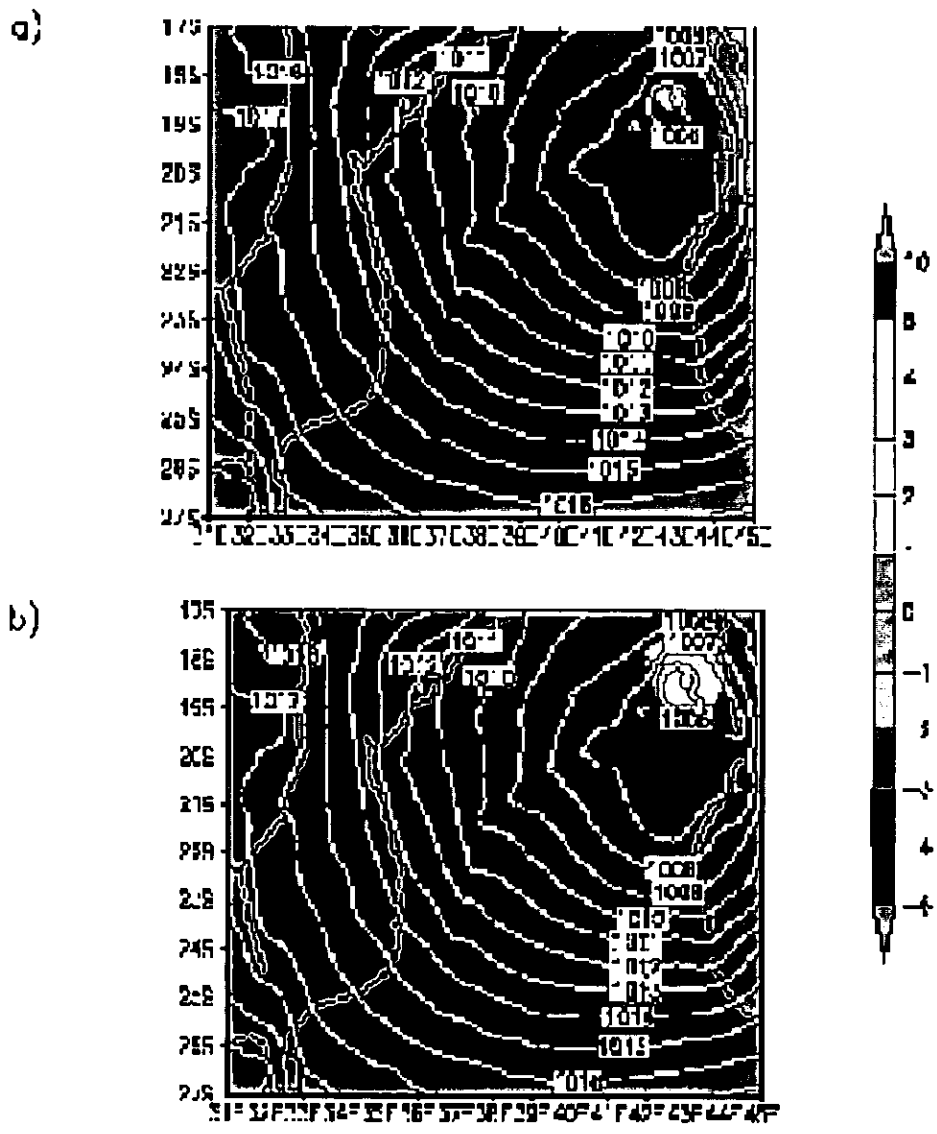


Figura D.1: Ciclone Eline: a) Diferença entre a configuração II e I b) Diferença entre a configuração III e I. Pressão ao nível do mar para 24h de previsão, válida para o dia 19 de Fevereiro de 2000

Apêndice E

Mapas de campos de diferença
da precipitação acumulada

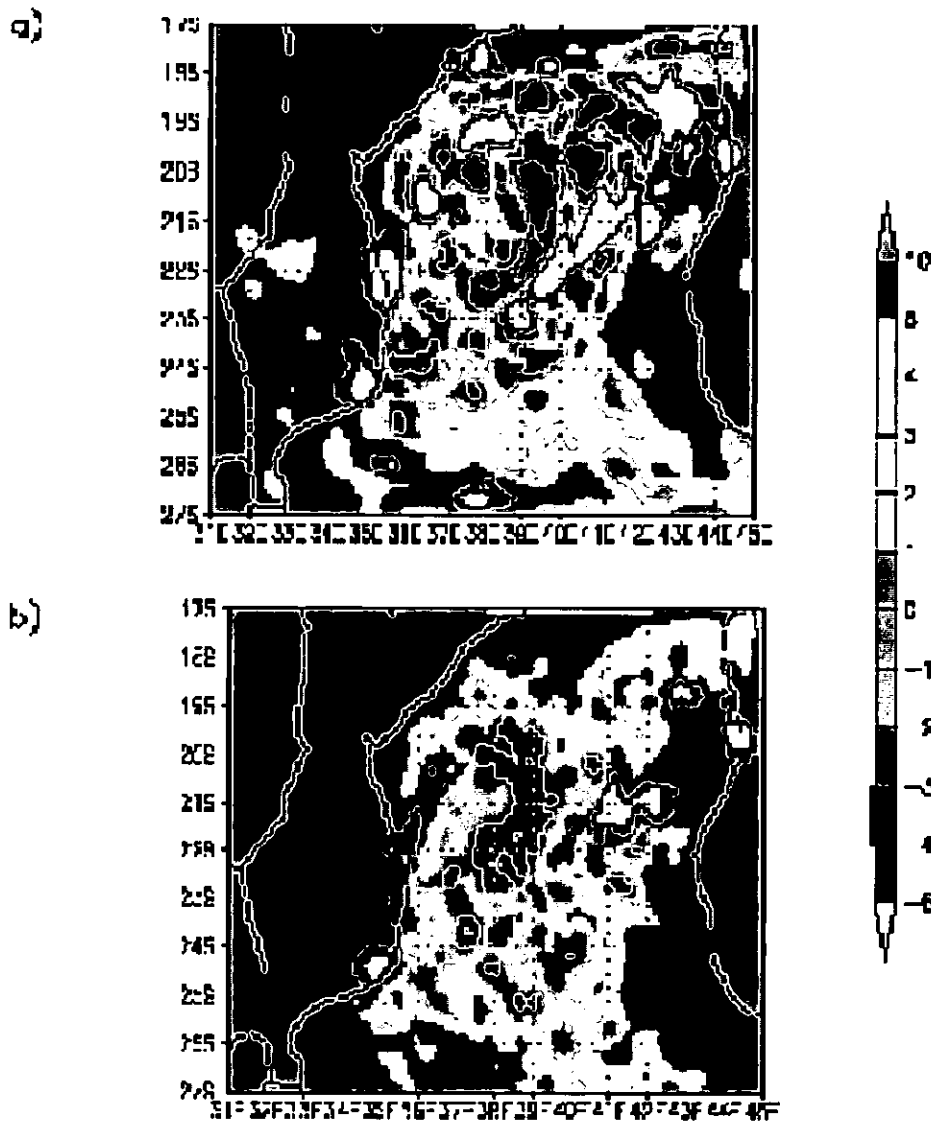


Figura E.1: Ciclone Eline: a) Diferença entre a configuração II e I b) Diferença entre a configuração III e I. Precipitação acumulada para 72h de previsão, válida para o dia 21 de Fevereiro de 2000

Apêndice F

Mapas de campos de
diferença da temperatura
superficial

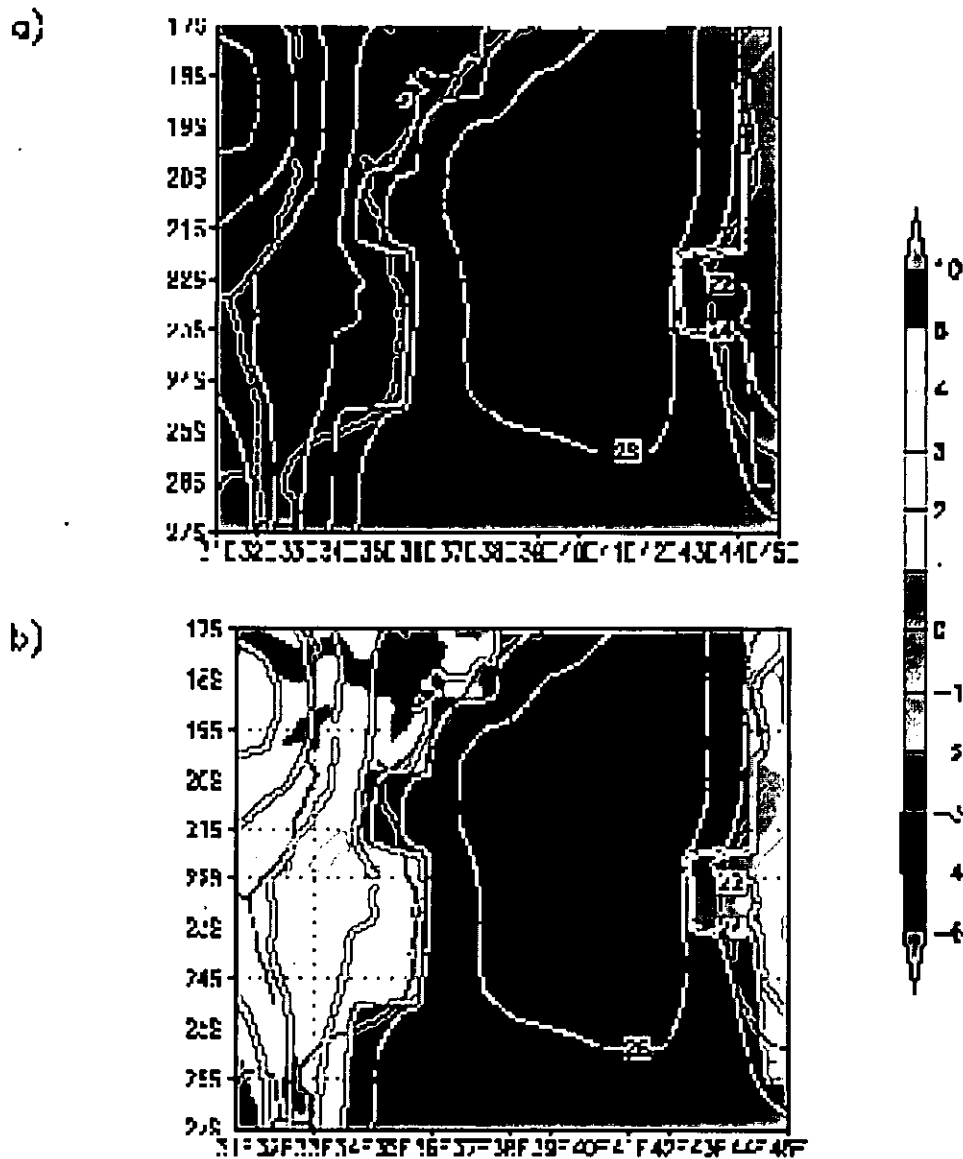


Figura F.1: Ciclone Eline: a) Diferença entre a configuração II e I b) Diferença entre a Configuração III e I. Temperatura superficial para 24h de previsão, válida para o dia 19 de Fevereiro de 2000

Apêndice G

Mapas de campos de diferença
da humidade relativa à 925 hPa

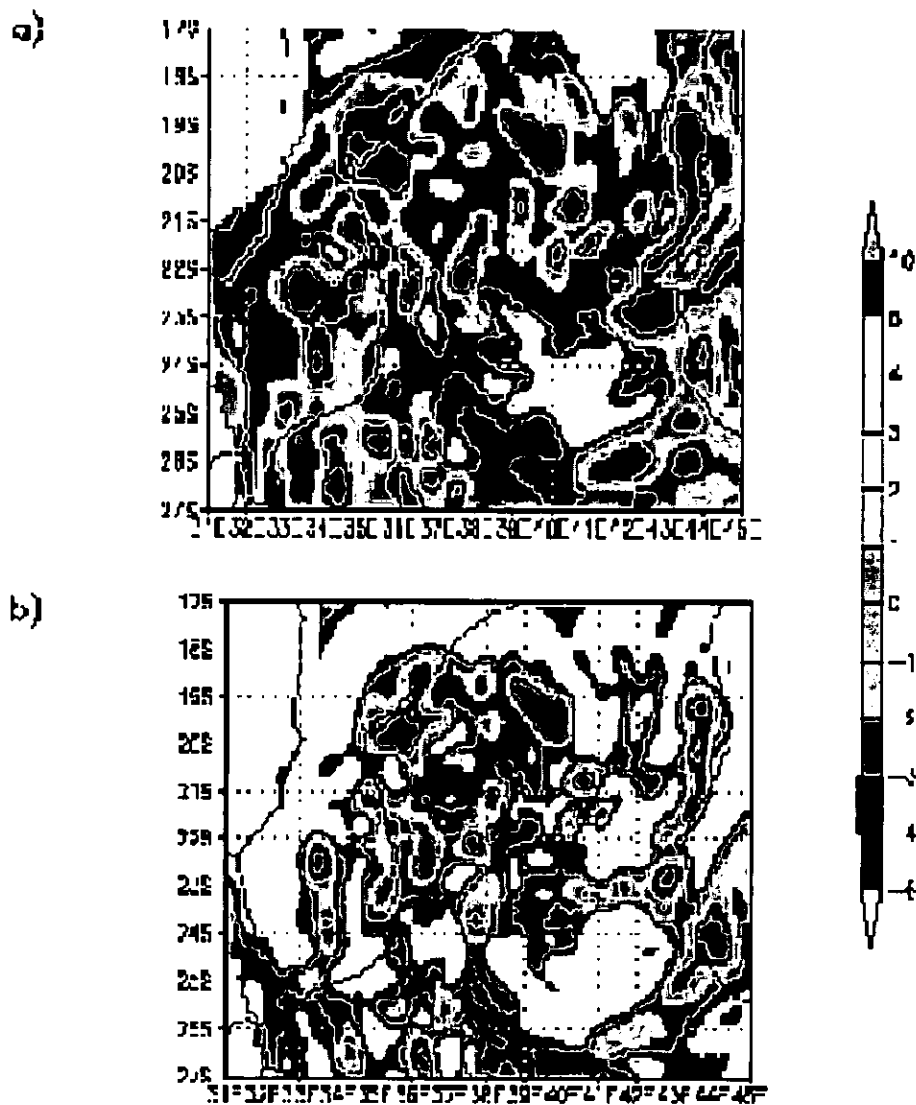


Figura G.1: Ciclone Eline: a) Diferença entre a configuração II e I b) Diferença entre a configuração III e I. Humidade relativa à 925 hPa para 48h de previsão, válida para o dia 20 de Fevereiro de 2000