

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS FÍSICAS E MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
CURSO DE BACHARELADO EM METEOROLOGIA

Guilherme Rafael Hammes

**ATUALIZAÇÃO DO SISTEMA DE PREVISÃO ATMOSFÉRICA REGIONAL POR
CONJUNTO ATRAVÉS DO MODELO WRF NA EPAGRI/CIRAM**

Florianópolis

2022

Guilherme Rafael Hammes

**ATUALIZAÇÃO DO SISTEMA DE PREVISÃO ATMOSFÉRICA REGIONAL POR
CONJUNTO ATRAVÉS DO MODELO WRF NA EPAGRI/CIRAM**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Meteorologia do Centro de Ciências Físicas e Matemáticas da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Meteorologia.

Orientador: Dr. Carlos Eduardo Salles de Araujo

Florianópolis

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Hammes, Guilherme Rafael
ATUALIZAÇÃO DO SISTEMA DE PREVISÃO ATMOSFÉRICA REGIONAL
POR CONJUNTO ATRAVÉS DO MODELO WRF NA EPAGRI/CIRAM /
Guilherme Rafael Hammes ; orientador, Carlos Eduardo
Salles de Araujo, 2022.
54 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências
Físicas e Matemáticas, Graduação em Meteorologia,
Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Meteorologia. 2. Previsão atmosférica por conjunto.
3. Ensemble weather forecast. 4. WRF. 5. Epagri/Ciram. I.
Araujo, Carlos Eduardo Salles de. II. Universidade
Federal de Santa Catarina. Graduação em Meteorologia. III.
Titulo.

Guilherme Rafael Hammes

**ATUALIZAÇÃO DO SISTEMA DE PREVISÃO ATMOSFÉRICA REGIONAL POR
CONJUNTO ATRAVÉS DO MODELO WRF NA EPAGRI/CIRAM**

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de bacharel e aprovado em sua forma final pelo Curso de Bacharelado em Meteorologia.

Florianópolis, 29 de abril de 2022.

Dra. Marina Hirota Magalhães
Coordenadora do Curso

Banca Examinadora:

Dr. Carlos Eduardo Salles de Araujo
Orientador
Instituição Epagri/Ciram

Dr. Felipe Mendonça Pimenta
Avaliador
Instituição UFSC

Dr. Mario Francisco Leal De Quadro
Avaliador
Instituição IFSC-SC

Este trabalho é dedicado à minha amada mãe Alzenir (in memoriam), que sempre me incentivou e acreditou na minha capacidade. Você continua sendo minha maior força e inspiração na vida. Sei que de algum lugar você olha por mim e está presente neste importante momento.

AGRADECIMENTOS

À instituição de ensino e pesquisa UFSC, essencial no meu processo de formação profissional e por tudo o que aprendi ao longo dos anos na minha jornada por três cursos de graduação.

Aos professores, pelas correções e ensinamentos que me permitiram apresentar um melhor desempenho no meu processo de formação profissional ao longo do curso.

À banca, formada pelos doutores Felipe Mendonça Pimenta e Mario Francisco Leal De Quadro, por suas sugestões, por doarem do seu tempo para esta avaliação e participarem deste momento de conclusão da minha jornada acadêmica.

Ao Dr. Carlos Eduardo Salles de Araujo por ter sido meu orientador e ter desempenhado tal função com dedicação, amizade, paciência e por abrir as portas para o início da minha carreira profissional como meteorologista.

Aos meus amados pais, Antonio e Alzenir, que sempre me incentivaram disponibilizando a melhor educação possível e apoiando em todas minhas decisões. E minha amada irmã Patrícia que apesar da distância continuou me aconselhando nessa fase acadêmica.

Sou muito grato a minha amada esposa Débora por seu apoio e amor, sem você este TCC não teria chegado ao fim. Obrigado por seu incentivo e compreensão durante todos esses anos.

RESUMO

Este trabalho descreve a implementação do sistema de previsão atmosférica por conjunto (weather ensemble forecast) implementado na Epagri/Ciram, no qual fornece os dados de entrada para a previsão de geadas da própria instituição. São levantados temas como as fontes das incertezas relacionadas à modelagem numérica da atmosfera e a motivação de utilizar o método de previsão atmosférica por conjunto para tentar representar essas incertezas intrínsecas à modelos numéricos caóticos, determinísticos e parametrizados. São explicados detalhes relacionados ao sistema computacional da Epagri/Ciram e a paralelização do modelo numérico e do sistema de previsão. Posteriormente é feita uma descrição do modelo Weather Research and Forecasting (WRF) utilizado nesta previsão por conjunto, como também os domínios, discretização das grades, condições iniciais e de contorno utilizadas. A dinâmica e físicas distintas e comuns dos membros são justificadas e brevemente descritas.

Palavras-chave: Previsão Atmosférica por Conjunto. WRF. Epagri/Ciram. Previsão de Geadas

ABSTRACT

This work describes the implementation of the weather ensemble forecast system implemented at Epagri/Ciram, where it provides input data for the institution's own frost forecast. It begins explaining the uncertainties sources intrinsic to chaotic, deterministic and parameterized weather numerical forecast models. It presents the benefits of the ensemble forecast method in an attempt to include these uncertainties in the outputs. After the motivation for the use of this method exposed, it describes the details of the entire implementation of the ensemble system, such as, the Epagri/Ciram computational system, the parallelization of the numerical model and the prediction system, details about the Weather Research and Forecasting Model (WRF), the domains, the initial and boundary conditions. More on, describes the ensemble configuration, as the dynamics and physics used in the different members with a brief description of each option, and the improvements made since the first ensemble version installed.

Keywords: Weather Ensemble Forecast. Epagri/Ciram. Weather and Research Forecast Model. WRF. Frost forecast.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema representando as evoluções de trajetórias no espaço da fase de diferentes modelos com diferentes condições iniciais. Linhas sólidas são o mesmo modelo, pontilhadas modelos diferentes. Os “+” são condições iniciais diferentes. A evolução real da atmosfera é representada pela linha sólida grossa com “T” localizando início e fim. “EM” representa a localização final do valor médio do resultado do conjunto e as elipses representam uma estimativa do espalhamento das previsões.	18
Figura 2 – Previsão geada total média (média do conjunto)	20
Figura 3 – Previsão geada total mínima (média menos 2 desvios padrão).....	21
Figura 4 – Previsão geada total máxima (média mais 2 desvios padrão).....	21
Figura 5 – Esquema do <i>cluster HPC</i> Epagri/Ciram.....	24
Figura 6 – Componentes da plataforma <i>WRF-ARW</i>	25
Figura 7 – Parametrizações de subgrade e sua interação.....	26
Figura 8 – Domínios antigo das grades da previsão por conjuntos <i>WRF</i> com abrangência de área menor. Pontos 1 e 2 referentes ao centro de cada grade.....	30
Figura 9 – Novos domínios das grades para previsão por conjuntos <i>WRF</i> . Domínio 1 com resolução 9 km e Domínio 2 de 3 km. Pontos 1 e 2 referentes ao centro de cada grade.	31
Figura 10 – Regiões de ciclogênese identificadas em estudos de <i>ensembles</i> multimodelos com dados reanalisados.....	32
Figura 11 – Densidade de ciclogênese (contornos cinza) e trajetória (colorido) para os <i>ensembles</i> climáticos e reanálises.....	33
Figura 12 – Exemplo de coordenada vertical híbrida.....	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais mudanças entre as versões do sistema de previsão por Conjunto.	27
Tabela 2 – Detalhes das duas grades do modelo <i>WRF</i> usadas na previsão por conjunto Epagri/Ciram.	34
Tabela 3 – Configuração dos membros do conjunto da versão antiga e as parametrizações adotadas para cada membro do conjunto. O número ao lado do nome do esquema se refere ao código da opção no arquivo <i>namelist.input</i>	41
Tabela 4 – Configuração dos membros do conjunto da versão atual e as parametrizações adotadas para cada membro do conjunto. O número ao lado do nome do esquema se refere ao código da opção no arquivo <i>namelist.input</i>	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AFWA	Air Force Weather Agency
ARW	Advanced Research WRF
CCNs	Núcleos de condensação de nuvens
CFL	Condição de Courant Friedrichs Lewy
CFSR	Climate Forecast System Reanalysis
CLA	Camada Limite Atmosférica
CLP	Camada Limite Planetária
DTC	Developer Testbed Center
EPS	Ensemble Prediction System
ERA-Interim	Global atmospheric reanalysis from ECMWF
FAA	Federal Aviation Administration
FDP	Função de Densidade de Probabilidade
GCM	General Circulation Models
GFS	Global Forecast System
GRIMS	Global/Regional Integrated Modeling System
HPC	High Performance Computing
JAEA	Japan Atomic Energy Agency
KF	Esquema de convecção Kain Fritsch
L	Comprimento de Munin Obukhov
LES	Large Eddy Simulation
LSM	Land and Surface Model
LWC	Liquid Water Content
MCICA	Monte Carlo Independent Column Approximation
MET	Model Evaluation Tools
MM5	Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model
MPI	Message Passing Interface
MSKF	Esquema de convecção multiescala Kain Fritsch
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NFS	Network File System
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NOMADS	NOAA Operational Model Archive and Distribution System

NRL	Naval Research Laboratory
NWP	Numerical Weather Prediction
OPENMP	Open Multi Processing interface
OU	University of Oklahoma
PAL	Modelo de Pluma Gaussiano
REGCM4	Regional Climate Model system from NCAR
Ri	Número de Richardson
RRTM	Rapid Radiative Transfer Model
RRTMG	Rapid Radiative Transfer Model for GCMs
SST	Sea Surface Temperature
UCM	Unobserved Component Model
USAF	United States Air Force
Z	Altura
WRF	Weather Research and Forecasting Model
WRFDA	WRF Data Assimilation
WSF	WRF Software Framework

LISTA DE SÍMBOLOS

Ψ Parâmetro de estabilidade extra do modelo MM5

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	DESCRIÇÃO DO <i>CLUSTER HPC</i> DA EPAGRI/CIRAM.....	23
3	O MODELO WRF	24
4	SISTEMA PREVISÃO ATMOSFÉRICA REGIONAL POR CONJUNTO DA EPAGRI/CIRAM.....	26
5	CONDIÇÕES INICIAL E DE CONTORNO DA PREVISÃO POR CONJUNTO DA EPAGRI/CIRAM	28
6	DEFINIÇÃO DAS GRADES DA PREVISÃO ATMOSFÉRICA POR CONJUNTO DA EPAGRI/CIRAM	30
6.1	Domínios.....	30
6.2	Discretização horizontal das grades.....	34
6.3	Discretização Vertical.....	35
7	DINÂMICA E FÍSICA UTILIZADAS NA PREVISÃO ATMOSFÉRICA POR CONJUNTO DA EPAGRI/CIRAM.....	36
7.1	Configuração comum nos membros do conjunto	36
7.1.1	Núcleo Dinâmico do modelo.....	37
7.1.2	Difusão completa na CLP.....	37
7.1.3	Amortecimento em níveis superiores (<i>damp_opt</i>)	37
7.1.4	Amortecimento de velocidade vertical (<i>w_damping</i>)	37
7.1.5	O arrasto da onda gravitacional.....	38
7.2	Processos físico-sem comum dos membros	38
7.2.1	Interação da fração de nuvem de subgrade com a radiação.....	38
7.2.2	Modelo de radiação de ondas longas e curtas do <i>WRF</i>	38
7.2.3	Modelo de Solo	39
7.2.4	Modelo de dossel urbano	39
7.2.5	Modelo de Nevoeiro	39

7.2.6	Efeito das nuvens para a profundidade óptica da radiação.....	40
7.2.7	Correção topográfica para ventos de superfície.....	40
7.2.8	Timestep do modelo da CLP e Cumulus.....	40
7.3	Físicas distintas dos membros do conjunto.....	40
7.3.1	Definição dos membros do conjunto	40
7.3.2	Atualização das parametrizações distintas dos membros	41
7.3.3	Microfísica	44
<i>7.3.3.1</i>	<i>WRF Double-Moment 7 class.</i>	<i>44</i>
<i>7.3.3.2</i>	<i>Thompson aerosol-aware.....</i>	<i>45</i>
<i>7.3.3.3</i>	<i>Morrison double-moment.....</i>	<i>45</i>
7.3.4	Convecção/Cumulus	46
<i>7.3.4.1</i>	<i>Multi-scale Kain-Fritsch scheme para grade externa D1</i>	<i>46</i>
<i>7.3.4.2</i>	<i>New Tiedtke scheme para grade externa D1</i>	<i>47</i>
7.3.5	Convecção rasa GRIMS para grade D2.....	47
7.3.6	Camada Limite Planetária (CLP)	47
<i>7.3.6.1</i>	<i>Esquema CLP YSU</i>	<i>48</i>
<i>7.3.6.2</i>	<i>Esquema CLP ACM2</i>	<i>48</i>
7.3.7	Camada de Superfície.....	48
<i>7.3.7.1</i>	<i>Camada de Superfície MM5 Revisada.....</i>	<i>49</i>
<i>7.3.7.2</i>	<i>Camada de Superfície Pleim-Xiu.....</i>	<i>49</i>
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
	REFERÊNCIAS	52

1 INTRODUÇÃO

Partindo do princípio de que a atmosfera é um sistema dinâmico caótico e de que a incerteza é uma característica fundamental do tempo, de sua climatologia sazonal e da previsão hidrológica, nenhuma previsão é completa sem uma descrição de sua incerteza (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2006). Porém os modelos numéricos de previsão do tempo utilizados comumente são determinísticos, isto é, não representam incertezas. Uma vez fornecido um estado atmosférico inicial particular (ventos, temperaturas, umidades, etc., em todos níveis) e as condições de contorno, cada modelo irá produzir um único resultado particular. Executar novamente o mesmo modelo com as mesmas entradas não altera o resultado. Atualmente, para representar a incerteza nas previsões numéricas da atmosférica, os principais centros meteorológicos utilizam-se de métodos probabilísticos aplicados aos modelos (BUIZZA et al, 2005). Estas previsões são chamadas de sistemas de previsão por conjunto, *ensemble prediction system (EPS)*. Este método pode ser explicado, de forma simplificada, como uma técnica para gerar resultados estocásticos com a utilização de rodadas de modelos determinístico e assim resultar em uma probabilidade da previsão atmosférica que possa representar as incertezas envolvidas. Nos parágrafos seguintes serão detalhadas as fontes dessas incertezas relacionadas à representação da atmosfera nos modelos numéricos, como também uma explicação do método *ensemble* (por conjunto) com um breve histórico do seu surgimento e evolução.

Na introdução de seu livro, Wilks (2019) explica que idealmente os modelos atmosféricos poderiam fornecer previsões sem incertezas, mas na realidade não o fazem por duas razões. A primeira é que embora os modelos possam ser muito impressionantes e darem boas aproximações ao comportamento atmosférico, eles não são representações completas e verdadeiras dos processos físicos governantes. Segundo Wilks (2019), essa é uma fonte de incerteza importante e essencialmente inevitável nos modelos numéricos da atmosfera. Wilks (2019) explica que a existência deste problema ocorre em decorrência de que alguns processos físicos relevantes operam em escalas muito pequenas e/ou rápidas para serem representadas explicitamente, e seus efeitos em escalas maiores devem ser aproximados de alguma forma usando apenas as informações de grande escala. Parte dos erros dessas simulações se origina das aproximações numéricas e da representação dos processos físicos no modelo e nas parametrizações (STENSRUD et al, 2000). Leutbecher e Palmer (2008)

também relatam a incerteza na representação da dinâmica e física da atmosfera por algoritmos numéricos e citam exemplos como erros de truncamento, a incerteza de parâmetros que descrevem processos em escala de subgrade como convecção *cumulus* em um modelo global.

Entretanto, mesmo no caso do modelo ser ideal, representando explicitamente todos processos, ainda não seria possível escapar da incerteza proveniente do que veio a ser conhecido como caos dinâmico. Este fenômeno foi descoberto pelo matemático e meteorologista Edward Norton Lorenz (LORENZ, 1963). Esta é a segunda fonte de incertezas nos modelos numéricos, também relatada por Wilks (2019). Pode ser explicada, de forma simplificada, pelo fato de que a evolução no tempo de um sistema dinâmico não linear e determinístico (modelo numérico da atmosfera) depende muito sensivelmente das condições iniciais. Caso o mesmo modelo seja iniciado com condições iniciais apenas ligeiramente diferentes, os resultados poderão resultar em grandes divergências. Leutbecher e Palmer (2008) relatam que os primeiros estudos teóricos sobre o crescimento dos erros (incertezas) em previsões atmosféricas, os limites implícitos de previsão e as previsões probabilísticas surgiram no final da década de 1950 até o início da década de 1970. Esta área de pesquisa meteorológica é referida como previsibilidade (*predictability*). Lewis (2005) analisa em profundidade e faz um histórico citando os trabalhos pioneiros de Thompson, Lorenz, Epstein e Leith como fundamentais para o surgimento da pesquisa de previsibilidade e previsão por conjunto (*ensemble*).

De acordo com Leutbecher e Palmer (2008) a única técnica viável para obter estimativas da função de densidade de probabilidade (FDP) evoluída, não linearmente, são as técnicas de Monte-Carlo que amostram a FDP no momento inicial e evoluem os estados iniciais amostrados com o modelo de previsão, ou uma versão perturbada do modelo de previsão para explicar a incerteza do modelo. A amostra é geralmente referida como *ensemble* e os elementos individuais como **membros** do *ensemble*. Epstein (1969) utilizando o método probabilístico de Monte-Carlo foi quem fez essa primeira abordagem e conexão de modelos atmosféricos determinísticos gerando resultados estocásticos probabilísticos (FDP). Lewis (2005) traça a evolução e a definição do método *ensemble* usado atualmente, no qual teve início na utilização do método de Monte-Carlo e suas derivações para gerar as condições iniciais ligeiramente diferentes (perturbações da condição inicial) até chegar à abordagem atual, mais ampla. Esta definição atualizada e mais abrangente sobre o método *ensemble* engloba tanto membros com condições iniciais perturbadas, multimodelos (dinâmica e física

diferentes), como também forçantes diferentes na execução da previsão atmosférica probabilística para um mesmo período de tempo. Deste modo, o método *ensemble* tem a capacidade de representar tanto as incertezas relacionadas ao estado inicial da simulação como também às de origem na representação imperfeita dos modelos atmosféricos.

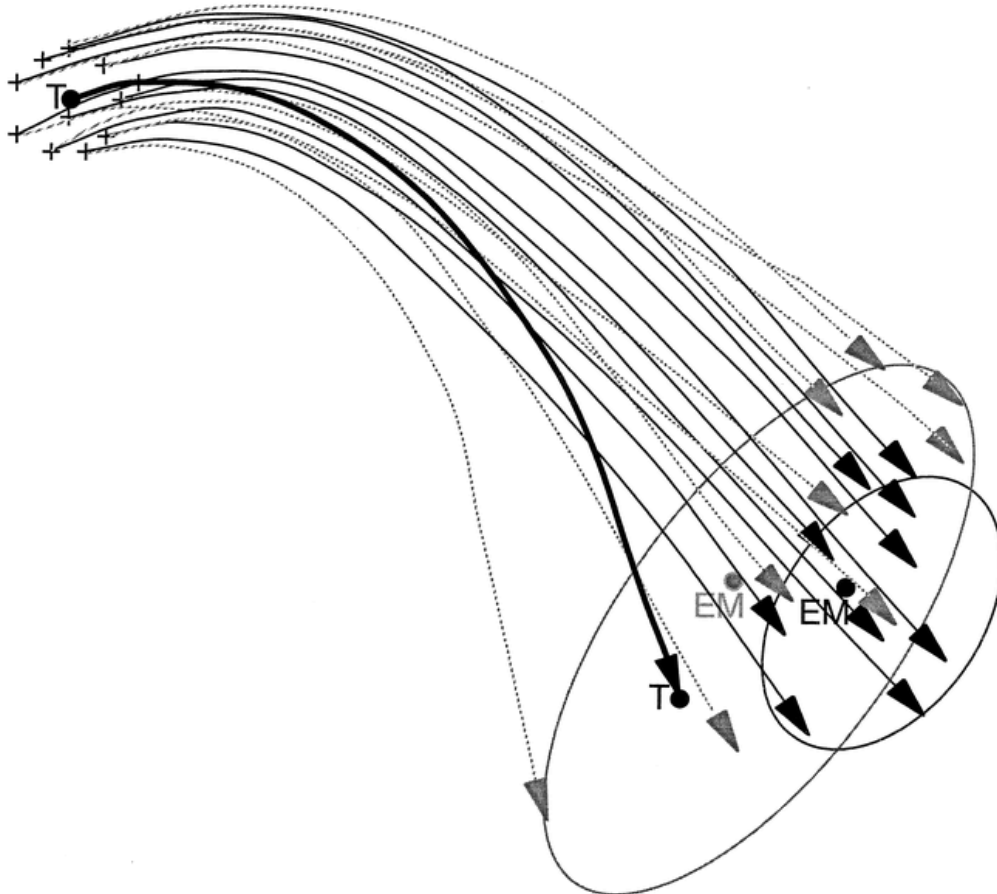
Portanto, a primeira alternativa para implementar uma previsão atmosférica por conjunto, mais clássica e comumente utilizada, é iniciar os membros com o mesmo modelo numérico e usando condições iniciais perturbadas. Desta forma, conforme relatado por Lorenz (1963), as perturbações permitem que um único modelo numérico apresente diferentes trajetórias para as partículas ao longo do tempo. Stensrud et al. (2000) relatam que historicamente a técnica de condições iniciais perturbadas foi a mais utilizada para a previsão por conjunto. Porém Stensrud et al. (2000) também acrescentam que as previsões de um modelo idêntico usando diferentes condições iniciais tendem a ser altamente correlacionadas, de modo que os erros sistemáticos do modelo numérico possam afastar todas as previsões da evolução da atmosfera real e em direção ao clima do modelo. Esta abordagem assume a hipótese de que o modelo adotado é perfeito, no entanto é notório que os modelos numéricos não são representações perfeitas da atmosfera.

A segunda alternativa de aplicar o método de previsão por conjunto é através da utilização de diferentes representações de processos físicos, ou multimodelos, com uma condição inicial igual. Esta abordagem faz uso de diferentes modelos meteorológicos, *multimodel ensembles*, ou de diferentes parametrizações para os processos físicos de subgrade. O aspecto positivo de utilizar diferentes modelos físicos é reduzir a correlação das saídas obtidas, e com isto obter um conjunto de resultados que possa representar melhor a FDP atmosférica real em relação a uma previsão por conjunto que não inclua variações na física do modelo (PERSON, 1996). Stensrud et al. (2000) discutem que uma previsão numérica por conjuntos de físicas diferentes produz uma variância de duas a seis vezes mais rápido, durante as primeiras 12 horas de rodada do modelo, do que a variância do *ensemble* de condição inicial.

A terceira alternativa para realizar uma previsão atmosférica por conjunto, mais completa, porém com maior complexidade, é utilizar as duas fontes de incertezas, modelos com processos físicos diferentes e condições iniciais diferentes. Ao utilizar esta abordagem pode ser possível aumentar a precisão e a utilidade de um conjunto criando uma maior divergência nas trajetórias do conjunto do que seria criado usando apenas diferentes

condições iniciais (STENSRUD ET AL., 2000). Esta abordagem mais abrangente das incertezas é ilustrada na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, onde podemos ver o esquema de diferentes modelos com diferentes condições iniciais e suas evoluções de trajetórias no espaço da fase.

Figura 1 – Esquema representando as evoluções de trajetórias no espaço da fase de diferentes modelos com diferentes condições iniciais. Linhas sólidas são o mesmo modelo, pontilhadas modelos diferentes. Os “+” são condições iniciais diferentes. A evolução real da atmosfera é representada pela linha sólida grossa com “T” localizando início e fim. “EM” representa a localização final do valor médio do resultado do conjunto e as elipses representam uma estimativa do espalhamento das previsões.



Fonte: STENSRUD ET AL., 2000

Ao simular a atmosfera em escala regional, os aspectos da previsão que tem maior importância de serem representados diferem em relação à outras escalas. Por exemplo, em um modelo global, características gerais ligadas a escala sinótica terão maior importância, isto é, a dinâmica da atmosfera inclusa nas equações de movimento e que constituem a fundação ou núcleo do modelo numérico. No entanto, em escalas menores, o modelo atmosférico está

primeiramente ligado com as características regionais da superfície (topografia, cobertura do solo) e aos parâmetros sensíveis do tempo (meteorológico) regional, processos convectivos, o desenvolvimento diurno da camada limite planetária (CLP), a quantidade de água precipitável na atmosfera, entre outros, os quais são frequentemente influenciados diretamente pelas aproximações assumidas nas parametrizações. Partindo desta análise de escala, pode-se chegar constatação que membros de *ensemble* com representações físicas diferentes (parametrizações diferentes) terão maior sensibilidade e variância nos resultados quando usados para *downscaling*, isto é, para simulações regionais, (meso e micro escala meteorológicas) quando comparados às simulações de maior escala.

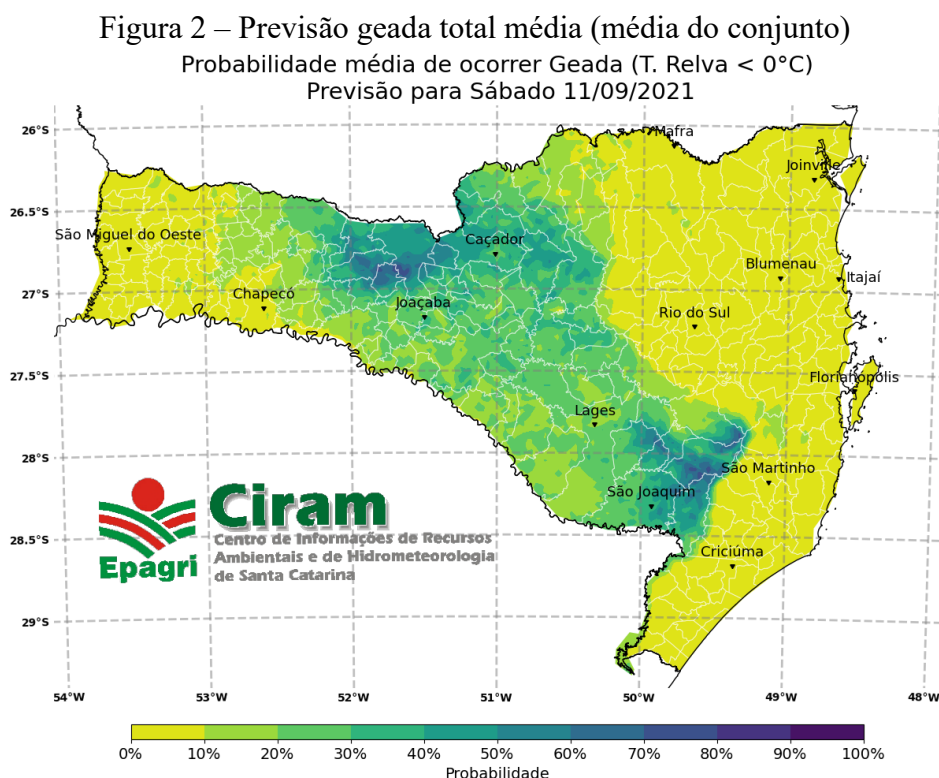
O modelo atmosférico *Weather Research and Forecasting (WRF)*, pode ser considerado como uma plataforma para simulação da atmosfera pois contém diversas representações de processos físicos como microfísica de nuvens, camada limite planetária, radiação, superfície terrestre, etc. Esta variedade de representações (modelos) para cada processo físico, que são provenientes de instituições e pesquisadores de todo mundo, foram integradas na plataforma do *WRF* e facilita sua utilização para estudos e comparações de física diferentes para um mesmo domínio. Esta diversidade de opções de físicas diferentes também facilita a implementação de uma solução de previsão por conjunto. E por este motivo o *WRF* foi o modelo atmosférico escolhido para a implementação de um sistema de previsão por conjunto no Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia da Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (Epagri/Ciram).

O objetivo principal da previsão regional por conjunto implantada na Epagri/Ciram é fornecer um *ensemble* de *downscaling* utilizando parametrizações diferentes como entrada para o modelo especialista de previsão de geadas do estado de Santa Catarina (ARAUJO, 2020). As variáveis atmosféricas utilizadas como entrada do modelo de geadas são as temperaturas mínimas diárias, vento e umidade relativa no momento da mínima temperatura, todas em superfície.

A previsão de geadas é uma ferramenta computacional online que fornece aos agricultores uma avaliação das probabilidades (chances) de ocorrer geadas de diferentes intensidades em qualquer ponto do território catarinense e com um horizonte de previsão de cinco dias. A utilização dessa ferramenta permite planejar a adoção de medidas de proteção, de forma a evitar ou minimizar os danos provocados pelas geadas nas culturas. Essa ferramenta pode ser acessada por meio do endereço eletrônico da Epagri/Ciram, na aba

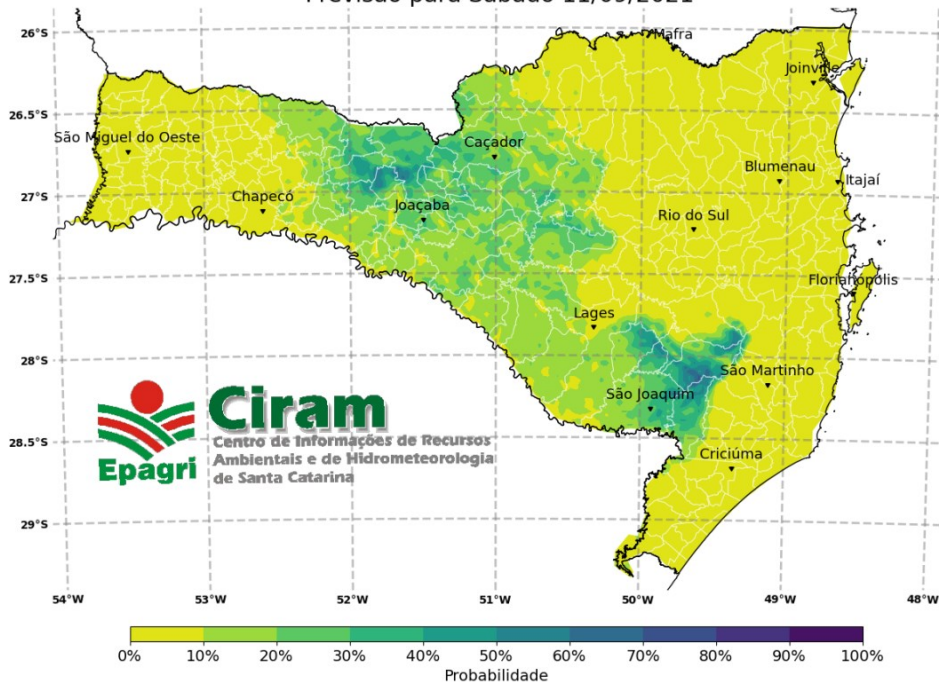
SERVIÇOS/PREVISÃO DO TEMPO/PREVISÃO DE GEADAS, ou diretamente pelo link: <https://ciram.epagri.sc.gov.br/index.php/previsao-geada/> (SANTA CATARINA, 2022).

As probabilidades de ocorrência de geada por classe de intensidade são calculadas para cada membro do conjunto de forma individual e ao final são computados as médias e os desvios padrão das probabilidades do conjunto por classe de geada. Nessa metodologia são adotadas três classes: **Geada Total** (ocorrência da temperatura mínima de relva menor que 0°C), **Geada Moderada Forte** (ocorrência da temperatura mínima de relva menor que -2°C) e **Geada Forte** (ocorrência da temperatura mínima de relva menor que -6°C). Para cada classe de geada é calculada uma média da previsão do conjunto e dois valores extremos, mínimo e máximo (computados a partir da média e dois desvios padrão do conjunto) para representação das incertezas. A Figura 2, Figura 3 e Figura 4 mostram a variância da previsão da classe Geada Total para estes três valores representativos da FDP da previsão por conjunto. Estes produtos (Figura 2, Figura 3 e Figura 4) são resultados do *ensemble* atual, após a atualização do sistema de previsão atmosférica regional por conjunto em operação na Epagri/Ciram.



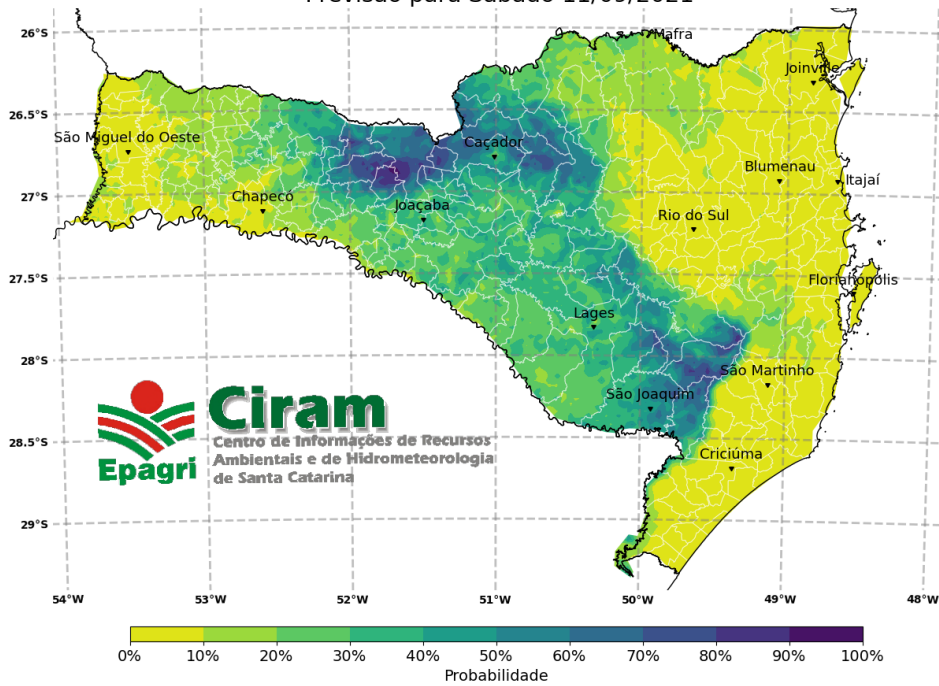
Fonte: Epagri/Ciram

Figura 3 – Previsão geada total mínima (média menos 2 desvios padrão)
 Probabilidade mínima de ocorrer Geada (T. Relva < 0°C)
 Previsão para Sábado 11/09/2021



Fonte: Epagri/Ciram

Figura 4 – Previsão geada total máxima (média mais 2 desvios padrão)
 Probabilidade máxima de ocorrer Geada (T. Relva < 0°C)
 Previsão para Sábado 11/09/2021



Fonte: Epagri/Ciram

Além do objetivo específico de fornecer dados de entrada para a previsão de geadas da Epagri/Ciram, este sistema *ensemble* tem como objetivo geral fornecer uma previsão *ensemble* regional com uma distribuição estatística que possa representar melhor a condição atmosférica catarinense. Este sistema também pode fornecer dados para gerar produtos de previsão meteorológica ou servir de forçante para outros modelos da instituição, como modelos hidrodinâmicos, hidrológicos, agrometeorológicos, entre outros. E por executar várias previsões em paralelo (membros do conjunto), pode também servir como uma plataforma de avaliação de desempenho, validação e calibração de diferentes combinações de parametrizações e configurações do modelo *WRF*.

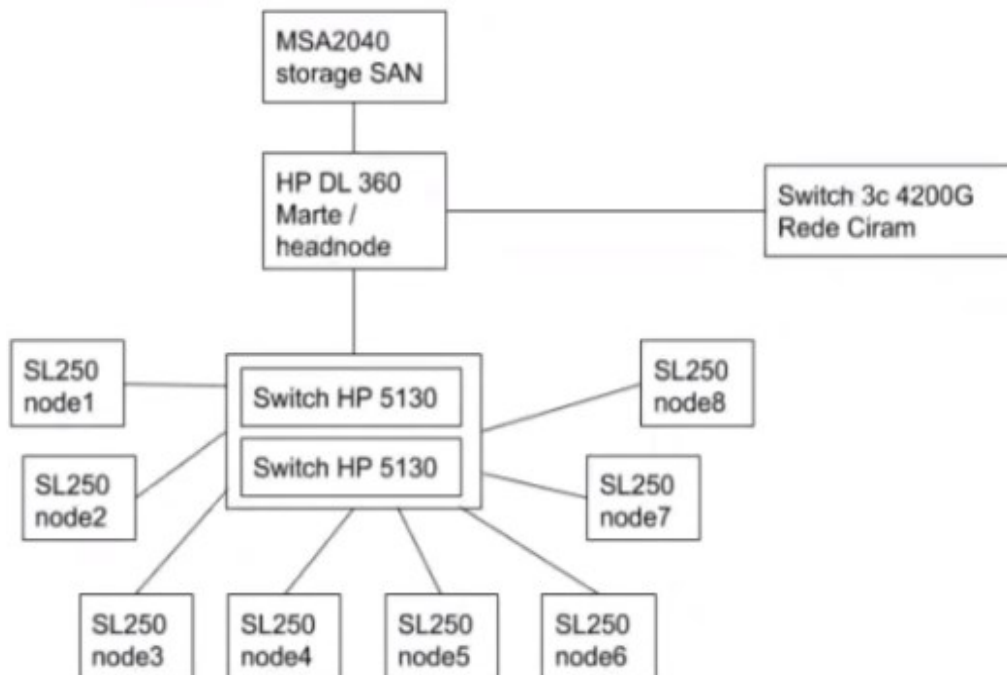
O novo (atualização) sistema de previsão atmosférica regional por conjunto da Epagri/Ciram, descrita neste trabalho, utiliza uma abordagem *ensemble* multimodelos (o modelo *WRF* com combinações de parametrizações diferentes) utilizando uma condição inicial idêntica para todos os membros do conjunto, isto é, tenta abordar somente as incertezas relacionadas a representação física dos modelos atmosféricos. Na exposição desta solução *ensemble* adotada, são apresentados alguns detalhes sobre a primeira versão da previsão por conjunto da instituição com o objetivo de revelar as mudanças e melhorias implementadas no atual sistema em operação na Epagri/Ciram.

2 DESCRIÇÃO DO *CLUSTER HPC* DA EPAGRI/CIRAM

O *cluster HPC* da Epagri/Ciram é composto por nove computadores chamados de nós, sendo eles um nó mestre e oito nós escravos. O nó mestre consiste em um computador *HP ProLiant DL380p Gen8* com dois processadores *Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2670 V2*, totalizando 20 núcleos de processamento e 96 *gigabytes* de memória *RAM*. Os nós escravos são computadores do modelo *HP ProLiant SL250s Gen8* com os mesmos 2 processadores e 20 núcleos de processamento por nó, porém com metade de memória *RAM*, isto é, 48 *gigabytes*. Nesta configuração o *cluster HPC* totaliza 180 núcleos físicos de processamento e quando habilitada a tecnologia *Hyper-Threading* (dois processos por núcleo) resultam no dobro de núcleos físicos, isto é, 360 núcleos virtuais para processamento paralelo. O modelo *WRF* suporta processamento paralelo híbrido que tira proveito da tecnologia *Hyper-Threading* e resultando em um incremento adicional no desempenho do modelo. Esta execução híbrida do modelo *WRF* significa utilizar a tecnologia *OPENMP (Open Multi Processing interface)* de memória compartilhada (*threads*) e *MPI (Message Passing Interface)* de memória distribuída (processos independentes) simultaneamente.

O *cluster* também possui três placas *Xeon Phi 5110P*, porém não são utilizadas nesta aplicação, pois além de obsoletas, o modelo *WRF* possui pouco desenvolvimento para utilizá-las, acrescentariam maior complexidade e pouco ganho no desempenho final do sistema de previsão *WRF* por conjunto.

Os nós do *cluster* são interligados por duas redes *gigabit* independentes. A primeira rede é dedicada para comunicação *SSH* e comunicação dos processos paralelizados do modelo *WRF* por *MPI*. A segunda rede é dedicada para o compartilhamento dos discos de armazenamento de dados, através do sistema *NFS (Network File System)*, conectados no nó mestre para os nós escravos. O diagrama da Figura 5 demonstra a composição e conexões do *cluster HPC* da Epagri/Ciram.

Figura 5 – Esquema do *cluster HPC* Epagri/Ciram

Fonte: Epagri/Ciram

Para compilação e execução do modelo *WRF* em paralelo no *cluster HPC* foi utilizado o *Intel® Parallel Studio XE* que consiste em compiladores, ferramentas, bibliotecas e o sistema *MPI Intel®*.

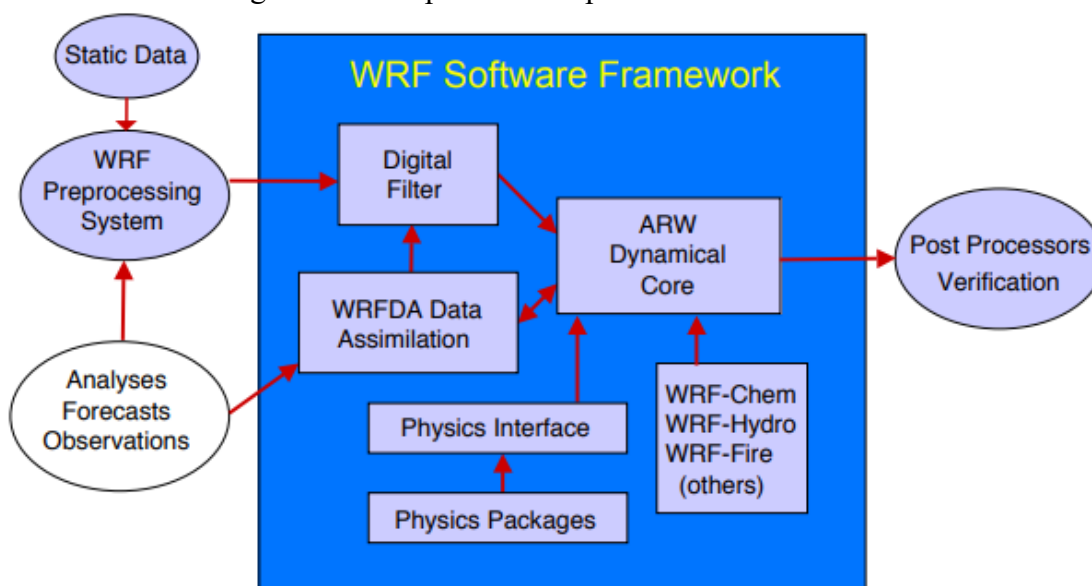
3 O MODELO WRF

O Modelo *WRF* é um sistema (plataforma) de modelagem atmosférica projetado para pesquisa e previsão numérica do tempo. Ele é um modelo de código aberto com contribuição da comunidade científica mundial e tem sido adotado para pesquisas em universidades e laboratórios governamentais, para previsão operacional por entidades governamentais e privadas e para aplicações comerciais da indústria. O desenvolvimento do *WRF* começou na segunda metade da década de 1990 com os objetivos de construir uma plataforma compartilhada para pesquisa, operações e assim criar uma previsão numérica do tempo de última geração. O *WRF* foi desenvolvido através de uma parceria entre as seguintes instituições nos Estados Unidos da América: Centro Nacional de Pesquisa Atmosférica (*NCAR*), a Administração Nacional Oceanográfica e Atmosférica (*NOAA*), a Força Aérea

(*USAF*), o Laboratório de Pesquisa Naval (*NRL*), a Universidade de Oklahoma (*OU*) e a Administração Federal de Aviação (*FAA*). Consiste em um código flexível, modular e portátil que é eficiente em ambientes de computação que variam de laptops a supercomputadores com processamento altamente paralelizados. O WRF suporta simulações atmosféricas desde dezenas de metros, como na grande escala da turbulência (*LES – Large Eddy Simulation*), até milhares de quilômetros, como a escala global. Isto permite ao modelo realizar a previsão numérica do tempo (meteorológico) em tempo real, simular eventos, utilizar como ferramenta na educação acadêmica, estudos de processos atmosféricos, desenvolver assimilação de dados e físicas parametrizadas, fazer simulações regionais, modelagem de qualidade do ar, acoplamento atmosfera-oceano e estudos de atmosferas idealizadas (SKAMAROCK et al., 2019).

A Figura 6 mostra os principais componentes do sistema *WRF*. O *WRF Software Framework (WSF)* é a infraestrutura que contém um núcleo de cálculo da dinâmica atmosférica (*ARW*), pacotes de física, utilitários para inicialização, pré e pós processamento dos dados, assimilação de dados observados (*WRFDA*) e recursos integrados como modelagem da química atmosférica (*WRF-Chem*), modelagem hidrológica (*WRF-Hydro*) e modelagem de incêndio em áreas selvagens (*WRF-Fire*). A versão instalada para a previsão por conjunto na Epagri/Ciram foi a 4.2.1, mais atual na época de implantação.

Figura 6 – Componentes da plataforma *WRF-ARW*

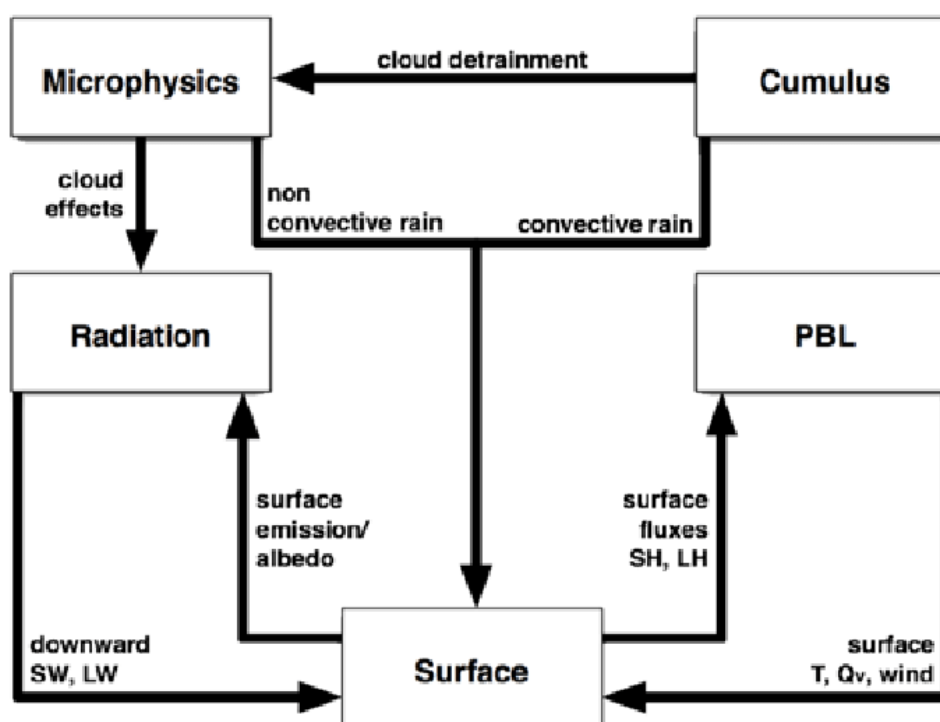


Fonte: Skamarock et al. (2019)

O *WRF* parametriza diversos processos físicos de subgrade: microfísica de nuvens, camada limite planetária, camada superficial, solo, oceano, radiação onda curta e longa, e convecção. O *WRF* possui para cada processo físico descrito uma variedade opções de parametrizações provenientes de diferentes trabalhos científicos e autores de diferentes instituições de todo o mundo. Esta gama de opções de parametrizações é o que torna possível a implementação de membros com uma combinação de físicas distintas, tornando possível utilizá-lo em uma previsão atmosférica por conjunto. A Figura 7 ilustra como os diferentes processos e interações físicas diretas e indiretas de subgrade.

Figura 7 – Parametrizações de subgrade e sua interação

Direct Interactions of Parameterizations



Fonte: Dudhia (2014)

4 SISTEMA PREVISÃO ATMOSFÉRICA REGIONAL POR CONJUNTO DA EPAGRI/CIRAM

O sistema de Previsão *WRF Ensemble* da Epagri/Ciram foi implementado inicialmente em 2016 e posteriormente em 2019 foi totalmente reinstalado e atualizado. O

sistema operacional *Linux/GNU RedHat* de todos nós do *cluster HPC* foi substituído pelo *Ubuntu LTS 20.04*, o modelo *WRF* versão 3.8 atualizado para versão 4.2.1, o domínio e resolução das grades foram aprimorados, a quantidade de rodadas diária aumentou de uma para duas (06 UTC e 18 UTC) e a janela de previsão ampliada de 54 horas para 120 (5 dias). A Tabela 1 descreve as principais mudanças entre as versões do sistema de previsão. Detalhes sobre as grades dos domínios da nova versão são detalhadas no capítulo 6.

Tabela 1 – Principais mudanças entre as versões do sistema de previsão por Conjunto.

Mudanças no Sistema Previsão por Conjunto	Primeira Versão (2016)	Versão Atual (2020-2022)
Sistema Operacional	RedHat Enterprise 6.6	Ubuntu LTS 2.04
Modelo Atmosférico	WRF 3.8	WRF 4.2.1
Rodadas por dia	1 rodada	2 rodadas
Tempo de previsão	2 dias (54 horas)	5 dias (120 horas)
Versão Compilador Intel	Intel Parallel Studio XE 2016	Intel Parallel Studio XE 2020
Pontos grade D1 (9 km)	160 x 150	270 x 235
Pontos grade D2 (3 km)	235 x 190	268 x 226
Camadas Verticais	42 (topo 50 hPa)	55 híbrida (topo 20 hPa)

Fonte: Elaborada pelo autor (2022)

A nova implementação do sistema operacional de previsão atmosférica *WRF ensemble* Epagri/Ciram foi concebida com o intuito de flexibilidade e centralização do gerenciamento dos membros além da atualização do Modelo *WRF* e seus recursos. Esta centralização trouxe vantagens em relação a primeira versão como:

- Facilidade na manutenção dos nós, pois nenhum dado é armazenado ou script é instalado nos nós escravos. Todos os nós escravos tem a mesma imagem de sistema e servem somente para executar uma tarefa recebida do nó mestre.
- Melhor controle do fluxo de funcionamento e gerenciamento do disparo das rodadas de cada membro da previsão *ensemble*. Nenhum script é armazenado ou disparado por agendamento nos nós escravos.
- Melhor desempenho. A centralização do controle das rodadas dos membros é feita pelo nó mestre. Tarefas como baixar os dados de entrada, fazer o pré e pós processamento dos dados é executado somente uma vez no nó mestre. Isto otimiza e reduz o tempo total da rodada da previsão como um todo e os nós escravos são usados apenas para execução dos membros distintos.

- Caso algum dos nós escravos fique indisponível, ele pode ser excluído da lista de nós disponíveis e os membros a serem executados podem ser redistribuídos entre os nós restantes disponíveis.
- Membros podem ser adicionados ou removidos com facilidade através da edição de um único arquivo.

5 CONDIÇÕES INICIAL E DE CONTORNO DA PREVISÃO POR CONJUNTO DA EPAGRI/CIRAM

O método *ensemble* definido para ser utilizado no sistema de previsão atmosférica da Epagri/Ciram foi o multimodelos com condição inicial única, isto é, alterar somente as parametrizações físicas e utilizar uma condição inicial idêntica para todos membros do conjunto. Porém, também é possível iniciar um modelo atmosférico regional com as condições iniciais herdadas da rodada anterior do mesmo membro, através dos arquivos chamados de *restart* ou *hotfile*. Esta condição inicial é obtida através da propagação no tempo da rodada anterior até o momento de início da rodada atual.

Outro método para obter uma condição inicial idêntica para todos membros, no caso de uma previsão *downscaling* (regional), é utilizar dados interpolados do modelo global que já fornece as condições de contorno para a rodada de previsão regional. Os dados de previsão global que são utilizados como condição de contorno no sistema de previsão regional da Epagri/Ciram é o *Global Forecast System (GFS)* da *NOAA*, que nesta configuração também fornece os dados para condição inicial para os membros do conjunto.

No caso de utilizar uma condição herdada da rodada anterior, é preciso uma propagação no tempo da condição inicial da rodada anterior até o momento de início da rodada atual. O sistema de previsão por conjunto da Epagri/Ciram (duas rodadas por dia) teria um adicional de 12 horas de simulação de cada membro além das 120 horas de previsão. Para a execução neste modo (com *restart*) o *cluster* necessitaria de uma a duas horas adicionais para concluir a execução da previsão. Este tempo adicional tornaria inviável a execução da previsão *ensemble* duas vezes por dia no *cluster HPC* da Epagri/Ciram e foi um dos motivos principais para a desistência do uso deste método de condição inicial propagada da rodada anterior. Outros motivos identificados para escolha de utilizar a condição inicial do *GFS* em vez da herdada de cada membro foram:

- As primeiras sete horas do resultado da previsão já serão dados pretéritos e não serão utilizados, sendo assim considerados como tempo de *spinup* do modelo suficientes para estabilização do modelo *WRF* com as condições iniciais impostas do modelo *GFS*. No momento do término da rodada, estes dados referentes ao *spinup* serão descartados por serem referentes a uma data e hora pretérita do término.
- O tempo adicional para rodar as 12 horas da propagação da condição inicial entre as rodadas é superior a uma hora. Como já mencionado, isto tornaria inviável rodar o modelo duas vezes por dia.
- A estabilização do modelo *WRF* utilizando a condições iniciais interpoladas do *GFS* é relativamente rápida, necessitando apenas de alguns *timesteps* para esta estabilização sendo bem inferior às sete horas que serão descartadas.
- Utilizar condições herdadas de rodadas anteriores podem trazer erros desta rodada que podem continuar sendo propagados na rodada seguinte, adicionando mais uma fonte de erro para a previsão atual.

Por estes motivos expostos foi escolhido para iniciar o modelo *WRF* (todos membros) com as condições iniciais interpoladas do modelo global *GFS*, no qual também fornece as condições de contorno durante a rodada da previsão de 120 horas.

Os dados forçantes de contorno e condição inicial do modelo *GFS* são baixados da plataforma operacional *NOMADS*, que tem função de disponibilizar os dados meteorológicos e oceanográficos da instituição *NOAA*. Os dados são divididos em três categorias com diferentes resoluções e intervalos temporais:

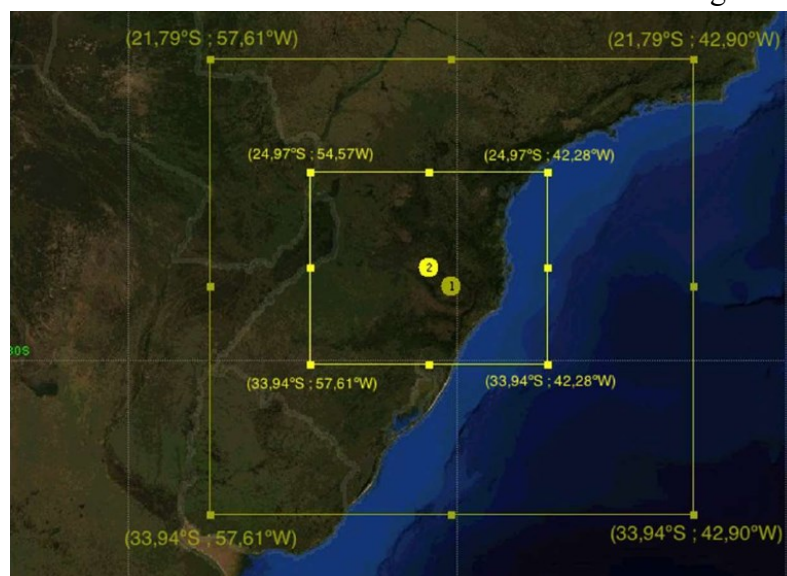
- Dados das variáveis de superfície e de quatro níveis de solo com intervalo de 1 hora entre eles em uma grade gaussiana com resolução aproximada de 13 km.
- Dados das variáveis atmosféricas com 34 níveis de pressão, intervalo de 1 hora entre eles com resolução espacial de aproximadamente 27 km.
- Dados da temperatura superficial do oceano (*SST*), um dado estático de análise, chamado *Real-Time High Resolution Global Sea Surface Temperature* fornecido pela *NOAA* com resolução de aproximadamente 9 km e referente ao horário de início da rodada da previsão *ensemble WRF*.

6 DEFINIÇÃO DAS GRADES DA PREVISÃO ATMOSFÉRICA POR CONJUNTO DA EPAGRI/CIRAM

6.1 DOMÍNIOS

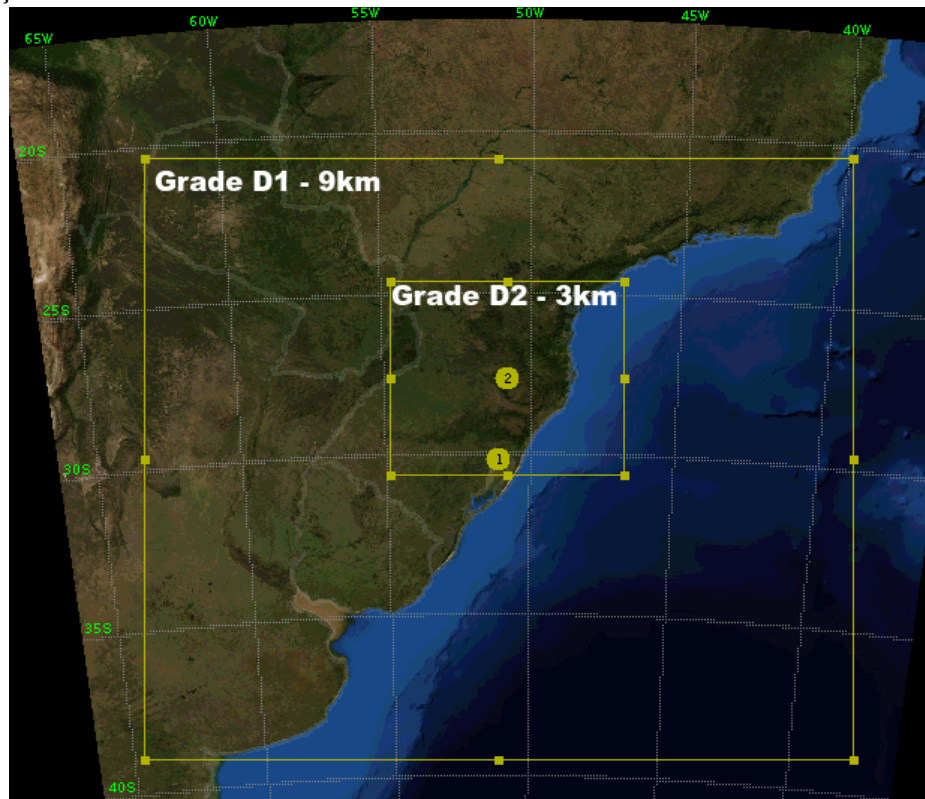
O foco do sistema operacional de previsão por conjunto é fornecer dados atmosféricos para o estado de Santa Catarina com maior qualidade e detalhamento. Sendo assim, a definição dos domínios para representar os membros da previsão foi centrada no estado de SC. Foram escolhidas duas grades aninhadas para respeitar as proporções 3:1 na resolução espacial entre elas e também com a grade do modelo forçante *GFS-NOAA*. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra a grade da primeira versão da previsão por conjunto implementada na Epagri/Ciram. Este domínio anterior foi avaliado pelos pesquisadores envolvidos no projeto da nova implementação do sistema de previsão e foi ampliada sua área de abrangência em ambas grades D2 e D1. A Figura 9 mostra os novos domínios espaciais das grades definidas para as rodadas do sistema de previsão atual. A grade D1 é a de maior área, com resolução espacial 9 km, sendo a que recebe a condição de contorno do modelo global *GFS-NOAA* (~27km). A grade D2, aninhada à D1, abrange o estado de SC e tem resolução de 3 km.

Figura 8 – Domínios antigo das grades da previsão por conjuntos *WRF* com abrangência de área menor. Pontos 1 e 2 referentes ao centro de cada grade.



Fonte: Epagri/Ciram

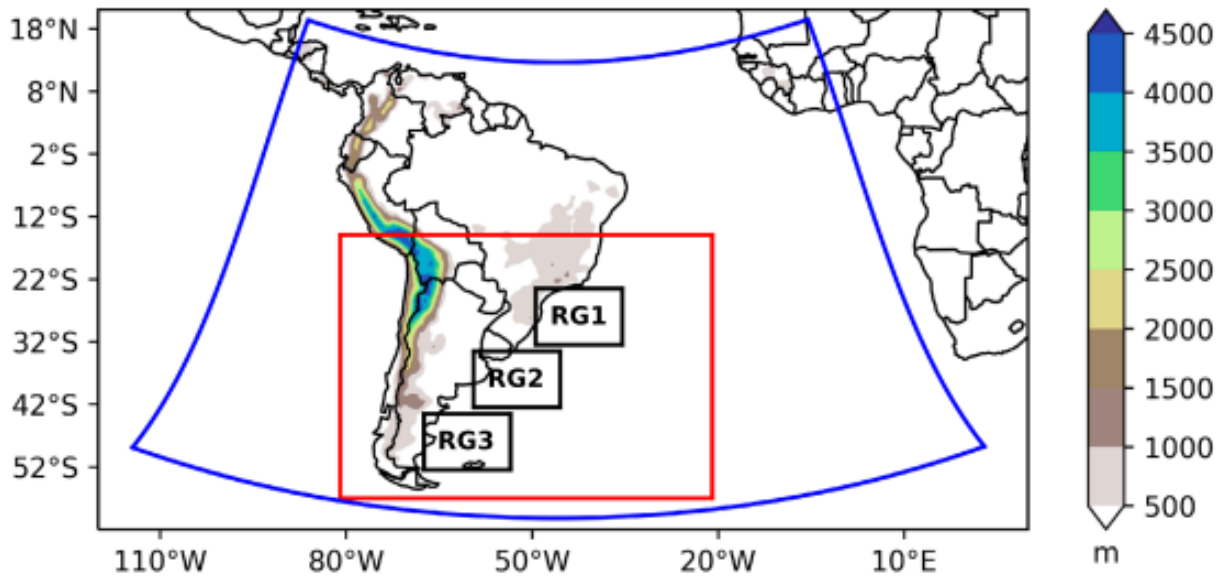
Figura 9 – Novos domínios das grades para previsão por conjuntos *WRF*. Domínio 1 com resolução 9 km e Domínio 2 de 3 km. Pontos 1 e 2 referentes ao centro de cada grade.



Fonte: Epagri/Ciram

Na definição da grade D1 externa procurou-se abranger regiões importantes, onde ocorrem e/ou se formam sistemas de escala sinótica, para que já pudessem ser representados utilizando a física e dinâmica (*WRF-ARW*) dos diferentes membros da previsão regional por conjunto, além de serem simulados em uma resolução espacial mais resolvida que a global. Muitos destes fenômenos atmosféricos sinóticos são originados em regiões próximas da área de interesse (grade D2), e nos quais têm grande contribuição na caracterização climática da Região Sul do país. Portanto, houve a intenção de abranger regiões como a Baixa do Chaco, região de foz do Rio da Prata, norte e nordeste da Argentina e uma grande área do Oceano Atlântico adjacente ao sul e sudeste do Brasil, Uruguai e norte da Argentina. A grade D1 foi estendida mais ao sul principalmente para contemplar duas das três regiões principais áreas de ciclogênese no leste da América do Sul, onde foi considerado as pesquisas realizadas por Reboita *et al* (2010). As duas regiões abrangidas foram a RG1 e RG2, ilustradas na Figura 10.

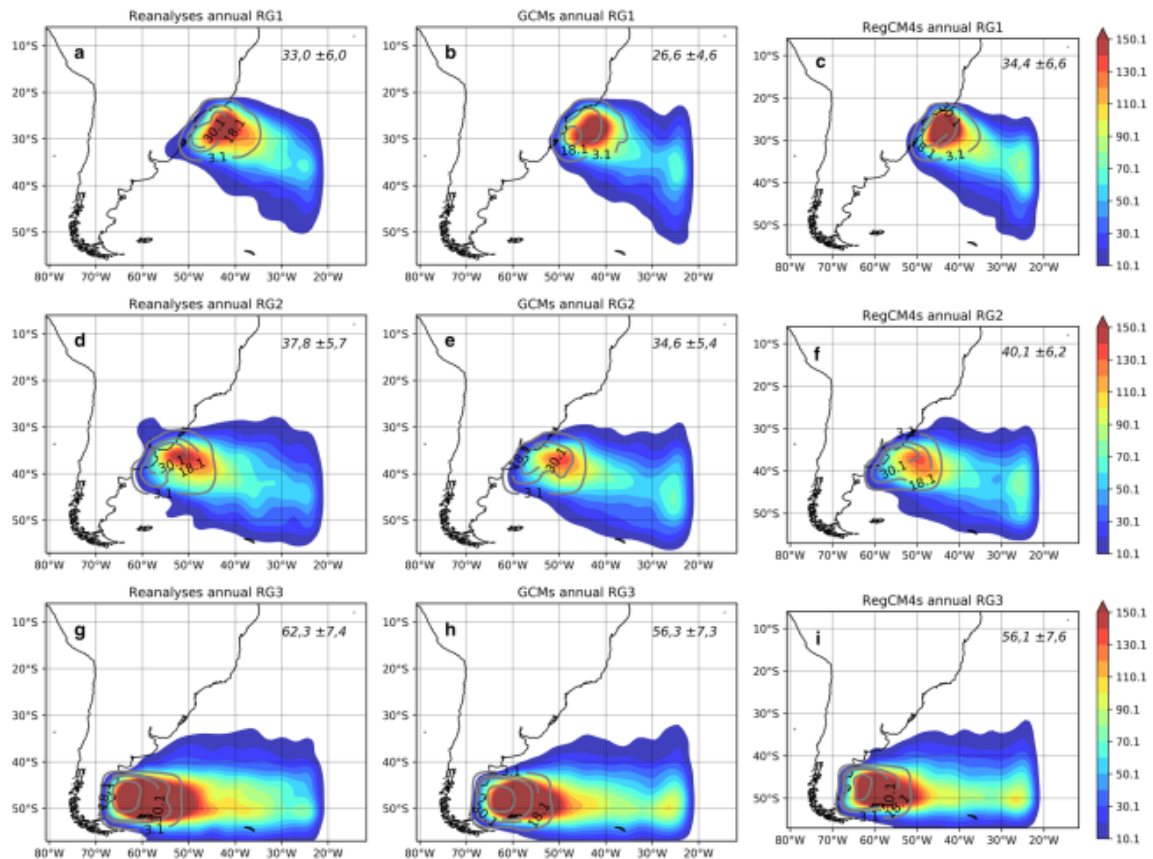
Figura 10 – Regiões de ciclogênese identificadas em estudos de *ensembles* multimodelos com dados reanalizados.



Fonte: de Jesus et al. (2022)

Na avaliação das regiões ciclogênicas a serem consideradas na grade D1, também foram considerados os resultados de um estudo publicado utilizando resultados de *ensemble* multimodelos realizado por de Jesus et al. (2022). Esta pesquisa consistia em quatro *downscalings RegCM4* para o período 1979-2100, e um *ensemble* de reanálise do *ERA-Interim* com *CFSR* (DE JESUS et al., 2022). Neste artigo eles avaliaram as trajetórias dos ciclones gerados por cada *hotspot* e a Figura 11 ilustra algumas conclusões deste estudo. Nesta figura a densidade de ocorrência de ciclogênese é representada pelas linhas cinza, a trajetória pelo sombreado colorido, sendo as regiões RG1 (a, b, c), RG2(d, e, f) e RG3(g, h, i) e os *ensembles* de reanálise (a, d, g), de *GCMs* (b, e, h), e de *RegCM4s* (c, f, i). O *hotspot* RG3 foi a única área não incluída na grade D2 da previsão por conjunto *WRF*. Apesar da região ter a maior ocorrência de ciclones anuais (62.3 ± 7.4) no *ensemble* reanálises, ela também é a mais afastada da área de foco da previsão e a trajetória dos ciclones também são as mais afastadas. Outro fator que pesou na decisão de desconsiderar a RG3 foi a limitação computacional disponível para estender o domínio computacional até esta região, pois impossibilitaria a execução da previsão na resolução e período desejados.

Figura 11 – Densidade de ciclogênese (contornos cinza) e trajetória (colorido) para os *ensembles* climáticos e reanálises.



Fonte: de Jesus et al. (2022)

Além do benefício de representar tanto as feições geográficas, processos dinâmicos e físicos em uma resolução menor (9 km) que a global (~27 km), a grade D1 também tem como finalidade ser uma grade intermediária para atenuar a redução de escala (3:1) da grade *GFS-NOAA* para grade final D2 (3 km). Por este motivo é importante manter uma área considerável afastada das bordas da grade final, isto é, pontos suficientes de cálculo da borda externa até a região de contorno da grade D2. Isto permite que processos de escalas de espaço e tempo diferentes possam ser transmitidos desde o modelo *GFS* externo global até a grade D2 sem possíveis instabilidades numéricas.

Esta grade final sobre o estado de Santa Catarina é o objetivo final para representação atmosférica da previsão por conjunto *WRF* da Epagri/Ciram e os resultados deste *ensemble* serão utilizados como entrada no modelo especialista de previsão de geada.

6.2 DISCRETIZAÇÃO HORIZONTAL DAS GRADES

As grades foram criadas usando a projeção *Lambert Conformal* cônica. Esta projeção é a mais adequada para as resoluções e domínios definidos, pois ela mantém o espaçamento de grade mais constante na superfície esférica simulada, assim como as áreas discretizadas. Outras projeções, como a *Mercator* apresentam distorções de área quanto mais se aproximam dos polos do planeta, e podem resultar em instabilidades numéricas nesta região mal representada. Erros possíveis de ocorrer por este motivo é extrapolar o número *CFL*, a condição de *Courant–Friedrichs–Lewy*. A condição *CFL* é um parâmetro utilizado na modelagem numérica onde existe uma discretização no espaço e tempo. Ela garante que o passo de tempo, o *timestep*, seja suficiente para a informação que se propaga no espaço consiga ser transmitida entre pontos vizinhos de grade.

Foram utilizadas duas grades aninhadas para representar a área modelada. A proporção de refinamento entre as grades aninhadas foi de 3:1, no espaço e tempo. Esta proporção é conservadora e amplamente utilizada na modelagem numérica da atmosfera. Como a grade final D2 foi definida para ter 3 km de resolução horizontal, obedecendo a proporção 3:1, foi decidido utilizar somente uma grade externa com 9 km intermediária de resolução sendo suficientes para receber os dados do modelo global respeitando e ainda a mesma proporção espacial. A Tabela 2 detalha as duas grades *WRF*, a externa D1 e a aninhada D2 usadas na previsão atmosférica por conjunto.

Tabela 2 – Detalhes das duas grades do modelo *WRF* usadas na previsão por conjunto Epagri/Ciram.

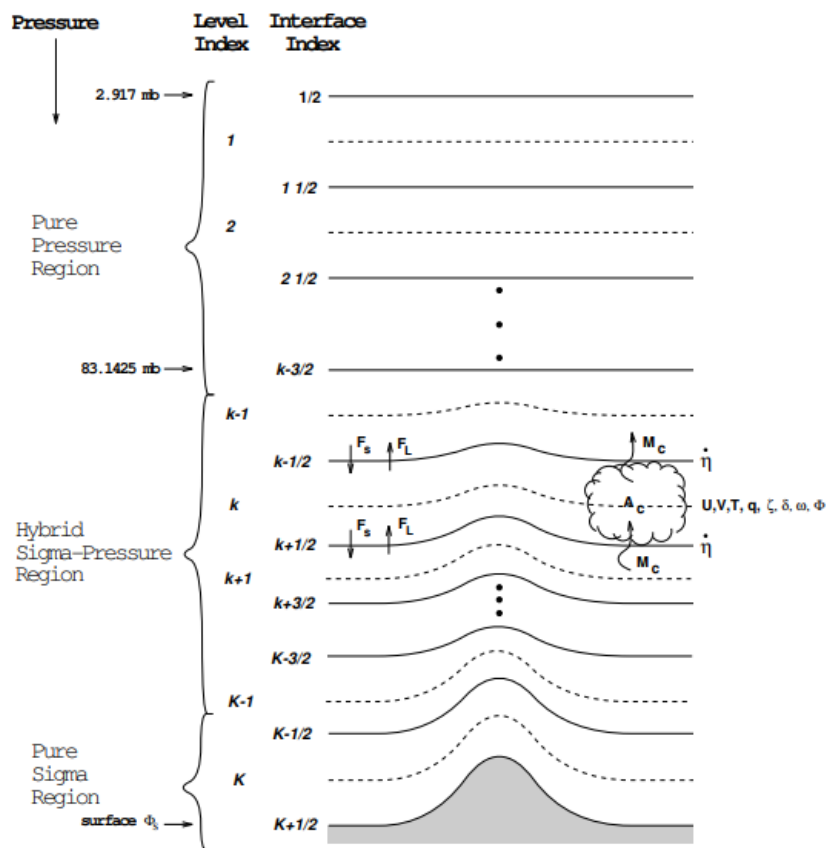
Propriedades da grade	Grade externa D1	Grade interna D2
Resolução em U e V	9 km	3 km
Quantidade Pontos U e V	270 x 235	268 x 226
Projeção	Lambert Conformal	Lambert Conformal
Discretização Vertical Z	Híbrida 55 níveis	Híbrida 55 níveis
Resolução na Vertical	20 até 859 metros	20 até 859 metros
Topo vertical do modelo	20 hPa	20 hPa
Base vertical do modelo	20 metros	20 metros

Fonte: Elaborada pelo autor (2022)

6.3 DISCRETIZAÇÃO VERTICAL

Para representar a dimensão vertical de forma discretizada, foi utilizada uma representação híbrida disponível pelo *WRF*. Atualmente, esta representação vertical é a padrão do modelo *WRF* (versões superiores à V4.0). Esta representação vertical possui as vantagens das coordenadas sigma próximo a superfície, onde os níveis acompanham o relevo. E as vantagens das coordenadas isobáricas em altos níveis, onde os níveis acompanhar relevo perde importância no escoamento, sendo mais importante acompanhar os níveis de pressão. Para utilizar a discretização vertical com coordenadas híbridas são fornecidos parâmetros que irão definir a transição entre as coordenadas sigma (próximo da superfície) até as isobáricas, em níveis superiores. Esta transição deve ser feita de forma coerente para não atrapalhar a representação física do modelo *WRF*. A Figura 12 ilustra este tipo de discretização vertical do modelo *WRF*.

Figura 12 – Exemplo de coordenada vertical híbrida.



Fonte: McCaa et al. (2004)

Utilizando a discretização híbrida foi possível concentrar 14 níveis nos primeiros 1000 metros de altitude e 35 níveis nos primeiros 10 km de atmosfera. As espessuras de camadas variam com espaçamento de aproximadamente 20 metros próximo da superfície aumentando gradualmente até chegar em 859 metros de resolução vertical em altos níveis.

7 DINÂMICA E FÍSICA UTILIZADAS NA PREVISÃO ATMOSFÉRICA POR CONJUNTO DA EPAGRI/CIRAM

Os modelos são construídos em torno de um núcleo dinâmico e, embora este permaneça relativamente fixo ao longo dos anos, as parametrizações físicas sofrem uma evolução contínua com adições e/ou substituições. Isso reflete onde estão a maior parte das incertezas nos modelos atmosféricos. Ao contrário da dinâmica, nenhum aspecto da representação física tem um conjunto de equações tão rígido quanto os da dinâmica dos fluidos. Em todas as áreas da física, decisões precisam ser tomadas em relação ao que é resolvido ou não pela dinâmica, quais processos afetam mais a evolução atmosférica e qual nível de sofisticação e gasto computacional está acessível para a aplicação em mente. Estes tipos de decisões levam naturalmente a uma ampla gama de parametrizações de diferentes níveis de complexidade e custo para cada subcategoria da física (DUDHIA et al., 2014). Por estes motivos, as configurações relacionadas à dinâmica do modelo *WRF* da previsão por conjuntos foi mantida igual para os membros e as diferenças se localizam na parte física do modelo e os processos parametrizados, pois é onde se encontram as maiores fontes de incertezas desta natureza.

7.1 CONFIGURAÇÃO COMUM NOS MEMBROS DO CONJUNTO

As informações explicadas neste capítulo 7 foram extraídas do relatório técnico que descreve o modelo *WRF* (SKAMAROCK ET AL., 2019) e do manual do usuário que podem ser obtidos no site oficial para do *WRF*: <https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/> (BOULDER, 2022). Nesta parte do trabalho serão descritos brevemente cada parte do modelo relacionadas aos processos dinâmicos e físicos do modelo e como são habilitadas no arquivo de configuração *namelist.input*.

7.1.1 Núcleo Dinâmico do modelo

Todos os membros utilizam o núcleo dinâmico não hidrostático do *WRF*. Para rodar o modelo da forma não hidrostática o parâmetro *non_hydrostatic* é definido como *true*.

7.1.2 Difusão completa na CLP

Os gradientes usam termos métricos completos para calcular com maior precisão os gradientes horizontais em terrenos com inclinação elevada. Este recurso é ativado utilizando a opção *diff_opt* igual a 2.

K para difusão horizontal é diagnosticado apenas a partir da deformação horizontal. A difusão vertical é assumida como feita pelo esquema da CLP. Este recurso melhora a estabilidade numérica e é habilitado utilizando a opção *km_opt* igual a 4.

A difusão horizontal de 6ª ordem é um filtro seletivo para remover estruturas mal resolvidas, um filtro de ruído numérico de onda curta.

A difusão reduzida com ventos fracos permite que o ruído em escala de grade cresça nas camadas limites diurnas. Esta opção *monotonic and positive-definite* foi ativada definindo *diff_6th_opt* igual a 2 e *diff_6th_factor* igual 0.12.

7.1.3 Amortecimento em níveis superiores (*damp_opt*)

Amortecimento de onda gravitacional implícita adicionado próximo ao topo do modelo para controlar a reflexão no limite superior. Esta opção é ativada definindo *damp_opt* igual a 3.

7.1.4 Amortecimento de velocidade vertical (*w_damping*)

Para robustez operacional, o movimento vertical pode ser amortecido para evitar que o modelo se torne instável com velocidades verticais localmente grandes. Esta opção é ativada definindo *w_damping* igual a 1.

7.1.5 O arrasto da onda gravitacional

O arrasto das ondas gravitacionais pode ser incluído para grades de baixa resolução, maiores que 5 km. Esta opção ajuda na representação do transporte de momento vertical das ondas gravitacionais orográficas de subgrade. Este recurso é ativado com a opção *gwd_opt* igual a *1*.

7.2 PROCESSOS FÍSICOSEM COMUM DOS MEMBROS

Nem todas configurações da parte física dos membros possuem diferenças. Neste capítulo é descrito as configurações que serão comuns entre eles neste setor. A definição das físicas do modelo *WRF* encontra-se no arquivo *namelist.input*, na seção *&physics*.

7.2.1 Interação da fração de nuvem de subgrade com a radiação

Esta opção, permite fornecer uma fração de nuvem e quantidade nas colunas ativas de grade. Funciona com esquema de convecção *Grell*, *KF* e *MSKF*. Para habilitar essa interação de subgrade usamos a opção *cu_rad_feedback* igual a *true*.

7.2.2 Modelo de radiação de ondas longas e curtas do *WRF*

Calcula os fluxos de radiação com céu claro e com nuvens para cima e para baixo.

Esquema *RRTMG* é uma nova versão do *RRTM* adicionada na versão 3.1. Este esquema de radiação inclui o método *MCICA* de sobreposição aleatória de nuvens. Para ativar esta opção definimos para ondas longas e curtas respectivamente, *lw_physics* e *ra_sw_physics* com valor igual a *4*.

Para definir o *timestep* em minutos das chamadas da física da radiação é usado a opção *radt*. O recomendado pelo manual é 1 minuto para cada km de resolução da grade externa. Este cálculo do modelo de radiação tem custo computacional alto. Na implementação deste projeto foi definido em 9 minutos.

O termo para suavizar a entrada da radiação incidente também foi utilizado, assim evitando degraus entre cada passo de tempo. Este recurso é habilitado utilizando a opção *swint_opt* igual a *1*.

7.2.3 Modelo de Solo

O modelo de solo utilizado é o *Noah Land Surface Model* desenvolvido entre as instituições *NCEP*, *NCAR* e *AFWA*. Este esquema representa a temperatura e umidade do solo em quatro camadas, a cobertura fracionada de neve e física de solo congelado. Para utilizar este esquema utilizamos a opção *sf_surface_physics* com valor *2*.

Os recursos de fluxos de calor e umidade da superfície do solo também foram habilitados com a opção *isfflx* igual a *1*.

7.2.4 Modelo de dossel urbano

Modelo *UCM* de 3 categorias com efeitos de superfície para telhados, paredes e ruas. A partir da versão 3.7 do *WRF*, uma opção de telhado verde também foi adicionada. Este modelo de dossel pode ser habilitado com a opção *sf_urban_physics* igual a *1*.

7.2.5 Modelo de Nevoeiro

O esquema *FogDES* foi desenvolvido pela *Japan Atomic Energy Agency (JAEA)* e calcula a deposição de água do nevoeiro, as gotículas das nuvens, em vários tipos de superfície terrestre com um baixo custo de cálculo (KATATA et al., 2014). O cálculo da deposição de névoa é feito com base na função linear simples do conteúdo de água líquida (*LWC*) na superfície do solo e a velocidade de deposição da névoa. O *LWC* é obtido a partir da saída padrão do *WRF* na camada atmosférica mais baixa, portanto neste caso, 20 metros de 20 m de altura da superfície. Este esquema é ativado com a opção *grav_settling* igual a *2*.

7.2.6 Efeito das nuvens para a profundidade óptica da radiação

O Método de *Sundqvist* (SUNDQVIST et al., 1989) é utilizado para considerar o efeito das nuvens (fração) na profundidade óptica da radiação. Este método é ativado através da opção *icloud* igual a 3.

7.2.7 Correção topográfica para ventos de superfície

O modelo possui um recurso de corrigir a representação do arrasto extra da topografia de subgrade e fluxo maior no topo dos morros. Foi utilizada a versão simplificada utilizando a variação do terreno e ela é habilitada com a opção *topo_wind* igual a 2.

7.2.8 Timestep do modelo da CLP e Cumulus

Os *timesteps* da **CLP** como também o de convecção podem ser configurados separadamente em relação ao *timestep* geral do modelo **WRF**. Porém como possuem baixo custo computacional, eles foram configurados para acompanhar o *timestep* geral do modelo. Portanto, os cálculos relacionados a estes processos físicos serão feitos a cada passo de tempo do modelo. Para isto, os parâmetros *bldt* (CLP) e *cu dt* (convecção) são definidos com valor 0.

7.3 FÍSICAS DISTINTAS DOS MEMBROS DO CONJUNTO

7.3.1 Definição dos membros do conjunto

As combinações das opções físicas de cada membro foram definidas em um levantamento bibliográfico sobre o desempenho sobre o tema e estão descritas em Araujo (2020). Este estudo inicial considerou que o principal interesse do projeto é fornecer dados para a previsão de geadas da Epagri/Ciram, e para isto, o foco seria nas físicas com maior impacto nas variáveis atmosféricas próximas à superfície. Elas são, a temperatura e umidade do ar em 2 metros de altura, e vento em 10 metros. Considerando este objetivo, os processos físicos escolhidos para serem distintos são a camada de superfície, **CLP**, microfísica e convecção. As parametrizações definidas por essa pesquisa bibliográfica para a primeira

versão do sistema de previsão por conjunto da Epagri/Ciram podem ser conferidas na Tabela 3.

Tabela 3 – Configuração dos membros do conjunto da versão antiga e as parametrizações adotadas para cada membro do conjunto. O número ao lado do nome do esquema se refere ao código da opção no arquivo *namelist.input*.

Membros/ Processos	Microfísica de Nuvens	Camada limite Planetária/ superficial	Convecção Grade D1	Convecção Grade D2
M1-WYK	<i>WSM6 (6)</i>	<i>YSU/MM5 (1)</i>	<i>Kain-Fritsch (1)</i>	Explícito (0)
M2-WYT	<i>WSM6 (6)</i>	<i>YSU/MM5 (1)</i>	<i>Tiedtke (6)</i>	Explícito (0)
M3-WAK	<i>WSM6 (6)</i>	<i>ACM2/Pleim-Xu (7)</i>	<i>Kain-Fritsch (1)</i>	Explícito (0)
M4-WAT	<i>WSM6 (6)</i>	<i>ACM2/Pleim-Xu (7)</i>	<i>Tiedtke (6)</i>	Explícito (0)
M5-TYK	<i>Thompson (8)</i>	<i>YSU/MM5 (1)</i>	<i>Kain-Fritsch (1)</i>	Explícito (0)
M6-TYT	<i>Thompson (8)</i>	<i>YSU/MM5 (1)</i>	<i>Tiedtke (6)</i>	Explícito (0)
M7-TAK	<i>Thompson (8)</i>	<i>ACM2/Pleim-Xu (7)</i>	<i>Kain-Fritsch (1)</i>	Explícito (0)
M8-TAT	<i>Thompson (8)</i>	<i>ACM2/Pleim-Xu (7)</i>	<i>Tiedtke (6)</i>	Explícito (0)
M9-MYK	<i>Morrison et al. (10)</i>	<i>YSU/MM5 (1)</i>	<i>Kain-Fritsch (1)</i>	Explícito (0)
M10-MYT	<i>Morrison et al. (10)</i>	<i>YSU/MM5 (1)</i>	<i>Tiedtke (6)</i>	Explícito (0)
M11-MAK	<i>Morrison et al. (10)</i>	<i>ACM2/Pleim-Xu (7)</i>	<i>Kain-Fritsch (1)</i>	Explícito (0)
M12-MAT	<i>Morrison et al. (10)</i>	<i>ACM2/Pleim-Xu (7)</i>	<i>Tiedtke (6)</i>	Explícito (0)

Fonte: Elaborada pelo autor (2022)

7.3.2 Atualização das parametrizações distintas dos membros

Neste capítulo serão descritas brevemente as parametrizações físicas alteradas depois da atualização do sistema de previsão por conjunto e do modelo *WRF* (versão 4.2.1) e a motivação das alterações. Como já mencionado, a variação da física entre os membros é o motivo das saídas distintas, isto é, a consequência de obtermos um conjunto de resultados com uma distribuição de probabilidades do estado da atmosfera. Na previsão por conjunto apresentada neste trabalho, estas diferenças encontram-se na microfísica, camada limite planetária, camada superficial, e convecção (profunda). Vale destacar o detalhe sobre a parametrização de convecção profunda variar somente na grade externa do modelo (D1 de 9 km), pois os processos convectivos profundos não são possíveis de serem representados nesta resolução. Na grade aninhada de maior resolução D2 (3 km) já é possível resolver a convecção profunda explicitamente pela microfísica de cada membro e, portanto, a parametrização deste processo de subgrade é desligada. Porém, a convecção rasa é um

processo que pode ocorrer em uma escala menor que a profunda, e espaçamento de 3 km da grade D2 não suficiente para resolver este processo explicitamente. Então, foi necessário habilitar a parametrização de convecção rasa de subgrade para a esta grade, sendo escolhido um único esquema que era compatível com todos membros do conjunto para não aumentar o número de integrantes do conjunto que já estava no limite computacional disponível para o projeto. A parametrização de convecção rasa escolhida foi a **GRIMS** (*Global/Regional Integrated Modeling System*).

Com a atualização do modelo **WRF**, melhorias e novas opções dos processos físicos disponíveis na plataforma ficaram disponíveis. Assim, para manter o sistema de previsão utilizando o que existe de mais moderno, incluindo correções e melhorias feitas pelos autores e colaboradores do sistema **WRF**, alterações nas físicas dos membros foram feitas quando disponível. Estas alterações mantiveram a escolha inicial dos membros, sendo escolhidas somente versões mais completas ou complexas delas que estão disponíveis na nova versão do modelo **WRF**. Estas mudanças feitas foram:

- O esquema de momento simples com 5 classes de hidrometeoros (**WSM5**) foi substituído pelo de momento duplo com 7 classes (**WSDM7**).
- O esquema **Thompson** antigo foi alterado para o novo esquema **Thompson**, no qual passa a considerar o efeito de aerossóis.
- As parametrizações da convecção foram atualizadas para versões mais recentes, a **Tiedtke** foi substituída pela **New-Tiedtke**, similar a utilizada pela previsão **ECMF**, e a **Kain-Fritsch** pela **Kain-Fritsch** de multiescala que é sensível a resolução espacial de cada grade computacional.
- Na grade D2, de 3 km de resolução, a parametrização de convecção rasa **GRIMS** é utilizada para todos os membros.

Os membros atualizados com estas modificações podem ser conferidos na Tabela 4.

Tabela 4 – Configuração dos membros do conjunto da versão atual e as parametrizações adotadas para cada membro do conjunto. O número ao lado do nome do esquema se refere ao código da opção no arquivo *namelist.input*.

Membro / Processos	Microfísica	CLP /Superfície	Convecção Grade D1 Rasa e Profunda	Convecção Grade D2 Rasa//Prof.
M1/WYK	<i>WDM7 (26)</i>	<i>YSU/MM5 (1)</i>	<i>Multi-scale Kain-Fritsch (11)</i>	<i>GRIMS (3) / Explícita (0)</i>
M2/WYT	<i>WDM7 (26)</i>	<i>YSU/MM5 (1)</i>	<i>New Tiedtke (16)</i>	<i>GRIMS (3) / Explícita (0)</i>
M3/WAK	<i>WDM7 (26)</i>	<i>ACM2/Pleim-Xiu (7)</i>	<i>Multi-scale Kain-Fritsch (11)</i>	<i>GRIMS (3) / Explícita (0)</i>
M4/WAT	<i>WDM7 (26)</i>	<i>ACM2/Pleim-Xiu (7)</i>	<i>New Tiedtke (16)</i>	<i>GRIMS (3) / Explícita (0)</i>
M5/TYK	<i>Thompson aer. aware (28)</i>	<i>YSU/MM5 (1)</i>	<i>Multi-scale Kain-Fritsch (11)</i>	<i>GRIMS (3) / Explícita (0)</i>
M6/TYT	<i>Thompson aer. aware (28)</i>	<i>YSU/MM5 (1)</i>	<i>New Tiedtke (16)</i>	<i>GRIMS (3) / Explícita (0)</i>
M7/TAK	<i>Thompson aer. aware (28)</i>	<i>ACM2/Pleim-Xiu (7)</i>	<i>Multi-scale Kain-Fritsch (11)</i>	<i>GRIMS (3) / Explícita (0)</i>
M8/TAT	<i>Thompson aer. aware (28)</i>	<i>ACM2/Pleim-Xiu (7)</i>	<i>New Tiedtke (16)</i>	<i>GRIMS (3) / Explícita (0)</i>
M9/MYK	<i>Morrison Double Moment (10)</i>	<i>YSU/MM5 (1)</i>	<i>Multi-scale Kain-Fritsch (11)</i>	<i>GRIMS (3) / Explícita (0)</i>
M10/MYT	<i>Morrison Double Moment (10)</i>	<i>YSU/MM5 (1)</i>	<i>New Tiedtke (16)</i>	<i>GRIMS (3) / Explícita (0)</i>
M11/MAK	<i>Morrison Double Moment (10)</i>	<i>ACM2/Pleim-Xiu (7)</i>	<i>Multi-scale Kain-Fritsch (11)</i>	<i>GRIMS (3) / Explícita (0)</i>
M12/MAT	<i>Morrison Double Moment (10)</i>	<i>ACM2/Pleim-Xiu (7)</i>	<i>New Tiedtke (16)</i>	<i>GRIMS (3) / Explícita (0)</i>

Fonte: Elaborada pelo autor (2022)

Deste modo, as físicas que variam entre os membros após a atualização ficaram da seguinte forma:

- **Microfísica**
 - *WRF Double-Moment 7-class scheme (26)*
 - *Thompson Aerosol aware (28)*
 - *Morrison Double Moment (10)*
- **Camada Limite Planetária e Superfície (variavam juntos)**
 - *YSU PBL com MM5 Surface Layer (1)*
 - *ACM2 PBL com Pleim-Xiu Surface Layer (7)*
- **Convecção**
 - *Multi-scale Kain-Fritsch (11)*
 - *New Tiedtke (16)*

7.3.3 Microfísica

A microfísica inclui processos de vapor de água, nuvens e precipitação explicitamente resolvidos. O modelo é geral o suficiente para acomodar qualquer quantidade de razões de mistura de massas e outras quantidades, como número de partículas por unidade de massa de ar seco. São usadas matrizes quadrimencionais com três índices espaciais e um índice de espécie para transportar tais escalares.

7.3.3.1 *WRF Double-Moment 7 class.*

Esta é a microfísica principal do modelo *WRF*, sendo disponível em várias variantes de momento simples e duplo momento, além de distinguir diferentes classes de hidrometeoros. A versão escolhida para ser utilizada foi a mais complexa e completa, a de duplo momento e 7 classes, *WDM7*. Neste esquema os processos convectivos quentes são cálculos de momento duplo com a quantidade de nuvens e chuva sendo calculados como variáveis prognósticas. Deste modo, são sensíveis a quantidade de núcleos de condensação de nuvens (*CCNs*) que também são advectados. Esta versão também separa a água em 7 classes: vapor, gelo, neve, graupel, chuva, granizo e nuvem. Este esquema ao permitir granizo pode

proporcionar taxas de precipitação mais intensas. Esta microfísica é habilitada com a opção *mp_physics* igual a **26**.

Outro recurso habilitado nos membros que utilizam este esquema são os dados climatológicos da distribuição espacial de ozônio e aerossóis para o esquema de radiação *RRTMG*. Esta opção é habilitada usando a opção *aer_opt* igual a **1**.

7.3.3.2 *Thompson aerosol-aware*

O novo esquema *Thompson aerosol-aware* é uma versão mais complexa e atual do anterior Thompson de duplo momento. Ele foi desenvolvido para condições convectivas, orográficas e de queda de neve em latitudes médias, especialmente em escalas de grade que permitem a convecção. É utilizado operacionalmente no sistema de previsão RAP/HRRR. O gelo, neve e radiação relacionada às gotículas de nuvens são passados para os esquemas de radiação *RRTMG* juntamente com os aerossóis de céu claro para cálculos de profundidade óptica, além da refletividade também é diagnosticada. Este esquema de microfísica é habilitado com a opção *mp_physics* igual a **28**.

Outro recurso habilitado nos membros que utilizam este esquema são os dados climatológicos de aerossóis da *Thompson* compatíveis com água e gelo para o esquema de radiação *RRTMG*. Este recurso de fornecer os dados de aerossóis é habilitado utilizando a opção *aer_opt* igual a **3**.

7.3.3.3 *Morrison double-moment*

O esquema Morrison utilizado é o de duplo momento, ou seja, calcula a razão de mistura, tanto em quantidade como em massa, e assim permitindo um tratamento mais robusto das distribuições de tamanho de partícula, que são a chave para calcular as taxas de processo microfísico e evolução nuvem/precipitação. Cinco espécies de hidrometeoros estão incluídas: gotículas de nuvens, nuvens de gelo, chuva, neve e graupel/granizo. As variáveis prognósticas incluem razões de mistura da quantidade e massa de nuvens, de gelo, chuva, neve e graupel/granizo, e razões de mistura de gotículas de nuvens e vapor de água em um total de 10 variáveis. Este esquema de microfísica é habilitado com a opção *mp_physics* igual a **10**.

Outro recurso habilitado nos membros que utilizam este esquema são os dados climatológicos da distribuição espacial de ozônio e aerossóis para o esquema de radiação **RRTMG**, que é habilitado usando a opção *aer_opt* igual a **1**.

7.3.4 Convecção/Cumulus

As parametrizações de convecção são responsáveis pelos efeitos na escala de subgrade das nuvens convectivas e/ou rasas. Os esquemas destinam-se a representar fluxos verticais devido a correntes ascendentes e descendentes não resolvidas e movimento compensatório fora das nuvens. Estas parametrizações operam apenas em colunas individuais onde o esquema é acionado e fornecem perfis verticais de aquecimento e umidificação. Alguns esquemas também fornecem tendências de campo das nuvens e precipitação na coluna, e alguns fornecem tendências de momento devido ao transporte convectivo de momento. Todos os esquemas fornecem o componente convectivo da precipitação na superfície.

7.3.4.1 *Multi-scale Kain-Fritsch scheme para grade externa D1*

Este esquema é a versão modificada do **Kain-Fritsch (KF)** com base em testes dentro do modelo ETA. Assim como no esquema **KF** original, ele utiliza um modelo de nuvem simples com correntes ascendentes e descendentes úmidas, incluindo os efeitos de entranhamento, desentranhamento e microfísica relativamente simples. Além disto, a versão multiescala permite que o esquema se adapte quando o tamanho da grade diminui da faixa de mesoescala (algumas dezenas de quilômetros) até escalas convectivas (alguns quilômetros) (ZHENG et al., 2016). A principal modificação inclui um ajuste dinâmico da escala de tempo para remoção de **CAPE**, uma taxa de entranhamento modificada mínima dependente da escala e um movimento vertical na escala da grade aprimorada usando fluxos de massa ascendente na escala de subgrade. O esquema também inclui uma opção para interagir com dados climatológicos de aerossóis por meio da adição de uma microfísica de nuvens em escala de subgrade (GLOTFELTYEL et al., 2019). Este esquema é habilitado definindo a opção *cu_physics* igual a **11**.

7.3.4.2 *New Tiedtke scheme para grade externa D1*

A parametrização de convecção *New Tiedtke* é um esquema do tipo fluxo de massas com escala de tempo para remoção de CAPE, com componente rasa e transporte de momento. Esta é uma versão atualizada do esquema *Tiedtke* e está mais próxima da usada no recente ECMWF IFS (ZHANG; WANG, 2017). As atualizações incluem funções de gatilho para convecção profunda e rasa, fechamentos para convecção profunda e rasa, ajuste da escala de tempo convectiva, taxas de entranhamento e desentranhamento para todos os tipos de convecção, conversão de água de nuvem/gelo para chuva/neve e opções para transporte de momento. Este esquema é habilitado definindo a opção *cu_physics* igual a *16*.

7.3.5 Convecção rasa GRIMS para grade D2

Semelhante à parametrização de cumulus profunda, os esquemas de convecção rasa representam o transporte de calor e umidade em escala subgrade nas nuvens. Como a escala da nuvem convectiva rasa é geralmente menor do que a profunda, ela deve ser usada em modelos quando o esquema de convecção profunda é desativado. Por este motivo os esquemas de convecção rasa estão disponíveis para serem ativados separadamente. A configuração da grade D2 de 3 km de resolução se enquadra nesta situação onde a convecção profunda está desativada, porém processos convectivos rasos podem não ser bem representados neste espaçamento horizontal. Portanto, para esta grade interna foi utilizada a parametrização de convecção rasa *GRIMS (Global/Regional Integrated Modeling System)*, sendo utilizada para todos os membros. Este esquema representa o processo de convecção rasa usando difusão por turbulência e o algoritmo de pluma gaussiano (*PAL*). Este esquema se acopla diretamente ao esquema *YSU* de camada limite planetária (quando utilizado). Para habilitar o esquema *GRIMS* é definido a opção *shcu_physics* igual a *3*.

7.3.6 Camada Limite Planetária (CLP)

O esquema de *CLP* é responsável por fluxos verticais em escala subgrade devido aos transportes turbulentos em toda a coluna atmosférica, não apenas na camada limite. Assim,

quando um esquema PBL é ativado, a difusão vertical explícita é desativada com a suposição de que o esquema PBL irá lidar com este processo.

7.3.6.1 Esquema *CLP YSU*

O esquema *CLP* da Universidade *Yonsei* usa termos contragradiente para representar fluxos devido a gradientes não locais. Este esquema adiciona um tratamento explícito da camada de entranhamento no topo do *CLP*. Foram adicionadas opções para efeitos de arrasto topográfico que variam de acordo com a elevação do terreno na subgrade. Foi adicionada a opção de mistura de cima para baixo, permitindo-a acontecer no sentido descendente, disparada pela radiação, e ajudando no ciclo de vida de nuvens estratocúmulos e neblina. Esta parametrização de camada limite planetária é habilitada com a opção *bl_pbl_physics* igual a *1*.

7.3.6.2 Esquema *CLP ACM2*

O esquema *ACM2* (*Asymmetrical Convective Modelversion 2*) é uma combinação da parametrização *ACM*, que é um modelo transiente simples com um modelo de difusão de turbulência. Assim, em condições convectivas, o *ACM2* pode simular transporte ascendente rápido em plumas flutuantes e como também em uma difusão turbulenta induzida por cisalhamento local. Esta parametrização de camada limite planetária é habilitado com a opção *bl_pbl_physics* igual a *7*.

7.3.7 Camada de Superfície

Os esquemas da camada superficial calculam as velocidades de atrito e os coeficientes de troca que permitem o cálculo dos fluxos de calor e umidade da superfície pelos modelos solo-superfície, e a tensão superficial no esquema da camada limite planetária. Na superfície da água, os fluxos de superfície e os campos diagnósticos da superfície são calculados no próprio esquema de camada superficial. Os esquemas não fornecem tendências, apenas as informações dependentes da estabilidade sobre a camada superficial para os esquemas solo-superfície e *CLP*.

7.3.7.1 Camada de Superfície *MM5* Revisada

O modelo de camada de superfície *MM5* revisada utiliza a teoria da similaridade baseada em *Monin-Obukhov*. Jiménez et al. (2012) revisaram a teoria de similaridade *MM5* anterior melhorando a consistência entre Ri e z/L e removendo limites com o uso de novas funções de estabilidade para condições estáveis e instáveis que também incluem o termo extra $\psi(z_0/L)$. O esquema *MM5* revisado é habilitado com a opção *sf_sfclay_physics* igual a 1.

7.3.7.2 Camada de Superfície *Pleim-Xiu*

O modelo de camada de superfície *Pleim-Xiu* é um esquema simples para estimativa analítica das funções de similaridade da camada de superfície a partir de variáveis de estado. O esquema de camada superficial *PX* (PLEIM, 2006) foi desenvolvido como parte do *PX LSM (Land and Surface Model)*, mas pode ser usado com qualquer modelo de solo ou *CLP*. Este esquema é baseado na teoria da similaridade e inclui parametrizações de uma subcamada viscosa na forma de uma camada de resistência quase-laminar, levando em conta as diferenças na difusividade do calor, vapor d'água e traços de espécies químicas. O esquema *Pleim-Xiu* é habilitado com a opção *sf_sfclay_physics* igual a 7.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A atualização do sistema de previsão atmosférica regional por conjunto através do modelo *WRF* na Epagri/Ciram foi concluída no final do ano de 2020, está operacional e fornecendo dados para o modelo especialista de previsão de geadas da instituição. O sistema operacional do **cluster** foi substituído com a distribuição *Ubuntu* possibilitando novas atualizações por longo período. O modelo de previsão *WRF* e suas dependências foram instalados na última versão disponível. As escolhas das parametrizações dos membros foram mantidas de acordo com os estudos feitos na definição do projeto inicial, sendo as únicas alterações dos membros para atualizar a física e dinâmica para versões com correções, novos recursos ou mais completas. As grades foram redefinidas com uma área de abrangência maior e considerando regiões com maior ocorrência de ciclogênese, além de um refinamento e mudança da discretização vertical para híbrida. O sistema de automatização do sistema operacional foi refeito para ser mais modular e flexível, sendo possível adicionar mais membros ou nós computacionais no **cluster** com facilidade. A previsão foi ampliada de 54 horas (2 dias) de horizonte e uma rodada por dia, para 120 horas (5 dias) e duas rodadas por dia usando o mesmo recurso computacional. Isto foi possível principalmente através da otimização do código compilado, do tipo de execução no modo híbrido de memória compartilhada e distribuída (*OPENMP* e *MPI*) e do uso *timestep* do modelo adaptável que agiliza o cálculo de cada passo de tempo quando possível.

Comparações de desempenho entre versões do sistema antigo e após a atualização não foram possíveis, pois o sistema antigo estava inoperante (devido à falta de manutenção) quando foi executada a atualização do novo sistema *ensemble*. A falta de dados ou resultados de desempenho da versão anterior também impossibilitou estas comparações.

O próximo passo, visando um aprimoramento e validação do sistema de previsão atmosférica por conjunto da Epagri/Ciram, será avaliar o desempenho de cada membro comparando com dados medidos em campo. Para esta finalidade a Epagri/Ciram possui uma ampla rede de estações meteorológicas de superfície automáticas e telemétricas distribuídas por todo o território catarinense. Estuda-se implantar na Epagri/Ciram a ferramenta computacional *Model Evaluation Tools (MET)* com o objetivo de padronizar a avaliação e validação dos dados em grade dos modelos numéricos com base nos dados observados pela Epagri/Ciram. Este programa é amplamente usado, validado pela comunidade científica,

desenvolvido pelo Centro de testes para desenvolvedores de modelos atmosféricos (**DTC**) com suporte da 557^a Ala Meteorológica da Força Aérea dos Estados Unidos, a **NOAA** e o **NCAR**.

O **MET** incorpora métodos tradicionais de verificação bem como técnicas modernas de inferência estatística e análise espacial, desenvolvidas ao longo da última década. Conta com o engajamento e suporte da comunidade científica e é disponibilizado gratuitamente como um pacote de código aberto. O aplicativo foi atualizado para sua décima versão em 2020 desde a primeira versão lançada em 2008. Atualmente o pacote é utilizado operacionalmente por vários centros de previsão nos Estados Unidos da América, Reino Unido, Taiwan, África do Sul e China, além de ser empregado por pesquisadores em universidades e laboratórios de todo o mundo.

Com esta avaliação dos membros do **ensemble** será possível substituir aqueles com menor desempenho, alterar configurações e fazer calibrações de parâmetros do modelo. Desta maneira será possível diminuir ou excluir os resultados do conjunto que não incorporam a variância de estados da atmosfera não representativos da realidade de Santa Catarina.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, C.E.S. Previsão numérica de tempo por conjunto. Florianópolis: Epagri, 2020. 20p. (Epagri, Documentos, 317). ISSN 2674-9521
- BOULDER. NATIONAL CENTER FOR ATMOSPHERIC RESEARCH. (org.). WRF Model Users' Page. 2022. Disponível em: <https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/>. Acesso em: 02 fev. 2022.
- BUIZZA, Roberto; HOUTEKAMER, P. L.; PELLERIN, Gerald; TOTH, Zoltan; ZHU, Yuejian; WEI, Mozheng. A Comparison of the ECMWF, MSC, and NCEP Global Ensemble Prediction Systems. *Monthly Weather Review*, [S.L.], v. 133, n. 5, p. 1076-1097, 1 maio 2005. American Meteorological Society.
- DUDHIA, Jimy. A history of mesoscale model development. *Asia-Pacific Journal Of Atmospheric Sciences*, [S.L.], v. 50, n. 1, p. 121-131, jan. 2014. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s13143-014-0031-8>.
- GLOTFELTY, Timothy; ALAPATY, Kiran; HE, Jian; HAWBECKER, Patrick; SONG, Xiaoliang; ZHANG, Guang. The Weather Research and Forecasting Model with Aerosol–Cloud Interactions (WRF-ACI): development, evaluation, and initial application. *Monthly Weather Review*, [S.L.], v. 147, n. 5, p. 1491-1511, 17 abr. 2019. American Meteorological Society.
- JESUS, Eduardo Marcos de; ROCHA, Rosmeri Porfirio da; CRESPO, Natália Machado; REBOITA, Michelle Simões; GOZZO, Luiz Felipe. Multi-model climate projections of the main cyclogenesis hot-spots and associated winds over the eastern coast of South America. *Climate Dynamics*, [S.L.], v. 56, n. 1-2, p. 537-557, 15 out. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-020-05490-1>.
- JIMÉNEZ, Pedro A.; DUDHIA, Jimy; GONZÁLEZ-ROUCO, J. Fidel; NAVARRO, Jorge; MONTÁVEZ, Juan P.; GARCÍA-BUSTAMANTE, Elena. A Revised Scheme for the WRF Surface Layer Formulation. *Monthly Weather Review*, [S.L.], v. 140, n. 3, p. 898-918, 1 mar. 2012. American Meteorological Society.
- KATATA, Genki. Fogwater deposition modeling for terrestrial ecosystems: a review of developments and measurements. *Journal Of Geophysical Research: Atmospheres*, [S.L.], v. 119, n. 13, p. 8137-8159, 14 jul. 2014. American Geophysical Union (AGU).
- LEUTBECHER, M.; PALMER, T.N.. Ensemble forecasting. *Journal Of Computational Physics*, [S.L.], v. 227, n. 7, p. 3515-3539, mar. 2008. Elsevier BV.
- LEWIS, John M.. Roots of Ensemble Forecasting. *Monthly Weather Review*, [S.L.], v. 133, n. 7, p. 1865-1885, 1 jul. 2005. American Meteorological Society

LORENZ, Edward N.. Deterministic Nonperiodic Flow. *Journal Of The Atmospheric Sciences*, [S.L.], v. 20, n. 2, p. 130-141, mar. 1963. American Meteorological Society.

MCCAA, James R. et al. *User's Guide to the NCAR Community Atmosphere Model (CAM 3.0)*. Colorado: Climate And Global Dynamics Division National Center For Atmospheric Research Boulder, 204. 97 p.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. *Completing the Forecast: characterizing and communicating uncertainty for better decisions using weather and climate forecasts*. Washington DC: The National Academies Press, 2006. 124 p.

PERSSON, A.. Forecast error and inconsistency in medium range weather prediction. *Preprints, 13th Conf. on Probability and Statistics*, San Francisco, CA, p. 253-259, 1996, American Meteorological Society.

PLEIM, Jonathan E.. A Simple, Efficient Solution of Flux–Profile Relationships in the Atmospheric Surface Layer. *Journal Of Applied Meteorology And Climatology*, [S.L.], v. 45, n. 2, p. 341-347, 1 fev. 2006. American Meteorological Society.

REBOITA, Michelle Simões; ROCHA, Rosmeri Porfirio da; AMBRIZZI, Tércio; SUGAHARA, Shigetoshi. South Atlantic Ocean cyclogenesis climatology simulated by regional climate model (RegCM3). *Climate Dynamics*, [S.L.], v. 35, n. 7-8, p. 1331-1347, 23 set. 2009. Springer Science and Business Media LLC.

SANTA CATARINA. Carlos Eduardo Salles de Araujo. Epagri/Ciram. PREVISÃO DE GEADAS. Disponível em: <https://ciram.epagri.sc.gov.br/index.php/previsao-geada/>. Acesso em: 10 abr. 2022.

SKAMAROCK, William C.; KLEMP, Joseph B.; DUDHIA, Jimy; GILL, David O.; LIU, Zhiqun; BERNER, Judith; WANG, Wei; POWERS, Jordan G.; DUDA, Michael G.; BARKER, Dale M.; HUANG, Xiang-yu. *A Description of the Advanced Research WRF Version 4*. [S.L.]: Tech. Note Ncar/Tn-556+Str, 2019. 162 p. UCAR/NCAR.

STENSRUD, David J. et al. Using Initial Condition and Model Physics Perturbations in Short-Range Ensemble Simulations of Mesoscale Convective Systems. *Monthly Weather Review*, [S.L.], v. 128, n. 7, p. 2077-2107, jul. 2000. American Meteorological Society.

SUNDQVIST, Hilding et al. Condensation and Cloud Parameterization Studies with a Mesoscale Numerical Weather Prediction Model. *Monthly Weather Review*, [S.L.], v. 117, n. 8, p. 1641-1657, ago. 1989. American Meteorological Society.

WILKS, Daniel S.. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. 4. ed. *Statistical Methods In The Atmospheric Sciences*: Elsevier, 2019. 840 p.

ZHANG, Chunxi; WANG, Yuqing. Projected Future Changes of Tropical Cyclone Activity over the Western North and South Pacific in a 20-km-Mesh Regional Climate Model. *Journal Of Climate*, [S.L.], v. 30, n. 15, p. 5923-5941, ago. 2017. American Meteorological Society.

ZHENG, Yue; ALAPATY, Kiran; HERWEHE, Jerold A.; GENIO, Anthony D. del; NIYOGI, Dev. Improving High-Resolution Weather Forecasts Using the Weather Research and Forecasting (WRF) Model with an Updated Kain–Fritsch Scheme. *Monthly Weather Review*, [S.L.], v. 144, n. 3, p. 833-860, 12 fev. 2016. American Meteorological Society.