

Artigo

Avaliação do Modelo WRF para Aplicação de um Índice de Previsão de Geadas na Região Sul do Brasil

Caio Vinicius Alves Bussoni¹, Demerval Soares Moreira¹ , Jeferson Prietsch Machado² 

¹*Departamento de Física, Faculdade de Ciências de Bauru, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Bauru, SP, Brasil.*

²*Programa de Pós-Graduação em Oceanologia, Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, RS, Brasil.*

Recebido em: 15 de Dezembro de 2021 - Aceito em: 23 de Julho de 2022

Resumo

O entendimento dos processos de formação, bem como a previsibilidade das geadas, é de suma importância para evitar prejuízos socioeconômicos, principalmente nas regiões que são propícias a ocorrência do fenômeno, como nas Regiões Sul e Sudeste do Brasil. Dentre os diversos métodos de prever as geadas, destaca-se a modelagem numérica, a qual, para este estudo, utilizou-se o modelo regional WRF. Este modelo permite escolher o conjunto de parametrizações, o que torna possível avaliar aquelas que melhor reproduzem as condições atmosféricas. Neste trabalho a avaliação das parametrizações foi realizada a partir de cinco eventos de geada, abrangendo sete municípios da Região Sul do Brasil. O modelo foi executado com aninhamento de grade para três domínios (30, 10 e 3 km de resolução) e para três conjuntos de parametrizações. O resultado apontou o menor erro quando se utilizou o seguinte conjunto de parametrizações: Dudhia para onda curta, RRTM para onda longa, WDM6 para microfísica de nuvens e YSU para a camada limite planetária. Posteriormente, um índice de geada (IG) foi aplicado para determinar qual melhor conjunto reproduz as condições da ocorrência da geada. O mesmo conjunto de parametrizações mostrou um melhor ajuste, evidenciando que a microfísica de nuvens e a radiação possuem pesos mais significativos na previsão do fenômeno geada.

Palavras-chave: modelo regional, geada, parametrizações físicas.

Evaluation of WRF Model for Application of Frost Forecast Index in the South Brazil

Abstract

Understanding the formation processes, as well as the predictability of frosts, is of paramount importance to avoid socioeconomic damage, especially in regions that are prone to the occurrence of the phenomenon, such as in the South and Southeast of Brazil. Among the various methods of forecasting frosts, numerical modeling stands out, which, for this study, used the regional model WRF. This model uses physical parameterizations to represent the sub-grid processes. The WRF allows to choose the parameterization set to be used, in this way, it is possible to evaluate the ones that best reproduce the atmospheric conditions. In this work, the evaluation of the parameterizations was carried out for a set of five cases, covering seven municipalities in the Southern Region of Brazil. The model was executed with grid nesting for three domains: 30, 10 and 3 km of resolution. and for three sets of parameterizations. The result showed that the smallest error was obtained when using the following set of parameterizations: Dudhia for short wave, RRTM for long wave, WDM6 for cloud microphysics and YSU for the planetary boundary layer. Subsequently, a frost index (GI) was applied to the data in order to determine which would better predict the conditions for the occurrence of frost. Again, the same set of parameterizations was better compared to the other sets, showing that the cloud and radiation microphysics have more significant weights in the forecast of the frost phenomenon.

Keywords: regional model, frost, physical parameterizations.

1. Introdução

Conforme definição de [Seluchi \(2009\)](#), existem diversos fenômenos que não se associam à convecção profunda e intensa, porém, associam-se a grandes prejuízos econômicos, como o visto em secas, ondas de calor, geadas, etc. Os fenômenos que diferem da convecção profunda são denominados como “adversos”, o que indica que são potencialmente perigosos para uma população ou para um país. A ocorrência do fenômeno geadas no Brasil é observado preferencialmente em latitudes maiores de 20° S, abrangendo os Estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul.

De acordo com [Seluchi \(2009\)](#) e [Santos \(2013\)](#), geadas se constituem no depósito de gelo cristalino sobre a superfície do solo, das plantas e de objetos, com temperaturas inferiores a de congelamento da água, onde ocorre a condensação do vapor d'água adjacente à superfície, e em seguida seu congelamento. O processo de congelamento ocorre de forma muito rápida.

Segundo Aguiar e [Mendonça \(2004\)](#), do ponto de vista agrônomo, o fenômeno geada é compreendido como responsável por provocar a morte da planta e de suas partes (folhas, frutos, ramos, etc.), em decorrência da baixa temperatura do ar, através do congelamento dos tecidos vegetais, independente ou não da formação de gelo.

Várias culturas são afetadas negativamente pelas geadas, tais como o fumo, as frutíferas e os hortigranjeiros. A pecuária leiteira também é afetada negativamente, pois, o fenômeno influencia no crescimento da pastagem. Até mesmo para culturas que tiram proveito benéfico da geada, como o trigo durante sua fase vegetativa, se atingido fora desta fase, pode ocasionar até a perda total da lavoura (Aguiar e [Mendonça, 2004](#)).

As geadas possuem dois processos de formação, sendo eles: advectivo e radiativo. As geadas com processo de formação advectiva constituem-se do avanço de massas de ar oriundas de latitudes mais altas, as quais associam-se ao deslocamento de frentes frias e aos anticiclones migratórios, que por sua vez associam-se as quedas acentuadas de temperatura. As geadas com processo de formação radiativo constituem-se no processo em que as condições meteorológicas são favoráveis ao decréscimo da temperatura (perda radiativa) na superfície durante o período da noite, atingindo temperaturas negativas ([Seluchi, 2009](#)). Vale ressaltar que, na presença de ambos os processos (advectivo e radiativo), a geada é considerada com mista.

[Seluchi \(2009\)](#) destaca que, na maioria dos casos de geada no Brasil, há predomínio do tipo radiativo, os quais se associam a um anticiclone migratório que sucede a passagem de sistemas frontais frios. Em resumo, tanto os processos advectivos quanto os radiativos são necessários para determinação da presença de geadas no país, onde os processos advectivos se associam às geadas com maior

poder destrutivo (geada negra), que ocorrem quando não se associam a formação de gelo, mas com temperaturas do ar próxima ao solo inferior à 0 °C, umidade baixa ou vento intenso. Já os processos radiativos se associam a geada branca, com o gelo depositado sobre as superfícies ([Seluchi, 2009](#)).

As geadas na Região Sul do Brasil ocorrem principalmente entre os meses do inverno austral (junho a agosto), porém, há registros no início do outono e fim da primavera. Além disso, essas geadas antecipadas ou tardias se mostram mais destrutivas no ponto de vista agrônomo ([Seluchi, 2009](#)).

Evidencia-se que as geadas não se restringem apenas ao sul do Brasil, pois há ocasiões em que os sistemas frontais e os anticiclones associados as suas retaguardas conseguem deslocar-se para as latitudes mais baixas. As massas polares que atingem baixas latitudes, incluindo a Região Amazônica, localmente são intituladas como friagem. Em decorrência dos intensos anticiclones, associados às incursões de ar frio, a perda de calor noturno por resfriamento radiativo causa baixa umidade e ausência de nuvens, fazendo com que o ar frio se mantenha por vários dias sem modificação, o que gera condições favoráveis para ocorrência de geada ([Escobar, 2007](#)).

Estudos que envolvem a climatologia de eventos de geada de uma forma ampla são escassos e restritos mais ao Sul do Brasil. Neste contexto, destaca-se Aguiar e [Mendonça \(2004\)](#), que realizaram uma climatologia de geada para o Estado de Santa Catarina a partir de 24 anos de dados observados. Os autores destacam que o período de maior frequência do fenômeno é de maio a setembro, ocorrendo mais eventos durante períodos com a atuação da La Niña. Já [Wrege et al. \(2018\)](#) determinaram o risco de ocorrência de geada para o Centro-Sul do Brasil a partir de valores de temperatura mínima no abrigo inferiores a 3 °C. Os autores concluíram que a região situada entre o sul do Paraná e o norte do Rio Grande do Sul apresenta o maior risco, principalmente nos municípios de maior altitude.

O entendimento das condições atmosféricas favoráveis à geada, juntamente com as técnicas utilizadas para redução de danos, possuem alta aplicabilidade quando associadas com previsões meteorológicas precisas. Desta forma, os mecanismos de alerta de geadas são desenvolvidos/testados com base em previsões de modelos numéricos (Prabha e [Hoogenboom, 2008](#)) e redes neurais (Ghielmi e Eccel, 2006).

A previsão de geada é um assunto de grande interesse, principalmente para os agricultores, os quais normalmente buscam informações sobre a aproximação de sistemas causadores de geadas ([Santos et al., 2013](#)).

Existem processos atmosféricos, que não estão contidos no domínio da dinâmica de fluidos, como a formação de nuvens, a precipitação e as trocas radiativas que, por estarem em uma escala espacial e temporal menor, não são

representados pelas leis da hidrodinâmica, como as trocas turbulentas. Esses processos situam-se em uma escala inferior as grades dos modelos numéricos, sendo assim denominados como processos de sub-grade. O esquema responsável por relacionar os processos de sub-grade com as variáveis prognósticas, denomina-se parametrização. A utilização das parametrizações em modelos dinâmicos é essencial para a resolução de equações que estimam os efeitos provenientes dos processos de sub-grade (Ferreira *et al.*, 2008). Desta forma, as parametrizações são responsáveis por simular processos de pequena escala, contabilizando os seus efeitos na grade do modelo e, assim, são capazes de obter resultados mais realísticos (Ferreira *et al.*, 2008). Uma descrição detalhada das parametrizações aplicadas ao modelo numérico regional *Weather Research and Forecasting* (WRF) é encontrada em Skamarock *et al.* (2005) e Bender (2012).

Conforme Rozante *et al.* (2019), índices para a detecção de geadas são obtidos via previsões meteorológicas de modelos regionais, os quais possuem maior resolução espacial e temporal quando comparados com os modelos globais. O índice proposto por Rozante *et al.* (2019) possui uma abordagem multivariada e, inclui-se em sua formulação, os processos de ocorrência de geada, tornando-se necessário a utilização de cinco variáveis: temperatura (T) e umidade relativa (H), ambas à 2 m de altura; velocidade do vento à 10 m de altura (V); pressão reduzida ao nível médio do mar (P); e nebulosidade (N). De acordo com Rozante *et al.* (2019), os resultados do novo índice de geada foram comparados com as saídas de temperatura do modelo regional ETA. Verificou-se que, para as três áreas selecionadas (Sul e Sudeste do Brasil, Uruguai, Paraguai e parte da Argentina e Bolívia) e para todas as horas previstas, o índice de geada produz melhores resultados do que as previsões diretas de temperatura do modelo. Desta forma, os autores concluíram que o uso do índice em ambiente operacional proporciona melhora considerável na previsibilidade de eventos de geada.

Este trabalho teve como objetivo avaliar a resposta do modelo WRF em função às diferentes parametrizações físicas e determinar as que melhor se adaptam em eventos de geada, com especificidade para a região Sul do Brasil. Objetivou-se também utilizar as variáveis provenientes do modelo WRF para o cálculo de um índice de geada.

2. Materiais e Métodos

O desenvolvimento deste trabalho foi realizado a partir do modelo regional WRF, versão 3.9.1, onde utilizou-se como condições iniciais e de contorno os dados de alta resolução da reanálise do ERA-Interim (ERA-I) (Dee *et al.*, 2011). Essa reanálise é produzida pela *European Center for Medium-Range Weather Forecasting* (ECMWF), com resolução de $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ de latitude por

longitude, com 37 níveis verticais, e para os horários 00, 06, 12 e 18 UTC (Simmons *et al.*, 2007).

Segundo Skamarock *et al.*, 2005, o modelo WRF constitui um sistema de modelagem atmosférica que utiliza processos de subgrade que são explicitamente incorporados por meio de esquemas de parametrizações, que são implementadas em módulos separados em cinco blocos: (1) microfísica, (2) parametrização de cumulus, (3) camada limite planetária, (4) modelo de superfície e (5) radiação. O WRF é desenvolvido através dos esforços colaborativos entre: NCAR *Mesoscale and Microscale Meteorology* (MMM), *the National Oceanic and Atmospheric Administration's* (NOAA), *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP), *Forecast System Laboratory* (FSL), *Department of Defense's Air Force Weather Agency* (AFWA), *Naval Research Laboratory* (NRL), *Center for Analysis and Prediction of Storms* (CAPS) da Universidade de Oklahoma, e *Federal Aviation Administration* (FAA). A coordenada vertical atribuída para o modelo WRF é a sigma (σ) (Laprise, 1992).

Também foi necessária a utilização dos dados observados provenientes das estações meteorológicas convencionais do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), os quais foram assumidos como condição atmosférica verdadeira. Desta forma, foram utilizadas as seguintes variáveis na avaliação dos resultados das simulações: Temperatura do ar a 2 m (*tar*), Umidade relativa a 2 m (*rh*) e Velocidade do vento a 10 m (*vnt*). Estas variáveis foram simuladas dentro dos limites dos três domínios no modelo WRF, onde: domínio (1) representa a menor resolução do modelo (30 km); domínio (2) representa uma resolução intermediária do modelo (10 km); por fim o domínio (3) representa uma alta resolução do modelo (3 km) (Fig. 1).

Os casos estudados foram selecionados obedecendo aos seguintes critérios: estarem localizados dentro das regiões dos três domínios; possuírem dados observados provenientes das estações convencionais do INMET; apresentarem casos de ocorrência de geada. Deste modo, foram selecionados 5 casos, abrangendo os municípios de Bom Jesus-RS, Lagoa Vermelha-RS e Passo Fundo-RS; Campos Novos-SC, Chapecó-SC, Lages-SC e São Joaquim-SC (Fig. 2).

Mostra-se na Tabela 1, o comparativo entre as altitudes observadas nas estações do INMET e as altitudes representadas pelo modelo WRF. Estes municípios, também foram investigados por Machado *et al.* (2018), porém, com menor número de casos, e menor tempo de simulação.

As datas iniciais e finais de cada um dos cinco casos analisados, juntamente com o tempo de simulação, para todas as cidades representadas na Fig. 2, estão evidenciadas na Tabela 2.

As parametrizações foram organizadas em três conjuntos, onde cada conjunto possui uma variação de forma que fosse possível investigar a influência de processos

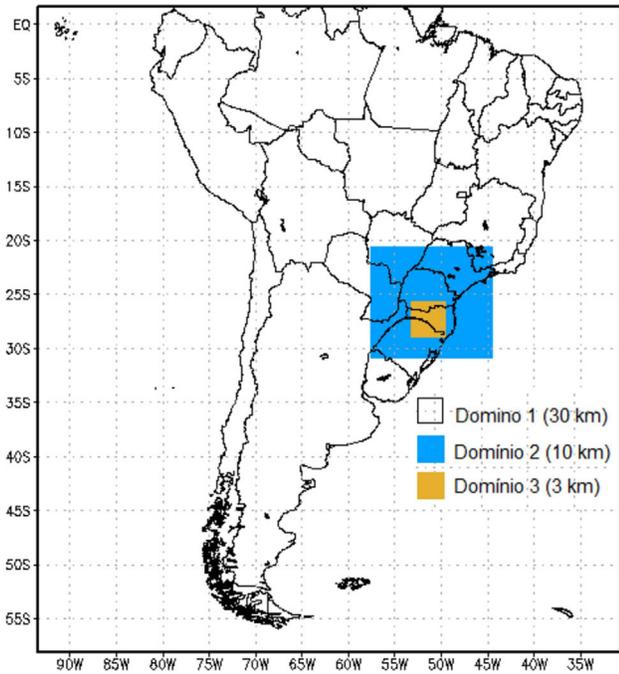


Figura 1 - Representação dos domínios 1, 2 e 3 (30, 10 e 3 km) para os casos simulados.

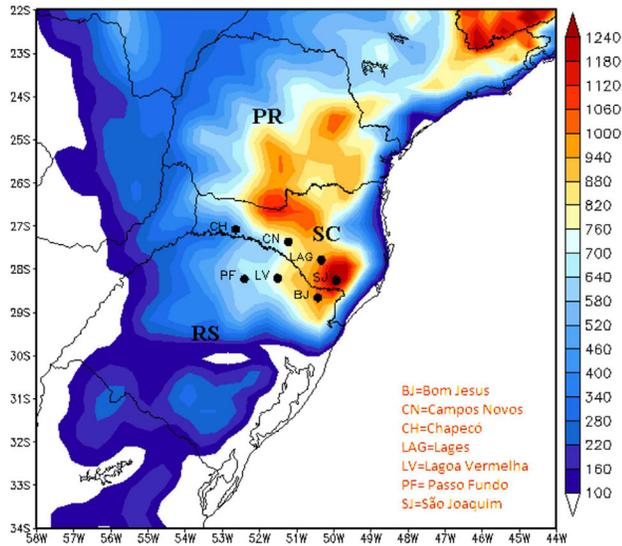


Figura 2 - Representação da localização das cidades selecionadas, em relação à topografia [metros], gerada via modelo WRF.

específicos na previsão da geada. A parametrização WRF *Single-Moment 6-class* (WSM6), foi utilizada por apresentar melhores resultados para representação da microfísica de nuvens, conforme o apresentado por Zepka (2011), a qual também avaliou a parametrização Grell-Devenyi que representa cumulus. As parametrizações da camada limite planetária Mellor-Yamada-Janjic (MYJ), MM5 para cama superficial, *Rapid radiation transfer model* (RRTM) para radiação de onda longa, foram utili-

Tabela 1 - Comparativo entre altitudes registradas nas estações do INMET, e altitudes representadas pelo modelo WRF.

Cidades	Altitude na estação (metros)	Altitude do WRF (metros)
Bom Jesus - RS	1048	985
Campos Novos - SC	963	896
Chapecó - SC	679	614
Lages - SC	953	916
Lagoa Vermelha - RS	834	785
Passo Fundo - RS	681	621
São Joaquim - SC	1400	1277

Tabela 2 - Tempos de simulações e datas iniciais e finais para cada caso.

Caso	Data Inicial	Data Final	Tempo de simulação (horas)
1°	05/06/2012 00 UTC	11/06/2012 18 UTC	162
2°	25/07/2014 00 UTC	29/07/2014 18 UTC	114
3°	07/06/2016 00 UTC	14/06/2016 18 UTC	186
4°	06/07/2016 00 UTC	10/07/2016 18 UTC	114
5°	17/07/2016 00 UTC	20/07/2016 18 UTC	90

zadas por apresentarem melhores resultados de acordo com os estudos de Prabha *et al.* (2007) e Prabha e Hoo-genboom (2008). Desta forma, a disposição de cada conjunto de parametrizações está representada na Tabela 3. Neste trabalho foi utilizado o esquema Noah como modelo solo-superfície.

A simulação P1 é considerada neste estudo como controle (padrão do WRF); a simulação P2 investiga a influência da microfísica de nuvens, das radiações e da parametrização de cumulus, quando comparada com a simulação P1; por fim, a simulação P3 verifica a influência da Camada Limite Planetária (CLP) e da Camada superficial, em relação à simulação de controle (P1). Destaca-se

Tabela 3 - Disposição dos conjuntos de parametrizações.

Esquema	Microfísica de nuvens	Cumulus	Camada superficial	Camada Limite Planetária	Radiação de onda curta/longa
P1	New Thompson	Grell-Devenyi	MM5	YSU	RRTMG/RRTMG
P2	WSM6	Grell 3D	MM5	YSU	Dudhia/RRTM
P3	New Thompson	Grell-Devenyi	ETA	MYJ	RRTMG/RRTMG

que, de modo geral, não há preferência entre as parametrizações, já que o desempenho de cada modelo se torna dependente da região, da escala e dos interesses de aplicação (Kuo *et al.*, 1996; Ruiz *et al.*, 2010; Zepka, 2011).

Os resultados dos testes com diferentes parametrizações do modelo WRF foram avaliados utilizando o cálculo estatístico do Erro Médio (ME em inglês) e da Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE em inglês).

A Eq. (1) apresenta o Índice de Geada (IG) utilizado nesse trabalho, proposto por Rozante *et al.* (2019):

$$IG(i,j,h) = w_1 \cdot \frac{(\overline{T(i,j,h)} - T_m(i,j,h))}{\sigma_T(i,j,h)} + w_2 \cdot \frac{(P_m(i,j,h) - \overline{P(i,j,h)})}{\sigma_P(i,j,h)} + w_3 \cdot \frac{(\overline{V(i,j,h)} - V_m(i,j,h))}{\sigma_V(i,j,h)} + w_4 \cdot \frac{(\overline{N(i,j,h)} - N(i,j,h))}{\sigma_N(i,j,h)} + w_5 \cdot \frac{(\overline{H(i,j,h)} - H(i,j,h))}{\sigma_H(i,j,h)} \quad (1)$$

onde P_m, T_m, V_m, H_m e N_m são as variáveis extraídas do modelo numérico WRF no horário da temperatura mínima de cada dia das simulações: pressão ao nível médio do mar, temperatura a 2 m, magnitude do vento a 10 m, umidade relativa a 2 m e nebulosidade, respectivamente; $\overline{P}, \overline{T}, \overline{V}, \overline{H}$ e \overline{N} são as variáveis médias em relação aos casos de ocorrência de geada; $\sigma_P, \sigma_T, \sigma_V, \sigma_H$ e σ_N referem-se ao desvio padrão dos casos com ocorrência de geada; $w_i, i = 1 \dots 5$ são os pesos atribuídos para cada variável meteorológica, obedecendo a restrição de $\sum w_i = 1$.

Conforme descrito por Rozante *et al.* (2019), os respectivos pesos empregados a cada termo referem-se à influência de cada variável no ponto de vista fenomenológico. Desta forma, apresenta-se a Temperatura (T) como portadora do maior peso, seguida pela Pressão ao nível médio do mar (P) e Magnitude do vento (V). Os demais pesos ajustam-se de modo a satisfazer a restrição ($\sum w_i = 1$). Estes pesos são parametrizados em função dos parâmetros α, β e γ , onde $0,7 \leq \alpha \leq 1, 0 \leq \beta \leq 1$ e $\gamma = 4$. De acordo com Rozante *et al.* (2018), o critério de seleção dos pesos e limiares levou em conta a combinação entre eles que produziram os maiores números de acertos, ou seja, quando a proporção de acertos com e sem ocorrência do evento assumisse o valor máximo entre todas as combinações. A formulação de cada peso está representada nas Eqs. (2) a (7) a seguir:

$$\theta = (1 - \beta^\gamma) \cdot \frac{\pi}{2} \quad (2)$$

$$w_1 = \alpha \quad (3)$$

$$w_2 = \alpha \cdot \cos(\theta) \quad (4)$$

$$w_3 = \alpha \cdot \cos(\theta) \quad (5)$$

$$w_4 = \beta^\gamma \cdot (1 - \alpha) \quad (6)$$

$$w_5 = -2 \cdot \cos(\theta) + (1 - \alpha) \cdot (1 - \beta^\gamma) \quad (7)$$

Para obtenção dos pesos torna-se necessário um conjunto volumoso de dados, pois a calibragem é realizada empiricamente, requisito este que não contempla o presente trabalho. Mais detalhes sobre o índice de geada utilizado neste trabalho podem ser obtidos em Rozante *et al.* (2018) e Rozante *et al.* (2019). No presente estudo, utilizou-se os mesmos pesos obtidos por Rozante *et al.* (2019), uma vez que, esses autores também calcularam os pesos para a região Sul do Brasil. No entanto, os pesos foram obtidos empregando o modelo regional ETA (Mesinger *et al.*, 1988), com resolução horizontal de 15 km e 50 níveis de resolução vertical, grade diferente da que foi utilizada com o modelo WRF. Portanto, para a inserção dos resultados obtidos pelo modelo WRF no Índice de Geada foi necessário realizar uma interpolação dos dados.

Como a previsão do Índice de Geada foi calculada para toda uma região, para facilitar a análise qualitativa dos casos de geada utilizou-se uma máscara que apresenta somente as localidades desejadas. Assim, a avaliação qualitativa da representatividade do Índice de Geada foi realizada através da confecção de uma tabela de contingência (Tabela 4), a qual foi utilizada para calcular os índices estatísticos responsáveis por avaliar a confiabilidade, precisão e exatidão dos resultados gerados pelo Índice de Geada quando comparados com os valores observados.

Os índices estatísticos, bem como sua formulação, são apresentados na Tabela 5.

3. Resultados e Discussões

A Tabela 6 apresenta a frequência de ocorrência de geada nas cidades investigadas (Tabela 1) e nos períodos avaliados (Tabela 2), relacionando a altitude da região com a intensidade de ocorrência do fenômeno.

Vale ressaltar que a intensidade da geada foi obtida pelas observações meteorológicas nas estações convencionais do INMET, sendo considerada fraca quando a tempe-

Tabela 4 - Tabela de contingência utilizada para comparação dos acertos e erros na estimativa de ocorrência (Sim) ou não ocorrência (Não) do evento.

Previsto	Sim	Não	Total
Sim	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a + b</i>
Não	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>c + d</i>
Total	<i>a + c</i>	<i>b + d</i>	<i>n = a + b + c + d</i>

Tabela 5 - Índices estatísticos, formulação, definição e limiares para avaliação de cada índice (Wilks, 2011).

Índice	Fórmula	Significado	Valores
Proportion correct	$PC = \frac{a+d}{a+b+c+d}$	Proporção de acertos com ou sem a ocorrência do evento.	$0 \leq PC \leq 1$; perfeito = 1
Probability of detection	$POD = \frac{a}{a+c}$	Proporção de êxitos, uma vez que o evento ocorreu.	$0 \leq POD \leq 1$; perfeito = 1
False alarm rate	$FAR = \frac{b}{a+b}$	Proporção de previsões de ocorrências que não ocorreram.	$0 \leq FAR \leq 1$; perfeito = 0
Critical success index	$CSI = \frac{a}{a+b+c}$	Proporção de ocorrências, omitindo casos em que a não ocorrência do evento foi corretamente prevista.	$0 \leq CSI \leq 1$; perfeito = 1
BIAS	$BIAS = \frac{a+b}{a+c}$	Proporção do número de ocorrências previstas para o número observado.	$BIAS > 0$; Perfeito = 1, $BIAS > 1$ (superestimativa) $BIAS < 1$ (subestimativa)

Tabela 6 - Representação dos casos de geada observadas, em função da intensidade da geada e altitude do local.

Intensidade	Regiões baixas (altitude < 700 m)	Regiões altas (altitudes ≥ 1000 m)
Fraca	1	4
Moderada	8	7
Forte	16	27
Total	25	38

ratura do ar no abrigo está entre 3 e 5 °C; moderada entre 1 e 3 °C e forte ≤ 0 °C.

Deste modo, são apresentadas as frequências de ocorrência de geada na “Regiões baixas”, aquelas com altitude inferior à 700 m, e “Regiões altas”, com altitude superior ou igual à 1000 m. Desta forma, serão avaliados os municípios de Chapecó - SC e Passo Fundo - RS (Regiões baixas) e os municípios de Bom Jesus - RS e São Joaquim - SC (Regiões altas), como evidenciado na Tabela 1.

Os valores totais encontrados na Tabela 6 são coerentes com resultados de trabalhos anteriores, como Aguiar e Mendonça (2004), em que a maior concentração dos casos de geada observada se situa em regiões com maiores altitudes.

Devido ao fato do modelo WRF ter sido executado com aninhamento de grade tipo “two-way”, onde existem trocas de informações da grade com menor resolução para a grade mais refinada e vice-versa, os valores de todas as grades são muito semelhantes. Portanto, será apresentado somente os resultados provenientes da grade mais refinada (D3 - 3 km), minimizando assim os erros proveniente das interpolações para o ponto de observação. A Tabela 7 apresenta os valores do ME e RMSE, aplicados para as variáveis: temperatura do ar a 2 m, umidade relativa do ar a 2 m e velocidade do vento a 10 m.

Evidencia-se através da análise do ME que o modelo WRF superestima a temperatura do ar quando utiliza-se os conjuntos de parametrizações P1 (ME = 1,2 °C) e P3 (ME = 1,2 °C). Para o conjunto de parametrizações P2, ocorre uma pequena subestimativa da temperatura do ar (ME = -0,2 °C). O RMSE mostra que o conjunto P2 foi o que proporcionou o menor erro na temperatura do ar (RMSE = 2,3 °C). Destaca-se que este comportamento de

Tabela 7 - Valores estatísticos de cada variável, em relação ao conjunto de parametrizações. Comparando os dados do domínio 3 (D3) do WRF com os dados observados nas estações automáticas do INMET.

Variável	Parametrização	Erro médio (ME)	Raiz quadrada do erro médio (RMSE)
T [°C]	P1	1,2	2,5
T [°C]	P2	-0,2	2,3
T [°C]	P3	1,2	2,5
H [%]	P1	-13,4	21,2
H [%]	P2	-11,0	19,6
H [%]	P3	-11,7	20,1
V [m/s]	P1	2,2	3,2
V [m/s]	P2	1,4	2,4
V [m/s]	P3	2,7	3,6

subestimativa do conjunto P2 para a temperatura do ar, também foi evidenciado por Machado *et al.* (2018), porém, com valor de RMSE ligeiramente menor (2,1 °C). Portanto, pode-se dizer que ao modificar as parametrizações de microfísica de nuvens e de radiação em relação à simulação de controle, obtém-se um melhor ajuste nos valores de temperatura do ar, causando impactos positivos na previsibilidade do fenômeno geada.

Os dados provenientes do modelo, referente à umidade relativa do ar, apresentam um comportamento de subestimativa (Tabela 7). Através do RMSE, evidencia novamente o conjunto de parametrizações P2 como o representante do menor valor (RMSE = 19,6 %). Os resultados elevados podem estar relacionados com o nível em que o modelo realiza seus cálculos (2 m de altura), visto que, para obtenção dos valores de umidade relativa foram utilizadas as variáveis temperatura e pressão, pois o modelo não possuía a variável umidade relativa. Apesar da sensação de um erro elevado, ressalta-se que a umidade relativa é uma variável que apresenta dificuldades de representação pelos modelos. Como essa variável se limita de 0 a 100%, um erro de aproximadamente 20 % mostra-se satisfatório em um primeiro momento.

Com relação à velocidade do vento, nota-se na Tabela 7 um comportamento de superestimativa desta variável. Entretanto, o conjunto de parametrizações P2 também apresenta o melhor resultado, com ME e RMSE

significativamente menores do que os outros dois conjuntos de parametrizações (ME = 1,4 m/s e RMSE = 2,4 m/s). Possíveis erros associam-se a condições de estabilidade atmosférica e ventos fracos, pois, conforme Battisti (2014), em situações de ondas de frio, onde ocorre o desacoplamento entre a superfície e a atmosfera e há grande perda radiativa (noites e madrugadas), os modelos apresentam dificuldade em representar este processo.

Os IG são calculados em toda a grade do modelo (Região Sul do Brasil), o que dificulta a análise qualitativa dos eventos, como evidenciado na Fig. 3A. Para realizar um comparativo entre o simulado pelo IG (Fig. 3A) e a distribuição dos registros de geada, apresentado pelo INMET (Fig. 3B), tornou-se necessário a utilização de uma máscara que apresenta somente as cidades estudadas, facilitando o comparativo do simulado com o observado (Fig. 4).

Como o objetivo é aferir a ocorrência ou não ocorrência do fenômeno geada, realizou-se a análise qualitativa, desconsiderando a intensidade do evento. Esta análise foi possível através da utilização da tabela de contingência (Tabela 4), a qual foi separada para os três conjuntos de parametrização (P1, P2 e P3). Os resultados

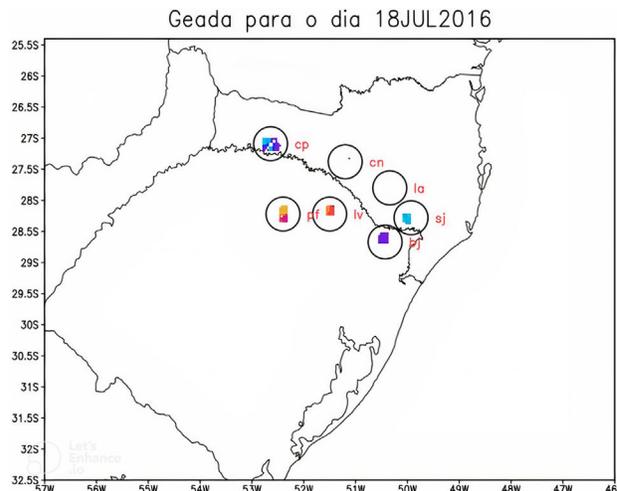


Figura 4 - Resultados extraídos do IG (utilizando máscara) para o dia 18 de julho de 2016, referente ao conjunto P2.

desta tabela de contingência estão representados na Tabela 8.

Ao analisar os resultados apresentados na Tabela 9 tem-se que a proporção de acertos com ou sem a ocorrência do evento (PC) apresentou melhores resultados para os

Tabela 8 - Tabela de contingência com os valores obtidos através da análise qualitativa.

	P1		P2		P3	
	Obs_Sim	Obs_Não	Obs_Sim	Obs_Não	Obs_Sim	Obs_Não
Prev_Sim	63	15	70	23	51	14
Prev_Não	37	88	30	80	49	89

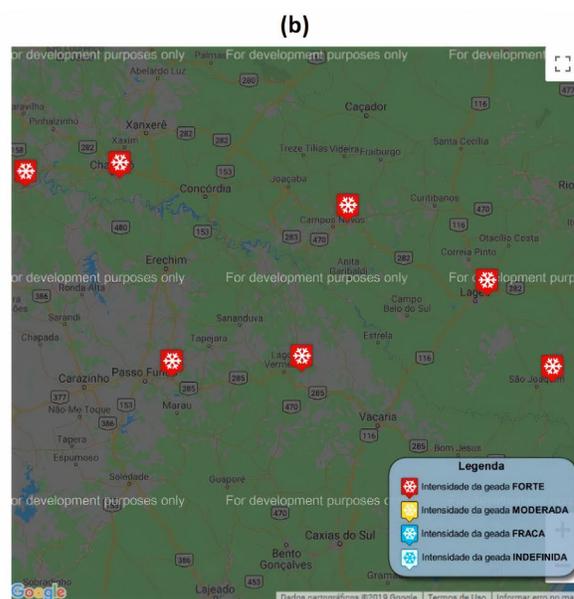
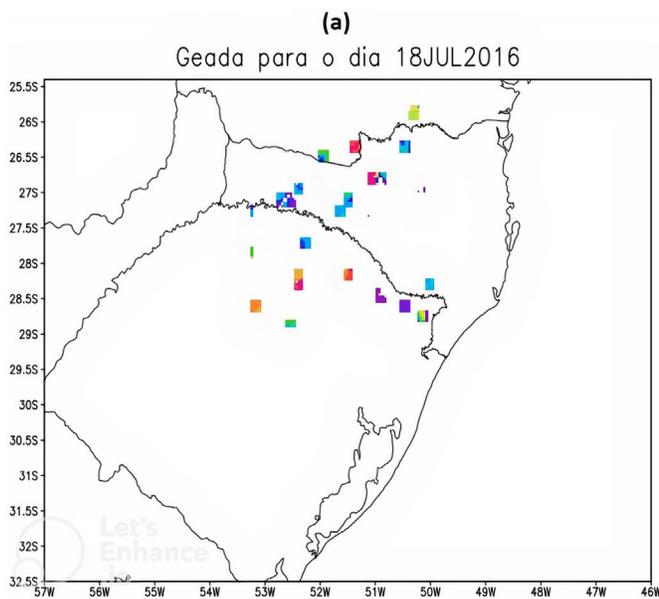


Figura 3 - Comparativo entre os resultados extraídos do IG (a) e o observado pelas estações convencionais do INMET (b) para o dia 18 de julho de 2016, referente ao conjunto P2.

Tabela 9 - Resultados dos índices estatísticos, para os três conjuntos de parametrizações, aplicados no domínio de alta resolução.

	PC	POD	FAR	CSI	BIAS
P1	0,74	0,63	0,19	0,55	0,78
P2	0,74	0,7	0,25	0,57	0,93
P3	0,69	0,51	0,21	0,45	0,65

conjuntos de parametrizações P1 e P2 (0,74), em comparação com P3 (0,69), já que para serem considerados ótimos deveriam apresentar valores iguais a 1.

Logo, o índice está mais assertivo, mas não está isento de erros sistemáticos, significando que, apesar de próximo ao desejado houve simulações em que o modelo atribuiu geada para as regiões, porém, o evento não foi observado. Já a proporção de êxitos apresentou melhores resultados para o conjunto P2 (0,7), quando comparado com os conjuntos P1 (0,63) e P3 (0,51), tendo em vista que, para ser considerado ótimo, deveria apresentar valor igual a 1. Este índice estatístico fornece um posicionamento em relação a previsibilidade do IG. A proporção de previsões de ocorrências do fenômeno que não ocorreu (FAR) se mostrou melhor para o conjunto P1 (0,19), quando comparado com P2 (0,25) e P3 (0,21), uma vez que, o resultado ideal ou ótimo seria igual a 0. Este índice estatístico apresenta os falsos alarmes que o IG pode apresentar. A proporção de ocorrências, omitindo casos em que a não ocorrência do evento foi corretamente prevista (CSI), apresentou melhores resultados no conjunto P2 (0,57) em comparação com P1 (0,55) e P3 (0,45), já que, para uma ótima representatividade, o valor é igual a 1. Por último, a proporção do número de ocorrências previstas para o número observado (BIAS) apresentou melhores resultados para o conjunto P2 (0,93), quando comparado com P1 (0,78) e P3 (0,65), devido aos resultados ótimos para este índice, serem iguais a 1.

4. Considerações finais

Com base nos resultados obtidos, o conjunto de parametrizações intitulado P2, que investiga os processos de microfísica de nuvens e radiação de onda curta/longa, representou melhor as condições de formação do fenômeno geada, quando comparado com os outros dois conjuntos (P1 e P3).

Conclui-se também, que o conjunto P2, quando aplicado no índice de geada (IG), previu com maior confiabilidade, já que, a proporção de previsões do conjunto P2 aplicada no domínio D3 (3 km) é superior aos demais conjuntos e mostra-se satisfatória. Embora o *False Alarme* (FAR) tenha se mostrado pior para o conjunto P2, o mesmo deixa de ser tão representativo, uma vez que o índice BIAS se mostrou abaixo do valor considerado ótimo (igual a 1), indicando a subestimativa da ocorrência de geadas. Associa-se também, os erros observados, em de-

corrência da utilização dos pesos, uma vez que, os mesmos foram obtidos com modelo e grade diferente do utilizado neste trabalho, além da diferença de altitude entre o observado e o representado pelo modelo WRF, que pode contribuir para o aumento dos erros.

Em trabalhos futuros pode-se avaliar a magnitude da geada, uma vez que os resultados obtidos por este trabalho buscaram apenas a previsão da ocorrência ou não ocorrência de geadas. Também, sabendo-se que o melhor conjunto de parametrizações a ser utilizado para a previsão do IG é o P2, pode-se analisar um conjunto bem maior de casos para se obter os pesos proveniente do próprio modelo WRF e utilizando a mesma resolução/grade.

Os objetivos propostos nesse trabalho foram alcançados, e seu resultados, em concordância com a trabalho de Machado *et al* (2018), mostraram que a melhor escolha das parametrizações de microfísica de nuvens e radiação, proporciona ganhos consideráveis na previsão das geadas.

Por fim, mostra-se possível o desenvolvimento de produtos operacionais voltados para previsão de ocorrência de geadas utilizando as previsões do modelo WRF, o qual é executado operacionalmente no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Agradecimentos

Agradecemos o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro através do Projeto Universal-CNPq (processo 422063/20169). Também agradecemos ao Centro de Meteorologia de Bauru (IPMet) pela estrutura fornecida para a realização deste trabalho.

Referências

- AGUIAR, D.; MENDONÇA, M. Climatologia das geadas em Santa Catarina. *Simpósio Brasileiro de Desastres Naturais*, v. 1, p. 762-773, 2004.
- BATTISTI, A. *Parametrização de Turbulência na Previsibilidade de Temperaturas Mínimas em um Modelo de Mesoescala*. Dissertação de Mestrado em Meteorologia, Universidade de Santa Maria, 92 p, 2014.
- BENDER, F.D. *Verificação da Previsão de Tempo em São Paulo com o Modelo Operacional WRF*. Dissertação de Mestrado em Meteorologia, Universidade de São Paulo, 164 p., 2012.
- DEE, D.P.; UPPALA, S.M.; SIMMONS, A.J.; BERRISFORD, P.; POLI, P. *et al*. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 137, n. 656, p. 553-597, 2011.
- ESCOBAR, G.C.J. Padrões sinóticos associados a ondas de frio na cidade São Paulo. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 22, n. 2, p. 241-254, 2007.
- FERREIRA, A.P.; CASTANHEIRA, J.M.; ROCHA, A.; FERREIRA, J. Estudo de sensibilidade das previsões de super-

- fície em Portugal pelo WRF face à variação das parametrizações físicas. **XXX Jornadas Científicas de la Asociación Meteorológica Española**, n. 1, p. 1-27, 2008.
- GHIELMI, L.; ECCEL, E. Descriptive models and artificial neural networks for spring frost prediction in an agricultural mountain area. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 54, n. 2, p. 101-114, 2006.
- HALLAK, R.; PEREIRA FILHO, A. J. Metodologia para análise de desempenho de simulações de sistemas convectivos na região metropolitana de São Paulo com o modelo ARPS: sensibilidade a variações com os esquemas de advecção e assimilação de dados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 4, p. 591-608, 2011.
- KUO, Y.H.; REED, R.J.; LIU, Y. The ERICA IOP5 Storm. Part III: mesoscale cyclogenesis and precipitation parameterization. **Monthly Weather Review**, v. 124, n. 7, p. 1409-1434, 1996.
- LAPRISE, R. The Euler equations of motion with hydrostatic pressure as independent variable. **Monthly Weather Review**, v. 120, n. 1, p. 197-207, 1992.
- MACHADO, J.P.; QUADRO, M.F.L.; CARDOSO, C.S.; ARAÚJO, C.E.S.; RODRIGUES, G.L.; *et al.* Evaluación preliminar de las parametrizaciones físicas del modelo WRF para un caso de helada en el Sur de Brasil. **Meteorologica**, v. 43, n. 1, p. 3-23, 2018.
- MESINGER, F.; JANJIC, Z.L.; NICKOVIC, S.; DEAVEN, D.G. The stepmountain coordinate: model description and performance for cases of Alpine lee cyclogenesis and for a case of Appalachian redevelopment. **Monthly Weather Review**, v. 116, n. 7, p. 1493-1518, 1988.
- PRABHA T.; HOOGENBOOM, G. Evaluation of the weather research and forecasting model for two frost events. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 64, n. 2, p. 234-247, 2008.
- ROZANTE, J.R.; FERNANDES, A.A.; SILVA, V.M. **Desenvolvimento de um Índice de Previsão de Geadas: Técnicas e Validação**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 32 p., 2018.
- ROZANTE, J.R.; GUTIERREZ, E.R.; DIAS, P.L.S.; FERNANDES, A.A.; ALVIM, D.S.; SILVA, V.M. Development of an index for Frost prediction: technique and validation. **Meteorological Applications**, v. 27, n. 1, p. 1-12, 2019.
- RUIZ, J.J.; SAULO, C.; NOGUÉS-PAEGLE, J. WRF model sensitivity to choice of parameterization over South America: validation against surface variables. **Monthly Weather Review**, v. 138, n. 8, p. 3342-3351, 2010.
- SANTOS, A.P.; GONÇALVES, J.P.; FERREIRA, A.S.; SANTOS, S.R.Q. Previsão de geada para a região Sul do Brasil: uma avaliação do Modelo ETA 15 km durante o Outono de 2012. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, n. 1, p. 100-109, 2013.
- SELUCHI, M.E. Geadas e friagens. In: CAVALCANTI, I.F.A.; FERREIRA, N.J.; DIAS, M.A.F.; JUSTI, M.G.A. **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Editora Oficina de Textos, v. 1, p. 375-384, 2009.
- SIMMONS, A.; UPPALA, C.; DEE, D.; KOBAYASHI, S. ERA-Interim: new ECMWF reanalysis products from 1989 onwards. **ECMWF Newsletter**, v. 110, n. 1, p. 25-35, 2007.
- SKAMAROCK, W.C.; KLEMP, J.B.; DUDHIA, J.; GILL, D.O.; BARKER, D.M.; WANG, W.; POWERS, J.G. A description of the advanced research WRF version 2. **NCAR Technical Note**. Boulder: WRF, 100 p, 2005.
- WILKS, D.S. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**. Oxford: Academic Press, 2011.
- WREGE, M.S.; FRITZSONS, E.; SOARES, M.T.S.; PRELAPÂNTANO, A.; STEINMETZ, S.; CARAMORI, P.H.; *et al.* Risco de ocorrência de geada na região Centro-Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, n. 1, p. 524-553, 2018.
- ZEPKA, G.S. **Previsão de Descargas Atmosféricas Usando o Modelo de Mesoescala WRF**. Tese de Doutorado em Geofísica Espacial, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 178 p, 2011.