

Previsão de geada em Santa Catarina

Carlos Eduardo Salles de Araujo¹, Ângelo Mendes Massignam² e Rafael Censi Borges³

Resumo – A geada é um evento meteorológico caracterizado pela formação de gelo sobre plantas e objetos expostos ao relento, sendo observada principalmente nos meses de maio a setembro na Região Sul do Brasil. O estudo climatológico e a previsão do fenômeno são importantes para o setor agropecuário em razão dos danos às culturas e consequentes prejuízos à economia. Este trabalho propõe um modelo probabilístico para previsão de geadas de diferentes intensidades no Estado de Santa Catarina. A metodologia utiliza um modelo linear generalizado para determinar um índice de geada, correspondente à relação entre a ocorrência de geadas de diferentes intensidades e as seguintes variáveis prognósticas do modelo meteorológico Weather Research and Forecasting (WRF): a temperatura mínima diária do ar (Tmin); a umidade relativa (UR) e a intensidade do vento (v) observadas no mesmo horário de Tmin. Os resultados obtidos a partir da análise de 3 anos de dados mostraram um bom desempenho do modelo na previsão de geada, principalmente na separação das diferentes intensidades do fenômeno.

Termos para indexação: Agrometeorologia, modelo logístico, previsão do tempo.

Frost forecast in Santa Catarina State, Brazil

Abstract – Frost is a weather event characterized by the formation of ice on exposed objects and plants, being observed mainly from May to September in Southern Brazil. Climate study and frost forecast are important for the agricultural sector due to crop damage and consequent economic losses. This paper proposes a probabilistic model for the forecast of frost in different intensities in the State of Santa Catarina, Southern Brazil. The methodology uses a generalized linear model to determine a frost index, corresponding to the relationship between the occurrence of frosts in different intensities and the following variables of prognostic Weather Research and Forecasting (WRF) model: minimum daily air temperature (Tmin); relative humidity and wind velocity, observed at the same time as Tmin. The results obtained from the data analysis of a 3-year period showed good performance of the model in predicting frost, especially in the separation of the different intensities of the phenomenon.

Index terms: Agrometeorology, logistic model, weather forecast.

Do ponto de vista meteorológico, define-se a ocorrência de geada quando há formação de gelo sobre plantas e objetos expostos ao relento (Pereira et al., 2002). O estudo da ocorrência de geada visando principalmente a sua previsão é de fundamental importância ao setor agropecuário em razão dos danos às culturas e consequentes prejuízos à economia.

A intensidade dos danos depende da espécie vegetal e da fase fenológica na qual se encontra. Como exemplo, Vieira et al. (2003) avaliaram as respostas das espécies arbóreas nativas com potencial para implantação em um sistema agrossilvicultural na região de Florianópolis. Espécies de árvores como a licurana (*Hieronyma alchorneoides*), a “tucuneira” (*Citharexylum* sp.), a corticeira (*Erythrina falcata*) e o olandi

(*Calophyllum brasiliense*) apresentaram baixa capacidade de rebrotação após a ocorrência de geada, mostrando uma taxa de mortalidade próxima dos 100%.

A temperatura mínima do ar no abrigo meteorológico é uma importante variável no levantamento de geadas. No entanto, Bootsma (1976) afirma que é a temperatura mínima da relva que dará a noção exata do nível de dano ocorrido. O pesquisador relacionou o efeito de fatores atmosféricos com a diferença entre a temperatura mínima absoluta do ar em abrigo e da relva, verificando que a nebulosidade e a velocidade do vento são responsáveis por 74% de sua variação.

Diversos estudos têm sido feitos visando prever ou estimar a ocorrência de geada, como o de Massignam & Dittrich (1998), que utilizaram modelos

probabilísticos e método de regressão para estimar o número médio mensal e a probabilidade mensal de ocorrência de geada para Santa Catarina, com base na altitude. A aplicação de Inteligência Artificial com a finalidade de elaboração de previsões mais rápidas e eficientes para cada sub-região do Rio Grande do Sul foi abordada por Duarte & Rebello (1988). Sediya et al. (2002) desenvolveram um sistema estatístico de previsão de geada baseada no diagnóstico do tempo utilizando os conceitos da série de Fourier.

Devido aos danos provocados pela geada, principalmente na região subtropical do Brasil, torna-se útil e necessário o desenvolvimento de sistemas computacionais que possam fazer prognósticos quando houver probabilidade de ocorrência de geada, ►

Aceito para publicação em 22/12/11.

¹ Oceanógrafo, Dr., Epagri/Ciram, fone: (48) 3239-8144, 88034-901 Florianópolis, SC, e-mail: kadu_araujo@epagri.sc.gov.br.

² Eng.-agr., Ph.D., Epagri/Ciram, fone: (48) 3239-8015, e-mail: massigna@epagri.sc.gov.br.

³ Técn. Meteorologia, Epagri/Ciram, fone: (48) 3239-8064, e-mail: censi@epagri.sc.gov.br.

permitindo aos agricultores tomar medidas preventivas. O objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo probabilístico e operacional para previsão de geadas de diferentes intensidades para o Estado de Santa Catarina.

Utilizando-se um modelo linear generalizado (McCullagh & Nelder, 1989 e Collet, 2002), determinou-se um índice de geada, correspondente à relação entre a ocorrência de geadas de diferentes intensidades (variável dependente) e as seguintes variáveis meteorológicas (independentes): temperatura mínima diária do ar (Tmin), umidade relativa (UR) e intensidade do vento (v).

As intensidades de geada (Gclass) foram obtidas através da classificação ordinal das temperaturas mínimas diárias da relva, conforme apresentado na Tabela 1. Consideraram-se os dados de geada das estações meteorológicas convencionais de Santa Catarina (Tabela 2), durante o período de maio a setembro, nos anos de 2006, 2007 e 2008.

As variáveis meteorológicas foram obtidas pelas saídas, a cada 3 horas, do modelo numérico Weather Research and Forecasting (WRF) (Skamarock et al., 2008) para os pontos de grade coincidentes com as estações meteorológicas (Tabela 2) e para o mesmo período de maio a setembro, nos anos de 2006, 2007 e 2008. Adotou-se o seguinte procedimento: a) selecionar para cada ponto de grade o horário de ocorrência da temperatura mínima diária em superfície; e b) extrair Tmin, UR e v correspondentes ao horário de ocorrência de Tmin para cada ponto de grade.

Avaliou-se o histograma de frequências de Gclass e ajustou-se uma distribuição paramétrica gama ao histograma avaliado, utilizando-se a metodologia proposta por Cody (1976). O coeficiente de correlação de Pearson entre o histograma de frequências e a distribuição gama apresentou um valor igual a 0,9987, revelando um bom ajuste entre as séries.

Considerando-se que a distribuição de frequências das intensidades de geada pode ser representada por uma função gama, adotou-se, no modelo

Tabela 1. Intensidade da geada de acordo com a temperatura mínima da relva e classe ordinal

Intensidade	Temperatura mínima da relva	Classe ordinal
Sem ocorrência	> 0°C	0
Geada fraca	-2°C a 0°C	1
Geada moderada	-4°C a -2°C	2
Geada mediana	-6°C a -4°C	3
Geada forte	-8°C a -6°C	4
Geada muito forte, extremamente forte ou excepcional	-10°C a -8°C -12°C a -10°C < -12°C	5

Tabela 2. Localização das Estações Meteorológicas (latitude e longitude em graus decimais e altitude em metros)

Município	Latitude (S)	Longitude (W)	Altitude (m)
Caçador	26,82	50,99	960
Campo Erê	26,44	53,08	900
Campos Novos	27,38	51,22	964
Chapecó	27,09	52,63	679
Itapiranga	27,18	53,65	200
Ituporanga	27,42	49,65	475
Lages	27,81	50,33	938
Major Vieira	26,36	50,34	765
Matos Costa	26,48	51,15	1.200
Ponte Serrada	26,92	51,93	1.100
Rio do Campo	26,94	50,15	570
Rio Negrinho	26,25	49,58	862
São Joaquim	28,28	49,93	1.376
São Miguel Oeste	26,78	53,50	700
Urussanga	28,53	49,31	48
Videira	27,02	51,15	774

linear generalizado, uma função de ligação canônica do tipo loglog, conforme sugerido por McCullagh & Nelder (1989) e Dobson (1990). A função de ligação descreve a relação não linear entre a média da variável dependente (resposta) e o lado direito linear (variáveis explicativas) da equação. A equação (modelo) linear generalizada adotada apresenta, portanto, a seguinte forma:

$$\log(-\log(\mu)) = X*b \quad (1)$$

em que: $\mu = E(Y|X)$, ou o valor esperado de Y, dado X. Y é o vetor do parâmetro resposta (intensidade de geada - Gclass), X é a matriz dos

parâmetros independentes, e b é o vetor dos coeficientes a serem determinados na regressão, de acordo com as matrizes abaixo:

$$Y = \begin{bmatrix} Gclass_1 \\ Gclass_2 \\ \dots \\ Gclass_n \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} 1 & T_{min,1} & UR_1 & v_1 \\ 1 & T_{min,2} & UR_2 & v_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & T_{min,n} & UR_n & v_n \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_{UR} \\ b_v \end{bmatrix}$$

Os coeficientes em b foram estimados pelo método da máxima verossimilhança, através do logaritmo da função de verossimilhança, calculada para o vetor Y e maximizada para os coeficientes em b. Por tratar-se de um sistema de equações não lineares, empregou-se o algoritmo de Newton-Raphson como método numérico

interativo para a resolução da função de verossimilhança. Os valores de b obtidos são apresentados na Tabela 3.

Após a determinação dos coeficientes b , calcularam-se os valores previstos (índice de geada ou μ) pelo modelo linear generalizado, aplicando-se a inversa da função de ligação loglog e os preditores da matriz X . A equação final adotada apresenta a seguinte formulação:

$$\mu = 10 * \exp(-\exp(X*b)) \quad (2)$$

Os valores diários de μ obtidos pela equação 2 foram agrupados de acordo com as diferentes intensidades da geada. Com o propósito de simplificar as análises e melhorar a representatividade estatística, as classes de intensidade da geada foram reagrupadas da seguinte forma: classe 0 - sem geada ($T_{relva} > 0^\circ\text{C}$); classe 1 - geada fraca ($-2^\circ\text{C} < T_{relva} \leq 0^\circ\text{C}$); classe 2 - geada média ($-6^\circ\text{C} < T_{relva} \leq -2^\circ\text{C}$); e classe 3 - geada forte a excepcional ($T_{relva} \leq -6^\circ\text{C}$).

Adotando-se intervalos de classe de μ igual a 0,2, calculou-se a distribuição de frequências absolutas dos valores de μ para as intensidades de geada reagrupadas. A partir das frequências absolutas calcularam-se, para cada intervalo de μ , as frequências relativas, como indicativo da probabilidade de ocorrência de uma determinada intensidade de geada. A Tabela 4 apresenta as frequências absolutas e também as probabilidades de ocorrência das diferentes intensidades de geada, para cada intervalo de classe de μ considerado.

Para se obter a probabilidade total de ocorrência de geadas para cada intervalo de μ , basta somar as probabilidades das intensidades de geada fraca ($Y = 1$), geada média ($Y = 2$) e geada forte a excepcional ($Y = 3$) na Tabela 4, ou utilizar a porcentagem complementar da classe sem geada ($Y = 0$). Portanto, tomando-se como exemplo o intervalo de μ entre 1,6 e 1,8, tem-se que a probabilidade de ocorrência de geadas é de 36,16% (19,62 + 15,77 + 0,77 ou 100 - 63,84).

Foram ajustadas funções para modelar a probabilidade de ocorrência de geadas a partir dos valores de μ na Tabela 4. A Tabela 5 apresenta as funções de ajuste adotadas para as

Tabela 3. Valores e erro padrão dos coeficientes de regressão

Coefficiente	Valor	Erro padrão de b
b_0	$-6,898 \times 10^{-2}$	$1,891 \times 10^{-2}$
$b_{T_{min}}$	$4,380 \times 10^{-2}$	$5,483 \times 10^{-4}$
b_{UR}	$5,822 \times 10^{-3}$	$2,1535 \times 10^{-4}$
b_v	$-5,324 \times 10^{-3}$	$1,987 \times 10^{-4}$

diferentes classes de geada, assim como os respectivos coeficientes de determinação (R^2) dessas funções.

As probabilidades de ocorrência das intensidades de geada observadas na Tabela 4 e modeladas pelas equações da Tabela 5 são apresentadas na Figura 1. Nota-se que à medida que os valores do índice de geada (μ) aumentam, au-

menta também a probabilidade de ocorrência de geadas, bem como a probabilidade de as geadas serem mais intensas.

Finalmente, as intensidades de geada média e forte foram agrupadas para se produzir uma classificação final, apresentada na Tabela 6.

Para a realização das previsões de geada de forma operacional, segue-se o seguinte fluxo de processamento:

O modelo WRF com 15km de resolução é rodado diariamente com os dados da análise (observados) da 0h00min GMT para a Região Sul do Brasil. Computam-se os valores de ▶

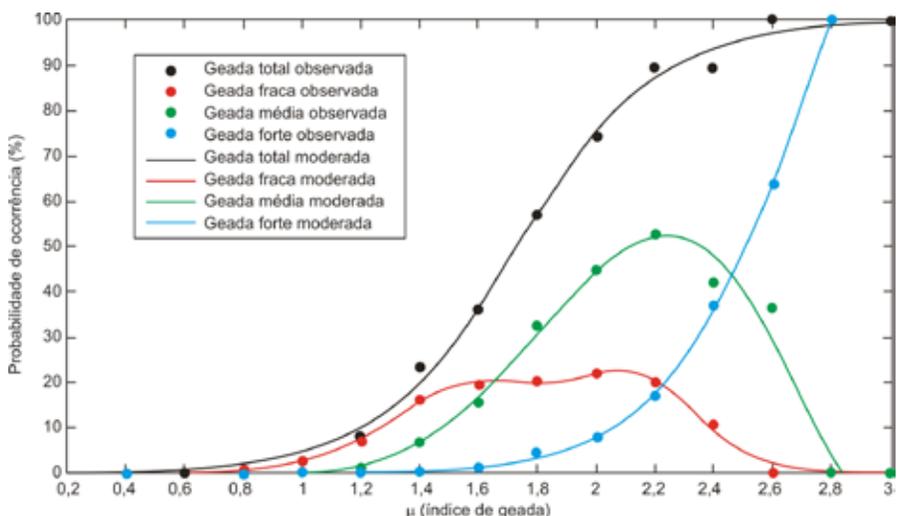


Figura 1. Funções de transferência entre os valores de μ e as probabilidades de ocorrência de geada para as diferentes intensidades

Tabela 4. Frequências absolutas (N) e probabilidades (%) de ocorrência das intensidades de geada por intervalos de classe do índice de geada μ

μ	Sem geada	Geada fraca	Geada média	Geada forte a excepcional
intervalos	N (%)	N (%)	N (%)	N (%)
0 a 0,2	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
0,2 a 0,4	98 (100)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
0,4 a 0,6	951 (100)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
0,6 a 0,8	1624 (99,94)	1 (0,06)	0 (0)	0 (0)
0,8 a 1,0	1212 (99,43)	6 (0,49)	1 (0,08)	0 (0)
1,0 a 1,2	789 (97,16)	21 (2,59)	2 (0,25)	0 (0)
1,2 a 1,4	480 (91,95)	37 (7,09)	5 (0,96)	0 (0)
1,4 a 1,6	262 (76,61)	56 (16,37)	24 (7,02)	0 (0)
1,6 a 1,8	166 (63,84)	51 (19,62)	41 (15,77)	2 (0,77)
1,8 a 2,0	81 (43,08)	38 (20,21)	61 (32,45)	8 (4,26)
2,0 a 2,2	29 (25,44)	25 (21,93)	51 (44,74)	9 (7,89)
2,2 a 2,4	8 (10,53)	15 (19,74)	40 (52,63)	13 (17,10)
2,4 a 2,6	2 (10,53)	2 (10,53)	8 (42,10)	7 (36,84)
2,6 a 2,8	0 (0)	0 (0)	4 (36,36)	7 (63,64)
2,8 a 3,0	0 (0)	0 (0)	0 (0)	2 (100)
Total	5702 (91,39)	252 (4,04)	237 (3,80)	48 (0,77)

Tabela 5. Funções adotadas para a probabilidade de ocorrência de geadas para diferentes intensidades

Intensidade	Função de ajuste	R ²
Geadas (total)	$P(\mu) = 1 / (1 + \exp(7,183 - 4,148 * \mu))$	0,998
Geadas fracas	$P(\mu) = 0,185 * \exp(-((\mu - 2,149) / 0,296)^2) + 0,196 * \exp(-((\mu - 1,597) / 0,410)^2)$	0,992
Geadas médias	$P(\mu) = 0,078 * \mu^7 - 0,645 * \mu^6 + 1,938 * \mu^5 - 2,622 * \mu^4 + 1,711 * \mu^3 - 0,519 * \mu^2 + 0,059 * \mu$	0,966
Geadas fortes	$P(\mu) = -2,121 * 10^{13} * \exp(-((\mu - 4,871) / 0,333)^2) + 1,813 * \exp(-((\mu - 3,419) / 0,802)^2)$	0,999

Tabela 6. Intensidades de geada agrupadas

Temperatura mínima de relva	Fenômeno
> 0°C	Sem ocorrência
≤ 0°C	Geadas fracas
< -2°C	Geadas médias a fortes
< -6°C	Geadas fortes

previsão da temperatura mínima diária do ar (Tmin), da umidade relativa (UR) e da intensidade do vento (v) observados no horário de ocorrência de Tmin.

Aplica-se a equação 2, com os coeficientes da Tabela 3, para se determinar o índice de geada (μ) para todos os pontos de grade do modelo WRF no Estado de Santa Catarina.

Aplicam-se as equações da Tabela 5 para, a partir do índice de geada (μ), determinar a probabilidade de ocorrência das diferentes classes de geadas.

São produzidos seis mapas, correspondentes às previsões de 24h e 48h para as probabilidades de ocorrência de geada, geada média a forte e geada forte.

O produto desenvolvido foi operacionalizado na página da Epagri/Ciram e pode ser consultado no seguinte endereço eletrônico: <http://ciram.epagri.sc.gov.br/portal/website/index.jsp?url=jsp/previsao/probGeadas.jsp&tipo=previsao>.

O modelo estatístico de regressão desenvolvido mostrou um bom desempenho na previsão de geada, principalmente na separação das diferentes intensidades do fenômeno. Esse aspecto é de suma importância para a agricultura, pois diferentes culturas apresentam resistências distintas a diferentes intensidades de geada.

Entretanto, verificou-se que o modelo de previsão de geada não consegue fazer distinção entre os episódios de neve e geada. Esse fato

ocorre porque não foram utilizadas informações de nebulosidade oriundas do modelo numérico de previsão de tempo WRF na determinação do índice de geada. Para diferenciar os episódios de neve e geada, sugere-se, em trabalhos futuros, testar e incluir na metodologia de previsão de geada variáveis representativas da nebulosidade, como a radiação de onda longa.

Do ponto de vista estatístico, não foi possível validar com segurança o modelo, pois o número de ocorrências de geadas registradas nos três anos de análise considerados foi insuficiente para realizar a validação. Para se obter uma validação robusta, sugere-se um novo estudo com a utilização de uma série temporal com pelo menos dez anos de ocorrências de geada. Sugere-se, ainda, testar outros modelos numéricos de previsão de tempo, além do WRF, na determinação do índice de geada.

Literatura citada

1. BOOTSMA, A. Estimating grass minimum temperatures from screen minimum values and other climatological parameters. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, ano 16, v.1, p.103-113, 1976.
2. Cody, J. **An Overview of Software Development for Special Functions, Lecture Notes in Mathematics, 506, Numerical Analysis**. Berlim: Springer Verlag, 1976.
3. Collett, D. **Modelling Binary Data**. 2.ed. Nova Iorque: Chapman & Hall/CRC Press, 2002.
4. Dobson, A.J. **An Introduction to Generalized Linear Models**. Boca Raton, USA: CRC Press, 1990.
5. DUARTE, V.H.; REBELLO, E.R. Sistemas especialistas aplicados à previsão de tempo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 5., 1988, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 1988. v.2.
6. MASSIGNAM, A.M.; DITTRICH, R.C. Estimativa do número médio e da probabilidade mensal de ocorrência de geadas para o estado de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.6, p.213-220, 1998.
7. McCullagh, P.; Nelder, J.A. **Generalized Linear Models**. 2.ed. Nova Iorque: Chapman & Hall, 1989.
8. PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478p.
9. SEDIYAMA, G.C.; SANTANA, M.O.; AGUIAR, F.M. et al. **Modelo prognóstico de geadas no Estado de Minas Gerais**. Relatório Técnico, 2002.
10. Skamarock, W.C.; Klemp, J.B.; Dudhia, J. et al. **A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Technical Note 475**. Mesoscale and Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA (NCAR/TN-475+STR). Jun. 2008.
11. VIEIRA, A.R.R.; FEISTAUER, D.; SILVA, V.P. Adaptação de espécies arbóreas nativas em um sistema agrossilvicultural, submetidos a extremos climáticos de geada na região de Florianópolis. **Revista Árvore**, v.27, p.627-634, 2003. ■