

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM SENSORIAMENTO REMOTO E
METEOROLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO

DÉBORA DE SOUZA SIMÕES

AMBIENTE FÍSICO E METEOROLÓGICO PARA ANÁLISE DO RISCO DE GEADA

Porto Alegre
2015

DÉBORA DE SOUZA SIMÕES

AMBIENTE FÍSICO E METEOROLÓGICO PARA ANÁLISE DO RISCO DE GEADA

Tese de Doutorado apresentada como requisito parcial para a obtenção do Título de Doutor em Sensoriamento Remoto.

COMISSÃO ORIENTADORA

Prof. Dra. Denise Cybis Fontana (orientadora)

Prof. Dra. Sílvia Rolim

Prof. Dr. Júlio Renato Marques

Porto Alegre

2015

Dedico esta tese aos meus amados filhos Lucas e Marina pela compreensão nos momentos difíceis e ausentes, mas principalmente por seus sorrisos que me traziam à realidade.

AGRADECIMENTOS

À professora Denise Cybis Fontana, minha orientadora e incentivadora, cuja serenidade e realismo me mantiveram perseverante nesta jornada.

Ao professor Júlio Renato Marques, que contribuiu imensamente para a realização deste sonho, cujo profissionalismo e dedicação me inspiram.

À UFRGS e ao Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, e seus professores e funcionários, pela contribuição à minha formação.

À CAPES, que financiou os dois anos iniciais desta tese através da bolsa de doutorado concedida.

Ao colega Matheus Boni Vicari, que muito colaborou em algumas publicações.

Aos amigos Izabel Villela e Roger Krolow, que me acolheram dando total condição para começar esta caminhada.

AMBIENTE FÍSICO E METEOROLÓGICO PARA ANÁLISE DO RISCO DE GEADA¹

Autor: Débora de Souza Simões

Orientador: Denise Cybis Fontana

A geada é um fenômeno meteorológico adverso que causa perdas severas ao setor agrícola, em especial no Sul do Brasil. A baixa distribuição espacial da rede de estações meteorológicas dificulta o monitoramento e a previsão do fenômeno. O propósito principal desta tese foi o desenvolvimento de um modelo matemático para quantificar de forma direta e simples a probabilidade do risco de ocorrência de geada tendo como base em dados de fácil obtenção como altitude, latitude, continentalidade e temperatura do ar. O modelo criado, denominado Risco Geral de Geada (RGG), foi idealizado a partir de dois riscos básicos, o risco geográfico e o risco advindo da temperatura mínima do local, ambos com o mesma contribuição para a ocorrência de geada. O risco geográfico de geada (RGeo) foi obtido a partir do somatório dos riscos atribuídos aos fatores geográficos altitude, latitude e continentalidade. Cada um destes fatores contribui de forma diferente para a formação da geada e suas contribuições foram estimadas a partir de um modelo de regressão linear múltipla para a estimativa da temperatura mínima do ar climatológica de inverno no Rio Grande do Sul. No risco de geada associado à temperatura mínima ($RT_{mín}$) foi feita a atribuição de riscos em um intervalo de temperatura entre 0 e 6°C. O modelo final obtido, válido apenas para o Rio Grande do Sul, foi testado com dados coletados em estações meteorológicas de superfície da mesorregião do Sudeste Rio-grandense, localizadas em Encruzilhada do Sul, Rio Grande e Santa Vitória do Palmar. Dados de temperatura mínima do ar nos meses de junho, julho e agosto, coletados entre os anos de 1961 e 2015, comprovaram a utilidade do modelo RGG para a definição da probabilidade do risco de ocorrência de geada, mesmo diante de incertezas atribuídas a outros fatores não descritos no modelo. Na região de teste também foi avaliada a qualidade de dados orbitais de temperatura da superfície terrestre (TST), obtidos do produto MDY11A1 da passagem noturna do sensor MODIS/AQUA, na detecção de temperaturas baixas relacionadas com a ocorrência de geada. A frequência de dias com TST inferiores a 3°C mostrou coerência tanto com os dados observados em estação meteorológica, quanto com o risco determinado pelo RGG. A coerência entre os resultados obtidos do modelo RGG e os dados reais observados em superfície e obtidos por satélite torna o modelo útil na descrição da probabilidade do risco de ocorrência de geada sobre o Rio Grande do Sul.

Palavras-chave: altitude; latitude; continentalidade; temperatura mínima do ar; temperatura da superfície terrestre

¹ Tese de Doutorado em Sensoriamento Remoto, Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS, Brasil (131 p.). Agosto, 2015.

PHYSICAL ENVIRONMENT AND METEOROLOGICAL ANALYSIS FOR FROST RISK¹

Autor: Débora de Souza Simões

Orientador: Denise Cybis Fontana

Frost is an adverse meteorological phenomenon that causes severe losses to the agricultural sector, especially in Southern Brazil. Low spatial distribution of the network of meteorological stations hinders monitoring and forecast phenomenon. The main purpose of this thesis was to develop a mathematical model to measure directly and easily the probability of the risk of frost based on readily available data such as altitude, latitude, continentality and air temperature. The model, called Frost General Risk (RGG), was designed from two basic risk, geographic risk and risk arising out of the local minimum temperature, both with the same contribution to the occurrence of frost. The geographical risk of frost (RGeo) was obtained from the sum of the risks attributed to geographical factors altitude, latitude and continental influence. Each of these factors contributes differently to the formation of frost and their contributions were estimated from a multiple linear regression model to estimate the minimum air temperature winter climatological in Rio Grande do Sul. In the frost risk associated with minimum temperature (RT_{\min}) assigning risk was taken in a temperature range between 0 and 6° C. The final model obtained, valid only for the Rio Grande do Sul, has been tested with data collected from weather stations surface of the middle region of Sudeste Rio-grandense, located in Encruzilhada do Sul, Rio Grande and Santa Vitória do Palmar. Minimum temperature, the air in the months of June, July and August, collected between 1961 and 2015, have proved the usefulness of the model RGG to define the probability of the risk of frost, even in the face of uncertainty attributed to other factors not described in the model. In the test region was also evaluated the quality of satellite data of the land surface temperature (LST), the product obtained MDY11A1 the night passage of MODIS / AQUA sensor to detect low temperatures related to the occurrence of frost. The frequency of days with LST below 3° C showed much consistency with the observed data in weather station, and with the particular risk for the RGG. Consistency between the results obtained from the RGG model and the actual data observed in surface and from satellites makes the model useful in describing the probability of the risk of frost on the Rio Grande do Sul.

Keywords: altitude; latitude; continentality; minimum air temperature; land surface temperature

¹ Ph.D thesis in Remote Sensing, Post-graduate Program in Remote Sensing, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS, Brazil (131 p.). August 2015.

Sumário

1 INTRODUÇÃO	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 GEADA	13
2.1.1 <i>Generalidades sobre o fenômeno</i>	13
2.1.2 <i>Fatores determinantes</i>	17
2.1.2.1 Fatores físicos	18
2.1.2.1.1 Aporte de energia para o sistema	18
2.1.2.1.2 Latitude	26
2.1.2.1.3 Altitude	28
2.1.2.1.4 Continentalidade e maritimidade	30
2.1.2.2 Fatores meteorológicos	31
2.1.2.2.1 Massas de ar	31
2.1.2.2.2 Temperatura mínima do ar	34
2.2 SENSORIAMENTO REMOTO DA GEADA	40
2.2.1 <i>Base teórica do sensoriamento remoto</i>	40
2.2.2 <i>Uso do sensor MODIS</i>	44
3 MATERIAL E MÉTODOS	47
3.1 ÁREA DE MODELAGEM E TESTE	47
3.2 BASE DE DADOS	51
3.2.1 <i>Dados geográficos</i>	51
3.2.2 <i>Dados meteorológicos</i>	54
3.2.3 <i>Dados de satélite</i>	55
3.3 AJUSTE DO MODELO DO RISCO GERAL DE GEADA	57
3.4 TESTE DO MODELO	61
3.4.1 <i>Teste com dados observados em superfície</i>	61
3.4.2 <i>Teste com dados de satélite</i>	62
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
4.1 AJUSTE DO MODELO DE RISCO GERAL DE GEADA	64

4.2 TESTE DO MODELO DO RISCO GERAL DE GEADA (RGG).....	76
4.2.1 <i>Dados observados em superfície</i>	76
4.2.2 <i>Dados de satélite</i>	92
5 CONCLUSÕES	106
REFERÊNCIAS	107
ANEXOS	114
ANEXO A.....	115
ANEXO B.....	121

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Espectro eletromagnético. Fonte: Adaptado de Ferreira (2006).	19
Figura 2.	Espectro eletromagnético da radiação solar e terrestre. Fonte: Adaptado de Ferreira (2006).	20
Figura 3	Porcentagem da radiação solar absorvida (acima) e transmitida (abaixo) pelos constituintes atmosféricos. Fonte: Adaptado de Varejão-Silva (2006).	22
Figura 4.	Esquema do balanço médio de radiação solar. Fonte: Adaptado de Tubelis & Nascimento (1984).	24
Figura 5.	Esquema do balanço médio anual de radiação global ($\text{kcal.cm}^{-2}.\text{ano}^{-1}$). Trocas de calor por irradiação (I), evaporação (E) e transferência turbulenta (T). Fonte: Adaptado de Budyko (1980) <i>apud</i> Varejão–Silva (2006). ...	25
Figura 6.	Perfis do saldo de radiação obtidos entre junho de 1974 e maio de 1975. As letras entre parênteses representam os meses correspondentes àquela estação do ano. Fonte: Adaptado de Varejão-Silva (2006).	28
Figura 7.	Esquema hipotético do balanço de radiação ao longo de 24 horas. Fonte: Adaptado de Tubelis & Nascimento (1980).	35
Figura 8.	Gradiente térmico diurno e noturno em noite de geada, indicando a inversão térmica, temperatura no abrigo (Tabrigo) e na relva (Trelva), e diferença de temperatura entre ambas (ΔT). Fonte: Adaptado de Pereira <i>et al.</i> (2007).	37
Figura 9.	Normal climatológica de temperatura mínima média do ar sobre o Brasil, dados de 1961-1990, com valores de média anual (a) e média mensal de junho (b) e de julho(c). Fonte: INMET (2009).	39
Figura 10.	Geomorfologia (a) e hipsometria (b) do Rio Grande do Sul. Fonte: Ducati (2001) e Miranda (2005).	48
Figura 11.	Área de teste e localização das estações meteorológicas selecionadas.	49
Figura 12.	Esquema de crescimento das variáveis geográficas, latitude, longitude, altitude e continentalidade. Este símbolo representa a direção para cima.....	53
Figura 13.	Fluxograma das etapas de processamento das imagens TST do produto MDY11A1 do sensor MODIS/AQUA. Fonte: Vicari <i>et al.</i> , 2013.	56

Figura 14.	Média climatológica padronizada da temperatura mínima do ar [°C] observada e estimada para os meses de junho e julho sobre o Rio Grande do Sul.	66
Figura 15.	Risco Geral de Geadas para temperatura mínima de 6°C. A escala de cores corresponde a probabilidade de ocorrência de geada variando entre 0 e 1.	69
Figura 16.	Risco Geral de Geadas para temperatura mínima de 5°C. A escala de cores corresponde a probabilidade de ocorrência de geada variando entre 0 e 1.	70
Figura 17.	Risco Geral de Geadas para temperatura mínima de 4°C. A escala de cores corresponde a probabilidade de ocorrência de geada variando entre 0 e 1.	71
Figura 18.	Risco Geral de Geadas para temperatura mínima de 3°C. A escala de cores corresponde a probabilidade de ocorrência de geada variando entre 0 e 1.	72
Figura 19.	Risco Geral de Geadas para temperatura mínima de 2°C. A escala de cores corresponde a probabilidade de ocorrência de geada variando entre 0 e 1.	73
Figura 20.	Risco Geral de Geadas para temperatura mínima de 1°C. A escala de cores corresponde a probabilidade de ocorrência de geada variando entre 0 e 1.	74
Figura 21.	Risco Geral de Geadas para temperatura mínima de 0°C. A escala de cores corresponde a probabilidade de ocorrência de geada variando entre 0 e 1.	75
Figura 22.	Frequência relativa da temperatura mínima do ar inferiores a 3°C. Observação diária nas localidades de Encruzilhada do Sul, Rio Grande e Santa Vitória do Palmar, no período entre 1961 e 2012.	76
Figura 23.	Frequência relativa da temperatura mínima do ar inferiores a 0°C. Observação diária nas localidades de Encruzilhada do Sul, Rio Grande e Santa Vitória do Palmar, no período entre 1961 e 2012.	77
Figura 24.	Carta sinótica das 12 UTC de 03/07/2011. Fonte: DHN/CHM da Marinha do Brasil.	79
Figura 25.	Carta sinótica das 12 UTC de 04/07/2011. Fonte: DHN/CHM da Marinha do Brasil.	80
Figura 26.	Carta sinótica das 12 UTC de 05/07/2011. Fonte: DHN/CHM da Marinha do Brasil.	81
Figura 27.	Carta sinótica das 12 UTC de 06/07/2011. Fonte: DHN/CHM da Marinha do Brasil.	82
Figura 28.	Carta sinótica das 12 UTC de 07/07/2011. Fonte: DHN/CHM da Marinha do Brasil.	83
Figura 29.	Carta sinótica das 12 UTC de 08/07/2011. Fonte: DHN/CHM da Marinha do Brasil.	84
Figura 30.	Carta sinótica das 12 UTC de 09/07/2011. Fonte: DHN/CHM da Marinha do Brasil.	85
Figura 31.	Carta sinótica das 12 UTC de 05/08/2014. Fonte: DHN/CHM da Marinha do Brasil.	87
Figura 32.	Carta sinótica das 12 UTC de 07/08/2014. Fonte: DHN/CHM da Marinha do Brasil.	88

Figura 33	Carta sinótica das 12 UTC de 08/08/2014. Fonte: DHN/CHM da Marinha do Brasil.	89
Figura 34	Carta sinótica das 12 UTC de 09/08/2014. Fonte: DHN/CHM da Marinha do Brasil.	90
Figura 35	Carta sinótica das 12 UTC de 13/08/2014. Fonte: DHN/CHM da Marinha do Brasil.	91
Figura 36	Carta sinótica das 12 UTC de 14/08/2014. Fonte: DHN/CHM da Marinha do Brasil.	92
Figura 37	Distribuição dos valores de temperatura mínima do ar (T _{mín}) e temperatura da superfície terrestre (TST) referente à série 2006 a 2012 das localidades de Encruzilhada do Sul, Rio Grande e Santa Vitória do Palmar. As extremidades de cada caixa correspondem ao primeiro e terceiro quartis e a linha interna a mediana.	94
Figura 38	Relação entre a temperatura mínima do ar (T _{mín}) e a temperatura da superfície terrestre (TST) do período de 2006 a 2012 para as localidades de Encruzilhada do Sul, Rio Grande, Santa Vitória do Palmar e série total dos dados.	96
Figura 39	Mapa do Sudeste Rio-grandense com a contagem da frequência relativa de dias com: TST < 0°C (a), TST < 1°C (b), TST < 2°C (c) e TST < 3°C (d). Período de junho, julho e agosto de 2006 a 2012.	100
Figura 40	Frequência relativa da temperatura mínima do ar (T _{mín}) menores que 3°C nos meses de junho, julho e agosto entre os anos de 2006 a 2012, para as localidades de Encruzilhada do Sul (esquerda) e Santa Vitória do Palmar (direita).	101
Figura 41	Sudeste Rio-grandense apresentado em: a. Risco geral de geada (RGG, em %) para temperatura mínima de 3°C; b. Frequência relativa de dias com temperatura da superfície terrestre (TST) inferior a 3°C obtida nos meses de junho, julho e agosto de 2006 a 2012.	103
Figura 42	Sudeste Rio-grandense apresentado em: a. Risco geral de geada (RGG, em %) para temperatura mínima de 2°C; b. Frequência relativa de dias com temperatura da superfície terrestre (TST) inferior a 2°C obtida nos meses de junho, julho e agosto de 2006 a 2012.	104
Figura 43	Sudeste Rio-grandense apresentado em: a. Risco geral de geada (RGG, em %) para temperatura mínima de 1°C; b. Frequência relativa de dias com temperatura da superfície terrestre (TST) inferior a 1°C obtida nos meses de junho, julho e agosto de 2006 a 2012.	104
Figura 44	Sudeste Rio-grandense apresentado em: a. Risco geral de geada (RGG, em %) para temperatura mínima de 0°C; b. Frequência relativa de dias com temperatura da superfície terrestre (TST) inferior a 0°C obtida nos meses de junho, julho e agosto de 2006 a 2012.	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Produção agrícola (em toneladas) e pecuária (mil cabeças) do Sudeste Rio-grandense e participação (%) na economia do Rio Grande do Sul.	49
Tabela 2.	Latitude [°], longitude [°], altitude [m] e temperatura mínima média climatológica [°C] de junho e julho de estações meteorológicas de superfície do Rio Grande do Sul.	52
Tabela 3.	Continentalidade [°] das estações meteorológicas de superfície do Rio Grande do Sul.	64
Tabela 4.	Registro de geadas e temperatura mínima do ar associada, em Encruzilhada do Sul e Santa Vitória do Palmar entre 2007 e 2015.	77
Tabela 5.	Geadas ocorridas em Encruzilhada do Sul em julho de 2011 e temperaturas mínimas associadas.	78
Tabela 6.	Geadas ocorridas em Santa Vitória do Palmar em agosto de 2014 e temperaturas mínimas associadas.	86
Tabela 7.	Estatísticas dos dados de temperatura mínima do ar ($T_{mín}$) e de temperatura da superfície terrestre (TST) dos meses de junho, julho e agosto entre os anos de 2006 a 2012 para as localidades de Encruzilhada do Sul, Rio Grande e Santa Vitória do Palmar.	93
Tabela 8.	Equações de regressão linear, coeficiente de correlação de Pearson R e coeficientes de determinação R^2 obtidos com os dados do período 2006/2012.	95
Tabela 9.	Estatísticas dos dados de temperatura mínima do ar com ocorrência de geada ($T_{mín_geada}$) e de temperatura da superfície terrestre (TST) dos meses de junho, julho e agosto entre os anos de 2006 a 2012 para as localidades de Encruzilhada do Sul e Santa Vitória do Palmar.	98

1 INTRODUÇÃO

A energia proveniente do Sol interage com a atmosfera, os oceanos e a crosta do planeta Terra definindo seu clima e tempo meteorológico. Esta interação promove processos físicos, químicos e biológicos que interferem na vida do Planeta.

Circulação atmosférica, processos de saturação do vapor d'água na atmosfera e o balanço global de radiação se combinam provocando a variabilidade espacial e temporal da temperatura. Tal variabilidade é observada tanto na temperatura do ar quanto na temperatura das superfícies, esta última interferindo fortemente sobre a primeira.

Situações extremas de baixas temperaturas, em geral associadas à ocorrência de geadas, se constitui em um evento meteorológico adverso e de risco para a produção agrícola e, conseqüentemente, à economia do país. Pelos impactos causados e pela escassez de dados sobre geadas, existe a necessidade de se obter mais informações, e mais simplificadas, que permitam ajudar os agricultores a enfrentar este problema.

A geada se caracteriza pela formação de uma camada de gelo sobre superfícies quando a temperatura da mesma é igual ou inferior a 0°C, através da sublimação do vapor d'água depositado. Do ponto de vista agrônômico, a geada é caracterizada pela morte de plantas ou de suas partes pelo intenso resfriamento da superfície, sendo ou não observada a formação de camada de gelo.

O resfriamento necessário para a formação da geada pode ter ser dividido em dois grupos de fatores, os físicos e os meteorológicos.

Nos fatores físicos encontra-se as características da superfície, cobertura do solo, posição na superfície terrestre (altitude, latitude e longitude) e ainda a inclinação do eixo da Terra e seus movimentos de rotação e translação, como fatores que

interferem no resfriamento. Todos esses fatores afetam diretamente o recebimento da energia solar e o balanço global de radiação.

Dentre os fatores meteorológicos destaca-se a advecção de ar frio promovido pelo deslocamento de massas polares sobre zonas mais aquecidas do Planeta. No Brasil a região Sul é uma das mais afetadas pelas geadas justamente pela trajetória preferencial das massas polares, de sul para norte, oriundas dos mares antárticos.

Compreender os mecanismos favoráveis à formação de geada é apenas um dos muitos desafios encontrados pelos pesquisadores do assunto. A carência de registros e dados sobre o evento agrega incertezas sobre informações e previsões. Na maioria das vezes a ocorrência de geada está associada a valores característicos de temperatura do ar, cuja medida também está sujeita a falhas e discontinuidades.

A medição da temperatura do ar pode ser feita por diferentes métodos, salientando-se: aquela efetuada por termômetros, que se destinam a medição direta da temperatura; e aquela determinada de forma indireta, pela relação funcional entre a temperatura da superfície e a energia infravermelha emitida por unidade de tempo e área (Lei de Stefan-Boltzmann). Esta medida indireta pode ser obtida por sensores orbitais, tendo-se assim um dado com resolução espacial muito superior àqueles obtidos em estações meteorológicas de superfície.

Motivado pelas dificuldades de efetuar análises relacionadas à susceptibilidade à ocorrência de geadas, a hipótese estabelecida para este estudo é que seja possível, através de dados de fácil acesso por parte do usuário, obter um dado numérico e objetivo do risco de ocorrência de geada no Rio Grande do Sul.

O objetivo geral desta tese foi desenvolver e testar um modelo matemático que possibilite quantificar o risco de ocorrência de geadas em um determinado local, usando dados que contemplem as características físicas e meteorológicas do lugar.

Como objetivos específicos:

- Aprofundar os conhecimentos a respeito dos fatores que determinam a variabilidade da temperatura mínima do ar e, conseqüentemente, à formação de geada;
- Identificar os fatores físicos e meteorológicos mais favoráveis à ocorrência de geada no Rio Grande do Sul;
- Testar a acurácia do modelo matemático frente à dados obtidos em estações meteorológicas de superfície e por satélites.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Geada

2.1.1 Generalidades sobre o fenômeno

A geada é qualificada como sendo um fenômeno meteorológico adverso, uma manifestação silenciosa e devastadora da atmosfera. Consiste no depósito de gelo cristalino sobre as superfícies expostas ao ar livre, que se forma de maneira semelhante ao orvalho, mas com temperaturas das superfícies inferiores a 0°C (SELUCHI, 2009; WMO, 2012).

Pela definição física de geada apresentada por Vianello & Alves (2002), mesmo que a geada e o orvalho se processem de maneira semelhante, é um equívoco dizer que a geada é o orvalho congelado, pois a geada se forma pela sublimação do vapor d'água e o orvalho pela condensação do vapor.

Diferentes tipos podem ser caracterizados tendo como base a gênese do fenômeno ou os efeitos visuais que produzem. No que se refere à gênese, a geada recebe as designações técnicas de geada de advecção, de radiação e mista, e quanto ao critério visual as designações de geada branca e negra (MOTA, 1979).

Quanto ao aspecto visual da geada tem-se dois tipos, a geada branca, com formação de camada de gelo cristalino sobre as superfícies, e a geada negra, sem a camada de gelo. A geada negra, mais danosa às plantas, recebe esta denominação por causa da coloração que as plantas apresentam no dia seguinte a formação da geada, e não sendo, portanto, classificado como um hidrometeoro (VIANELLO & ALVES, 2002).

Os dois processos de gênese de geadas também são responsáveis pela denominação das mesmas:

- a) geada de advecção – resultante da advecção de ar frio pela incursão de anticiclones migratórios na retaguarda de sistemas frontais. Geralmente as condições meteorológicas associadas são: muitas nuvens, ventos moderados e fortes na baixa atmosfera, sem inversão de temperatura na camada limite, baixa umidade do ar e temperatura abaixo de 0°C durante a noite e pouco acima deste valor durante o dia. São comuns as geadas do tipo negra (AYOADE, 1996; VAREJÃO-SILVA, 2006; PEREIRA *et al.*, 2007; SNYDER, 2010);
- b) geada de radiação – produzida pela perda de energia da superfície devido à emissão de radiação infravermelha para o espaço durante a noite, resultando em intenso resfriamento da superfície até atingir temperaturas inferiores a 0°C. A situação meteorológica favorável a este tipo de geada comumente está associada a circulação anticiclônica, com a presença de massa de ar frio e seco, vento calmo, pouca ou nenhuma nebulosidade, temperatura do ar inferior a 0°C durante a noite, baixa temperatura do ponto de orvalho e inversão térmica na camada limite. O resfriamento por radiação é um processo local e lento, por isso a geada de radiação é mais restritiva espacialmente do que a de advecção (AYOADE, 1996; VAREJÃO-SILVA, 2006; PEREIRA *et al.*, 2007; SNYDER, 2010); e
- c) geada mista – ocorre pela associação de condições favoráveis à formação dos dois tipos de geada, advecção e radiação, sucessivamente ou concomitantes.

A geada pode ser registrada utilizando dois critérios: observação visual da formação de cristais de gelo sobre as superfícies e inferência sobre a ocorrência de geada a partir das medições de temperatura do ar.

Pelo critério visual o observador meteorológico, responsável pela medição e registro das variáveis meteorológicas obtidas nas estações convencionais de superfície, registrará a formação de geada apenas por visualizar a camada de gelo cristalino sobre as superfícies. Esta é uma condição muito restritiva, uma vez que nos horários rotineiros de observação, às 12, 18 e 24 UTC, como consta em INMET

(2009), pode não ter ocorrido a formação da camada de gelo ou esta já pode ter derretido.

O critério de estimativa a partir das medições de temperatura é mais objetivo e preciso, uma vez que usa informações registradas durante a ocorrência da geada. Duas técnicas podem ser utilizadas: a primeira irá partir da temperatura mínima do ar ($T_{mín}$), registrada no abrigo meteorológico, cujo termômetro de mínima está instalado a cerca de 1,5 m acima do solo; e a segunda usa a temperatura mínima de relva, registrada com um termômetro de mínima instalado em suportes a 0,05 m acima do solo. Mas a disponibilidade de termômetros de relva se restringe a estações meteorológicas que efetuam medidas destinadas à agricultura.

Quando a estação não possui termômetro de relva, é necessário que se tenha definido o valor numérico da diferença entre a $T_{mín}$ no abrigo e a $T_{mín}$ na relva, e/ou se faça uso de valores médios de diferença estabelecido em estudos estatísticos como os obtidos por vários pesquisadores: Sentelhas *et al.* (1995); Oliveira (1997); Silva & Sentelhas (2001); Ferreira *et al.* (2006).

O complexo conjunto de variáveis e interações que compõem a condição favorável a ocorrência de geada dificultam o prognóstico de ocorrência e de intensidade do evento, associando-se a isto a carência de registros.

Os fenômenos de advecção de ar frio e perda de radiação emitida pela superfície terrestre, que ocasionam o resfriamento do ambiente, é representado pelos valores da temperatura mínima do ar. Assim, a ocorrência de geada será tanto maior quanto menor for a temperatura mínima do ar, com correspondência direta entre seus ciclos sazonais.

No Hemisfério Sul, a ocorrência de geadas é mais frequente durante os meses de junho a agosto (inverno), se formando em locais com latitude superior aos 19°S, que no Brasil incluem a Região Sul e partes do Sudeste e do Centro-Oeste (PEREIRA *et al.*, 2007). Contudo, Seluchi (2009) citou estudos da ocorrência de friagens ocasionadas pela incursão de “massas polares” até baixas latitudes, atingindo a região amazônica do Brasil, causando estragos em plantações decorrentes de possíveis geadas e até a morte por hipotermia em comunidades indígenas e moradores de rua.

Há também muitos registros de geadas no início do outono ou no final da primavera. Oliveira (1997) pesquisando a ocorrência de geada no Rio Grande do Sul constatou que, entre as geadas ocorridas fora dos meses de inverno, a maior

probabilidade de ocorrência foi observada em geadas tardias (primaveris). Aguiar & Mendonça (2004) mostraram que, em Santa Catarina, entre 1980 e 2003, ocorreram geadas em todos os meses do ano, até mesmo no verão.

Diversos setores produtivos vinculados ao agronegócio são dependentes do conhecimento de variáveis meteorológicas, destacando-se a temperatura mínima do ar. A agricultura, por exemplo, é especialmente afetada pelas baixas temperaturas e, sobretudo pelas geadas, que podem gerar problemas econômicos e sociais quando os danos à produção, repercutem no preço dos produtos.

Em escala global, algumas regiões sofrem sérios danos no setor agrícola causados por geadas, como é o caso do sul do Brasil, Uruguai, centro-norte da Argentina, sudeste dos Estados Unidos, da Austrália, da África do Sul e da China, Portugal, Itália, entre outros (SNYDER, 2010). De acordo com Ayoade (1996) nas regiões temperadas e nas áreas subtropicais a ocorrência de geadas são comuns, já nos trópicos os casos são desconhecidos, exceto em áreas montanhosas isoladas.

Variadas culturas são afetadas pelo fenômeno pois, de acordo com Pereira *et al.* (2007), os danos causados dependem da espécie, da fase de desenvolvimento, do estado fitossanitário e do estado nutricional das plantas.

No ano de 2006, segundo dados da Emater-RS, houve uma quebra de cerca de 50% da safra do trigo do Rio Grande do Sul. As geadas tardias (primaveris) ocorridas naquele ano coincidiram com o florescimento do trigo, que mesmo para uma cultura de inverno, é o período de maior sensibilidade a eventos de baixas temperaturas (JUNGES *et al.*, 2008). Na literatura são encontrados muitos estudos sobre o impacto causado por geadas, por exemplo, os realizados por: Pezza (2003); Aguiar & Mendonça (2004); Müller (2005); Snyder (2010); WMO (2010).

Atualmente os produtores rurais dispõem de locais virtuais onde buscar informações e orientações direcionadas à produção agrícola, como o portal do Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR) no endereço eletrônico <http://www.iapar.br/>. Neste é possível encontrar uma vasta quantidade de informações relativas à ocorrência de geada, que abrangem o zoneamento de cultura e agroclimático, métodos de controle e proteção, monitoramento contínuo das condições atmosféricas e das áreas agrícolas, entre outras.

A minimização do risco das atividades agrícolas, portanto, está associada à adaptação dos cultivos às condições meteorológicas predominantes, ou seja, ao clima

regional. Tal premissa representa uma importante ação de política agrícola no contexto nacional. Anualmente o governo federal publica portarias contendo recomendações de épocas de semeadura para as principais culturas em todos os municípios brasileiros. A informação é obtida a partir de uma análise de risco de ocorrência de condições adversas, a qual é obtida a partir dos estudos de zoneamento de risco (DALMAGO *et al.*, 2008). Para os estados do sul do país, a ocorrência de geadas é um critério essencial a ser considerado em tais estudos, especialmente para as culturas de outono-inverno.

2.1.2 Fatores determinantes

Sendo a geada diretamente relacionada ao resfriamento, então os fatores que influenciam a temperatura mínima do ar também devem influenciar a ocorrência de geada. O resultado da interação da radiação emitida pelo Sol e pela superfície terrestre com cada um dos fatores determina a variabilidade espacial e temporal do fenômeno.

Estes fatores determinantes foram divididos em dois grupos: físicos e meteorológicos. Naturalmente que os fatores não atuam isoladamente, nem no espaço, tão pouco no tempo, se observando constante sobreposição dos efeitos de diferentes fatores e também a interdependência entre muitos.

Por isso, é fundamental começar pela apresentação teórica da radiação que formará uma base sólida para a compreensão dos fatores determinantes para a ocorrência de geada.

2.1.2.1 Fatores físicos

2.1.2.1.1 Aporte de energia para o sistema

A radiação é definida como uma forma ou processo de transferência de energia sem a necessidade de um meio material para a propagação da mesma. A radiação eletromagnética (REM) apresenta dualidade de comportamento: onda e energia. Isso significa que a REM que se propaga pelo espaço vazio é, ao mesmo tempo, uma forma de onda e uma forma de energia (MENESES & ALMEIDA, 2012).

As ondas eletromagnéticas propagam-se no vácuo na velocidade da luz ($c=299.292,46 \text{ kms}^{-1}$ ou aproximadamente 300.000 kms^{-1}). Medindo a distância entre dois picos sucessivos de ondas, determina-se o comprimento ou tamanho da onda, simbolizado pela letra grega λ , sendo esta uma característica básica da radiação eletromagnética. Contando o número de picos de ondas que passa por um ponto fixo de referência no espaço, determina-se a frequência ν . Da física clássica proposta pelo físico francês Louis De Broglie vem a seguinte relação entre essas duas grandezas físicas da REM (λ e ν) que exprime a lei do comportamento ondulatório (Equação 1):

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (\text{eq. 1})$$

Onde: λ - comprimento de onda [m];

c - velocidade de propagação da onda [m.s^{-1}];

ν - frequência [$\text{Hz} = \text{s}^{-1}$].

Observa-se na equação 1 que, como a onda se propaga a uma velocidade constante, quanto menor for o comprimento de onda maior será a frequência. O espectro eletromagnético é o conjunto de todos os tipos de radiação eletromagnética (Figura 1). Os comprimentos de onda são da ordem de bilionésimo de metro (raios cósmicos) até dimensões de quilômetros (ondas de rádio).

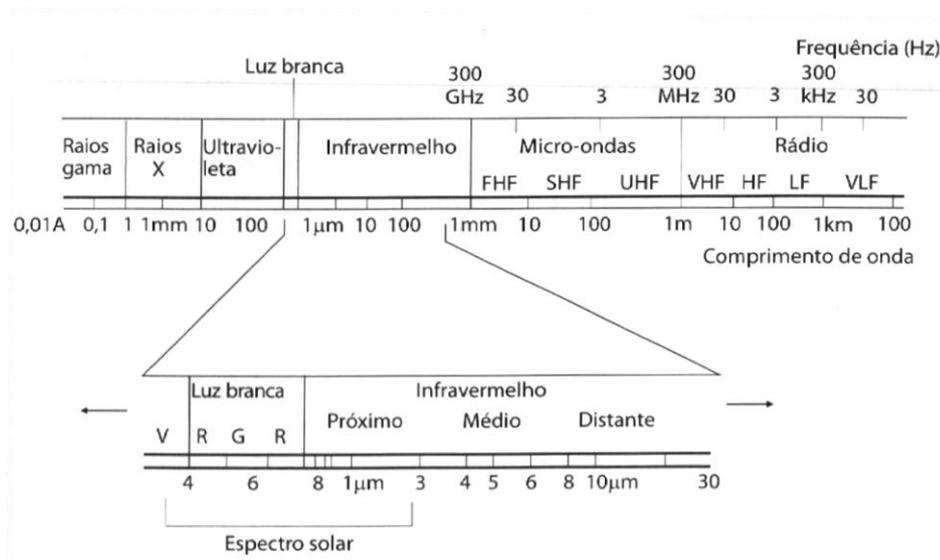


Figura 1. Espectro eletromagnético. Fonte: Adaptado de Ferreira, 2006.

Todo objeto cuja temperatura seja maior que o zero absoluto (-273°C) emite radiação. A temperatura do objeto determina as características da sua radiação, cujo máximo comprimento de onda naquela temperatura pode ser determinado pela Lei dos Deslocamentos de Wien, na equação 2:

$$\lambda_m = \frac{C}{T} \quad (\text{eq. 2})$$

Onde: λ_m – comprimento de onda com a maior quantidade de energia emitida [m];

C – constante de Wien= $2,898 \times 10^{-3}$ [mK];

T – temperatura do objeto [K].

Na Figura 2 tem-se o espectro eletromagnético da radiação solar e terrestre, onde se observa as diferentes faixas de comprimento de onda da radiação emitida pelo Sol, a radiação solar no topo da atmosfera e a radiação emitida pela superfície terrestre. A maior parte da radiação solar que chega ao Planeta está na parte do visível e a emissão da energia da Terra ocorre principalmente na porção do infravermelho termal.

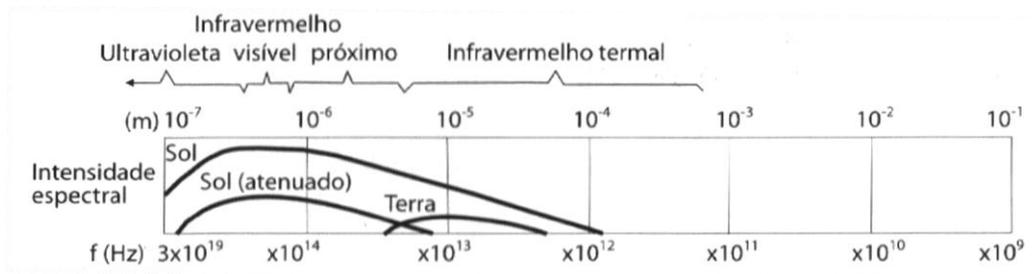


Figura 2. Espectro eletromagnético da radiação solar e terrestre.
 Fonte: Adaptado de Ferreira, 2006.

Quando a REM incide sobre uma superfície, parte da radiação é refletida, parte é espalhada e parte é transmitida. O albedo de uma superfície expressa a refletividade da superfície através da relação da energia refletida sobre a incidente. Superfícies cobertas de neve ou nuvens espessas tem um albedo muito alto pela alta reflexão, já as florestas e solos escuros tem albedo menor e conseqüentemente maior absorção da radiação incidente (FERREIRA, 2006).

O fluxo de energia radiante que se propaga na atmosfera é atenuado ao interagir com os constituintes em seu caminho, como resultado de dois fenômenos distintos, absorção e espalhamento. Durante essa interação ocorre os processos de transferência de energia que apresentam três formas: por radiação, por condução e por convecção.

A absorção é um processo por meio do qual a energia radiante é transformada em um outro tipo de energia, geralmente calor (FERREIRA, 2006). Esse processo, segundo Lenzi & Favero (2011), implica na transformação do *quantum* de energia de um sistema em um fenômeno físico ou químico, que obedece o princípio do balanço de energia. O *quantum* é uma quantidade discreta de energia. A transformação só ocorrerá quando a quantidade de energia contida na REM for exatamente igual àquela necessária para promover uma mudança nos níveis de energia dos átomos ou moléculas (MENESES & ALMEIDA, 2012).

Segundo Lenzi & Favero (2011), para produzir um fenômeno físico a energia absorvida, no caso pelos constituintes atmosféricos, provoca uma excitação eletrônica sem conduzir a uma reação química. Posteriormente a energia absorvida é reemitida, total ou parcialmente, ou ainda degradada em energia térmica. Nesta situação a radiação solar que avança pela atmosfera é atenuada, chegando nos níveis mais

baixos da atmosfera a radiação solar de comprimentos do visível e do infravermelho próximo, principalmente.

Os autores ainda descrevem que a excitação promovida pela adsorção dos diferentes comprimentos de onda do espectro visível quando degradados em energia térmica elevam o estado cinético do ambiente, e conseqüentemente, elevando a temperatura. Já os comprimentos de onda entre 0,780 e 300 μm , região do infravermelho, não possuem energia do *quantum* suficiente para provocar uma excitação eletrônica. Eles provocam um aumento no estado vibracional dos átomos ligados a estruturas, moléculas etc., do ambiente, e por isso é a faixa do espectro associada à energia calorífica.

Durante sua entrada na atmosfera, a radiação solar também sofre espalhamento, que tem como resultado o desvio da trajetória normal do fluxo radiante, sem perda de energia (FERREIRA, 2006). Esse é um processo espectral seletivo, dependente, sobretudo, da natureza, dimensão e concentração das partículas e do comprimento de onda do fluxo radiante.

Alguns comprimentos de onda da REM passam facilmente pela atmosfera, enquanto outros são barrados. A habilidade da atmosfera em deixar passar certo tipo de radiação é conhecido como transmissividade. Ela depende da composição da atmosfera e varia de acordo com o comprimento de onda da radiação.

A Figura 3 é um exemplo de variação de transmissão de diferentes comprimentos de ondas através da atmosfera, e da absorção deste por alguns constituintes atmosféricos. O comprimento de onda (em metros) é apresentado na base dos gráficos, e a porcentagem absorvida e transmitida no eixo vertical.

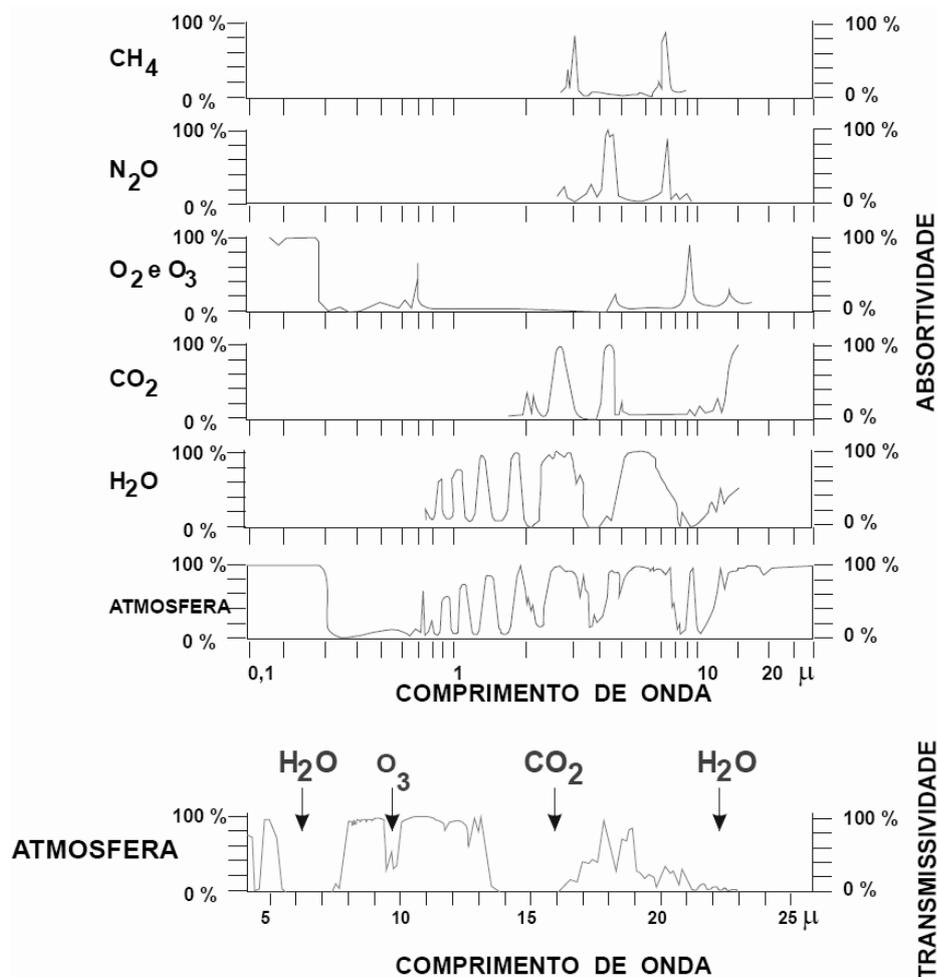


Figura 3. Porcentagem da radiação solar absorvida (acima) e transmitida (abaixo) pelos constituintes atmosféricos. Fonte: Adaptado de Varejão-Silva, 2006.

A atmosfera é opaca para ondas curtas (radiação de alta energia) como raios x, raios ultravioleta e raios gama. A camada de ozônio estratosférico é um exemplo de barreira, absorvendo perto de 100% de toda a radiação com comprimentos de onda menores que 0,3 μm. A atmosfera também absorve energia em outras bandas do espectro, como do infravermelho distante e das micro-ondas, cujos comprimentos de onda são superiores aos 10 μm (FERREIRA, 2006).

As faixas do espectro eletromagnético que são absorvidas pelos constituintes atmosféricos são chamadas de bandas de absorção, onde se observa um baixo percentual de transmissão, destaca-se como exemplo a alta absorção do vapor d'água na faixa do infravermelho próximo e médio.

Em meio as bandas de absorção, existem faixas do espectro eletromagnético onde a atmosfera é transparente para um determinado comprimento de onda. Essas faixas são chamadas janelas atmosféricas, importante tanto para a chegada da

radiação solar à superfície da Terra, quanto da radiação terrestre ao espaço, que pode ser detectada por sensores remotos instalados em satélites.

Nesse processo de transferência de energia radiante na atmosfera é importante analisar a reemissão de energia. A energia radiante absorvida durante a entrada na atmosfera pode sofrer os mesmos fenômenos fotoquímicos descritos anteriormente. Segundo Lenzi & Favero (2011), pode haver a emissão de uma radiação idêntica à absorvida, isto é, o *quantum* é reemitido, que pode ser absorvido por outro constituinte atmosférico. A radiação emitida tem comprimento de onda maior que o absorvido. Esta situação descreve bem a emissão da radiação de ondas longas pela superfície terrestre na faixa do infravermelho.

Se não houvesse nada na atmosfera, a radiação emitida pela superfície terrestre passaria livremente através dela e se perderia no espaço. No entanto na baixa atmosfera há muitos elementos que absorvem a radiação do infravermelho, como as moléculas de água (H₂O), gás carbônico (CO₂), metano (CH₄), ozônio (O₃) entre outros. Como já mencionado, Lenzi & Favero (2011) mostraram que a energia da radiação da banda do infravermelho é suficiente para promover alterações nas ligações das moléculas (estiramento, distorção, vibração, rotação e translação), consumindo parte da energia emitida pela superfície terrestre. Ao consumir a radiação terrestre os constituintes liberam calor, provocando um aquecimento natural da atmosfera chamado efeito estufa.

Todos os processos físicos e químicos de interação da radiação eletromagnética com a atmosfera resultarão em diferenciação no aquecimento da superfície terrestre e da própria atmosfera. O trânsito da energia pode ser acompanhado através do balanço de radiação.

Na Figura 4 tem-se o esquema do balanço médio de radiação solar. De acordo com Tubelis & Nascimento (1984), em termos de percentagem média, de 100% da radiação solar que chega à atmosfera somente 51% vai atingir a superfície terrestre. As nuvens recebem cerca de 40% da radiação solar, refletindo/espalhando 25%, absorvendo 1% e transmitindo 14%, que efetivamente chegam à superfície. Os outros 60% interagem com os demais constituintes atmosféricos na ausência de nuvens. Desse total, 7% são refletidos/espalhados por aerossóis em suspensão na atmosfera, 16% são absorvidos pelos gases atmosféricos e 37% avançam até a superfície terrestre, que reflete 5%.

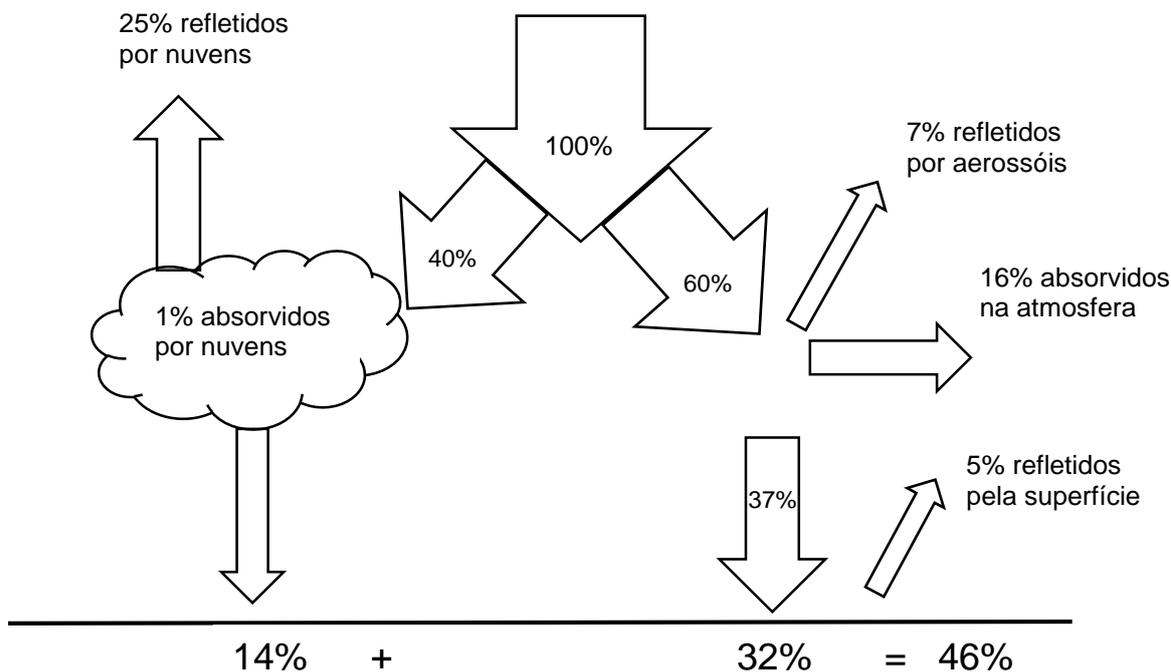


Figura 4. Esquema do balanço médio de radiação solar.
 Fonte: Adaptado de Tubelis & Nascimento, 1984.

A superfície terrestre, terra e água, recebe efetivamente 46% do total de radiação solar que chega à atmosfera. Segundo Budyko (1980) *apud* VAREJÃO-SILVA (2006), cerca de 55% do total absorvido é consumido no processo de evaporação, cujo calor latente é devolvido à atmosfera; 12% é usado no aquecimento do ar adjacente pelo processo de condução do calor sensível; o restante, 33%, é armazenado e emitido posteriormente para atmosfera. Na Figura 5 tem-se o esquema do balanço médio da radiação global, onde se observa as trocas de calor por irradiação (I), evaporação (E) e transferência turbulenta ou convecção (T).

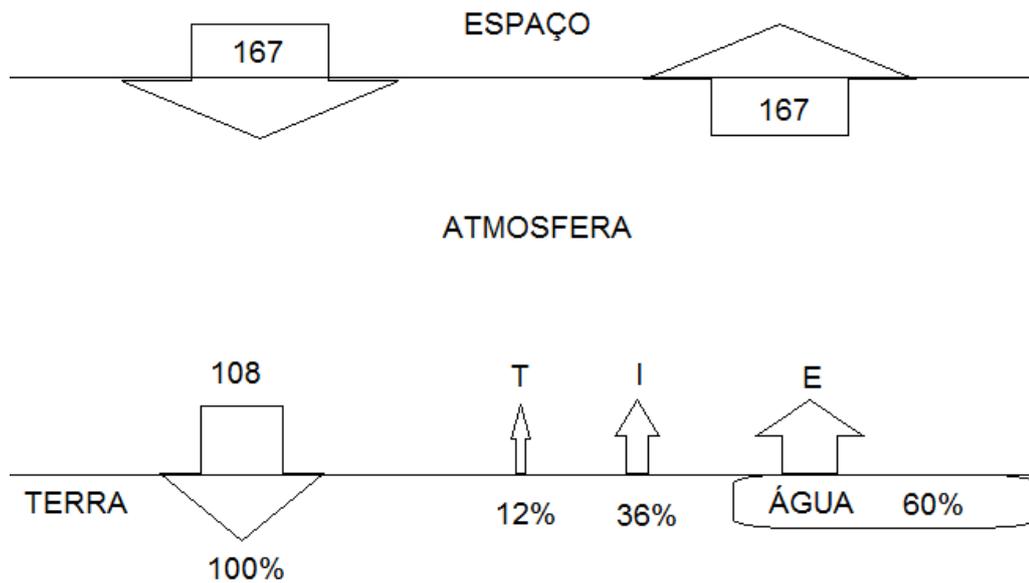


Figura 5. Esquema do balanço médio anual de radiação global (kcal.cm⁻².ano⁻¹). Trocas de calor por irradiação (I), evaporação (E) e transferência turbulenta (T).
 Fonte: Adaptado de Varejão–Silva (2006).

De acordo com Sellers (1965) *apud* VAREJÃO-SILVA (2006), do total da energia solar que é interceptado pela Terra, uma parcela, 36%, é diretamente refletida para o espaço e os 64% restante são emitidos na forma de radiação infravermelha, levando o balanço médio de radiação global a um valor praticamente nulo.

O albedo expressa a fração de radiação refletida pela superfície. Assim, para entender as variações na temperatura do ar é essencial examinar as propriedades das várias superfícies que refletem e absorvem energia solar em quantidades diferentes.

Em geral as superfícies secas e de cores claras refletem mais radiação que as superfícies úmidas e escuras. Superfícies com maior rugosidade tendem a apresentar menor albedo por causa das sombras geradas. A inclinação das superfícies também altera o albedo, que varia de acordo com o ângulo de incidência da radiação, assim raios perpendiculares a superfície geram albedos menores do que os inclinados.

A vegetação, além de interferir no albedo da superfície, segundo Torres & Machado (2011) vai influenciar a temperatura pelos efeitos do sombreamento, da absorção de calor e da evaporação da água que transpiram. De forma análoga, as características da terra e da água lhes confere albedos diferentes, mas estas coberturas interferem na temperatura também pelos distintos processos de transferência de energia entre a superfície e a atmosfera.

A quantidade de radiação solar que chega à Terra depende de alguns fatores como período do ano e do dia, latitude e composição da atmosfera. Outros fatores determinam o tipo de energia que será devolvida ao espaço, como as características físicas da superfície terrestre e, mais uma vez, os constituintes atmosféricos. Todas as interações da radiação solar e terrestre com a atmosfera resultam em áreas com acúmulo e outras com déficit de energia, dependente dos processos de transferência de energia.

2.1.2.1.2 Latitude

A latitude de um ponto qualquer sobre a superfície da Terra é o ângulo, para norte (+) ou para sul (-), contado a partir do equador até esse ponto, ao longo do meridiano do local (MAGALHÃES *et al.*, 1998). O formato esférico e a inclinação de eixo de rotação da Terra com relação a perpendicular de seu plano de órbita (eclíptica), faz com que a radiação solar incida sobre o planeta com inclinações diferenciadas.

O ângulo de incidência dos raios solares e a duração do dia em um ponto qualquer do planeta são dependentes da latitude de tal lugar. Portanto, a latitude exerce o principal controle sobre a quantidade de insolação que um determinado lugar recebe (AYOADE, 1996).

Assunção *et al.* (2009) mostraram a relação entre aquecimento da superfície terrestre e a inclinação dos raios solares incidentes sobre esta. Quanto mais próxima de uma incidência vertical, maior o aquecimento. Além disso, a inclinação do eixo terrestre associado ao movimento de translação da Terra, ocasiona a mudança da declinação do Sol, alternando o fornecimento de energia entre os hemisférios e definindo, assim, as estações do ano.

Parece contraditório abordar circunstância de aquecimento da superfície para discutir um fenômeno que ocorre justamente pelo oposto, o resfriamento da superfície. Através do balanço de radiação (dependente da latitude) é possível compreender os processos de aquecimento e resfriamento da superfície e da atmosfera em contato

com esta, e, assim, compreender também a ocorrência de geadas. Se espera que haja resfriamento nas áreas onde o saldo de energia seja negativo, pois ali a perda é maior que o ganho.

Em termos de valores médios, do total de energia solar que incide no topo da atmosfera 40% interagem com as nuvens e outros 60% com os demais constituintes atmosféricos. Chegam a superfície, para ser absorvido pela mesma, apenas 46% da radiação total incidente. Esta energia fica armazenada para ser emitida em forma de radiação de onda longa nos períodos em que não há fornecimento de energia solar.

Os percentuais apresentados sofrem alteração em seus valores conforme o período do ano e do dia, e a latitude do local. Torres & Machado (2011) deixam evidente a dependência da quantidade de radiação solar que incide sobre determinado local com relação a latitude da mesma. Destacam que nas latitudes entre 35°N e 35°S a energia é excedente e que fora dessas latitudes há déficit energético.

Observando as condições agrometeorológicas no Hemisfério Sul Camargo (1972) *apud* PEREIRA *et al.*(2007) relata que: “Ao nível do mar, as geadas ocorrem somente em latitudes maiores que 23°S; entre 23°S e 27°S, ocorrem geadas somente no inverno; em latitudes maiores que 27°S, ocorrem geadas precoces no outono, geadas normais no inverno, e geadas tardias na primavera.”

A influência da latitude sobre o saldo de radiação em escala global está presente nos resultados apresentados por Gruber (1978) *apud* VAREJÃO-SILVA (2006). Seus resultados (Figura 6) mostram que o saldo varia com a latitude segundo as estações do ano. Durante o inverno, período extremamente favorável a ocorrência de geada, todas as faixas de latitude superior a 10° apresentam saldo negativo de radiação. No outono, quando ocorrem as geadas precoces nas zonas temperadas, o saldo é negativo a partir da latitude de 20°. Já nos períodos de primavera, com geadas tardias nas zonas temperadas, o saldo negativo de radiação se estende do paralelo 45° até os polos.

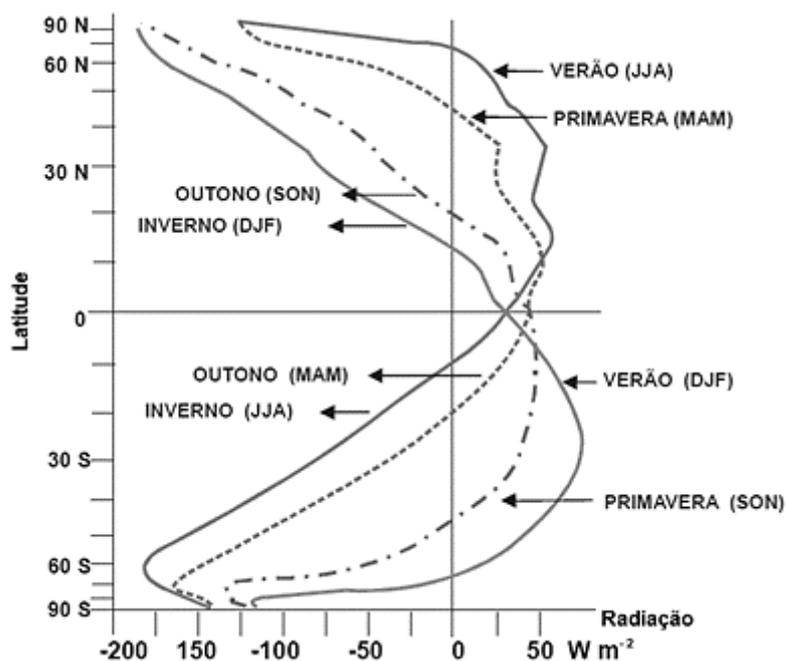


Figura 6. Perfis do saldo de radiação obtidos entre junho de 1974 e maio de 1975. As letras entre parênteses representam os meses correspondentes àquela estação do ano. Fonte: Adaptado de Varejão-Silva, 2006.

2.1.2.1.3 Altitude

A altitude é a distância vertical de um ponto ao nível médio do mar, sendo este um importante fator de variabilidade da temperatura, sobretudo nos trópicos.

O aumento da altitude resulta em variação da temperatura do ar diante da dependência da interação entre a radiação solar e terrestre com os componentes da atmosfera. Varejão-Silva (2006) cita que aproximadamente 50% da massa total da atmosfera estão concentrados nos primeiros 5 km de altitude. Essa progressiva rarefação do ar tem como consequência a diminuição da densidade, como resultado da ação gravitacional.

Pode-se analisar a influência da altitude para a ocorrência de geada do ponto de vista dos processos físico-químicos e dinâmicos que ocorrem em diferentes escalas espaciais. Muitas vezes se observa a sobreposição dos processos.

Analisando a microescala, processos que ocorrem em escala da ordem de até 100 m, o que se observa são as formas de transferência de energia: por radiação, por condução e por convecção, este último não tão importante para a geada. As formas de

transferência de energia por radiação e por condução foram detalhadas na seção anterior. Conforme exposto anteriormente os constituintes atmosféricos interferem diretamente na quantidade de radiação solar que chega até a superfície. Durante a noite, a superfície emite para atmosfera a radiação de onda longa promovendo maior ou menor resfriamento noturno, dependendo também da composição química da atmosfera, principalmente poluentes e quantidade de vapor d'água.

Em mesoescala, processos que ocorrem dentro de uma escala de 10 a 100 km, o resfriamento dos vales e encosta apresenta diferença, sendo, portanto, a causa das brisas vale-montanha. Em regiões de maior altitude se estabelece durante a noite a circulação local denominada brisa de montanha, devido ao resfriamento mais acentuado do topo, e, como o ar frio é mais denso ele se deposita no interior do vale (FEDOROVA, 2001). Assim, os vales tornam-se áreas mais propícias a formação de geada.

Ao analisar a escala sinótica, processos que ocorrem numa escala de 100 a 1.000 km, observa-se a influência da orografia. Aqui o resfriamento ocorrerá principalmente pela advecção de ar frio, que atinge determinadas áreas pela influência das nuances do relevo, como cadeias montanhosas.

Na América do Sul, a Cordilheira dos Andes, com altitudes superiores a 6.900 m, tem grande influência no avanço dos anticiclones migratórios na retaguarda de frentes frias. Segundo Seluchi (2009) a cordilheira ajuda a canalizar o fluxo meridional dos sistemas migratórios, favorecendo (inibindo) o avanço das frentes a leste (oeste) das montanhas, contribuindo para ocorrência de friagens e geadas no Brasil. O autor ainda destaca que os Andes barram o fluxo na baixa atmosfera, obrigando o escoamento a ascender parcialmente a encosta da cordilheira ocasionando o resfriamento adiabático.

2.1.2.1.4 Continentalidade e maritimidade

A continentalidade de um lugar é dada pelo distanciamento dos corpos hídricos e a maritimidade pela proximidade.

Torres & Machado (2011) citam que enquanto a maritimidade atenua as diferenças térmicas, homogeneizando as temperaturas costeiras, a continentalidade provoca o inverso nas áreas interioranas, aumentando a amplitude térmica.

A influência destes fatores sobre a temperatura do ar se dá por causa das diferenças básicas nas características térmicas das superfícies continentais e hídricas (AYOADE, 1996). A superfície aquática se aquece e se resfria mais lentamente do que a superfície continental.

O efeito da maritimidade gera um dipolo barométrico, fenômeno de mesoescala, que traz como consequência o estabelecimento de uma circulação local denominada brisa marítima (dia) e brisa terrestre (noite). Esta circulação é sobreposta pelas de maior escala, como o avanço de frentes frias e dos anticiclones pós-frontal, comumente associados a ocorrência de geada, principalmente no inverno. A brisa marítima, mais intensa e duradoura que a terrestre, ocasiona um grande aporte de vapor d'água ao continente interferindo nos processos de saturação e balanço de radiação local.

A continentalidade também interfere na saturação do ar e nos processos de interação entre a radiação e os químicos atmosféricos. Segundo Mendonça & Danni-Oliveira (2007) na ausência dos efeitos termorreguladores dos oceanos sobre as temperaturas, o aquecimento/resfriamento das superfícies continentais ocorre de forma mais rápida e com menor participação da umidade do ar. Estes locais além de serem mais secos apresentam amplitudes térmicas diárias acentuadas.

Em INMET (2009) observa-se no Rio Grande do Sul menor umidade e nebulosidade nas áreas mais afastadas do litoral. Nesses casos, o resfriamento noturno é mais pronunciado do que em regiões úmidas (VAREJÃO-SILVA, 2006).

Aguiar & Mendonça (2004) observaram que os fatores geográficos, maior altitude e continentalidade, favoreceram a ocorrência de geada em Santa Catarina entre 1980 e 2003.

Os movimentos de água nos oceanos definem as correntes oceânicas, que possuem temperaturas diferentes dependendo do local de origem da corrente. De acordo com Leinz (2005) as causas principais das correntes marítimas são representadas pela temperatura e salinidade, que alteram a densidade da água, e pela ação do vento e da chuva que provocam a flutuação da salinidade.

Correntes quentes fornecem calor para o ar adjacente mais frio, e as frias retiram calor do ar mais aquecido (VIANELLO & ALVES, 2002). Torres & Machado (2011) citam como exemplo as áreas costeiras banhadas por correntes frias que têm temperaturas mais baixas que outras situadas na mesma latitude, mas que não são afetadas por tais correntes.

Assim, pela ação da brisa marítima, o ar deslocado do mar sobre o litoral terá características térmicas relacionadas com as da corrente oceânica presente naquele momento, além, é claro, de incrementar o conteúdo de umidade sobre o continente.

2.1.2.2 Fatores meteorológicos

Conforme visto anteriormente, o balanço de radiação evidencia as transferências de energia entre atmosfera e superfície terrestre e do saldo de radiação as áreas com acúmulo ou déficit de energia.

2.1.2.2.1 Massas de ar

O ar frio dos polos e o ar quente dos trópicos e subtropicais estão separados pelas chamadas frentes, sendo estas a fronteira entre massas de ar com características termodinâmicas diferentes. Na tentativa de equilibrar a energia do Planeta as frentes e massas de ar se deslocam das áreas com excesso para as áreas com déficit, promovendo a advecção de calor e de massa de um lugar para outro.

As massas de ar são grandes porções de ar com propriedades bastante uniformes. Elas são o resultado das variações do aquecimento do ar sobre a superfície

da terra e da água. A transferência das propriedades termodinâmicas (temperatura e umidade) da superfície de determinada região para o ar em contato com esta vai definir a massa de ar que se originará. Esta massa permanece sobre a região por um período de tempo suficientemente longo para que suas propriedades alcancem um estado de equilíbrio em um volume aproximadamente homogêneo (FEDOROVA, 1999).

Quando uma massa de ar se afasta de sua região de origem, ela vai progressivamente perdendo suas características iniciais. Ela é, então, modificada pelas diferentes quantidades de radiação e/ou umidade que recebe e/ou perde (TORRES & MACHADO, 2011).

A denominação das massas de ar parte das características de temperatura (ou latitude) e umidade (úmido ou seco) dos locais de origem. Assim, são classificadas pela combinação dos termos: massa equatorial (E), tropical (T), polar (P), ártica ou antártica (A), continental (c) e marítima (m). Torres e Machado (2011) afirmam que as principais, não as únicas, regiões de origem de massas de ar são os grandes centros de alta pressão, como as regiões polares e subtropicais.

No contexto do presente estudo, o interesse maior recai sobre a advecção de frio que ocorre com o avanço de uma massa de ar frio.

Segundo Seluchi (2009), geralmente as geadas estão associadas ao avanço de massas denominadas polares e, para os eventos ocorridos na América do Sul, isto significa que tais massas tem origem nos mares subantárticos, em especial no Mar de Weddel e no Mar de Ross. No seu avanço em direção as menores latitudes essas massas são modificadas, recebendo, então, a denominação de “massa de ar polar marítima” ou “massa de ar polar continental”, segundo sua trajetória.

Fedorova (1999) descreveu as características gerais das massas de ar, de onde destaca-se que, a massa polar continental (Pc) apresenta no inverno temperatura média na superfície de -8°C , sendo seca, estável ($\gamma = 0,2$ a $0,5^{\circ}\text{C}/100$ m) e rasa (pouca profundidade vertical), e a massa polar marítima (Pm) tem temperatura média na superfície no inverno em -1°C , é úmida, instável ($\gamma = 0,7$ a $0,8^{\circ}\text{C}/100$ m) e profunda (estende-se através da troposfera). A letra γ é o gradiente vertical de temperatura.

De acordo com Seluchi (2009), de certa forma, a ocorrência e intensidade das geadas na América do Sul são dependentes da trajetória e velocidade de

deslocamentos das massas de ar envolvidas. Em geral, as geadas mais intensas estão associadas a anticiclones migratórios frios que se deslocam rapidamente sobre o continente numa trajetória meridional. Ainda segundo o autor, as massas polares marítimas chegam ao continente muito modificadas pelo avanço lento sobre o oceano relativamente aquecido. Suas temperaturas menos baixas e umidade mais elevada provocam, eventualmente, geadas menos intensas e do tipo branca.

Algarve & Cavalcanti (1994) analisando geadas ocorridas no sul do Brasil entre 1980 e 1989 observaram que mais de um sistema sinótico atua na região antes da ocorrência de geadas. O primeiro sistema permanece sobre a região por um período de tempo prolongado, ajudando a manter as altas pressões por mais tempo e também favorecendo o rápido deslocamento das massas frias que avançam posteriormente. Este fato faz sentido quando se observa a grande frequência de avanço, sobre o sul do País, de anticiclones polares nos meses de inverno como mostram os resultados encontrados por Pezza (2003). Calbete (2012) apresentou tabela com as massas de ar frio que provocaram geadas entre 1988 e 1996 que avançaram pelo Brasil entre os meses de abril e outubro, evidenciando os meses mais sujeitos a ocorrência de geada.

Em Seluchi (2009), foram apresentadas e discutidas diversas pesquisas que descrevem a atuação de massas polares na ocorrência de geadas e friagens na América do Sul, sobretudo no Brasil. Os trabalhos mostraram desde as condições favoráveis ao rápido deslocamento meridional das massas, como a barreira natural da Cordilheira dos Andes; as causas do confinamento das massas entre o Planalto Central do Brasil e a cordilheira; os processos dinâmicos que dominam a evolução da situação favorável à ocorrência de geadas nas latitudes extratropicais; até os processos térmicos (radiativo e advectivo) que sustentam as friagens nas latitudes subtropicais e tropicais.

Torres & Machado (2011) descreveram: “As massas de ar são muito importantes no estudo e caracterização do tempo e do clima, uma vez que durante o deslocamento influenciam diretamente as áreas nas quais predominam”. Pezza (2003) corroborou esta ideia afirmando que, sendo a América do Sul um continente de economia essencialmente agrícola, a influência da formação e propagação das massas polares é muito significativa diante do impacto gerado pela ocorrência de geadas ou de temperaturas muito baixas.

O transporte e a distribuição de calor na atmosfera, a evaporação e a evapotranspiração, a absorção de diversos comprimentos de onda da radiação solar e terrestre, são apenas alguns exemplos do papel essencial que a água e suas fases na atmosfera desempenham perante vários processos físicos naturais. Em particular, exerce um grande efeito sobre a temperatura do ar.

O vapor d'água pode variar de valores quase nulos em regiões desérticas e polares até 4% do volume total do ar em regiões úmidas nos trópicos úmidos. A saturação de vapor d'água de uma determinada parcela de ar é definida como a quantidade máxima possível de vapor presente na parcela, numa determinada temperatura. A saturação pode ser atingida aumentando a quantidade de vapor da parcela mantendo a temperatura constante, reduzindo a temperatura sem acrescentar vapor, e/ou combinando os dois processos (VAREJÃO-SILVA, 2006).

A temperatura na qual uma parcela de ar atinge a saturação apenas por resfriamento é denominada de temperatura do ponto de orvalho (PEREIRA *et al.*, 2007). Quando o resfriamento produz saturação na temperatura de 0°C ou menos, ocorrendo então a sublimação do vapor, a temperatura de saturação será denominada temperatura do ponto de geada.

As formas como o resfriamento acontece são, predominantemente, por radiação e advecção. Ambiente com pouca quantidade de vapor d'água é mais propício aos processos radiativos e, segundo Seluchi (2009), isto pode limitar as baixas temperaturas a regiões elevadas, desérticas ou localizadas nos fundos dos vales ou baixadas, em algumas ocasiões.

Apesar de sua importância para a ocorrência de geada a variabilidade da quantidade de vapor d'água torna este parâmetro desinteressante para este estudo.

2.1.2.2.2 Temperatura mínima do ar

Todos os fatores apresentados como controladores da temperatura do ar tem como principal ator a radiação solar, apresentando interações contínuas e que se retroalimentam. Nenhuma das interações ocorre isoladamente, havendo sobreposição de influências. Fedorova (2001) citou vários controladores da

temperatura do ar: da incidência diferenciada da radiação solar em função da latitude e estação do ano; do aquecimento diferencial da terra e da água; e das correntes oceânicas.

A temperatura mínima do ar ocorre próximo do nascer do sol como resultado de uma noite de resfriamento radiativo da superfície terrestre. Na presença de fenômenos capazes de perturbar o estado prevalecente da atmosfera (advecção de ar frio, por exemplo), a expectativa quanto ao provável horário de ocorrência da temperatura mínima pode ser alterado (VAREJÃO-SILVA, 2006).

O balanço de radiação é o principal fator de controle da temperatura. Entende-se por balanço de radiação a contabilização de todos os fluxos ascendente e descendentes de radiação, de ondas curtas ou de ondas longas. A Figura 7 traz um esquema hipotético da radiação solar incidente e a emissão da superfície terrestre ao longo de 24 horas. Nesta representação gráfica o balanço de radiação está dividido em três regiões: região (1) da radiação solar absorvida usada para repor parte da emissão terrestre; região (2) representa a fração excedente da radiação solar absorvida e que é disponível para outros processos e região (3) indica o déficit de radiação da superfície. A área (1+2) representa o total diário da radiação solar absorvida pela superfície, enquanto (1+3) o total diário da radiação terrestre emitida. Os pontos A e B são os momentos em que o saldo de radiação é nulo; o intervalo AB é o período com saldo positivo e antes de A e depois de B o saldo é negativo. O resfriamento do ar ocorre predominantemente no período de saldo de radiação negativo.

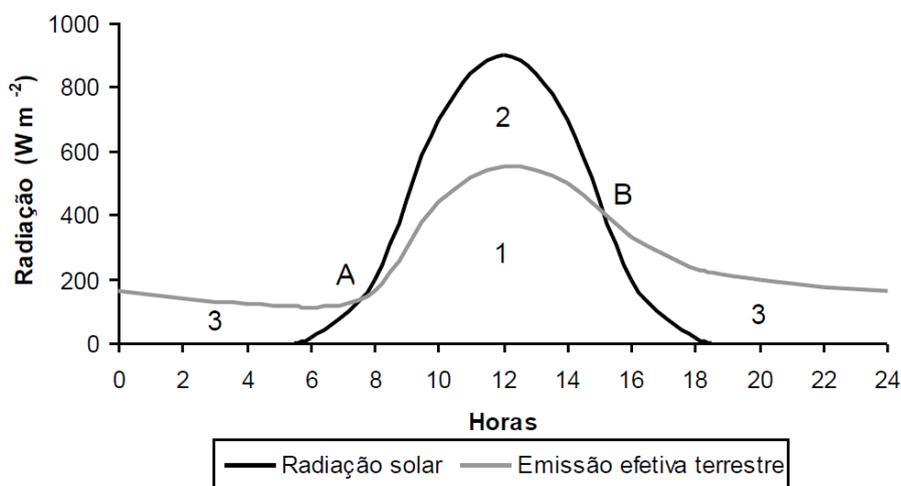


Figura 7. Esquema hipotético do balanço de radiação ao longo de 24 horas. Fonte: Adaptado de Tubelis & Nascimento, 1984.

As trocas de calor entre atmosfera e superfície se dão basicamente por condução e convecção. Na atmosfera o fator preponderante de transporte de calor é a difusão turbulenta, movimentos que transportam, além de calor, outras propriedades importantes como vapor d'água, energia cinética, gás carbônico, poluentes, etc. A difusão turbulenta tem duas causas: o movimento friccional (atrito com a superfície) e o movimento convectivo (TUBELIS & NASCIMENTO, 1984). No período em que o saldo radiação é negativo os movimentos convectivos cessam, prevalecendo os friccionais.

Após a temperatura máxima, a temperatura do ar diminui como consequência da diminuição da temperatura do solo, com saldo de radiação positivo em decréscimo. Quando o saldo torna-se negativo, a partir do ponto B da Figura 7, se estabelece um fluxo de calor por condução, do ar, junto à superfície, na direção da superfície. Este fluxo passa a resfriar o ar, iniciando pelas camadas adjacentes à superfície. Pelo aumento da densidade do ar devido ao resfriamento, as diversas camadas tendem a se acamar (TUBELIS & NASCIMENTO, 1984). Se estabelece assim a inversão térmica da baixa atmosfera. O processo se intensifica continuamente no transcorrer da noite até a nova inversão no saldo de radiação, quando a temperatura do ar adjacente ao solo é mínima.

Vale lembrar que, devido à baixa condutividade térmica do ar, os processos de aquecimento e resfriamento do ar não atingiriam mais de 3 m de altura, caso ocorressem exclusivamente por condução (TUBELIS & NASCIMENTO, 1984). Assim, espera-se o retardo na ocorrência da temperatura mínima do ar nas camadas mais afastadas da superfície do solo (Figura 8), uma vez que o resfriamento do ar ocorre pelo lento processo de condução. O retardo será tão maior, quanto menor a intensidade do vento e maior a emissão de radiação terrestre em condições de ausência de nuvens e baixo conteúdo de vapor d'água na atmosfera.

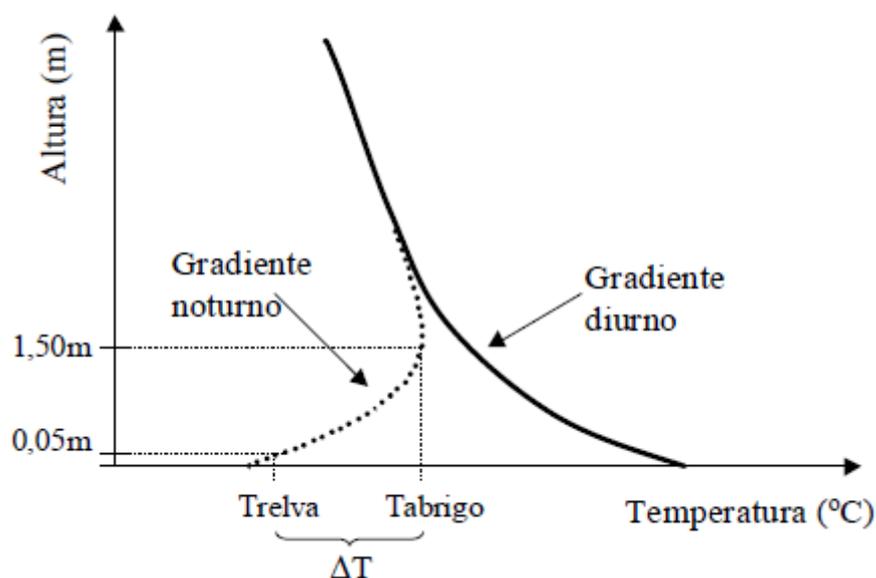


Figura 8. Gradiente térmico diurno e noturno em noite de geada, indicando a inversão térmica, temperatura no abrigo (Tabrigo) e na relva (Trelva), e diferença de temperatura entre ambas (ΔT). Fonte: Adaptado de Pereira *et al.*, 2007.

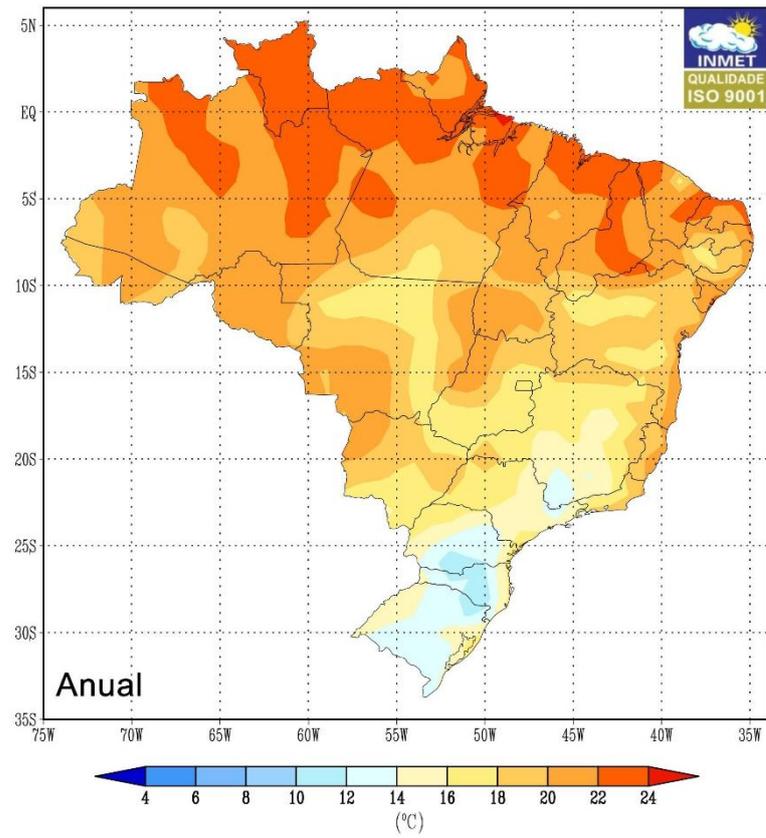
Fica evidente na Figura 8 que a temperatura mínima registrada junto da relva é mais representativa da formação de geada do que a temperatura mínima obtida no abrigo meteorológico, sendo a temperatura mínima do ar resultante do saldo negativo de radiação e o balanço de radiação afetado por muitos fatores.

Como visto anteriormente, durante a noite o principal processo de transferência de calor entre o ar e a superfície é a condução. Por se tratar de um processo lento, ele é facilmente sobreposto por outro processo qualquer, por exemplo a advecção de frio ou de massa, acentuando ou desintensificando o resfriamento noturno.

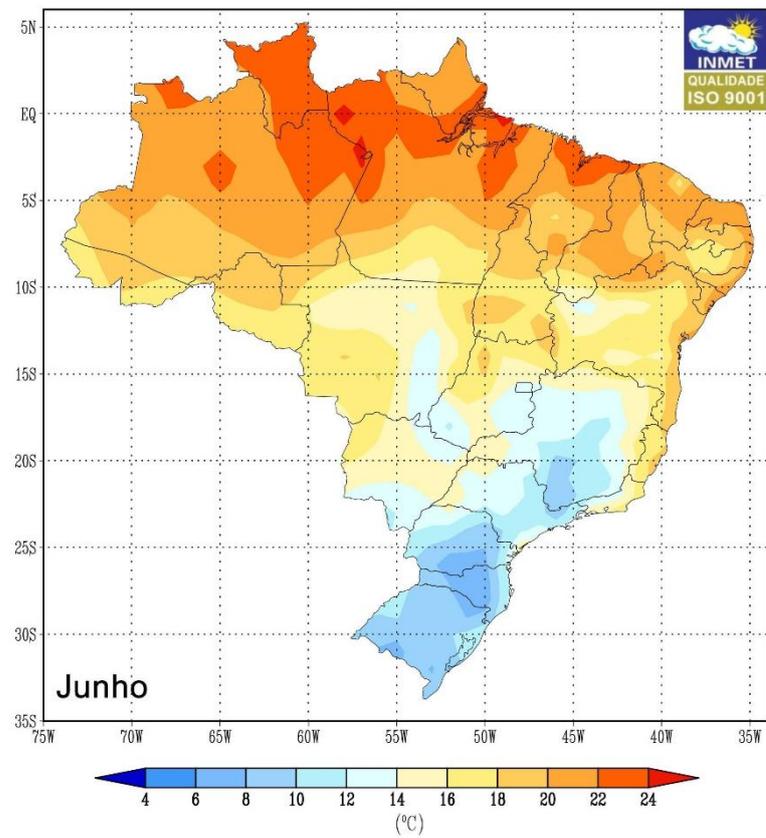
Algarve (2012) agrupou autores que estudaram o avanço de massas de ar frio que causaram geadas sobre o Brasil. São apontados o período de inverno como os mais estudados na literatura e o mês de julho como o mais significativo para a ocorrência de geadas. O período entre maio e setembro aparece com frequência nos estudos, embora as temperaturas baixas raramente cheguem a valores negativos e as geadas serem fracas.

Em termos de distribuição anual (Figura 9), verifica-se que no sul do Brasil os meses de junho e julho tem os menores valores de temperatura mínima média mensal e que esta é a região predominantemente com os menores valores do País INMET (2009).

a.



b.



C.

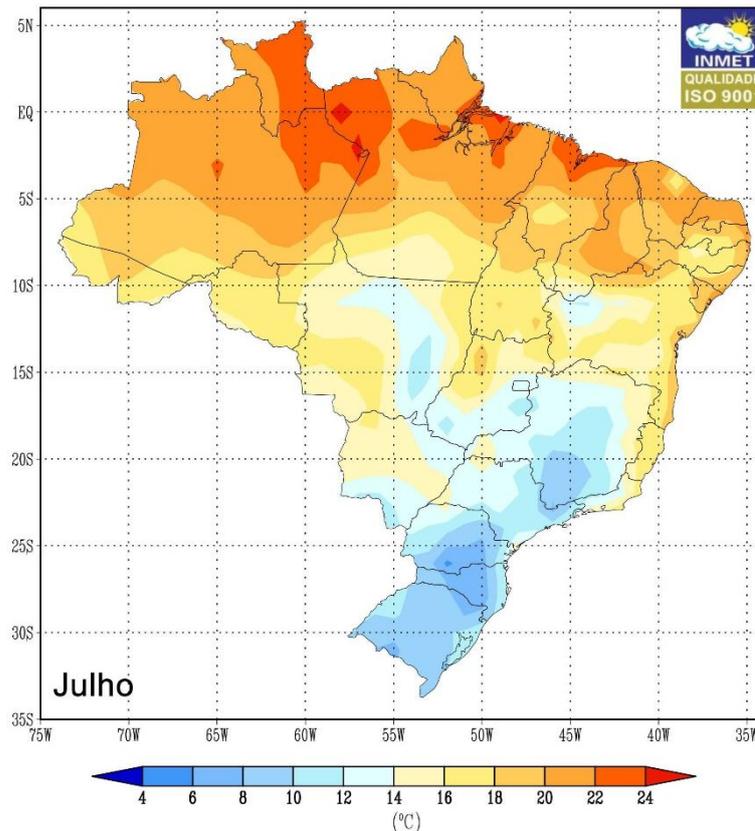


Figura 9. Normal climatológica de temperatura mínima média do ar sobre o Brasil, dados de 1961-1990, com valores de média anual (a) e média mensal de junho (b) e de julho (c) Fonte: INMET, 2009.

As estações de monitoramento atmosférico podem ser compostas por diversos sensores, com as mais diversas finalidades. A escolha de quais sensores irão compor determinada estação é baseada na aplicação dos dados coletados. A temperatura do ar é uma das variáveis que sempre compõem o quadro de medidas das estações independentemente do tipo ou finalidade da estação, obtendo-se, então, também seus valores extremos (mínimo e máximo).

Tais dados podem ser medidos ou registrado, através de determinação direta da temperatura, usando termômetros e termógrafos convencionais, ou ainda utilizando-se termosensores, comumente instalados em estações automáticas, e que efetuam a medida de forma indireta (VAREJÃO-SILVA, 2006). O uso do termômetro de mínima, cujo elemento sensível é o álcool etílico, se restringe às estações convencionais de superfície, que necessita da presença de um humano para a coleta dos dados.

Mesmo com tão ampla presença das medidas de temperatura mínima no quadro de registros do monitoramento atmosférico de superfície, o Brasil ainda

apresenta considerável carência de pontos de coleta. A rede de monitoramento possui baixa densidade e má distribuição espacial, e a manutenção das estações de superfície se constitui em trabalho árduo perante as dimensões de nosso território, levando a descontinuidade nas séries de registros.

Maneiras alternativas precisam ser encontradas para suprir as dificuldades impostas à obtenção dos dados de temperatura mínima, sendo comuns pesquisas que estimam a temperatura mínima do ar a partir de dados geográficos (ESTEFANEL *et al.*, 1973; PEDRO JÚNIOR *et al.*, 1991; CARGNUTTELI FILHO *et al.*, 2006) e até mesmo que estimam a temperatura mínima a partir de satélites (FRANÇOIS *et al.*, 1999; GUSSO, 2003; LOPES *et al.*, 2011).

Mesmo condições meteorológicas iniciais semelhantes podem dar origem a desdobramentos bastante diferentes no que diz respeito à evolução dos fenômenos, neste caso à ocorrência de geada. Isso significa que, para que as previsões de geada possam ser melhor sucedidas, deve-se procurar melhorar ao máximo a representação dos fenômenos físicos associados às condições de origem, amplificação e deslocamento das massas polares, e à aspectos locais dentre os quais destaca-se o balanço radiativo.

2.2 Sensoriamento remoto da geada

2.2.1 Base teórica do sensoriamento remoto

Diferentes autores definem sensoriamento remoto de forma diferente. Novo (2008) apresenta desde a definição mais ampla apresentada por Charles Elachi - “é a aquisição de informação sobre um objeto sem que se entre em contato físico com ele” - até a mais específica também de Elachi - “sensoriamento remoto implica na obtenção de informação a partir da detecção e mensuração das mudanças que um determinado objeto impõe aos campos de força que o circundam, sejam estes campos eletromagnéticos, acústicos ou potenciais”. Esta última definição, que a autora julga como a mais adequada, abrange sensores não apenas os que detectam a radiação

eletromagnética, mas também sonares (ondas acústicas) e os sismógrafos (ondas elásticas).

Conforme Novo (2008) existe duas teorias que explicam a propagação da radiação eletromagnética (REM). Uma delas proposta por James Maxwell em 1864 evidencia o comportamento ondulatório da REM e a outra, que descreve o comportamento quântico da REM pela transferência de energia através de fótons (pacote de energia), foi verificada por Planck em 1900.

Esse conceito de dualidade é extremamente importante para o sensoriamento remoto. Sempre que alguém estiver analisando qualquer tipo de informação obtida por sensores remotos, a coexistência da radiação eletromagnética na forma de onda e na forma de energia deverá ser considerada, para que se possa explicar o que se observa nas imagens, por exemplo, com referência às características do objeto (MENEZES & ALMEIDA, 2012).

O sensoriamento remoto como sistema de aquisição de informação pode ser dividido em dois grandes subsistemas: subsistema de aquisição de dados de SR, e subsistema de produção de informação. O primeiro possui componentes que se destinam a coleta da informação primária, bruta; e no segundo há componentes que efetuam o processamento da informação primária oferecendo ao usuário uma informação qualificada (NOVO, 2008).

O uso de dados de sensoriamento remoto oferece um grande suporte ao estudo ambiental dada a carência de pontos de coleta em superfície e a descontinuidade de séries históricas. Há, por exemplo, um grande número de satélites que possui sensores específicos para medir propriedades da atmosfera, tais como umidade, temperatura do topo das nuvens, ou ainda sua composição química, ofertando aos usuários uma quantidade regular e frequente de informações com amplo domínio espacial.

Extensas áreas continentais desabitadas e uma vasta superfície oceânica praticamente impossibilitam a coleta sistemática de dados, exceto através de sensoriamento remoto, usando, principalmente, imagens de satélite. O progresso observado nessa área tem possibilitado, por exemplo, obter informações preciosas quanto à distribuição de temperatura na superfície terrestre (TST) através de satélites.

Para Jensen (2009), as informações sobre a temperatura superficial podem ser obtidas por sensoriamento remoto, tendo em vista que o calor interno de um objeto é

convertido em energia radiante e para a maioria dos objetos existe uma alta correlação positiva entre a temperatura cinética verdadeira do objeto e o fluxo radiante proveniente dos objetos.

Conforme já discutido anteriormente, quando da análise da Figura 8, a temperatura mínima do ar junto à superfície terrestre ($T_{\text{mín}}$ da relva) é mais representativa da ocorrência de geada do que temperatura obtida em outros níveis da baixa atmosfera. Este fato, torna pertinente a análise e uso de dados de TST, obtidos por sensores orbitais, no contexto do desenvolvimento do presente estudo.

Gusso (2003) ressaltou que, sendo a relação entre TST e temperatura do ar acima desta superfície consistente, torna-se possível a geração de mapas deste elemento a partir de imagens orbitais. A queda da temperatura do solo por emissão de radiação eletromagnética de ondas longas resulta, por consequência, a queda da temperatura do ar. É, portanto, exatamente na iminência de ocorrência da TST mínima que se reúnem as melhores condições atmosféricas para a observação da superfície terrestre usando sensores remotos orbitais para a aquisição de dados da superfície, sobretudo em situação de formação de geada de radiação.

A temperatura da superfície terrestre é uma variável de grande importância no entendimento da interação solo-atmosfera por evidenciar os processos de dependência recíproca entre os dois sistemas. O sensoriamento remoto da superfície só é possível pela existência de janelas atmosféricas, regiões onde a REM pode avançar livremente pela transparência da atmosfera para determinados comprimentos de onda.

Todo corpo com temperatura superior ao zero absoluto (0 K) emite REM. Para sensoriamento remoto da superfície terrestre a principal fonte de REM é o Sol. Uma parcela da radiação solar de onda curta que chega na superfície é absorvida para, posteriormente, ser emitida para atmosfera na forma de radiação de onda longa.

A temperatura real da superfície terrestre pode ser estimada a partir da detecção da radiação de ondas longas emitida na faixa do infravermelho, fazendo uso de sensores orbitais. A TST é estimada a partir de correções feitas sobre a temperatura de brilho da superfície, detectada por sensores remotos.

A temperatura de brilho de um objeto na superfície é estimada a partir da excitância do objeto. A excitância é o fluxo radiante emitido pelo objeto aquecido ($T > 0$ K), em equilíbrio térmico, contido em um ângulo sólido e detectada pelo sensor.

Assim, a temperatura de brilho é obtida pela média ponderada da função de distribuição de Planck sobre a função resposta do sensor ao longo de uma faixa de comprimentos de onda, conforme a equação 3:

$$L(T) = \frac{\int_{\lambda}^{\Delta\lambda} M(T, \lambda) \Phi(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda}^{\Delta\lambda} \Phi(\lambda) d\lambda} \quad (\text{eq. 3})$$

Onde: $L(T)$ - radiância em $[\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}]$;
 $M(T, \lambda)$ – excitância por unidade de área, em um dado comprimento de onda e dada temperatura $[\text{Wm}^{-2}]$; e
 $\Phi(\lambda)$ - curva de resposta do sensor como função do comprimento de onda, ângulo sólido [sr].

A Lei de Planck prevê que toda a energia térmica de um corpo negro, com temperatura superior ao zero absoluto, seja convertida em radiação eletromagnética. Para superfícies naturais, que diferem de um corpo negro, é necessário a introdução de um parâmetro de correção, denominado emissividade ($\epsilon(\lambda)$). A emissividade compara a habilidade dos materiais reais em emitirem energia como um corpo negro, $\epsilon(\lambda)$ apresenta valores que variam de 0 a 1 e depende do comprimento de onda, da rugosidade, umidade e do tipo de cobertura do solo, além de outros parâmetros físicos (ANDERSEN, 1997).

Diversos satélites possuem sensores para obtenção da TST, tendo cada equipamento características espaciais, espectrais e temporais que lhes são próprias, fornecendo, assim, inúmeras possibilidades de pesquisa destinados ao monitoramento ambiental.

As informações de temperatura são obtidas através da aquisição e análise de dados advindos de sensores que operam na região do infravermelho do espectro eletromagnético. A radiação detectada tem comprimentos de onda que variam de 1,3 a 1.000 μm , e compõem as bandas do infravermelho médio e distante. A energia é proveniente da emissão eletromagnética de objetos e substâncias terrestres e por isso é denominada radiação termal (FERREIRA, 2006).

Uma das vantagens do sensoriamento remoto termal é a possibilidade de obtenção de uma ampla rede de dados de temperatura de áreas sobre a superfície terrestre. Estes dados são obtidos em um curto espaço de tempo, permitindo o monitoramento e estudo multitemporal das áreas com vários trabalhos já realizados (SOBRINO *et al.*, 1997; ATAÍDE, 2006; LOPES & RIZZI, 2007; RODRIGUES *et al.*, 2007; LENSKY & DAYAN, 2011).

Como mencionado anteriormente, as condições atmosféricas favoráveis à emissão de radiação de onda longa pela superfície em noites favoráveis à ocorrência de geadas, são coincidentes com as condições adequadas ao imageamento da superfície a partir de sensores orbitais, dada a alta transmitância atmosférica.

Diversos trabalhos têm analisado a qualidade da informação de TST obtida por sensores orbitais através da comparação com dados de temperatura do ar medida em estações meteorológicas (GUSSO *et al.*, 2007; LOPES *et al.*, 2011). Em geral, os resultados apontam para coeficientes de determinação que variam de 0,63 a 0,86. As incertezas nestes estudos decorrem da estimativa da TST propriamente dita, relacionada à quantificação da emissividade da superfície e da interferência atmosférica (GUSSO *et al.*, 2007) e, também, relacionadas à obtenção do conjunto de dados usados como referência, dada as diferenças de natureza e abrangência das medidas de um e outro elemento (FRANÇOIS *et al.*, 1999).

2.2.2 Uso do sensor MODIS

Alternativas interessantes para obtenção de dados de TST são oriundas do programa *Earth Science Enterprise*, lançado em 1991, que surgiu com a missão de desenvolver satélites, produtos e ferramentas destinadas ao estudo intensivo da Terra, dando suporte ao monitoramento ambiental coletando informações da crosta terrestre, dos oceanos e da atmosfera (FLORENZONI, 2008).

O primeiro satélite do programa foi lançado em 1999, batizado de TERRA e formalmente conhecido como EOS-AM (*Earth Observing System*). Outro satélite da série EOS é a plataforma AQUA, lançado em 2002. Este, possui os mesmos instrumentos que compõem a plataforma TERRA, mas foram adicionados outros que

fornece dados para melhor entendimento do ciclo da água no Planeta. Ambos operam numa órbita polar e síncrona com o Sol, com inclinação de aproximadamente 98,2°, período orbital de 98,1min, altitude média de 705 km, velocidade no solo de 6,7 kms⁻¹, distância entre órbitas adjacentes de 172 km e com período de revisita de 1-2 dias (NASA, 2006).

Para o desenvolvimento desta tese a característica que qualifica o satélite AQUA para o estudo é o horário de cruzamento no Equador, que ocorre à 1h30min (norte-sul) e 13h30min (sul-norte), sendo o primeiro, obviamente, o mais próximo do provável horário de ocorrência de geada.

As duas plataformas possuem entre seus instrumentos o MODIS (*MODerate resolution Imaging Spectroradiometer*). O espectro eletromagnético detectado se estende do visível ao infravermelho termal, cujos comprimentos de onda estão situados entre 0,405 e 14,385 µm. O tamanho do pixel em terra é de 250 m para as bandas 1 e 2, de 500 m para as bandas de 3 a 7, e de 1.000 m para as bandas de 8 a 36 (MODIS, 2014a).

Segundo Justice *et al.* (2002) o sensor MODIS foi projetado para satisfazer os interesses de três campos de estudos: atmosfera, oceano e continente. Em termos de especificidades da resolução temporal, o MODIS adquire imagens globais a cada 2 dias e imagens diárias da superfície terrestre com latitude superior a 30°, cuja largura da área observada é de 2.340 km em fileira.

As imagens MODIS disponibilizadas estão prontas para uso, pois passaram por correções atmosféricas e geométricas. O elevado nível de processamentos a que estão sujeitos os dados MODIS, além da alta frequência de observações, qualifica este instrumento para uso na obtenção da temperatura da superfície terrestre. Além disso, em MODIS (2014a) tem-se que os produtos são armazenados em um formato *Hierarchy Data Format* (HDF), que permite uma implementação transparente de acesso aos dados, através de um conjunto de ferramentas específicas. Os produtos são disponibilizados gratuitamente no site Reverb | Echo.

Dentre as possibilidades de dados de TST do instrumento MODIS tem-se o produto MODIS / Aqua LST / E L3 global 1 e 5 km (MYD11A1), de grade sinusoidal e resolução espacial de 1 Km e 5 Km. Eles são produzidos diariamente utilizando o algoritmo Land Surface Temperature (LST) e a emissividade das bandas 31 e 32,

cujas faixas de comprimentos de onda estão entre 10,780-11,280 μm e 11,770-12,270 μm , respectivamente.

O algoritmo LST diminui o efeito de atenuação causada pela atmosfera sobre a radiação emitida pela superfície, resultando em um campo de temperatura com acurácia de 1 K para materiais com emissividade conhecida (MODIS, 2014b).

O produto MDY11A1 vem sendo utilizado especialmente em estudos em regiões com baixa densidade de estações meteorológicas em regiões frias do Globo, destacando-se os trabalhos de Pouteau *et al.* (2011), Hachem *et al.* (2012) e Muster *et al.* (2015).

Diante das dificuldades para obtenção de dados de superfície que representem a ocorrência de geada, com adequada representação espacial, soluções alternativas precisam ser encontradas.

A coincidência da condição atmosférica para a ocorrência de geada e obtenção de dados através de sensores orbitais, qualifica o produto MDY11A1, do sensor MODIS/AQUA, como uma possibilidade de instrumento para solucionar a carência de dados de superfície, para investigação de formação de geada.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de modelagem e teste

A área de modelagem do risco de geada está compreendida entre as latitudes -27° e -34° e longitudes entre -48° e -58° , onde o Rio Grande do Sul se insere. Possui uma grande diversidade cultural e de paisagens.

Segundo SEPLAN (2015), o Estado apresenta cinco unidades geomorfológicas bem definidas, que determinam sua hipsometria (Figura 10). Ao norte do Estado situa-se o Planalto Meridional, formado por rochas basálticas. Na extremidade a oeste, se observa o resultado do trabalho da erosão diferencial, ocorrendo valores de baixa altitude em direção à calha do Rio Uruguai. À nordeste encontram-se as maiores altitudes do Planalto, chegando a alcançar 1.398 m no Monte Negro em São José dos Ausentes. Suas bordas correspondem à chamada Serra Geral.

Ainda na Figura 10 se observa a Depressão Central que é formada de rochas sedimentares dando origem a um extenso corredor que liga o oeste ao leste, através de terrenos de baixa altitude. Ao sul localiza-se o Escudo Sul-rio-grandense, com rochas ígneas muito desgastadas pela erosão e que não ultrapassa os 600 m. A Planície Costeira, a mais recente formação geológica como decorrência da sedimentação marinha e fluvio-lacustre, corresponde a uma faixa arenosa de 622 km, com grande ocorrência de corpos hídricos, entre os quais destacam-se a Laguna dos Patos e a Lagoa Mirim.

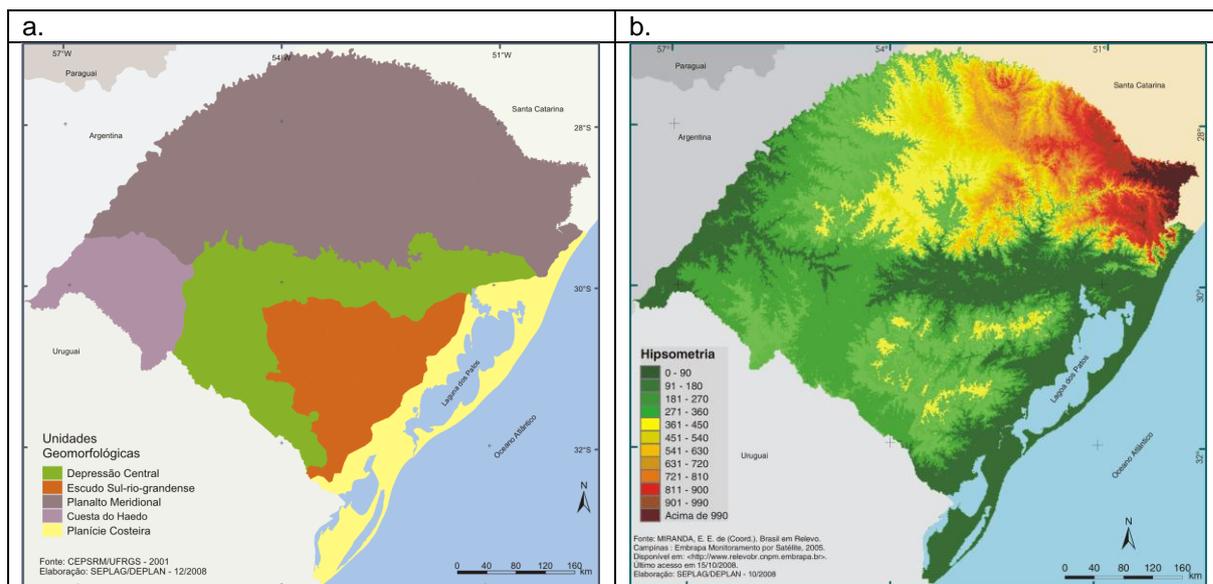


Figura 10. Geomorfologia (a) e hipsimetria (b) do Rio Grande do Sul. Fonte: Ducati (2001) e Miranda (2005).

O clima do Rio Grande do Sul é temperado do tipo subtropical, classificado como mesotérmico úmido, segundo a classificação climática de W. Köppen de 1948. A latitude reforça as influências das massas de ar oriundas da região polar e da área tropical continental e Atlântica, cujas movimentações definem muitas de nossas características climáticas. As temperaturas apresentam grande variação sazonal, com verões quentes e invernos bastante rigorosos, com a ocorrência de geada e precipitação eventual de neve (SEPLAN, 2015).

Ainda segundo SEPLAN (2015), mais de 30% da estrutura econômica do Rio Grande do Sul corresponde a agroindústria. Em 2014, como citado em Rocha (2015), a agricultura contribuiu com 11,68% do VAB (valor adicionado bruto, aproximação do PIB) e a indústria com 23,15%. A forte ligação da indústria com a agricultura deixa o Rio Grande do Sul mais vulnerável às crises agrícolas do que outros estados brasileiros.

Para testar o modelo do risco de geada foi escolhida uma área que engloba o Sudeste Rio-grandense, mostrada na Figura 11. Localizada entre as latitudes $-30,16^\circ$ e $-33,75^\circ$ e as longitudes $-51,75^\circ$ e $-53,97^\circ$ contribui fortemente com a produção agropecuária do Estado e possui características geográficas que favorecem a ocorrência de geada. Os testes ocorreram através de comparações com dados de temperatura mínima do ar registrados em estação meteorológica de superfície de três localidades distribuídas na região de teste, sendo estas Encruzilhada do Sul, Rio

Grande e Santa Vitória do Palmar, cujas coordenadas geográficas e altitudes são respectivamente (-30,53°, -52,52°, 427 m), (-32,02°, -52,08°, 5 m) e (-33,52°, -53,35°, 6 m).

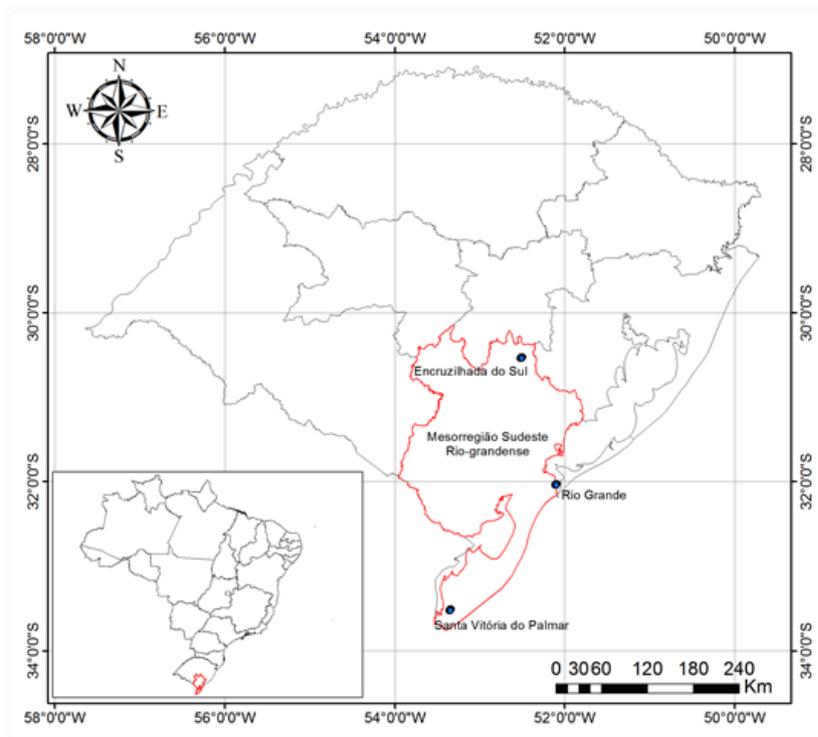


Figura 11. Área de teste e localização das estações meteorológicas selecionadas.

Na Tabela 1 são apresentados os produtos agrícolas e pecuários mais expressivos da região de teste e suas respectivas contribuições para a economia do Rio Grande do Sul, com destaque para a produção de arroz, cebola, pêssigo e ovino.

Tabela 1. Produção agrícola (em toneladas) e pecuária (mil cabeças) do Sudeste Rio-grandense e participação (%) na economia do Rio Grande do Sul.

Lavouras temporárias		
Produto	Quantidade (em toneladas)	Participação (%)
Arroz (em casca)	1.405.124	18,3
Cebola	98.157	47,4
Fumo (em folha)	63.035	15,9
Melancia	51.484	15
Tomate	11.426	10,6
Sorgo (em grão)	10.522	29,5
Mamona (baga)	36	100
Fava (em grão)	12	10,9

Lavouras permanentes		
Produto	Quantidade (em toneladas)	Participação (%)
Pêssego	60.664	45,7
Marmelo	68	29,8
Azeitona	41	28,3

Pecuária		
Produto	Quantidade (em mil cabeças)	Participação (%)
Bovino	2.167,40	15,3
Ovino	1.034,70	25,3
Equino	92,4	19,7
Caprino	22,9	22,8

Fonte: FIERGS, 2014.

O Sudeste Rio-grandense está inserido na zona de trajetória de anticiclones polares conforme Pezza (2003), o que lhe confere condições meteorológicas favoráveis à ocorrência de geada.

A presença de grandes corpos hídricos, Laguna dos Patos, Lagoa Mirim e costa do Oceano Atlântico, lhe confere características em termos de concentração de vapor d'água na atmosfera que interferem no balanço de radiação local. Outro fator de interferência é a cobertura do solo através do albedo das superfícies. O balanço de radiação pode acentuar ou reduzir as condições favoráveis à formação de geada.

Além disso, os valores de altitude variam do nível do mar até 600 m. Este é principal fator de influência às baixas temperaturas segundo Aguiar & Mendonça (2004). Fedorova (2001) ressaltou as variações na altitude como facilitador do acamamento do ar frio nas áreas de baixada. Eventualmente a topografia pode facilitar ou impedir a advecção do ar frio, ocasionando, localmente, um efeito canalizador ou de barreira para a massa de ar polar, semelhante ao descrito por Seluchi (2009) em consequência da presença da Cordilheira dos Andes, porém em escala bem menor.

3.2 Base de dados

3.2.1 Dados geográficos

Para a elaboração do modelo de geada foram usados dados do posicionamento geográfico de 40 estações meteorológicas de superfície do Rio Grande do Sul cedidos pelo 8° DISME/ INMET (8° Distrito de Meteorologia/Instituto Nacional de Meteorologia) e FEPAGRO/ SEAPA (Fundação Estadual de Pesquisas Agropecuária/Secretaria Estadual da Agricultura, Pecuária e Agronegócio), conforme Tabela 2.

Tabela 2. Latitude [°], longitude [°], altitude [m] e temperatura mínima média climatológica [°C] de junho e julho de estações meteorológicas de superfície do Rio Grande do Sul.

	Estação	Latitude [°]	Longitude [°]	Altitude [m]	Temperatura mínima do ar [°C]
1	Alegrete	-29,68	-55,52	124	8,9
2	Bagé	-31,35	-54,10	215	8,5
3	Bento	-29,25	-51,52	619	8,8
4	Bom Jesus	-28,67	-50,43	1047	6,4
5	Caçapava do Sul	-30,5	-53,48	450	8,8
6	Cachoeirinha	-30,03	-52,88	72	8,8
7	Caxias do Sul	-29,17	-51,20	785	9,0
8	Cruz Alta	-28,63	-53,60	472	9,4
9	Encruzilhada do Sul	-30,53	-52,52	427	8,8
10	Farroupilha	-29,23	-51,43	702	7,4
11	Guaporé	-28,92	-51,90	772	8,2
12	Ijuí	-28,38	-53,90	448	9,5
13	Iraí	-27,18	-53,23	222	9,9
14	Júlio de Castilhos	-29,22	-53,67	516	8,6
15	Lagoa Vermelha	-28,42	-51,58	836	7,9
16	Marcelino Ramos	-27,45	-51,90	414	9,2
17	Osório	-29,68	-50,22	32	9,3
18	Palmeira das Missões	-27,88	-53,43	634	9,3
19	Passo Fundo	-28,25	-52,40	676	9,0
20	Pelotas	-31,87	-52,35	13	8,6
21	Porto Alegre	-30,02	-51,22	46	10,6
22	Rio Grande	-32,02	-52,08	5	10,1
23	Santa Cruz	-29,72	-52,42	56	9,6
24	Santa Maria	-29,70	-53,70	95	9,8
25	Santa Rosa	-27,85	-54,42	360	10,1
26	Santa Vitória do Palmar	-33,52	-53,35	6	8,2
27	Santana do Livramento	-30,88	-55,53	210	8,3
28	Santiago	-29,18	-54,88	426	9,3
29	Santo Ângelo	-28,3	-54,25	289	8,5
30	São Borja	-28,65	-56,00	96	10,3
31	São Francisco de Paula	-29,33	-51,50	912	7,1
32	São Gabriel	-30,33	-54,32	124	9,0
33	São Luiz Gonzaga	-28,38	-54,97	254	11,0
34	Soledade	-29,05	-52,43	720	8,7
35	Tapes	-30,87	-51,35	5	9,7
36	Taquari	-29,80	-51,82	76	9,4
37	Torres	-29,33	-49,72	43	11,2
38	Uruguaiana	-29,75	-57,08	74	9,1
39	Vacaria	-28,55	-50,70	960	6,3
40	Veranópolis	-28,93	-51,55	705	7,9

Fonte: 8° DISME/ INMET e FEPAGRO/ SEAPA.

O conjunto de dados foi constituído por latitude [°], longitude [°] e altitude [m], que posteriormente foram padronizados para que ficassem na mesma ordem de grandeza.

Neste estudo a longitude foi usada para o cálculo da continentalidade (distância do mar), obtida a partir da distância com relação a uma reta paralela a costa do Rio Grande do Sul como mostra a Figura 12. Nesta figura ainda se observa um esquema indicando as direções de crescimento das variáveis usadas para a modelagem.

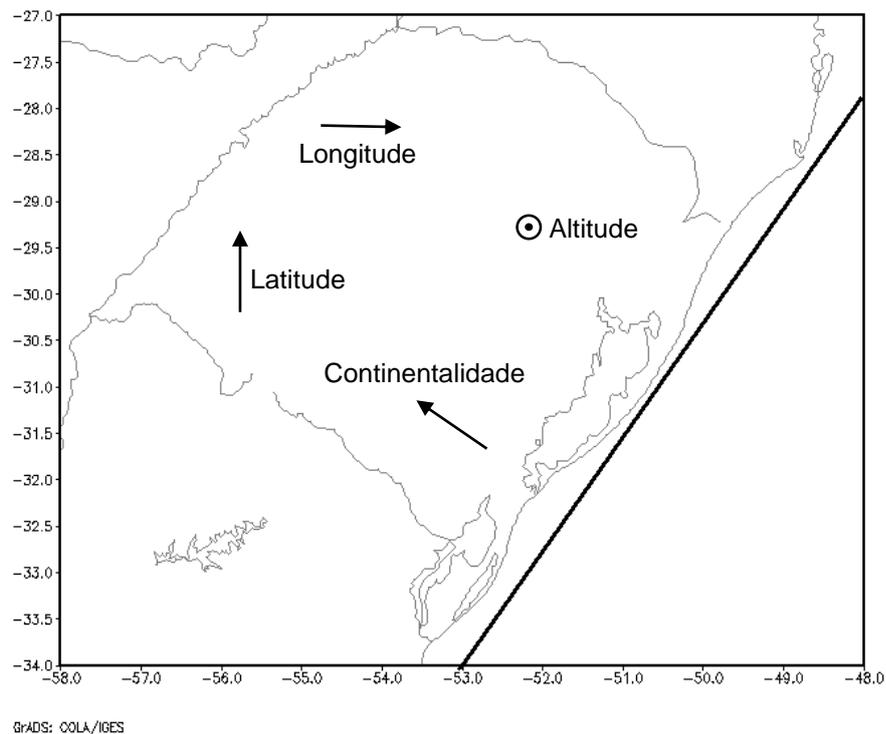


Figura 12. Esquema de crescimento das variáveis geográficas, latitude, longitude, altitude e continentalidade. Este símbolo ⊙ representa a direção para cima.

A reta paralela a costa do Rio Grande do Sul é representada pela equação genérica $y = a + bx$ cuja inclinação é dada em função das latitudes e longitudes.

3.2.2 Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos utilizados neste estudo foram a temperatura mínima do ar, medida em abrigo meteorológico, e registro de geadas, ambas provenientes de estações meteorológicas de superfície.

Foram usados períodos diferentes de dados para a elaboração do modelo do risco geral de geada, para testar o modelo e para comparar com os dados orbitais obtidos com o sensor MODIS/AQUA.

Para a elaboração do modelo de regressão linear múltipla, utilizado para posterior obtenção do risco geográfico de geada (RGeo), componente do risco geral de geada (RGG), foram utilizados os dados de temperatura mínima do ar registradas nas 40 estações meteorológicas de superfície do Rio Grande do Sul, apresentados na Tabela 2. Os dados foram cedidos pelo 8° DISME/INMET e FEPAGRO/SEAPA. Tais dados correspondem aos valores de média climatológica dos meses de junho e julho calculadas no período entre 1961-1990.

Os dados diários de temperatura mínima do ar, foram obtidos do BDMEP/INMET (Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa/Instituto Nacional de Meteorologia) do período entre 1961 e 2015.

Estes dados diários foram organizados mês a mês para se obter as estatísticas mensais, estacionais e anuais da temperatura mínima do ar de cada estação meteorológica contida na área de teste, sendo estas Encruzilhada do Sul, Rio Grande e Santa Vitória do Palmar. Foram extraídos os valores de média e desvio padrão, bem como obtidas as frequências relativas mensais/anuais dos valores diários da $T_{mín}$. As frequências foram computadas através da contagem dos valores distribuídos em intervalos classes. O número de classes foi definido pela expressão $5 * (\log_{10}(N))$, sendo N o número total de dados mensal/anual.

Para o teste do RGG foram usados os dados coletados entre os anos de 1961 e 2015. Foram analisados criteriosamente dois períodos específicos onde foi registrada a mais alta temperatura mínima do ar associada a ocorrência de geada, em julho de 2011 na localidade de Encruzilhada do Sul e em agosto de 2014 em Santa Vitória do Palmar. Para melhor compreensão do estudo destes casos específicos foram analisadas também cartas sinóticas de superfície disponibilizadas

gratuitamente pelo DHN/CHM (Diretoria de Hidrografia e Navegação/Centro de hidrografia da Marinha) da Marinha do Brasil.

A avaliação dos dados de TST obtidos do produto MDY11A1 a partir de imagens orbitais do sensor MODIS/AQUA se deu com o uso dos dados meteorológicos coletados nos meses de junho, julho e agosto entre os anos de 2006 e 2012. Foram obtidos dois conjuntos distintos, um com todos os dias em que foram obtidas imagens de satélite, outro conjunto com dados de temperatura mínima do ar ($T_{mín_geada}$) e TST apenas em noites com registro de geada.

3.2.3 Dados de satélite

Os dados de TST foram provenientes do produto MDY11A1, obtidos a partir de imagens orbitais do sensor MODIS a bordo do satélite AQUA na passagem noturna, obtidas gratuitamente no portal *Reverb | ECHO* da NASA. Tais dados foram obtidos nos meses de junho, julho e agosto entre os anos de 2006 e 2012.

As imagens foram processadas no software *ArcGIS® 10*, usando a ferramenta de modelagem interativa chamada *Model Builder*. As rotinas foram desenvolvidas através de fluxogramas que relacionam os dados de entrada, parâmetros relativos a cada ferramenta, a própria ferramenta de processamento e os dados de saída (Figura 13).

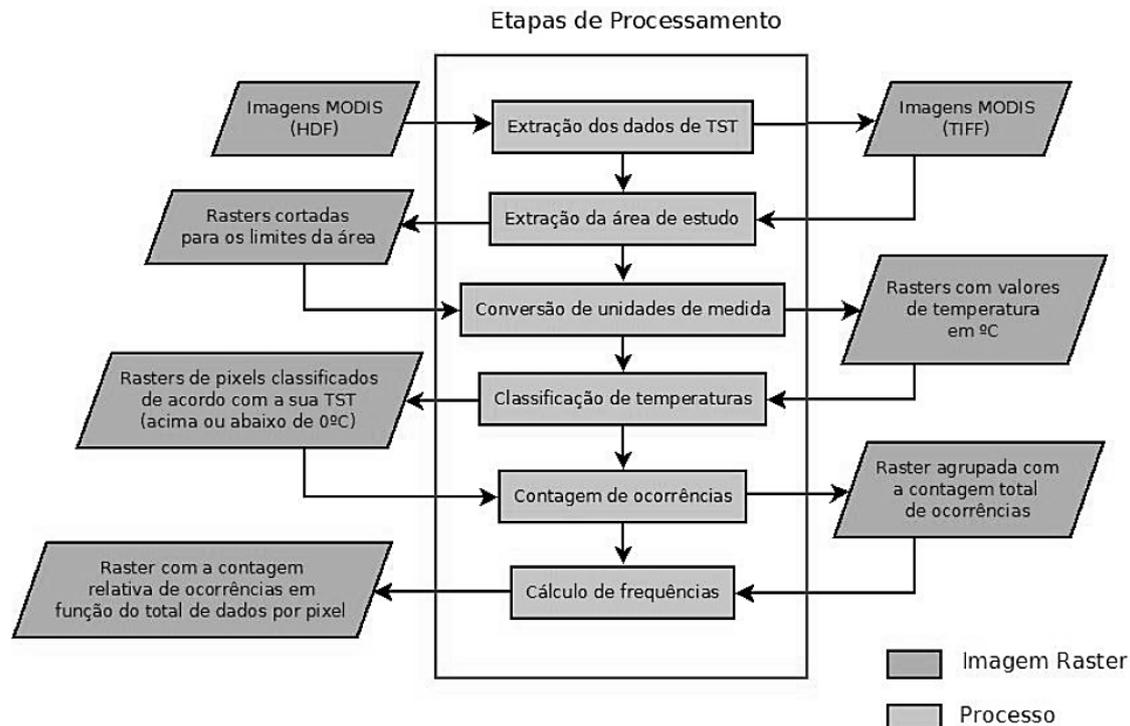


Figura 13. Fluxograma das etapas de processamento das imagens TST do produto MDY11A1 do sensor MODIS/AQUA. Fonte: Vicari *et al.*, 2013.

A primeira etapa foi a extração dos dados de TST dos 12 subconjuntos de dados que compõem o produto MDY11A1, recorte do limite da área de estudo e a conversão de unidades de temperatura, de Kelvin para Celsius. Após, foi efetuada a classificação de forma booleana, ou seja, cada pixel foi comparado com um valor limite, sendo selecionados somente os pixels com temperatura abaixo de 3°C.

Na sequência foi feita uma contagem de frequência simples e, posteriormente, realizada uma segunda classificação, desconsiderando pixels com falhas, por exemplo com nuvens.

Utilizando uma técnica de sobreposição de imagem, foi feita a contagem das possíveis ocorrências de geadas e do total de dados válidos, separadamente, gerando dois mapeamentos distintos, um com a contagem total de possíveis ocorrências de geada e outro com a contagem total de dados válidos para cada limiar, ocorrendo geada ou não.

A etapa final consistiu em calcular a razão entre a contagem de ocorrências e a contagem total de dados válidos, obtendo o mapeamento da frequência relativa dos dias com temperatura sujeita a ocorrência de geada.

Para comparação entre os dados de Tmín das estações meteorológicas com os de TST foi extraída uma janela de 3 x 3 pixels centrada nas coordenadas das

estações meteorológicas em estudo. O valor de TST desta janela foi definido pela média dos valores dos pixels que a compõem. A partir do conjunto de dados obtidos das estações meteorológicas ($T_{mín}$ e $T_{mín_geada}$) e do produto MDY11A1 (TST), foram calculadas as estatísticas básicas das séries: número de ocorrências, valor mínimo, valor máximo, média e desvio padrão. As significâncias foram testadas através do teste t de *Student* e DMS de Fisher, ambos ao nível de 95%.

Foram, ainda, ajustadas equações de regressão linear entre $T_{mín}$ e TST através do método dos mínimos quadrados, para cada uma das localidades ao longo de todo período e para o conjunto total dos dados. O grau de ajuste das equações foi avaliado pelos coeficientes de correlação (R) e de determinação (R^2).

Para análise dos casos especiais utilizados para o teste do modelo do risco geral de geada, foram usadas imagens dos satélites meteorológicos GOES-12 e GOES-13 cedidos pela DAS/CPTEC/INPE (Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais/Centro de Pesquisas de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). Foram selecionadas imagens nos canais 3 (WV) do vapor d'água e 4 (IR) do infravermelho, cujos comprimentos de onda são respectivamente 6,47 – 7,02 μm e 10,2 – 11,2 μm . As imagens possuem resolução espacial de 8 km no canal 3 e de 4 km no canal 4.

3.3 Ajuste do modelo do risco geral de geada

A obtenção do modelo do risco geral de geada (RGG) sobre o Rio Grande do Sul foi fundamentada no risco que as características posicionais do local e a temperatura mínima apresentam para a formação da geada. Assim, primeiro foi obtido um modelo que resultasse no risco geográfico de geada (RGeo), para então ser adicionado o risco de geada da temperatura mínima ($RT_{mín}$). Tais riscos foram representados em termos de probabilidade.

Como primeiro passo foi obtida uma equação para cálculo da continentalidade em função da latitude e da longitude, com base na reta paralela a costa do Rio Grande do Sul conforme a Figura 12. A forma genérica da equação da continentalidade está descrita na equação 4 a seguir:

$$Cont = -Lon + \left\{ \left[(Lat - (-28)) * \left(\frac{-48 - (-53)}{-28 - (-34)} \right) \right] + (-48) \right\} \quad \text{eq. 4}$$

Onde: Cont – Continentalidade [°];

Lat – Latitude do local [°];

Lon – Longitude do local [°].

No segundo passo, utilizando o software gratuito *SPSS Statistics*, obteve-se um modelo linear de regressão múltipla, aplicando os dados da Tabela 2 e os resultados da continentalidade calculados com a equação 4. Este modelo efetua a estimativa da temperatura mínima do ar, média climatológica dos meses de junho e julho, para o Rio Grande do Sul, através da equação 5:

$$Tmín_p = \alpha * Lat + \beta * Alt + \gamma * Cont \quad \text{eq. 5}$$

Onde: $Tmín_p$ – Temperatura mínima prevista [°C];

Lat – Latitude [°];

Alt – Altitude [m];

Con – Continentalidade [°];

α , β e γ – coeficientes de regressão linear.

Desta regressão obteve-se o valor numérico da contribuição de cada variável geográfica, altitude, latitude e continentalidade, na explicação da temperatura mínima do ar sobre o Rio Grande do Sul nos meses de inverno. Cada uma das contribuições, α , β e γ , foi dividida pelo somatório de todas elas a fim de obter os pesos proporcionais de cada variável, uma vez que a temperatura mínima não é explicada somente pelas coordenadas geográficas e altitude.

Nos passos seguintes foram estabelecido o risco que cada variável, isoladamente, carrega consigo para a formação de geada. Assim, foram criados os riscos de geada da latitude (RLat), da altitude (RAlt) e da continentalidade (RCont), cujos valores de probabilidade variam entre 0 e 1.

O RLat teve sua distribuição num intervalo de latitude entre 0 e -40°, correspondendo respectivamente à menor e maior probabilidade de ocorrência de geada. Esta faixa de latitude está baseada, nas ocorrências de geada provocadas

pela advecção de ar frio descritas em Seluchi (2009), e no saldo negativo de radiação em latitudes superiores a -40°. A equação 6 descreve o risco devido a latitude:

$$RLat = \frac{Lat}{(-40)} \quad \text{eq. 6}$$

Onde: RLat – Risco de geada devido somente a latitude;
Lat – Latitude [°].

O valor de RAlt foi distribuído num intervalo de altitudes entre 0 e 1200 m, onde o menor risco corresponde a menor altitude e o maior risco a maior altitude. A escolha dos limites foi baseada na altitude observada no Rio Grande do Sul. Assim o risco da altitude é descrita pela equação 7:

$$RAlt = \frac{Alt}{1200} \quad \text{eq. 7}$$

Onde: RAlt – Risco de geada devido somente a altitude;
Alt – Altitude [m].

O RCont também foi definido pelos valores observados no Rio Grande do Sul. Ele foi distribuído entre 0 e 8° calculados através da equação 4, o último valor correspondendo a maior distância da reta paralela a costa do Oceano Atlântico, onde também está a maior probabilidade de ocorrência de geada se o risco for devido somente a continentalidade. Tal risco é descrito pela equação 8:

$$RCont = \frac{Cont}{8} \quad \text{eq. 8}$$

Onde: RCont – Risco de geada devido somente a continentalidade;
Cont – Continentalidade [°].

De posse dos pesos proporcionais das variáveis geográficas e dos riscos isolados de cada uma delas foi possível avançar mais um passo. Foi então obtido o modelo geográfico do risco de geada, RGeo, com o somatório da probabilidade de

cada uma das variáveis considerando a contribuição de cada uma para a formação de geada. A forma geral do RGeo é descrita pela equação 9:

$$RGeo = \frac{\alpha}{\alpha + \beta + \gamma} RLat + \frac{\beta}{\alpha + \beta + \gamma} RAlt + \frac{\gamma}{\alpha + \beta + \gamma} RCont \quad \text{eq. 9}$$

Onde: RGeo – Risco geográfico de geada;

RLat – Risco de geada devido somente a latitude;

RAlt – Risco de geada devido somente a altitude;

RCont – Risco de geada devido somente a continentalidade;

α , β e γ – coeficientes de regressão linear.

Na sequência foi estabelecido o risco de ocorrência de geada devido somente a temperatura mínima, RTmín. A probabilidade foi distribuída num intervalo de temperatura entre 0 e 6°C, sendo neste caso o maior risco de geada atribuído ao menor valor de temperatura e menor risco ao maior valor de Tmín. Este risco de geada é descrito genericamente por uma reta conforme a equação 10:

$$RTmín = -bTmín + 1 \quad \text{eq. 10}$$

Onde: RTmín – Risco de geada devido somente a temperatura mínima;

Tmín – temperatura mínima [°C];

b – coeficiente angular da reta.

Na literatura são comuns valores de temperatura mínima do ar de 3 e 4°C como referência do limite superior para a ocorrência de geada (ESTEFANEL *et al.*, 1973; SENTELHAS, 1995; PEDRO JÚNIOR *et al.*, 1991; OLIVEIRA, 1997; SILVA & SENTELHAS, 2001; CARGNELUTTI FILHO *et al.*, 2006; FERREIRA *et al.*, 2006). Entretanto se observa a formação de geada em condições de temperaturas superiores a estes. Como exemplo tem-se em Bagé geada fraca em 21 de julho de 2007 com temperatura mínima de 5,6°C e Bom Jesus registrou geada fraca em 3 de maio de 2012 cuja temperatura mínima foi de 6°C e em 29 de agosto de 2015 com temperatura de 5,8°C, segundo dados do 8º DISME/INMET.

Por fim, na última etapa foi obtido o modelo do risco geral de geada (RGG) que se deu pelo somatório do RGeo e RTmín conforme equação genérica 11:

$$RGG = A * RGeo + B * RTmín \quad \text{eq. 11}$$

Onde: RGG – Risco geral de geada;

RGeo – Risco geográfico de geada;

RTmín – Risco de geada pela temperatura mínima;

A e B – contribuições proporcionais ao risco de geada.

Foram confeccionados no software livre GrADS/COLA IGES mapas do RGG para diferentes temperaturas para facilitar a interpretação dos resultados.

3.4 Teste do modelo

O modelo do risco geral de geada foi testado na mesorregião denominada Sudeste Rio-grandense conforme Figura 11 da área de teste, apresentada na seção 3.1.

3.4.1 Teste com dados observados em superfície

Através da análise estatística dos dados diários de temperatura mínima do ar, de estações meteorológicas de superfície, foram identificados os meses mais favoráveis à ocorrência de geada, bem como detectados os valores de Tmín mais compatíveis com a formação de geadas no Sudeste Rio-grandense.

Também foram identificadas situações especiais para análise particular. Foram selecionados os dias com maior temperatura mínima associada com a formação de geada, em cada localidade da área de teste, para a comparação com os resultados obtidos do RGG.

3.4.2 Teste com dados de satélite

Os resultados obtidos das análises estatísticas aplicadas aos dados diários de temperatura mínima do ar, obtidos em estações meteorológicas de superfície do Sudeste Rio-grandense, foram comparados com os de TST do produto MDY11A1. Além das estatísticas básicas, foram obtidas equações de regressão para verificar a correlação entre $T_{mín}$ inferiores a 6°C e TST.

Os dados foram separados em dois conjuntos, de noites com e sem geada, para se efetuar comparações mais realísticas.

A frequência de dias com valores de TST inferiores a 3°C foram comparadas também com frequência relativa da $T_{mín}$ inferior a 3°C .

O RGG também foi comparado com a frequência de valores de TST inferiores a 3°C .

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados diários de temperatura mínima obtidos do BDMEP/INMET apresentam uma falha grande nas três estações de superfície, com 4 anos consecutivos sem registros, entre 1984 e 1987. Foram detectadas também uma quantidade considerável de falhas distribuídas aleatoriamente em 6 anos em torno do período citado. As falhas nos dados podem ter origem em problemas nos equipamentos de medição e, ou ainda, falhas humanas, não sendo possível identificar qualquer relação com a localização das estações.

Sendo a geada um evento bastante restrito espacial e temporalmente, e dependente de fatores bem específicos, optou-se por usar a totalidade dos dados registrados nas estações para garantir a abrangência do maior número de eventos ocorridos entre 1961 e 2012, totalizando 52 anos de observações.

Os resultados estatísticos apontam os meses de inverno (junho, julho e agosto), onde se observa a ocorrência de temperaturas inferiores a 3°C como sendo os meses com maior probabilidade para a ocorrência de geada. Estes coincidem com o trimestre predominante para a ocorrência de geada estudado por Müller (2005).

Estes resultados contribuíram para a escolha do período de obtenção dos dados de TST provenientes do sensor MODIS/AQUA. Os limiares estabelecidos como pontos de corte para a classificação booleana das imagens TST foram 0, 1, 2 e 3°C, sendo então estes considerados valores passíveis de formação de geada.

4.1 Ajuste do modelo de risco geral de geada

O primeiro passo efetuado para modelar o risco geral de geada foi obter a equação da continentalidade aplicada sobre a área de modelagem, resultando na equação 12:

$$Cont = -Lon + \{[(Lat + 28) * (0,8333)] - 48\} \quad \text{eq. 12}$$

Onde: Cont – continentalidade, distância do mar [°];

Lon – Longitude [°];

Lat – Latitude [°].

O valor 0,8333 é simplesmente o coeficiente angular da reta paralela a costa do Rio Grande do Sul apresentada na Figura 12, sendo calculado pela razão $\{[-48-(-53)] / [-28-(-34)]\}$.

Aplicando a equação 12 aos dados das estações meteorológicas de superfície apresentados na Tabela 2 se obtém os resultados da Tabela 3.

Tabela 3. Continentalidade [°] das estações meteorológicas de superfície do Rio Grande do Sul.

Estação	Continentalidade [°]	Estação	Continentalidade [°]
Alegrete	6,11	Porto Alegre	1,54
Bagé	3,31	Rio Grande	0,74
Bento	2,48	Santa Cruz	2,99
Bom Jesus	1,88	Santa Maria	4,28
Caçapava do Sul	3,40	Santa Rosa	6,54
Cachoeirinha	3,19	Santa Vitória do Palmar	0,75
Caxias do Sul	2,23	Santana do Livramento	5,13
Cruz Alta	5,07	Santiago	5,90
Encruzilhada do Sul	2,41	Santo Ângelo	6,00
Farroupilha	2,41	São Borja	7,46
Guaporé	3,14	São Francisco de Paula	2,39
Ijuí	5,58	São Gabriel	4,37
Iraí	5,91	São Luiz Gonzaga	6,65
Júlio de Castilhos	4,65	Soledade	3,56
Lagoa Vermelha	3,24	Tapes	0,96
Marcelino Ramos	4,36	Taquari	2,32
Osório	0,81	Torres	0,61
Palmeira das Missões	5,53	Uruguaiana	7,63
Passo Fundo	4,19	Vacaria	2,24
Pelotas	1,13	Veranópolis	2,77

Para definir a contribuição das variáveis geográficas latitude, altitude e continentalidade no modelo geográfico de geada foi utilizado um modelo linear de regressão múltipla para a estimativa da temperatura mínima do ar, obtendo-se a equação 13:

$$T_{mín_e} = (0,567 * Lat) - (0,952 * Alt) - (0,087 * Con) \quad \text{eq. 13}$$

Onde: $T_{mín_e}$ – Temperatura mínima média climatológica estimada [°C];

Lat – Latitude [°];

Alt – Altitude [m];

Con – Continentalidade [°].

Salienta-se que a temperatura mínima estimada tem como resultado um valor padronizado e que representa o valor médio climatológico dos meses de junho e julho sendo válido somente para o Rio Grande do Sul.

Observa-se pela equação 13 que a altitude é o fator que melhor explica a temperatura mínima do ar no Rio Grande do Sul, coerente com os resultados apresentado por Aguiar & Mendonça (2004) em estudo semelhante para Santa Catarina.

Este modelo de regressão apresentou resultados muito satisfatórios, conforme Figura 14, cujo coeficiente de correlação foi de 0,81, ou seja, 81% da variabilidade da temperatura mínima média climatológica dos meses de junho e julho sobre o Rio Grande do Sul é atribuída as variáveis latitude, altitude e longitude.

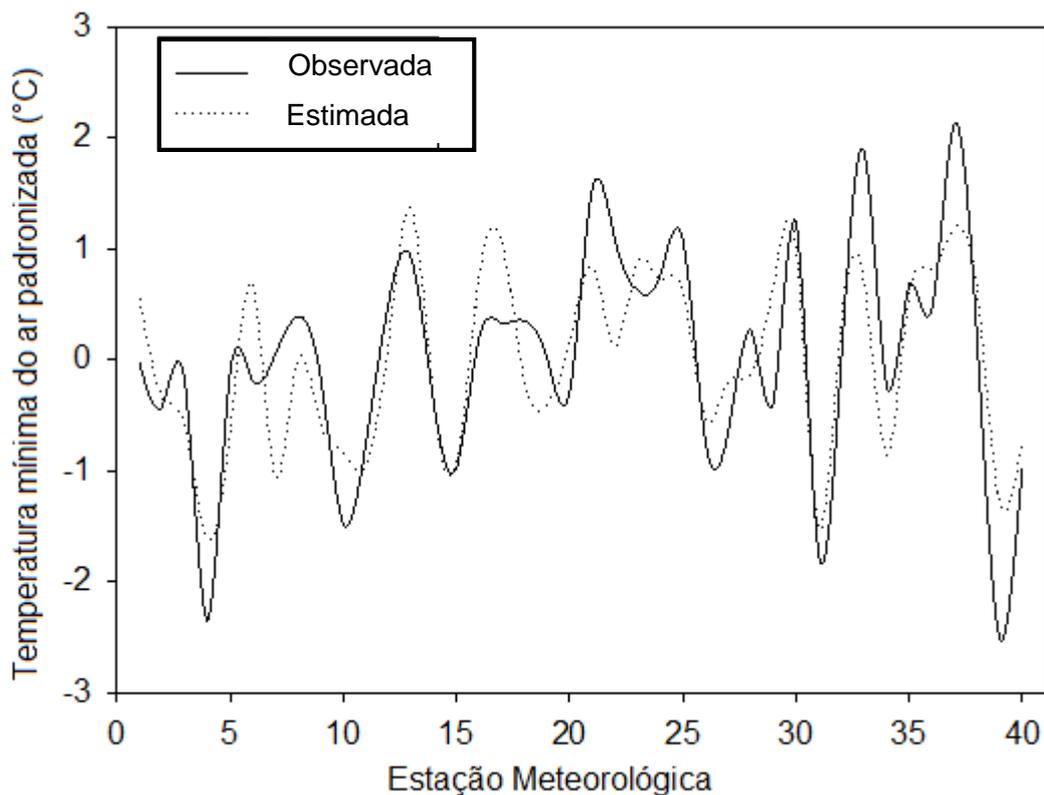


Figura 14. Média climatológica padronizada da temperatura mínima do ar [°C] observada e estimada para os meses de junho e julho sobre o Rio Grande do Sul.

Apesar das estações não estarem ligadas entre si, e assim não representarem uma variável contínua, o gráfico de linhas foi o que melhor representou os resultados obtidos. Na Figura 14 se observa que o comportamento da temperatura mínima estimada é muito semelhante ao da observada não sendo possível identificar qualquer padrão que justifique a superestimativa ou subestimativa da $T_{mín}$ estimada.

Aplicando a proporcionalidade aos pesos das variáveis geográficas, obtidos do modelo linear de regressão múltipla, obteve-se a equação 14 para o risco geográfico:

$$R_{Geo} = (0,353 * R_{Lat}) + (0,593 * R_{Alt}) + (0,054 * R_{Con}) \quad \text{eq. 14}$$

Onde: R_{Geo} – Risco geográfico de geada;

R_{Lat} – Risco de geada da latitude;

R_{Alt} – Risco de geada da altitude;

R_{Con} – Risco de geada da continentalidade.

Constata-se que as variáveis latitude e altitude são as que maior contribuição dão ao risco de formação de geada no Rio Grande do Sul. Mais de 59% do risco

geográfico de geada pode ser explicado pelo risco decorrente da altitude e o risco devido a latitude responde por mais de 35%. Assim, pode se esperar que o risco geral de geada (RGG) esteja de acordo, principalmente, com as variações altimétricas do Rio Grande do Sul.

A pouca contribuição do risco de geada devido à continentalidade, apenas 5%, deve ser mascarado pela componente altitude no contexto deste modelo. O ambiente costeiro deve apresentar-se mais protegido de geada nos resultados aqui encontrados, principalmente pelo efeito das baixas altitudes do que pela pequena distância da costa. É sabido da literatura que as áreas costeiras são menos susceptíveis a ocorrência de geada por causa do efeito termorregulador dos grandes corpos hídricos e o maior percentual de umidade atmosférica (AYOADE, 1996; VIANELLO & ALVES, 2002; AGUIAR & MENDONÇA, 2004; MENDONÇA & DANNI-OLIVEIRA, 2007; TORRES & MACHADO, 2011), porém estes elementos não foram considerados no modelo estudado.

O risco de geada devido somente a variável meteorológica temperatura mínima, descrito pela reta da equação 10, com probabilidade distribuída no intervalo entre 0 e 6 °C retornou como resultado a equação 15:

$$RT_{mín} = (-0,1667 * T_{mín}) + 1 \quad \text{eq. 15}$$

Onde: $RT_{mín}$ – Risco de geada da temperatura mínima;
 $T_{mín}$ – Temperatura mínima [°C].

Por fim, obteve-se a o modelo do risco geral de geada (RGG) na equação 16, onde são apresentados os respectivos pesos correspondentes ao risco geográfico de geada e o risco de geada da temperatura mínima.

$$RGG = 0,5 * RGeo + 0,5 * RT_{mín} \quad \text{eq. 16}$$

Onde: RGG – Risco geral de geada;
RGeo – Risco geográfico de geada;
 $RT_{mín}$ – Risco de geada da temperatura mínima.

Os riscos RGeo e RTmín retornaram melhor resultado de probabilidade do risco geral de geada quando seus pesos relativos foram iguais, correspondente a 0,5. Outros pesos foram testados se observado incoerência na probabilidade de ocorrência de geada em diferentes partes do Rio Grande do Sul, observando-se por vezes riscos idênticos em áreas com altitudes completamente distintas.

Portanto, a igualdade dos pesos pode ser explicada por um lado pela grande participação das variáveis geográficas na determinação da temperatura mínima, mas que por si só não são suficientes para a formação de geada. Por outro lado, a forte contribuição da temperatura mínima na ocorrência de geada em muitas situações, principalmente em condição sinótica de advecção de frio, sobrepõe os fatores geográficos formando geada em áreas pouco prováveis.

A análise dos mapas obtidos a partir do modelo do risco geral de geada (RGG) considerou a situação hipotética de que todo o Rio Grande do Sul tivesse uma mesma temperatura.

Na Figura 15 tem-se o mapa de RGG dada a previsão de temperatura mínima de 6°C, onde se constata probabilidade entre 10 e 20% nas áreas com altitude abaixo de 300 m. A quase totalidade do Planalto Meridional tem probabilidade entre 20 e 30%, se concentrando na região serrana valores entre 30 e 40%. Os Campos de Cima da Serra apresentam risco entre 40 e 50%.

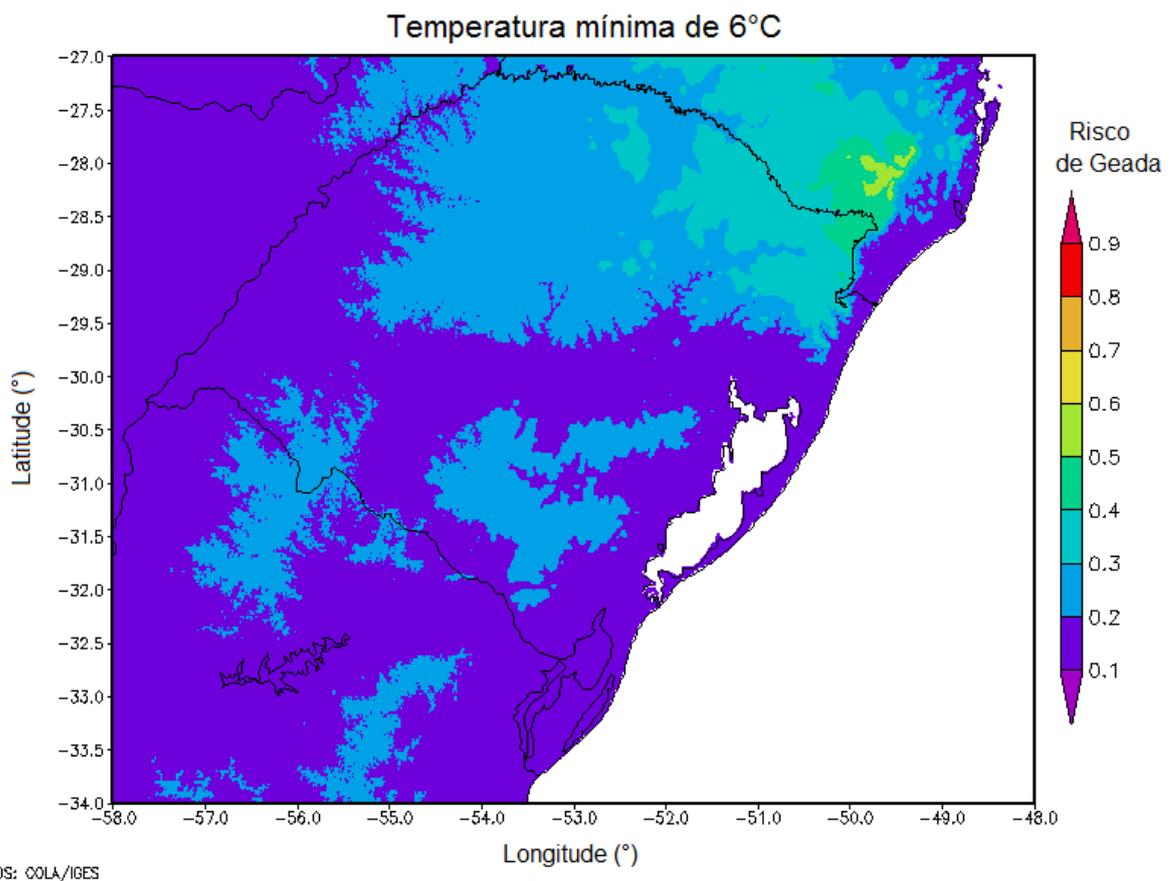


Figura 15 – Risco Geral de Geadas para temperatura mínima de 6°C. A escala de cores corresponde a probabilidade de ocorrência de geadas variando entre 0 e 1.

Diminuindo a temperatura para 5°C (Figura 16) o risco fica acima dos 20% em todo o Estado. As maiores probabilidades permanecem sobre os Campos de Cima da Serra, com valores entre 40 e 50%, tendo as cidades de maior altitude risco real de ocorrência de geadas com probabilidade entre 50 e 60%.

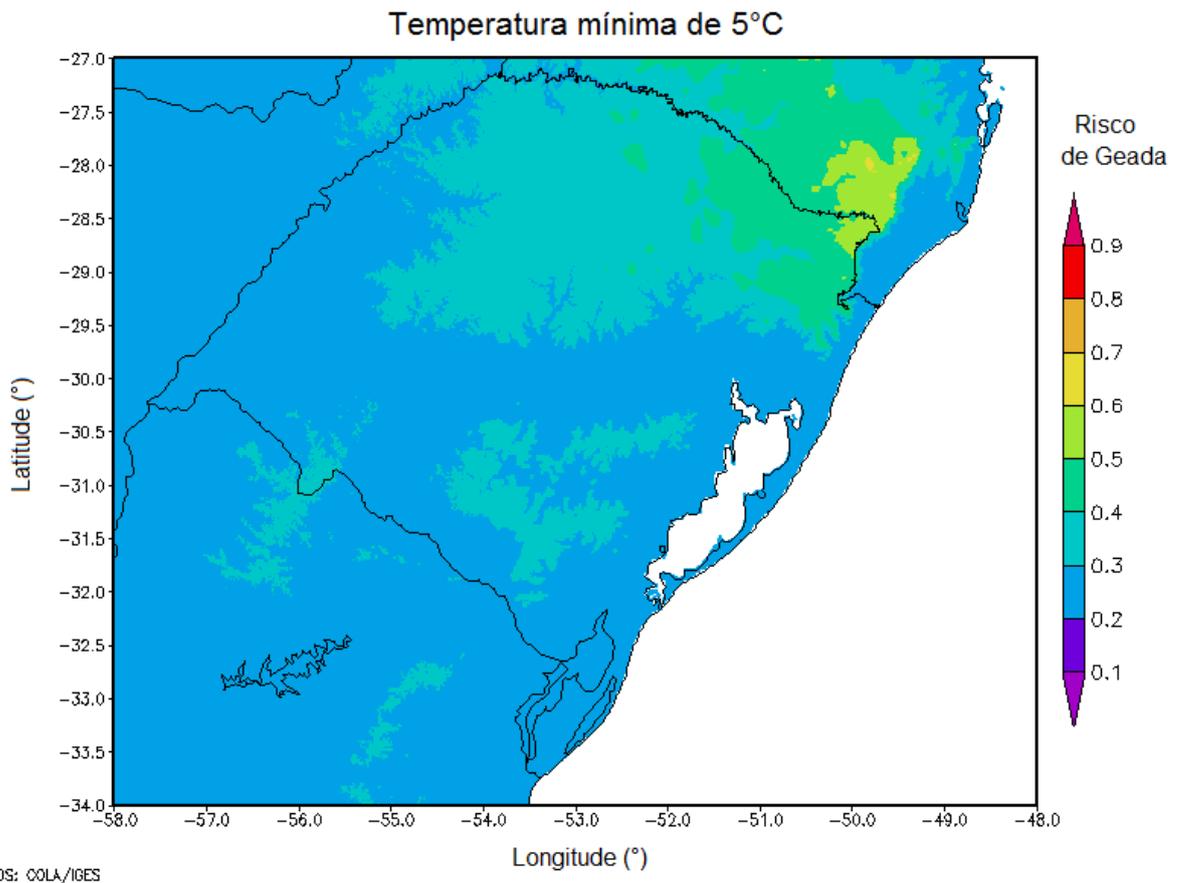


Figura 16 – Risco Geral de Geada para temperatura mínima de 5°C. A escala de cores corresponde a probabilidade de ocorrência de geada variando entre 0 e 1.

Na Figura 17, com temperatura de 4°C, nos Campos de Cima da Serra o risco de geada chega a valores entre 50 e 70%, enquanto o restante do Planalto Meridional tem probabilidade entre 40 e 50%. Com esta temperatura nas áreas com altitude inferiores a 400 m o incremento do risco da temperatura mínima se sobrepõe ao risco do geográfico, cujos valores ficam entre 40 e 30%.

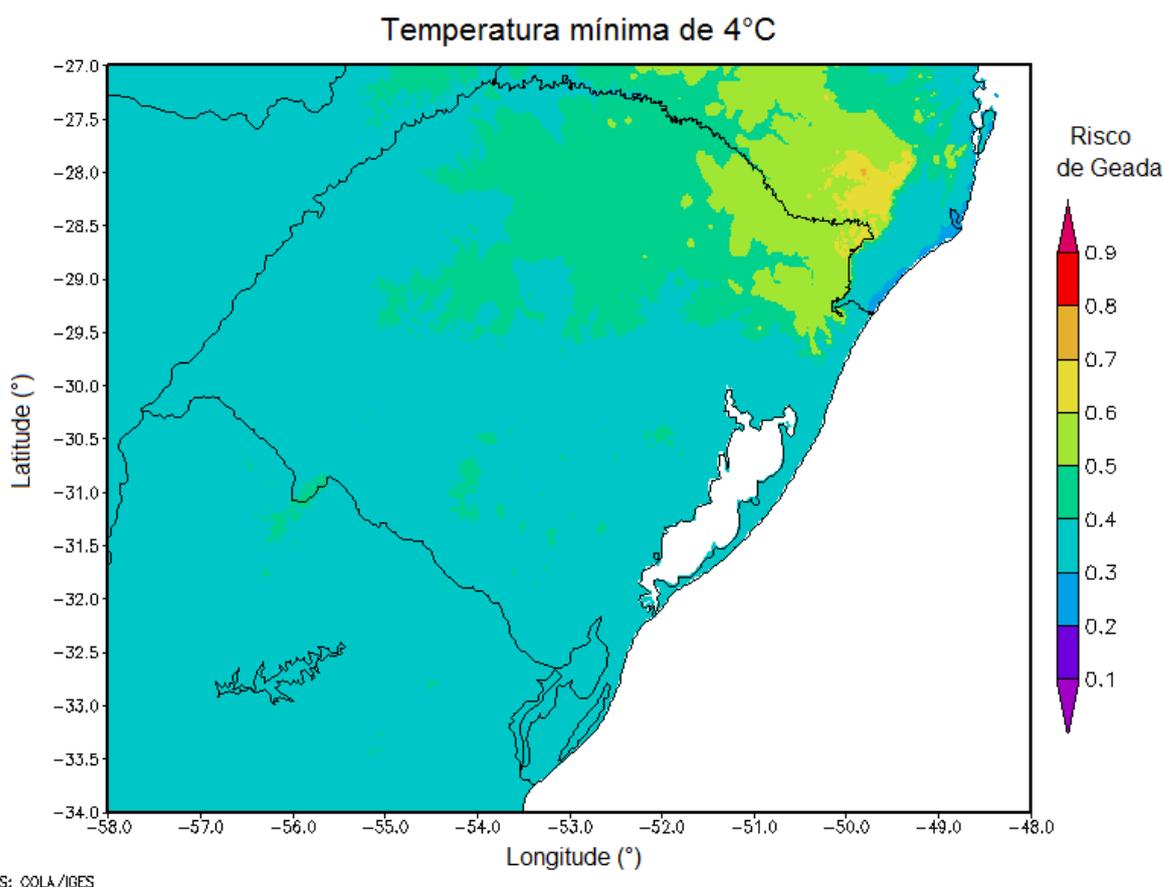


Figura 17 – Risco Geral de Geadas para temperatura mínima de 4°C. A escala de cores corresponde a probabilidade de ocorrência de geadas variando entre 0 e 1.

Na temperatura de 3°C (Figura 18), a probabilidade de ocorrência de geadas fica entre 60 e 70% nos Campos de Cima da Serra, entre 50 e 60 % no Planalto Meridional e entre 40 e 50% na maior parte do restante do Rio Grande do Sul. Na faixa litorânea e no entorno da Laguna dos Patos se observa probabilidades entre 30 e 40%. No extremo sul do Estado se constata risco de geadas entre 40 e 50% superior ao risco observado no litoral, provavelmente evidenciando o efeito das maiores latitudes.

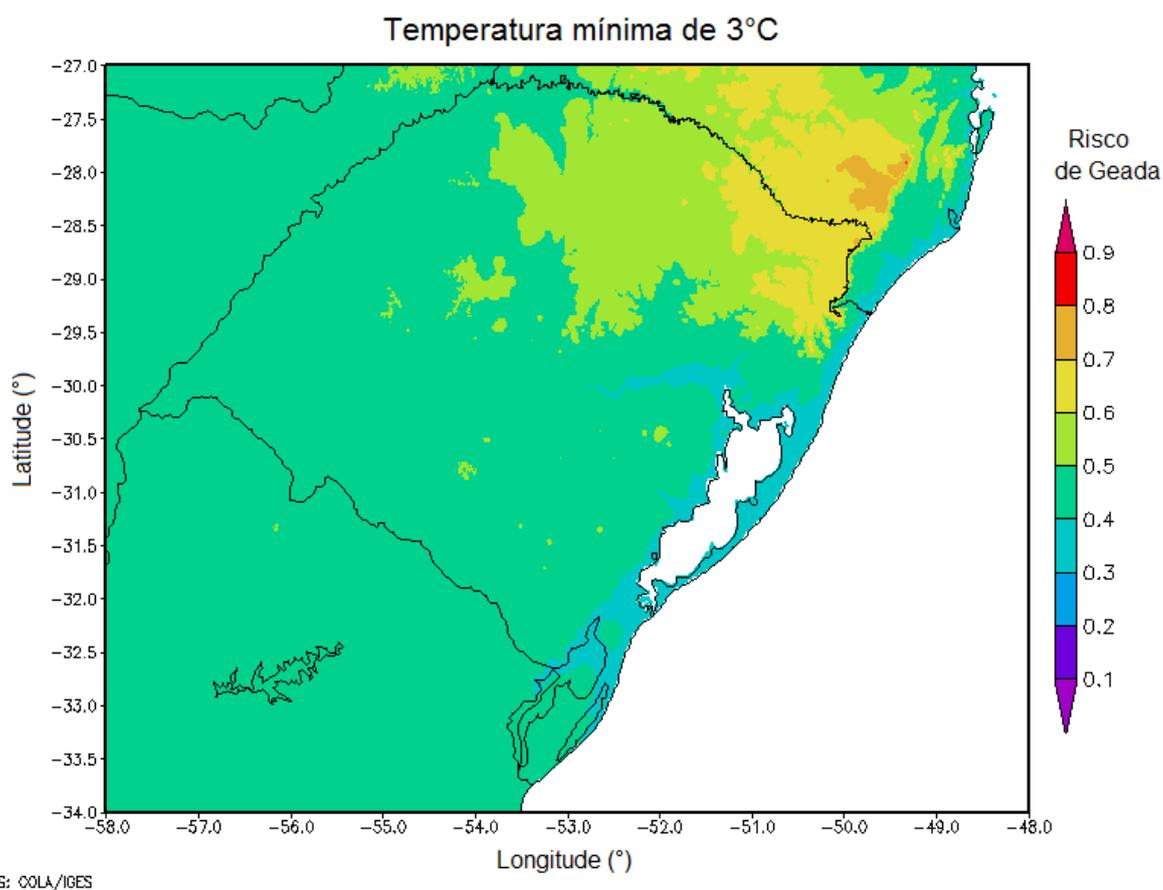


Figura 18 – Risco Geral de Geadas para temperatura mínima de 3°C. A escala de cores corresponde a probabilidade de ocorrência de geadas variando entre 0 e 1.

Na Figura 19, dada a temperatura de 2°C, o risco de geadas fica entre 70 e 80% nos Campos de Cima da Serra. Na metade leste do Planalto Meridional o risco fica acima de 60%. No restante do Estado as probabilidades variam entre 50 e 60%, porém a Planície Costeira continua mais protegida contra geadas com risco entre 40 e 50% provavelmente pelo efeito do risco das altitudes menores que 90 m.

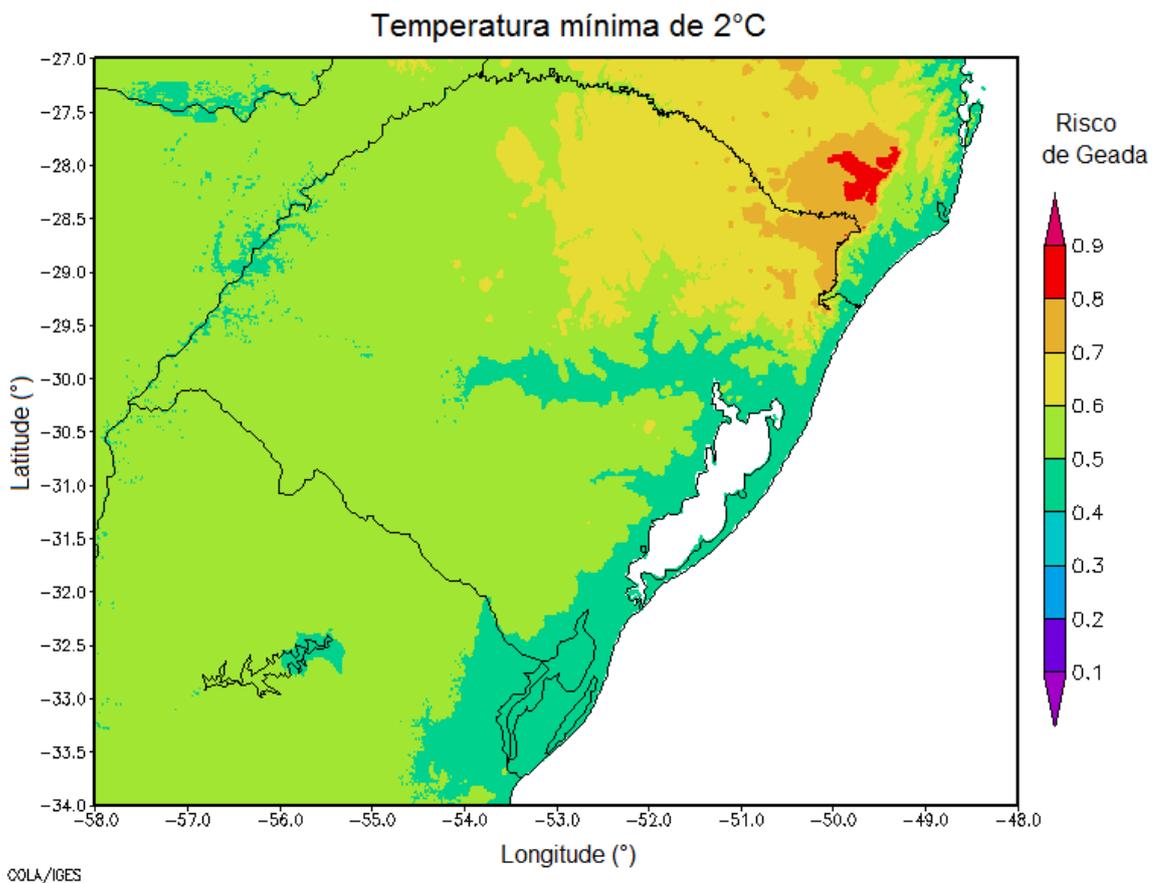


Figura 19 – Risco Geral de Geadas para temperatura mínima de 2°C. A escala de cores corresponde a probabilidade de ocorrência de geadas variando entre 0 e 1.

Ao ser atingida a temperatura de 1°C, como mostra a Figura 20, o risco de geadas fica acima de 60% em todo o Rio Grande do Sul, passando dos 90% nas localidades de maior altitude dos Campos de Cima da Serra. Nesta situação é marcante o efeito geográfico.

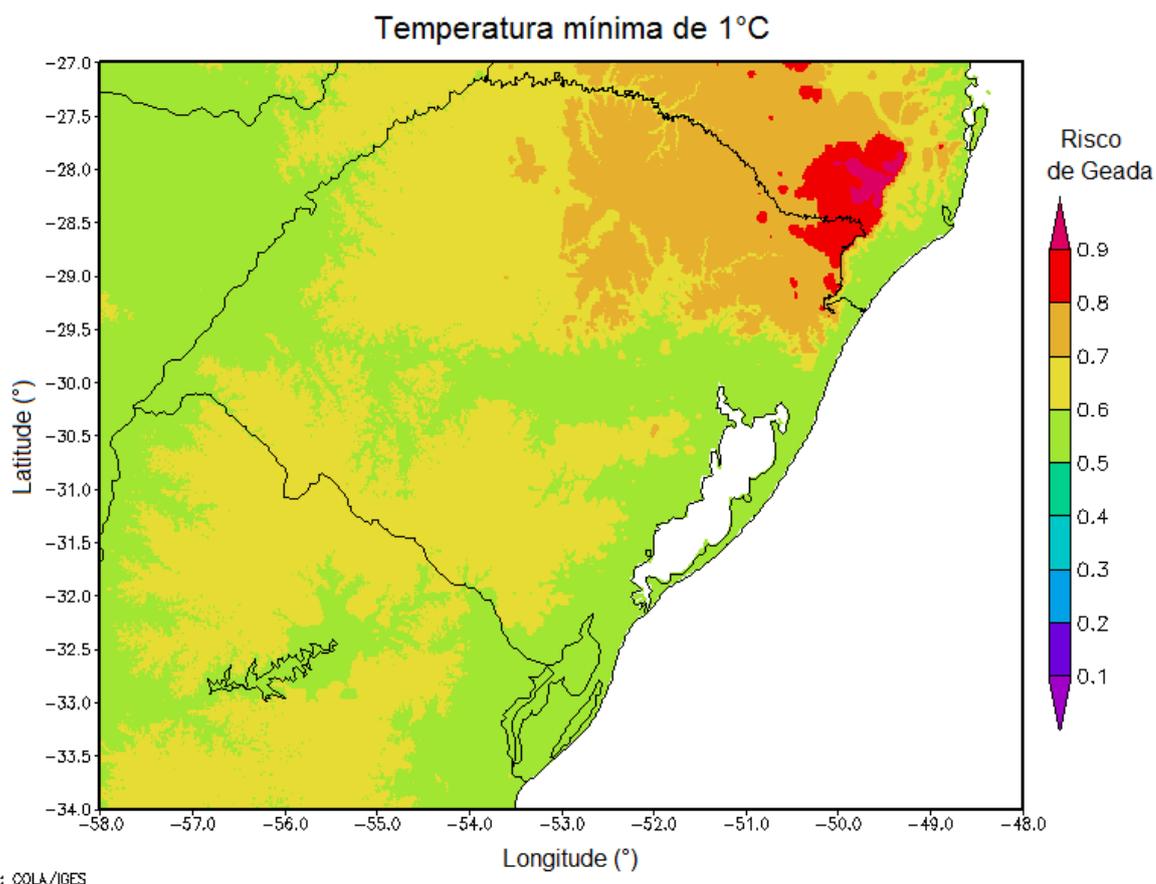


Figura 20 – Risco Geral de Geada para temperatura mínima de 1°C. A escala de cores corresponde a probabilidade de ocorrência de geada variando entre 0 e 1.

Na Figura 21 se observa o risco geral de geada (RGG) quando a temperatura atinge 0°C. Nesta condição o risco da temperatura mínima é máximo, ou seja, avaliando apenas esta variável com certeza ocorreria geada. Mas este risco é amenizado pela componente geográfica, estando um pouco mais protegidas as áreas de menor altitude e mais próximas da costa do Oceano Atlântico.

De fato se observa que o extremo oeste, a faixa central e Planície Costeira apresentam risco entre 60 e 70%. As localidades com altitude superiores aos 300 m passam a ter valores de risco superiores a 70%, se observando valores maiores que 80% nos Campos de Cima da Serra e de mais 90% nas localidades com altitude acima de 1.000 m.

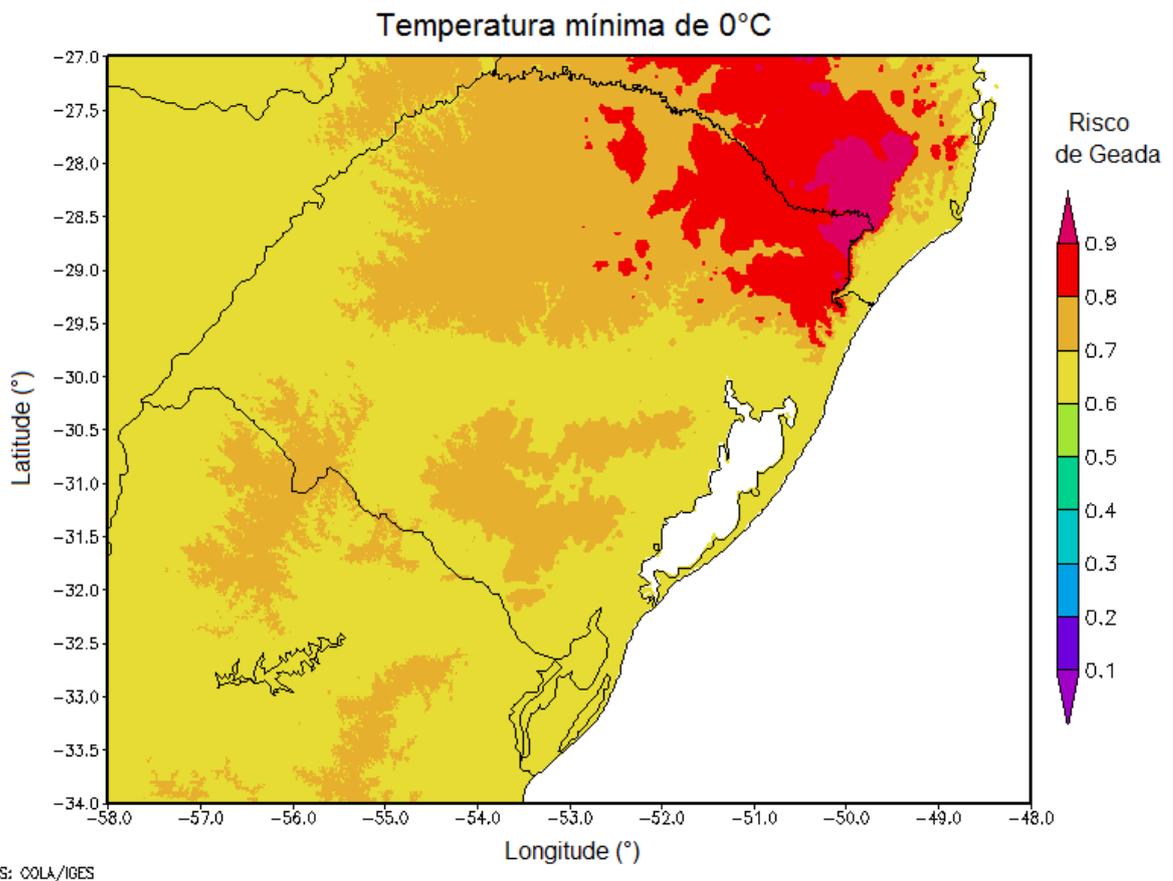


Figura 21 - Risco Geral de Geada para temperatura mínima de 0°C. A escala de cores corresponde a probabilidade de ocorrência de geada variando entre 0 e 1

A forte contribuição da variável altitude sobre o risco geográfico de geada (RGeo) fica evidente nos mapas apresentados, lembrando que estas são situações hipotéticas, pois em condição real não se observaria a mesma temperatura nos diferentes recantos do Rio Grande do Sul.

A área de modelagem, apresentada nos mapas anteriores, não possui características que permita se observar o risco nulo (0) ou risco máximo (100%). Isto é justificado pelas condicionantes do risco isolado das variáveis geográficas. O RGG máximo seria atingido quando os riscos isolados (RLat, RAlt, RCont e RTmín) fossem máximos também, ou seja, se houvesse um local na latitude de -40°, com altitude superior a 1200 m, distante 8° da costa do Rio Grande do Sul e sob temperatura de 0°C ou menos.

O modelo desenvolvido nesta tese é útil apenas para o Rio Grande do Sul, uma vez que as condicionantes do risco isolado de geada de cada variável e o peso destas foram estabelecidas com dados observados neste Estado.

A principal vantagem observada para o uso do RGG é a facilidade da obtenção dos dados necessários para a modelagem do risco de geada. As informações de latitude, longitude e altitude são facilmente obtidas, bem como a temperatura mínima. Sendo a $T_{mín}$ a variável meteorológica de maior precisão em termos de previsão, o usuário pode vislumbrar com antecedência a probabilidade de ocorrer geada em sua localidade, e assim, tomar as providências necessárias para minimizar possíveis prejuízos.

4.2 Teste do modelo do risco geral de geada (RGG)

4.2.1 Dados observados em superfície

O teste do RGG frente aos dados das estações meteorológicas de superfície do 8° DISME/ INMET, localizadas nas cidades de Encruzilhada do Sul, Rio Grande e Santa Vitória do Palmar, é apresentada na Figura 22. A Figura frequência relativa da temperatura mínima do ar com valor abaixo de 3°C, calculada a partir dos dados coletados diariamente entre 1961 e 2012, mostram a possibilidade de ocorrência de geadas precoces (maio) e tardias (setembro) nas três cidades analisadas. Encruzilhada do Sul e Santa Vitória do Palmar com ocorrências de geada até mesmo em outubro.

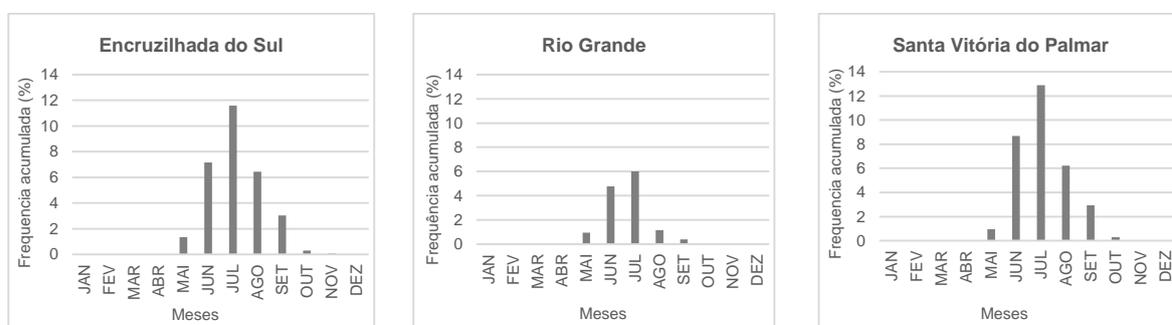


Figura 22. Frequência relativa da temperatura mínima do ar inferiores a 3°C. Observação diária nas localidades de Encruzilhada do Sul, Rio Grande e Santa Vitória do Palmar, no período entre 1961 e 2012.

Ao se observar a frequência relativa das temperaturas mínimas do ar inferiores a 0°C, Figura 23, valor geralmente atribuído à ocorrência de geada, constata-se que o registro de tais temperaturas se concentra nos meses de junho, julho e agosto, com maior frequência no mês de julho, nas três localidades.

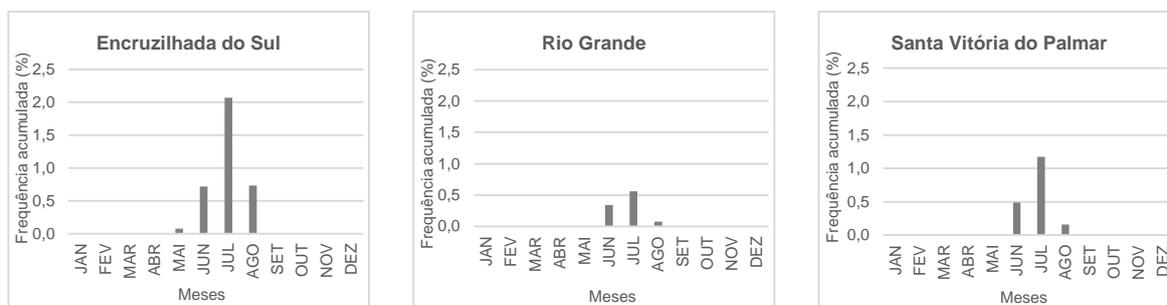


Figura 23. Frequência relativa da temperatura mínima do ar inferiores a 0°C. Observação diária nas localidades de Encruzilhada do Sul, Rio Grande e Santa Vitória do Palmar, no período entre 1961 e 2012.

Com temperatura inferior a 0°C a condição é altamente favorável a formação de geada, mas isto não corresponde diretamente a ocorrência do evento. Outros fatores podem desfavorecer a formação da camada de gelo sobre as superfícies, que é o indicador visual para registro de geada em estações meteorológicas de superfície. Provavelmente a falta de ocorrência de geada na cidade de Rio Grande esteja associada à esta situação, a não formação de camada de gelo nas superfícies que permita a identificação visual. Portanto, na Tabela 4, há informações relacionadas à ocorrência de geada somente nas outras duas localidades.

Tabela 4. Registro de geadas e temperatura mínima do ar associada, em Encruzilhada do Sul e Santa Vitória do Palmar entre 2007 e 2015.

	Encruzilhada do Sul	Santa Vitória do Palmar
Geadas	86	99
Menor Tmín [°C]	-1,40	-0,70
Maior Tmín [°C]	6,80	5,90
Média [°C]	2,46	2,59
Desvio padrão [°C]	1,98	1,33

Em Encruzilhada do Sul foram registradas 86 geadas ao longo dos 9 anos disponibilizados. Neste período a menor temperatura mínima associada à geada foi de -1,4°C, a maior foi de 6,80°C, e o valor médio de todos os registros foi de 2,46°C.

Santa Vitória do Palmar teve 99 geadas registradas, com menor temperatura de $-0,70^{\circ}\text{C}$, maior de $5,90^{\circ}\text{C}$ e média de $2,59^{\circ}\text{C}$.

Apesar da maior quantidade de geadas registradas em Santa Vitória do Palmar a intensidade dos eventos registrados são predominantemente moderada, cerca de 51%, e outros 38% foram classificadas como fraca. Isto pode ser explicado por sua localização, que, segundo Pezza (2003), encontra-se exatamente numa área de menor acúmulo de trajetórias de anticiclones associados à eventos de geada.

O trabalho de Pezza (2003) mostrou grande quantidade de centros de anticiclones migratórios passando sobre a região de Encruzilhada do Sul. Isto pode justificar o maior percentual de geadas de forte intensidade (17%) registradas nesta localidade, mesmo com menor número total de registros de geadas do que Santa Vitória do Palmar.

Os valores de $6,80$ e $5,90^{\circ}\text{C}$ conferem risco de ocorrência de geada de 24,78 e 15,97% para Encruzilhada do Sul e Santa Vitória do Palmar, respectivamente. Os valores associados ao registro de geada nestas duas localidades evidência a participação de outros fatores, que não apenas os geográficos e a temperatura mínima, na formação de geada. A justificativa para possíveis distorções entre o risco obtido através do RGG e os eventos registrados nas estações meteorológicas pode estar no domínio dos processos dinâmicos em latitudes mais elevadas, conforme descreve Seluchi (2009).

Na Tabela 5 se observa os dados de temperatura mínima do ar no abrigo meteorológico associados às diferentes intensidades de geada, num período de avanço de uma massa polar, entre os dias 3 e 9 de julho de 2011. No último dia ocorreu geada fraca com o maior valor de temperatura mínima, associada à geada, registrado em Encruzilhada do Sul nos últimos 9 anos.

Tabela 5. Geadas ocorridas em Encruzilhada do Sul em julho de 2011 e temperaturas mínimas associadas.

Dia do mês	Temperatura mínima do ar [$^{\circ}\text{C}$]	Intensidade da geada	RGG
3	0,6	Forte	69,78%
4	-0,6	Forte	74,78%
5	1,4	Moderada	63,11%
6	2,8	Moderada	51,44%
7	2,8	Moderada	51,44%
8	5,1	Fraca	33,27%
9	6,8	Fraca	24,78%

Após a passagem de um sistema frontal a região sul do Brasil ficou sob a influência de uma forte massa de ar polar entre os dias 02 e 09 de julho de 2011. A advecção do ar frio ocorrida na noite do dia 02/07/2011 com o avanço do centro de alta pressão de 1036 hPa permitiu a formação de geada forte registrada na madrugada do dia 03 (Figura 24).

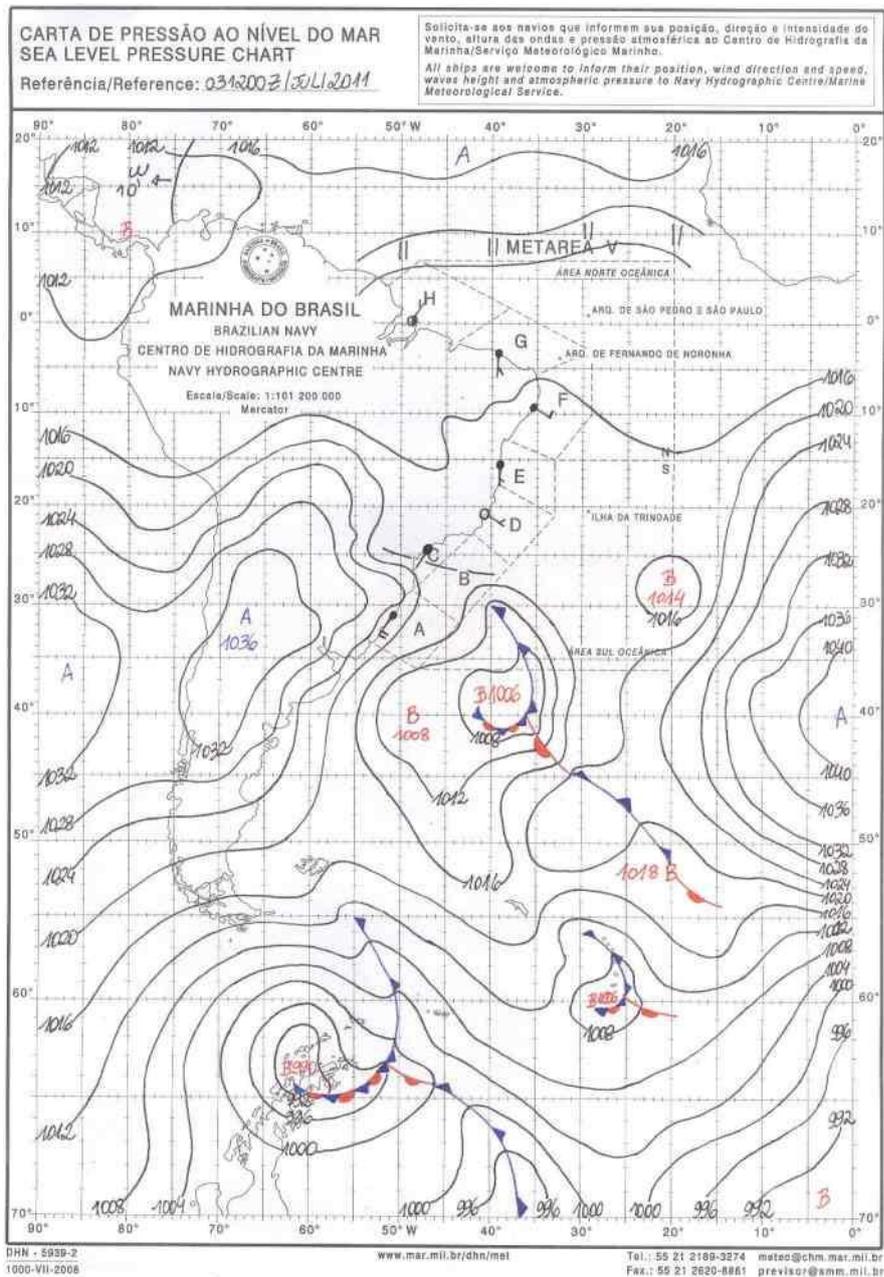


Figura 24. Carta sinótica das 12 UTC de 03/07/2011. Fonte: DHN/CHM da Marinha do Brasil.

A massa polar estagnada sobre o Rio Grande do Sul forneceu condições para sucessivos dias de perda de radiação noturna resultando em formação de geadas de radiação como pode ser acompanhado nas Figuras 25 a 30.

O aquecimento diurno no decorrer do dia 03/07 promove o enfraquecimento do anticiclone, cujo centro de 1028 hPa está localizado aproximadamente na latitude -30° e longitude -60°. Na Figura 25 observa-se o avanço do anticiclone pelo oeste do Rio Grande do Sul no dia 04/07.

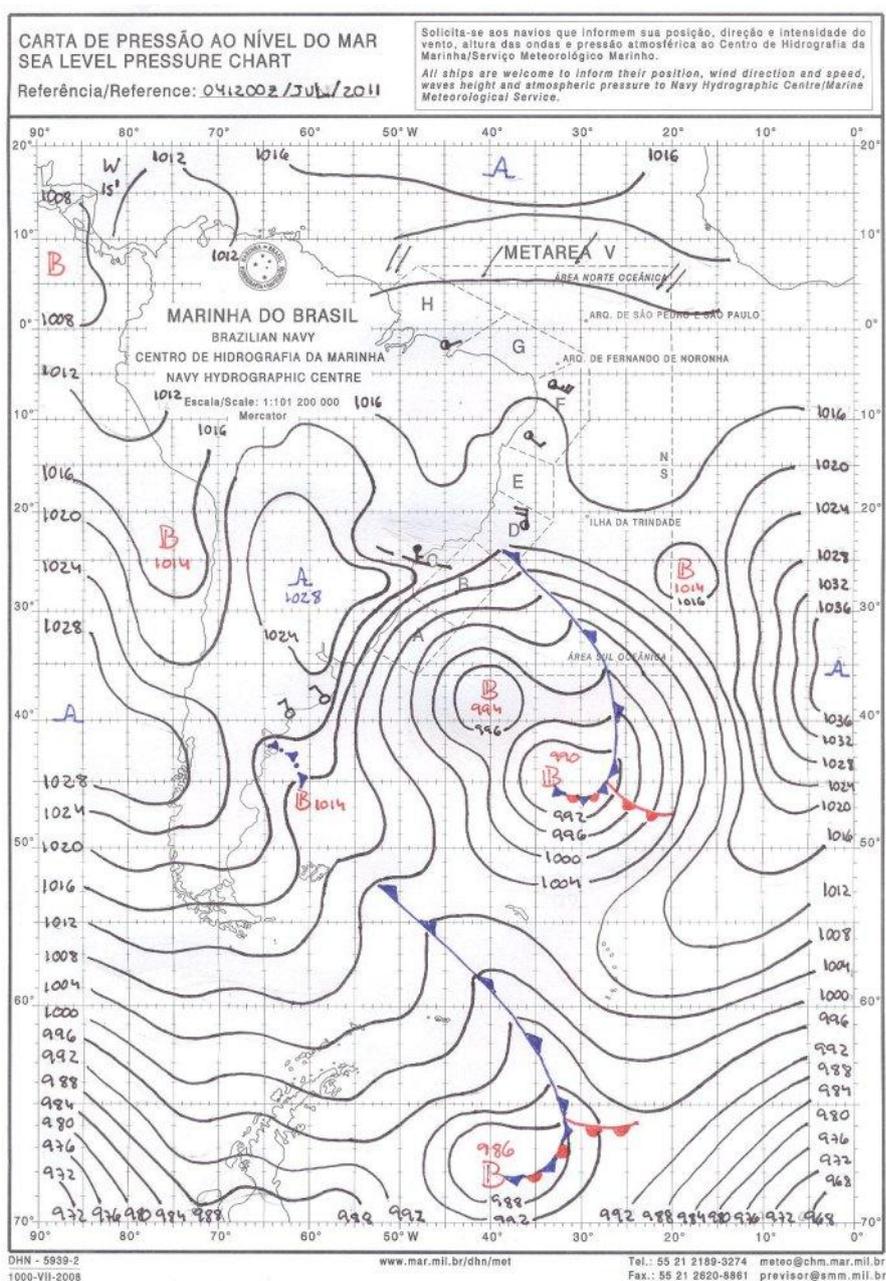


Figura 25. Carta sinótica das 12 UTC de 04/07/2011. Fonte: DHN/CHM da Marinha do Brasil.

Na Figura 26 é possível identificar a alta pressão de 1024 hPa dominando o Rio Grande do Sul e um novo anticiclone migratório, de pressão central de 1030 hPa, cruzando a Cordilheira dos Andes em torno da latitude de -35° . Este novo sistema reforça o aporte de frio sobre a região já dominada pelo primeiro anticiclone mantendo as condições favoráveis a formação de geada.

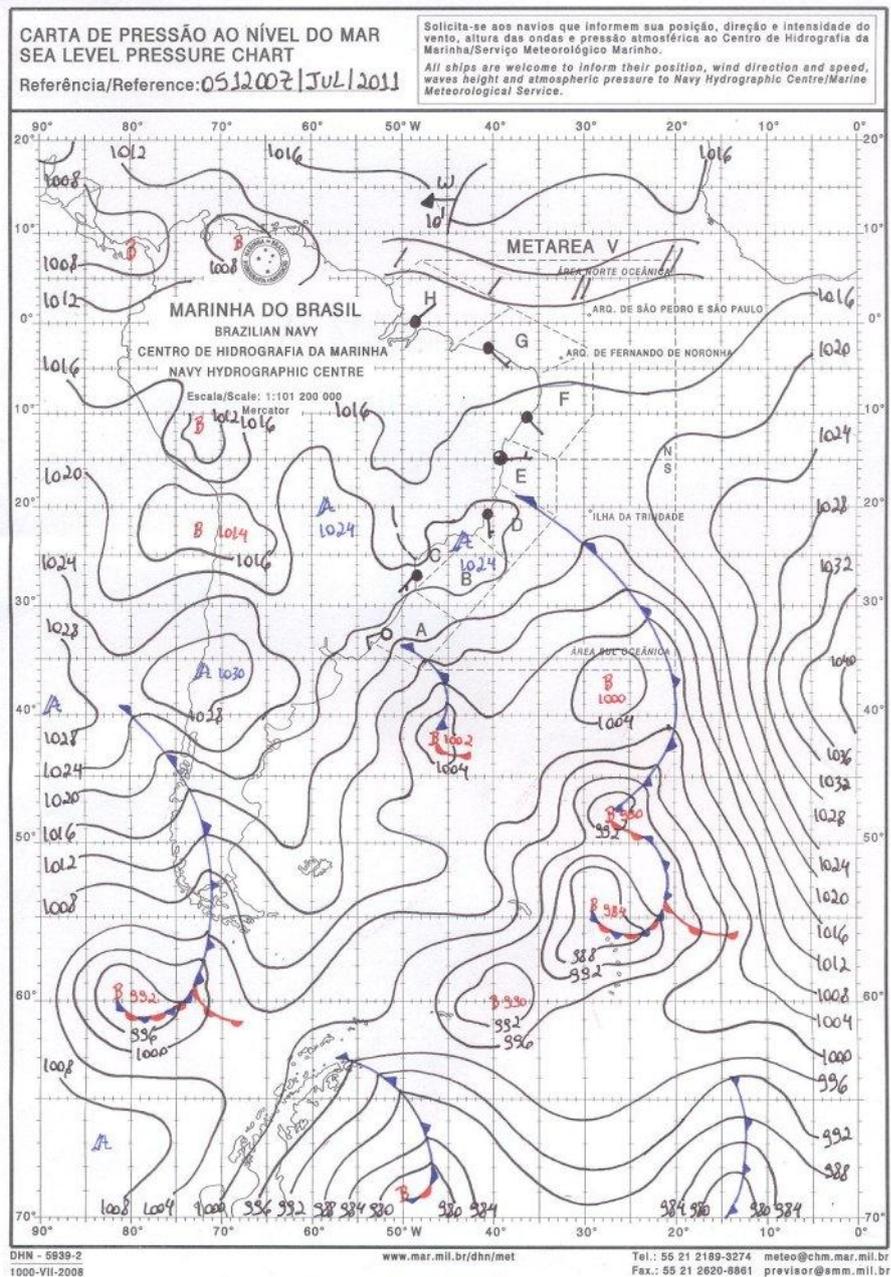


Figura 26. Carta sinótica das 12 UTC de 05/07/2011. Fonte: DHN/CHM da Marinha do Brasil.

A advecção de frio com a chegada do anticiclone na noite do dia 05/07 reforça a alta pressão sobre o Rio Grande do Sul, que na manhã do dia 06/07 tem valor central

de 1026 hPa localizada na metade norte do Estado, conforme Figura 27. Este valor persiste no dia 07/07 como verificado na Figura 28. A intensidade do anticiclone desvia os sistemas frontais para alto mar, impedindo que estes cheguem ao Rio Grande do Sul.

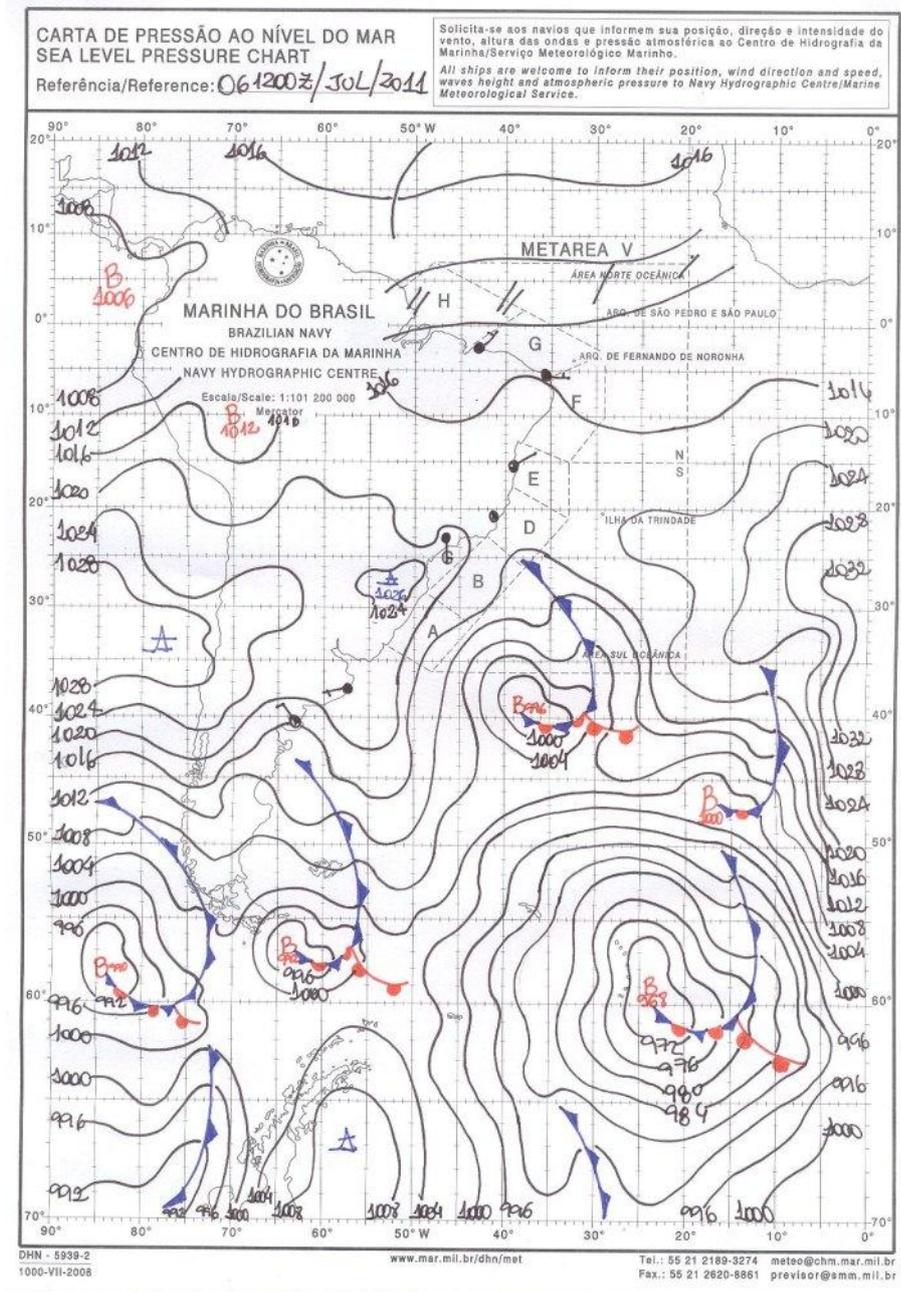


Figura 27. Carta sinótica das 12 UTC de 06/07/2011. Fonte: DHN/CHM da Marinha do Brasil.

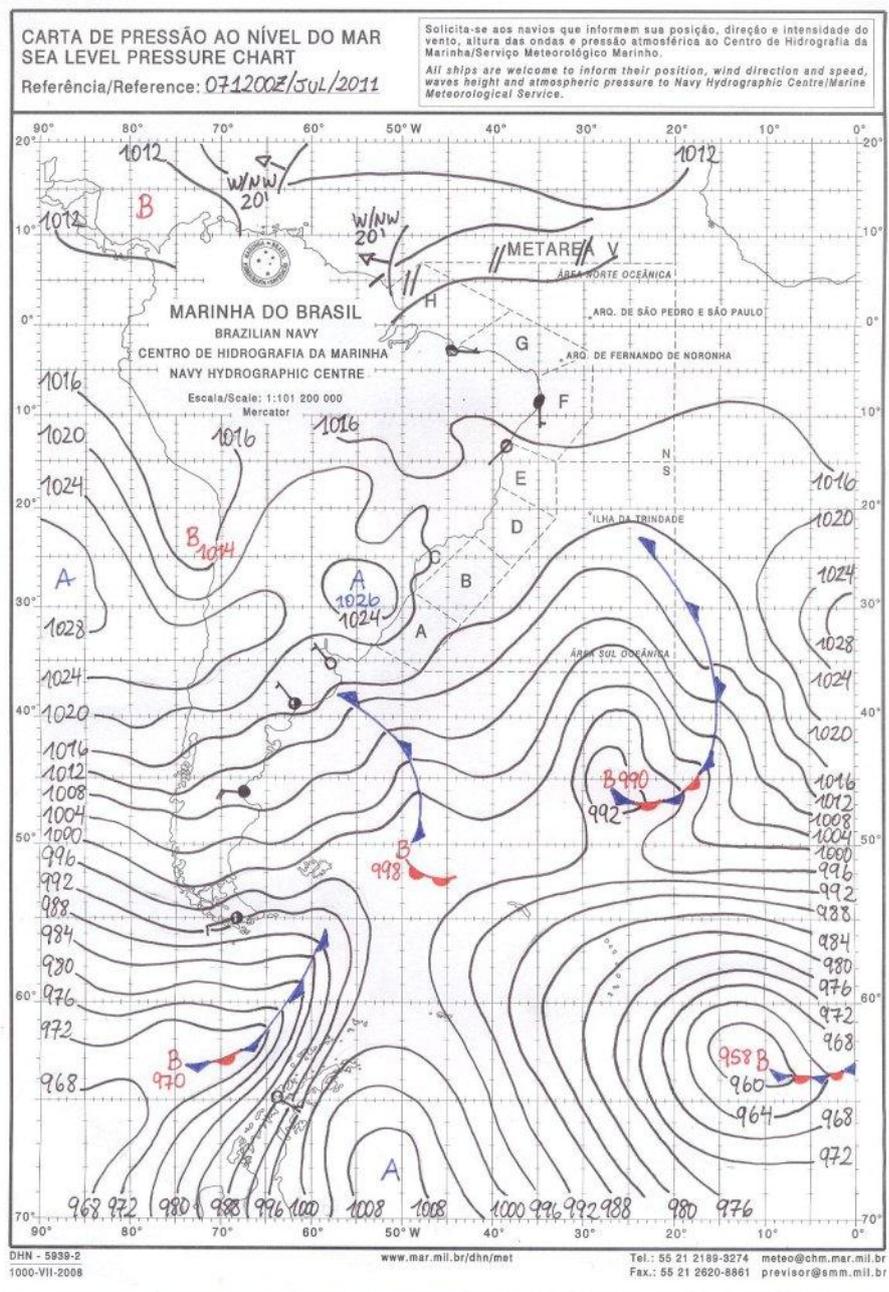


Figura 28. Carta sinótica das 12 UTC de 07/07/2011. Fonte: DHN/CHM da Marinha do Brasil.

Na Figura 29 da manhã do dia 08/07 observa-se que o escoamento, através da Cordilheira dos Andes, do ar frio do anticiclone do Pacífico começa a se deslocar para latitudes menores, ocorrendo preferencialmente na zona acima dos 30°S. Com o aumento das altitudes da Cordilheira o aporte de frio torna-se menos intenso sobre o Rio Grande do Sul e o anticiclone estacionado sobre o Estado perde força. Outra condição que contribui para o enfraquecimento do anticiclone estacionado é o intenso aquecimento diurno pela radiação solar e terrestre.

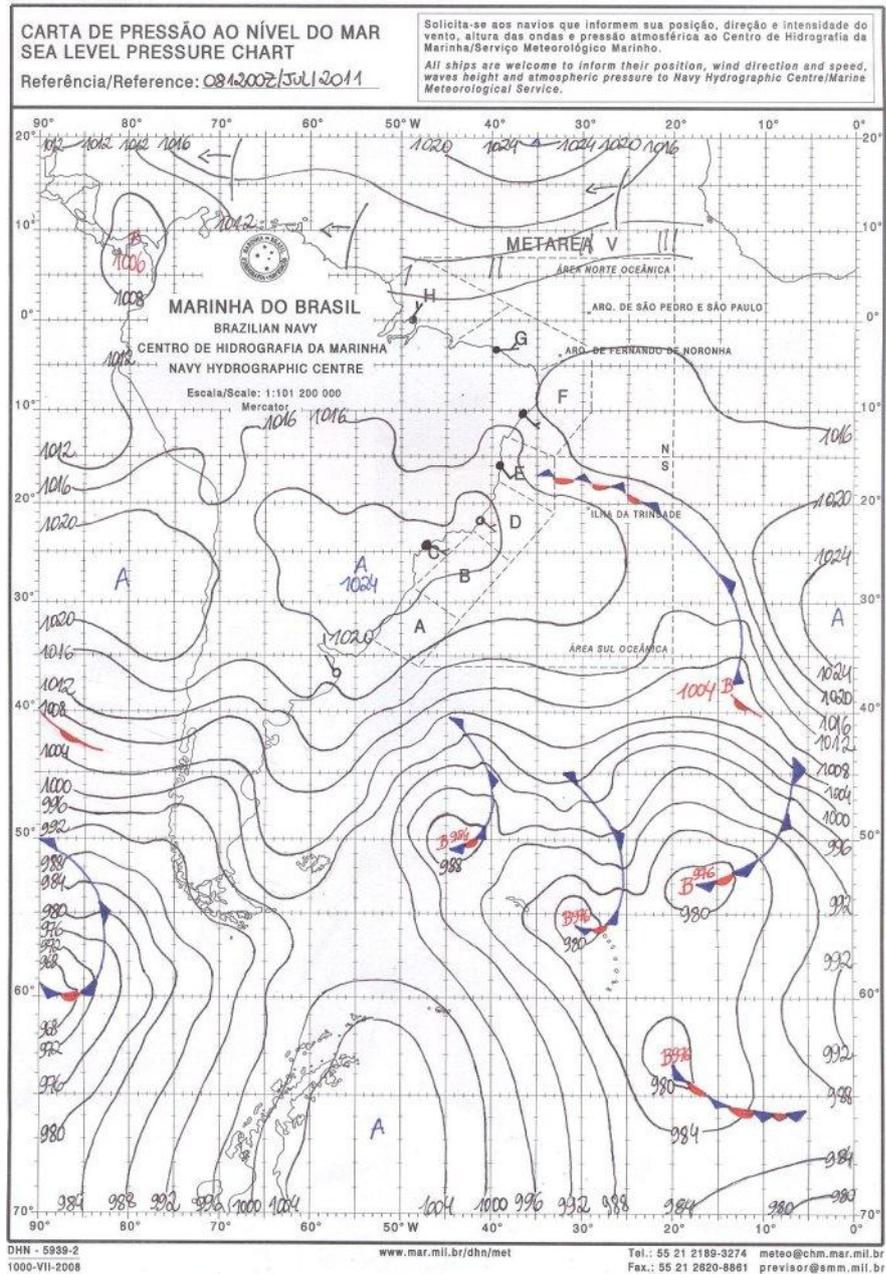


Figura 29. Carta sinótica das 12 UTC de 08/07/2011. Fonte: DHN/CHM da Marinha do Brasil.

Finalmente na manhã dia 09/07 o anticiclone migratório avança em direção ao Sudeste do Brasil e por sua longa permanência sobre o continente perdeu muitas de suas características frias, formando geada fraca apenas em pontos isolados de maior altitude como por exemplo a observada em Encruzilhada do Sul.

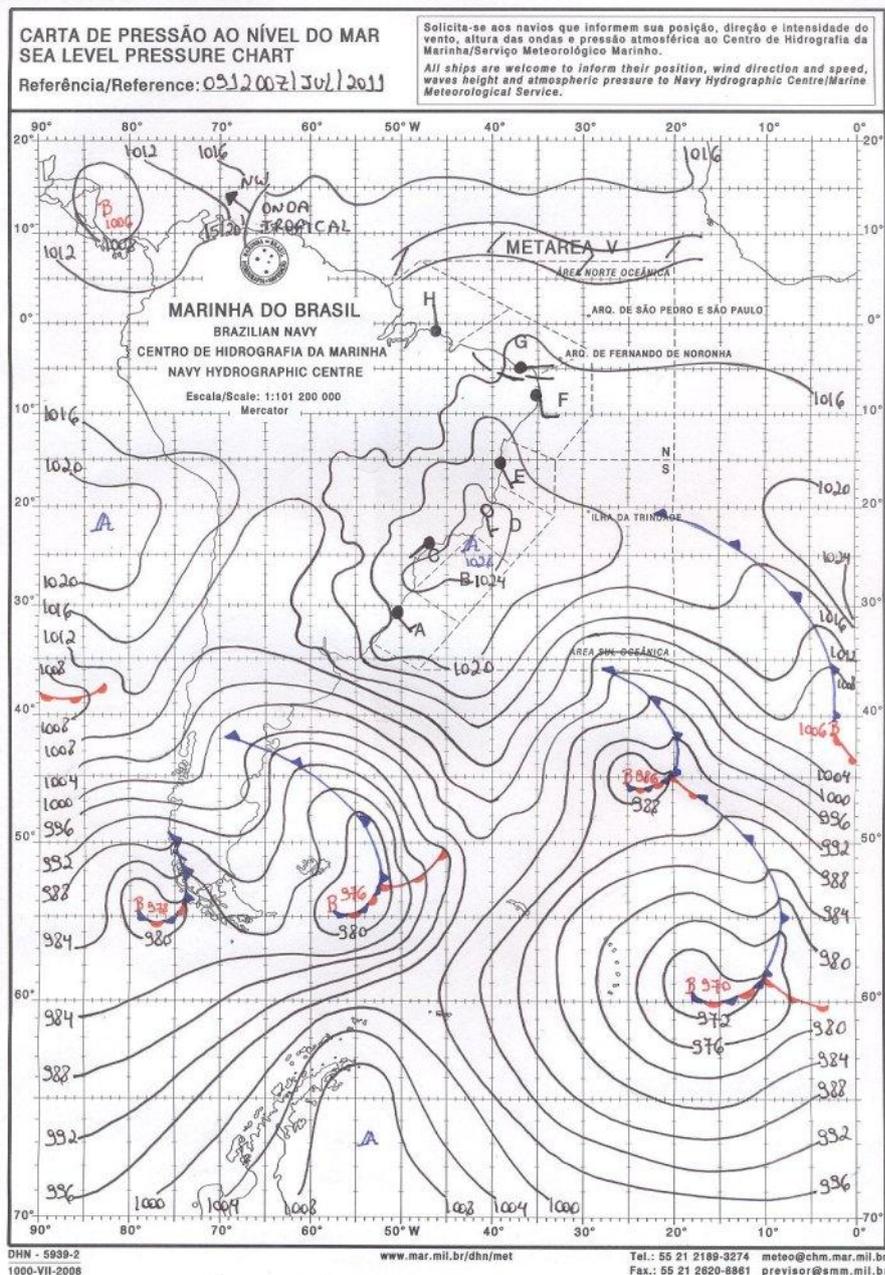


Figura 30. Carta sinótica das 12 UTC de 09/07/2011. Fonte: DHN/CHM da Marinha do Brasil.

Em Seluchi (2009) é mostrada a simulação de uma situação sinótica muito semelhante a estudada aqui. Quando o efeito advectivo já forneceu todo o aporte de frio possível o efeito radiativo prevalece com as noites de céu claro que se seguem. Entretanto, o aquecimento diurno se torna intenso sem a presença de nuvens no período, colaborando para o declínio do resfriamento, mesmo o noturno.

Imagens do satélite GOES-12 nos canais do infravermelho (11,2 e 10,2 μm) e do vapor d'água (7,3 e 6,7 μm), Anexo A, mostram a baixa umidade na média e alta atmosfera, sendo facilmente identificados rios e lagos (FERREIRA, 2006), situação

que favorece a emissão de radiação terrestre para a atmosfera durante as noites. Para melhor fluidez do texto a sequência de imagens do satélite GOES-12 do período observado estão disponíveis no Anexo A.

O ar bastante seco, favorável a intensa emissão de radiação terrestre noturna, estimulou a formação de geada por um longo período de dias que se encerrou com um evento de fraca intensidade no dia 09/07/2011 cuja temperatura mínima do ar registrou valor de 6,8°C.

O modelo do risco geral de geada (RGG) evidenciou o risco real de ocorrência de geada em Encruzilhada do Sul no período analisado na maior parte dos casos registrados. Os baixos valores do RGG nos dois últimos eventos são atribuídos aos maiores valores de Tmín. Entretanto, a formação de geada pode ser explicada pela baixa umidade do ar e poucas nuvens que favoreceu a perda radiativa da superfície terrestre.

Na Tabela 6 tem-se os dados de geada ocorridos em agosto de 2014 na cidade de Santa Vitória do Palmar, período que inclui o evento com a maior temperatura mínima do ar da série de 9 anos. Constata-se baixos valores do RGG diante do pequeno risco devido as variáveis geográficas, cujo RGeo para Santa Vitória do Palmar é de 30,30%, e ainda os elevados valores de temperatura mínima que confere ao RTmín valores de 35 e 1,65% para 3,9 e 5,9°C respectivamente.

Tabela 6. Geadas ocorridas em Santa Vitória do Palmar em agosto de 2014 e temperaturas mínimas associadas.

Dia do mês	Temperatura mínima do ar [°C]	Intensidade da geada	RGG
5	3,9	FRACA	32,64%
14	5,9	FRACA	15,97%

Através da interpretação de cartas sinóticas de superfície e imagens do satélite GOES-13, disponíveis no Anexo B para manter a fluidez do texto, é possível acompanhar a circulação atmosférica sobre o Rio Grande do Sul entre 04 e 14 de agosto de 2014.

Na noite do dia 04 de agosto o ar frio avança rapidamente pelo Estado atingindo a região da Campanha e o Sul gaúcho primeiramente, provocando geada fraca em Santa Vitória do Palmar na madrugada seguinte quando foi registrada a temperatura mínima de 3,9°C. As imagens de satélite no canal-3 do vapor d'água (Anexo B)

mostram a média e alta atmosfera bastante seca, condição favorável a perda noturna de radiação, mas que rapidamente se altera.

Na Figura 31 observa-se que o anticiclone migratório possui pressão central de 1030 hPa localizado aproximadamente na latitude de -32° e longitude de -50° . Cabe destacar o posicionamento do anticiclone do Pacífico, acima da latitude de -30° .

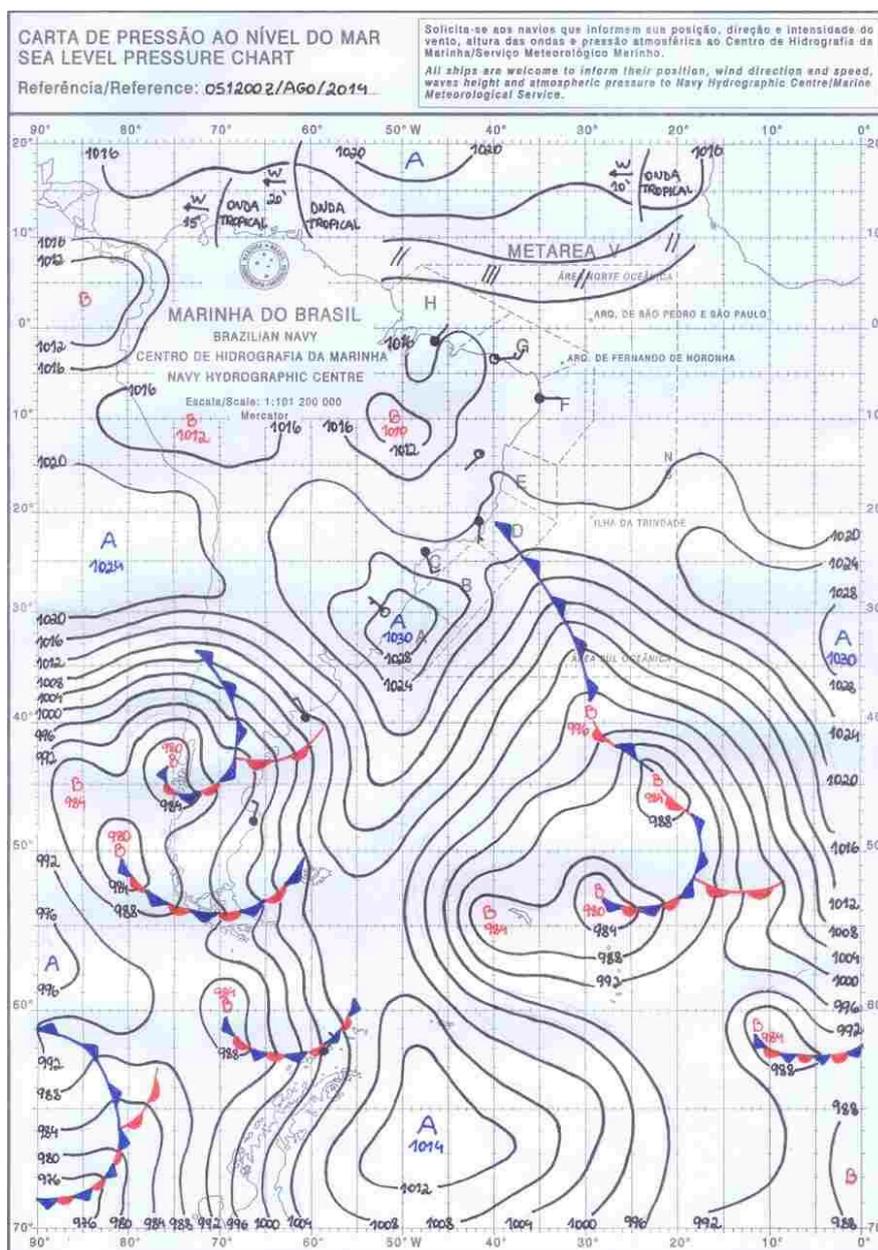


Figura 31. Carta sinótica das 12 UTC de 05/08/2014. Fonte: DHN/CHM da Marinha do Brasil.

Após a passagem do primeiro anticiclone migratório no dia 05/08 ocorreram dias com rápidas mudanças e avanço de diferentes sistemas atmosféricos como a

frente fria dia 07/08 (Figura 32) e o avanço de outro anticiclone no dia 08/08 com pressão central de 1032 hPa (Figura 33).

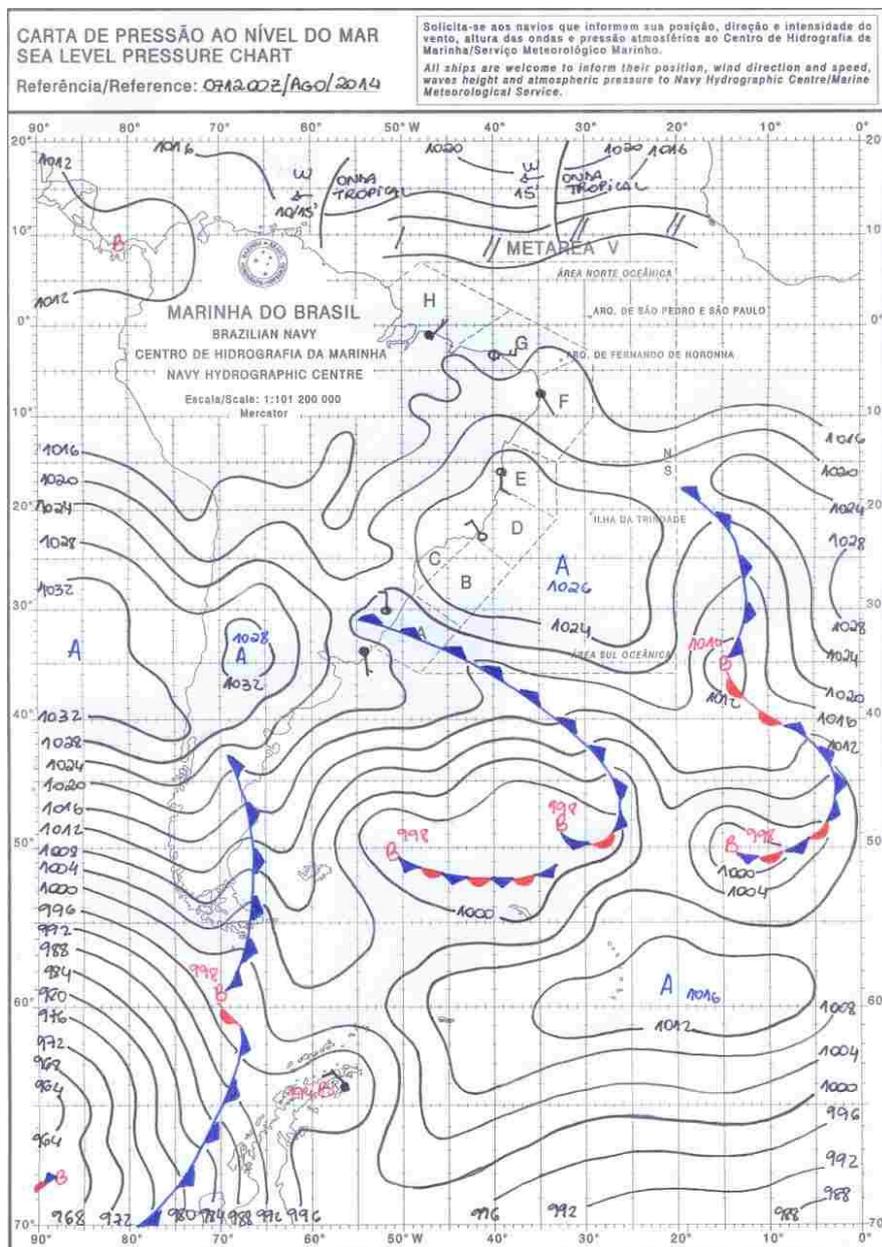


Figura 32. Carta sinótica das 12 UTC de 07/08/2014. Fonte: DHN/CHM da Marinha do Brasil.

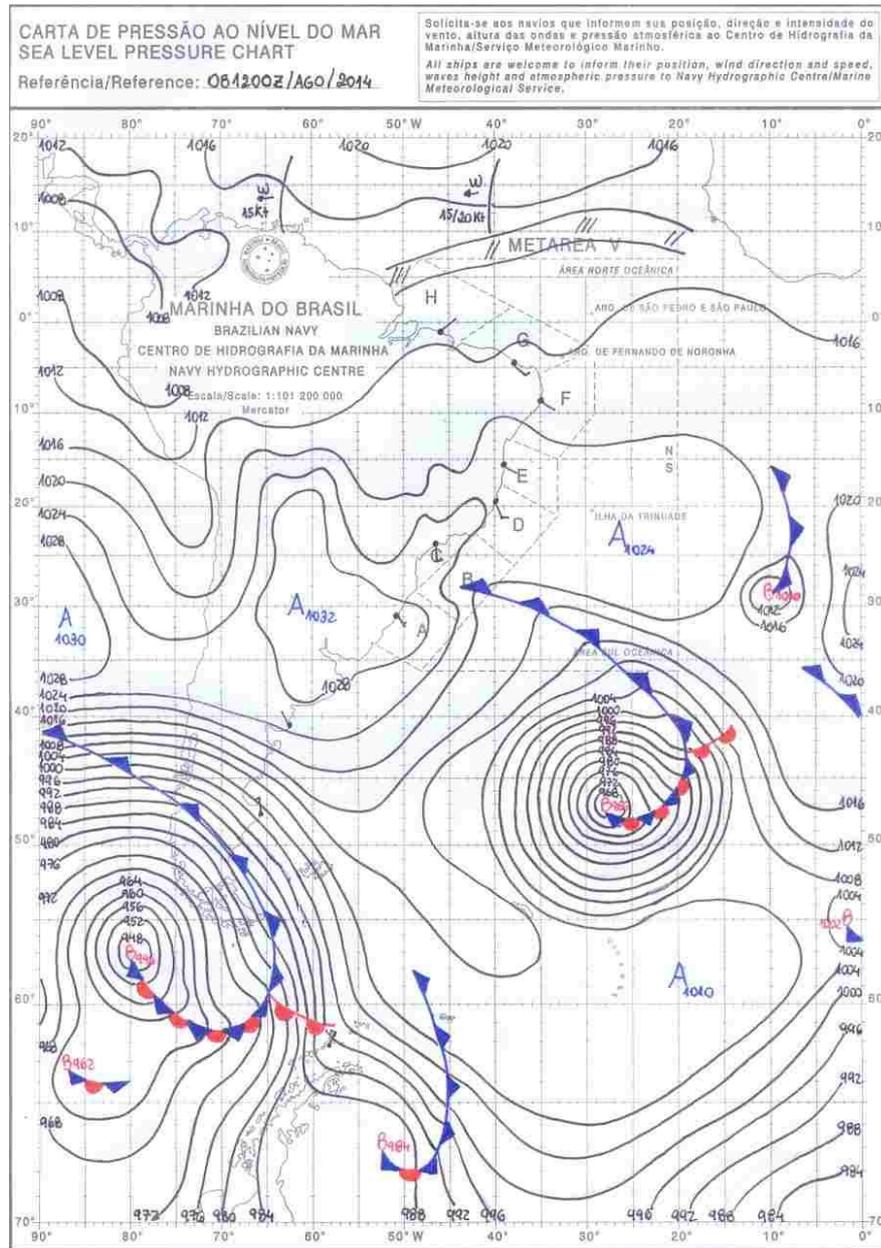


Figura 33. Carta sinótica das 12 UTC de 08/08/2014. Fonte: DHN/CHM da Marinha do Brasil.

Em alguns dias se observa a média atmosfera bem seca sobre Santa Vitória do Palmar, mas sem o registro de geadas, por exemplo na madrugada do dia 09/08, quando também se constata a influência do anticiclone de pressão central de 1026 hPa mostrado na Figura 34.

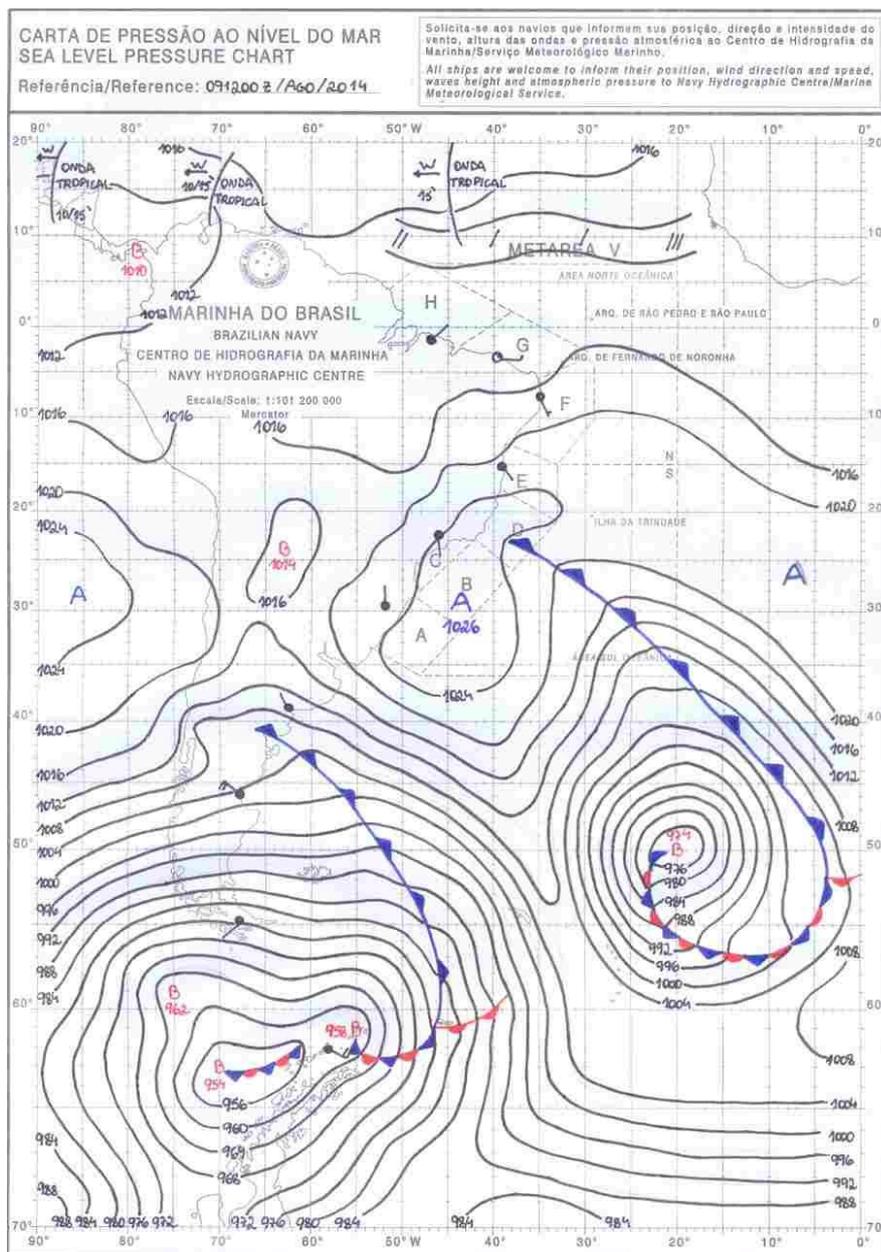


Figura 34. Carta sinótica das 12 UTC de 09/08/2014. Fonte: DHN/CHM da Marinha do Brasil.

Então no dia 13 de agosto a Cordilheira dos Andes evidencia seu efeito frontogenético na encosta leste, efeito este bem descrito em Seluchi (2009), favorecendo o confinamento de ar frio, que posteriormente avança sobre o Rio Grande do Sul (Figura 35). No dia 14 é registrada geada em Santa Vitória do Palmar com temperatura mínima de 5,9°C, onde se observa anticiclone com pressão central de 1030 hPa localizada sobre a latitude de -30° (Figura 36).

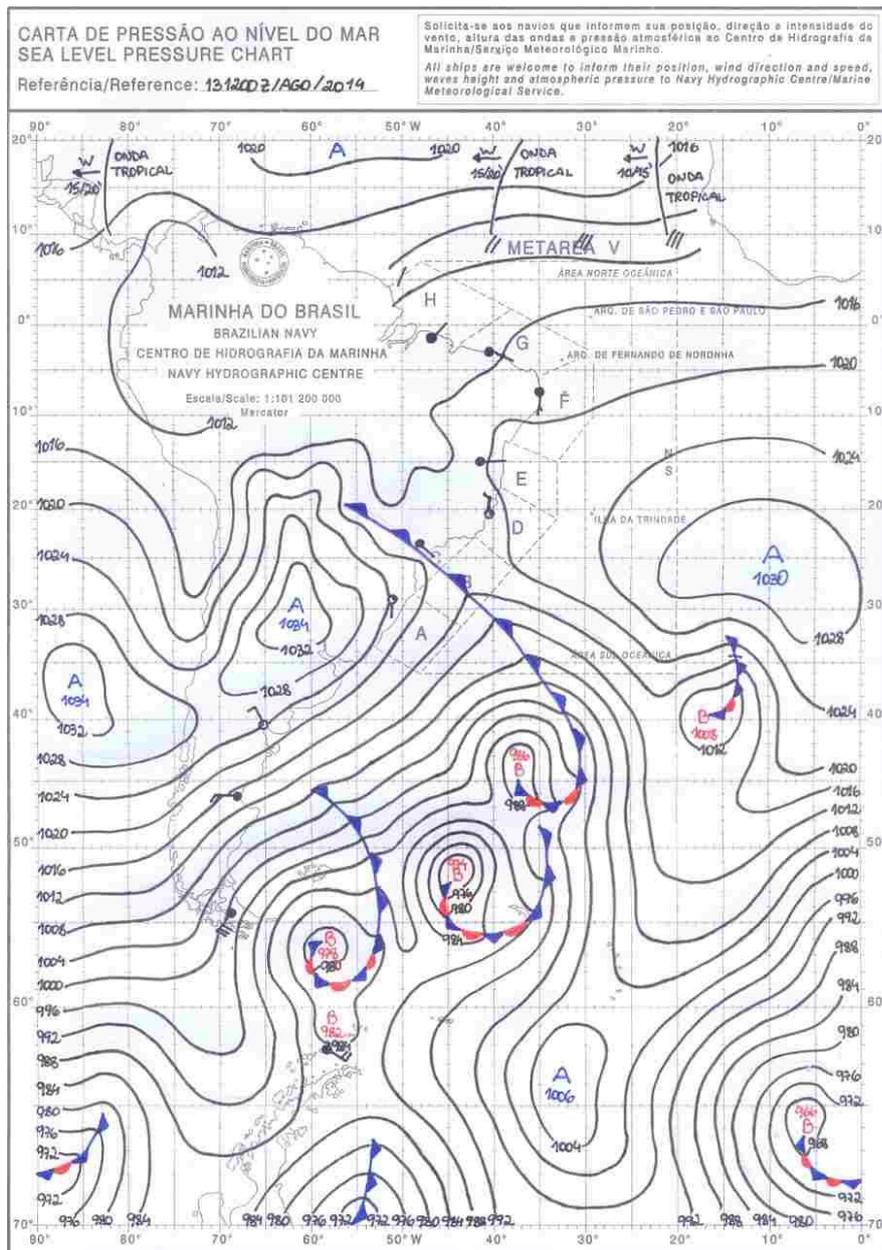


Figura 35. Carta sinótica das 12 UTC de 13/08/2014. Fonte: DHN/CHM da Marinha do Brasil.

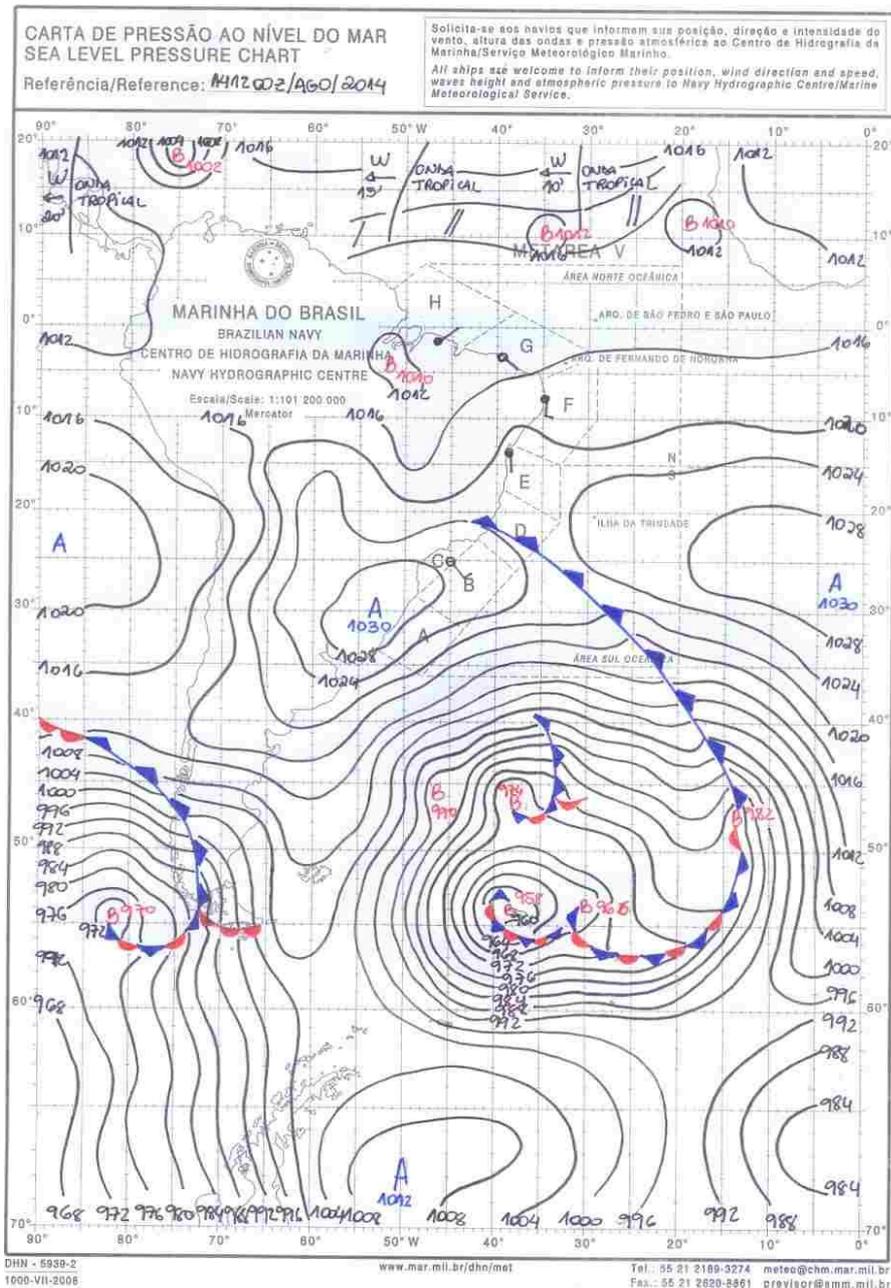


Figura 36. Carta sinótica das 12 UTC de 14/08/2014. Fonte: DHN/CHM da Marinha do Brasil.

4.2.2 Dados de satélite

Para analisar a acurácia dos dados de satélite como alternativa de informação de temperatura mínima, associada à ocorrência de geada, foram comparados os dados de temperatura mínima do ar ($T_{mín}$), obtidos em estação meteorológica de

superfície, com dados de temperatura da superfície terrestre (TST) do produto MDY11A1 da passagem noturna do sensor MODIS/AQUA.

Na Tabela 7 são apresentados os valores médios e de desvio padrão de $T_{mín}$, de TST e da diferença entre elas, sendo $Dif = T_{mín} - TST$, ambos medidos em °C. Os menores valores médios de $T_{mín}$ foram verificados em Santa Vitória do Palmar (6,5°C), no sul do Estado, seguida por Encruzilhada do Sul (7,9°C) onde a menor latitude foi compensada pela maior altitude (427 m). Já na estação de Rio Grande, com latitude intermediária, baixa altitude e mais próxima ao oceano, foi observada a maior média de temperatura mínima, 8,5°C. O comportamento desta variável está de acordo com o esperado diante dos efeitos dos fatores altitude, latitude e continentalidade. Em termos de TST o maior valor médio foi obtido em Encruzilhada do Sul, seguido por Santa Vitória do Palmar, e Rio Grande obteve a menor média

Tabela 7. Estatísticas dos dados de temperatura mínima do ar ($T_{mín}$) e de temperatura da superfície terrestre (TST) dos meses de junho, julho e agosto entre os anos de 2006 a 2012 para as localidades de Encruzilhada do Sul, Rio Grande e Santa Vitória do Palmar.

Estatísticas	$T_{mín}$ [°C]	TST [°C]	Dif ($T_{mín} - TST$)
Estação	Encruzilhada do Sul		
Média	7,9	5,7	2,2
Desvio Padrão	4,8	4,5	
Estação	Rio Grande		
Média	8,5	4,5	3,9
Desvio Padrão	4,3	3,0	
Estação	Santa Vitória do Palmar		
Média	6,5	5,3	1,2
Desvio Padrão	3,6	3,6	

Em primeira leitura observa-se uma provável incoerência entre os resultados obtidos com $T_{mín}$ e TST na cidade de Rio Grande. Esperava-se que nesta localidade também fosse obtido o maior valor médio de TST. Possivelmente, o padrão observado em Rio Grande esteja associado à sua localização rodeado por grandes corpos d'água: Laguna dos Patos, Saco da Mangueira e Oceano Atlântico. Isto faz com que aumente as incertezas, ocorrendo por um lado a possibilidade de mistura espectral no pixel (terra e água), consequência das dimensões do pixel MODIS (1000 x 1000 m), e, por outro lado, menor transparência atmosférica em função da maior presença de vapor d'água na atmosfera (MENESES & ALMEIDA, 2012).

O teste DMS de Fisher aplicado às médias de $T_{mín}$ e TST evidenciou ao nível de significância de 95% que as médias são estatisticamente diferentes, o que pode ser justificado pela possibilidade de melhor associação da TST com a temperatura mínima de relva. Entretanto a correlação entre as duas temperaturas mostrou-se significativa nas três localidades ao nível de 95%.

O valor positivo para a média das diferenças de temperatura ($Dif = T_{mín} - TST$) correspondeu ao esperado, como consequência da diferença de nível de aquisição dos dois conjuntos de dados. Durante a noite normalmente ocorre o fenômeno de inversão térmica (VAREJÃO-SILVA, 2006), resultando em temperatura próxima à superfície (equivalente à TST) menor do que aquela medida no abrigo meteorológico ($T_{mín}$), cujo termômetro está localizado a 1,5 m de altura, tendência também observada por Ferreira *et al.* (2006).

Na Figura 37 observa-se a coerência das caixas associadas aos dados de TST serem na sua grande maioria inferiores aos de $T_{mín}$, assim como a ocorrência de valores discrepantes contidos no período estudado (pontos). Os menores valores de TST podem ser justificados pelo nível de aquisição do dado, sendo, portanto, esta informação mais adequadamente associada à temperatura mínima de relva, obtida a 0,05 m acima do solo.

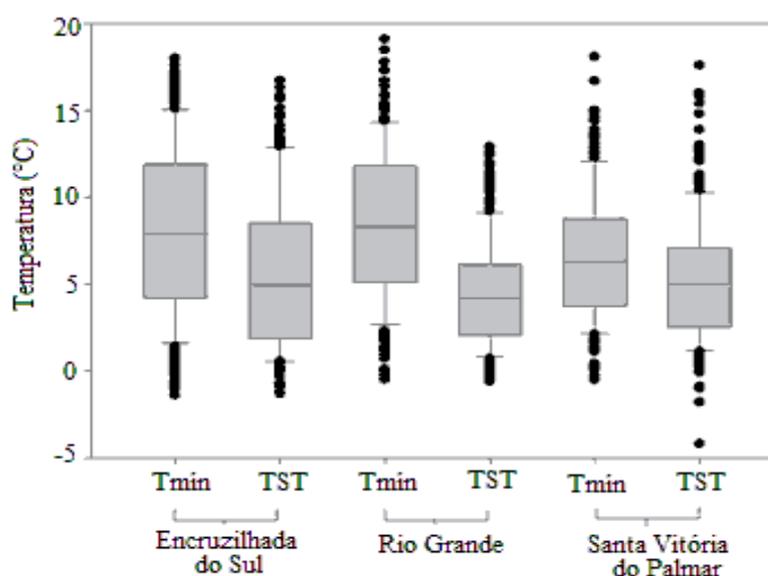


Figura 37. Distribuição dos valores de temperatura mínima do ar ($T_{mín}$) e temperatura da superfície terrestre (TST) referente à série 2006 a 2012 das localidades de Encruzilhada do Sul, Rio Grande e Santa Vitória do Palmar. As extremidades de cada caixa correspondem ao primeiro e terceiro quartis e a linha interna a mediana.

No diagrama de caixas observa-se que os dados estão bem distribuídos, com mediana próxima da metade das caixas, indicando que os dados apresentam distribuição próxima da normal. Constata-se que 90% dos dados têm valor acima de 0 °C, indicando a ocorrência de poucos casos de geada detectável visualmente. Entretanto, todos os valores mínimos ficaram abaixo de 3 °C, evidenciando que, sim, ocorreram eventos de geada resultado este compatível com os encontrados por Roberti *et al.* (2013). Os valores discrepantes são explicados pela influência que a temperatura sofre do complexo processo de transferência de energia entre a superfície terrestre e a atmosfera.

Na Tabela 8 e Figura 38 apresentam-se os resultados da análise da regressão linear para cada uma das localidades e para o conjunto total dos dados, ou seja, os dados das três localidades como uma única série. Esta análise utilizou apenas os valores de $T_{mín}$ inferiores a 6°C e correspondente TST.

Tabela 8. Equações de regressão linear, coeficiente de correlação de Pearson R e coeficientes de determinação R^2 obtidos com os dados do período 2006/2012.

Localidade	Equação de regressão	R	R^2
Encruzilhada do Sul	$y = 0,78x + 0,06$	0,70 [*]	0,49 [*]
Rio Grande	$y = 0,35x + 2,28$	0,36 [*]	0,12 ^{ns}
Santa Vitória do Palmar	$y = 0,80x + 0,46$	0,63 [*]	0,40 [*]
Conjunto total	$y = 0,67x + 0,86$	0,58 [*]	0,34 [*]

* significativos a 95%, ^{ns} não significativo.

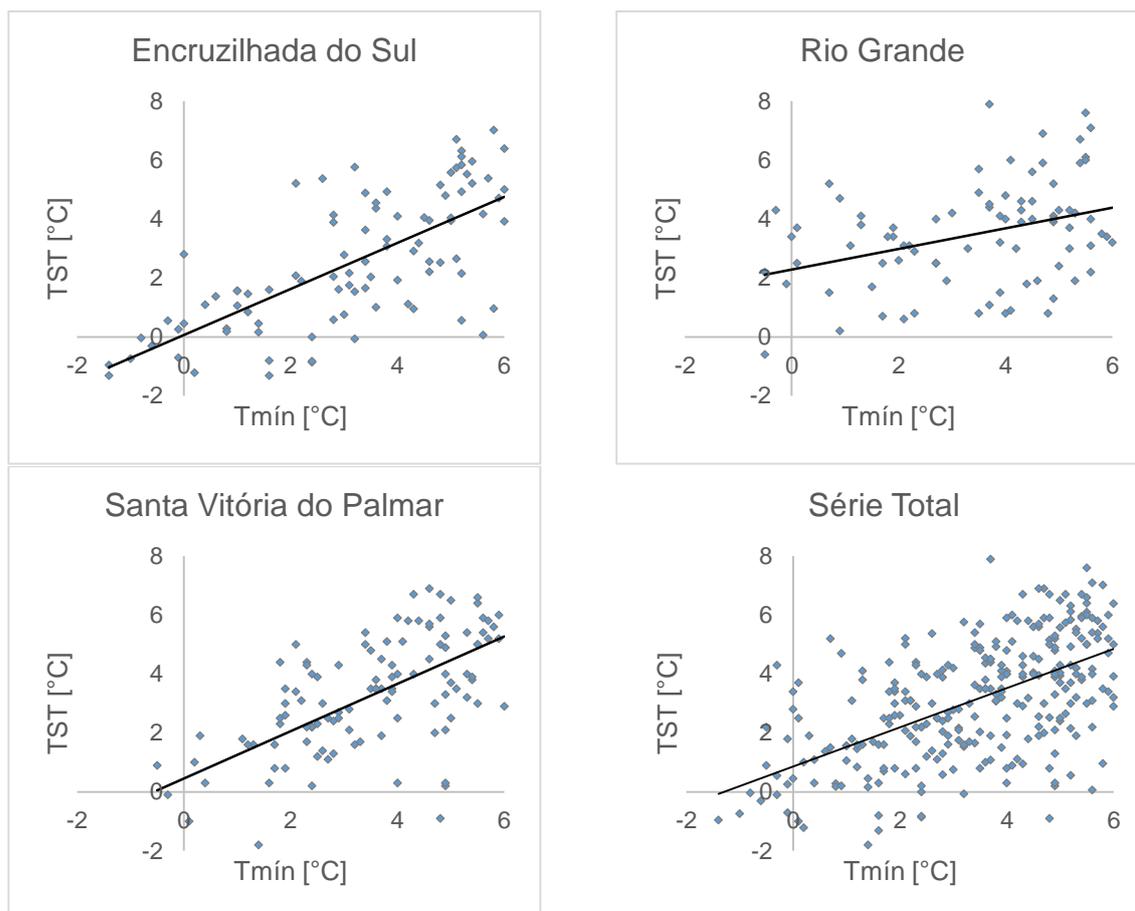


Figura 38. Relação entre a temperatura mínima do ar ($T_{mín}$) e a temperatura da superfície terrestre (TST) do período de 2006 a 2012 para as localidades de Encruzilhada do Sul, Rio Grande, Santa Vitória do Palmar e série total dos dados.

Os resultados mostram correlação positiva e significativa ao nível de 95% em todas as regressões. Observa-se alta dispersão dos dados nos quatro conjuntos, com baixos valores de R^2 , todos inferiores a 0,49. Os resultados são justificados pela tentativa de explicar um fenômeno complexo, como o fluxo de calor entre a superfície e a atmosfera, através de uma relação linear simples, sem levar em consideração os diversos fatores que interferem de forma importante neste processo.

A baixa correlação obtida nos dados de Rio Grande indica a dependência das duas variáveis com relação a outros fatores. Estudos realizados por Mezzomo *et al.* (2007) mostraram que Rio Grande se situa em região homogênea distinta das demais cidades estudadas do ponto de vista de temperatura mínima média trimestral.

Um dos fatores que provavelmente mais contribua para a alta dispersão dos dados é o horário de ocorrência da temperatura mínima e o horário de passagem do satélite sobre a região de estudo, que não são coincidentes. O satélite AQUA adquire informação sobre a TST da área de estudo no período noturno em torno de 1h15min

horário local. Uma forma de minimizar esta possível interferência nos resultados seria dados de $T_{mín}$ obtidos em estações automáticas próximo do horário da passagem do satélite.

Quanto ao horário de ocorrência da $T_{mín}$, sabe-se que após o pôr-do-Sol é interrompido o fornecimento de radiação de onda curta para superfície terrestre, contudo, esta continua a emitir para a atmosfera radiação de onda longa. Este fluxo é tão mais acentuado quanto maior for a transparência da atmosfera, ou seja, ausência de nuvens e baixa umidade. A temperatura mínima do ar em geral, tem o menor valor observado pouco antes do nascer do Sol, que nos meses de inverno varia entre 7h e 7h30min. Entretanto, segundo Varejão-Silva (2006), a presença de fenômenos capazes de perturbar o estado prevalecente da atmosfera (invasão de ar frio, por exemplo), pode alterar a expectativa quanto aos horários prováveis de ocorrência das temperaturas extremas.

Outro fator que traz incertezas às análises é a diferença na altura de obtenção da temperatura. Enquanto a $T_{mín}$ é medida a 1,5 m acima da superfície, TST estima a temperatura da superfície e, portanto, associada de forma mais adequada à temperatura de relva (T_{rel}) e conseqüentemente à ocorrência de geada. Ferreira *et al.* (2006), estudando a diferença entre a $T_{mín}$ e a T_{rel} medidas em oito estações meteorológicas do Rio Grande do Sul, apontaram para uma diferença de 2,0°C, se aproximando do proposto por Oliveira (1997) que chegou a 3°C.

Foi necessário avaliar a relação entre a $T_{mín}$ e a TST em situações de formação de geada para constatar de maneira mais eficaz a possibilidade do uso de imagens orbitais do sensor MODIS/AQUA como uma fonte de dados de temperatura com potencial para a ocorrência de geadas. Na Tabela 9 se observa a média e o desvio padrão dos dois conjuntos de dados de duas localidades na área de teste, Encruzilhada do Sul e Santa Vitória do Palmar. Não são apresentados dados referentes a cidade de Rio Grande por não haver registros de ocorrência de geada, detectável por observação visual, entre 2007 e 2012.

Tabela 9. Estatísticas dos dados de temperatura mínima do ar com ocorrência de geada (Tmín_geada) e de temperatura da superfície terrestre (TST) dos meses de junho, julho e agosto entre os anos de 2006 a 2012 para as localidades de Encruzilhada do Sul e Santa Vitória do Palmar.

Estatísticas	Tmín_geada (°C)	TST (°C)	Dif (Tmín_geada - TST)
Estação Encruzilhada do Sul			
Média	2,0	1,4	0,6
Desvio Padrão	2,0	1,8	
Estação Santa Vitória do Palmar			
Média	2,1	1,9	0,1
Desvio Padrão	1,1	1,5	

Coerente com o esperado, os valores médios de temperatura mínima em noites de geada (Tmín_geada da Tabela 9) foram inferiores às médias de Tmín calculadas para a série total (Tabela 7) que engloba também noites sem geada:

- Encruzilhada do Sul: Tmín = 7,9°C e Tmín_geada = 2,0°C; e
- Santa Vitória do Palmar: Tmín = 6,5°C e Tmín_geada = 2,1°C.

Observa-se ainda que os valores da diferença média entre Tmín e TST variou entre 1,2 e 3,9°C na série total da Tabela 7 e na série que contém apenas as noites de ocorrência de geada (Tabela 9), constata-se que a diferença entre as duas temperaturas (Dif = Tmín_geada - TST) é menor, entre 0,1 e 0,6°C, justificável pela condição meteorológica local altamente favorável a perda radiativa da superfície terrestre, menor turbulência do ar junto à superfície e maior transparência atmosférica, favorecendo a formação de uma camada mais espessa de ar com temperatura próxima à da superfície.

Cabe ressaltar que no presente trabalho a qualidade dos dados de TST foi avaliada através da comparação com dados de Tmín, que, conforme já mencionado, são obtidos em horários diferentes, em alturas diferentes e que provêm de medidas de natureza física distintas. Agrega-se a isso, o fato de que as temperaturas obtidas no interior do abrigo meteorológico nas estações meteorológicas (Tmín), podem não representar adequadamente as condições térmicas do ar nas vizinhanças da estação (VAREJÃO-SILVA, 2006), diferentemente da TST.

Assim, mesmo considerando todas as incertezas mencionadas, é razoável assumir que existe coerência entre as medidas de Tmín nas estações meteorológicas e as de TST oriundas do produto MYD11A1 na região de estudo. A grande vantagem do uso dos dados de TST decorre da representação espacial da temperatura, o que permite a realização de estudos climatológicos para a região num nível de

detalhamento muito superior ao possível quando do uso de dados interpolados de estações meteorológicas.

Os dados de temperatura dos dias com registro de geada colaborou, em conjunto com a literatura existente, para o estabelecimento de limiares delimitantes das temperaturas obtidas do sensor MODIS/AQUA passíveis de ocorrência de geada. Os valores médios de $T_{mín_geada}$ e desvio padrão apresentados na Tabela 9 mostram que 68% dos dados de temperatura em noites com registro de geada estão entre 0 e 4°C, considerando que estes dados possuem distribuição normal. Na literatura é comum encontrar para o Rio Grande do Sul o valor de 3°C como sendo de temperatura mínima do ar, registrada no abrigo meteorológico, relacionada à formação de geada (SENTELHAS, 1995; OLIVEIRA, 1997; SILVA & SENTELHAS, 2001; FERREIRA *et al.*, 2006). Além das evidências estatísticas e do suporte da literatura o horário de obtenção dos dados orbitais também foram considerados.

As frequências relativas dos dados de TST do produto MYD11A1 obtidos do sensor MODIS/AQUA do recorte da área de teste referente ao Sudeste do Rio Grande do Sul são apresentados nos mapas da Figura 39. Tais frequências foram obtidas utilizando os valores de corte de 0, 1, 2 e 3°C. Estes mapas representam o percentual de pixels válidos com TST inferiores a cada um dos limiares de corte. Na Figura 40 encontra-se as frequências relativas das temperaturas mínimas do ar ($T_{mín}$), obtidas no abrigo meteorológico, para comparação com os dados de TST da Figura 39.

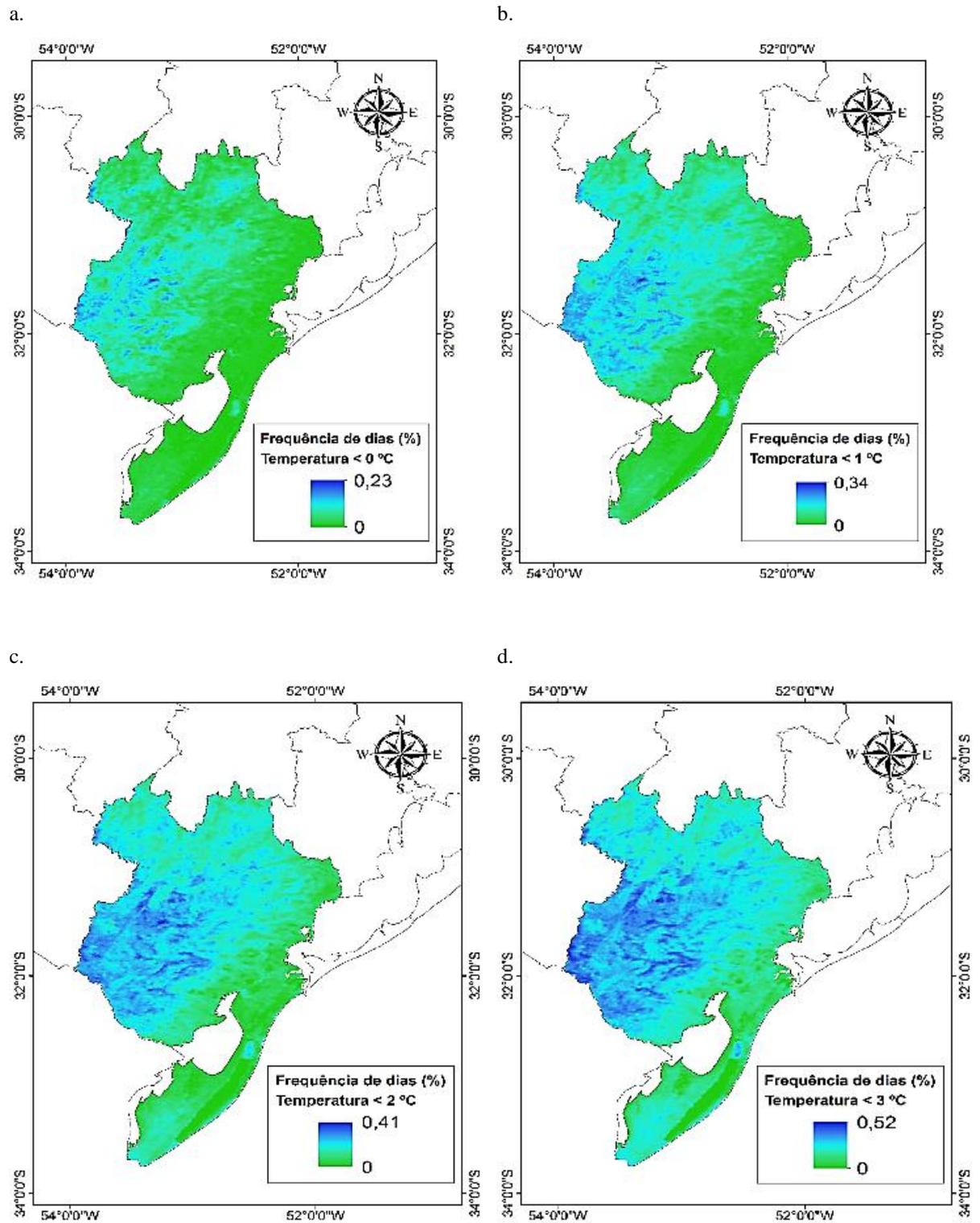


Figura 39. Mapa do Sudeste Rio-grandense com a contagem da frequência relativa de dias com: TST < 0°C (a), TST < 1°C (b), TST < 2°C (c) e TST < 3°C (d). Período de junho, julho e agosto de 2006 a 2012.

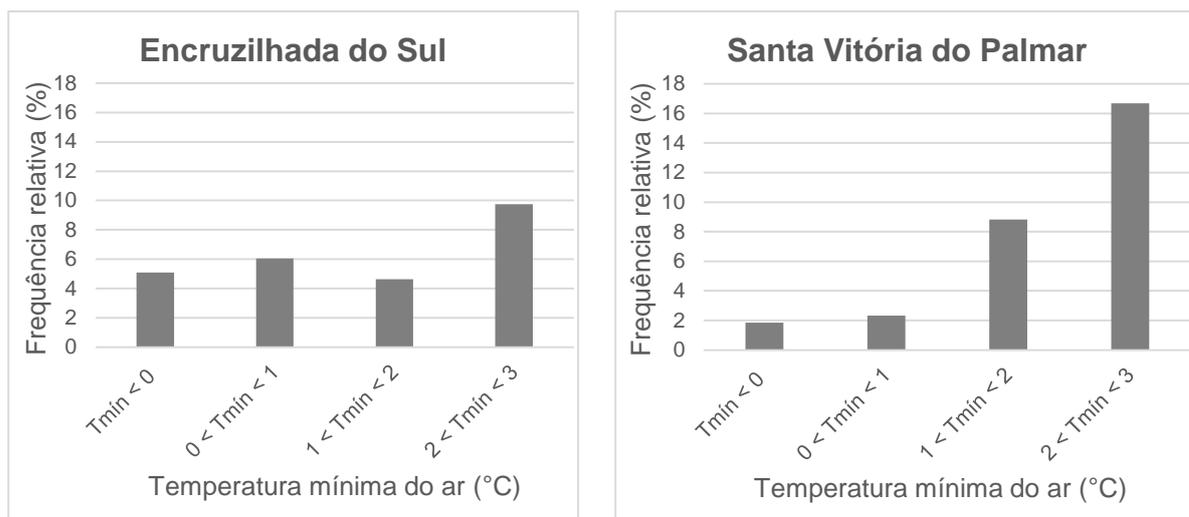


Figura 40. Frequência relativa da temperatura mínima do ar ($T_{mín}$) menores que 3°C nos meses de junho, julho e agosto entre os anos de 2006 a 2012, para as localidades de Encruzilhada do Sul (esquerda) e Santa Vitória do Palmar (direita).

Verifica-se que para o limiar de 0°C as frequências de TST foram muito baixas, inferiores a 23% conforme Figura 39a. Os maiores valores ocorrem em áreas restritas da região de teste, predominando no meio oeste da região. Na localidade de Encruzilhada do Sul observa-se uma frequência em torno de 10% com TST abaixo de 0°C e em Santa Vitória do Palmar um percentual menor, inferior a 5%. Os resultados obtidos para TST (Figura 39a) são coerentes com os percentuais de frequência relativa obtidos para temperatura mínima do ar ($T_{mín}$) menores que 0 °C (Figura 40), ocorrendo maiores percentuais em Encruzilhada do Sul e menores em Santa Vitória do Palmar.

Para o limiar de TST menor do que 1°C, a mudança mais marcante ocorre no aumento bem expressivo do percentual no meio oeste da região de teste. Nas localidades de Encruzilhada do Sul e Santa Vitória do Palmar não se observa alguma alteração significativa nem nos percentuais de TST (Figura 39b) nem nos dados de $T_{mín}$ (Figura 40).

Da forma esperada, o percentual de dias com temperatura da superfície terrestre (TST) menores que 2°C (Figura 39c) aumentou em comparação com limiares menores. Observa-se a distinção entre os percentuais nas áreas interioranas da região de teste e os menores percentuais, predominantemente inferiores a 20%, no entorno dos grandes corpos hídricos. Com este limiar detecta-se com clareza o aumento no percentual na cidade de Santa Vitória do Palmar correspondendo também

com o observado na medição na estação meteorológica de superfície (Figura 40-direita).

Ainda atendendo as expectativas, elevando-se o valor de corte para até 3°C, a frequência aumentou tanto dos dados de TST (Figura 39d) quanto de T_{mín} (Figura 40). Neste caso, diversos pixels passaram a atender a condição de risco de ocorrência de geada conforme a análise estatística de ocorrência do evento em Encruzilhada do Sul e Santa Vitória do Palmar, e valores de temperatura mínima relacionados na literatura. A área de abrangência se tornou maior e a frequência ficou acima de 50% no centro-oeste da região de teste.

De um modo geral, observa-se na Figura 39 menor frequência de ocorrência de baixas temperaturas próximo a corpos d'água (litoral e lagoas), evidenciando a característica conservadora da água. As frequências aumentam na parte central e oeste da região de teste, em parte associada às maiores altitudes. Também, é explicável o aumento da frequência no extremo sul, mesmo de forma menos acentuada que no oeste da região, evidenciando a influência da latitude na ocorrência de baixas temperaturas.

Apesar dos dados de TST não serem úteis para fins de previsão de geada, estes podem auxiliar em situações onde é necessário o diagnóstico de ocorrência do evento. Assim, é razoável efetuar a comparação entre os mapas do RGG e os mapas de frequência de TST inferiores a 3°C.

Observando-se os resultados do modelo do risco geral de geada (RGG) para temperaturas de 3°C e os dados de frequência relativa de dias com TST inferior a 3°C sobre a área de teste, Figura 41, constata-se a coerência entre os resultados obtidos.

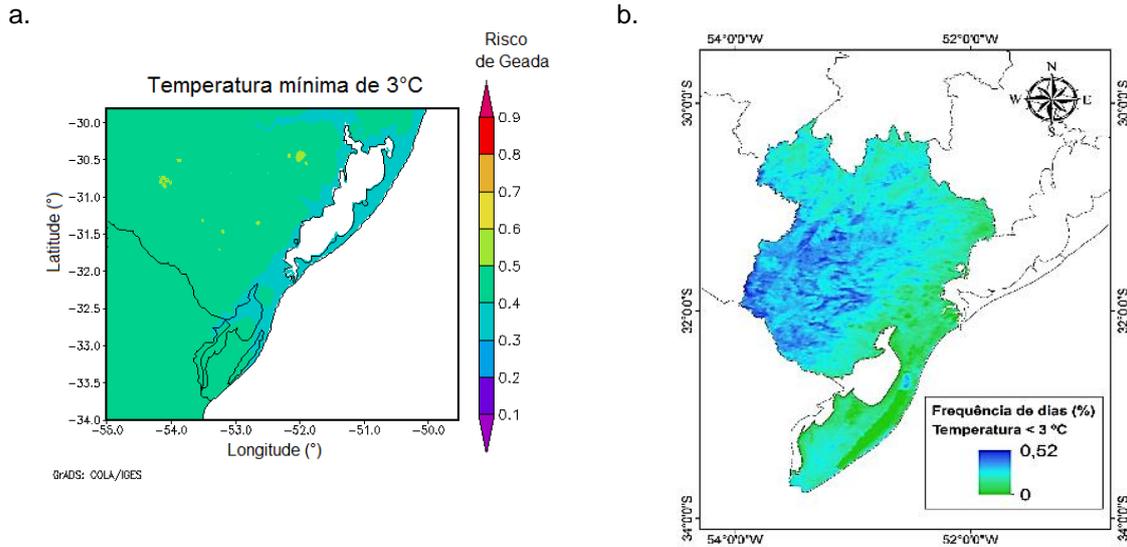


Figura 41. Sudeste Rio-grandense apresentado em: a. Risco geral de geada (RGG, em %) para temperatura mínima de 3°C; b. Frequência relativa de dias com temperatura da superfície terrestre (TST) inferior a 3°C obtida nos meses de junho, julho e agosto de 2006 a 2012.

Fica clara a compatibilidade entre o RGG para $T_{mín}$ de 3°C (Figura 41a) e a frequência de TST < 3°C (Figura 41b) onde se tem, respectivamente, risco de geada entre 40 e 50% e frequência de TST próxima a 50% na maior parte da região de teste. Os menores percentuais, inferiores a 40% para RGG e 30% para o TST, estão restritos às áreas nos arredores dos grandes corpos hídricos.

Na Figura 42 observa-se o RGG para temperatura de 2°C e a frequência relativa de dias com temperatura da superfície terrestre (TST) inferior a 2°C. Constata-se novamente a coerência entre os dois métodos de análise, principalmente em termos espaciais, uma vez que a quantidade de pixels com temperatura abaixo de 2°C irá diminuir sobre a área testada e o risco de geada irá aumentar com a redução da temperatura.

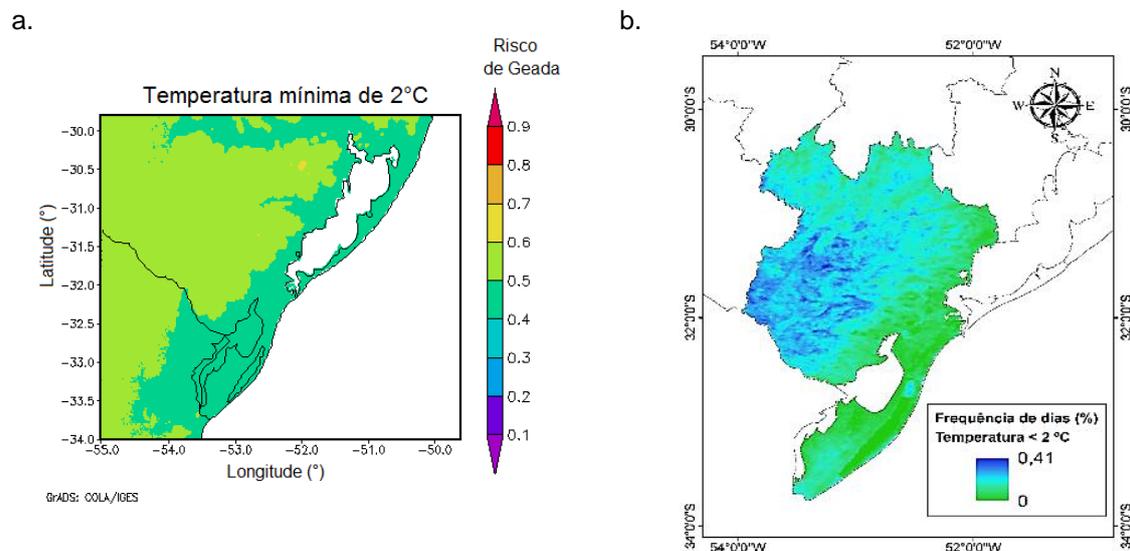


Figura 42. Sudeste Rio-grandense apresentado em: a. Risco geral de geada (RGG, em %) para temperatura mínima de 2°C; b. Frequência relativa de dias com temperatura da superfície terrestre (TST) inferior a 2°C obtida nos meses de junho, julho e agosto de 2006 a 2012.

Na Figura 43 observa-se o aumento da restrição espacial, na região de teste, das áreas com maior risco geral de ocorrência de geada (RGG) para temperatura de 1°C e da frequência de dias com TST < 1°C.

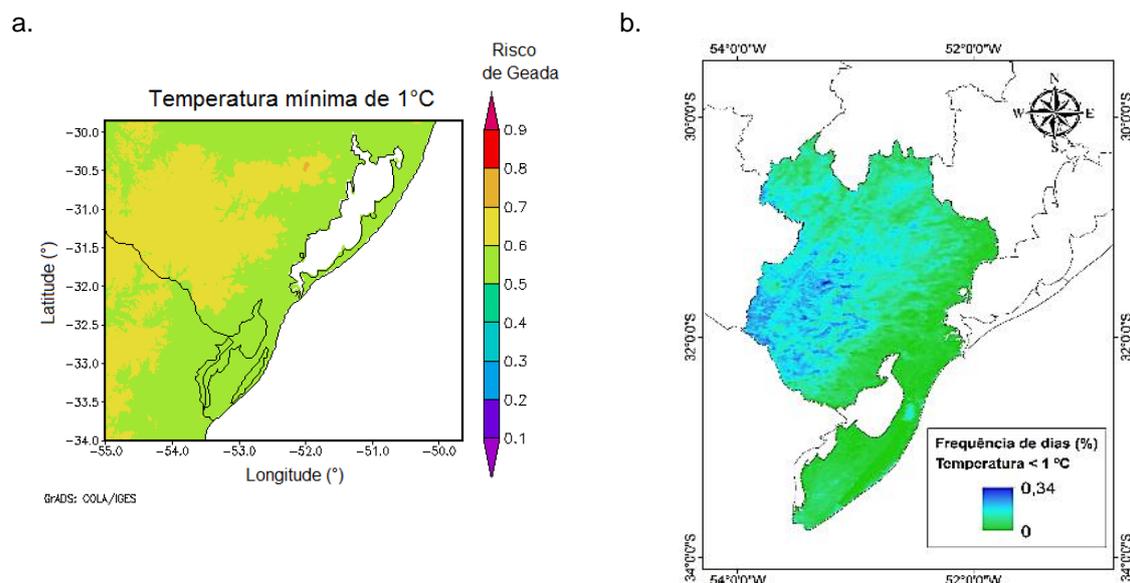


Figura 43. Sudeste Rio-grandense apresentado em: a. Risco geral de geada (RGG, em %) para temperatura mínima de 1°C; b. Frequência relativa de dias com temperatura da superfície terrestre (TST) inferior a 1°C obtida nos meses de junho, julho e agosto de 2006 a 2012.

A restrição espacial aumenta ainda mais quando o RGG é modelado para a temperatura de 0°C e a frequência de dias é computada com TST < 0 °C, Figura 44. Mas continua a se observar forte coerência espacial entre as duas imagens.

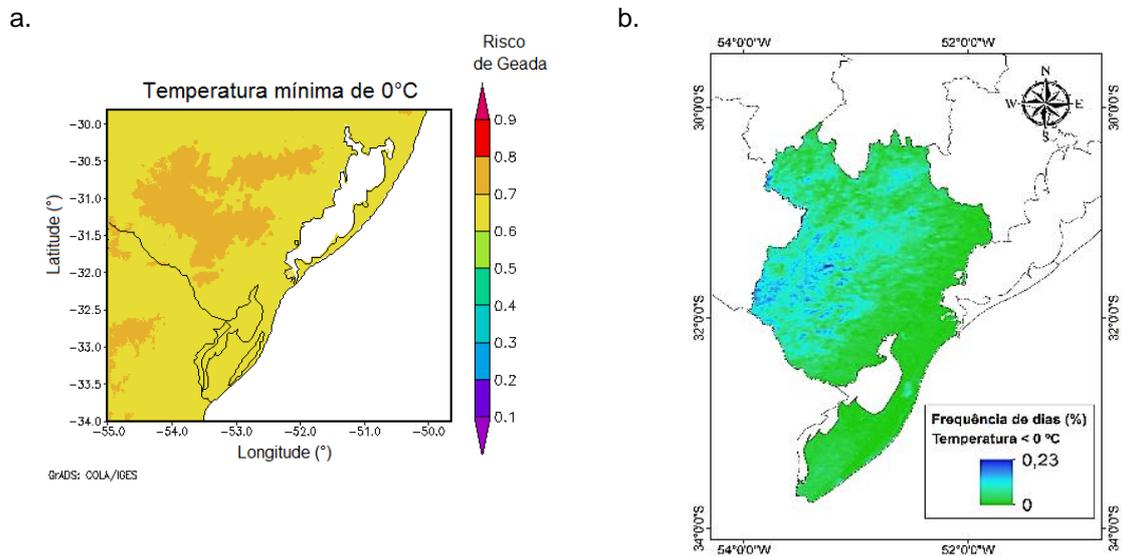


Figura 44. Sudeste Rio-grandense apresentado em: a. Risco geral de geada (RGG, em %) para temperatura mínima de 0°C; b. Frequência relativa de dias com temperatura da superfície terrestre (TST) inferior a 0°C obtida nos meses de junho, julho e agosto de 2006 a 2012.

As diferenças observadas entre o RGG e a frequência de baixas temperaturas obtidas através do TST podem ser explicadas pelos dados utilizados. Enquanto o primeiro foi obtido a partir de dados de temperatura mínima do ar registrados em abrigo meteorológico de estação meteorológica de superfície, nos meses de junho e julho entre os anos de 1961-1990, o segundo foi obtido a partir da temperatura da superfície terrestre, nos meses de junho, julho e agosto entre os anos de 2006 e 2012.

Mesmo com estas incertezas é perceptível a grande coerência entre o RGG e a frequência de baixos valores de TST. A medida que o risco aumenta a frequência de TST diminui.

5 CONCLUSÕES

O modelo do Risco Geral de Geadas (RGG) descreve de forma coerente a probabilidade de ocorrência de geada em função de variáveis geográficas e da temperatura mínima.

A altitude é o fator de maior contribuição para o risco geográfico de geada (RGeo), seguido pela latitude e a continentalidade.

Existe coerência entre os dados de temperatura mínima do ar, medidos em estações meteorológicas, e os dados de temperatura da superfície da terra, obtidos do sensor MODIS/AQUA.

As TSTs inferiores a 3°C, obtidas do produto MDY11A1 do sensor MODIS/AQUA, podem, portanto, ser utilizadas para a determinação da ocorrência de baixas temperaturas em situações sinóticas favoráveis a ocorrência de geadas.

Existe coerência também entre o risco geral de geada (RGG) e a frequência de temperaturas baixas obtidas do produto MDY11A1 do sensor MODIS/AQUA.

REFERÊNCIAS

Aguiar, D.; Mendonça, M. Climatologia das geadas em Santa Catarina. In: Simpósio Brasileiro de Desastres Naturais, 1, 2004, Florianópolis. **Anais do Simpósio Brasileiro de Desastres Naturais**. Florianópolis: GEDN/UFSC, p. 762-773. 2004.

Algarve, V.R., **Geadas no Brasil. Climanálise 13**. Disponível em: <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/cliesp10a/geada.html>. Acessado em: 01/10/2012.

Algarve, V.R., Cavalcanti, I.F.A., 1994. Características da circulação atmosférica associadas à ocorrência de geadas no sul do Brasil. In: VIII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Belo Horizonte. **Anais do VIII Congresso Brasileiro de Meteorologia**, v. 2, Belo Horizonte, 1994.

Andersen, H. S. Land surface estimation based on NOAA-AVHRR data during the HAPEX-Sahel experiment. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 189, p. 788-814, 1997.

Assunção, F. da S. D.; Gertrudes, A.; Silva, J. Para entender. Tempo e Clima. In: Cavalcanti, I. F. A.; Ferreira, N.; Assunção, F. da S. D.; Gertrudes, A.; Silva, J; (Org.). **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, p. 182. 2009.

Ataíde, K. R. P. **Determinação do saldo de radiação e radiação solar global com produtos do sensor MODIS Terra e Aqua**. Dissertação de Mestrado em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande-PB, 2006.

Ayoade, J. O. **Introdução à Climatologia para os Trópicos**. Rio de Janeiro. Bertrand Brasil. 4 ed., 332p., 1996.

Calbete, N. O. de. In: Algarve, V.R., **Geadas no Brasil. Climanálise 13**. Disponível em: <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/cliesp10a/geada.html>. Acessado em: 01/10/2012.

Cargnelutti Filho, A.; Maluf, J. R. T.; Matzenauer, R.; Stolz, A. P. Altitude e coordenadas geográficas na estimativa da temperatura mínima média decendial do ar no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 6, p. 893-901, 2006.

Dalmago, G. A.; Cunha, G. R. da; Tomm, G. O.; Pires, J. L. F.; Santi, A.; Pasinato, A.; Fanton, G.; Luersen, I.; Müller, F. L. D.; Müller, A. L. Zoneamento agroclimático para o cultivo de canola no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.16, p.295-305, 2008.

Ducatti, J. **Mosaico de imagens LANDSAT-TM e macrozoneamento do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 2001.

Estefanel, V.; Ferreira, M.; Buriol, G.A.; Pinto, H.S. Estimativa das médias das temperaturas mínimas mensais e anuais do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista do Centro de Ciências Rurais**, v.3, p.1-20, 1973.

Federação das Indústrias do Rio Grande do Sul (FIERGS). **Panorama econômico do Rio Grande do Sul**. 2014.

Federova, N. **Meteorologia sinótica**. V. 1, Pelotas: UFPel, 259p., 1999.

Federova, N. **Meteorologia sinótica**. V. 2, Pelotas: UFPel, 244p., 2001.

Ferreira, A. G. **Meteorologia Prática**. São Paulo: Oficina de textos, 2006.

Ferreira, C. F., Fontana, C. F., Berlato, M. A. Relação entre a temperatura mínima do ar medida no abrigo meteorológico e na relva no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.14, p 53-63, 2006.

Florenzoni, T. G. **Os satélites e suas aplicações**. São José dos Campos-SP: SindCT, v. 1. 48p, 2008.

François, C.; Bosseno, R.; Vacher, J.J.; Seguin, B. Frost risk mapping derived from satellite and surface data over the Bolivian Altiplano. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.95, p.113-137, 1999.

Gusso, A. **Monitoramento de temperaturas da superfície terrestre noturna no Estado do Rio Grande do Sul com uso do sensor orbital AVHRR/NOAA**. Porto Alegre: UFRGS, 2003. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto), Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

Gusso, A.; Fontana, D. C.; Gonçalves, G. A. Mapeamento da temperatura da superfície terrestre com uso do sensor AVHRR/NOAA. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, p.231-237, 2007.

Hachem, S.; Duguay, C. R.; Allard, M. Comparison of MODIS-derived land surface temperatures with ground surface and air temperature measurements in continuous permafrost terrain. **The Cryosphere**, v.6, p.51-69, 2012.

Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR). Disponível em: <http://www.iapar.br/>, acessado em 12/08/2015.

Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). **Normais climatológicas do Brasil: 1961-1990**. Brasília, DF: INMET, 2009.

Jensen, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. 2ª Edição traduzida pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. São Paulo, Parêntese, 672 p, 2009.

Junges, A. H., Gusso, A., Melo, R. W., Fontana, D. C. Avaliação das perdas de rendimento de trigo na safra de 2006 por meio da análise de temperaturas mínimas do ar e de superfície na região do norte do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 16, n. 1, p. 1-8, 2008.

Lensky, I. M. and Dayan, U.: Detection of Finescale Climatic Features from Satellites and Implications for Agricultural Planning, **B. Am. Meteorol. Soc.**, 92, 1131–1136, doi:10.1175/2011BAMS3160.1, 2011.

Leinz, V. **Geologia geral**. São Paulo: Companhia Ed. Nacional, 2005.

Lenzi, E.; Favero, L. O. B. **Introdução à química da atmosfera**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

Lopes, P. M. O.; Adami, M.; Pereira, E. B.; Moura, G. B. de A.; Moreira, M. A. Estimativa de temperaturas absolutas usando dados climáticos e orbitais sobre o território brasileiro. **Revista Caatinga**, v.24, p.120-127, 2011.

Lopes, P. M. O.; Rizzi, R. Modelagem da emissividade da superfície terrestre em regiões montanhosas a partir de dados do sensor MODIS. **Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 2797-2804, 2007.

Magalhães, W. G. (Org., Comp., Elab.); Silva, I. de F. T. (Coor.); Augusto, M. J. de C.; Oliveira, M. A. de; Freitas, A. L. B. de. **Noções Básicas de Cartografia**, Diretoria de Geociências, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 1998.

Mendonça, F.; Danni-Oliveira, I. M. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

Meneses, P. R.; Almeida, T. de. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília: UnB/CNPq, 266p., 2012.

Meneses, P. R.; Almeida, T. de. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília, 2012.

Miranda, E. E. de. **Brasil em Relevo**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>. Acessado em: 15/10/2015

Mota, F. S. da. **Meteorologia Agrícola**. São Paulo: Livraria Nobel S.A., 376 p, 1979.

Moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS). **Land Surface**

Temperature and Emissivity, 2014a. Disponível em:

<http://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod11.php>. Acessado em 12/05/2014

Moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS). **MODIS/Aqua Land Surface Temperature and Emissivity Daily L3 Global Grid SIN**, 2014b. Disponível em:

https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table/myd11b1.

Acessado em: 12/05/2014

Müller, G. V. **Variabilidade interanual en la frecuencia de ocurrencia de heladas en la Pampa húmeda y su relación con la circulación atmosférica asociada**. Tese de doutorado. CIMA-CONICET/UBA, Buenos Aires, 2005.

Muster, S.; Langer, M.; Abnizova, A.; Young, K. L.; Boike, J. Spatio-temporal sensitivity of MODIS land surface temperature anomalies indicates high potential for large-scale land cover change detection in Arctic permafrost landscapes. **Remote Sensing of Environment**, v. 168, p. 1-12, 2015.

National Aeronautics and Space Administration (NASA). **Earth Science Reference Handbook. A Guide to NASA's Earth Science Program and Earth Observing Satellite Missions**. Washington, D. C. 2006.

Novo, E. M. L. de M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 3 ed., São Paulo: Blucher, 2008.

Oliveira, H. T. **Climatologia das temperaturas mínimas e probabilidade de ocorrência de geada no Estado do Rio Grande do Sul**. Dissertação de mestrado. PPG Fitotecnia/UFRGS, Porto Alegre, 1997.

Pedro Júnior, M.J.; Mello, M.H.D.A.; Ortolani, A.A.; Alfonsi, R.R.; Sentelhas, P.C. **Estimativa das temperaturas médias mensais das máximas e das mínimas para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomo, 11p. (Boletim técnico, 142), 1991.

Pereira, A. R.; Angelocci, L. R.; Sentelhas, P. C. **Meteorologia Agrícola**. Piracicaba, SP. Fevereiro de 2007. Disponível em: <file:///C:/Users/usuario/Downloads/Livro%20Agrometeorologia%20Pereira%20Angelo%20Sentelhas.pdf> Acessado em: 08/02/2014.

Pezza, A. **Ondas de frio na América do Sul e as trajetórias dos ciclones e anticiclones extratropicais: Climatologia Sinótica**. 2003. 369f. Tese de doutorado em Meteorologia. IAG/USP, São Paulo, 2003.

Pouteau, R.; Rambal, S.; Ratte, J. P.; Gogé, F.; Joffre, R.; Winkel, T. Downscaling MODIS-derived maps using GIS and boosted regression trees: The case of frost occurrence over the arid Andean highlands of Bolivia. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, Issue 1, p. 117-129, 2011.

Rodrigues, A.; Zullo J. J.; Caramori, P. H. Estimativa da Temperatura de Superfície, Através de Imagem do Satélite AVHRR/NOAA, em Evento de Geada Agrícola, no Paraná. In: XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 2007, Aracaju. **Anais do XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia**. Aracaju: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, v. 1. p. 1D-5D, 2007.

Secretaria do Planejamento, Mobilidade e Desenvolvimento Regional (SEPLAN). Atlas socioeconômico do Rio Grande do Sul. Disponível em: <http://www.atlassocioeconomico.rs.gov.br/> Acessado em: 26/06/2015.

Seluchi, M. E. Geadas e Friagens. In: Cavalcanti, I. F. A.; Ferreira, N.; Assunção, F. da S. D.; Gertrudes, A.; Silva, J. (Org.). **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, p. 182. 2009.

Sentelhas, P. C.; Ortolani, A. A.; Pezzopane, J. R. M. Estimativa da temperatura mínima de relva e da diferença de temperatura entre o abrigo e a relva em noites de geada. **Bragantia**, v.54, p.437-445, 1995.

Silva, J. G., Sentelhas, P. C. Diferença de temperatura mínima do ar no abrigo e na relva e probabilidade de sua ocorrência em eventos de geada no Estado de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. Santa Maria, v. 9, n. 1, p. 9-15, 2001.

Sobrino, J. A.; Raissouni, N.; Lobo, A. Monitoring the Iberian Peninsula land cover using NOAA-AVHRR data. In Guyot & Phulpin (Eds.). *Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*, p. 787-794, Rotterdam: Balkema, 1997.

Snyder, R. L. **Protección contra las Heladas: fundamentos, práctica y economía**. Roma. FAO N° 10, V. 1, 2010. Disponível em: <http://www.fao.org/docrep/008/y7223e/y7223e07.htm>. Acessado em: 12/07/2015.

Torres, F. T. P.; Machado, P. J. de O. **Introdução à Climatologia**. Cengage Learning, São Paulo, 2011.

Tubelis, A.; Nascimento, F. J. L. do. **Meteorologia Descritiva: Fundamentos e Aplicações Brasileiras**. São Paulo: Nobel, 1984.

Varejão-Silva, M. A. **Meteorologia e climatologia**. Recife: Versão digital 2, 351p., 2006.

Vianello, R.L. & Alves. A.R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 449p, 2002.

Vicari, M. B.; Simões, D. S.; Fontana, D. C. Definição de áreas de risco de ocorrência de baixas temperaturas em Encruzilhada do Sul usando imagens NODIS. In: **Anais do XVIII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia**, Belém, 2013.

World Meteorological Organization (WMO). **Guide to Agricultural Meteorological Practices**. N° 134. 2012.

ANEXOS

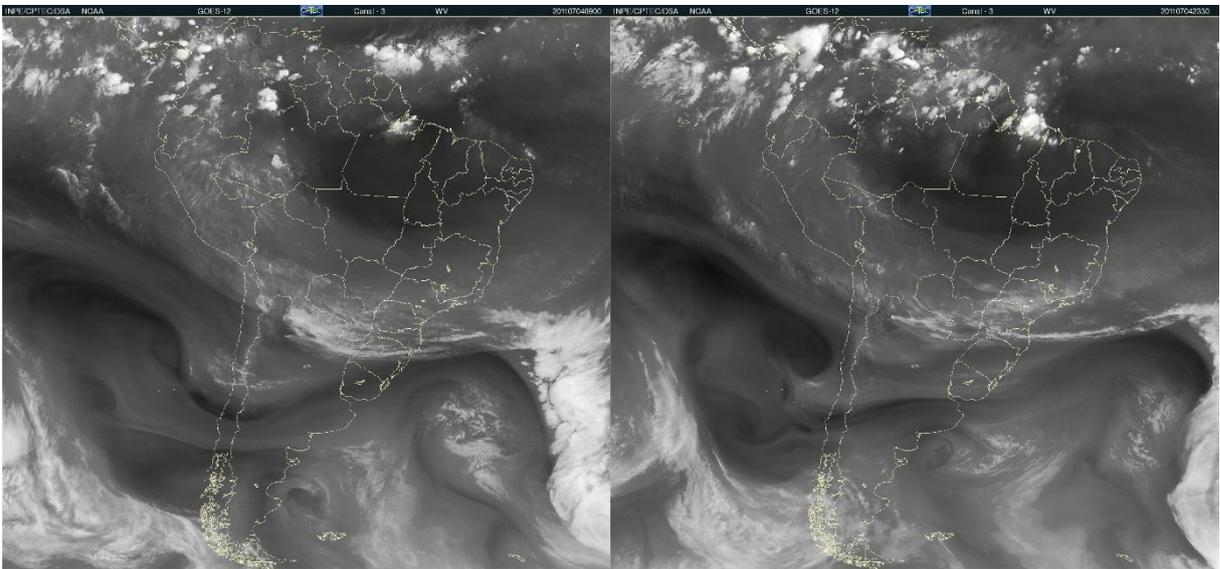
ANEXO A

Imagens para estudo de caso de formação de geadas no mês de julho de 2011 na cidade de Encruzilhada do Sul. a. imagens GOES-12 canal-3 do vapor d'água; b. imagens GOES-12 canal-4 do infravermelho.

a. Imagens GOES-12 canal-3 do vapor d'água:

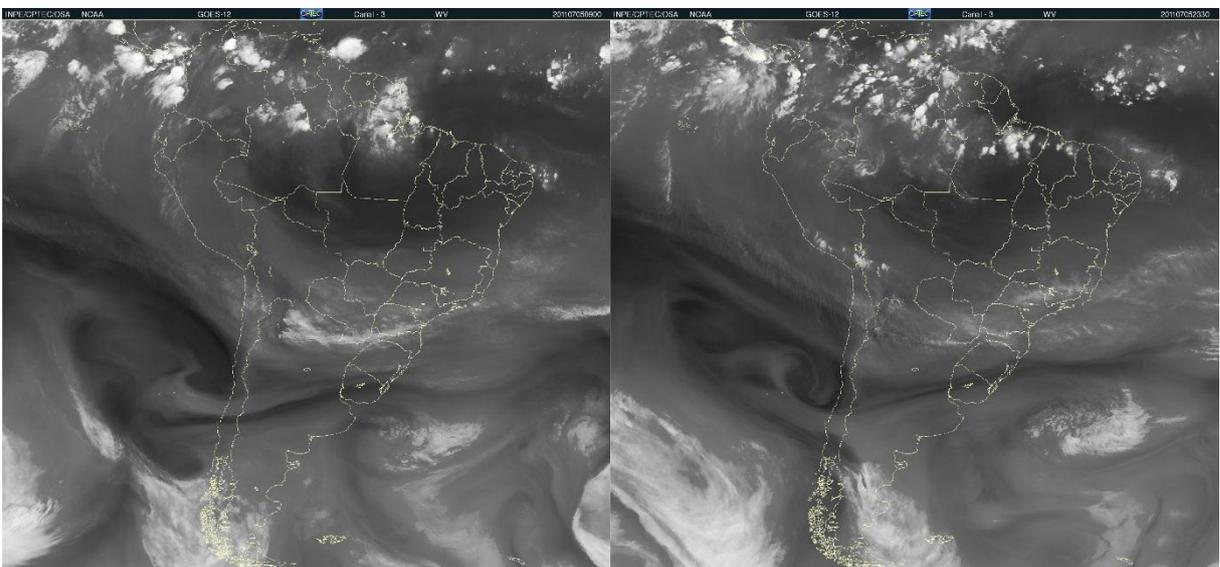
04/07/2011 – 09:00UTC

04/07/2011 – 23:30UTC



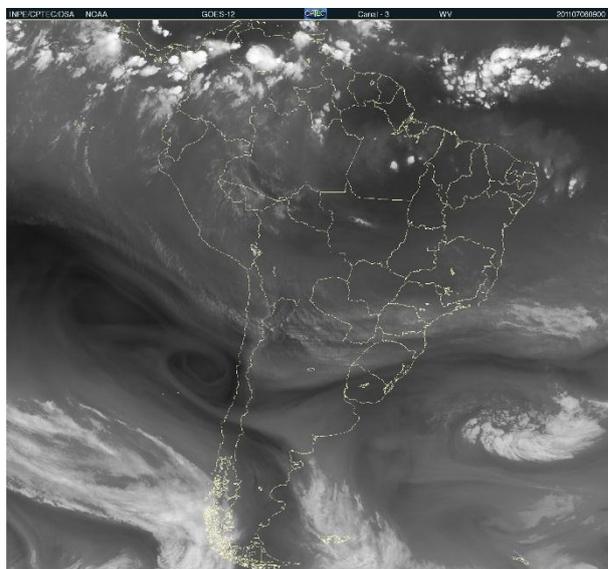
05/07/2011 – 09:00UTC

05/07/2011 – 23:30UTC

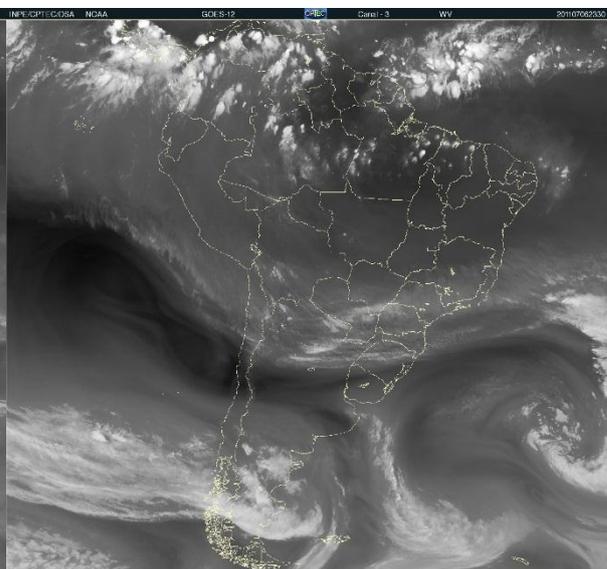


ANEXO A - continuação

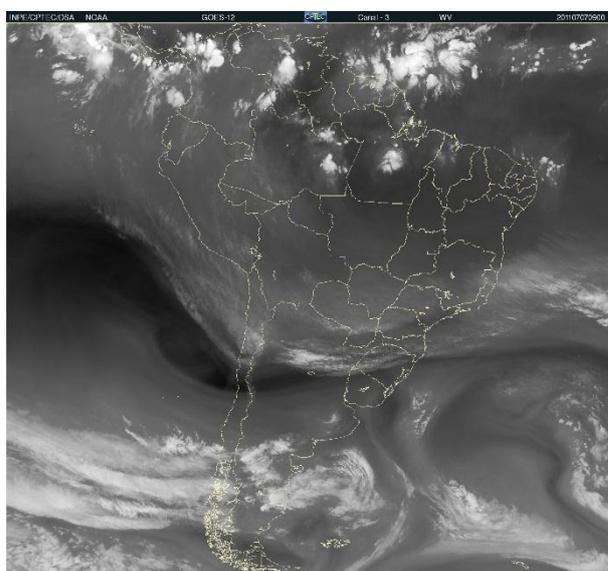
06/07/2011 – 09:00UTC



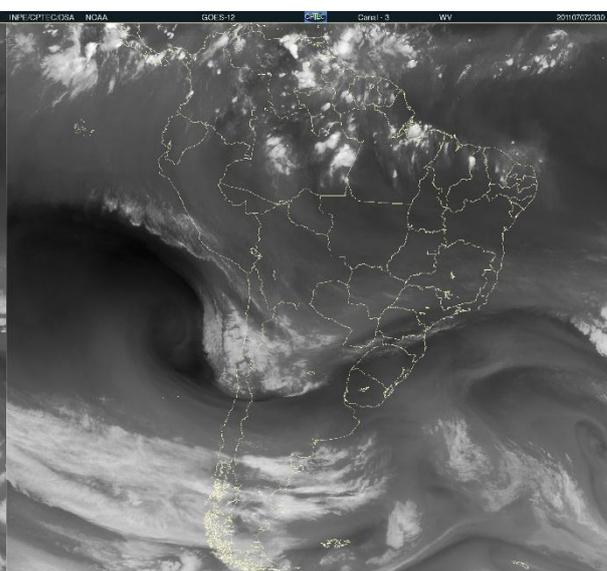
06/07/2011 – 23:30UTC



07/07/2011 – 09:00UTC

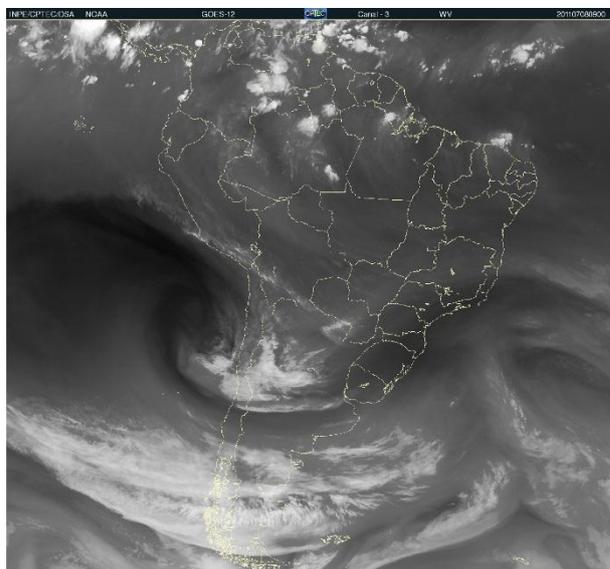


07/07/2011 – 23:30UTC

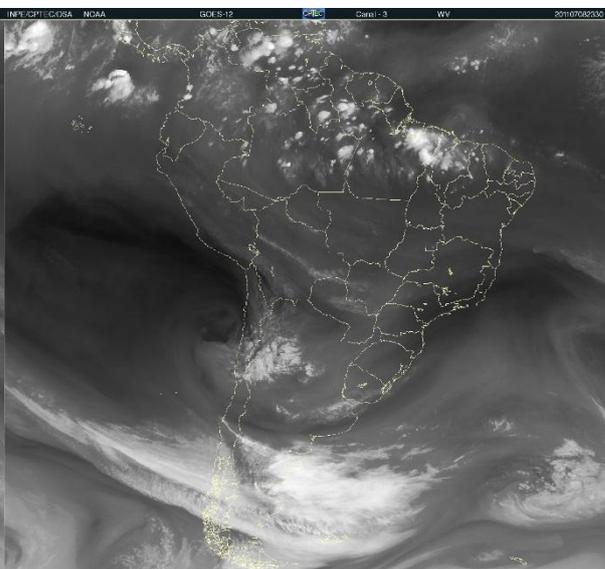


ANEXO A - continuação

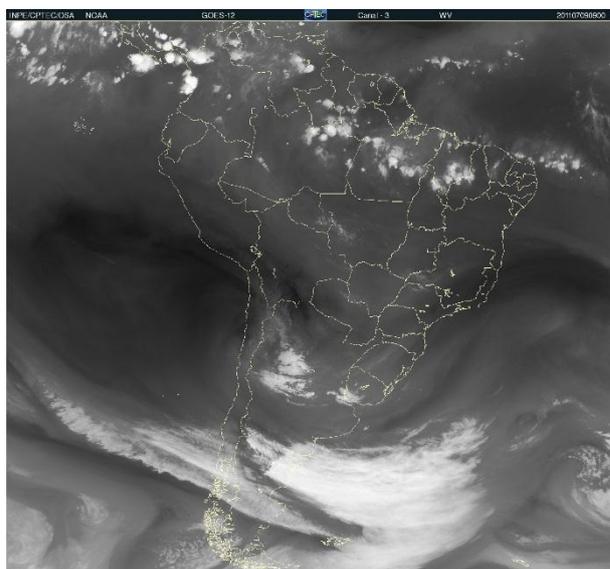
08/07/2011 – 09:00UTC



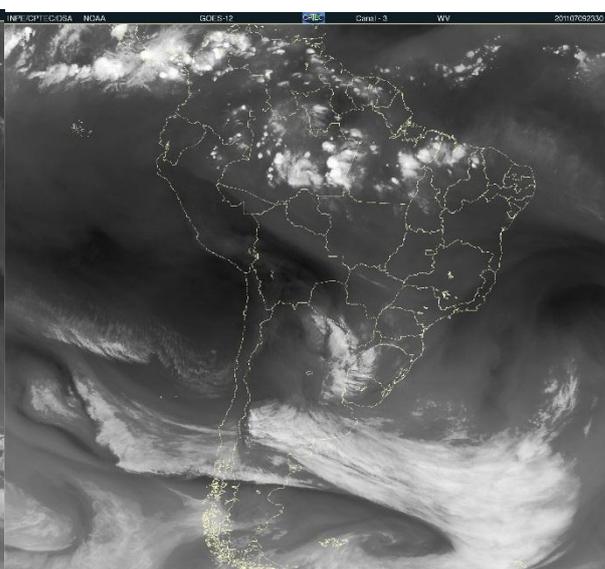
08/07/2011 – 23:30UTC



09/07/2011 – 09:00UTC



09/07/2011 – 23:30UTC

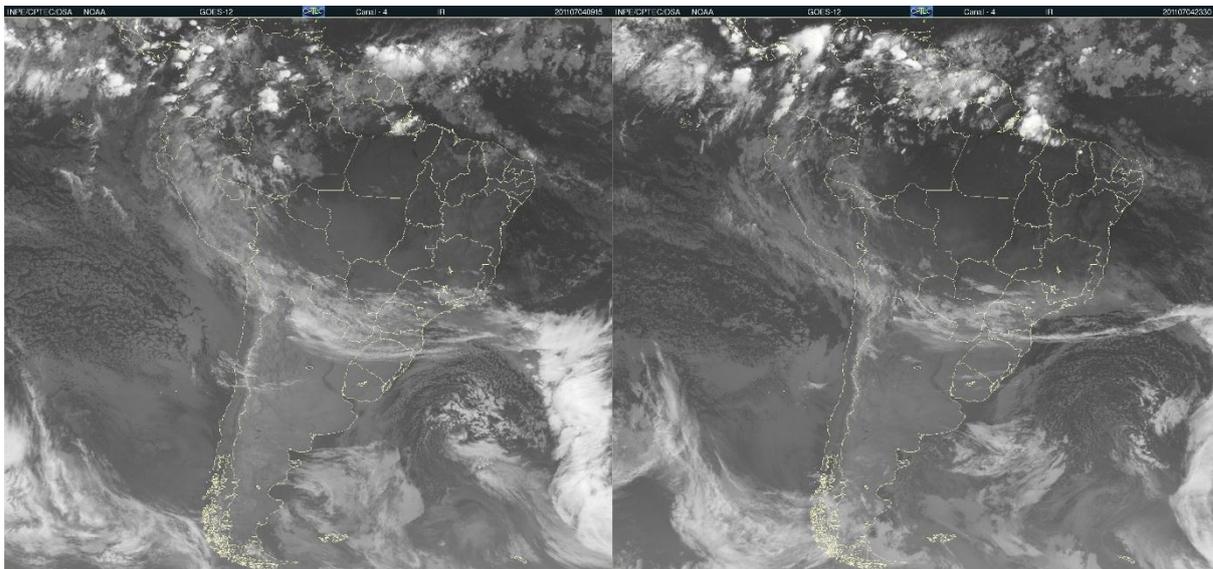


ANEXO A - continuação

b. Imagens GOES-13 canal-4 do infravermelho:

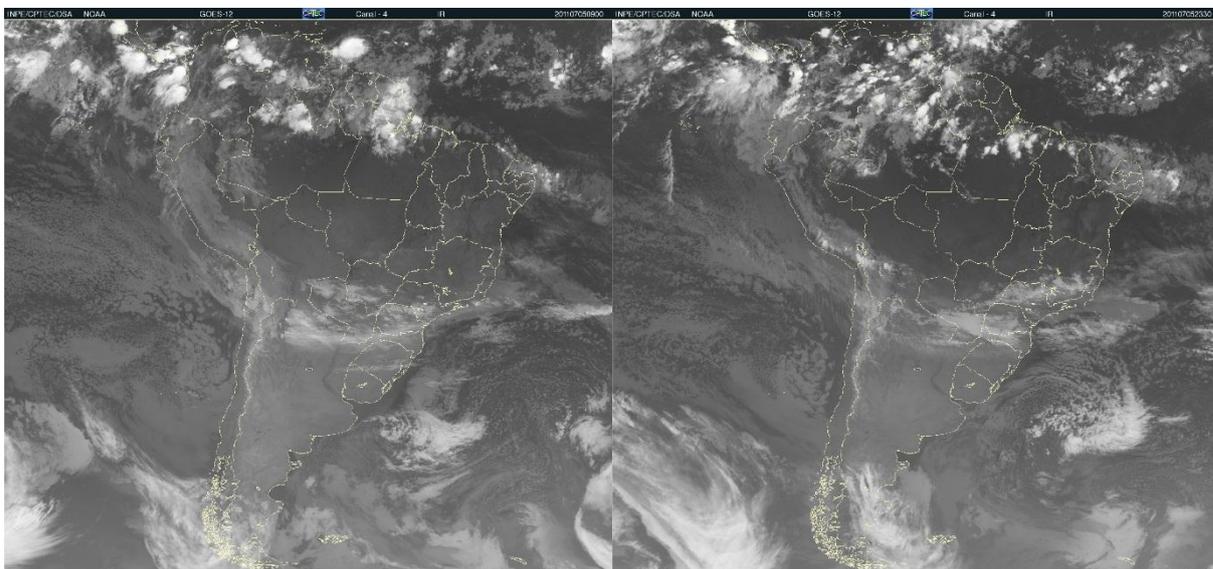
04/07/2011 – 09:15UTC

04/07/2011 – 23:30UTC



05/07/2011 – 09:00UTC

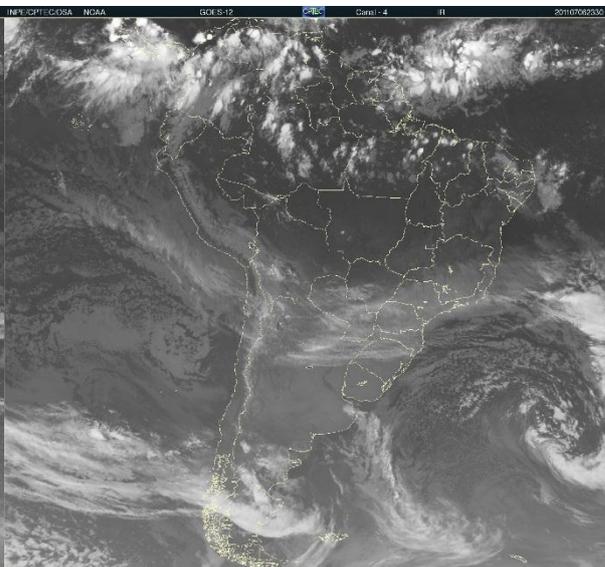
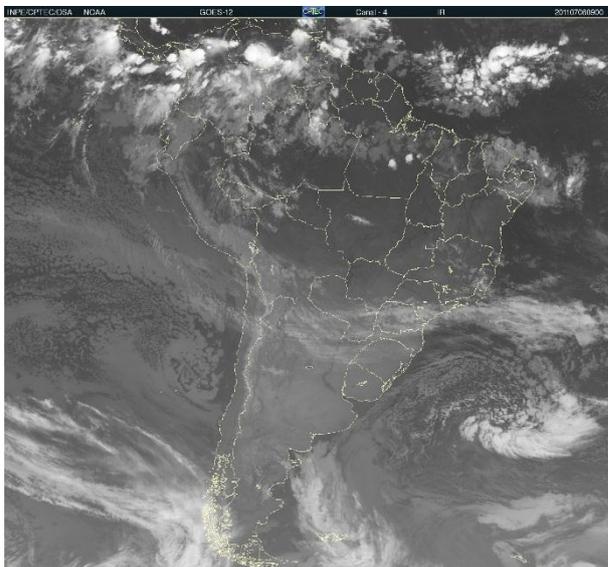
05/07/2011 – 23:30UTC



ANEXO A - continuação

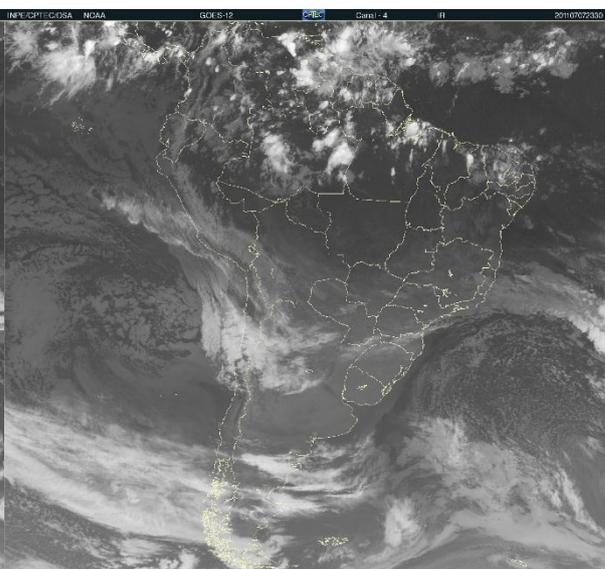
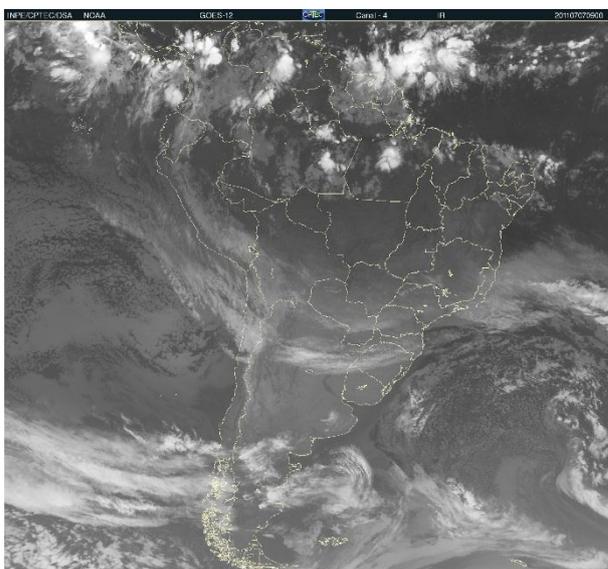
06/07/2011 – 09:00UTC

06/07/2011 – 23:30UTC



07/07/2011 – 09:00UTC

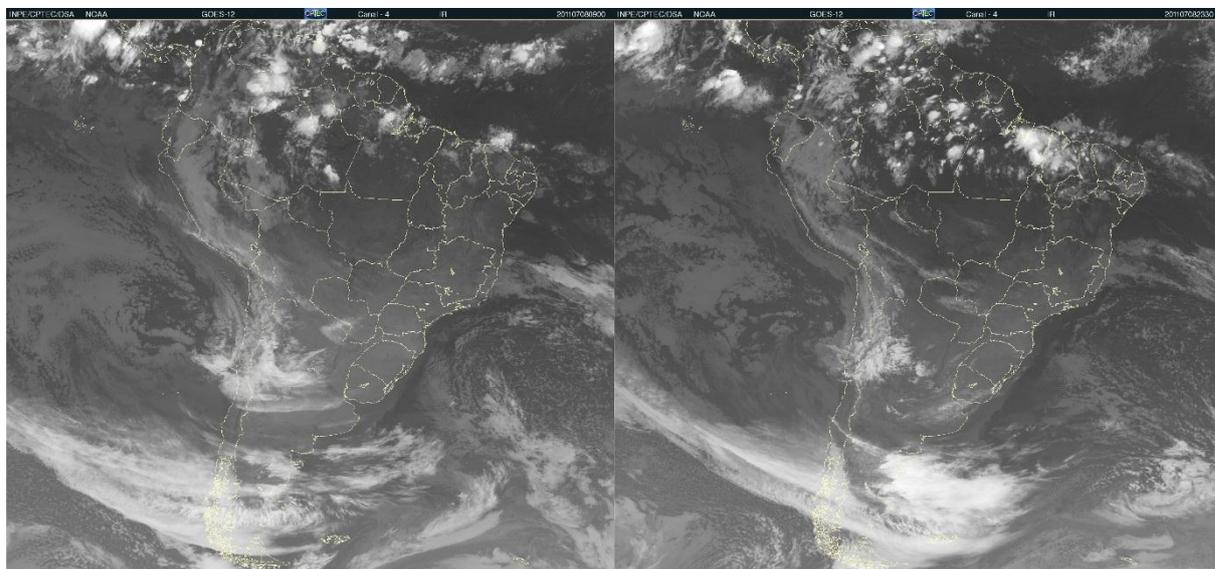
07/07/2011 – 23:30UTC



ANEXO A - continuação

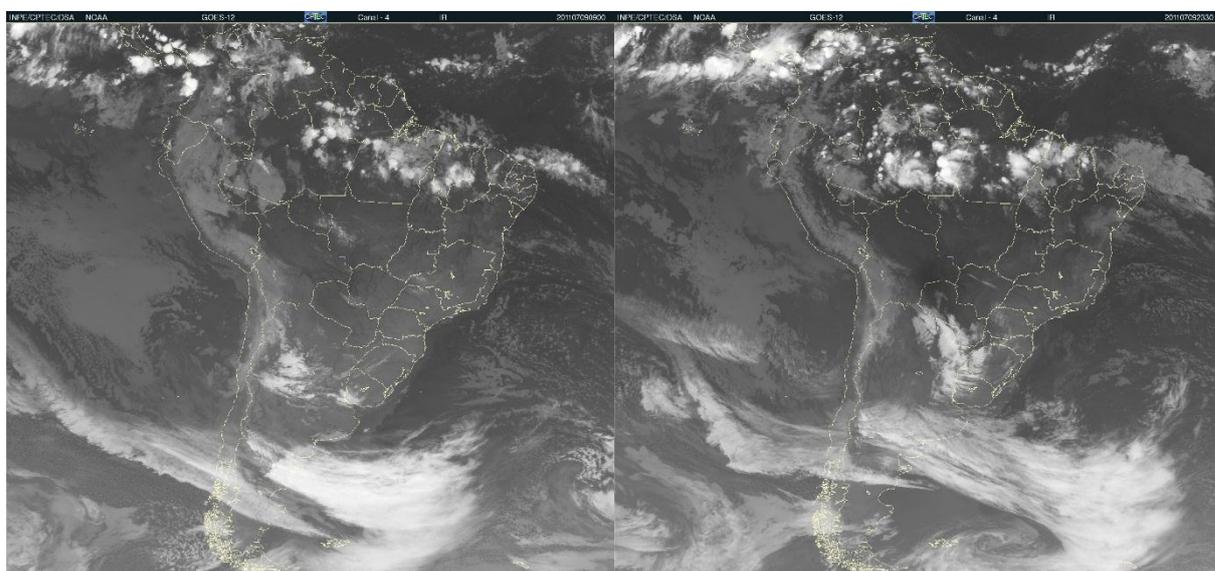
08/07/2011 – 09:00UTC

08/07/2011 – 23:30UTC



09/07/2011 – 09:00UTC

09/07/2011 – 23:30UTC

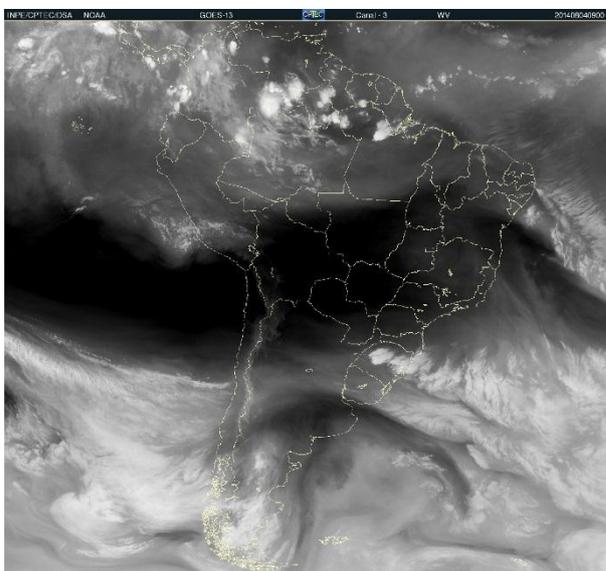


ANEXO B

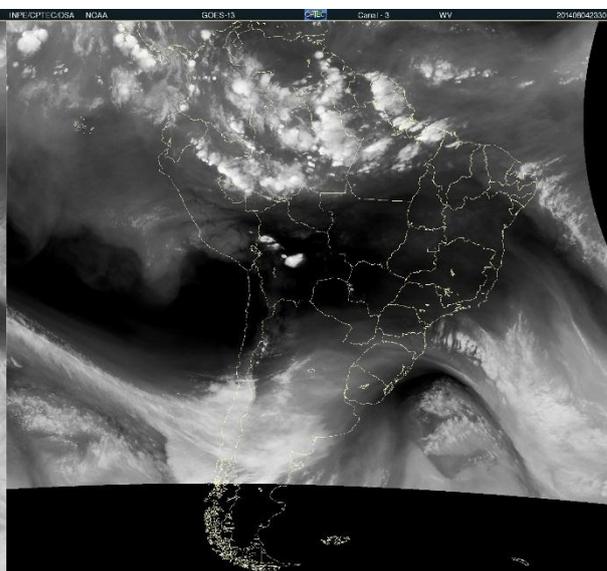
Imagens para estudo de caso de formação de geadas no mês de agosto de 2014 na cidade de Santa Vitória do Palmar. a. Imagens GOES-13 canal-3 do vapor d'água; b. Imagens GOES-13 canal-4 do infravermelho.

a. Imagens GOES-13 canal-3 do vapor d'água:

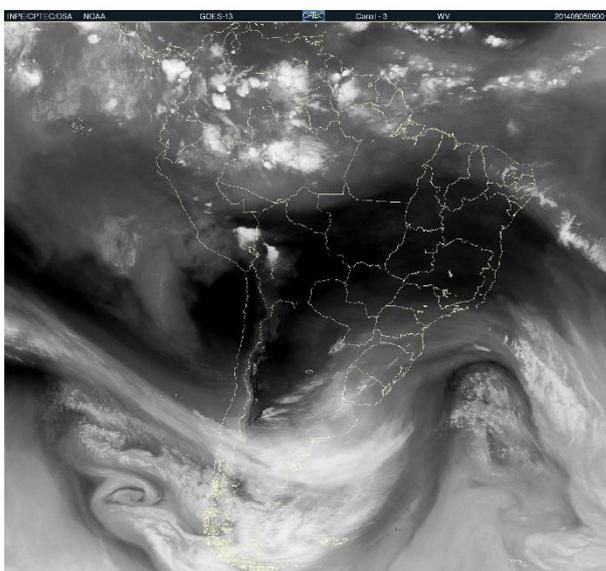
04/08/2014 – 09:00UTC



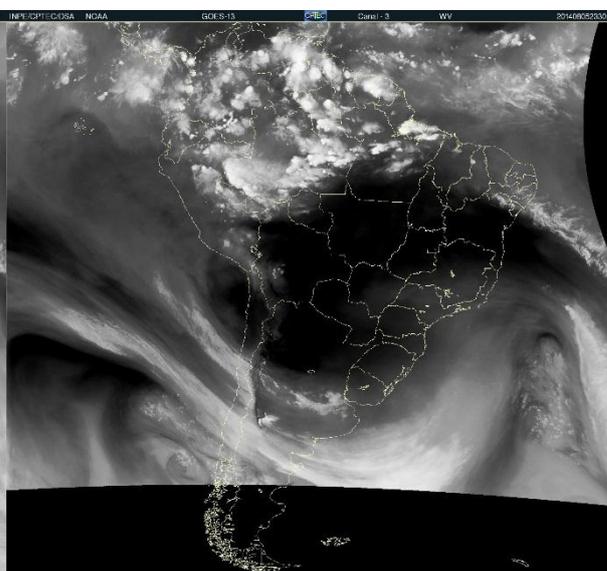
04/08/2014 – 23:30UTC



05/08/2014 – 09:00UTC

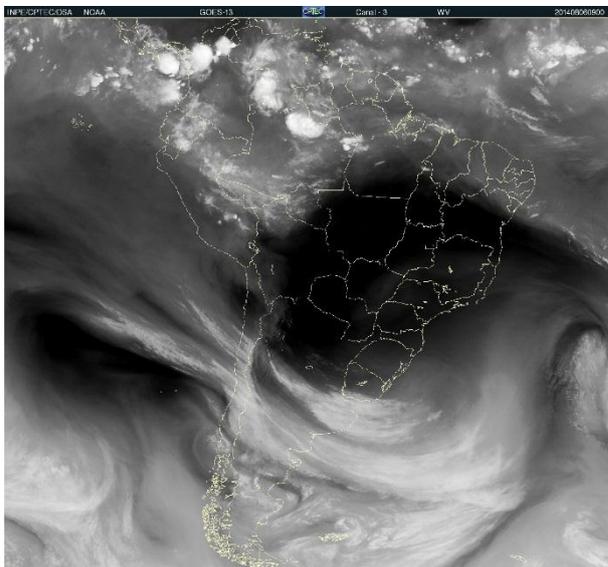


05/08/2014 – 23:30UTC

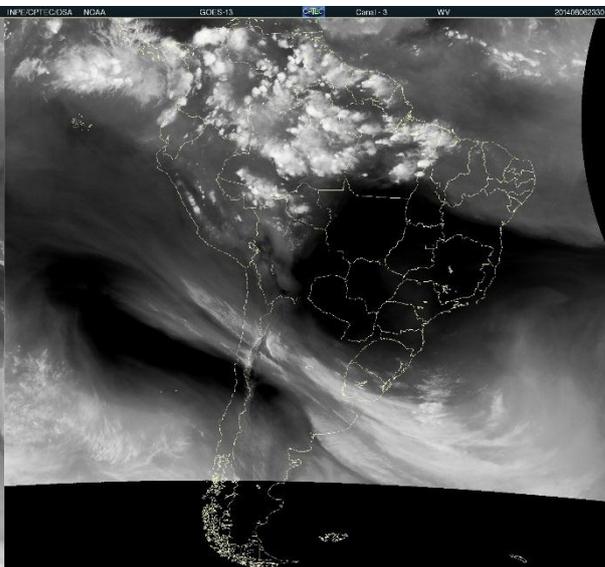


ANEXO B - continuação

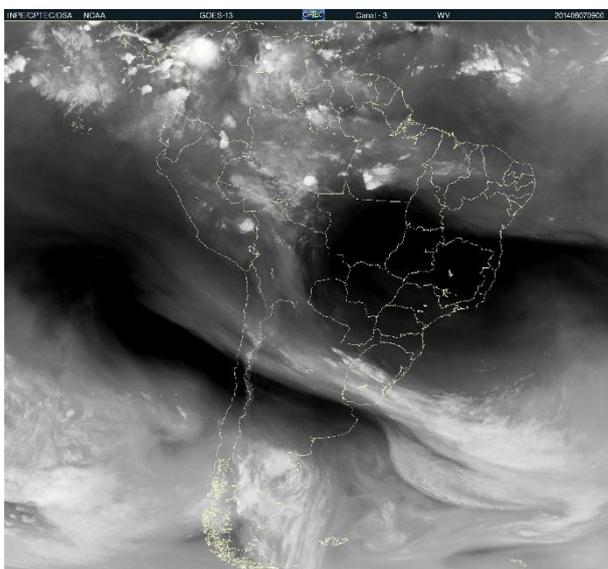
06/08/2014 – 09:00UTC



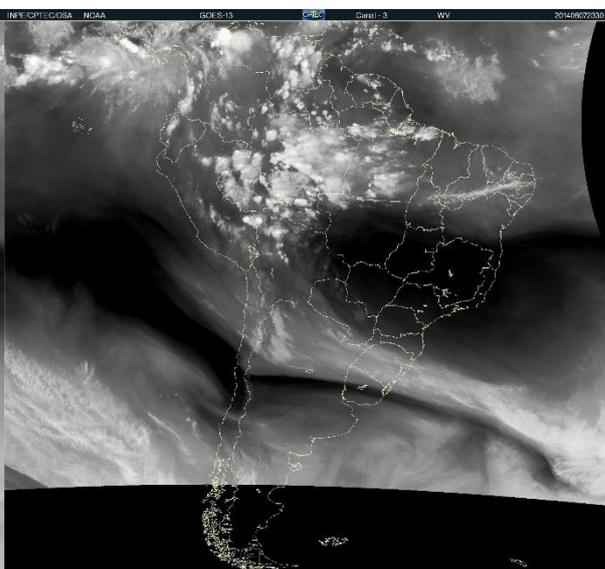
06/08/2014 – 23:30UTC



07/08/2014 – 09:00UTC

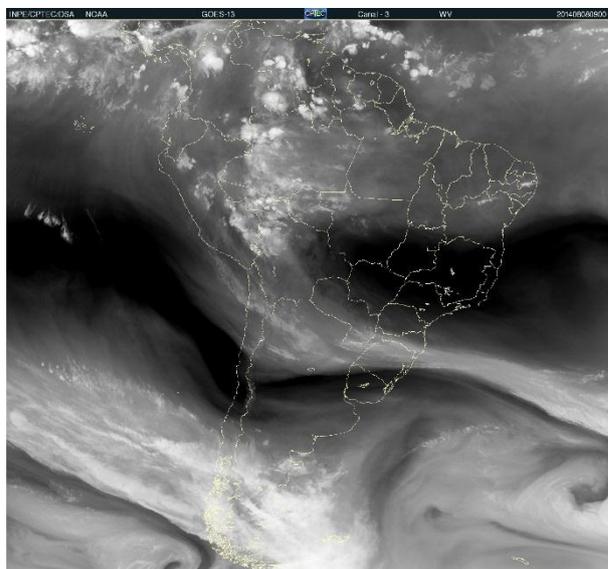


07/08/2014 – 23:30UTC

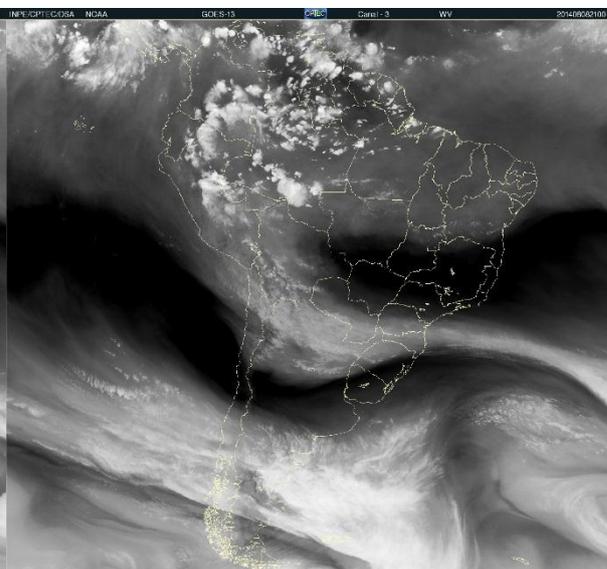


ANEXO B - continuação

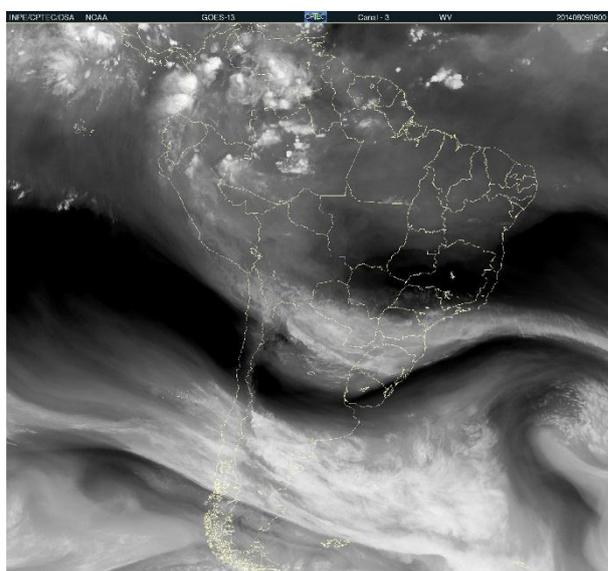
08/08/2014 – 09:00UTC



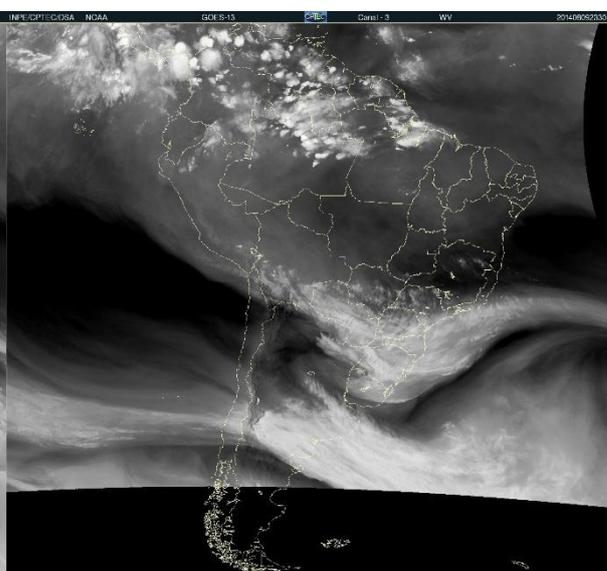
08/08/2014 – 21:00UTC



09/08/2014 – 09:00UTC

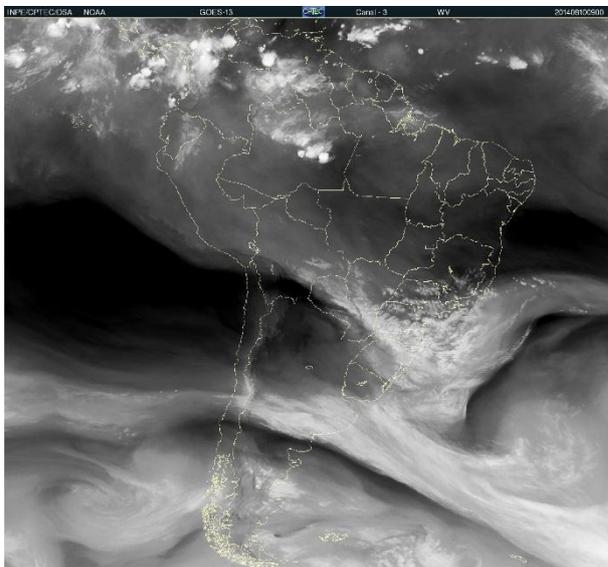


09/08/2014 – 23:30UTC

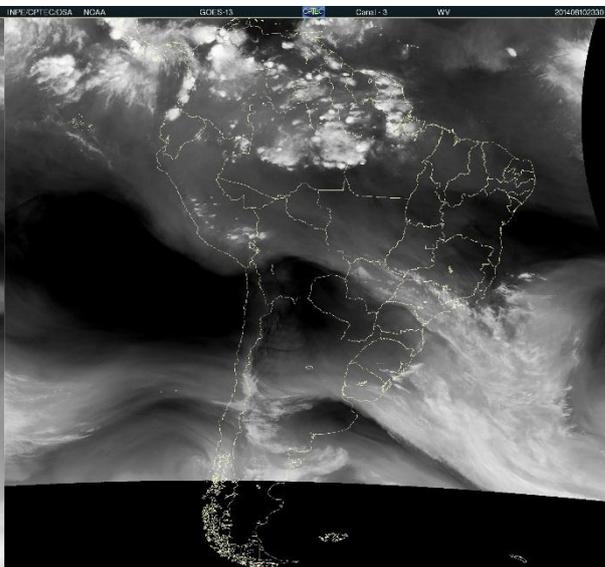


ANEXO B - continuação

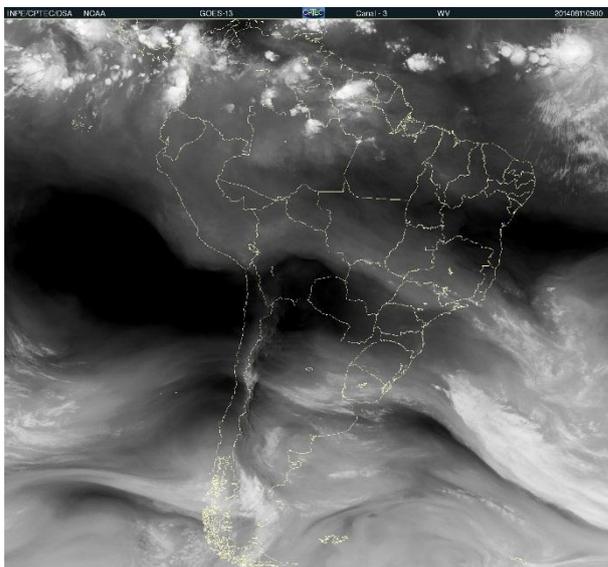
10/08/2014 – 09:00UTC



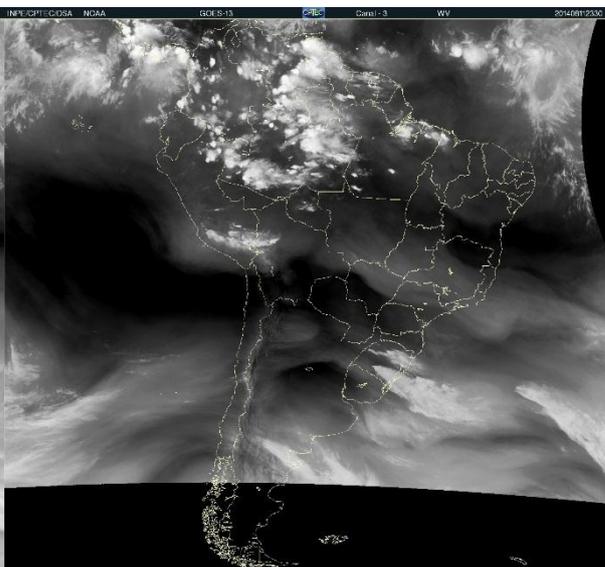
10/08/2014 – 23:30UTC



11/08/2014 – 09:00UTC



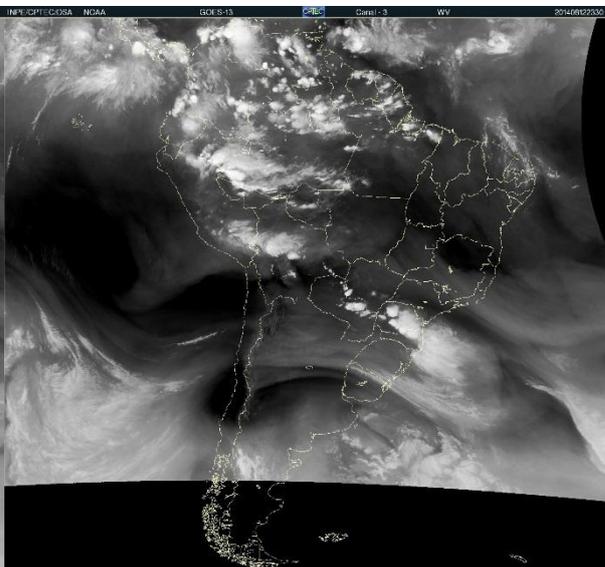
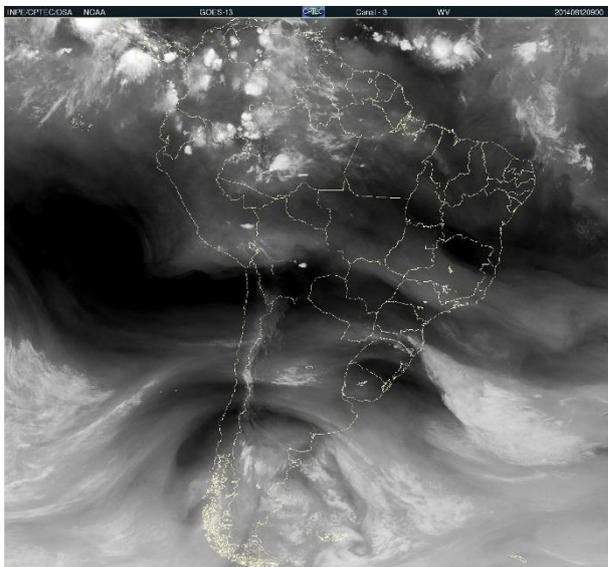
11/08/2014 – 23:30UTC



ANEXO B - continuação

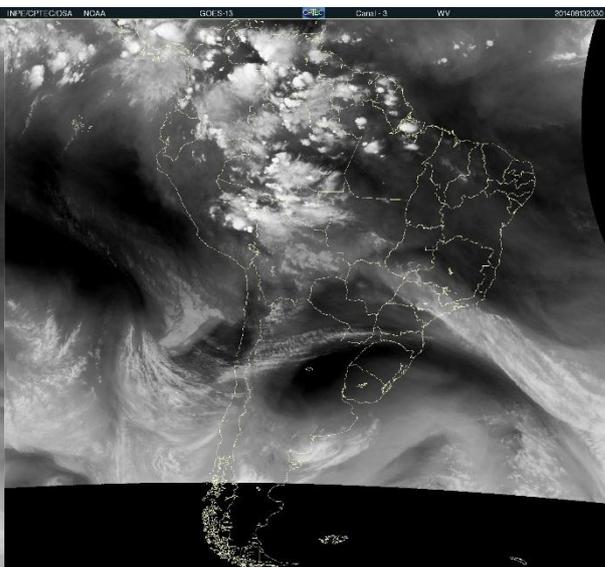
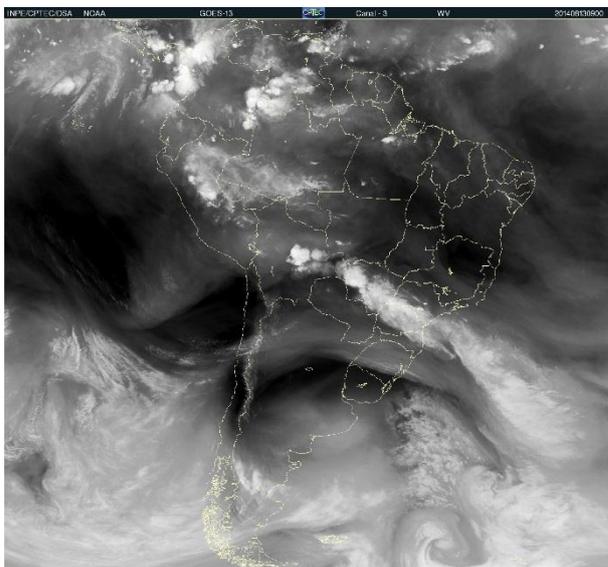
12/08/2014 – 09:00UTC

12/08/2014 – 23:30UTC



13/08/2014 – 09:00UTC

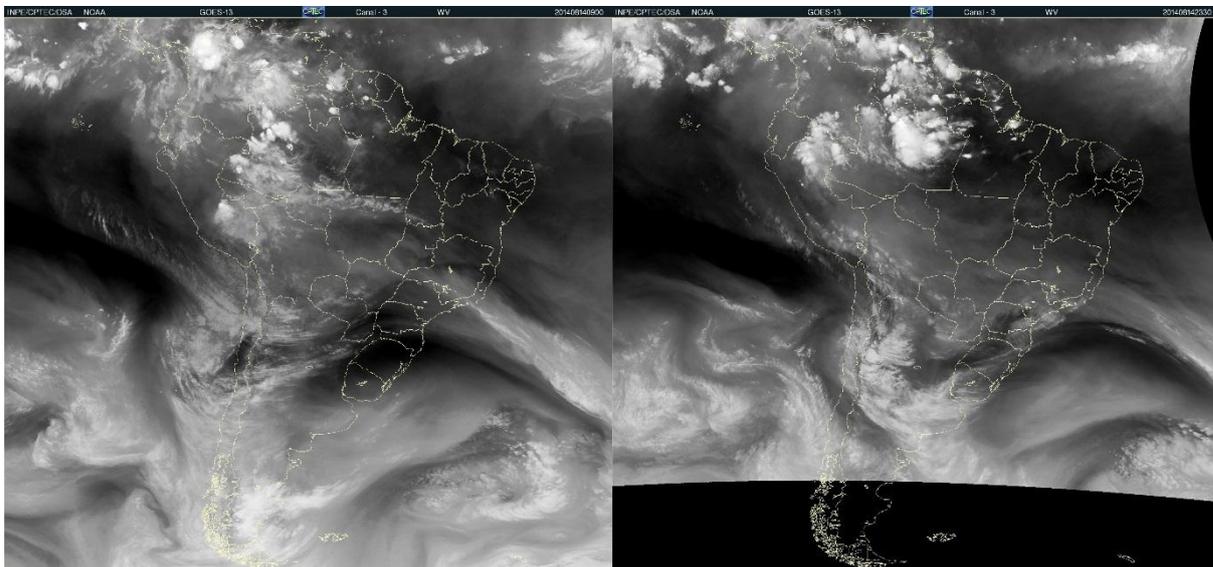
13/08/2014 – 23:30UTC



ANEXO B - continuação

14/08/2014 – 09:00UTC

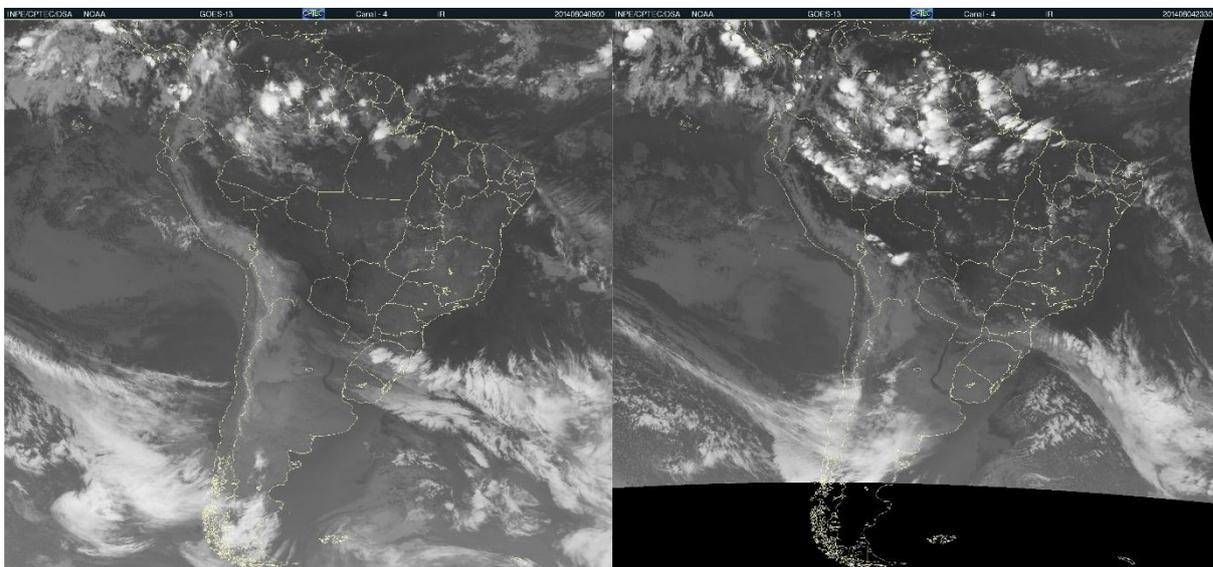
14/08/2014 – 23:30UTC



b. Imagens GOES-13 canal-4 do infravermelho:

04/08/2014 – 09:00UTC

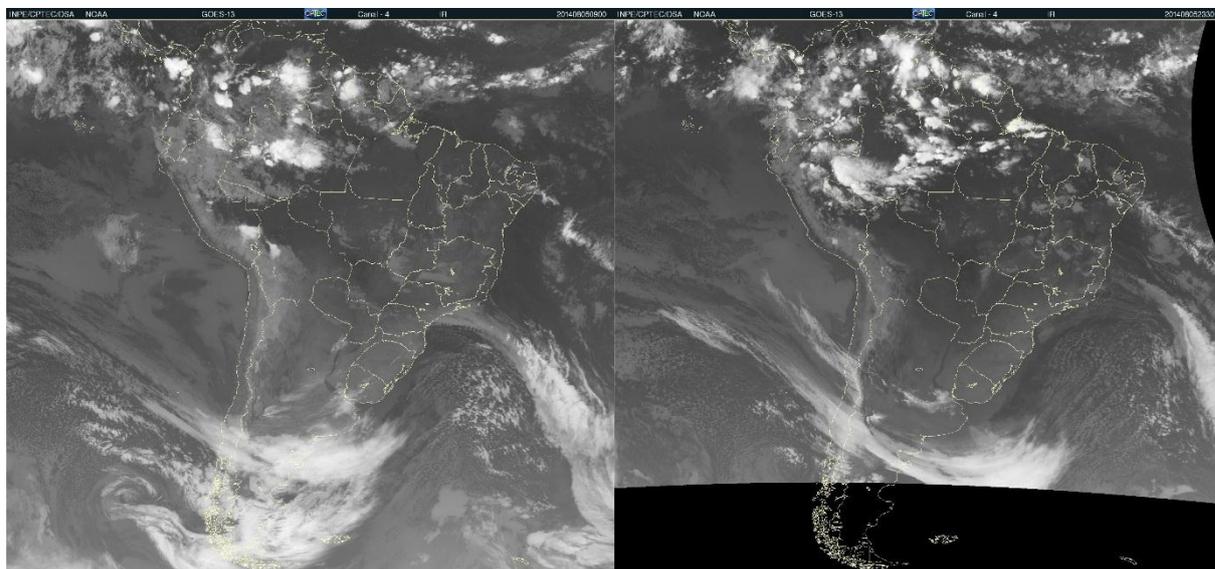
04/08/2014 – 23:30UTC



ANEXO B – continuação

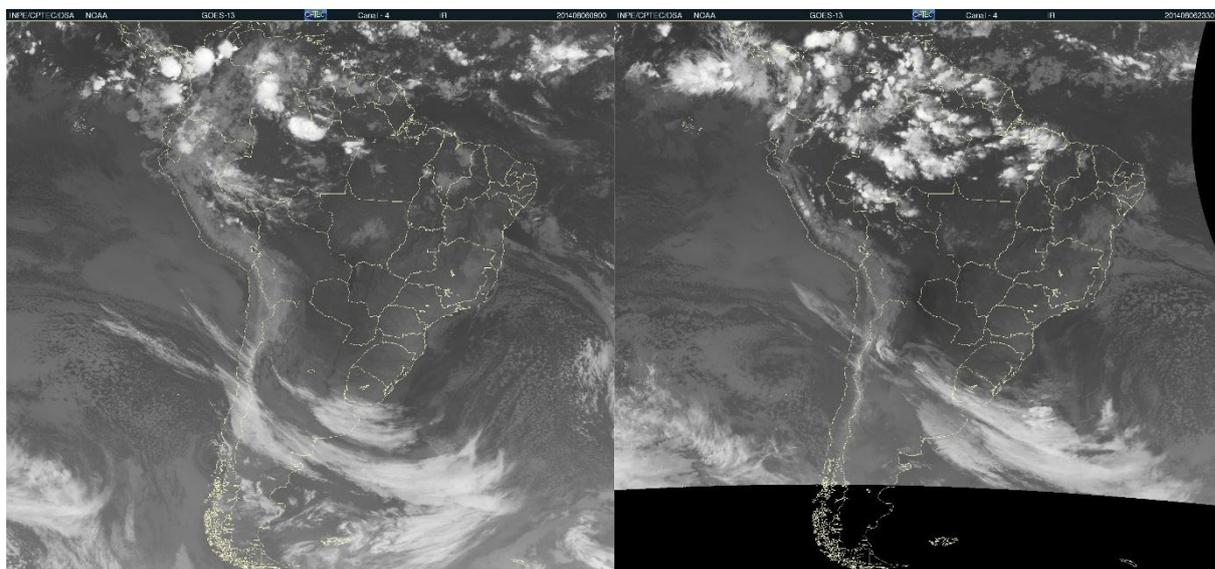
05/08/2014 – 09:00UTC

05/08/2014 – 23:30UTC



06/08/2014 – 09:00UTC

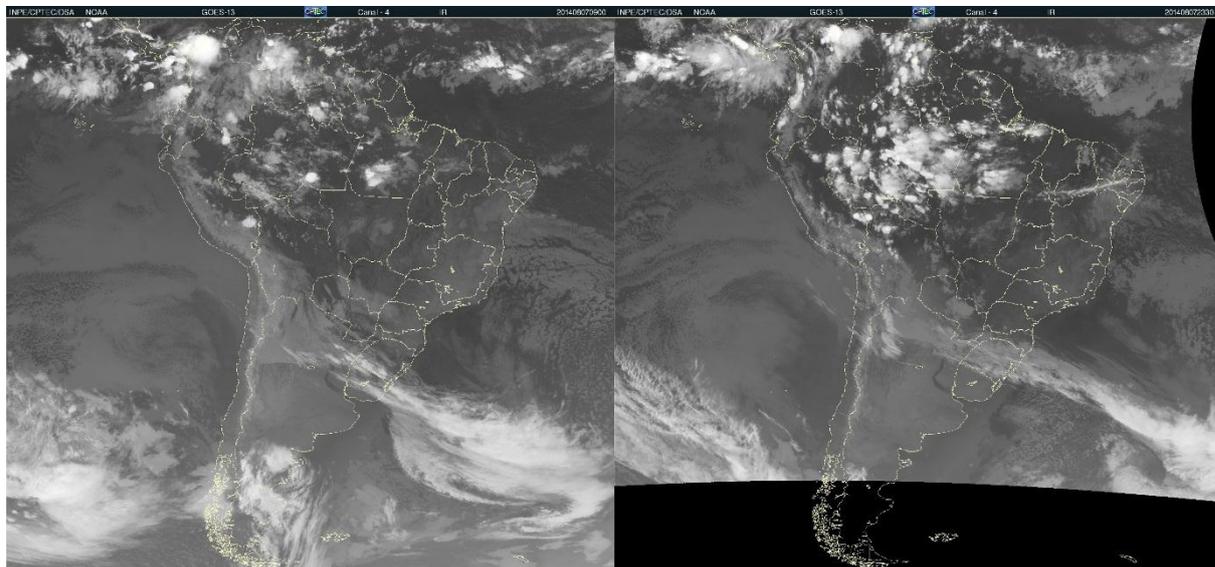
06/08/2014 – 23:30UTC



ANEXO B - continuação

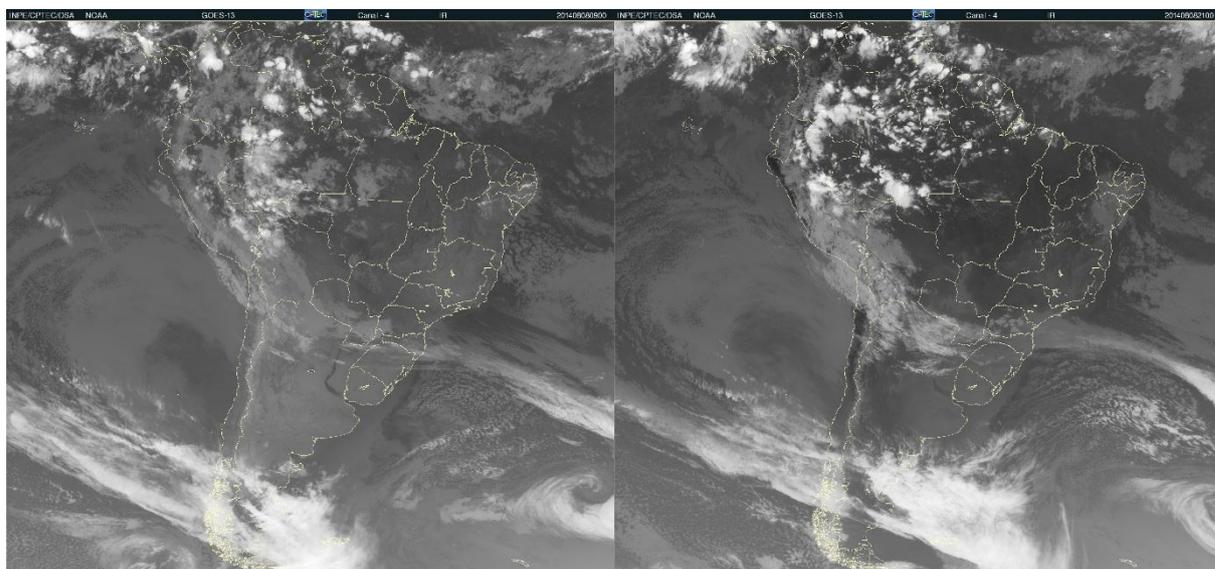
07/08/2014 – 09:00UTC

07/08/2014 – 23:30UTC



08/08/2014 – 09:00UTC

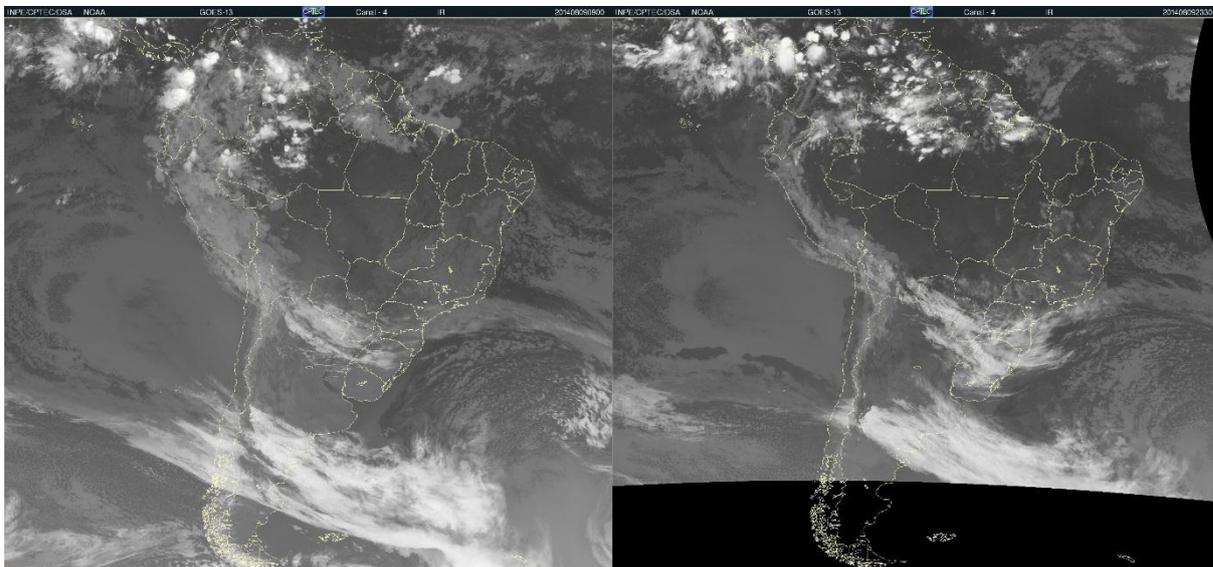
08/08/2014 – 21:00UTC



ANEXO B - continuação

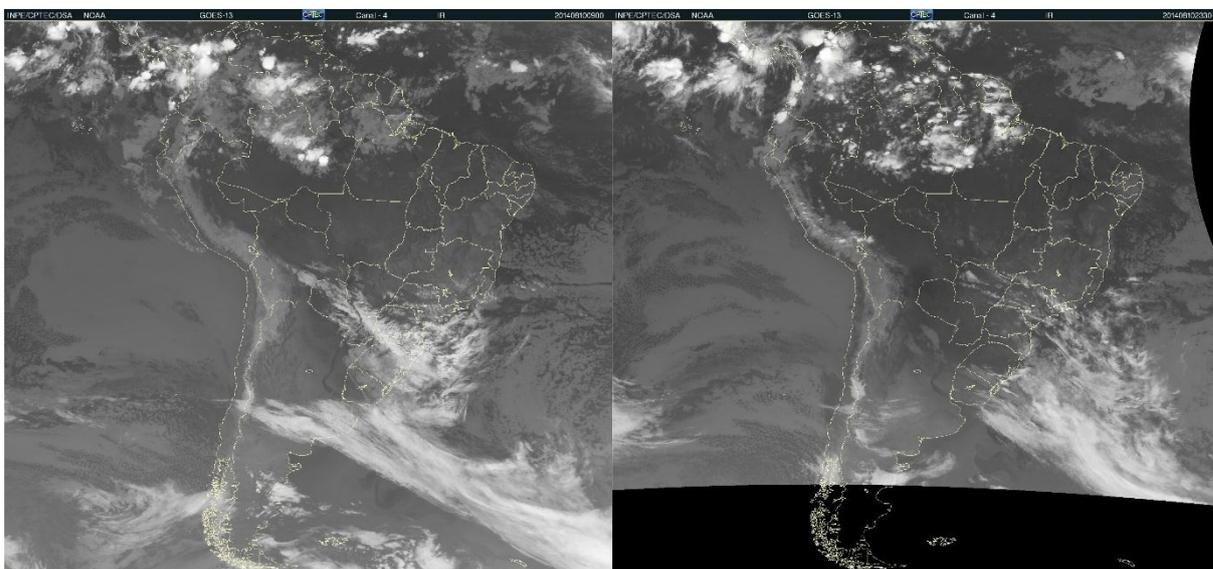
09/08/2014 – 09:00UTC

09/08/2014 – 23:30UTC



10/08/2014 – 09:00UTC

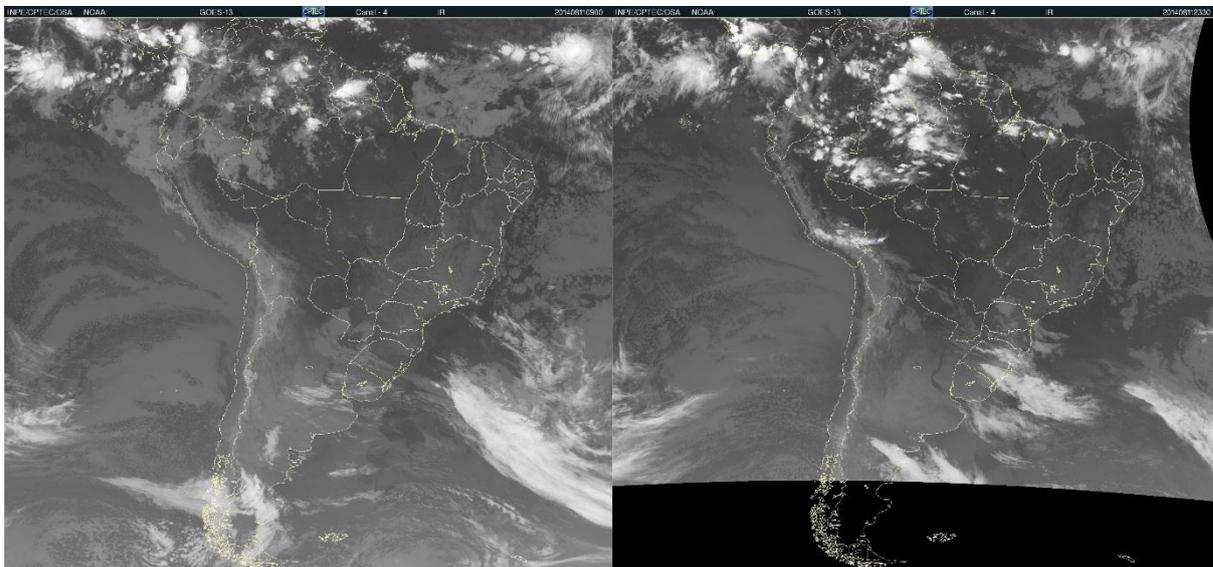
10/08/2014 – 23:30UTC



ANEXO B - continuação

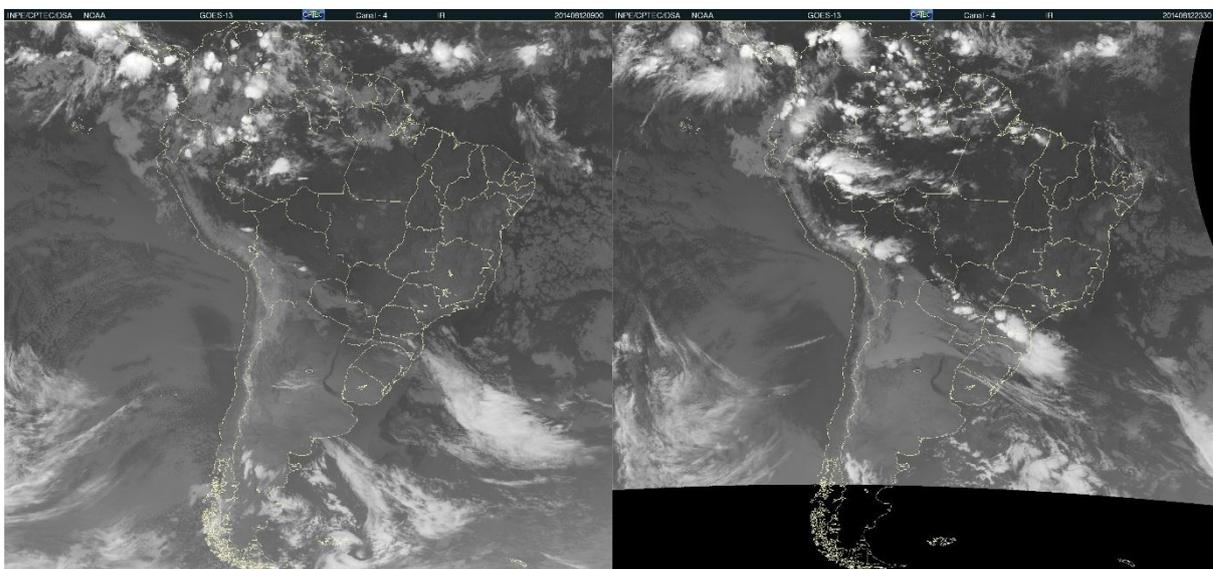
11/08/2014 – 09:00UTC

11/08/2014 – 23:30UTC



12/08/2014 – 09:00UTC

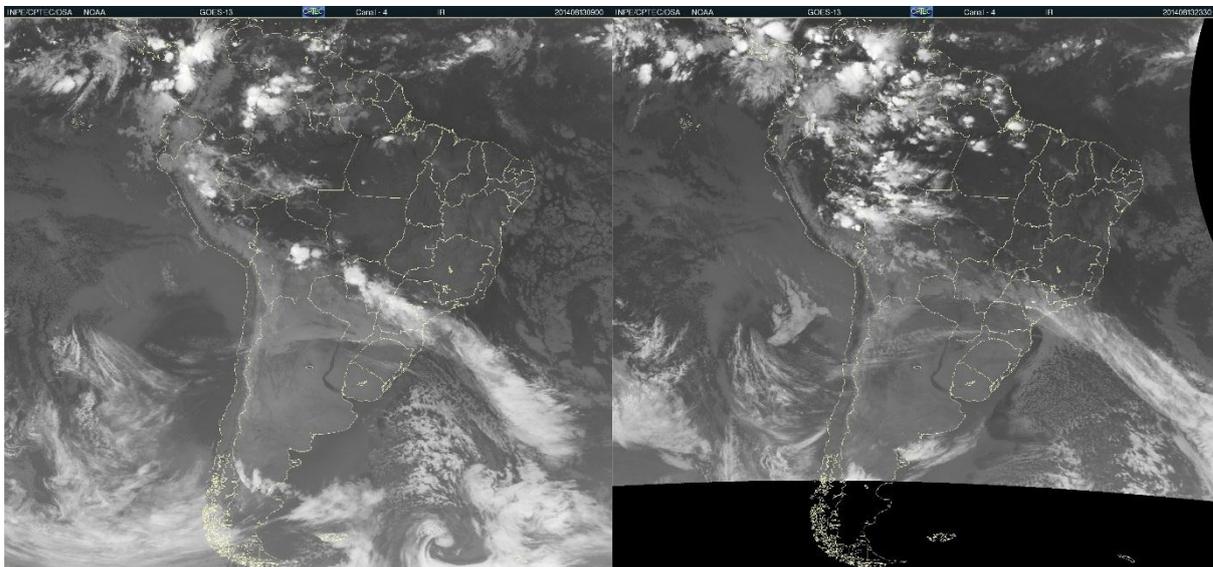
12/08/2014 – 23:30UTC



ANEXO B - continuação

13/08/2014 – 09:00UTC

13/08/2014 – 23:30UTC



14/08/2014 – 09:00UTC

14/08/2014 – 23:30UTC

