

EVALUACIÓN PRELIMINAR DE LAS PARAMETRIZACIONES FÍSICAS DEL MODELO WRF PARA UN CASO DE HELADA EN EL SUR DE BRASIL

Jeferson Machado¹, Mário Quadro², Camila Cardoso², Carlos Araújo⁴, Gabriel Rodrigues³, Natália Costa², Tuanny Rodrigues² y Lourenço de Paula²

¹Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências / Centro de Meteorologia de Bauru (IPMet) – Bauru/Brasil

²Instituto Federal de Santa Catarina – Florianópolis/Brasil

³Universidade Federal de Santa Catarina - Florianópolis/Brasil

⁴Epagri/Ciram - Florianópolis/Brasil

(Manuscrito recibido el 30 de octubre de 2015, en su versión final el 31 de agosto de 2016)

RESUMEN

A partir de simulaciones numéricas realizadas con el modelo WRF para un evento de helada en el sur de Brasil, en julio de 2013, es posible evaluar diferentes parametrizaciones físicas y determinar las que más se adaptan en estas condiciones meteorológicas. Aunque los resultados no demuestran grandes diferencias estadísticas, el conjunto de parametrizaciones que utiliza los esquemas Dudhia de onda corta, RRTM de onda larga, WSM6 para microfísica y el esquema YSU para capa límite planetaria, fue el más ajustado en un evento de helada, ya que presenta los valores más bajos de ME y RMSE para la temperatura mínima, humedad relativa y velocidad del viento. Sin embargo, no se puede determinar qué parametrización influye más a partir de estos resultados. Es importante destacar que las parametrizaciones aún deben probarse con más eventos de helada simuladas por el modelo WRF, con la finalidad de obtener un análisis estadístico más robusto.

Palabras clave: Helada, Modelo WRF, Parametrizaciones físicas.

PRELIMINARY EVALUATION OF WRF PHYSICAL PARAMETERIZATIONS FOR A FROST EVENT IN SOUTHERN BRAZIL

ABSTRACT

Based on numerical simulations performed with the WRF model for a frost event in Southern Brazil in July 2013, it was possible to test different physical parameterizations and evaluate these parameterizations in these weather conditions. Although the results do not show considerable statistical differences, the experiment utilizing the Dudhia for shortwave radiation, RRTM for longwave radiation schemes, WSM6 for microphysics and YSU for boundary layer showed better results in the frost event, as it had the lowest values of ME and RMSE for the minimum temperature, relative humidity and wind speed. However, it was not possible to determine which parameterization produce the largest impact from these experiments. A greater number of frost events must be simulated with WRF model in order to

obtain a more robust statistical analysis.

Keywords: Frost, WRF Model, Physical Parameterizations.

1. INTRODUCCIÓN

Existen fenómenos que no están vinculados a la convección profunda e intensa, pero que pueden generar grandes pérdidas económicas, tales como las sequías, olas de calor, heladas, etc. A estos fenómenos, se los consideran como adversos, sin características de convección, pero son potencialmente peligrosos para las personas o para el país (Seluchi, 2009). De acuerdo con Pereira et. al (2001) la ocurrencia de heladas en Brasil es un fenómeno frecuente al sur de 19° S, llegando a los estados de São Paulo (SP), Mato Grosso do Sul (MS), Minas Gerais (MG), Paraná (PR), Santa Catarina (SC) y Rio Grande do Sul (RS). Las heladas ocurren con relativa frecuencia en el sur de Brasil debido a la combinación de dos factores principales: (i) la incidencia de los sistemas frontales fríos y anticiclones migratorios; (ii) la presencia de una topografía compleja, que incluye elevaciones superiores a los 1000 m. La combinación de la topografía y la actividad baroclínica hace que la región de montaña de RS y de SC sea una de las regiones más favorables para la formación de las heladas en Brasil (Seluchi, 2009).

En general, se puede decir que las heladas se asocian a la incursión de las masas de aire polares que vienen de los mares subantárticos, especialmente de Mar de Weddell y el Mar de Ross. Con todo, estas masas se modifican a lo largo de su desplazamiento, y reciben la designación de masas de aire polar marítimo o polar continental. Es importante resaltar que la incidencia y la intensidad de las heladas dependen, en gran medida, de la trayectoria y de la velocidad de desplazamiento de las masas de aire involucradas (Seluchi y Nery, 1992; Seluchi, 2009). Así pues, las heladas más intensas se asocian con el anticiclón migratorio frío que se mueve más rápidamente, siguiendo una trayectoria continental meridional. Por otro

lado, las masas de aire polar marítimas, que se mueven lentamente a través del mar, adquieren gradualmente la temperatura y la humedad de la superficie del océano, alcanzan el continente ya muy modificadas y pierden sus características polares. En estas ocasiones, las temperaturas no tan bajas y la alta humedad provocan heladas menos intensas (Seluchi, 2009).

Müller y Ambrizzi (2007) realizaron experimentos numéricos con un modelo de circulación general en dos estados básicos de la atmósfera con características opuestas. Estos investigadores concluyeron que existen condiciones atmosféricas que promueven o inhiben el desarrollo de los eventos extremos fríos en el sureste de América del Sur. Cuando el estado básico promueve la propagación de ondas de Rossby a lo largo de los chorros subtropicales y polares sobre el océano Pacífico, es decir, trayectorias claramente zonales, el tren de ondas se modifica antes de llegar al continente. En esta situación, se establece una fuerte anomalía de viento del sur, y su dinámica resulta en la intensificación de la circulación anticiclónica en el sur del continente. Esta condición favorece la ocurrencia de heladas de gran extensión y duración temporal, además de ocurrir con mayor frecuencia. Müller y Ambrizzi (2007) también relatan que, cuando el estado básico de la atmósfera no presenta las condiciones adecuadas, la frecuencia de ocurrencia de las heladas será mínima o cero.

La variabilidad interanual también influye en la frecuencia de ocurrencia de heladas en América del Sur. Müller (2006), relaciona la cantidad de heladas con cada uno de los eventos de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) ocurridos para el periodo 1961-1990 en la región de la Pampa Húmeda. De acuerdo con sus resultados, la variabilidad interanual en la frecuencia de ocurrencia de heladas en la Pampa Húmeda se explica, en parte, por la ocurrencia de las

fases cálida y fría del ENOS, la cual es inversa durante estas. Durante el invierno de los años de El Niño (La Niña) el número de heladas es, en general, inferior (superior) al promedio. En cambio, en otoño y en primavera, el número de heladas se condiciona a la etapa de desarrollo del fenómeno, sobre todo en El Niño. Por lo tanto, la helada es un tema de mucho interés para los meteorólogos que tratan de difundir avisos meteorológicos para alertar a la sociedad y, en especial, a los agricultores (Santos et al, 2013).

Debido al frecuente desarrollo de los sistemas computacionales, pronosticar, con cinco o más días de anticipación, la ocurrencia de heladas parece un desafío posible (Seluchi, 2009). Así pues, se hace viable ejecutar modelos con muy alta resolución y sistemas de predicción por ensambles, tanto regionales como globales. Además, este desarrollo de modelos es constante y así son cada vez, mejores, puesto que los modelos de mayor resolución permiten una representación explícita de la convección y utilizan una parametrización compleja de los procesos microfísicos, permitiendo la realización de simulaciones no hidrostáticas a escala convectiva.

Es de destacar que algunas investigaciones sobre predicción de heladas y evaluación de los modelos atmosféricos para este fin se encuentran en la literatura. Entre las investigaciones que evalúan la predicción de heladas utilizando modelos numéricos podemos mencionar los estudios realizados por Prabha et al (2007) y por Prabha y Hoogenboom (2008), que informan el uso de diferentes parametrizaciones del modelo WRF (Weather Research and Forecasting) para simulaciones de eventos de heladas, además de aplicar un índice de predicción de este fenómeno para el estado de Georgia, en Estados Unidos. En el estudio realizado por Prabha et al. (2007), se utiliza el modelo WRF versión 2.2 para tres dominios (9, 3 y 1 km), con las siguientes parametrizaciones: WRF Single-Moment 3-class (WSM3) para microfísica, Kain-Fritsch para cúmulos, MM5 para onda corta y, esquema RRTM para parametrización

de onda larga. Para la capa límite planetaria (CLP) se utilizan diferentes parametrizaciones: Mellor-Yamada-Janjic (MYJ) y el esquema de la Universidad de Yonsei (YSU) combinadas con tres modelos de suelo: Noah, SLAB y RUC. Los resultados se muestran para el segundo dominio que cuenta con 3 km de resolución horizontal. Para la temperatura del aire, se observa una subestimación en todos los conjuntos de parametrizaciones y, para la temperatura mínima, la tendencia de subestimación es menor para la combinación YSU-Noah. Por tanto, esta combinación es utilizada por Prabha y Hoogenboom (2008) en estudios de casos de ocurrencia de heladas en el sureste de los Estados Unidos. En el mismo estudio, se define un índice de heladas con base en dos parámetros: la integración de la temperatura del aire cuando está por debajo de 0° C y el número de horas en que esta temperatura se mantuvo por debajo de 0 ° C. Conforme los resultados encontrados por los autores, la exactitud de la previsión de temperatura mínima fue del 90

Evaluaciones con diferentes parametrizaciones de variables de superficie del WRF también se encuentran para el sureste de América del Sur (Ruiz et al., 2010). Sin embargo, los autores utilizan el modelo con una resolución horizontal de 40 km. Las parametrizaciones fijas utilizadas por los autores son las siguientes: Dudhia para la radiación de onda corta, RRTM para la radiación de onda larga y ETA para parametrización de microfísica. La parametrización de la convección, CLP y el modelo de suelo se evalúan con diferentes esquemas. Se encuentra que las variables de superficie son muy sensibles al modelo de suelo-superficie, y el esquema de Noah es el que mejor representa la temperatura del aire en superficie, combinado con el esquema YSU para la CLP y Kain-Fritsch para cúmulos.

En Brasil, existen pocos estudios que relacionan modelación atmosférica con las heladas. En este contexto, Santos et al. (2013) realizan una evaluación de un índice de ocurrencia de heladas para el modelo Eta con 15 km de resolución horizontal (ETA 15). Según los autores, el índice

se obtiene mediante las variables meteorológicas de temperatura del aire a 2 m, la cobertura de nubes, la presión atmosférica, el viento y la humedad, extraídos en forma horaria, del modelo ETA 15, en varias partes del sur y sudeste de Brasil. De acuerdo con los resultados obtenidos por los autores, la evaluación del índice de heladas demuestra un desempeño satisfactorio, principalmente en las previsiones a 24h y 48h. La mayoría de los errores se asocian a una sobreestimación de la temperatura a 2 metros. Por otro lado, la subestimación de las temperaturas, que son las más problemáticas, se observan en menor número y, sobre todo, en los pronósticos a 72h y 96h.

Se ha publicado, recientemente, el trabajo de Mollmann Junior et al. (2016), con el fin de probar la sensibilidad de las parametrizaciones del modelo WRF al cuantificar las variables presión atmosférica, temperatura, humedad relativa y precipitación, durante el invierno de 2014 en el estado de Rio Grande do Sul. Según los autores, a excepción de la variable precipitación, los resultados no son capaces de demostrar cuál es la mejor combinación de parametrización, ya que no indican diferencias significativas entre sus errores.

En virtud de la escasez de investigaciones acerca de la mejora de previsión de heladas y de que estas, en Brasil, tienen fuerte impacto en la agricultura y la ganadería, es de suma importancia la evaluación de los modelos atmosféricos de alta resolución y el uso de índices para predecir este fenómeno.

Teniendo en cuenta lo anterior, el objetivo de este trabajo es evaluar diferentes parametrizaciones físicas del modelo WRF y determinar las más adecuadas para un evento de helada ocurrido en julio de 2013 en el sur de Brasil.

El trabajo se organiza de la siguiente manera: La sección 2 proporciona una descripción del modelo y los datos utilizados y describe la metodología utilizada. La sección 3 aporta un breve análisis sinóptico del evento de helada y muestra un

análisis estadístico y una discusión de los resultados para las diferentes parametrizaciones del modelo WRF. Finalmente, en la sección 4, se presentan las conclusiones.

2. DATOS Y MÉTODOS

Para el desarrollo de este trabajo, se utiliza la versión 3.6.1 del modelo regional WRF. Según lo descrito por Zepka (2011) y Skamarock et al (2008), el modelo WRF es parte de un sistema de modelización numérica del ambiente no hidrostático totalmente compresible, desarrollado tanto para fines de investigación como para las operaciones en diferentes escalas espaciales, desde pocos metros a miles de kilómetros. Es de destacar que su desarrollo es continuo, y se realizan actualizaciones frecuentemente.

En relación a su estructura, el WRF posee dos núcleos dinámicos, un sistema de asimilación de datos, y una arquitectura de software que permite la aplicación de la computación paralela para realizar las simulaciones (Skamarock et al., 2008). En este estudio, se utiliza el núcleo dinámico Advanced Research WRF (ARW). Las parametrizaciones se implementan en módulos separados, organizadas en cinco secciones principales: (i) microfísica de nubes; (ii) los procesos convectivos (Cúmulos); (iii) cambios y transportes en la capa límite planetaria turbulenta; (iv) procesos de radiación y (v) la interacción de los procesos de superficie. Una descripción más detallada de los esquemas de parametrización y los diferentes tipos utilizados en el modelo WRF pueden obtenerse en Zepka, (2011), en Bender (2012) y en el sitio web que proporciona el modelo: http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/users_guide_chap5.htm#_Description_of_Namelist.

Según Zepka (2011), para obtener resultados satisfactorios con respecto a la previsibilidad de una tormenta en sí o cualquier fenómeno adverso de tiempo caracterizado por dimensiones espaciales y de tiempo muy reducido, son

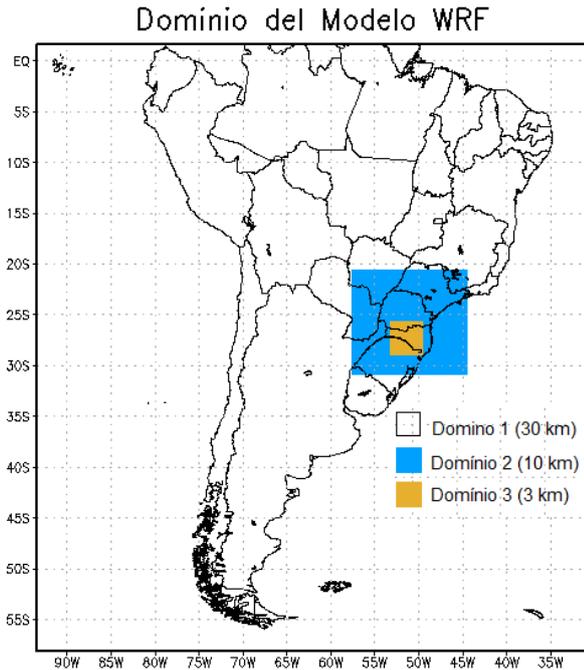


Figura 1: Dominios utilizados en el modelo WRF para las tres simulaciones.

Esquema	Microfísica	Cúmulos	Capa superficial	Modelo suelo-superficie	Capa Limite Planetaria	Radiación de onda corta/larga
P_01	New Thompson	Grell-Devenyi	MM5	Noah	YSU	RRTMG/RRTMG
P_02	WSM6	Grell 3D	MM5	Noah	YSU	Dudhia/RRTM
P_03	New Thompson	Grell-Devenyi	ETA	Noah	MYJ	RRTMG/RRTMG

Tabla I: Diferentes esquemas de parametrizaciones usadas en las simulaciones.

necesarios datos de entrada de alta calidad y con altas resoluciones temporales y espaciales, así como un modelo de alta resolución. En virtud de la importancia de la calidad de los datos de entrada para el modelo WRF, se utiliza, en este trabajo, el reanálisis del ERA-Interim (ERA-I) como condición inicial y de contorno para las simulaciones numéricas de alta resolución que se realizan. Estos datos son producidos por el European Center for Medium-Range Weather Forecasting (ECMWF), disponible en una malla con una resolución de $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ de latitud por longitud y 37 niveles de resolución vertical, en los horarios de 00, 06, 12 y 18 UTC (Simmons et al., 2007).

Siguiendo diferentes estudios que evalúan el desempeño de diferentes parametrizaciones en el Hemisferio Norte y en América del Sur (Prabha et al., 2007; Prabha y Hoogenboom, 2008; Ruiz et al., 2010; Zepka, 2011), se realizan tres simulaciones con diferentes parametrizaciones utilizando el Cluster del proyecto CT-INFRA, en el Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) (Brasil y Quadro, 2014). El período elegido es el de las 00 UTC del día 23 hasta las 18 UTC del día 25 de julio de 2013, y se utilizan 3 dominios anidados con resolución horizontal de 30, 10 y 3 km (Figura 1), 37 niveles de resolución vertical, con salidas disponibles cada 3 horas y ejecutado durante un periodo de 66 horas para cada simulación realizada. La Tabla I muestra las tres combinaciones de parametrizaciones usadas, denotadas por P_01, P_02 y P_03. En la retícula de 3 km de resolución no se utiliza parametrización de la convección. El criterio para la elección de las parametrizaciones utilizadas es el siguiente: La simulación P_01 es la simulación control. La simulación P_02 se ha elegida para investigar la influencia de la microfísica y de la radiación, en comparación con la simulación P_01. Por último, se ha determinado la simulación P_03 con el fin de verificar la influencia de la CLP en comparación con la simulación P_01. A continuación, se hace una breve descripción de las opciones de parametrización usadas de acuerdo con la Tabla 1, con énfasis en la microfísica, en la radiación y la CLP.

- a) Microfísica: Para la microfísica de las nubes se utiliza el esquema New Thompson en las simulaciones P_01 y P_03, que proporciona mejoras en las implementaciones de depósito, sublimación y evaporación. En la simulación P_02, se utiliza el WRF Single Moment Microphysics (WSM6), que es una de las parametrizaciones más avanzadas para la microfísica (Hong y Lim, 2006). Cabe enfatizar que ambos esquemas se utilizan en simulaciones con alta resolución. Es importante tener en cuenta que el proceso de microfísica no debe tratarse por separado de otros procesos físicos, sino que están relacionados.

- b) Radiación: En las simulaciones P_01 y P_03, se mantiene el esquema Rapid radiation transfer model para modelos de circulación general (RRTMG) para intercambios de radiación solar e infrarroja, que tiene como objetivo estimar con mayor precisión los flujos radiativos y velocidades de enfriamiento. Este esquema utiliza el método de aproximación de correlación-k para el cálculo de transferencia de radiación, lo que permite una mayor precisión y eficiencia computacional. Por otro lado, para modelar los intercambios de radiación infrarroja para la simulación P_02, se ha elegido el Rapid radiation transfer model (RRTM, utilizado, por ejemplo, en el GFS), que tiene la reputación de ser fiable y eficiente, con la opción de incluir el efecto de las nubes. Para el intercambio de radiación solar se ha decidido utilizar el esquema simple de la integración de la radiación descendente de Dudhia en la simulación P_02.
- c) Capa límite planetaria: Para la CLP se utiliza el esquema Yonsei University (YSU) en las simulaciones P_01 y P_02, que se debe usar en conjunto con el esquema MM5 para la capa superficial. El esquema de Mellor-Yamada-Janjic (MYJ), utilizado en la simulación P_03, debe utilizarse con el esquema ETA para la capa superficial. Cabe señalar que el esquema YSU utiliza términos contra gradientes para representar los flujos debidos a los gradientes no locales, y que este es un esquema de cierre no local de 1ª orden. En el cierre no local, se tiene en cuenta la contribución de los grandes remolinos y este proceso es importante para la capa límite convectiva. El esquema MYJ es una aplicación no singular del modelo de cierre de turbulencia de Mellor-Yamada a través de una serie de condiciones atmosféricas turbulentas, es decir, es un cierre de orden local 1.5, que utiliza una ecuación predictiva para la Energía Cinética Turbulenta (ECT). De acuerdo con Sánchez (2002), estas diferentes aproximaciones producen diferentes comportamientos en la capa límite en condiciones convectivas típicas. Por ejemplo,

un cierre local no será una aproximación correcta, pues la convección mezcla toda la capa límite, y la parametrización debería considerar valores de las magnitudes en toda la capa, y no apenas las de cada punto.

Según la mayoría de los estudios, ningún esquema de parametrización es consistentemente mejor que otro y el desempeño del modelo es muy dependiente de la región, de la escala y de los intereses de aplicación (Kuo et al., 1996; Ruiz et al., 2010; Zepka, 2011). Ruiz et al. (2010) destacan que no hay ninguna combinación de parametrización que represente a todas las variables en la región de estudio. Conforme fue discutido anteriormente, este trabajo presenta resultados aún preliminares y los esquemas de parametrizaciones se han elegido a partir de estudios anteriores. Sin embargo, existe un proyecto en curso que estudia más a fondo los esquemas de parametrizaciones físicas utilizados en el modelo WRF y, por lo tanto, se llevará a cabo un gran número de simulaciones para los días con heladas en el sur y sudeste de Brasil.

En el período elegido para este trabajo, un intenso sistema de alta presión actuaba en el sur de Brasil, lo que originó una intensa helada en RS, SC y PR, incluyendo el registro de helada negra. Es importante destacar que los registros de las heladas durante el período de estudio se obtuvieron a partir de observaciones hechas en las estaciones convencionales del Instituto Nacional de Meteorología (INMET). Además, estas estaciones meteorológicas registraron temperaturas mínimas negativas, y conforme la definición de helada meteorológica (WMO n°134, 1981), se identifica un día de helada como aquel en el cual la temperatura mínima es igual o menor que 0°C. De acuerdo con el informe de Climanálise de CPTEC (2013), había registros de fuertes heladas en varias ciudades en el sur de Brasil, especialmente Bom Jesus-RS, Lages-SC y São Joaquim, SC.

Para el análisis de los resultados, se utilizan las siguientes variables de salida del modelo: temperatura del aire a 2 metros (T2m), humedad

Código	Estación	Latitud	Longitud	Altitud	Altitud WRF	Altitud reanálisis
83919	Bom Jesus-RS	-28,67°	-50,43°	1047,5 m	985,6 m	917,2 m
83887	Campos Novos-SC	-27,38°	-51,22°	964,2 m	896,8 m	865 m
83883	Chapecó-SC	-27,09°	-52,64°	687 m	614,6 m	624,1 m
83891	Lages-SC	-27,80°	-50,34°	936,8 m	916,9 m	966,1 m
83916	Lagoa Vermelha-RS	-28,22°	-51,5°	840 m	785,2 m	643,8 m
83914	Passo Fundo-RS	-28,25°	-52,40°	684,1 m	621,5 m	570,8 m
83920	São Joaquim-SC	-28,28°	-49,94°	1415 m	1277,8 m	917,2 m

Tabla II: Datos correspondientes a las estaciones meteorológicas utilizadas y la altura de la topografía correspondiente a cada estación en la retícula del WRF y de los reanálisis.

relativa a 2 metros (HR) y velocidad del viento a 10 metros (V10m), para cada simulación para el dominio 3 (de 3 km). Esta información se ha extraído para cada punto del modelo coincidente con las latitudes y longitudes de las estaciones meteorológicas del INMET elegidas (Bom Jesus, Lagoa Vermelha y Passo Fundo en RS; Campos Novos, Chapecó, Lages y São Joaquim en SC), que se muestran en la Tabla II y Figura 2, juntamente con la topografía de la región generada por el modelo WRF.

La evaluación estadística de las simulaciones se realiza mediante el cálculo del error medio (ME en Inglés) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE en Inglés) (Ecuaciones 1 y 2). Cabe mencionar que, estadísticamente, la media de los errores individuales es el primer momento de la distribución de las diferencias y no proporciona información acerca de los errores individuales. Mientras que proporciona una medida del sesgo o error sistemático (Hallak y Filho, 2011). El RMSE se utiliza comúnmente para expresar la exactitud de los resultados numéricos con la ventaja de que muestra los valores del error en las mismas dimensiones de la variable analizada.

$$ME = \frac{f_i - o_i}{N} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum \frac{f_i - o_i}{N}} \quad (2)$$

En la cual f_i son los valores simulados, o_i son los valores observados y N es el tamaño de la muestra.

3. RESULTADOS

Primeramente, se realiza una descripción sinóptica del evento de helada ocurrido en el sur de Brasil, a partir de los datos de reanálisis del ERA-Interim para el horario de 12Z durante el período del 23 al 25 de julio de 2013 (Figuras 3, 4 y 5), puesto que se ha elegido este horario por ser el más cercano a la temperatura mínima esperada. El intenso sistema de alta presión entre estos días tenía potencial para la formación de helada fuerte, en virtud de los bajos valores de t_2m simulados para las regiones sur de Brasil y sudeste de América de Sur, con valores negativos de temperatura en estas regiones (Figuras 3 a, b y c). Es importante destacar que el aire frío ha avanzado para latitudes más bajas de América del Sur y estas incursiones de masas polares a latitudes bajas son conocidos como “friagem” en el Brasil (Seluchi, 2009).

El campo de presión al nivel medio del mar (Figuras 4 a, b y c) muestra la presencia de este intenso sistema de alta presión, con cerca de 1030 hPa durante los tres días, lo que confirma el potencial de heladas en este periodo. Además, es posible observar el movimiento de este sistema de alta presión, con su centro en el sur de Brasil en el día 24 (Figura 4b). El día 25 de julio (Figura 4c), la intensa masa de aire seco y frío comienza a alejarse hacia el mar. Las líneas de corriente en 200 hPa (Figuras 5 a, b y c) muestran la presencia de las corrientes en chorro subtropical y polar. Es posible ver que la corriente en chorro polar norte se encuentra entre el norte de RS y el norte de PR, sobre todo, los días 23 y 24 (Figuras 5 a y b). También se percibe, en la Figura 5, que una vaguada de gran amplitud contribuye a la entrada de aire frío hacia menores latitudes, y que la intensa corriente en chorro al norte de RS es una consecuencia del aumento del gradiente de temperatura en superficie, el cual se debe a la advección fría. Es de destacar que el patrón de circulación atmosférica de la figura 5 es típico de un evento frío severo y cuenta con las características descritas por Seluchi (2009). En estas situaciones vinculadas con el frío intenso, el patrón sinóptico se caracteriza por una profunda

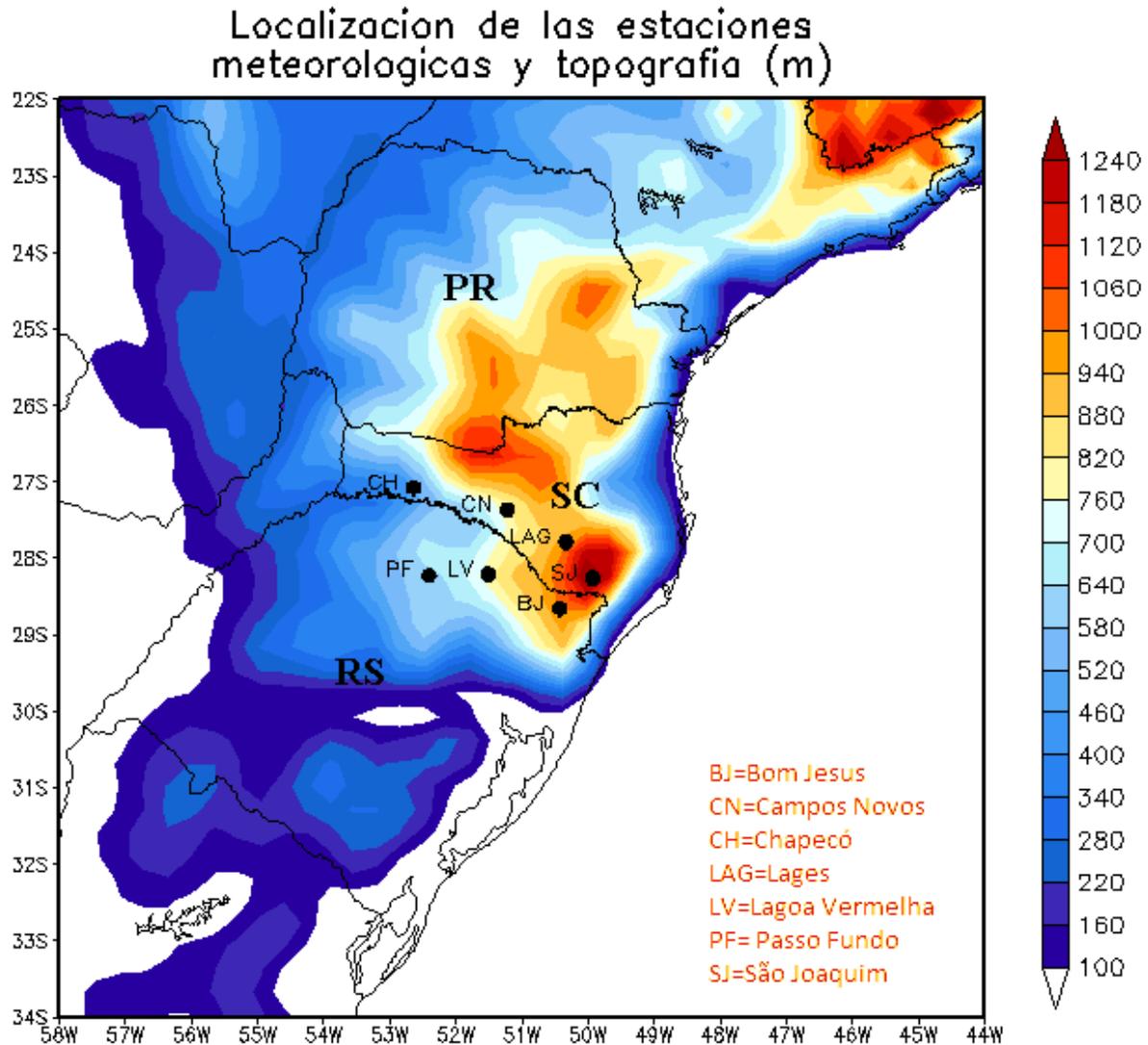


Figura 2: Localización de las estaciones meteorológicas y topografía (m) en el Sur de Brasil.

vaguada sobre el océano Atlántico y un eje de cuña sobre el océano Pacífico en niveles altos de la atmósfera (Figura 5), los cuales determinan la presencia de un anticiclón migratorio frío sobre el centro-sur de América del Sur (Figura 4).

La Figura 6 muestra la temperatura del aire a 2 m entre el 23 y el 25 de julio, en el área de estudio de este trabajo para el dominio 3 (3 km) de las tres simulaciones y para el reanálisis del ERA-Interim (75 km). Se percibe claramente que el aumento de la resolución de las simulaciones genera resultados más detallados de t_{2m} , principalmente, en las regiones más

altas (no se muestra). Además, la simulación P_02 subestima los valores de t_{2m} para los tres dominios, en comparación con las simulaciones P_01 y P_03. Por otra parte, cuando se comparan los datos del ERA-Interim (Figura 6d) con los tres dominios de WRF, se nota que el reanálisis presenta un patrón de temperatura bastante homogéneo en el sur de Brasil, con un bajo nivel de detalles para diferentes altitudes. Así pues, esto demuestra la importancia de tener un modelo numérico de alta resolución para la predicción de las heladas y otros fenómenos.

En la Figura 7, se muestran los valores de

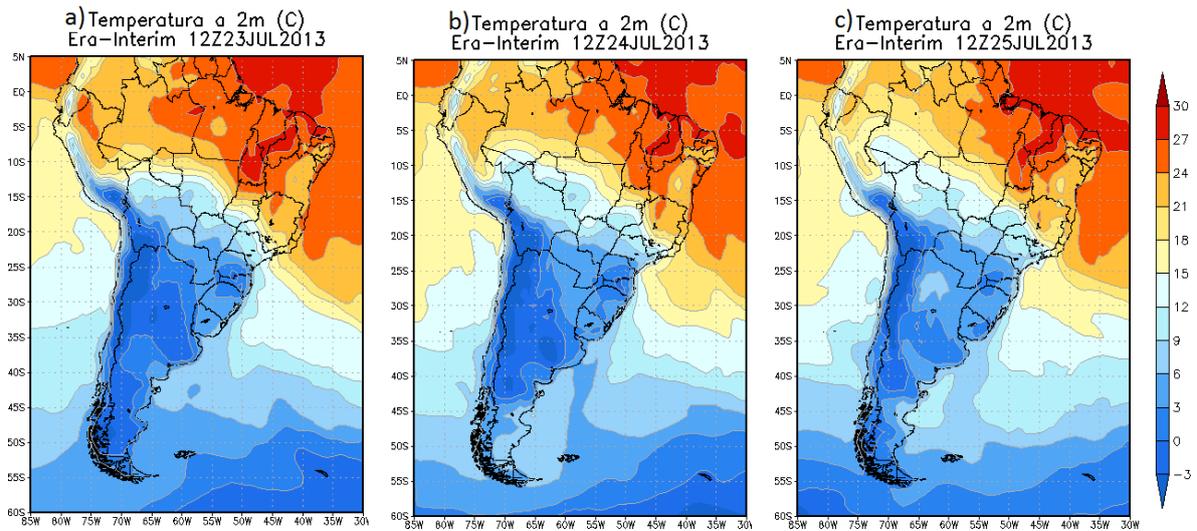


Figura 3: Temperatura del aire a 2m ($^{\circ}\text{C}$) en los reanálisis Era-Interim para las 12Z en los días 23, 24 y 25/07/2013.

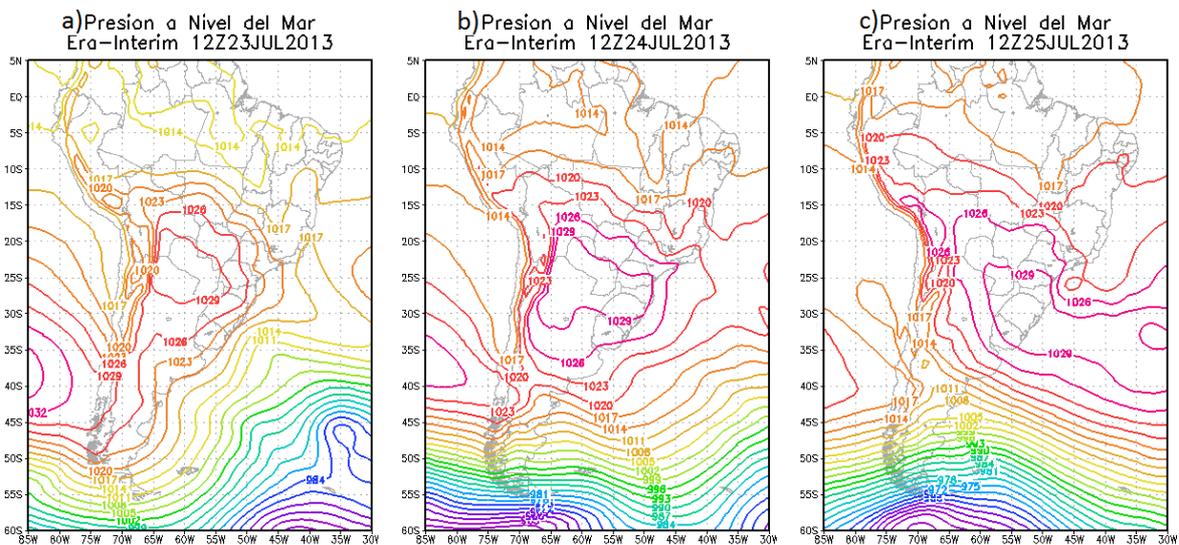


Figura 4: Presión a nivel medio del mar (hPa) en los reanálisis Era-Interim para las 12Z para los días 23, 24 y 25/07/2013.

temperatura del aire simuladas por el WRF, los valores registrados en cada estación convencional de INMET y los datos del reanálisis del Era-Interim. Es evidente que el modelo simula razonablemente los valores de T2m cuando se compara con valores observados. También, se perciben diferencias entre los valores simulados para T2m en P_01, P_02 y P_03 y los de las observaciones. Cabe destacar que el modelo WRF presenta, en este estudio de caso, la

tendencia a subestimar la temperatura del aire, en relación al reanálisis, durante el período de simulación, a excepción de la estación de Chapecó y de Lages en donde el modelo WRF sobreestima con respecto a las temperaturas del Era-Interim. La tendencia de subestimación puede explicarse en parte por las diferencias de altitud entre los puntos de retícula en el modelo y el reanálisis del Era-Interim. Por ejemplo, para la estación de mayor altitud (São Joaquim),

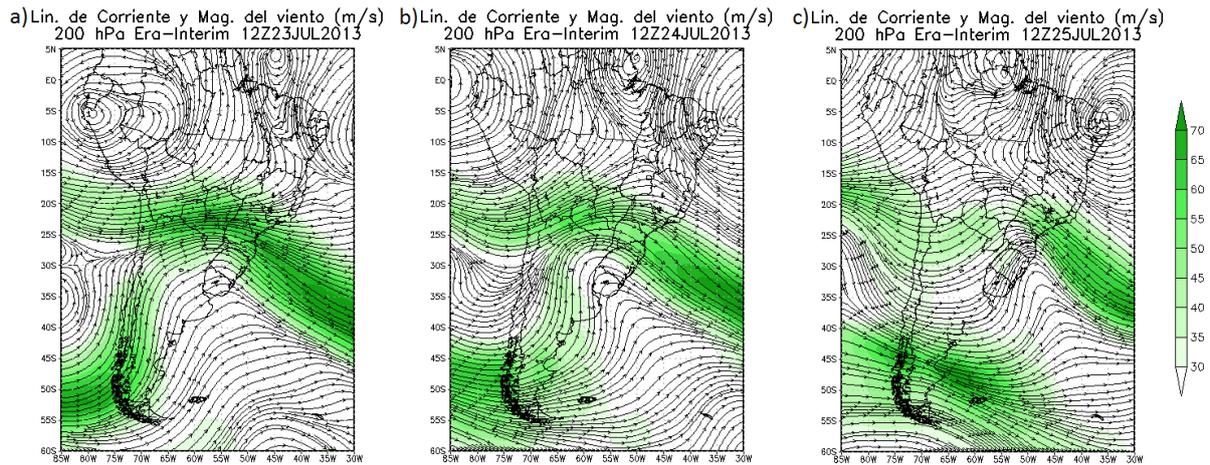


Figura 5: Líneas de corriente en 200 hPa (m/s) en los reanálisis Era-Interim para las 12Z para los días 23, 24 y 25/07/2013.

el WRF indica un valor de 1277 m, mientras que el reanálisis muestra un valor de 917,2 m (Tabla II). Al analizar solamente los resultados de las simulaciones, la parametrización P_02 subestima la t_{2m} en comparación con P_01 y P_03, especialmente con respecto a los valores de temperatura mínima. Estas diferencias son más notables en las estaciones con mayor altitud (Campos Novos, Lages, São Joaquim y Bom Jesus) para la noche y la mañana del 24 de julio (entre 27 y 33 horas de simulación). Es posible que esto esté asociado con el propio conjunto de parametrizaciones seleccionado. Por otro lado, características locales de superficie, tales como tipo de cobertura, la topografía y la proximidad de los obstáculos, pasan a ejercer el control sobre la temperatura del aire, lo que aumenta, en gran medida, la variabilidad horizontal, y hace que sea muy difícil predecir o simular esta variable (Acevedo y Fitzjarrald, 2003). Cabe señalar que Moraes y otros (2014) evalúan el comportamiento de los modelos WRF y MM5 para simular el ciclo diurno de temperatura del aire cerca de la superficie en Río de Janeiro-RJ, y encuentran una ligera tendencia de los datos simulados a subestimar las temperaturas máximas observadas y sobrestimar las temperaturas mínimas observadas.

En la Tabla III, se muestra un análisis estadístico para una mejor interpretación de los resultados

obtenidos con las simulaciones en comparación con los valores observados. Por esta razón, los resultados de ME y RMSE se muestran para cada localidad y en general. El ME indica que las simulaciones P_01 y P_03 sobreestiman los valores de t_{2m} en relación a las observaciones, mientras que P_02 muestra un valor de ME cercano a 0, tanto para la serie temporal como para los valores de temperatura mínima. Prabha y Hoogenboom (2008) utilizan diferentes parametrizaciones para simular la temperatura del aire con el modelo WRF en el sureste de Estados Unidos y señalan que, en todas las situaciones analizadas, los resultados también indican sobreestimación. Como se indicó anteriormente, el ME no es suficiente para el análisis estadístico, ya que no indica la magnitud de los errores. Para ello se utiliza el RMSE.

Luego, la Tabla III muestra que el valor de RMSE es el mismo cuando se lo analiza para todas las estaciones meteorológicas. Por otro lado, considerando la temperatura mínima, el valor RMSE es menor para la simulación P_02 y más alto para la simulación P_01. A pesar de que las diferencias no sean grandes, los resultados indican que la simulación P_02 es la más ajustada en este evento de helada en el sur de Brasil, visto que presenta los valores más bajos de ME y RMSE, principalmente, para simular la temperatura mínima, que es una variable de

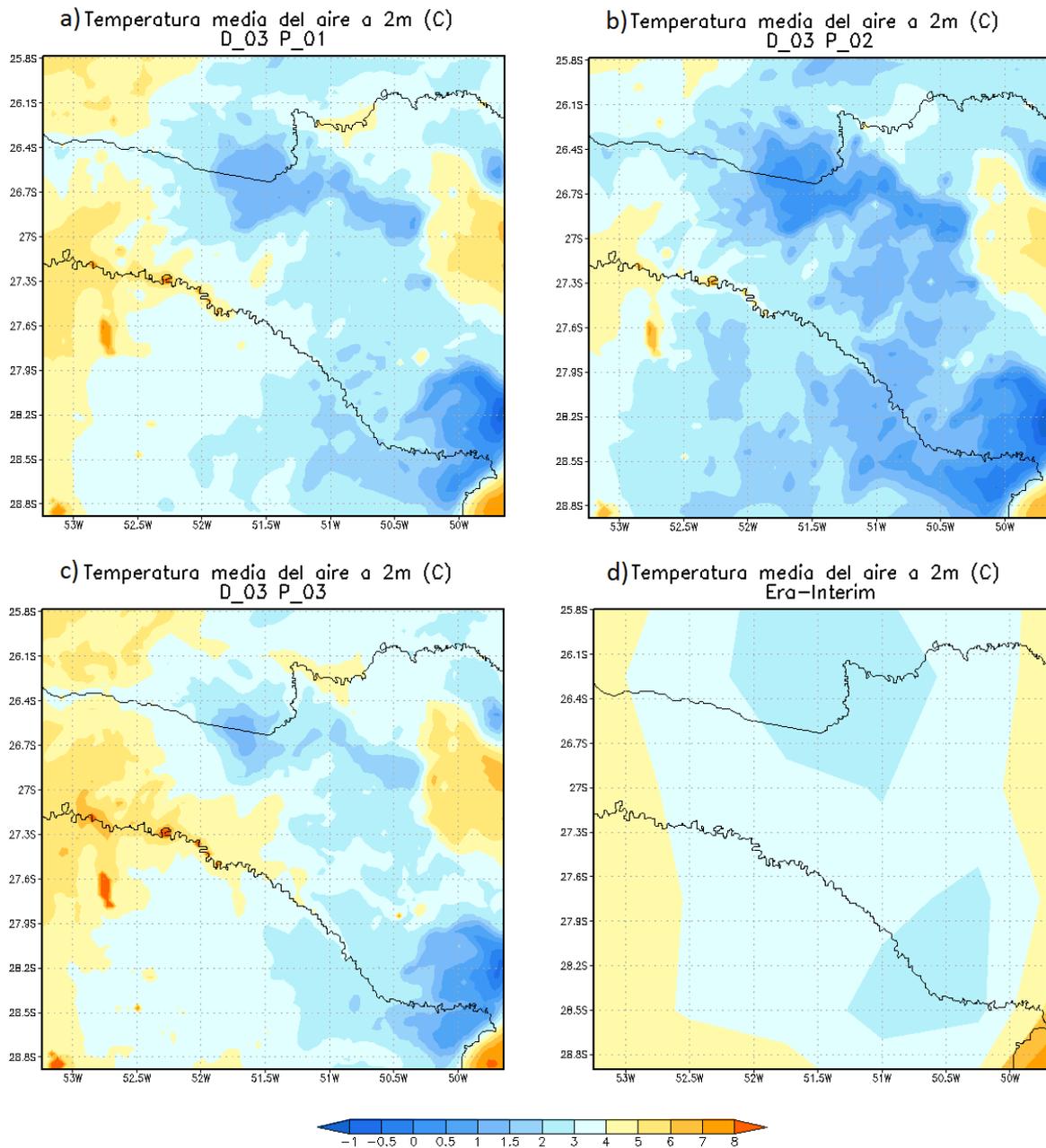


Figura 6: Temperatura media del aire ($^{\circ}\text{C}$) simulada por el modelo WRF para el dominio 3 (3 km) para el período comprendido entre las 00Z del día 23/07 y las 18Z del día 25/07/2013. (a) P_01, (b) P_02 y, (c) P_03. Temperatura media del aire ($^{\circ}\text{C}$) observada por los reanálisis Era-Interim (75 km) para el período entre las 00Z del día 23/07 y las 18Z del día 25/07/2013 (d).

extrema importancia en la estimación de las heladas. Es importante destacar que Ruiz et al. (2010) utilizan la versión 2.0 del WRF con varias combinaciones de parametrizaciones para la región del sudeste de América del Sur con el

siguiente conjunto parametrizaciones: Dudhia para la radiación onda corta y RRTM para radiación de onda larga. Los autores informan que los mejores resultados, con respecto a los valores de temperatura del aire a 2 m, se

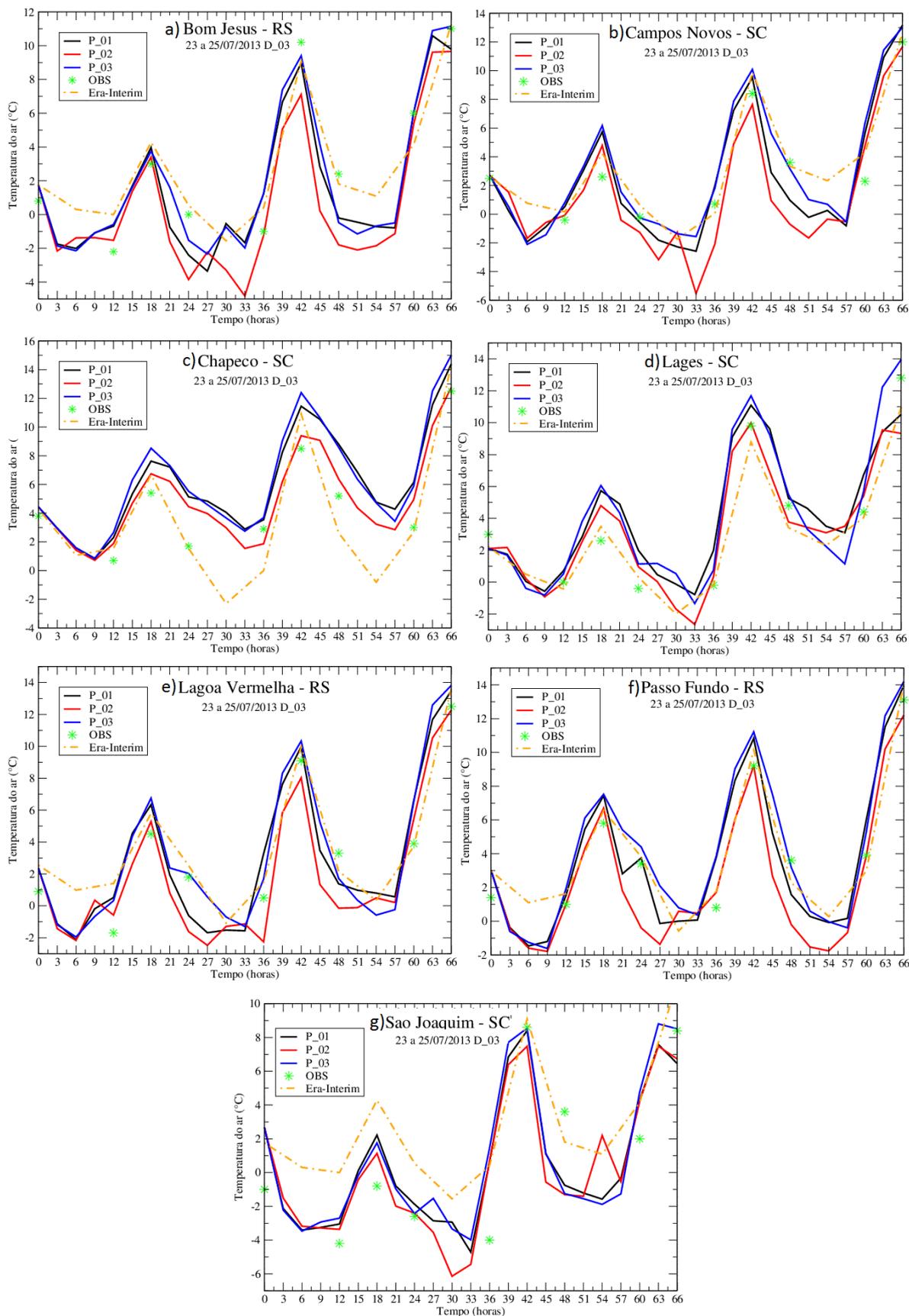


Figura 7: Evolución temporal de la temperatura a 2 metros (°C) en diferentes estaciones, para las diferentes simulaciones, las observaciones y los reanálisis ERA-Interim.

Estación	ME (°C)			RMSE (°C)		
	P 01	P 02	P 03	P 01	P 02	P 03
Campos Novos	0,9	-0,5	1,4	1,9	2,1	2,0
Chapecó	2,2	1,0	2,5	2,5	1,4	2,8
Lages	1,0	-0,1	1,2	1,9	1,5	1,6
São Joaquim	1,0	0,6	1,3	2,9	2,8	3,1
Bom Jesus	-0,2	-1,3	0,1	1,7	2,3	1,5
Lagoa Vermelha	1,0	-0,7	1,2	2,0	2,1	1,7
Passo Fundo	1,1	-0,6	1,4	1,7	1,9	1,6
General	1,0	-0,2	1,3	2,1	2,1	2,1
General (Tmínima)	1,2	0,4	1,1	1,9	1,6	1,7

Tabla III: Valores de ME y RMSE obtenidos de los datos de temperatura para las diferentes simulaciones del WRF.

obtuvieron con la parametrización YSU para la CLP y Noah para el modelo de la superficie del suelo, formando un conjunto similar a P_02 que se muestra en este trabajo.

La Figura 8 representa los valores de humedad relativa a 2 metros simulados por el WRF y los valores registrados en cada estación convencional del INMET. El modelo WRF simula razonablemente el perfil de humedad durante el periodo de integración, en comparación con los valores observados. En general, el WRF presenta una tendencia a subestimar la humedad relativa, sobre todo en las últimas 24 horas de simulación. Esto se evidencia en las estaciones de Bom Jesus, Campos Novos, Chapecó y Lages (Figuras 8a, b, c, d). Por otra parte, cuando se compara solamente la humedad relativa para los tres conjuntos de parametrizaciones, las diferencias son menores para los días 23 y 24 de julio, con una tendencia de la simulación P_02 a sobreestimar la humedad relativa durante las noches y madrugadas, cuando esta variable tiene los valores más altos, lo cual es consistente con la Figura 7, en la que la simulación P_02 muestra los valores mínimos de temperatura más bajos.

Mediante el análisis de los valores de ME para la variable humedad relativa a 1000 hPa (Tabla IV), se percibe que las tres simulaciones

muestran una tendencia a subestimar los valores simulados, con las mayores diferencias para las simulaciones P_01 y P_03. Esta condición evidencia una deficiencia del modelo WRF para simular la humedad relativa, sobre todo al amanecer, cuando los valores de humedad son más altos. De tal forma que, al analizar el ME y los valores RMSE para las tres simulaciones, los resultados también indican que la simulación P_02 es la más ajustada en este evento de helada en el sur de Brasil.

Para el perfil de velocidad del viento a 10 m (Figura 9), el modelo WRF sobrestima esta variable en comparación con los valores observados, sobre todo para las estaciones de Chapecó, Lages, Passo Fundo y São Joaquim (Figuras 9c, d, f, g). Es importante tener en cuenta que la magnitud y dirección del viento dependen de las características de la topografía de cada sitio. Como existen diferencias de altitud entre las estaciones y los puntos de retícula extraídos del WRF (Tabla II), esto puede producir errores más grandes cuando se hace la comparación entre los valores simulados y los observados. Al comparar los valores simulados, el perfil de la velocidad del viento a 10 m es similar en las tres simulaciones, con condiciones de vientos más fuertes en el primer día de la simulación, cuando ocurre el período con más advección de aire frío (no se muestra) y vientos

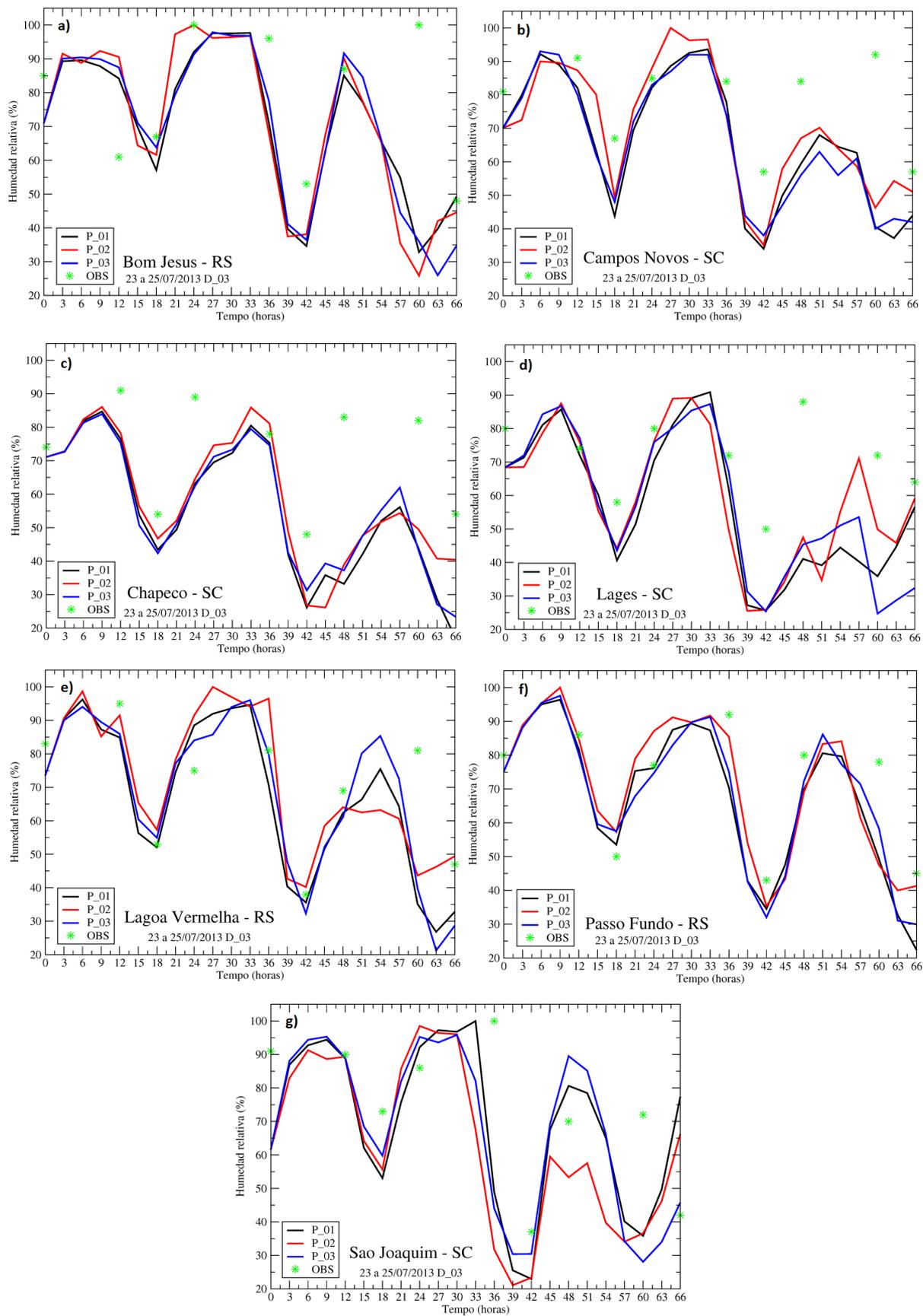


Figura 8: Evolución temporal de humedad relativa a 2 metros (%) en diferentes estaciones, para las diferentes simulaciones y las observaciones.

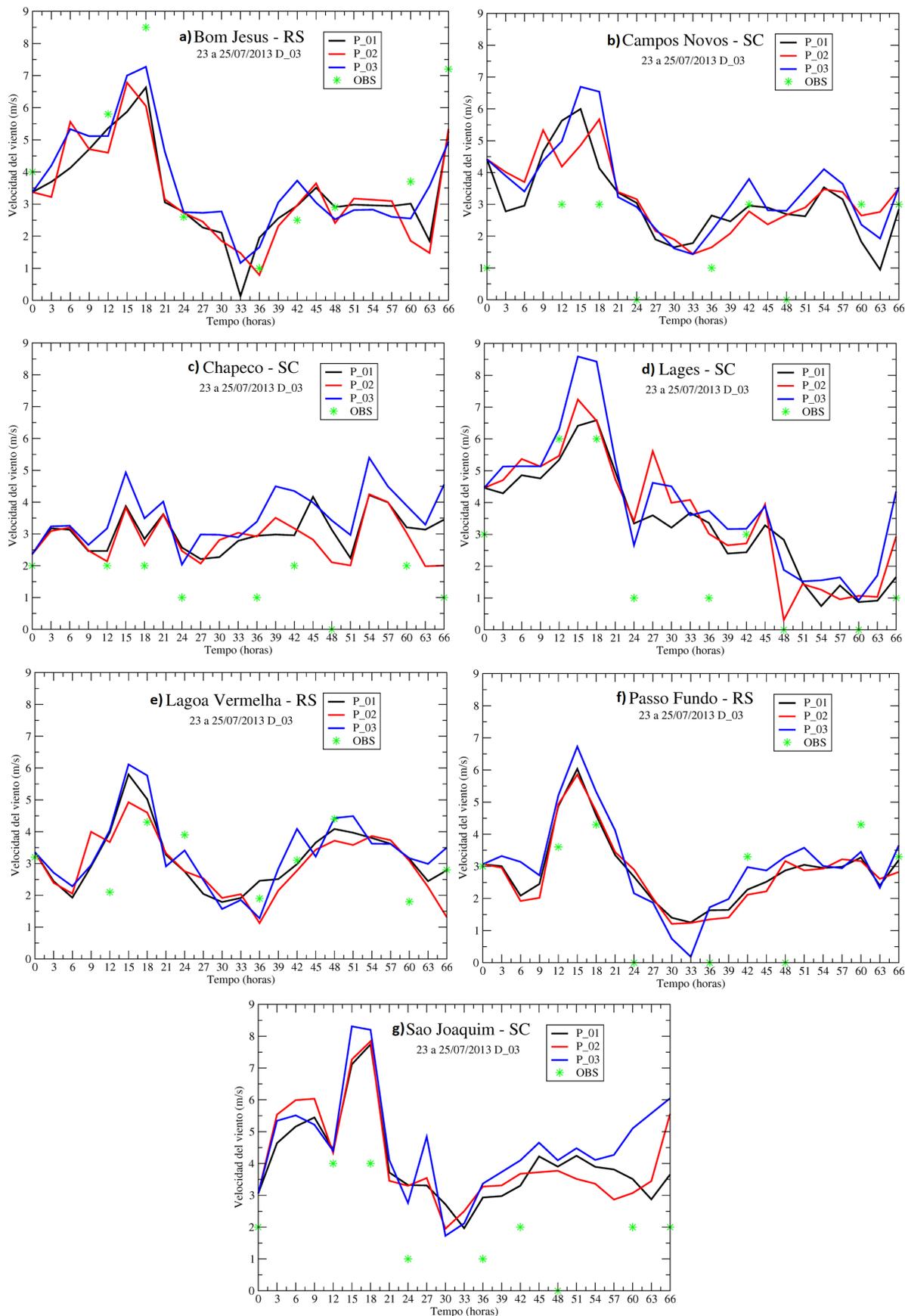


Figura 9: Evolución temporal de la velocidad del viento a 10 metros (m/s) en diferentes estaciones, para las diferentes simulaciones y las observaciones.

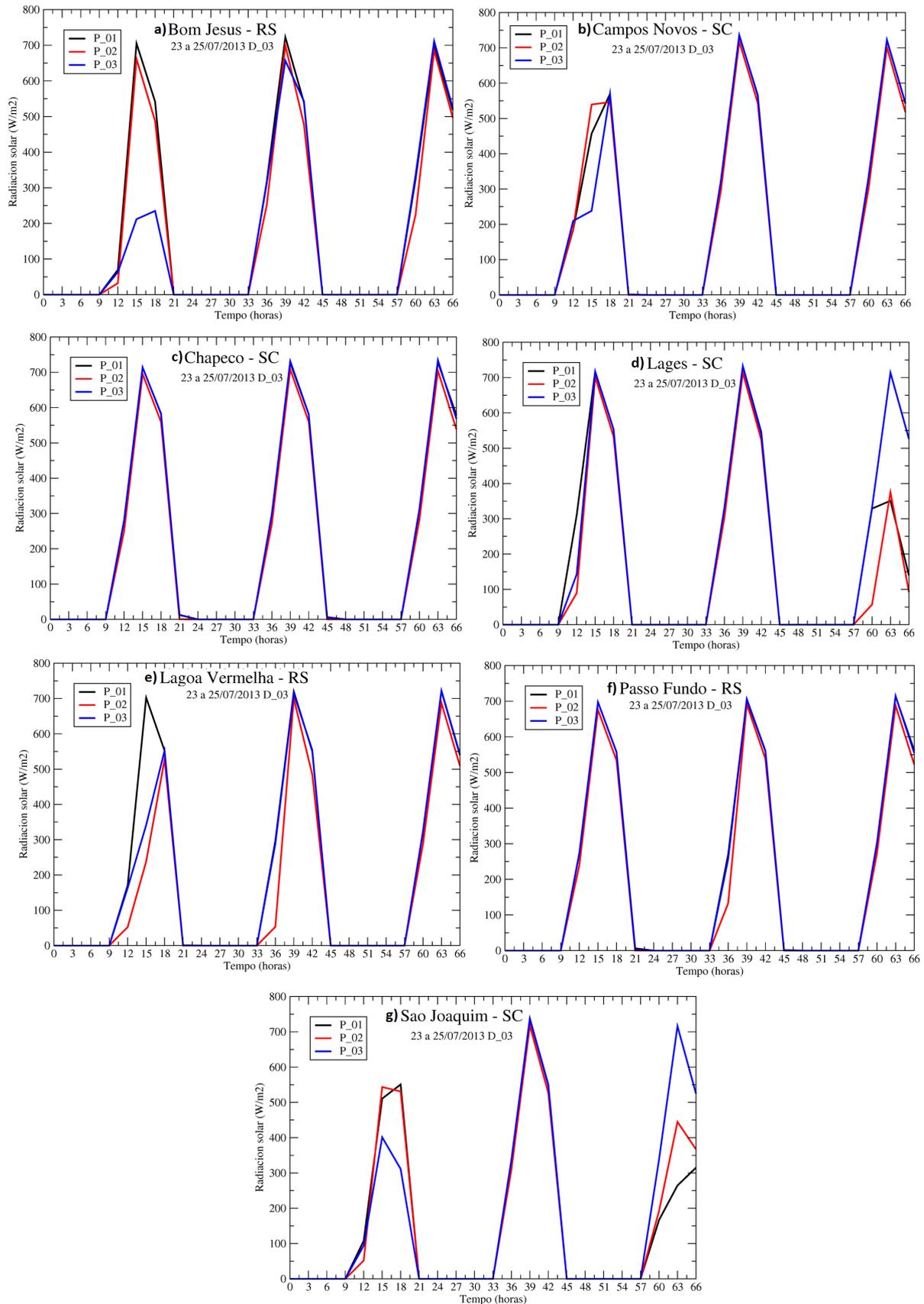


Figura 10: Evolución temporal de la radiación solar en la superficie (w/m²) en las diferentes simulaciones.

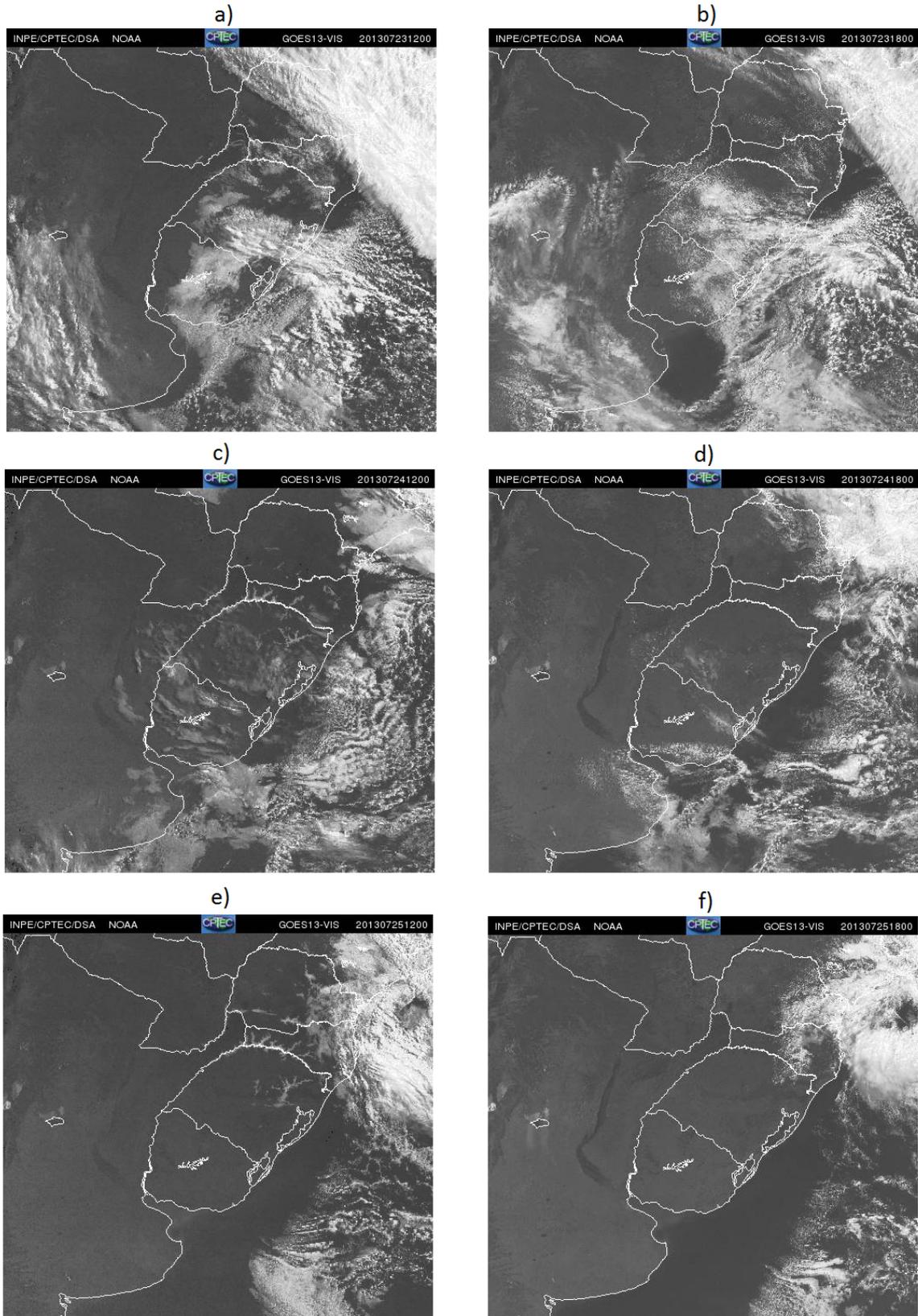


Figura 11: Imágenes de satélite del canal visible para: (a) 12Z del día 23/07, (b) 18Z del día 23/07, (c) 12Z del día 24/07, (d) 18Z del día 24/07, (e) 12Z del día 25/07 y, (f) 18Z del día 25/07.

Estación	ME (%)			RMSE (%)		
	P 01	P 02	P 03	P 01	P 02	P 03
Campos Novos	-18,2	-14,4	-18,1	22,9	19,6	22,6
Chapecó	-22,6	-17,3	-21,3	27,5	22,3	25,6
Lages	-18,3	-15,7	-19,7	23,0	19,9	25,9
São Joaquim	-11,0	-16,1	-13,1	27,4	30,3	27,1
Bom Jesus	-13,3	-10,1	-11,9	26,6	29,6	25,6
Lagoa Vermelha	-9,6	-1,6	-9,1	17,7	15,1	16,3
Passo Fundo	-10,9	-5,3	-8,4	15,0	12,2	11,5
General	-14,9	-11,5	-14,5	23,3	22,2	22,8

Tabla IV: Valores de ME y RMSE obtenidos de los datos de humedad para las diferentes simulaciones del WRF.

Estación	ME (m/s)			RMSE (m/s)		
	P 01	P 02	P 03	P 01	P 02	P 03
Campos Novos	1,5	1,5	1,8	2,2	2,1	2,3
Chapecó	1,4	1,1	2,0	1,7	1,3	2,2
Lages	1,1	1,0	1,7	1,6	1,4	1,9
São Joaquim	2,0	2,2	2,6	2,3	2,5	2,9
Bom Jesus	-0,4	-0,9	-0,5	1,0	1,3	1,1
Lagoa Vermelha	0,3	-0,1	0,6	0,9	1,0	1,0
Passo Fundo	0,7	0,7	1,0	1,6	1,7	1,6
General	1,0	0,8	1,3	1,7	1,7	2,0

Tabla V: Valores de ME y RMSE obtenidos de los datos de velocidad del viento para las diferentes simulaciones del WRF.

más débiles durante el resto de la simulación, cuando el centro del sistema de alta presión está en el sur de Brasil. Es importante resaltar que el perfil de la velocidad del viento está directamente asociado con el esquema de parametrización de la capa límite utilizado. Por consiguiente, las simulaciones P_01 y P_02 que utilizan la parametrización YSU para la CLP producen resultados muy similares entre sí. La simulación P_03, a su vez, presenta las mayores diferencias, en comparación con las simulaciones P_01 y P_02. Esto se puede explicar por el hecho de que el esquema YSU es no local, mientras que el esquema MYJ sí lo es. Así que, el esquema YSU muestra un mejor ajuste para el período de las tardes en las simulaciones P_01 P_02, con la condición de capa límite convectiva. Cabe destacar que la parametrización YSU considera los grandes remolinos durante el periodo de

calentamiento. Sin embargo, en condiciones de estabilidad atmosférica y con vientos débiles, las tres simulaciones presentan dificultades en simular correctamente la velocidad del viento. Esta condición también es observada por Battisti (2014), que establece que la mayor dificultad que tienen los modelos, en los casos más fríos, se debe al hecho de que no simulan correctamente el fenómeno de desacoplamiento entre la superficie y la atmósfera, que ocurre cuando hay un gran enfriamiento radiativo en las noches y madrugadas. Brum et al. (2010) reportan que, en varias de las estaciones de RS, el error en la predicción de la temperatura mínima aumenta bruscamente cuando la velocidad del viento en horas de la noche, es débil, momento en el que se produce el desacoplamiento entre la superficie y la atmósfera.

El análisis estadístico entre los valores simulados y observados para la velocidad del viento a 10 metros, en las 7 localidades, se muestra en la Tabla V. Tal como ocurre con de la temperatura del aire y la humedad relativa, el ME para la velocidad del viento es menor para la simulación P_02. Además, las tres simulaciones sobrestiman la velocidad del viento. Para el análisis de RMSE, se hace constar que las simulaciones P_01 y P_02 tienen los valores más bajos.

Con el fin de analizar la influencia de la parametrización relacionada con la radiación de onda corta, en la Figura 10, se muestran los valores de radiación solar en superficie simulados en los tres experimentos. Para complementar el análisis de la radiación solar con la condición de cielo nublado o claro, se utilizan imágenes de satélite del canal visible (Figura 11), proporcionadas por el Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Durante los tres días de simulación, las parametrizaciones utilizadas para onda corta (RRTMG y Dudhia) presentan comportamientos muy similares en condiciones de cielo claro, con intensidad máxima de 700 W/m². Así pues, en este estudio de caso, tanto el esquema simple de Dudhia (utilizado en la simulación P_02) como el más sofisticado esquema RTMG (utilizado en las simulaciones P_01 y P_03) se muestran eficientes para estimar el flujo de radiación de onda corta a superficie. Sin embargo, se observan diferencias significativas en el flujo de radiación de onda corta durante el día 23 de julio en las localidades de Bom Jesus (Figura 10a), Campos Novos (Figura 10b), Lagoa Vermelha (Figura 10e) y São Joaquim (Figura 10g). En las estaciones convencionales del INMET, se observa la presencia de muchas nubes en estas localidades. Entre las 12 y 18Z del día 23, las nubes cubrían entre el 70 y el 90

4. CONCLUSIONES

De acuerdo con las simulaciones con diferentes parametrizaciones para el evento de helada en el sur de Brasil, se observa que la simulación P_02 (Tabla I) es el que más se ha adaptado

en el presente estudio de caso. Los resultados obtenidos pueden indicar una influencia de la parametrización de la capa límite planetaria y de la microfísica de nubes, para explicar el mejor ajuste a los resultados encontrados en la simulación P_02 en relación con las simulaciones P_01 y P_03. En general, para las tres simulaciones, el modelo sobrestima la velocidad del viento a 10 metros, lo que resulta en una mayor mezcla turbulenta y, en consecuencia, una mayor temperatura simulada, en comparación con los datos observados. Los resultados son, todavía, preliminares, y es necesario llevar a cabo simulaciones con más estudios de casos con heladas y comparar datos con estaciones automáticas para un análisis estadístico más robusto. Diferentes simulaciones deben realizarse para analizar la influencia de la parametrización de la microfísica y de la capa límite planetaria en el modelo WRF para eventos de heladas, visto que los resultados han demostrado ser muy sensibles a dichas parametrizaciones en el caso de estudio analizado en este trabajo.

Sin embargo, las pruebas de sensibilidad de los resultados de un modelo atmosférico con diferentes ajustes de parametrizaciones son complejas, ya que no siempre se puede extraer conclusiones generales sobre el efecto de la configuración probada. Esto ocurre como resultado de la interacción entre los procesos físicos con mecanismos de retroalimentación generados por cada parametrización probada. Por lo tanto, los efectos sobre las variables atmosféricas son muy difíciles de predecir analíticamente.

Agradecimientos: Los autores agradecen a FINEP por el apoyo financiero, a través del proyecto Encomendas MCT/FINEP-COIAM – REDE CLIMASUL y al proyecto CT-INFRA (proceso 04.12.0270.00) por la estructura disponible para la realización de las simulaciones numéricas.

REFERENCIAS

- Acevedo, O. C. y Fitzjarrald, D. R. 2003. In the core of the night - effects of intermittent mixing on a horizontally heterogeneous surface. *Boundary-Layer Meteorology*, 106, 1-33.
- Battisti, A. 2014. Parametrização de turbulência na previsibilidade de temperaturas mínimas em um modelo de mesoescala. *Disertación (Master en Meteorología)*, Universidade de Santa Maria - UFSM.
- Bender, F. D., 2012. Verificação da previsão de tempo em São Paulo com o modelo operacional WRF. *Disertación (Master en Meteorología)*, Universidade de São Paulo - USP.
- Boletim Climanalise – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2013. Disponible en <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rcliman1/boletim/pdf/pdf13/jul13.pdf>. Acceso en 01 de febrero de 2016.
- Brasil, G. S. y Quadro, M. F. L., 2014. O uso da computação paralela para potencializar o rendimento dos processadores no processamento do modelo de previsão numérica WRF. *Revista Científica Semana Acadêmica*, v. 1, p. 1-17, 2014.
- Brum, B. V., Battisti, A., Acevedo, O. C. y Anabor, V. 2011. Temperaturas mínimas no Rio Grande do Sul. Parte II: análise dos erros da previsão do BRAMS em 27 estações. *IV Encontro Sul-Brasileiro de Meteorologia*, Universidade Federal de Pelotas – UFPel.
- Hall, D. W., Rasmussen, R. M. y Thompson, G., 2005. The New Thompson microphysical scheme in WRF. *WRF User's Workshop*.
- Hallak, R. y Pereira Filho, A. J., 2011. Metodologia para análise de desempenho de simulações de sistemas convectivos na região metropolitana de São Paulo com o modelo ARPS: sensibilidade a variações com os esquemas de advecção e assimilação de dados. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 26, 4, 591-608.
- Hong, S-Y, Lim, J. J-O, 2006. The WRF Single-Moment 6-Class Microphysics Scheme (WSM6). *Journal of the Korean Meteorological Society*, 42 (2), 129-151.
- Kuo, Y. H., Reed, R. J. y Liu, Y. 1996. The ERICA IOP5 Storm. Part III: Mesoscale cyclogenesis and precipitation parameterization. *Monthly Weather Review*, 124, 1409-1434.
- Mollmann Junior, R. A., Alves, R. C. M., Munchow, G. B., Rodrigues, B. D., Silva Júnior, R. S., Lucca, M. G. y Caumo, M., 2016. Análise da sensibilidade das Parametrizações no modelo WRF para o Estado do Rio Grande do Sul durante o inverno de 2014. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 9, 2, 368-383.
- Müller G. V., 2006. Variabilidad Interanual de las heladas en la Pampa Humeda. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 21, 141-152.
- Müller, G. V. y Ambrizzi, T., 2007. Teleconnection patterns and Rossby wave propagation associated to generalized frosts over Southern South America. *Climate Dynamics*, 29(6), 633-645.
- Moraes, N. O., Marton, E. y Pimentel, L. C. G., 2014. Análise do Desempenho dos Modelos MM5 e WRF na Simulação da Temperatura do Ar em Superfície na RMRJ. *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ*, 37, 161-168.
- Organización Meteorológica Mundial (OMM-WMO) N°134, 1981. *Guide to Agricultural Meteorological Practices*.
- Pereira, A. R., Angelocci, L. R. y Sentelhas, P. C., 2001. *Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas*. Guaíba-RS: Agropecuária Guaíba. 478p.
- Prabha, T. V., Hoogenboom, G. y Gopalakrishnan S. G., 2007. Evaluation of WRF for frost warning and consequences of cold air pooling, *Eighth WRF Users' Workshop*, June 11-15, 2007, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO (http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/workshops/WS2007/abstracts/p1-21_Prabhakaran.pdf).
- Prabha, T. V. y Hoogenboom, G., 2008. Evaluation of the Weather Research and Forecasting model for two frost events. *Computers and electronics in agriculture*, 64, 234-247.
- Ruiz, J. J., Saulo, S. y Nogués-Paegle, 2010. *WRF Model Sensitivity to Choice*

- of Parameterization over South America: Validation against Surface Variables. *Monthly Weather Review*, 138, 3342-3351.
- Sánchez, S. E., 2002. Nubes de Capa Límite Atmosférica: Estudio numérico y experimental. Tesis (Doctorado en Ciencias Físicas). Universidad Complutense de Madrid.
- Santos, A. P., Gonçalves, J. P., Ferreira, A. S. y Santos, S. R. Q., 2013. Previsão de geadas para a Região Sul do Brasil: Uma avaliação do Modelo ETA 15 km durante o Outono de 2012. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 6, 100-109.
- Seluchi, M. E., 2009. Geadas e friagens. In: Cavalcanti, I. F. A., Ferreira, N. J., Dias, M. A. F., Justi, M. G. A. (Org.). *Tempo e Clima no Brasil*. ed. São Paulo: Oficina de textos, 1, 375-384.
- Seluchi, M. E., Nery, J. T., 1992. Condiciones Meteorológicas Asociadas a la Ocurrencia de Heladas en la Region de Maringá. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 7, 523-534.
- Simmons, A., Uppala, C., Dee, D. y Kobayashi, S., 2007. ERA-Interim: New ECMWF reanalysis products from 1989 onwards. *ECMWF Newsletter*, 110, 25-35.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X. -Y., Wang, W. y Powers, J. G. A., 2008. Description of the Advanced Research WRF Version 3. National Center for Atmospheric Research (NCAR). Boulder, Colorado (EUA).
- Zepka, G. S., 2011. Previsão de descargas atmosféricas usando o modelo de mesoescala WRF. Tesis (Doctorado en Geofísica Espacial), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE.

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo la licencia Creative Commons, que permite el uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.