

# AVALIAÇÃO DO MODELO WRF DURANTE TEMPESTADES EM PRIMAVERAS DE EL NIÑO NO SUL DO BRASIL

Natália Martins Costa<sup>1</sup>, Jeferson P. Machado<sup>1</sup>, Camila de Souza Cardoso<sup>2</sup>, Mário F. L. Quadro<sup>1</sup>, Gabriel Luan Rodrigues<sup>2</sup>, Lourenço Alves de Paula<sup>1</sup>, Tuanny Steffane Rodrigues<sup>2</sup>

[natih\\_17@hotmail.com](mailto:natih_17@hotmail.com)

1 Instituto Federal de Santa Catarina

2 Universidade Federal de Santa Catarina

## RESUMO

Este trabalho teve por objetivo avaliar a capacidade do modelo WRF em simular os índices de instabilidade em situações de tempestades durante primaveras de El Niño no Sul do Brasil em quatro cidades: Curitiba, Florianópolis, Foz do Iguaçu e Porto Alegre. O modelo WRF foi utilizado para a realização das simulações. Os valores simulados dos índices K e TT mostrou se de forma satisfatória e razoavelmente para o LI. Os valores do CAPE simulados pelo WRF foi o que apresentou as maiores diferenças em relação às observações. Com relação ao comportamento dos índices K, TT e LI em relação as mensagens METAR, observou-se que os valores extremos simulados ocorreram muito próximos aos registros de tempo instável nos aeroportos.

## ABSTRACT

This work aims to evaluate of the WRF model to simulate the contents of instability in situations of storms during El Niño springs in Southern Brazil in four cities: Curitiba, Florianopolis, Foz do Iguaçu and Porto Alegre. The WRF model simulated values of the K and TT indices showed up in a satisfactory and reasonably for the LI index. The values of CAPE showed the largest differences compared with observations. When we analyzed the behavior of K, TT and LI indices with the METAR messages, it was observed that the simulated extreme values by WRF occurred at times to unstable weather records in the airports.

**Palavras chave:** Tempestades, Modelo WRF, Índices de Instabilidade.

## 1) INTRODUÇÃO

A Região Sul do Brasil é constantemente afetada pela formação de sistemas de tempo que provocam tempestades severas. Estas tempestades podem se formar a partir da passagem de sistemas frontais, sistemas convectivos de mesoescala ou de origem local, como ocorrem nos meses de verão austral, que em pouco tempo de atuação podem causar danos para vários setores da sociedade como o setor agrícola, aviação, navegação e, por consequência, a economia.

Estudos comprovam que há uma grande influência da fase positiva do fenômeno El Niño Oscilação Sul – ENOS (Kiladis e Mo, 1998) no Sul do Brasil (Grimm et al., 1998; Grimm, 2003; Grimm, 2004),

principalmente na primavera, onde provoca anomalias positivas de precipitação e, conseqüentemente, maior condição para ocorrência de tempestades nessa região. Essas anomalias positivas de precipitação aparecem também no outono e inverno do ano seguinte ao episódio de El Niño. Os impactos do ENOS no Brasil durante a primavera e verão podem ser encontrados nos estudos realizados por Grimm (2003) e Grimm (2004). Ropelewski e Halpert (1987) realizaram um trabalho de análise dos impactos do ENOS para várias regiões do globo e, apesar de contarem com poucos dados observados no Sul do Brasil, os seus resultados sugerem que em anos de El Niño ocorre um excesso de precipitação em relação à normal climatológica. Kim (1998), analisando dados mensais da precipitação acumulada na Região Sul do Brasil, mostrou que em anos de El Niño, há grande probabilidade da ocorrência de meses com excesso de chuvas.

Entretanto, não significa que as regiões afetadas com a influência do ENOS sobre a precipitação mensal e sazonal sofrerão necessariamente influência sobre a frequência e intensidade dos eventos extremos (Tedeschi, 2008). Segundo Silva et al. (1994), mesmo em anos onde há o desfavorecimento das chuvas na região Nordeste do Brasil (anos mais secos- fase positiva do ENOS), as chuvas são tipicamente de origem local, formadas a partir de sistemas convectivos de mesoescala (SCM) que surgem em áreas preferenciais da região.

O perfil termodinâmico da atmosfera pode ser diagnosticado por meio da radiossondagem, que transmite dados de pressão, altitude, posição geográfica, temperatura, umidade relativa e vento das distintas camadas por onde a sonda percorre. Uma forma de analisar a intensidades das tempestades é através de índices de instabilidade. Tais índices envolvem um valor numérico que pode ser obtido através de diferenças entre a temperatura do ar, temperatura do ponto de orvalho e a temperatura do bulbo úmido, entre outros parâmetros definidos entre duas ou mais superfícies isobáricas (Nascimento, 2005). Existem alguns estudos de ajuste de índices de instabilidade para as regiões Sul e Sudeste do país (Beneti e Silva Dias, 1986; Fogaccia e Pereira Filho, 2002), que mostram a importância e a utilidade destes índices nas técnicas de previsão. Fedorova et al. (2010) confirma, no estudo realizado em Pelotas/RS, que os perfis verticais estão associados com as trovoadas, quando o desenvolvimento de instabilidade é observado acima da camada seca e estabilidade em baixos níveis.

Neste contexto, modelos de previsão numérica de tempo de escala global e regional, são ferramentas de extrema importância para a previsão de tempestades no Sul do Brasil. Um exemplo é o modelo regional *Weather Research Forecasting* (WRF) (Skamarock et al., 2008), considerado de última geração e que engloba processos de mesoescala em colaboração com *National Center for Environmental Prediction* (NCEP). Entretanto, é importante testar esses modelos em situações específicas, como em casos de tempestades, onde os índices termodinâmicos indicam um elevado grau de instabilidade na atmosfera.

Diante do exposto, este estudo tem por objetivo avaliar a capacidade do modelo WRF em simular os índices de instabilidade em situações de tempestades durante primaveras de El Niño no Sul do Brasil.

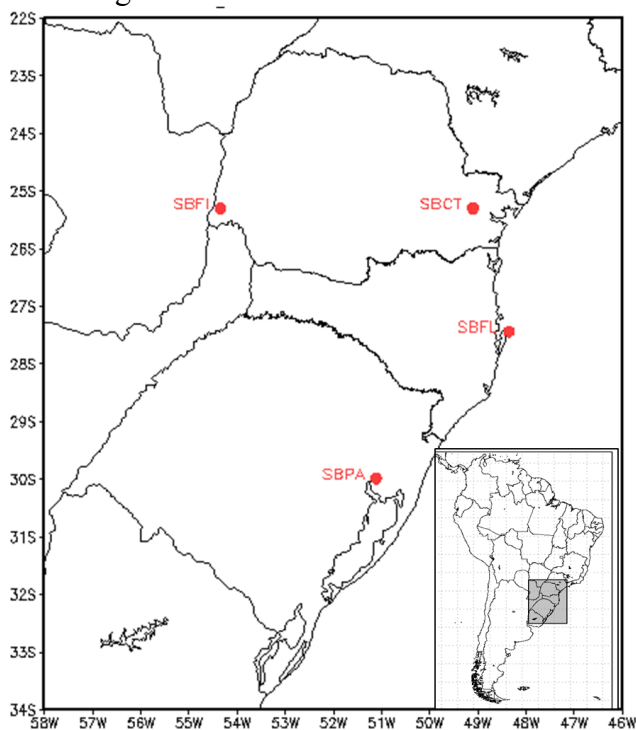
## 2) MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo teve início a partir dos registros de *Thunder Storm* (TS) ou trovoadas acompanhadas de precipitação (TSRA), através de mensagens meteorológicas disponibilizadas em aeródromos (METAR) e os índices de instabilidade Totals (TT), Lifted (LI), K e CAPE de radiossondagens disponibilizadas pelo National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) e pela Universidade de Wyoming, como ferramenta para indicar as condições adversas da atmosfera, durante as primaveras em anos de El Niño ocorridos entre os anos de 1982 a 2010. Os dados estão disponíveis on-line junto ao banco de

dados destas instituições. É importante destacar que as informações sobre a ocorrência e a intensidade da fase positiva do fenômeno ENOS foram disponibilizadas pelo Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC).

A partir das diversas ocorrências registradas em primaveras de El Niño, foram escolhidos trinta casos significativos de tempo instável para este estudo. Entretanto, apenas quatro casos foram simulados com o WRF para este trabalho: Curitiba (SBCT), Florianópolis (SBFL), Foz do Iguaçu (SBFI) e Porto Alegre (SBPA), onde suas localizações são mostradas na Figura 1. Para estes aeroportos foram analisados as mensagens do METAR com registro de TS ou TSRA, e os valores dos índices de instabilidade obtidos das sondagens do Skew-T Log P nos horários das 00 e 12Z.

Para o desenvolvimento deste trabalho foi utilizada a versão 3.3 do modelo regional WRF. Conforme descrito por Zepka (2011) e também disponível em (Skamarock et al., 2008), o modelo WRF faz parte de um sistema de modelagem numérica da atmosfera não-hidrostática, totalmente compressível, destinado tanto para fins de pesquisa quanto operacionais, em diferentes escalas espaciais, desde alguns metros até milhares de quilômetros. Ressalta-se que o seu desenvolvimento é contínuo, apresentando atualizações e correções com boa regularidade.



**Figura 1: Mapa com a localização dos aeroportos no Sul do Brasil.**

Para se obter resultados satisfatórios quanto à previsibilidade de uma tempestade em si, ou qualquer fenômeno adverso de tempo caracterizado por dimensões espacial e temporal muito reduzidas, faz-se necessários dados de entrada de alta qualidade e com altas resoluções temporal e espacial, assim como, alta resolução da grade do modelo, o que é bastante viável em estudos de casos puramente com objetivos de pesquisa (Zepka, 2011). Devido à importância na qualidade dos dados de entrada para o modelo WRF, será utilizada neste trabalho, a reanálise de alta resolução do ERA-Interim (ERA-I) como condição iniciais de contorno para as simulações numéricas a serem realizadas. Esse dados são produzidos pelo European Center for Medium-Range Weather Forecasting (ECMWF), disponíveis em

uma grade com resolução de  $0.75^\circ \times 0.75^\circ$  de latitude por longitude e 37 níveis na vertical para os horários de 00, 06, 12 e 18 UTC (Simmons et al., 2007).

O período escolhido para as simulações com o WRF é apresentado na Tabela I. O modelo foi configurado para três domínios aninhados: 30, 10 e 3 km de resolução horizontal, 19 níveis de resolução vertical, com resultados disponibilizados de 3 em 3 horas. Ressalta-se que o modelo foi rodado no Cluster do projeto CTINFRA do IFSC (Brasil e Quadro, 2014). Além disso, as parametrizações físicas utilizadas nestas simulações não foram alteradas em relação à configuração inicial do modelo (Tabela II).

Localidade	Data inicial	Data final	ENOS
Curitiba (SBCT)	20/11/2010 00Z	22/11/2010 12Z	El Niño Fraco
Florianópolis (SBFL)	19/11/2009 00Z	21/11/2009 12Z	El Niño Fraco
Foz do Iguaçu (SBFI)	06/10/2010 00Z	08/10/2010 12Z	El Niño Fraco
Porto Alegre (SBPA)	11/11/1997 00Z	13/11/1997 12Z	El Niño Forte

**Tabela I: Local e período das simulações numéricas realizadas com o modelo WRF.**

Domínios	Microfísica	Cumulus	Camada superficial	Modelo solo-superfície	Camada Limite Planetária	Radiação de onda curta/longa
D_01	Lin (Purdue)	Grell-3	MM5	Noah	YSU	GFSC/ RRTM
D_02	WSM3	Kain-Fritsch	MM5	Noah	YSU	Dudhia/ RRTM
D_03	WSM3	---	MM5	Noah	YSU	Dudhia/ RRTM

**Tabela II: Esquemas de parametrizações utilizadas para cada domínio do modelo WRF.**

Para a análise dos resultados, foi realizada uma comparação dos valores dos índices de instabilidade extraídos do domínio 3 (D\_03) das simulações referentes de cada localidade, com os valores observados das radiossondagens disponíveis. É importante destacar que os índices foram calculados pelo WRF para os pontos de grade coincidentes com as latitudes e longitudes dos aeroportos selecionados neste estudo. Além disso, o cálculo dos índices foi baseado na metodologia descrita por Nascimento (2005). Deste modo, foi possível calcular o erro médio (ME em inglês), a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE em Inglês) e o Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ). Vale ressaltar que em termos estatísticos, a média dos erros individuais ou viés é o primeiro momento da distribuição das diferenças e não traz informação a respeito dos erros individuais. Apesar de fornecer uma ideia da tendência ou erro sistemático, o viés é afetado pelo fato de que erros individuais positivos e negativos de mesma magnitude se cancelam na somatória, o que geralmente leva à subestimação do erro das simulações (Hallak e Filho, 2011). Já o RMSE é comumente usado para expressar a acurácia dos resultados numéricos com a vantagem de que ele apresenta valores do erro nas mesmas dimensões da variável analisada. Já o  $R^2$  indica a proporção de variação da variável independente (valores observados) que é explicada pela variável dependente (valores simulados), ou seja, é uma ferramenta que avalia a qualidade do ajuste.

### 3) RESULTADOS E DISCUSSÃO

Primeiramente, foi realizada uma análise sinótica baseada em dados de reanálise do NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research) (Kalnay et

al., 1996), com o objetivo de verificar o sistema meteorológico causador da instabilidade em cada um dos casos. Além da reanálise, para auxiliar na identificação do sistema meteorológico atuante, foram utilizadas imagens de satélite e cartas de pressão ao nível médio do mar provenientes da Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil. Por uma questão de limitação de páginas as referentes à análise sinótica não é mostrada, sendo descrita de uma forma resumida a seguir. Para o caso referente a Curitiba (SBCT), observou-se a atuação de um sistema de baixa pressão em superfície e baixos níveis. Para os eventos referentes a Florianópolis (SBFL) e Porto Alegre (SBPA), a formação e o deslocamento de ciclones extratropicais foram responsáveis pela condição de tempo instável. Já para o caso referente a Foz do Iguaçu (SBFI), o sistema meteorológico atuante foi uma frente fria. A Figura 2 mostra os valores simulados pelo WRF da precipitação acumulada para cada evento selecionado. É possível verificar que em todos os casos simulados, o Sul do Brasil apresentou acumulados significativos de chuva, com valores próximos ou até superiores a 100 mm.

Para todos os casos analisados houve a contribuição do Jato de Baixos Níveis (JBN) advectando calor e umidade nas camadas mais baixas da Atmosfera, contribuindo para os valores mais elevados dos índices de instabilidade. Ressalta-se que para caracterizar a ocorrência de JBN utilizou-se um dos critérios de Bonner (Bonner, 1968) que especifica que a magnitude do vento deve ser maior ou igual a  $12 \text{ m.s}^{-1}$ . A condição de JBN pode observada pelo campo de divergência de umidade simulado pelo WRF para cada caso (Figura 3), onde os valores negativos indicam o transporte de umidade em 850 hPa realizado pelo JBN em direção ao Sul do Brasil. Conforme Nascimento (2005), o transporte de umidade proveniente da Amazônia para as latitudes mais altas aumenta a oferta de umidade na camada limite planetária e favorece a desestabilização da atmosfera, ambos ingredientes necessários para tempestades.

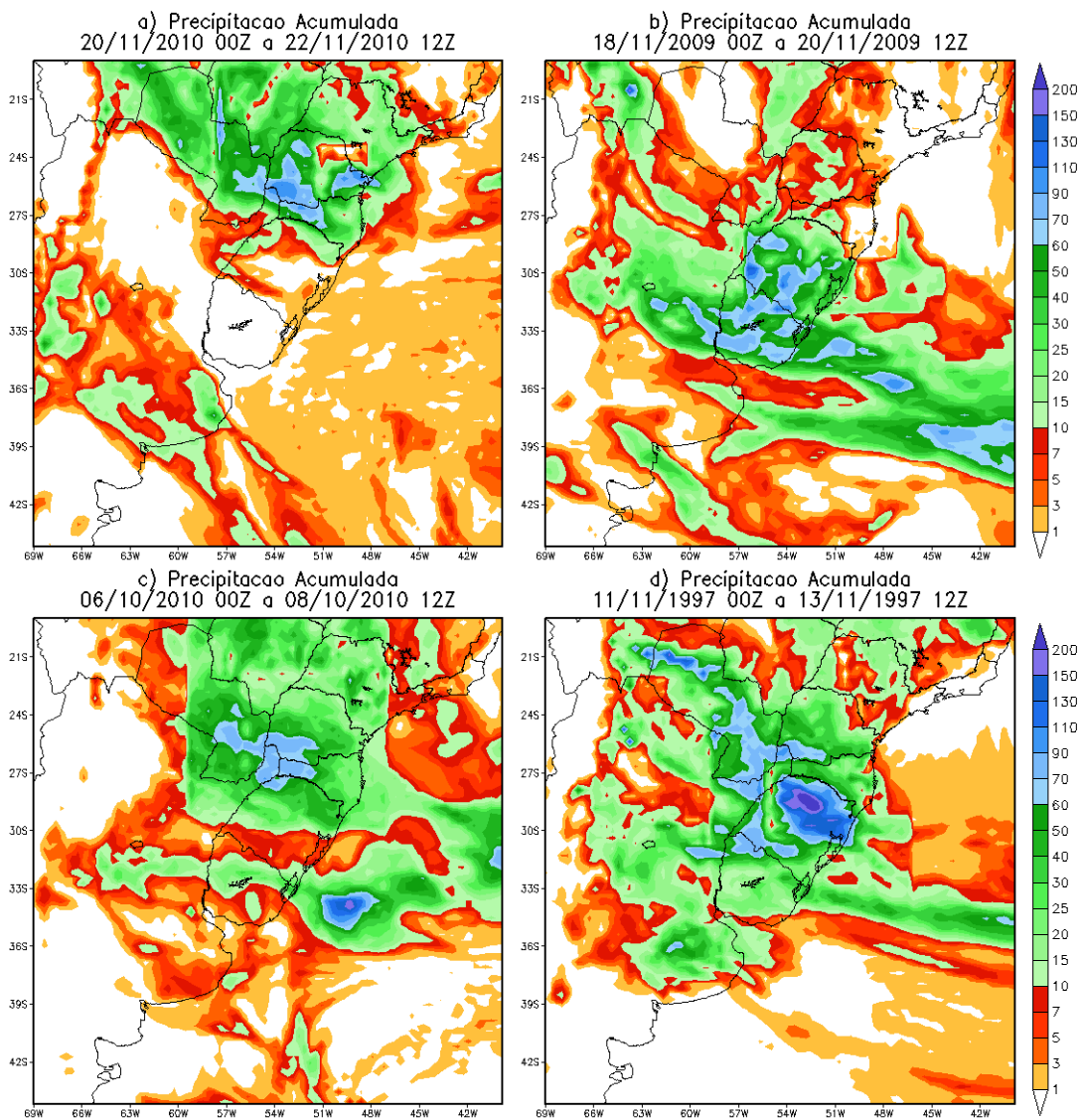
Para a avaliação dos índices de instabilidade, a análise estatística é mostrada a seguir para uma melhor interpretação dos resultados obtidos com as simulações quando comparadas com os valores observados. Desta forma, os resultados do ME, RMSE e  $R^2$  são mostrados considerando os valores dos índices para todas as simulações, como pode ser observado na Tabela III. De um modo geral, os valores positivos de ME indicam que o modelo WRF apresentou uma tendência em superestimar os índices K, TT e o índice CAPE, enquanto que o índice LI apresentou valor de EM próximo a 0. Como mostrado anteriormente o ME não é suficiente para a análise estatística, visto que ele não indica a magnitude dos erros. Logo, a Tabela III mostra os resultados para o RMSE e o  $R^2$ . É possível observar que o valor de RMSE foi bastante elevado para o CAPE. Além disso, o CAPE apresentou um valor baixo para o  $R^2$ , indicando que apenas 17% dos valores de CAPE observados, são explicados pelas simulações. Como o CAPE calcula a integração da flutuabilidade da parcela entre os níveis de convecção espontânea (NCE) e equilíbrio (NE), sendo a área positiva do diagrama termodinâmico, os modelos numéricos têm dificuldade em simular ou prever este índice, visto que o erro aumenta durante o cálculo da integração.

A Figura 4 mostra o comportamento dos índices K, TT e LI durante as 60 horas simuladas pelo WRF. A mesma figura também indica os valores de referência para cada índice, conforme (Nascimento, 2005). Vale ressaltar que o CAPE não é mostrado, visto que não foi simulado de forma satisfatória pelo WRF. Desta forma, para considerar a atmosfera instável, o índice K deve apresentar um valor maior que 25, TT maior que 40 ou LI menor que 2. Ao analisar a série temporal para as 4 localidades, nota-se que o WRF simulou valores significativos dos índices. Em todas as situações o índice K foi por algum momento maior que 40, o TT chegou a 50 e o LI ficou próximo de -5. Conforme Nascimento (2005), esses valores extremos combinados gerariam condição para instabilidade muito forte, com possibilidade de tempestades severas com chuvas fortes em qualquer um dos casos selecionados.

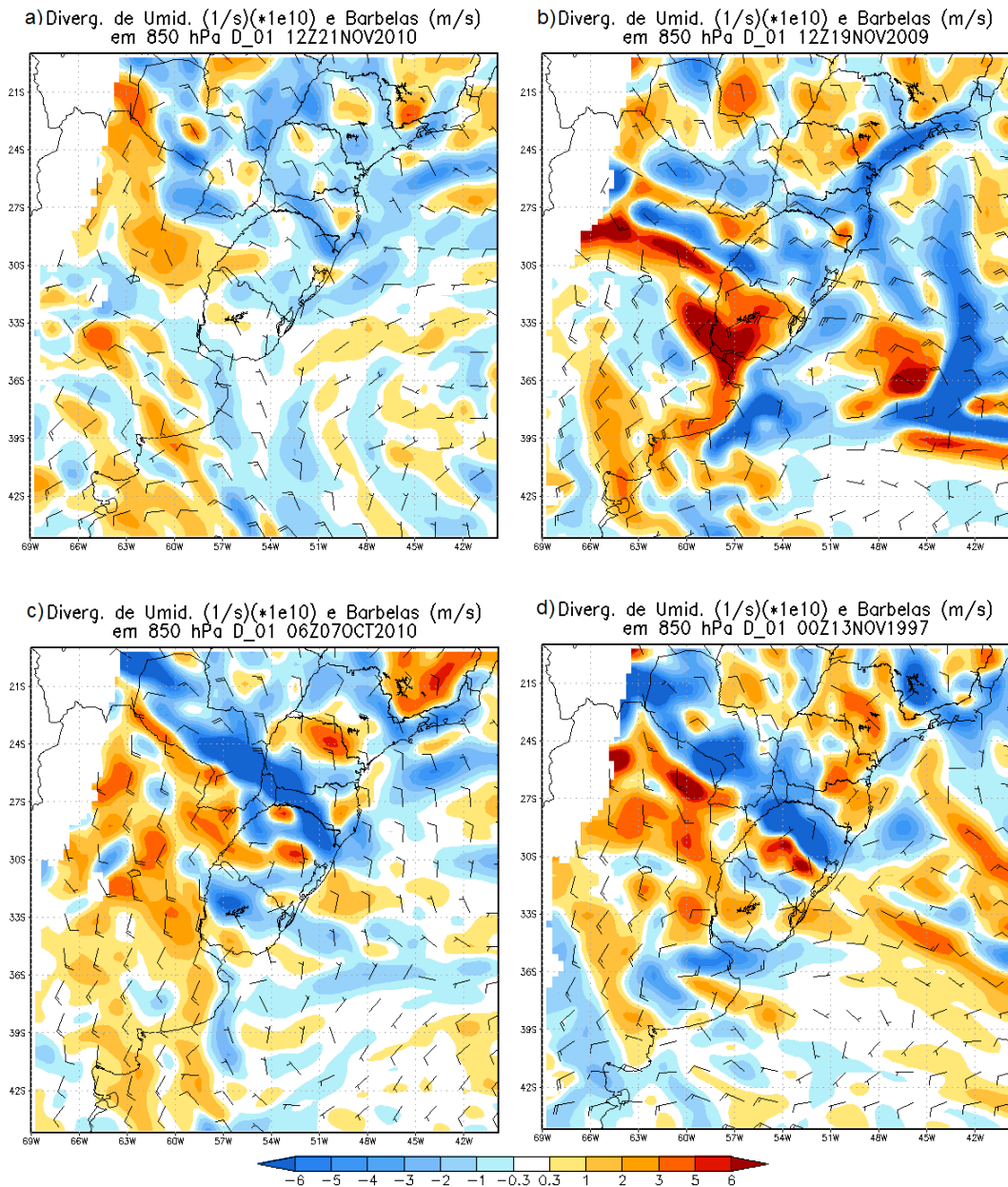
Ao relacionar os índices de instabilidade com as mensagens METAR disponibilizadas nos aeródromos (não mostrado), foi possível observar que o aeroporto de Curitiba (CBCT) reportou a condição de chuva com trovoadas às 18:00 Z do dia 21/11/2010. Ao analisar os valores dos índices simulados pelo WRF para Curitiba (Figura 4a), notou-se que os valores de K e TT e LI eram extremos entre 39 e 42 horas de simulação (entre 15:00 e 18:00 Z), muito próximo ao registro observado no METAR.

Para o aeroporto de Florianópolis (SBFL), o METAR reportou chuva com trovoadas e rajadas de vento superiores a 90 km/h a partir das 18:00 Z do dia 18/11/2009. Para este caso o WRF também simulou os valores dos índices com máxima instabilidade muito próximo ao registrado na mensagem (Figura 4b).

Em Foz do Iguaçu (SBFI) os valores dos índices simulados pelo WRF (Figura 4c) caracterizavam condição de instabilidade a partir da manhã do dia 07/10/2010, enquanto que o METAR desta mesma localidade reportou chuva forte com trovoadas já no decorrer da madrugada.



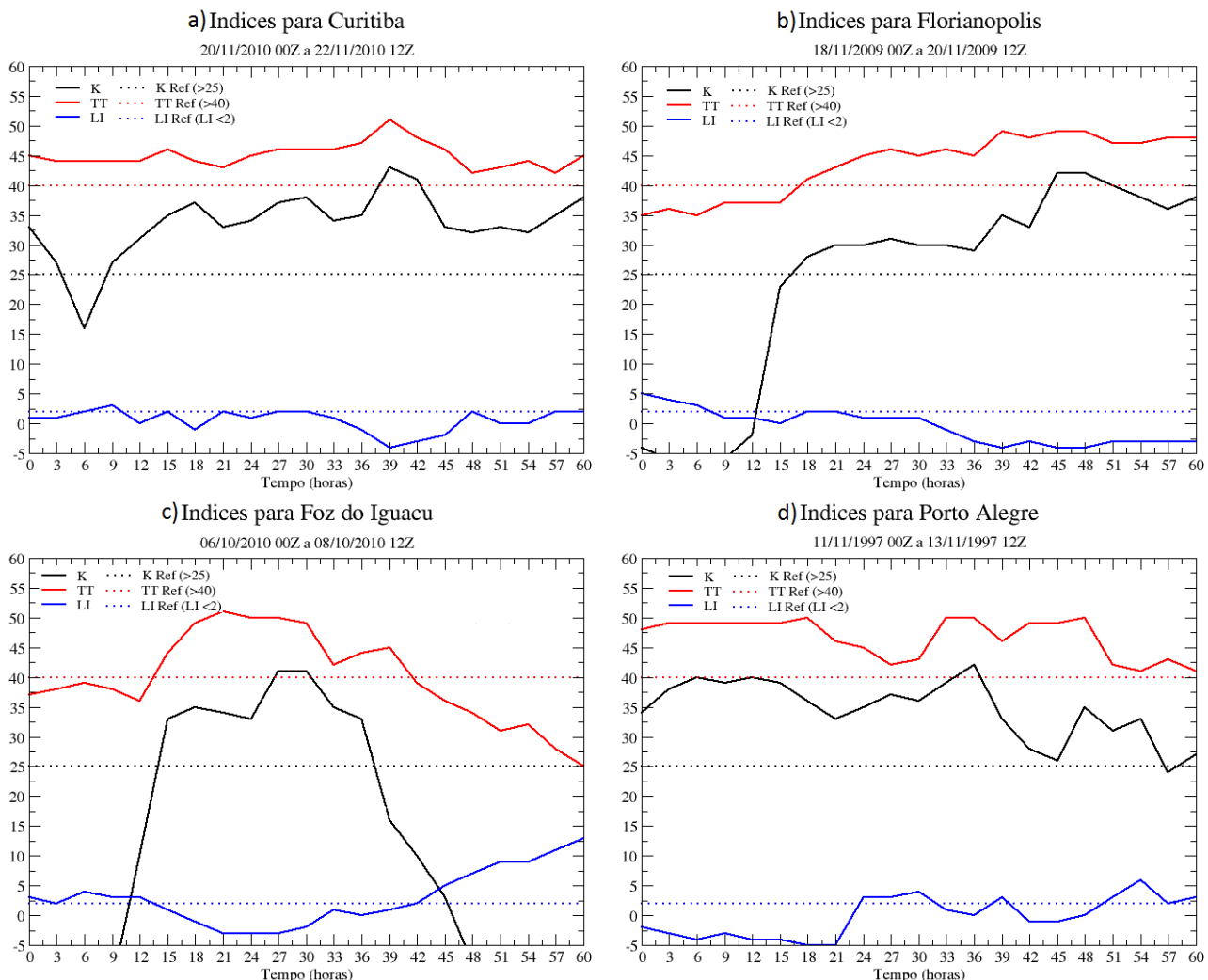
**Figura 2: Precipitação acumulada (mm) simulada pelo WRF durante todo o período simulado para cada evento.**



**Figura 3: Campo de divergência de umidade calculado pelo WRF em cada evento simulado com os respectivos horários.**

Índices	ME	RMSE	R <sup>2</sup>
K	3,69	11,95	0,68
TT	1,36	4,55	0,59
LI	-0,45	3,55	0,32
CAPE	98,88 (J/kg)	434,65 (J/kg)	0,17

**Tabela III: Valores de ME, RMSE e R<sup>2</sup> obtidos a partir dos índices de instabilidade K, TT, LI e CAPE para os casos simulados.**



**Figura 4: Série temporal dos índices K, TT e LI e seus respectivos valores de referência para cada evento simulado.**

#### 4) CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo apresentou uma avaliação preliminar dos índices de instabilidade para eventos de tempestades em anos de El Niño no Sul do Brasil a partir de simulações com o modelo WRF. De acordo com a análise estatística, o WRF simulou os valores dos índices K e TT de forma satisfatória e razoavelmente para o LI. Por outro lado os valores do CAPE simulados pelo WRF foi o que apresentou as maiores diferenças em relação às observações. Quando analisou-se o comportamento dos índices K, TT e LI em relação as mensagens METAR, observou-se que os valores extremos simulados ocorreram muito próximos aos registros de tempo instável nos aeroportos. Trabalhos futuros devem ser realizados com o intuito de avaliar o conjunto parametrizações físicas do WRF que mais se adapta em eventos de tempestades no Sul do Brasil. Além disso, mais estudos de caso devem ser simulados, com o intuito de se obter uma estatística mais robusta.



**AGRADECIMENTOS:** Os autores agradecem ao Projeto CT-INFRA (processo 04.12.0270.00) pelo apoio financeiro e pela estrutura disponibilizada para a realização das simulações numéricas.

## REFERÊNCIAS

**Bender, F. D., 2012:** Verificação da previsão de tempo em São Paulo com o modelo operacional WRF. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), USP.

**Beneti, C. A., Silva Dias, M. A., 1986:** Análise da performance de índices de instabilidade como previsores de tempestades na região de São Paulo. In: Anais do IV Congresso Brasileiro de Meteorologia, Brasília/DF, Soc. Bras. Meteorologia, v.2, p. 65-70.

**Bonner, W. D. 1968:** Climatology of the low level jet. *Mon. Wea. Rev.*, v. 96, p. 833-850.

**Brasil, G. S., 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.

**Centro de Hidrografia da Marinha.** Disponível em: <<http://www.mar.mil.br>>.

**Fedorova, N. et al, 2010:** Estrutura Vertical da Troposfera Associada com Nuvens Cumulonimbus e Nimbostratus em Pelotas, RS. In: *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.25, n.4, 487 - 500.

**Fogaccia, C. V. C., Pereira Filho, A. J., 2002:** Turbulência e cisalhamento do vento na área do Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos. In: Anais do XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Foz do Iguaçu/PR, Soc. Bras. Meteorologia, em mídia digital.

**Grimm, A. M.; Ferraz, S. E. T. e Gomes, J., 1998:** Precipitation anomalies in Southern Brazil associated with El Niño and La Niña events. *J. Climate*, v.11, p.2863-2880.

**Grimm, A. M., 2004:** How do La Niña events disturb the summer monsoon system in Brazil? *Climate Dynamics*, v.22, n. 2-3, p.123-138.

**Grimm, A. M., 2003:** The El Niño Impact on Summer Monsoon in Brazil: Regional Processes versus Remote Influences. *J. Climate*, v. 16, p.263-280.

**Hallak, R. e 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.

**Kalnay, E.; Kanamitsu, M.; Kistler, R.; Collins, W.; Deaven, D.; Gandin, L.; Iredell, M.; Saha, S.; White, G.; Woolen, J.; Zhu, Y.; Chellian, M.; Ebisuzaki, W.; Higgins, W.; Janowiak, J.; Mo, K. C.; Ropelewski, C.; Wang, J.; Leetma, A. Reynolds, R.; Janne, R.; Joseph, D., 1996:** The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v.77, p. 437-470, 1996.

**Kiladis, G. N., MO, K., 1998:** Interannual and intraseasonal variability in the Southern Hemisphere. In: Meteorological Monographs, Ed. D. Karoly and D. Vincent. American Meteorological Society. v. 27, n. 49, p. 307- 333.

**Kim, S. I., 1998:** Análise da variabilidade e variação dos El Niño, oscilação Sul e chuvas nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina do Brasil. In: XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia: a meteorologia a serviço de sociedade, Pelotas. UFPel.

**Nascimento, E., 2005:** Previsão de tempestades severas utilizando-se parâmetros convectivos e modelos de mesoescala: Uma estratégia operacional adotável no Brasil? Revista Brasileira de Meteorologia, 20, 1, 121-140.

**Ropelewski, C.F., Halpert, M. S., 1987:** Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño Southern Oscillation. Monthly Weather Review, v. 115, p. 1606-1626.

**Silva, R. R., Gandu, A. W., Silva Filho, V. P. Klein, M.; Gomes Filho, M. F.; Branco, M. A. C., 1994:** Estudo numérico da influência da topografia na formação de sistemas convectivos no Sul do Ceará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 7, CONGRESSO LATINO AMERICANO DE METEOROLOGIA ,2, Belo Horizonte. Anais .... p. 529-531.

**Simmons, A., Uppala, C., Dee, D. e 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., Powers, J. G. A., 2008:** Description of the Advanced Research WRF Version 3. National Center for Atmospheric Research (NCAR). Boulder, Colorado (EUA), p. 125.

**Tedeschi, R. G., 2008:** Impacto de Episódios EL Niño e La Niña Sobre a Frequência de Eventos Extremos de Precipitação e Vazão na América do Sul. Universidade Federal do Paraná. Curitiba.

**Zepka, G. S., 2011:** Previsão de descargas atmosféricas usando o modelo de mesoescala WRF. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial), INPE.