



Análise Preliminar dos Índices de Instabilidade a Partir de Simulações Realizadas com o Modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF) para o Sul do Brasil
Preliminary Analysis of Instability Indices from Simulations With Weather Research and Forecasting (WRF) Model for the Southern Brazil

Jeferson Prietsch Machado¹; Camila de Souza Cardoso²; Mário Francisco Leal de Quadro²,
Tayná Domingues de Almeida¹; Natália Martins Costa²; Gabriel Luan Rodrigues²;
Tuanny Steffane Rodrigues² & Lourenço Alves de Paula²

¹Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências, Centro de Meteorologia de Bauru,
Avenida Engenheiro Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01, 17.033-360 Vargem Limpa, Bauru, SP, Brasil

²Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis,

Avenida Mauro Ramos, 950, 88.020-300, Centro, Florianópolis, SC, Brasil

E-mails: jeferson@fc.unesp.br; cacazinhawilliam@gmail.com; mquadro95@gmail.com; tay-nalmeida@hotmail.com;
natih_17@hotmail.com; gabrielluanrodrigues@gmail.com; lourencod.p58@gmail.com; tuannysr@gmail.com

Recebido em: 28/04/2017 Aprovado em: 23/06/2017

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2017_2_153_162

Resumo

Este trabalho teve por objetivo avaliar a capacidade do modelo WRF em simular os índices de instabilidade em situações de tempestades durante primaveras com o fenômeno El Niño/Oscilação Sul 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, sendo que os valores dos índices K e TT foram simulados de forma satisfatória pelo WRF e razoavelmente para o LI. Os valores da CAPE simulados pelo WRF foi o que apresentaram as maiores diferenças em relação às observações. Com relação ao comportamento dos índices K, TT e LI em relação às mensagens METAR, observou-se que os valores extremos simulados ocorreram muito próximos aos registros de tempo instável nos aeroportos.

Palavras-chave: Tempestades; Modelo WRF; Índices de instabilidade

Abstract

This paper aims to evaluate of the WRF model to simulate the instability indices during storms springs with El Niño/Southern Oscillation in four cities of Southern Brazil: Curitiba, Florianópolis, Foz do Iguaçu and Porto Alegre. The K and TT values were satisfactorily simulated and LI index were reasonably simulated by WRF. 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 code, it was observed that the simulated extreme values by WRF occurred at times to unstable weather records in the airports.

Keywords: Storms; WRF Model; Instability indices

1 Introdução

A previsão de condições adversas na atmosfera, seguidas por tempestades, é de grande importância para a sociedade, pois afeta diretamente a economia e a população através da ocorrência de ventos fortes, descargas elétricas, enchentes e granizo. Desta forma, através da previsão de tempo, pode-se emitir alertas indicando a intensidade do fenômeno e auxiliando em medidas de mitigação.

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. Além disso, essas tempestades podem, muitas vezes, apresentar risco à população, devido à ocorrência de ventos fortes, descargas elétricas, granizo, enchentes e, em alguns casos, ocorre a formação de tornados. Vale ressaltar que o ano de 2015 apresentou registros de tornados em Santa Catarina e no estado do Paraná.

Estudos comprovam que há uma grande influência da fase positiva do fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS) no Sul do Brasil, principalmente na primavera, quando observa-se anomalias positivas de precipitação e, conseqüentemente, maior condição para ocorrência de tempestades nessa região (Grimm *et al.*, 1998; Grimm, 2003, 2004; Kiladis & Mo, 1998). Ropelewski & 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).

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 que mostram a importância e a utilidade destes índices nas técnicas de previsão (Beneti & Silva Dias, 1986; Fogaccia & Pereira Filho, 2002). Fedorova *et al.* (2010) confirmam, 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. Hallak & Pereira Filho (2012) analisaram o comportamento dos índices para a região metropolitana de São Paulo, de modo que em grande parte dos casos de precipitação intensa as circulações locais de mesoescala foram determinantes para o desenvolvimento de sistemas convectivos.

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 and 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 no Sul do Brasil que estavam sob a influência do fenômeno ENOS. A partir desta avaliação, será possível desenvolver e aplicar em modo operacional, produtos específicos que informem um prognóstico da atmosfera, indicando as regiões com maior potencial para ocorrência de tempestades a partir destes índices de instabilidade simulados com o WRF.

2 Materiais e Métodos

Este estudo teve início a partir dos registros de *Thunder Storm* (TS) ou trovoada acompanhada de precipitação (TSRA), através de mensagens meteorológicas disponibilizadas em aeródromos (METAR) e os índices de instabilidade Totals (TT), Lifted (LI), K_e e *Convective Available potential energy* (CAPE) de radiossondagens disponibilizadas pelo *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) e pela Universidade de Wyoming. Ambas as informações foram utilizadas como ferramentas para indicar as condições adversas da atmosfera, durante as primaveras sob a influência do fenômeno ENOS ocorridos entre os anos de 1982 a 2010. As informações sobre a ocorrência e a intensidade da fase positiva/negativa do fenômeno ENOS foram seguidas conforme a classificação estabelecida pela *Golden Gate Weather Service*.

A partir das diversas ocorrências registradas em primaveras de ENOS, foram escolhidos trinta casos significativos de tempo instável para este estudo. Entretanto, quatro casos foram simulados com o WRF para este trabalho: Curitiba (SBCT), Florianópolis (SBFL), Foz do Iguazu (SBFI) e Porto Alegre (SBPA), onde suas localizações são mostradas na Figura 1. Para estes aeroportos selecionados, 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 12 UTC (Universal Time Coordinated). Vale ressaltar que a escolha destes aeroportos se deu em função de haver dados de radiossondagens disponíveis para os dias em que ocorreram as tempestades. O número completo de casos foi utilizado em outro estudo do mesmo projeto, com a finalidade de obter o comportamento dos índices de instabilidade em primaveras de El Niño a partir de dados de reanálise (Paula *et al.*, 2015).

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, destinado tanto para fins de pesquisa quanto operacionais, em diferentes escalas espaciais, desde alguns metros até milhares de quilômetros. Ressalta-se que o

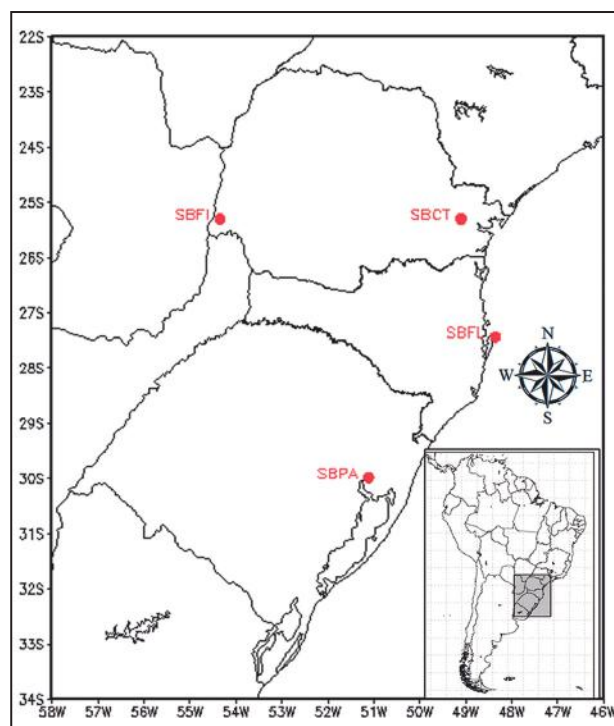


Figura 1 Mapa com a localização dos aeroportos no Sul do Brasil.

seu desenvolvimento é contínuo, apresentando atualizações e correções com boa regularidade. Sua estrutura é representada por dois núcleos dinâmicos sendo o *Nonhydrostatic Mesoscale Model* (NMM) e o *Advanced Research WRF* (ARW). Vale ressaltar que o núcleo ARW foi utilizado neste estudo.

De acordo com Zepka (2011), 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. 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; Dee *et al.*, 2011).

**Análise Preliminar dos Índices de Instabilidade a Partir de Simulações
Realizadas com o Modelo Weather Research and Forecasting (WRF) para o Sul do Brasil**

Jeferson Prietsch Machado; Camila de Souza Cardoso; Mário Francisco Leal de Quadro;

Tayná Domingues de Almeida; Natália Martins Costa; Gabriel Luan Rodrigues; Tuanny Steffane Rodrigues & Lourenço Alves de Paula

O período escolhido para as simulações com o WRF é apresentado na Tabela 1. O modelo foi configurado para três domínios aninhados: 30, 10 e 3 km de resolução horizontal, 37 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 Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) (Brasil & Quadro, 2014). Além disso, as parametrizações físicas utilizadas nestas simulações não foram alteradas em relação à configuração inicial do modelo (Tabela 2).

Localidade	Data Inicial	Data Final	ENOS
Curitiba (SBCT)	20/11/2010 00Z	22/11/2010 12Z	La Niña Moderado
Florianópolis (SBFL)	18/11/2009 00Z	20/11/2009 12Z	El Niño Moderado
Foz do Iguaçu (SBFI)	06/10/2010 00Z	08/10/2010 12Z	La Niña Moderado
Porto Alegre (SBPA)	11/11/1997 00Z	13/11/1997 12Z	El Niño Forte

Tabela 1 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 2 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 km (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). Hallak & Pereira Filho (2011) destacam 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. Os autores também afirmam que, apesar de fornecer

uma ideia da tendência, o viés é afetado em função de que erros individuais positivos e negativos de mesma magnitude se cancelam na somatória, o que geralmente leva à subestimação do erro das simulações. Já o RMSE expressa a acurácia dos resultados numéricos com a vantagem de apresentar 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.

Com relação à apresentação dos resultados, primeiramente, foi realizada uma análise sinótica baseada nos dados de reanálise do Era-Interim, 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.

3 Resultados

A partir da análise sinótica dos eventos de tempestades realizada com os dados do Era-Interim determinou-se os sistemas atmosféricos atuantes em cada caso. Por uma questão de limitação de páginas a análise sinótica de cada evento não é mostrada, porém é descrita de forma resumida. 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. De um modo geral, estes sistemas meteorológicos citados em cada evento apresentaram potencial para ocorrência com chuvas e ventos fortes.

A Figura 2 mostra os valores de precipitação acumulada simulados pelo WRF para cada evento a partir do domínio 30 km (D_01). 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 em algumas localidades. Os maiores volumes de

**Análise Preliminar dos Índices de Instabilidade a Partir de Simulações
Realizadas com o Modelo Weather Research and Forecasting (WRF) para o Sul do Brasil**

Jeferson Prietsch Machado; Camila de Souza Cardoso; Mário Francisco Leal de Quadro;

Tayná Domingues de Almeida; Natália Martins Costa; Gabriel Luan Rodrigues; Tuanny Steffane Rodrigues & Lourenço Alves de Paula

chuva simulados pelo WRF nem sempre ocorreram no aeródromo selecionado, indicando que os sistemas meteorológicos atuantes provocaram chuva de maneira abrangente. Ao comparar os valores acumulados de precipitação do WRF com dados fornecidos pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) para a mesma área de abrangência da Figura 2 (não mostrado), foi possível observar que o modelo WRF simulou razoavelmente esta variável meteorológica em todos os eventos. As principais diferenças encontradas foram em relação ao fato de que o modelo WRF apresentou uma tendência de superestimar a precipitação observada e, as regiões onde foram observados os pontuais mais elevados nem sempre coincidiram com o que foi simulado pelo modelo. Ao analisar a precipitação simulada para a maior resolução do WRF (domínio D_03) foi possível observar os valores acumulados em cada localidade e comparar com os valores medidos em estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Com exceção do caso de Florianópolis, o modelo WRF superestimou a precipitação acumulada para as 60 horas de simulação, principalmente para o evento de Porto Alegre e de Curitiba. Entretanto, o campo de precipitação é o mais problemático, em termos de simulação e previsão para os modelos atmosféricos, visto ao elevado número de parametrizações existentes para microfísica e cumulus. A superestimava da precipitação para a menor resolução do WRF (30 km) pode estar associada diretamente à parametrização de cumulus que foi utilizada nas simulações. Neste contexto, Oliveira (2014) realizou uma série de simulações na região ciclogênica próxima da região da foz do Rio da Prata com diferentes parametrizações cumulus. De acordo com o autor, ao utilizar o esquema Kain-Fritsch foi produzido uma maior área de chuva, principalmente em situações moderadas e fortes do que os esquemas Grell (utilizado neste estudo) e BMJ. Com relação ao domínio de 3 km, no qual não se recomenda a utilização de parametrização cumulus, as diferenças podem ser explicadas em função da limitação do modelo em reproduzir com maior exatidão os valores de precipitação para um determinado ponto de grade.

Para todos os casos analisados houve a contribuição do Jato de Baixos Níveis (JBN), o que favoreceu a advecção de 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 critério 1 de Bonner (Bonner, 1968), o qual especifica que a magnitude do vento deve ser maior ou igual a 12 m.s^{-1} , com uma taxa de decaimento de 6 m/s por km. 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. Marengo *et al.* (2009) complementa que na saída do JBN, no Sul do Brasil, existe uma convergência dos fluxos que vêm da Amazônia e do Atlântico Sul, favorecendo ainda mais a ocorrência de tempestades. É importante destacar que esta convergência pode ser observada na Figura 3, principalmente na altura do Litoral Sul do Brasil (valores negativos).

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 3. De um modo geral, os valores positivos de ME indicam que o modelo WRF apresentou uma tendência em superestimar os índices K, TT e a CAPE, enquanto que o índice LI apresentou valor de ME próximo a 0. A superestimativa indicada para os índices K e TT podem estar associadas ao fato do modelo WRF superestimar o conteúdo de umidade em baixos níveis, favorecendo, também, a superestimativa da precipitação mostrada anteriormente.

Como mostrado anteriormente o ME não é suficiente para a análise estatística, visto que ele não indica a magnitude dos erros. Logo, a Tabela 3 também mostra os resultados para o RMSE e o R^2 . É possível observar que o valor de RMSE foi bastante elevado para a CAPE. Além disso, a CAPE apresentou um valor baixo para o R^2 , indicando que apenas 17% dos valores de CAPE observados, são explicados pelas simulações. Como a CAPE calcula a

Análise Preliminar dos Índices de Instabilidade a Partir de Simulações
Realizadas com o Modelo Weather Research and Forecasting (WRF) para o Sul do Brasil

Jeferson Prietsch Machado; Camila de Souza Cardoso; Mário Francisco Leal de Quadro;

Tayná Domingues de Almeida; Natália Martins Costa; Gabriel Luan Rodrigues; Tuanny Steffane Rodrigues & Lourenço Alves de Paula

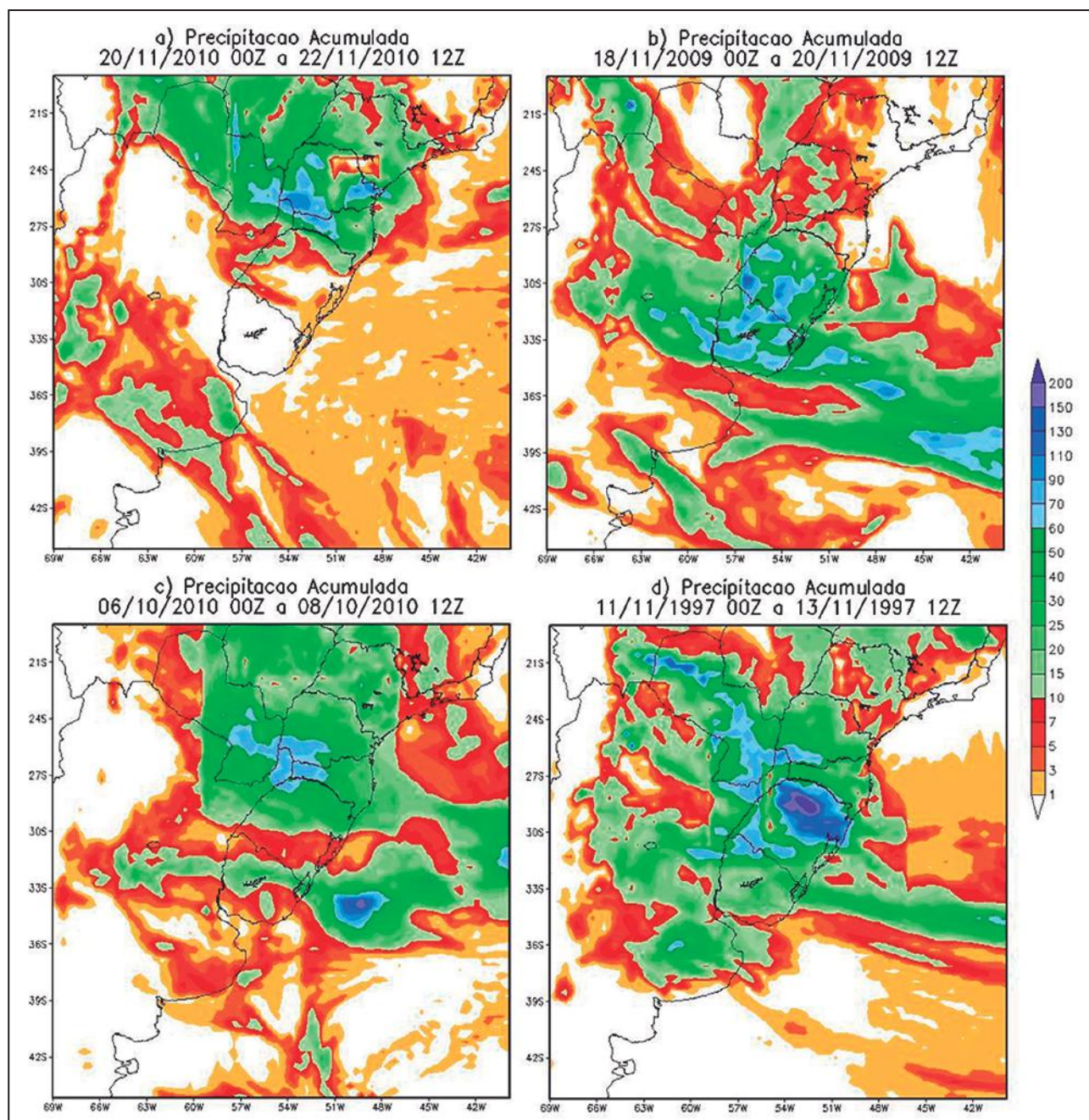


Figura 2 Precipitação acumulada (mm) simulada pelo WRF durante todo o período simulado para cada evento: A. Curitiba; B. Florianópolis; C. Foz do Iguaçu; D. Porto Alegre.

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. Os índices K e TT apresentaram os maiores valores de R^2 , indicando um melhor ajuste em relação aos dados observados (radiossondagens). Esse melhor resultado pode ser

explicado pela forma de como são calculados estes dois índices. O índice K baseia-se na taxa de variação vertical da temperatura, no conteúdo de umidade e na extensão vertical da camada úmida nos níveis de 850, 700 e 500 hPa. O índice TT calcula a taxa de variação vertical de temperatura em níveis médios, a umidade no nível de 850 hPa e a temperatura no nível de 500 hPa (Tavares & Mota, 2012). Deste modo, ao utilizar informações de três níveis atmosféricos,

**Análise Preliminar dos Índices de Instabilidade a Partir de Simulações
Realizadas com o Modelo Weather Research and Forecasting (WRF) para o Sul do Brasil**

Jeferson Prietsch Machado; Camila de Souza Cardoso; Mário Francisco Leal de Quadro;
Tayná Domingues de Almeida; Natália Martins Costa; Gabriel Luan Rodrigues; Tuanny Steffane Rodrigues & Lourenço Alves de Paula

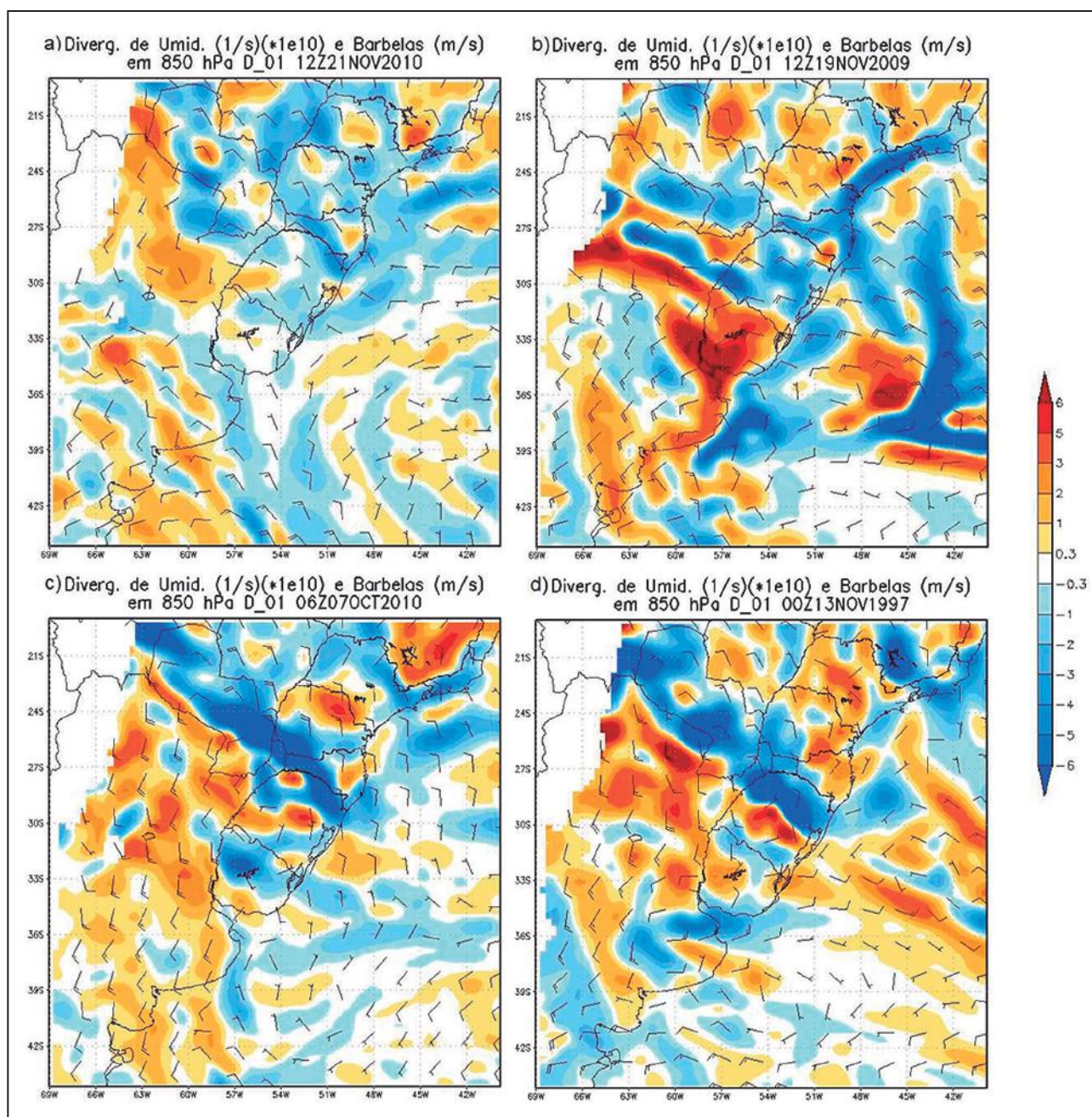


Figura 3 Campo de divergência de umidade calculado pelo WRF em cada evento simulado com os respectivos horários. A. Curitiba; B. Florianópolis; C. Foz do Iguaçu; D. Porto Alegre.

o modelo tende a apresentar um valor mais próximo ao fornecido pela radiossondagem. Já o índice LI é definido pela diferença entre a temperatura do ar ambiente e a temperatura da parcela, ambas em 500 hPa. Logo, ao utilizar apenas este nível para o cálculo, qualquer erro do modelo em simular a temperatura no referido nível, estará diretamente associado à magnitude do erro entre o índice LI calculado pelo WRF e da radiossondagem.

Índices	ME	RMSE	R ²
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 3 Valores de ME, RMSE e R² obtidos a partir dos índices de instabilidade K, TT, LI e CAPE para os casos simulados.

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 a CAPE não é mostrada, visto que não foi simulada 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 (Nascimento, 2005). Ao analisar a série temporal para as 4 localidades, nota-se que o WRF simulou valores dos índices, que caracterizam uma condição de atmosfera instável. 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. Além disso, Silva Dias (2000) destaca que se ambos K e TT forem altos, a tendência é de chuvas torrenciais.

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 horário em que foi registrado na mensagem METAR (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. Por fim, em Porto Alegre (Figura 4D), o METAR reportou a ocorrência de chuvas com trovoadas no início da noite do dia 11/11/1997, período em que o WRF simulou os TT e LI com valores típicos para ocorrência de tempestades. Durante o dia 12/11/1997 o METAR continuou reportando condição de chuva com trovoadas até o início da tarde. Vale ressaltar que os índices LI e K simulados

pelo WRF já não indicavam potencial para tempestades. Entretanto o índice TT simulado apresentava valores próximos a 50, o que indica potencial para convecção e trovoadas severas e isoladas. Silva Dias (2000) complementa que a condição de índice K baixo e TT maior que 45, há possibilidade de tempestade severa. Vale ressaltar que, de acordo com Nascimento (2005), os parâmetros para a previsão de eventos convectivos são capazes de apontar condições potencialmente favoráveis à ocorrência de tempestades (severas ou não), porém não exploram a questão importante de iniciação convectiva, assim tais parâmetros possuem alto índice de alarme falso. Neste contexto, Silva *et al.* (2015) realizaram a avaliação de indicadores atmosféricos utilizando o modelo WRF em eventos de chuva na cidade do Rio de Janeiro, sendo que K e TT apresentaram alta probabilidade de detecção para os dias de ocorrência de chuvas severas, mas também apresentaram probabilidade de alarme falso.

4 Considerações Finais

Este estudo apresentou uma avaliação preliminar dos índices de instabilidade para eventos de tempestades em anos de El Niño e La Niña 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 da CAPE simulados pelo WRF foram os que apresentaram 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. Vale ressaltar que 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.

5 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 e, também, à UNESP pela bolsa concedida a um dos autores a partir do edital 09/2016 (Primeiros Projetos).

**Análise Preliminar dos Índices de Instabilidade a Partir de Simulações
Realizadas com o Modelo Weather Research and Forecasting (WRF) para o Sul do Brasil**

Jeferson Prietsch Machado; Camila de Souza Cardoso; Mário Francisco Leal de Quadro;

Tayná Domingues de Almeida; Natália Martins Costa; Gabriel Luan Rodrigues; Tuanny Steffane Rodrigues & Lourenço Alves de Paula

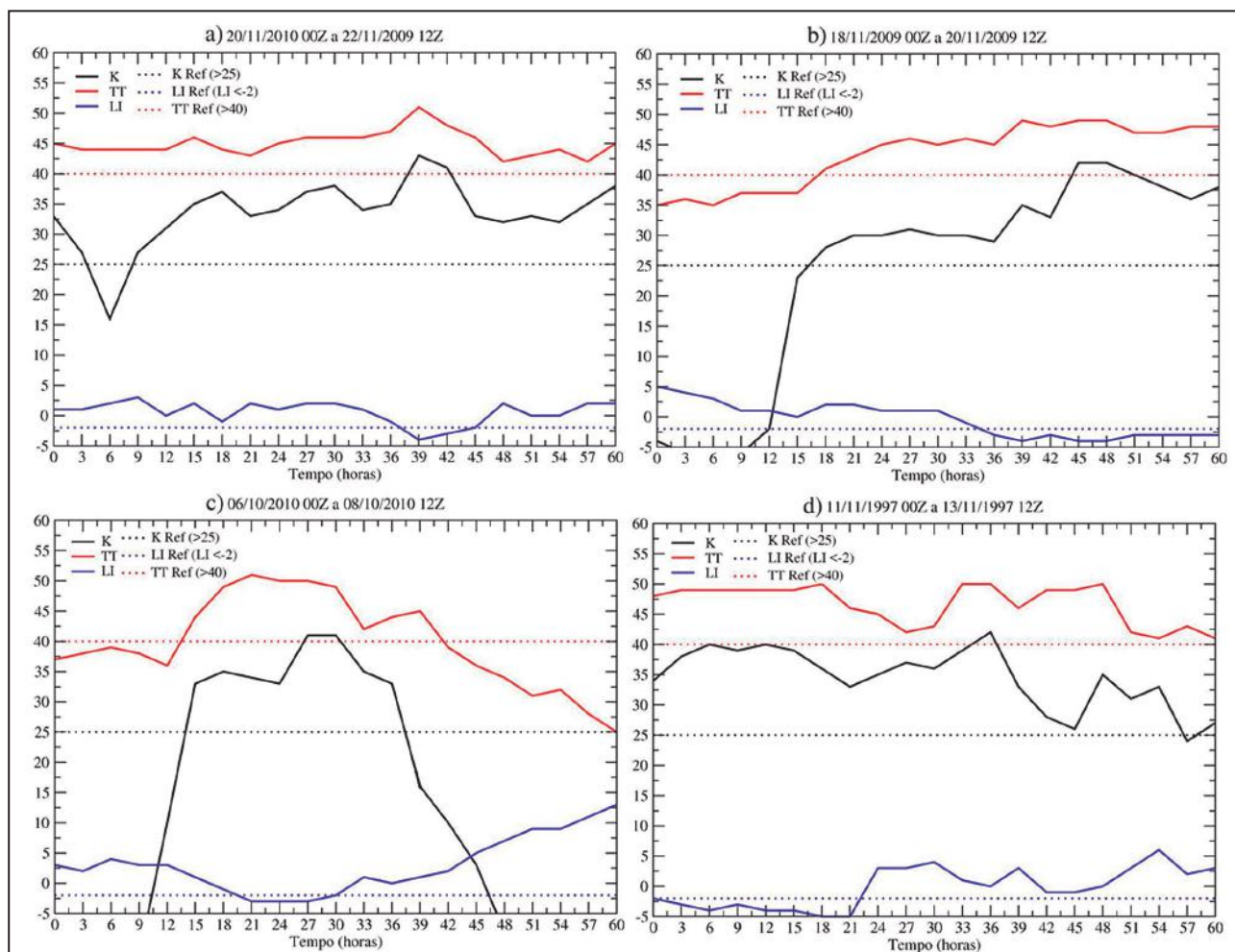


Figura 4 Série temporal dos índices K, TT e LI e seus respectivos valores de referência para cada evento simulado; A. Curitiba; B. Florianópolis; C. Foz do Iguaçu; D. Porto Alegre.

6 Referências

- Bender, F.D. 2012. *Verificação da previsão de tempo em São Paulo com o modelo operacional WRF*. Programa de Pós-graduação em Meteorologia, Universidade de São Paulo, Dissertação de Mestrado, 136p.
- 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, 2, Brasília, *Anais*, 1992. p. 65-70.
- Bonner, W.D. 1968. Climatology of the low level jet. *Monthly Weather Review*, 96: 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*, 1:1-17.
- Dee, Dick, P.; Uppala, S.; Simmons, A.J.; Berrisford, P.; Poli, P.; Kobayashi, S.; Andrae, U.; Balmaseda, M.A.; Balsamo, G.; Bauer, P.; Bechtold, P.; Beljaars, A.C.M.; van de Berg, L.; Bidlot, J.; Bormann, N.; Delsol, C.; Dragani, R.; Fuentes, M.; Geer, A.J.; Haimberger, L.; Healy, S.B.; Hersbach, H.; Hólm, E.V.; Isaksen, L.; Kållberg,
- P.; Köhler, M.; Matricardi, M.; McNally, A.P.; Monge-Sanz, B.M.; Morcrette, J.-J.; Park, B.-K.; Peubey, C.; de Rosnay, P.; Tavolato, C.; Thépaut, J.-N. & Vitart, F. 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the royal meteorological society*, 137(656): 553-597.
- Fedorova, N.; Levit, V. & Carvalho, M.H. 2010. Estrutura Vertical da Troposfera Associada com Nuvens Cumulonimbus e Nimbostratus em Pelotas, RS. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 25(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, *Anais*, 2002.
- Grimm, A.M.; Ferraz, S.E.T. & Gomes, J. 1998. Precipitation anomalies in Southern Brazil associated with El Niño and La Niña events. *Journal of Climate*, 11: 2863-2880.
- Grimm, A.M. 2004. How do La Niña events disturb the summer monsoon system in Brazil? *Climate Dynamics*, 22(2-3): 123-138.
- Grimm, A.M. 2003. The El Niño Impact on Summer Monsoon in Brazil: Regional Processes versus Remote Influences.

**Análise Preliminar dos Índices de Instabilidade a Partir de Simulações
Realizadas com o Modelo Weather Research and Forecasting (WRF) para o Sul do Brasil**

Jeferson Prietsch Machado; Camila de Souza Cardoso; Mário Francisco Leal de Quadro;

Tayná Domingues de Almeida; Natália Martins Costa; Gabriel Luan Rodrigues; Tuanny Steffane Rodrigues & Lourenço Alves de Paula

Journal of Climate, 16: 263-280.

- Hallak, R. & Pereira Filho, A.J. 2012. Análise de desempenho de índices de instabilidade atmosférica na previsão de fenômenos convectivos de mesoescala na região metropolitana de São Paulo entre 28 de janeiro e 04 de fevereiro de 2004. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 27: 173-206.
- Hallak, R. & 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.
- Kiladis, G.N. & Mo, K. 1998. Interannual and intraseasonal variability in the Southern Hemisphere. *Meteorological Monographs – American Meteorological Society*, 27(49): 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, Brasília, *Anais*, 1998.
- Marengo, J.A.; Ambrizzi, T. & Soares, W.R. 2009. Jatos de Baixos Níveis ao longo dos Andes. In: CAVALCANTI, I.F.A.; FERREIRA, N.J.; DIAS, M.A.F. & JUSTI, M.G.A. (Org.), *Tempo e Clima no Brasil*. São Paulo, Oficina de textos, p. 375-384.
- 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.
- Oliveira, E.M.G. 2014. *Parametrizações convectivas no modelo WRF e sua relação com a precipitação durante ciclôgeneses no Sudeste da América do Sul*. Programa de Pós-graduação em Meteorologia, Universidade de Santa Maria, Dissertação, 92p.
- Paula, L.A.; Wuadro, M.F.L.; Cardoso, C.; Rodrigues, G.L.; Machado, J.P.; Rodrigues, T.S. & Costa, N.M. 2015. Estudo dos índices de instabilidade em primaveras de El Niño no Sul do Brasil. In: ANAIS DO XII CONGRESSO ARGENTINO DE METEOROLOGIA, Mar del Plata, *Anais*, 2015.
- Ropelewski, C.F. & Halpert, M.S. 1987. Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño Southern Oscillation. *Monthly Weather Review*, 115: 1606-1626.
- Silva, F.P.; Silva, M.G.A.J.; Menezes, W.F. & Almeida, V.A. 2015. Atmospheric Indicators Evaluation Using WRF Numerical Model in Rainfall Events in the City of Rio de Janeiro. *Anuário do Instituto de Geociências*, 38(2): 81-90.
- Silva Dias, M.A.F. 2000. *Índices de Instabilidade para Previsão de Chuva e Tempestades Severas*. Disponível em <www.master.iag.usp.br/static/downloads/apostilas/indices.pdf>. Acesso em 04 de abril de 2017.
- Simmons, A.; Uppala, C.; Dee, D. & 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.
- Tavares, J.P.N. & Mota, M.A.S. 2012. Condições termodinâmicas de eventos de precipitação extrema em Belém – PA durante a estação chuvosa. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 27(2): 207-218.
- 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*. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Dissertação de Mestrado, 159p.
- Zepka, G.S. 2011. *Previsão de descargas atmosféricas usando o modelo de mesoescala WRF*. Programa de Pós-graduação em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Tese de Doutorado, 148p.