

INSTITUTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO

DIVISÃO DE ENSINO

ARTIGO CIENTÍFICO

AVALIAÇÃO DO MODELO WRF ICEA PARA UM CASO DE TEMPESTADE SEVERA NO AEROPORTO INTERNACIONAL DO GALEÃO

Título do Trabalho

ALESSANA CARRIJO **ROSETTE** – TEN ESP MET NOME

JOSÉ **HÉLIO** ABREU NOGUEIRA – CAP ESP MET ORIENTADOR

> MODELAGEM NUMÉRICA ÁREA DE PESQUISA

> > MET001/2015

Curso e Ano

ARTIGO CIENTÍFICO

AVALIAÇÃO DO MODELO WRF ICEA PARA UM CASO DE TEMPESTADE SEVERA NO AEROPORTO INTERNACIONAL DO GALEÃO

TÍTULO

MODELAGEM NUMÉRICA LINHA DE PESQUISA

22/JUNHO/2015 DATA

MET001/2015 CURSO

Este documento é o resultado dos trabalhos do aluno do Curso de Especialização em Meteorologia Aeronáutica do ICEA. Seu conteúdo reflete a opinião do autor, quando não for citada a fonte da matéria, não representando, necessariamente, a política ou prática do ICEA e do Comando da Aeronáutica.

RESUMO

Um caso de tempestade severa que ocorreu entre a noite do dia 11/12/2013 e a madrugada do dia 12/12/2013 no Aeroporto Internacional do Galeão (AIGL) foi simulado pelo modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF) instalado no Instituto de Controle do Espaço Aéreo (ICEA) com o objetivo de avaliar a capacidade do modelo em representar a precipitação associada ao evento. Os resultados obtidos indicaram que o modelo subestimou a quantidade de precipitação em um ponto, porém conseguiu simular bem os aspectos dinâmicos e termodinâmicos do sistema e representar, com pequenas diferenças, a distribuição espacial da precipitação.

ABSTRACT

A case of severe storm that occurred entire december 11 and december 12 of 2013 in Galeão International Airport (GLIA) was simulated by the model Weather Research and Forecasting (WRF) installed at the Institute of Airspace Control (ICEA) with the objective of to assess the model's ability to represent precipitation associated with the event. The results indicated that the model underestimated the amount of precipitation in a point, but could well simulate the dynamic and thermodynamic aspects of system and represent, with little differences, the spatial distribution of precipitation.

INTRODUÇÃO

Eventos meteorológicos extremos, como fortes precipitações, podem causar perturbações ao sistema de gerenciamento do fluxo de tráfego aéreo, ou mesmo destruição e prejuízos materiais e imateriais. À vista disso, o conhecimento antecipado das condições do tempo em um aeródromo é um fator essencial para a aviação. Para adquirir este conhecimento, é necessário definir os fenômenos meteorológicos causadores de eventos extremos e aprimorar os métodos de previsão dos mesmos.

Atualmente, a previsão de eventos meteorológicos, segundo Moura (2007), é realizada com modelos elaborados em forma de um sistema de equações matemáticas, resolvidas em computadores de alto desempenho, a partir das condições atmosféricas que são fornecidas por estações meteorológicas. Essas equações matemáticas são resolvidas repetidamente dentro de um determinado espaço de tempo, gerando como resultado as condições meteorológicas futuras, que são informações importantes para diversos setores como a agricultura, a construção civil, a saúde pública, o transporte, destacando-se a aviação.

A atividade aérea é bastante sensível a alguns fenômenos que as condições meteorológicas podem proporcionar. Visando minimizar os danos causados pelas condições adversas do tempo à aviação, faz-se necessária a aplicação dos modelos de previsão que sejam capazes de identificar os fenômenos meteorológicos que se apresentam como risco potencial para esta atividade. E é nesse contexto que o ICEA, em 2011, desenvolveu o projeto de instalação de um modelo numérico de previsão do tempo, o WRF.

O modelo WRF, instalado no ICEA (doravante chamado WRF-ICEA), obteve sucesso em quatro domínios: oferecer os mais recentes avanços da física; aumentar a performance dos recursos computacionais; ausência de custos com a compra de licença para software e flexibilidade quanto a sua instalação e configuração (IRIART et al. 2011). No entanto, para que se possa manter um modelo de previsão em funcionamento, é necessário que esses modelos sejam testados frequentemente.

Estudos como o de Carvalho, et al. (2012), em que a simulação de um caso utilizando o modelo WRF apresentou resultados satisfatórios na previsão do evento em estudo, são úteis para as atividades aeronáuticas, pois mantém o sistema de previsão meteorológica aeronáutico em constante atualização quanto a informações sobre a eficiência de seus modelos numéricos. Portanto, a avaliação desses modelos torna-se importante com a extração de informações relevantes que poderão resultar em correções e ajustes e intervir na melhoria do modelo. Uma avaliação do modelo WRF-ICEA para um caso de precipitação extrema deverá mostrar o desempenho do modelo na simulação de um caso que interfere não somente nas atividades humanas em geral, como também, e principalmente, nas atividades aéreas.

Em seu estudo Carvalho, et al. (2012), apresentou uma avaliação da precipitação simulada no modelo WRF-ICEA de um caso de tempestade severa no Aeroporto Internacional de Guarulhos, em que os resultados não mostraram uma variação significativa da precipitação simulada entre o conjunto de testes realizados, quando comparadas com os dados observacionais provenientes do Banco de Dados Climatológicos do ICEA. Resultado motivador, para o aumento da confiabilidade do modelo WRF-ICEA.

1 REFERENCIAL TEÓRICO

Uma das principais características de um evento extremo, como uma tempestade severa, é a ocorrência de intensa precipitação. Mas, segundo Erikson *et al.* (2013), a precipitação é uma variável que apresenta grande dificuldade de previsão pelos modelos de previsão numérica de tempo e também um dos mais importantes produtos de previsão para a sociedade.

Na tentativa de identificar eventos extremos de precipitação, Konrad (1997) estudou, em sua pesquisa realizada no sudeste dos Estados Unidos, 312 eventos de chuva intensa e definiu evento extremo de precipitação como aquele em que o acúmulo de chuva registrado no pluviógrafo supera a marca de 50 mm em uma ou mais estações num período de 6 horas. Junker *et al.* (1999), através de uma

amostra que abrangeu nove estados do meio oeste dos Estados Unidos, fizeram uma climatologia sinótica, concluindo que tais eventos caracterizam-se por uma precipitação superior a 50 mm num período de 24 horas.

Liebmann *et al.* (2000) definiram como um parâmetro para aferição desses eventos, um percentual diário que superasse a média sazonal ou anual. Enquanto que Teixeira e Satyamurty (2007), através do estudo de casos de chuvas intensas na região sul do Brasil, consideraram evento extremo de precipitação como uma taxa superior a 50 mm em 24 horas numa área de 10000 km².

2 METODOLOGIA

O presente trabalho teve como base a ocorrência de fortes chuvas no período entre a noite do dia 11/12/2013 e a madrugada do dia 12/12/2013 que ocasionaram diversos impactos na região metropolitana do Rio de Janeiro, como pontos de alagamentos, deslizamentos e problemas nos principais aeroportos da cidade. O Aeroporto Santos Dumont esteve fechado durante todo o período de chuva e o Aeroporto Internacional do Galeão (AIGL) teve que operar com auxílio de instrumentos, resultando em alguns cancelamentos e atrasos nos voos com partidas previstas desses aeroportos.

A região de estudo compreende a área do AIGL, localizado no Galeão, Ilha do Governador (Fig. 1).



Fig. 1 - Localização da área de estudo.

Para caracterizar a precipitação ocorrida no AIGL como um evento extremo, utilizou-se a classificação da precipitação do Manual do Comando da Aeronáutica (MCA) 105-2/2013 (Tab. 1). A ocorrência de chuva forte, ou seja, aquela em que o acúmulo do pluviógrafo fosse superior a 9,9 mm/h, foi considerada como um evento extremo de precipitação para esse aeroporto.

Tab. 1 - Classificação de intensidade da chuva (MCA 105-2/2013).

Intensidade	Acúmulo
Leve	de traços (T) até 2,4 mm/h (0,04 mm/min)
Moderada de 2,5 a 9,9 mm/h (0,05 a 0,16 mm/	
Forte	acima de 9,9 mm/h (0,16 mm/min)

Para qualificar o evento, inicialmente fez-se uma análise sinótica utilizando uma sequência de imagens de satélite obtidas no site do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), onde foram observadas as formações convectivas e a temperatura de topo das nuvens sobre a cidade do Rio de Janeiro. Em seguida, verificou-se as informações do banco de dados do ICEA de precipitação acumulada (mm/h) para o AIGL, os quais indicaram valores acima de 9,9 mm/h no período em estudo. Na análise de cartas sinóticas, obtidas no site do CPTEC, observou-se a presença de circulação ciclônica. Esse tipo de circulação geralmente está associado a mau tempo.

Também foram utilizadas imagens do radar meteorológico do Pico do Couto (RJ), coletados da Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica (REDEMET) e dados de sondagem atmosférica extraídos da página da Universidade de *Wyoming* (www.weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html).

Feita a análise sinótica, iniciou-se a simulação do caso em estudo no modelo WRF-ICEA, versão 3.4.1. De acordo com Carvalho *et al.* (2013), o sistema de modelagem do WRF é composto pelas seguintes etapas: pré processamento (WRF *Preprocessing System* - WPS); inicialização; execução e pós-processamento (ARWpost). O WPS é um conjunto de três subsistemas que prepara os dados de entrada para a simulação: geogrid, ungrib e metgrib. O geogrid define o domínio do modelo e interpola os dados estáticos geográficos para as grades. O ungrib extrai informações meteorológicas necessárias para iniciar o modelo. O metgrid interpola

os arquivos gerados pelo ungrib para as grades do modelo definida pelo geogrid. Por fim, o ARWpost é usado para converter as saídas do modelo para um formato que possam ser visualizados por aplicativos gráficos, como o GrADS, por exemplo. Uma apresentação esquemática do sistema de modelagem do WRF pode ser vista na Fig. 2.

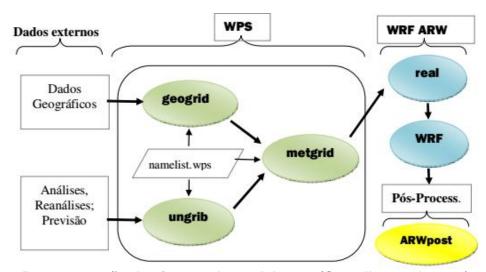


Fig. 2 - Representação do sistema de modelagem (Carvalho et al., 2013).

O modelo é executado sobre duas grades aninhadas de resoluções horizontais de 18 e 6 km. Neste trabalho, foram realizadas simulações com o espaçamento de grade nesses dois domínios. As parametrizações das duas grades são listadas na Tab. 2.

Tab. 2 - Parametrizações utilizadas no modelo WRF (Iriart et al. 2014)

Opção Fisica	Parametrização utilizada
Microfisica	WSM 3-class simple ice scheme
Radiação de onda longa	RRTM Scheme
Radiação de onda curta	Dudhia scheme
Camada de superfície	Revised MM5 Monin-Obukhov Scheme
Superfície	Unified Noah Land-Surface Model
Camada Limite Planetária	YSU Scheme
Cumulus	Kain-Fritsch (new Eta) Scheme

As simulações foram inicializadas às 12:00 UTC do dia 10/12/2013. As variáveis simuladas utilizadas na avaliação do modelo foram a precipitação acumulada (mm/h) e o transporte de umidade (g.g-1.m.s-1).

A título de validação dos resultados utilizou-se a medida estatística do EMQ (Eq. 1), por meio dos dados observacionais da estação meteorológica de superfície do Galeão (EMS-GL), obtidos do Banco de Dados do ICEA (BDC), referentes à precipitação acumulada (mm/h). Para avaliar o aspecto espacial, utilizou-se imagens do satélite GOES13 no canal infravermelho.

$$EMQ = \sum_{i} \frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{n}$$
 (Eq. 1)

3 RESULTADOS

Na Fig. 3 é apresentada uma sequência de imagens de satélite que mostra áreas de instabilidade vindas de noroeste, se deslocando para o Rio de Janeiro. Na imagem das 21:00 UTC do dia 10/12/2013 (imagem c) nota-se uma célula convectiva com temperatura de topo entre -60 e -70°C sobre a cidade do Rio de Janeiro.

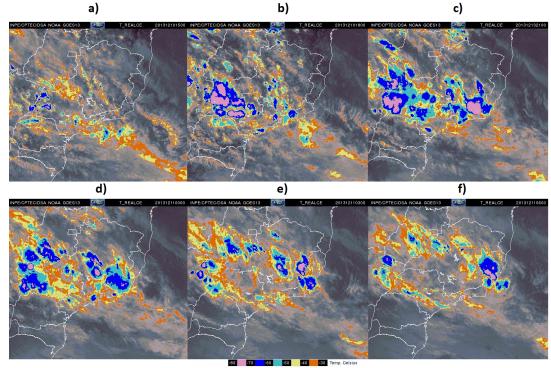


Fig. 3 - Imagens do satélite GOES13 no canal infravermelho e realçada: a) 15:00, b) 18:00, c) 21:00 UTC do dia 10/12/2013, d) 00:00, e) 03:00 e f) 06:00 UTC do dia 11/12/2013. Fonte: CPTEC.

Na análise dos dados de precipitação acumulada (mm/h) para a EMS-GL, conforme mostra a Tab. 3, verificou-se acumulados acima de 9,9 mm/h, atingindo até o máximo de 17,3 mm/h às 05:00 UTC, caracterizando a ocorrência de um evento extremo de precipitação para o AIGL.

Tab. 3 - Acumulados de chuva em mm/h para EMS-GL. Fonte: BDC/ICEA.

TOTAL DE PRECIPITAÇÃO (mm)						
EMS-GL - DIAS 10 E 11 DE DEZEMBRO DE 2013						
ANO	MES	DIA	HORA	TOTAL PRECIPITAÇÃO (mm)		
2013	12	10	21	1,3		
2013	12	10	22	0,2		
2013	12	10	23	0,6		
2013	12	11	0	1		
2013	12	11	1	0,1		
2013	12	11	2	0,1		
2013	12	11	3	1,4		
2013	12	11	4	16,8		
2013	12	11	5	17,3		
2013	12	11	6	8,7		

A carta sinótica de superfície das 06:00 UTC do dia 11/12/2013 (Fig. 4) mostra um sistema frontal sobre o oceano Atlântico próximo a região entre Santa Catarina e o Paraná. No campo de pressão atmosférica nota-se um cavado na costa da Região Sudeste, com uma isóbara fechada de 1010 hPa passando sobre o estado do Rio de Janeiro.

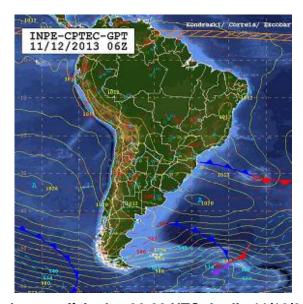


Fig. 4 - Carta sinótica de superfície das 06:00 UTC do dia 11/12/2013. Fonte: CPTEC.

As imagens obtidas pelo radar do Pico do Couto (MAXCAPPI 400 Km), apresentadas na Fig. 5, apontam áreas de ecos com intensidade variando de 35 a 50 dBz, sinalizando precipitação moderada a forte no estado do Rio de Janeiro.

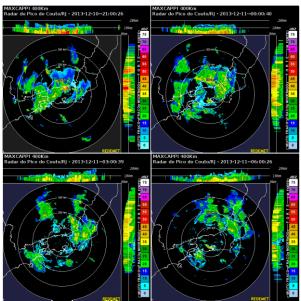


Fig. 5 - Imagem do radar Pico do Couto/Rio de Janeiro (MAXCAPPI 400km) das 21:00 UTC do dia 10/12/2013, 00:00, 03:00 e 06:00 UTC do dia 11/12/2013. Fonte: REDEMET.

A sondagem do AIGL mostrou um perfil praticamente saturado até 500 hPa, com um valor de 68,53 mm de água precipitável. Os índices revelam que a atmosfera estava instável, com destaque para o índice K que apresentava valor acima de 40 e a Energia Potencial Convectiva Disponível (*Convective Available Potencial Energy*), indicando um potencial convectivo marginalmente instável, conforme pode ser visto na Fig. **6**.

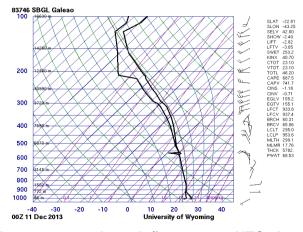


Fig. 6 - Sondagem do aeroporto de Galeão - 00:00 UTC do dia 11/12/2013. Fonte: *University of Wyoming.*

Na simulação do modelo WRF-ICEA com inicialização às 12:00 UTC do dia 10/12/2013, foram geradas as previsões de precipitação acumulada em mm/3h para nove intervalos, a fim de estudar a evolução da precipitação prevista, conforme Fig. 7.

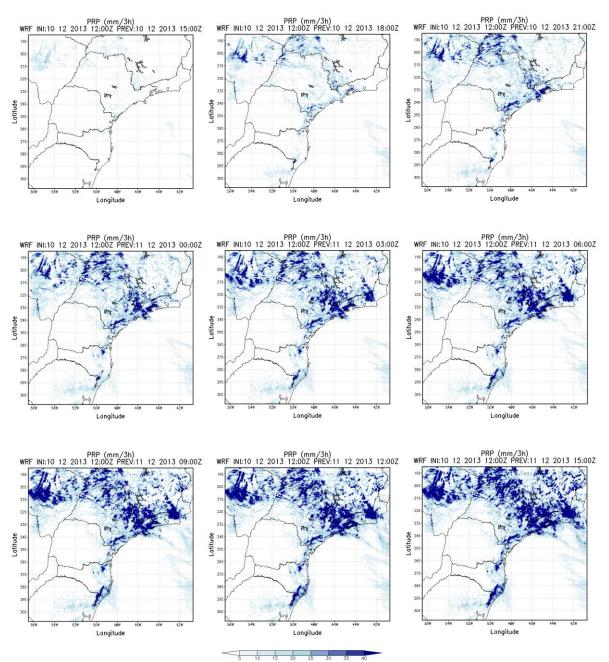


Fig. 7 - Simulações da precipitação acumulada das 15:00 UTC do dia 10/12/2013 às 15:00 UTC do dia 11/12/2013 (grade 6 km).

Para testar se o modelo WRF-ICEA conseguiu fazer a previsão da quantidade de precipitação do AIGL, utilizou-se os dois domínios de grade. Neles foram

selecionadas a latitude e a longitude da EMS-GL para obter valores de precipitação neste ponto. Os valores obtidos foram comparados com os valores registrados pela EMS-GL de precipitação acumulada. A Fig. 8 mostra a variabilidade horária da precipitação observada na EMS-GL (PO) e da precipitação simulada (PS) para a grade de 6 km (PS6) e para grade de 18 km (PS18). Os resultados demonstram que o modelo WRF-ICEA atrasou em perceber a precipitação e a PS foi subestimada no período de máxima precipitação (entre às 03:00 e 12:00 UTC).

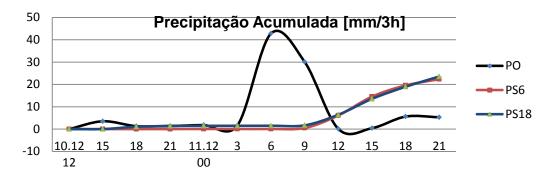


Fig. 8 - Variabilidade horária da precipitação observada (PO, linha preta), precipitação simulada com a grade de 6 km (PS6) e da precipitação simulada com a grade de 18 km (PS18).

Por meio do EMQ, são mostradas as comparações objetivas entre a PS6 e PO e entre a PS18 e PO para o conjunto de testes realizados entre os dias 10 e 11/12/2013 (Fig. 9). Os valores de EMQ indicam que a PS6 foi subestimada no período entre 03:00 e 12:00 UTC do dia 11/12/2013, variando aproximadamente entre 5,997 a 42,748 mm (Fig.9). O EMQ variou entre 0 e 41,292 mm para PS18, em todo período de estudo, indicando uma discreta melhora no desempenho do modelo na grade 18 km (Fig. 10).

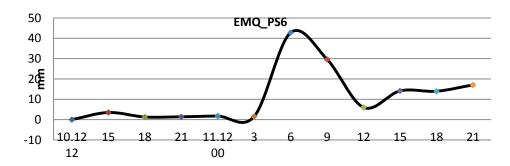


Fig. 9 - Erro médio quadrático da precipitação simulada (mm) para a grade de 6 km.

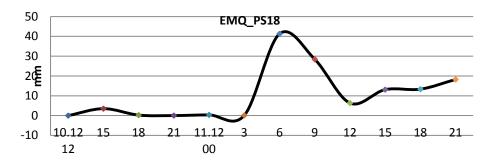


Fig. 10 - Erro médio quadrático da precipitação simulada (mm) para a grade de 18 km.

Os altos valores encontrados de EMQ devem-se ao fato de se utilizar um ponto de grade (latitude e longitude da EMS-GL) para análise. É notório que a previsão do tempo para um local com 6 km², ou mesmo 18 km² de dimensão espacial, torna-se complexa, se comparada a previsão do tempo para uma área maior, como o município do Rio de Janeiro por exemplo. Portanto, com o objetivo de realizar uma avaliação para uma área maior, comparou-se os campos de precipitação simulada com as imagens de satélite para o caso estudado. A Fig. 10 mostra essa análise referente às 00:00, 03:00 e 06:00 UTC do dia 11/12/2013.

Na Fig. 10 nota-se que o posicionamento da precipitação simulada pelo modelo é semelhante ao de nuvens significativas representadas nas imagens de satélite. Também pode-se observar a intensificação do sistema sobre o Rio de Janeiro, assumindo, a precipitação simulada, tons de azul mais escuro e nas imagens de satélite, tons de rosa.

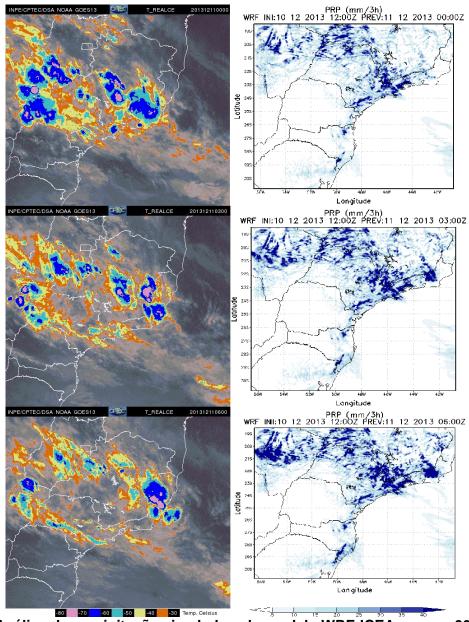


Fig. 10 - Análise da precipitação simulada pelo modelo WRF-ICEA para as 00:00, 03:00 e 06:00 UTC do dia 11/12/2013.

A análise do aspecto dinâmico do sistema estudado, foi feita através da simulação do transporte de umidade, baseada em uma integração vertical da umidade de 1000 a 700 hPa feita pelo modelo. Esta análise mostrou um intenso transporte de umidade entre as 15:00 e 21:00 UTC nas regiões Centro e Sul do Brasil com as linhas de corrente indicando uma convergência no Rio de Janeiro às 21:00 UTC. A Fig. 11 apresenta a evolução desse transporte. A área hachurada representa a magnitude do fluxo.

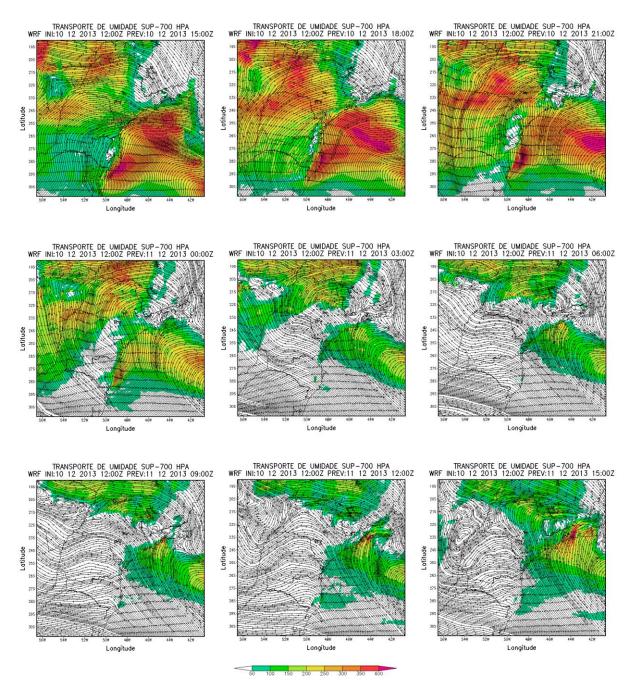


Fig. 11 - Transporte de umidade integrada de 1000 a 700 hPa (g.g-1.m.s-1) das 15:00 UTC do dia 10/12/2013 às 15:00 UTC do dia 11/12/2013.

Através da análise do transporte de umidade, observou-se que o modelo conseguiu simular bem os aspectos dinâmicos do sistema em estudo, uma vez que aponta o transporte de umidade que alimentou o sistema no AIGL.

CONCLUSÕES

Os resultados preliminares mostraram EMQ de até 42,748 mm na quantidade de precipitação entre os conjuntos de testes realizados e dados da estação meteorológica do Galeão. Ao utilizar uma grade de menor resolução (18 km), o desempenho do modelo aumentou, mas este aumento não foi significativo, indicando que o modelo subestimou o evento extremo de precipitação em estudo.

Por saber da dificuldade da previsão em um determinado ponto, foram avaliados: o aspecto espacial da distribuição da precipitação e o transporte de umidade simulados. As simulações da precipitação apresentaram pequenas diferenças em sua distribuição espacial, quando comparadas com os dados de imagens do satélite GOES13 no canal infravermelho realçada. Com relação ao transporte de umidade simulado, observou-se que o modelo indicou uma convergência desse transporte nas proximidades do AIGL, mostrando que o modelo WRF-ICEA conseguiu simular bem os aspectos dinâmicos do sistema em estudo.

Os resultados apontam que apesar de o WRF-ICEA ter subestimado o evento extremo de precipitação ocorrido no AIGL, um importante indicador desse evento (transporte de umidade) foi detectado nas simulações e sua distribuição espacial mostrou-se coerente com a nebulosidade apresentada nas imagens de satélite.

No entanto, é necessário que sejam realizadas simulações que avaliem um período maior de dados para que se possa determinar o desempenho do modelo WRF-ICEA quanto à sua capacidade de detecção de eventos extremos de precipitação. Espera-se que o presente trabalho tenha contribuído para uma melhor compreensão do comportamento do WRF-ICEA na previsão do caso estudado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BDC/ICEA, Banco de dados Climatológicos do Instituto de Controle do Espaço Aéreo - São José dos Campos, 2013.

BRASIL DECEA, Manual do Comando da Aeronáutica – MCA 105-2: **Manual de Estações Meteorológicas de Superfície**, Rio de Janeiro, 2013.

CARVALHO, M. A. V.; GISLER, C. A. F.; ROCHA, A. M. M.; ARAUJO, R. T.; SANTOS, P. S.; SANTOS, P. S. **Simulação de um caso de evento extremo de precipitação no aeroporto internacional de Guarulhos com o modelo WRF, utilizando diferente passos de tempo**. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2012, Gramado. XVII Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2012. v. 01.

CARVALHO, M. A. V.; GISLER C. A. F.; SILVA A. J. O.; NETO A. L. C. **Sistema de previsão numérica do tempo.** 2013. (Apresentação de Trabalho).

CPTEC. **Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos**. Disponível em: http://satelite.cptec.inpe.br/acervo/goes.formulario.logic. Acesso em 05 mai. 2015.

ERIKSON M. G. O.; EVERSON D. P.; DANIEL C. S.; GEOVANE W.; VIVIANE S. G. Avaliação do modelo WRF com diferentes parametrizações convectivas para um caso de ciclogênese na Bacia do Prata. Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas - UFSM Revista Ciência e Natura, Santa Maria, ISSN: 2179-460X Edição Esp. Dez. 2013.

IRIART, P.; ARAUJO, R. T.; LIMA FILHO, J. O.; SHIINO, E. Y.; LOPES, J. **Avaliação** da velocidade do vento obtida no modelo Weather Research and Forecasting para Recife em julho de 2014. Subdivisão de Climatologia e Arquivo Meteorológico (PBCA), Instituto de Controle do Espaço Aéreo (ICEA), São José dos Campos, 2014.

IRIART, P. G.; CARVALHO, M. V. C.; PEREIRA NETO, A. V. Manual de instalação, compilação e execução do sistema de modelagem numérica WRF no ICEA. Subdivisão de Climatologia e Arquivo Meteorológico (PBCA), Instituto de Controle do Espaço Aéreo (ICEA), São José dos Campos, 2011. Disponível em:http://www.icea.gov.br/climatologia/modelagemWRF.html.

JUNKER, N. W.; SHNEIDER, R. S.; FAUVER, S. L. *A study of heavy rainfall events during the great Midwest flood of 1993. Weather and Forecasting*, v. 14, pp. 701-712, 1999.

KONRAD, C. E. Synoptic-scale features associated with warm season heavy rainfall over the interior southern United States. Weather and Forecasting, v. 12, pp. 557-571, 1997.

LIEBMANN, B.; JONES, C.; CARVALHO, L. M. V. DE. *Interannual variability of daily extreme precipitation events in the State of São Paulo, Brazil*. Journal of Climate, v. 14, pp. 208-218, 2000.

MOURA, A. D. Entrevista à Revista Mensal do CREA-RS, v. 37, set. 2007.

REDEMET. **Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica**. Disponível em: http://www.redemet.aer.mil.br. Acesso em: 12 mai. 2015.

TEIXEIRA, M. S.; SATYAMURTY, P. *Dynamical and synoptic characteristics of heavy rainfall episodes in southern Brazil, Monthly Weather Review*, v. 135, p. 598-617, 2007

WEATHER/WYOMING. University of Wyoming, College of Engineering

Department of Atmospheric Science. Disponível em:

http://www.weather.uwyo.edu. Acesso em 14 mai. 2015.