

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
IAG-USP

HIREMAR ANTÔNIO J. S. SILVA

**ANÁLISE DAS OCORRÊNCIAS DE CISALHAMENTO DE VENTO
NO AEROPORTO DE GUARULHOS (SP) PARA A PREVENÇÃO
DE ACIDENTES AERONÁUTICOS**

**São Paulo
Dezembro - 2016**

HIREMAR ANTÔNIO J. S. SILVA

**ANÁLISE DAS OCORRÊNCIAS DE CISALHAMENTO DE VENTO
NO AEROPORTO DE GUARULHOS (SP) PARA A PREVENÇÃO
DE ACIDENTES AERONÁUTICOS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Meteorologia do Instituto de Astronomia,
Geofísica e Ciências Atmosféricas da
Universidade de São Paulo.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo de Camargo

Versão Corrigida. O original encontra-se disponível na unidade.

São Paulo

Dezembro - 2016

Nome: Hiremar Antônio J. S. Silva

Título: ANÁLISE DAS OCORRÊNCIAS DE CISALHAMENTO DE VENTO NO AEROPORTO DE GUARULHOS (SP) PARA A PREVENÇÃO DE ACIDENTES AERONÁUTICOS.

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo.

Aprovado em: ___/___/___

Banca Examinadora

Prof. Dr. Ricardo de Camargo
Orientador

Prof. Dr. Edson Cabral
Examinador (a)

Prof. Dr. Gutemberg Borges França
Examinador (a)

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho à minha esposa Michelle Rinco: Sem você, eu não teria terminado a faculdade. Obrigado por confiar em mim e ser a minha grande incentivadora. Obrigado pela força e coragem que sempre me deu para que eu aceitasse mais esse desafio.

RESUMO

A partir de um estudo realizado pelo *National Aviation Safety Data Analysis Center* (NASDAC), período de 1992 a 2001 e do sistema *Aviation Safety Information Analysis and Sharing* (ASIAS), desenvolvido pela *Federal Aviation Administration* (FAA), no período de 2003 a 2007, ambos utilizaram dados da *National Transportation Safety Board* (NTSB), constata-se que aproximadamente 21% do total de acidentes aeronáuticos foram devidos a fatores meteorológicos, sendo apontado o vento como responsável majoritário dos casos. Além disso, sabe-se que o maior índice de acidentes/incidentes aeronáuticos ocorre nos procedimentos de decolagem, pouso e aproximação de aeronaves às cabeceiras de pistas, estando relacionados a fatores meteorológicos como o cisalhamento do vento e a turbulência. Assim sendo, este estudo tem como foco principal a análise de informações referentes ao Aeroporto Internacional de Guarulhos, São Paulo, o primeiro entre os aeroportos do Brasil a operar um SODAR (***SONic Detection And Ranging***), equipamento perfilador de vento que contribui na prevenção de acidentes aeronáuticos. Além das medições do SODAR obtidas entre julho de 2012 e março de 2015, foram também utilizados dados METAR, imagens de satélite e de radar meteorológico. A metodologia envolveu uma análise subjetiva de todas as informações meteorológicas disponíveis para os casos de interesse de *windshear* - termo em inglês para cisalhamento do vento, os quais foram classificados em função da severidade do fenômeno. Em seguida, os casos foram agrupados para a identificação de características comuns que permitam uma interpretação objetiva dos eventos. No período analisado, aproximadamente 88% dos casos referem-se à intensidade moderada do cisalhamento do vento, 10% de eventos fortes e os 2% restantes em casos severos. Do ponto de vista das situações meteorológicas com potencial de causar *windshear*, foi possível notar que a esmagadora maioria dos casos esteve associada à presença de convecção ou então a situações pré-frontais ou frontais sobre o aeródromo. Além destes, também ocorreram casos com a presença de complexos convectivos de mesoescala (CCM) sobre a Região Sul do Brasil. Em geral, estas situações relacionadas a casos severos e fortes de cisalhamento do vento ocorrem em função da intensificação do fluxo de componente norte sobre o Aeroporto de Guarulhos, o qual interage com a topografia da Serra da Cantareira originando o fenômeno. No entanto, casos de *windshear* com intensidade forte e moderada podem ocorrer em situações não necessariamente associadas a condições frontais ou pré-frontais. Foram detectadas inúmeras situações pós-frontais em que o vento gira de sudeste (SE) para nordeste (NE) com a elevação de altura, o que significa que a interação com a topografia não é necessária para produzir os fenômenos. Outro ponto relevante diz respeito à intensidade do vento de superfície, pois a intensidade do cisalhamento independe do escoamento superficial apenas. A principal característica das medições do SODAR e que pode ser utilizada em termos práticos para a previsão deste tipo de evento refere-se à formação de uma estrutura aqui denominada “tubo”, o qual foi detectado em inúmeros casos moderados e fortes. Apesar disto, nos seis eventos severos de *windshear* detectados, esta estrutura não esteve presente.

Palavras-chave: cisalhamento do vento; perfilador de vento; acidentes aeronáuticos

ABSTRACT

From a study conducted by the National Aviation Safety Data Analysis Center (NASDAC) from 1992 to 2001 and the Aviation Safety Information Analysis and Sharing (ASIAS) system, developed by the Federal Aviation Administration (FAA), from 2003 to 2007, both used data from the National Transportation Safety Board (NTSB), it is observed that approximately 21% of the total aeronautical accidents were due to meteorological factors, with wind being the majority responsible for the cases. Moreover, it is well known that aeronautical accidents occur mostly within take-off, landing and approaching procedures, being related to meteorological factors such as windshear and turbulence. Therefore, this study is mainly focused in the analysis of the information collected at Guarulhos International Airport, Sao Paulo State, the first among the Brazilian airports to have a SODAR (***Sonic Detection And Ranging***), a wind profiler instrument which contributes for accidents prevention. Besides the SODAR information collected from July'2012 to 2015'March, METAR data and radio soundings were also used, as well as satellite and radar imagery. The methodology was based on a subjective analysis of the whole set of meteorological information for all the cases of windshear, which were classified in terms of their intensity and then grouped in order to identify common characteristics that allow an objective interpretation of the events. Within the studied period, 88% were related to moderate intensity of windshear, 10% of strong intensity and the remaining 2% had severe windshear. Nevertheless, moderate and strong windshear can occur without association to frontal or pre-frontal situations. Several post-frontal conditions with SE surface flow and steering to NE with height presented moderate to strong windshear, meaning that interaction with topography is not necessary to produce the phenomena. Another relevant point is related to the velocity of the surface flow, since the windshear intensity is independent of the surface wind. The main characteristic of the SODAR data that can be used in practical aspects to forecast this kind of event is related to the formation of a vertical structure of windshear direction here called "pipe", which appeared in several cases of moderate and strong windshear. Despite this fact, this structure was not present for the six detected cases of severe windshear.

Key-words: windshear; wind profiler; aeronautical accidents

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1: Porção da Região Metropolitana de São Paulo com indicação da Serra da Cantareira e dos Aeroportos de Congonhas (SBSP), Campo de Marte (SBMT) e Guarulhos (SBGR).....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 2: Pistas de pouso do Aeroporto de Guarulhos/Cumbica indicadas com letras e números de acordo com a direção magnética bem como a localização do SODAR.</i>	<i>14</i>
<i>Figura 3: Tipos de windshear por direção e velocidade, ainda pode ocorrer um.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 4: Perfil vertical da intensidade de WS entre 20 UTC do dia 4 à 01 UTC do dia 5 de outubro de 2013 no aeroporto de Guarulhos.</i>	<i>19</i>
<i>Figura 5: A figura ilustra as quatro forças que agem sobre uma aeronave, segundo.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 6: Efeito do fluxo de ar sobre a asa de uma aeronave.</i>	<i>21</i>
<i>Figura 7: Modelo de funcionamento (esquerda), equipamento de proteção e antena (direita).....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 8: Antena, à esquerda, e envólucro de proteção acústica à direita.</i>	<i>23</i>
<i>Figura 9: A imagem mostra as dimensões do SODAR MFAS e seus 64 transdutores piezoelétricos.</i>	<i>24</i>
<i>Figura 10: Esquema simplificado de subdivisão das escalas dos fenômenos atmosféricos.</i>	<i>26</i>
<i>Figura 11: Região de “Jatos Noturnos”.</i>	<i>27</i>
<i>Figura 12: Microburst de baixa altitude.</i>	<i>28</i>
<i>Figura 13: Evolução das temperaturas medidas próximas ao solo (975hPa) e a 1100m acima do solo (850hpa).....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 14: Estrutura diuturna da Camada Limite planetária.</i>	<i>31</i>
<i>Figura 15: Curvas de nível, geradas pelo Global Mapper, do relevo em torno do aeroporto de Guarulhos.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 16: Tempo de duração das 07:00h às 10:15h e intensidade de WS, na faixa de moderada conforme os dados cujo maior índice foi às 08:45h a 30m com variação de 3,02 m.s-1/30m.</i>	<i>40</i>
<i>Figura 17: Variação da direção da WS mostra a faixa central no setor WNW (entre 270° e 300°) variando, acima e abaixo, para uma componente aproximadamente N e em verde, a medida que se distancia da faixa central, a direção muda para NE.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 18: A figura mostra o perfil vertical do vento horizontal. Verifica-se vento NE entre 10kt e 15kt com componente direcional NE entre 100 m e 150 m. Às 07 UTC é detectado o fenômeno de WS, conforme Figura 14.</i>	<i>40</i>
<i>Figura 19: (A): Direção da WS do dia 12.09.2013 às 08:45UTC. (B): Perfil vertical de intensidade e direção do vento horizontal do dia 12.09.2013 às 09:00UTC.....</i>	<i>41</i>

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1: - Critérios para a intensidade de cisalhamento de vento recomendada pela Quinta Conferência de Navegação Aérea (Montreal, 1967).</i>	19
<i>Tabela 2: Principais características operacionais do SODAR MFAS.....</i>	23
<i>Tabela 3: Porcentagem de ocorrência de WS de acordo com cada faixa de altura e discriminada pelo ano de ocorrência.....</i>	36
<i>Tabela 4: Mostra o tempo médio de duração do cisalhamento do vento, em horas, associada a intensidade deste fenômenos em SBGR.....</i>	38

LISTA DE GRÁFICOS

<i>Gráfico 1: Reportes de windshear (WS) em ordem decrescente no período de 1999 a 2013 de alguns aeroportos brasileiros discriminados pela sua sigla ICAO.</i>	<i>15</i>
<i>Gráfico 2: Mostra a atenuação da onda sonora em função da.....</i>	<i>25</i>
<i>Gráfico 4: Distribuição mensal de cortante do vento nos três aeródromos de maior reporte do fenômeno no Brasil. O aeroporto SBGR apresenta uma maior variação ao longo do ano, com picos em janeiro e novembro.....</i>	<i>32</i>
<i>Gráfico 5: Comparação anual entre os totais de eventos mensais de WS registrados pelo SISCOMET e pelo SODAR do aeroporto SBGR.....</i>	<i>32</i>
<i>Gráfico 6: Os 10 aeroportos brasileiros com maior movimento de aeronaves no ano de 2012. Fonte: Anuário estatístico da INFRAERO, 2012.....</i>	<i>33</i>
<i>Gráfico 7: Classificação dos 10 aeroportos com maior fluxo de passageiros do ano de 2012. Fonte: Anuário estatístico da INFRAERO, 2012.....</i>	<i>34</i>
<i>Gráfico 8: Movimento de passageiros em um dia típico e a porcentagem de ocorrência de WS por período em ambas cabeceiras.....</i>	<i>35</i>
<i>Gráfico 9: Variação mensal das intensidades de WS em SBGR no ano de 2013.</i>	<i>35</i>
<i>Gráfico 10: Valores percentuais de WS, com base em sua intensidade e separados pelo ano de ocorrência no aeroporto de Guarulhos.....</i>	<i>37</i>

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CLP – Camada Limite Planetária
CB – Nuvem do tipo Cumulonimbus
CGNA – Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea
DECEA – Departamento de Controle do Espaço Aéreo
FAA (*Federal Aviation Administration*) - Administração da Aviação Federal
FPM – *Pés por minuto*
IATA (*International Air Transport Association*) – Associação Internacional de Transportes Aéreos
ICAO (*International Civil Aviation Organization*) – Organização da Aviação Civil Internacional
INFRAERO – Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária
HBV – Horário Brasileiro de Verão
JBN – Jato de baixos níveis
LLWAS (Low Level Windshear Alert System) – Sistema que alerta ocorrência de *windshear* através de uma rede de anemômetros na área do aeroporto.
METAR (*METEorological Aerodrome Report*) – Informe meteorológico regular de aeródromo confeccionada e enviada a cada hora
NASDAC (*National Aviation Safety Data Analysis Center*) - Centro Nacional de Análise de Dados de Segurança da Aviação
RADAR – *Radio Detection And Ranging*
REDEMET – Rede Meteorológica do Comando da Aeronáutica
SBBH – Aeroporto de Belo Horizonte/Pampulha – Carlos Drummond de Andrade
SBBR – Aeroporto Internacional de Brasília – Presidente Juscelino Kubitschek
SBFL – Aeroporto Internacional de Florianópolis – Hercílio Luz
SBGL – Aeroporto Internacional do Galeão – Tom Jobim
SBKP – Aeroporto Internacional de Campinas – Viracopos
SBPA – Aeroporto Internacional de Porto Alegre – Salgado Filho
SBRJ – Aeroporto Santos Dumont / Rio de Janeiro
SBSV – Aeroporto Internacional de Salvador – Deputado Luís Eduardo Magalhães
SBSP – Aeroporto de Congonhas / São Paulo
SIPAA – Seção de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos (SIPAA) do SERAC 4
SISCOMET – Sistema de Controle Operacional de Meteorologia
SERAC 4 – 4º Serviço Regional de Aviação Civil
SODAR – *SONic Detection And Ranging*
SPECI – Informe meteorológico das condições do aeroporto, porém apenas confeccionada em caso de mudança significativa do tempo em relação ao METAR
UTC – *Universal Time Coordinated* (Tempo Universal Coordenado)
WS – *WINDSHEAR* (cisalhamento de vento)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1 AEROPORTO GOVERNADOR ANDRÉ FRANCO MONTORO (SBGR).....	14
1.2 JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS	15
2. METODOLOGIA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1 WINDSHEAR - CISALHAMENTO DO VENTO.....	18
2.2 O SODAR.....	21
2.3 SISTEMAS METEOROLÓGICOS ATUANTES E POTENCIALMENTE CAUSADORES DE WS25	
2.4 BREVE CONTEXTUALIZAÇÃO DA CAMADA LIMITE PLANETÁRIA (CLP)	29
3. RESULTADOS.....	31
3.1 HORÁRIO DE OCORRÊNCIA DE WS VERSUS MOVIMENTO DE PASSAGEIROS.	34
3.2 ALTURA E INTENSIDADES DOS CASOS IDENTIFICADOS.....	35
3.3 CARACTERÍSTICAS DAS MEDIÇÕES DO SODAR.....	38
3.4 CASOS OBSERVADOS DE CISALHAMENTO DO VENTO.....	42
4. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES	84
5. LIMITAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	86
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87

1. INTRODUÇÃO

O primeiro registro de acidente de uma aeronave por cisalhamento do vento (em inglês *windshear*) data de 24 de junho de 1956 em Kano, Nigéria, conforme citado por Villela (2002). Contudo, o aprimoramento dos estudos deste fenômeno nas fases críticas de pouso e decolagem teve início em meados da década de 70 com a análise do Prof. T. Theodore Fujita, da Universidade de Chicago, sobre o notório acidente com o Boeing 727 do voo 66 da *Eastern Airlines*, ocorrido no Aeroporto John F. Kennedy em Nova York, no dia 27 de junho daquele ano (Fujita e Carracena, 1977). Dentre as conclusões do relatório desse acidente, foi explicitada a necessidade de reabrir investigações de antigos acidentes aeronáuticos inicialmente atribuídos a erros dos pilotos, mas que, na realidade, tinham esse importante fenômeno meteorológico como causa principal.

No Brasil, pode-se citar o caso de um acidente notório que ocorreu no Aeroporto de Congonhas (designação IATA: CGH, ICAO: SBSP), localizado a 28 km do Aeroporto Internacional de Guarulhos (designação IATA: GRU, ICAO: SBGR), conforme indicado na Figura 1.

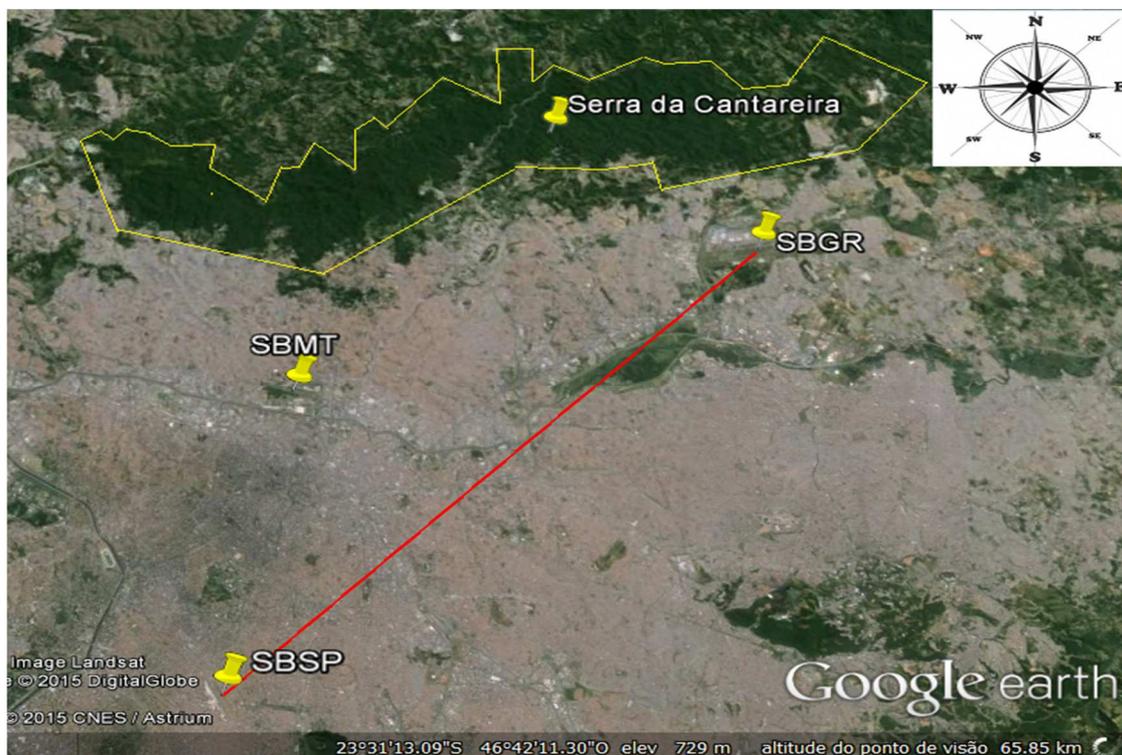


Figura 1: Porção da Região Metropolitana de São Paulo com indicação da Serra da Cantareira e dos Aeroportos de Congonhas (SBSP), Campo de Marte (SBMT) e Guarulhos (SBGR).
Fonte: Google Earth.

Segundo o Boletim SBMET de 2005, baseado em Villela (2001), em 16 de dezembro de 2000 a aeronave Rockwell 681 H.Commander, cuja matrícula era PT-IEE, decolou da pista 17 de Congonhas às 21h23min HBV (2323 UTC), em condições de chuva. O RADAR do Controle de Tráfego Aéreo de Congonhas acompanhou a trajetória, a altitude e a velocidade sobre o solo, em intervalos de 4 a 8 segundos. A velocidade muda repentinamente de 130kt ($\sim 67 \text{ m.s}^{-1}$) para 170kt ($\sim 87 \text{ m.s}^{-1}$) em apenas 4 s, a uma altitude de 3.700ft ($\sim 1.128 \text{ m}$); vale enfatizar que a altitude da pista de SBSP é de 2.631ft ($\sim 802 \text{ m}$). A aeronave sobe, nos próximos 17 s, a uma razão de 4.500fpm (pés por minuto), ou seja, 1372 metros por minuto, como se estivesse numa forte ascendente, enquanto a velocidade em relação ao solo se mantém a 170-175kt ($87\text{-}90 \text{ m.s}^{-1}$). Depois de um giro para a esquerda, a velocidade começa a cair rapidamente para 100-105kt ($51\text{-}54 \text{ m.s}^{-1}$). Vinte segundos depois a velocidade sobe para 120kt (62 m.s^{-1}) e até 140kt (72 m.s^{-1}), na altitude de 5.300ft (1615m), quando a aeronave mergulha 600ft (183m) em 7s (razão descendente de 5.140fpm, ou seja, 1567m por minuto). O ponto na tela do RADAR, da aeronave, desaparece a 4.700ft (1433m) de altitude. O impacto com o solo ocorreu 2 minutos após a decolagem, sobre casas do bairro de Vila Anhaguera, cerca de 5 km da cabeceira sul (pista 35).

O METAR SBSP entre 2000 UTC e 2400 UTC não informa presença de CB. Os dados da estação meteorológica do IAG/USP, localizada na Água Funda, a 3 km a sudeste de Congonhas, também não acusaram Trovoada / CB, mas sim chuva muito forte (75 mm) entre 19 e 22 horas local, e rajadas de vento de 9 a 11 m.s^{-1} . Em Guarulhos (SBGR), CB / trovoada só foi observado uma hora depois do acidente do PT-IEE.

Em ambos os acidentes exemplificados acima, a investigação mostra nuvem do tipo CB presente na região e como causadora de *windshear*. No entanto, outros fatores podem causar tal fenômeno meteorológico, tais como inversão térmica noturna, ondas de montanha, sistemas frontais e brisas dentre outros (SOUZA, 2010).

1.1 Aeroporto Governador André Franco Montoro (SBGR)

O Aeroporto GOVERNADOR ANDRÉ FRANCO MONTORO, mais conhecido como Aeroporto Internacional de Guarulhos/Cumbica-SP (designação IATA: GRU, ICAO: SBGR) está localizado no município de Guarulhos-SP e possui duas pistas de pouso, paralelas entre si e alinhadas em orientação magnética, ou seja, pista 09 (orientação magnética de 270°) e 27 (orientação magnética de 90°). Ele está situado a uma altitude de 750m, latitude 23°26'04,8"S e longitude 46°28'43,2"W (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**); a pista 09R/27L possui 3000m de comprimento e a 09L/27R, 3700m, ambas com 45 metros de largura, segundo informações da página eletrônica, AISWEB, da Força Aérea Brasileira. A Serra da Cantareira fica nas proximidades, no setor norte, e exerce influência significativa sobre os ventos, quando o fluxo é orientado no sentido da serra para o aeroporto.



Figura 2: Pistas de pouso do Aeroporto de Guarulhos/Cumbica indicadas com letras e números de acordo com a direção magnética bem como a localização do SODAR.

SBGR é o aeródromo brasileiro onde há maior tráfego de aeronaves (Anuário Estatístico de Tráfego Aéreo – DECEA, 2015); conforme informações do REDEMET, ele ocupa o primeiro lugar em ocorrência de *windshear* (WS) reportado por pilotos, nos procedimentos de pouso e decolagem (Gráfico 1). Por este motivo, dentre os aeroportos do Brasil, SBGR foi o primeiro a utilizar operacionalmente um equipamento perfilador de vento do tipo SODAR (**SO**nic

Detection And Ranging), o qual pode contribuir efetivamente na prevenção de acidentes aeronáuticos.

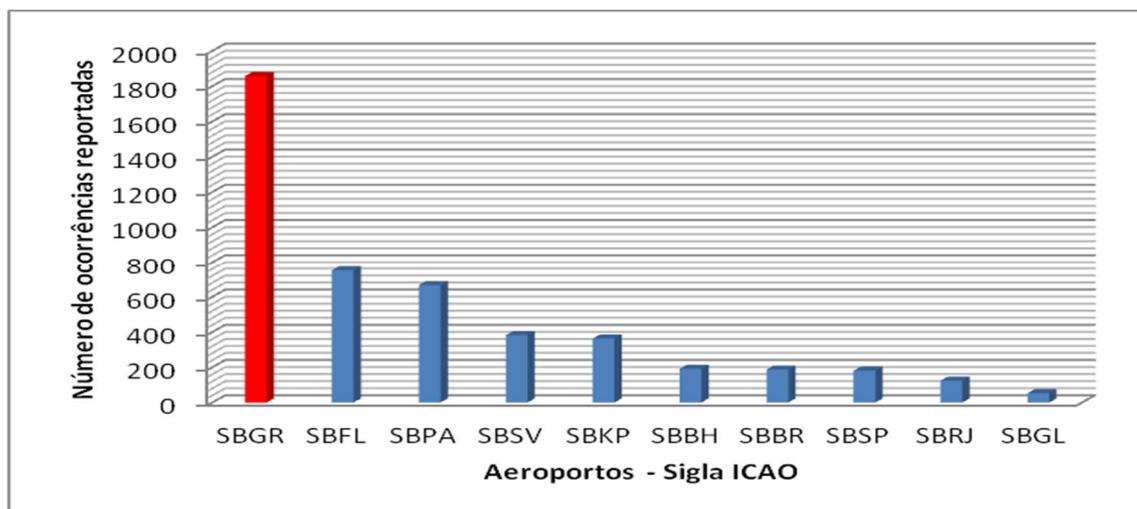


Gráfico 1: Reportes de windshear (WS) em ordem decrescente no período de 1999 a 2013 de alguns aeroportos brasileiros discriminados pela sua sigla ICAO.
Fonte: Adaptado de Matschinske (2012).

Segundo Matschinske (2012), SBGR apresentou neste período 1.857 reportes. O segundo aeroporto brasileiro em reportes de cortante do vento foi o SBFL (Florianópolis), chegando a 751 casos. Conforme citado na REDEMET, em ambos os casos, a principal causa é a onda de montanha, que se forma sobre o alinhamento das serras existentes ao norte/noroeste do aeroporto de Guarulhos e a oeste de Florianópolis.

1.2 Justificativa e Objetivos

Conforme enfatizado, WS é muito perigoso por afetar as fases mais críticas de um vôo: pouso, decolagem e aproximação. Nesses momentos, devido à baixa altitude, a aeronave fica vulnerável para manobras de recuperação. Desta forma, torna-se evidente a necessidade de estudos sobre o comportamento do vento com base nos dados do perfilador de vento SODAR do Aeroporto Internacional de Guarulhos/Cumbica. Uma vez que as situações de risco estejam identificadas pelos dados do SODAR ou pelos reportes dos pilotos, é possível classificar os eventos em termos de sua severidade, realizar uma análise das condições atmosféricas correspondentes para diagnosticar as causas do fenômeno, e então construir um acervo de informações pretéritas com o intuito de prevenir casos futuros.

Assim, o objetivo principal é a análise de situações de *windshear* ocorridas nas imediações do Aeroporto de Guarulhos, ao qual são inerentes as seguintes análises:

- dados do SODAR coletados em SBGR entre Julho de 2012 e Março de 2015;
- informações de METAR/SPECI confeccionadas pela estação meteorológica de superfície deste aeródromo (EMS-1 GR), bem como de SBMT e SBSP;
- imagens de satélite e radar meteorológico.

A partir destes conjuntos de informações e das correspondentes interpretações, é possível almejar os seguintes objetivos secundários:

- discriminar a sazonalidade de *windshear*;
- listar os fenômenos meteorológicos causadores e colecionar as situações atmosféricas correspondentes, em ordem da severidade dos eventos.

Para atingir tais objetivos e aprimorar o entendimento deste fenômeno no campo da meteorologia aeronáutica, é importante expor a metodologia empregada bem como explorar alguns conceitos, passos estes abordados nos itens a seguir.

2. METODOLOGIA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente trabalho chama a atenção para a necessidade de explorar mais profundamente o fenômeno meteorológico *windshear* por sua enorme relevância, e por ocorrer potencialmente em todos aeroportos do território nacional. Aspectos específicos sobre cisalhamento de vento serão apresentados na sequência deste capítulo.

Dadas as características do fenômeno em questão, é necessário utilizar equipamentos sofisticados que sejam capazes de identificá-los localmente e instantaneamente. Os dados do SODAR obtidos junto à INFRAERO, sem os quais este trabalho não seria possível, são inseridos no *software APRun version 1.40* para as devidas análises. O SODAR localizado na cabeceira 27 (Figura 2) havia maior quantidade contínua de dados, portanto utilizado como base para a pesquisa, já os dados do SODAR da cabeceira 09 foram utilizados principalmente de forma consultiva. Algumas informações básicas sobre o funcionamento e as limitações deste equipamento também fazem parte dos subitens deste capítulo.

Baseado nas informações de perfil de ventos é possível identificar os casos de WS significativos à aviação, conforme critérios de severidade; cada caso identificado foi colecionado e sua relação/associação com algum sistema meteorológico que potencialmente o disparou foi devidamente verificada. Desta forma, apresenta-se uma pequena revisão dos sistemas meteorológicos e das escalas típicas correspondentes.

Em seguida, para análise da correlação de WS com fluxo de tráfego aéreo, utilizou-se o anuário da Anuário Estatístico Operacional de 2012, INFRAERO e Anuário Estatístico de Tráfego Aéreo de 2013, CGNA.

Além disso, a utilização conjunta de observações meteorológicas do aeródromo e dos aeródromos vizinhos - bem como de imagens de satélite e de radar meteorológico - permite entender suas características e estudar suas origens, de modo a tentar prevenir futuros acidentes aéreos com alertas meteorológicos mais precisos e acurados. A partir da Rede Meteorológica do Comando da Aeronáutica, REDEMET, foi possível obter informações de METAR/SPECI dos anos de 2012 a 2015 dos aeroportos SBGR, SBSP e SBMT, além das imagens de RADAR meteorológico de São Roque/SP; as

imagens de satélite foram disponibilizadas pelo *site* do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE).

2.1 Windshear - Cisalhamento do vento

Windshear (WS), termo em inglês utilizado comumente na aviação, também pode ser denominada de cortante de vento, gradiente de vento, tesoura de vento ou cisalhamento de vento. É definida como um tipo de turbulência, à baixa altura, que afeta as operações de pouso e decolagem das aeronaves, devida a uma variação local na direção e/ou na velocidade do vento em determinada distância. Pode ser produzida por fenômenos meteorológicos em diversas escalas espaço-temporais, tais como: jatos de baixos níveis, sistemas frontais, brisa marítima, ondas de montanha, camadas de inversão de temperatura e trovoadas, todos capazes de produzir fortes variações na direção e/ou na velocidade do vento. Portanto, o cisalhamento pode ser classificado como:

1. Direcional - varia apenas de direção com a altura;
2. Por velocidade - varia apenas a velocidade com a altura e
3. Direcional e velocidade - o cisalhamento é função de ambos fatores de acordo com a variação da altura.

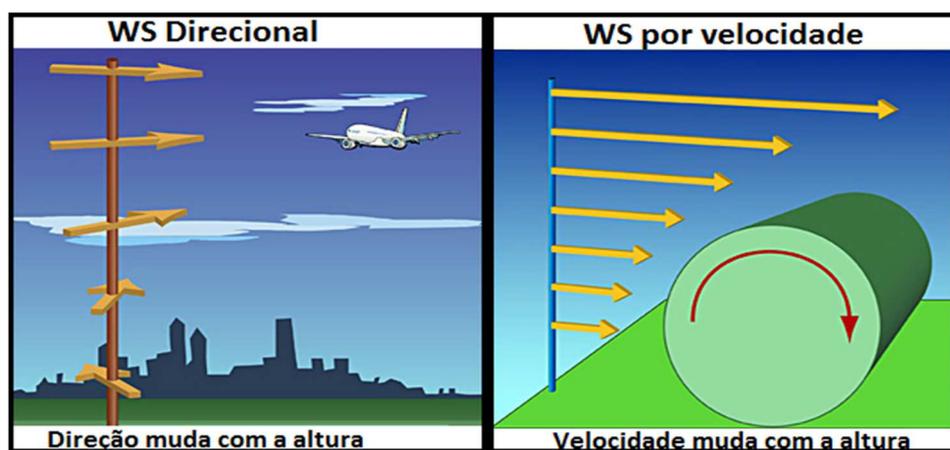


Figura 3: Tipos de windshear por direção e velocidade, ainda pode ocorrer um terceiro tipo que é o fator de ambos, velocidade e direção variando com a altura.
 Fonte: Adaptado de <http://www.srh.noaa.gov/jetstream/tstorms/tornado.html>

O fenômeno está presente na maioria das localidades geográficas do planeta, porém, devido aos fatores meteorológicos e topográficos, a sua ocorrência é mais frequente em regiões de trovoadas com presença de nuvens cumuliformes (nuvens com desenvolvimento vertical) e de relevo elevado (CERQUEIRA et al., 2005). Para fins aeronáuticos, WS ocorre da superfície até 1600ft (aproximadamente 500m de altura), fase crítica das aeronaves em procedimento de pouso e/ou decolagem (Manual ICAO, 2005). A intensidade do cisalhamento vertical do vento horizontal é determinada com base no Manual ICAO (2005), de acordo com a Tabela 1.

INTENSIDADE	VARIAÇÃO ($m.s^{-1}$ / 30m)	VARIAÇÃO (kt / 100ft)
LEVE	0,00 - 2,09	0 - 4
MODERADA	2,61 - 4,18	5 - 8
FORTE	4,70 - 6,26	9 - 12
SEVERA	Maior que 6,26	Maior que 12

Tabela 1: - Critérios para a intensidade de cisalhamento de vento recomendada pela Quinta Conferência de Navegação Aérea (Montreal, 1967).

Fonte: Adaptado de ICAO (International Civil Aviation Organization)

É de fundamental importância salientar que a identificação da intensidade forte e severa foi de acordo com o valor máximo de variação de velocidade em relação à altura, em um mesmo período contínuo, ou seja, em um caso identificado como severo (Tabela 1 e Figura 4) que perdurou por mais de 4 horas, por exemplo, houve um máximo entre as 22h e 23h. Portanto, este caso foi identificado como severo.

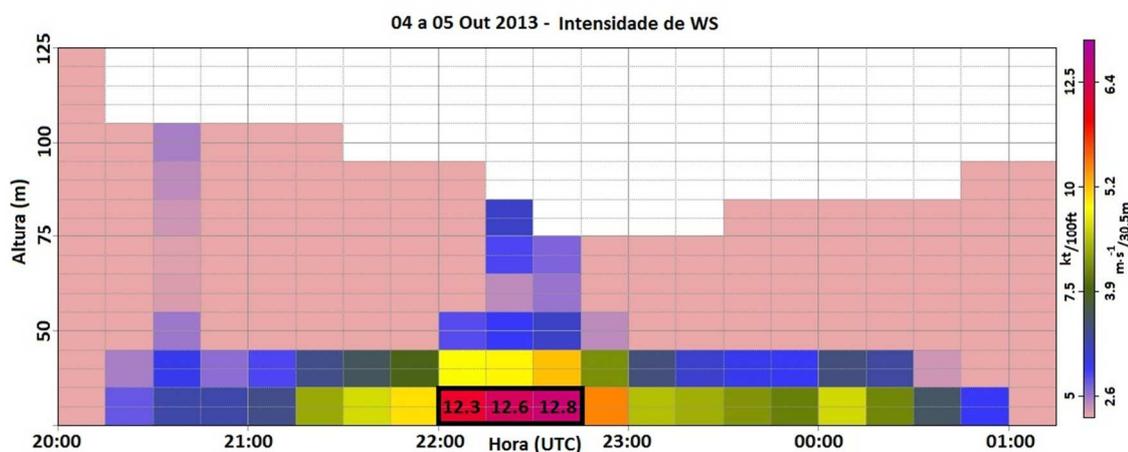


Figura 4: Perfil vertical da intensidade de WS entre 20 UTC do dia 4 à 01 UTC do dia 5 de outubro de 2013 no aeroporto de Guarulhos.

O risco fatal para aeronaves próximas ao solo em situações de WS é a súbita perda de sustentação e a conseqüente drástica perda de altitude, causa primária dos acidentes. Com relação a isso, cabe uma mínima explicação sobre os princípios da sustentação aerodinâmica.

No campo aeronáutico fala-se de quatro forças que agem sobre a aeronave em voo (*Figura 5*):

- Força de Tração (T) - Gerada pelo motor que impulsiona a aeronave para frente, quanto maior é a potência do motor, maior é a força "T".
- Força de Arrasto (A) - Gerada pela resistência do ar. Tem sentido contrário à força "T". Quanto mais alto é o voo, menor é a força A devido ao ar ser mais rarefeito o que leva a economia de combustível.
- Força gravitacional (G) - É denominada força peso, que é a ação da gravidade terrestre sobre todos os corpos.
- Força de Sustentação (S) - É a força gerada pelo fluxo de ar que passa pela asa de uma aeronave que tem sentido contrário à força "G".

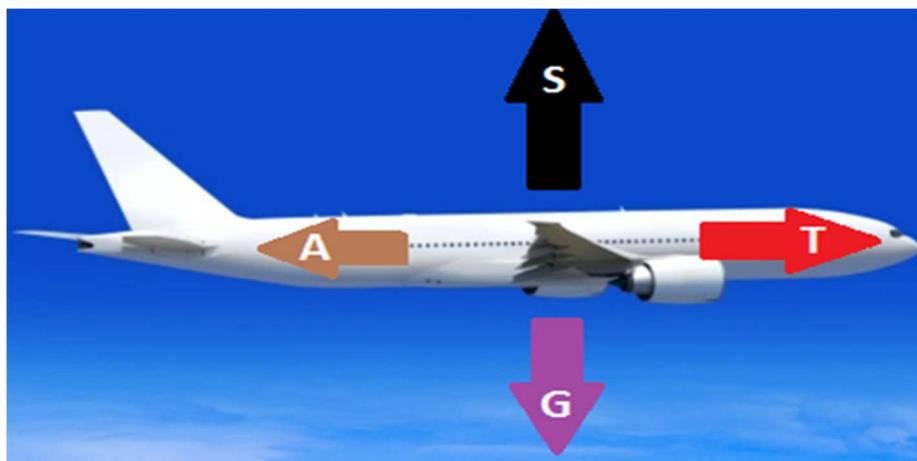


Figura 5: A figura ilustra as quatro forças que agem sobre uma aeronave, segundo o "jargão" aeronáutico.

Fonte: Adaptado de <http://topbrasilturismo.wordpress.com>

Baseado nas quatro forças apresentadas, a explicação mais simples para que uma aeronave possa voar é que a tração seja maior que o arrasto assim como a sustentação seja maior que a gravidade. A explicação para o surgimento da força de sustentação está no formato da asa, a qual é côncava na parte superior (extradorso) e praticamente plana na parte inferior (intradorso). Para percorrer em tempos iguais as partes superior e inferior da

asa, o fluxo de ar percorre uma distância maior pelo extradorso, o que requer maior velocidade e, portanto, uma menor pressão acima da asa em relação à parte de baixo (Figura 6); essa diferença de pressão é a responsável por gerar a força de sustentação (S).



Figura 6: Efeito do fluxo de ar sobre a asa de uma aeronave.
Fonte: Adaptado de Oliveira (2008).

2.2 O SODAR

Segundo Coulter e Kallistratova (2003), na década de 1970 houve um aumento na taxa de estudos da Camada Limite Planetária devido a pesquisadores no campo da acústica e após a criação da Sociedade de Sensoriamento Remoto Acústico da Atmosfera e Oceanos (*Society for Acoustic Remote Sensing of the Atmosphere and Oceans - ISARS*), em 1979, foram apresentados simpósios com dados e trabalhos coletado há mais de 20 anos na área. Os assuntos abordados na época continham temas como:

- propagação e atenuação do som na atmosfera;
- técnicas de sondagem do ambiente por diferentes instalações remotas terrestres tais como SODAR, SONAR, RASS, LIDAR, RADAR, e sistemas integrados; e
- desenvolvimento, validação e aplicação de novos métodos acústicos remotos.

Ainda, conforme citado por Coutler e Kallistratova (2003), mais de 60% dos trabalhos foram dedicados ao Sensoriamento Remoto Acústico da Camada Limite Atmosférica (CLA), com a ajuda do equipamento SODAR.

SODAR é um instrumento acústico para medições remotas de perfis tridimensionais de velocidade e direção do vento, bem como características de turbulência na atmosfera inferior, ou seja, na CLP, portanto, é um instrumento

significativo para o campo da micrometeorologia.

Em operação, a antena emite pulsos sonoros, que são retro-espalhados por heterogeneidades de temperatura no ar. A antena, em seguida, recebe os ecos dos pulsos sonoros. O SODAR mono-estático, ou seja, a mesma antena é utilizada para emissão e recepção do som, estima a altura, intensidade e direção do vento pelo tempo de retorno e variação de frequência do eco recebido.

A partir da onda retroespalhada, obtém-se detalhes sobre a estrutura da turbulência na Camada Limite Planetária (CLP) assim como o vento é determinado pela avaliação do espectro dessa mesma onda. Essa análise é possível devido à mudança de frequência dessa onda causada pela inhomogeneidade de temperatura da atmosfera, esse de desvio é o notório efeito Doppler.

A transformada rápida de Fourier (FFT) é a ferramenta matemática para os espectros dos sinais acústicos recebidos de diferentes direções (*Scintec Flat Array Sodar – Hardware Manual Version 1.01*). Verifica-se na *Figura 7* um modelo esquemático simplificado do funcionamento e a imagem do mesmo.

O SODAR MFAS, equipamento instalado no aeroporto em estudo, possui características peculiares e para melhor entender esse trabalho em questão, é necessário conhecer suas especificações e restrições instrumentais. A Tabela 2 apresenta as principais características operacionais do sistema MFAS.

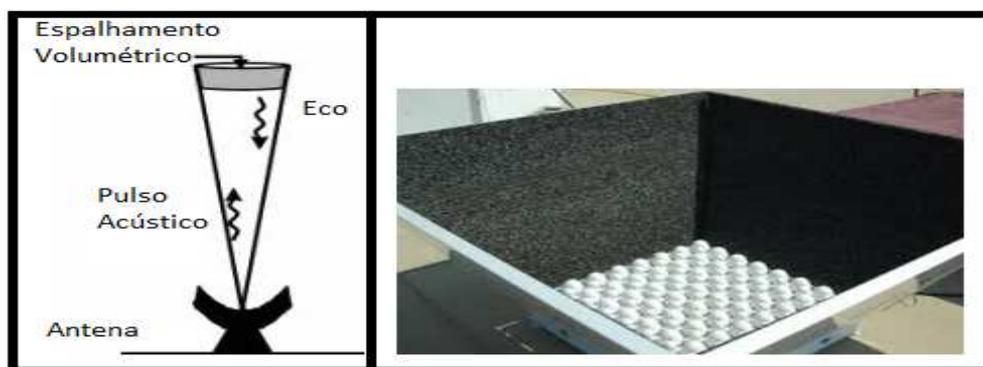


Figura 7: Modelo de funcionamento (esquerda), equipamento de proteção e antena (direita).
Fonte: Adaptado de <http://www.salford.ac.uk> (esquerda) e <http://www3.nd.edu/> (direita)

A *Figura 8* mostra a antena e a proteção acústica que ajuda a reduzir a susceptibilidade a interferências sonoras externas e a *Figura 9* mostra as dimensões e o número de transdutores piezoelétricos do SODAR MFAS.

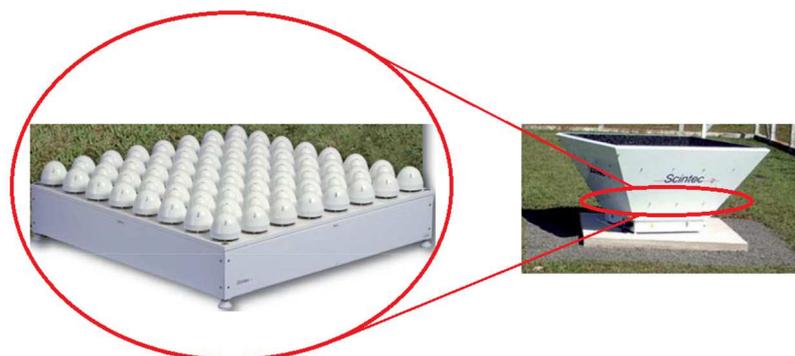


Figura 8: Antena, à esquerda, e envólucro de proteção acústica à direita.

Fonte: Adaptado de <http://www.scintec.com/english/Web/Scintec/Details/A032000.aspx>

Tabela 2: Principais características operacionais do SODAR MFAS.

Sistema MFAS		
Descrição	Especificações	Observações
Nº de elementos da antena	64	Transdutor Piezoelétrico*
Potência (acústica)elétrica de saída	50W (7,5 W)	Máximo, selecionável pelo usuário
Frequência variável	1650 -2750 Hz	Auto configuração ou definido pelo usuário
Multifrequência	sim	-
Ângulos do feixe	0°, ± 22°, ± 29°	Independente da frequência
Feixe múltiplo	Sim, acima de 9 feixes	-
Resolução Vertical	10m	Melhor sintonização
Nº de faixas de canais	100	Máxima sintonização
Altura Mínima	30m	Dependencia da seleção, ambiente e atmosfera.
Altura Máxima	1000m	
Média de tempo	1 - 60min	Definido pelo usuário
Acurácia do vento horizontal	0,1 -0,3 m.s ⁻¹	depende do modo, média ao longo de diferentes condições
Acurácia do vento horizontal	0,03 - 0,1 m.s ⁻¹	
Acurácia da direção do vento	< 1,5°	Velocidade do vento > 2 m.s ⁻¹
Faixa de medição velocidade horizontal	0 - 50 m.s ⁻¹	nominal
Faixa de medição velocidade vertical	- 10 - 10 m.s ⁻¹	
Temperatura de Operação	-35 a +55°C (-30 a +130 °F)	-

Fonte: Adaptado de Scintec Flat Array Sodar – Hardware Manual Version 1.01.

*O efeito piezoelétrico foi descoberto em 1880 pelos irmãos Curie e utilizado em uma aplicação prática pela primeira vez por Paul Langevin no desenvolvimento de sonares durante a primeira guerra mundial.

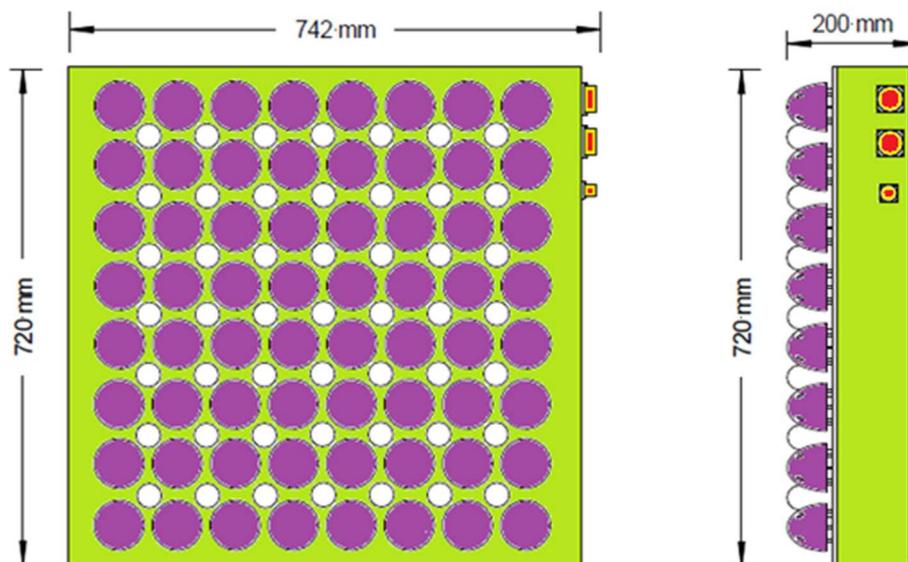


Figura 9: A imagem mostra as dimensões do SODAR MFAS e seus 64 transdutores piezoelétricos.

Fonte: Adaptado de Scintec Flat ArraySodars - Hardware Manual versão 1.01.

Vale salientar que o equipamento possui algumas restrições para o uso. Por ser um instrumento acústico, a umidade e a temperatura na área de atuação assim como o som do ambiente (ruídos) interferem diretamente na acurácia e resolução de altura para o estudo dos ventos. Portanto a antena deve ser protegida por um envólucro acústico a fim de diminuir a interferência externa.

Conforme já citado, além dos ruídos externos como transito de rodovias e os próprios aviões, a atmosfera também influencia de forma significativa na atenuação da onda sonora emitida pelo SODAR.

Ainda, equipamentos como o RADAR meteorológico, que emitem ondas eletromagnéticas, ou o próprio SODAR, onda sonora, são utilizados por pesquisadores para sondagens remotas da atmosfera sendo assim, nesta interação, há perda de energia. *“Sondagem remota da baixa atmosfera, por ondas eletromagnéticas ou acústicas, envolvem a interação das ondas com a atmosfera”* (LITTLE, 1969, p. 571).

O mesmo autor enfatiza a importância de reconhecer que a interação das ondas sonoras com a baixa atmosfera é muito mais forte do que para a

maioria das partes do espectro eletromagnético, portanto há uma maior atenuação (LITTLE, 1969, p. 571).

Observa-se em Harris (1966), publicado em *The Journal of the Acoustical Society of America*, a influência da temperatura e umidade na interação da absorção do som para diferentes frequências. Uma vez que o SODAR MFAS possui uma frequência variável entre 1650 e 2750 Hz, segundo a Tabela 2, verifica-se no Gráfico 2 a representação dessas variáveis atmosféricas na atenuação do som.

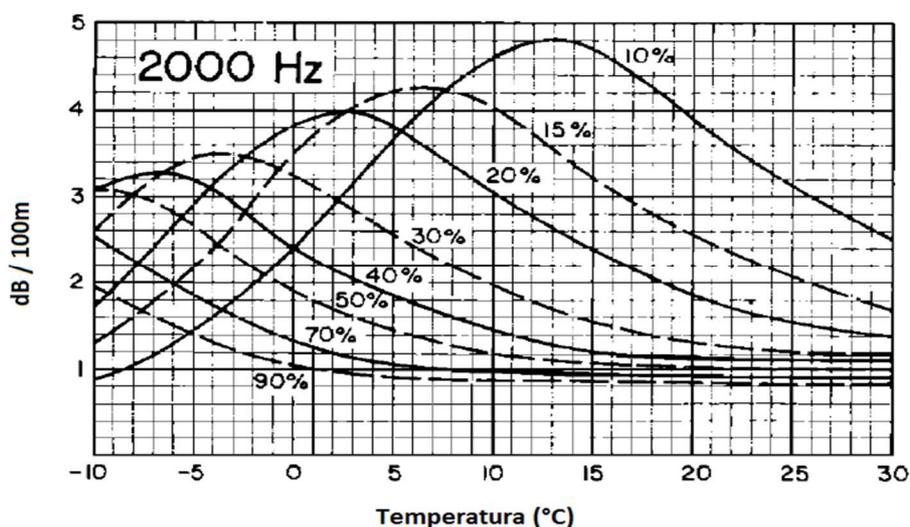


Gráfico 2: Mostra a atenuação da onda sonora em função da temperatura e da umidade atmosférica.

Fonte: Adaptado de Harris (1966).

2.3 Sistemas meteorológicos atuantes e potencialmente causadores de WS

Tendo em vista que as análises meteorológicas foram realizadas sobre a região aeroportuária de SBGR, é conveniente enunciar os fenômenos severos mais comuns de escala sinótica, mesoescala e microescala que ocorrem sobre a área de estudo. A *Figura 10* apresenta uma subdivisão simplificada das escalas de fenômenos utilizadas em meteorologia.

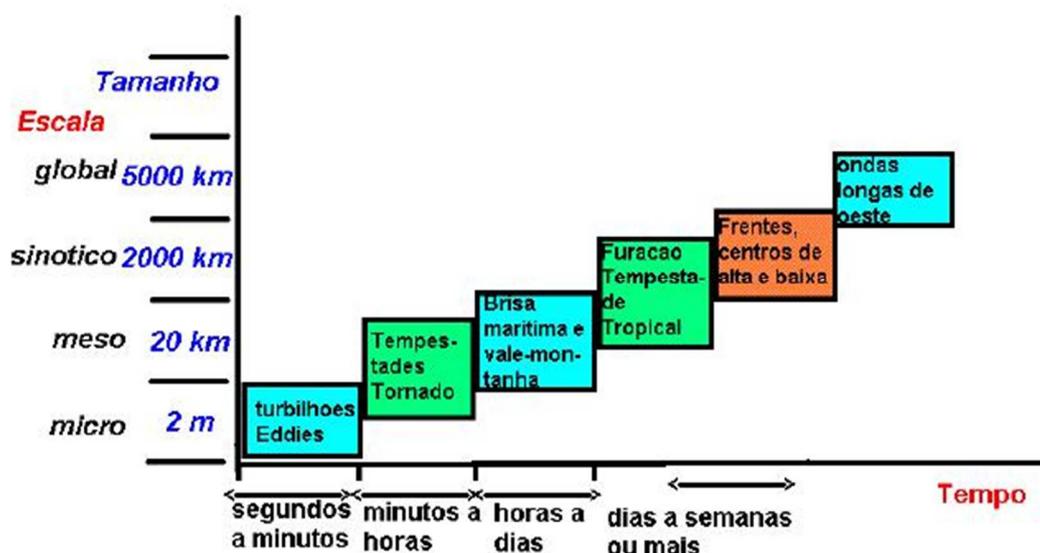


Figura 10: Esquema simplificado de subdivisão das escalas dos fenômenos atmosféricos.

Fonte: <http://master.iag.usp.br/pr/ensino/sinotica/aula01/>.

Sistemas frontais são frequentes sobre o Sudeste do país. Horas antes de uma frente fria atingir a região, o vento de noroeste se intensifica e, somado a proximidade do aeroporto a Serra da Cantareira (conforme mostrado na Figura 1), o fluxo de vento torna-se turbulento, causado por ondas orográficas.

Segundo Lima (2008), a distribuição percentual das rajadas de acordo com a orientação do vento médio, cabeceira 09R, principal de SBGR, foi observado que 31,3% das rajadas eram acompanhadas de vento noroeste (300° a 330°), e que 63,3% das rajadas ocorreram com ventos de oeste a norte (de 250° a 20°). Ainda, observa-se que a orientação de noroeste do vento médio é mais numerosa nos registros de rajada, independente da estação do ano.

É importante enfatizar que a distância do anemômetro em relação à base da torre anemométrica deverá ser de 10 metros, sendo técnica e operacionalmente tolerada a variação de $\pm 1,0\text{m}^1$; portanto este e o vento considerado como “vento de superfície” para a aviação e informado no METAR (MCA 101-1/2015).

Após contextualização acima, verifica-se que sistemas de brisa, são comuns, assim como as trovoadas, principalmente em estações de primavera e verão, que afetam demasiadamente a região em estudo. Observa-se em Stull (1988), que a inversão térmica, no topo da camada estável de inversão

¹ITEM 5.2.4 do MCA 101-1/2015, disponível em www.redemet.aer.mil.br.

noturna, comumente provoca um fenômeno chamado de “jatos noturnos” (Figura 11). Tais jatos afetam aeronaves, principalmente, no procedimento de pouso / decolagem. Sendo assim, todos estes fenômenos meteorológicos possuem potencial notório de produção de WS.

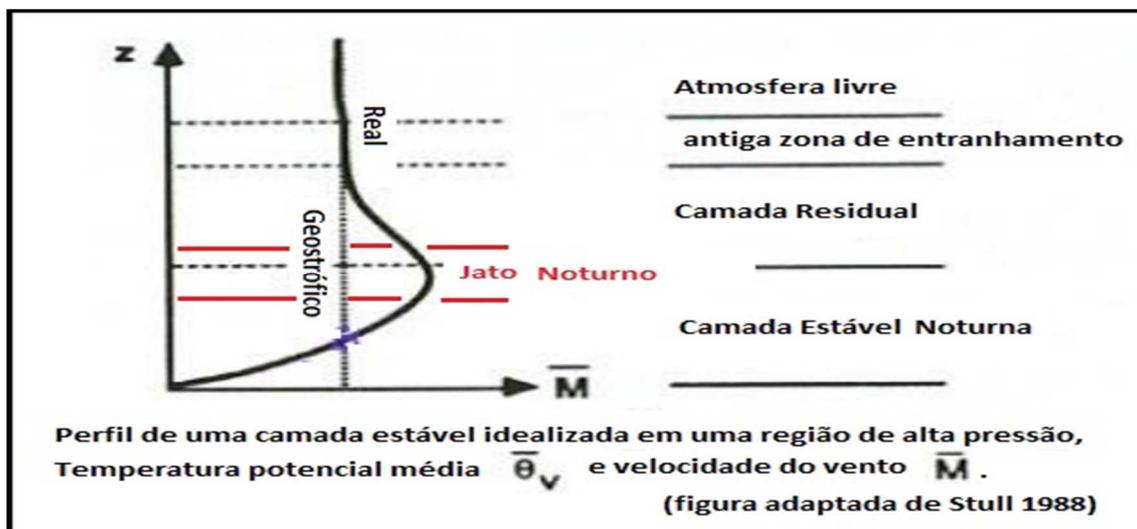


Figura 11: Região de “Jatos Noturnos”.
Fonte: adaptado de Stull 1988.

Em função de sua eventual severidade, é oportuno enfatizá-los a seguir.

Nuvens do tipo CB, que produzem raios, chuva, ventos fortes e até mesmo tornados, podem causar WS devido ao fenômeno, cuja denominação em inglês é chamado de *downburst*, *microburst*² e *outburst* (Boletim SBMET, 2005; Fujita, 1985). Observações sugerem que aproximadamente 5% das tempestades produzem este efeito. Na Figura 12, observa-se o movimento da massa de ar e os vórtices gerados quando um *microburst* atinge o solo.

2 *Microburst* é um intenso fluxo descendente de vento capaz de derrubar uma aeronave, tirando sua sustentação

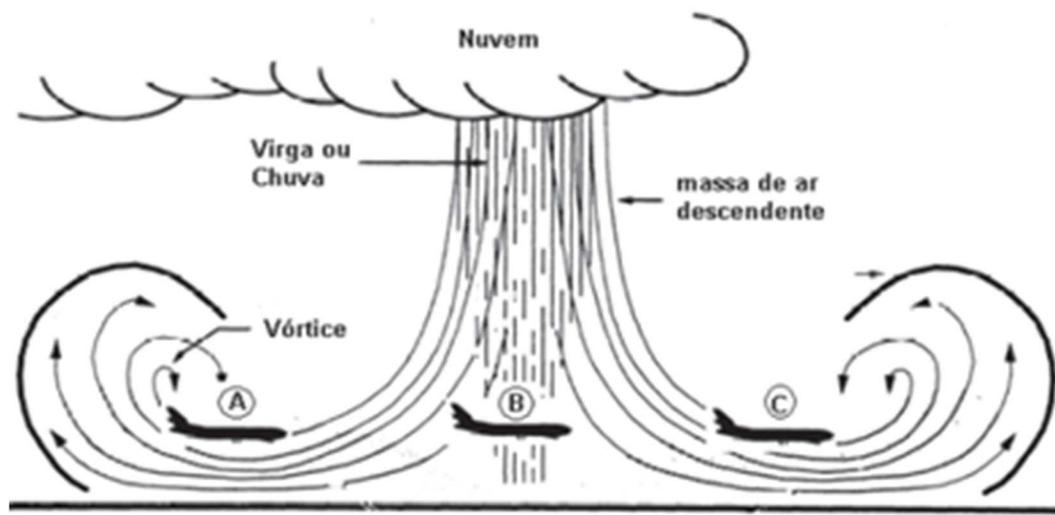


Figura 12: Microburst de baixa altitude.
Fonte: Adaptado de AC 00-54.

Conforme a Figura 12, quando a aeronave se localiza na posição A, ocorre um aumento da velocidade em relação ao ar e conseqüente ganho de sustentação. Na posição B, podem-se encontrar massas de ar descendentes com velocidades de até $3000 \text{ pés} \cdot \text{min}^{-1}$. Variações rápidas nestas velocidades podem aumentar significativamente a carga de trabalho do piloto, devido a eventuais disparos do “stickshaker”³. Na posição C, ocorre uma perda de velocidade em relação ao ar e conseqüente perda de sustentação (Boletim SBMET, 2005).

Inversões térmicas noturnas podem gerar o desenvolvimento do JBN (jatos noturnos no topo da camada de inversão) que aumenta o cisalhamento do vento, o que tende a gerar turbulência (SOUZA, 2010). A partir da Estabilidade atmosférica durante a madrugada, o ar ganha velocidade rapidamente com a altura em função da ausência de convecção (turbulência).

Uma vez citados os fenômenos causadores de WS, é importante ressaltar mínimos aspectos sobre a Camada Limite Planetária, região da baixa troposfera na qual tais fenômenos ocorrem.

³ O Stick Shaker, nada mais é que um conjunto de sensores e motores elétricos, ligados à coluna de comando (Manche) e com o intuito de fazer muito barulho e gerar grandes vibrações, avisando aos pilotos da eminência do Estol.

2.4 Breve contextualização da Camada Limite Planetária (CLP)

Conforme Arya (2001), uma camada limite é definida como a camada de um fluido (gasoso ou líquido) em contato com a vizinhança imediata de uma superfície material onde há troca de propriedades físicas como momento, calor e/ou massa. Por consequência, pode-se concluir que a CLP é formada pela interação entre a atmosfera e a superfície terrestre (superfície sólida ou líquida). A partir dessa interação há troca de momento e calor de forma rápida e eficiente em toda CLP através de fluxos turbulentos e mistura das propriedades físicas que são transportadas.

Stull (1988) define camada limite como parte da troposfera diretamente influenciada pela superfície terrestre através de forçantes como atrito, transporte de calor e evapotranspiração. Ela possui uma variação diuturna de temperatura, próximo ao solo, diferente do que ocorre em camadas mais elevadas da troposfera, de uma forma mais suavizada (*Figura 13*). Essa variação influencia também na alteração de altura a qual atinge. A Camada Limite Planetária estende-se dos primeiros milímetros acima do solo até aproximadamente 1500m de altura, durante o dia e pode chegar a 100m imediatamente antes do nascer do sol. A evolução diuturna estrutural da CLP pode ser observada de uma forma didática na *Figura 14* *Figura 13*.

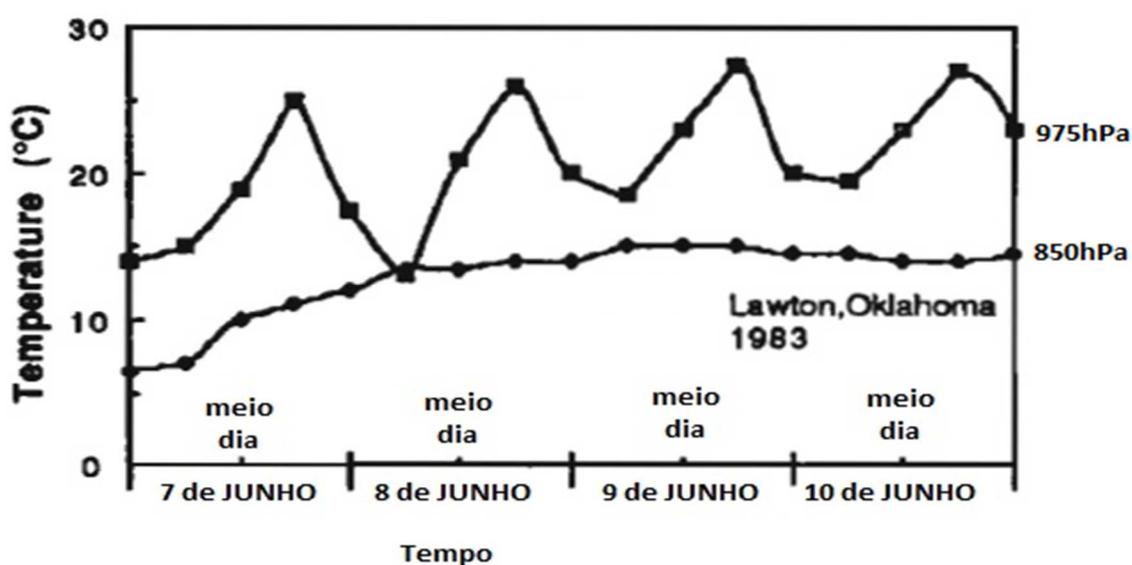


Figura 13: Evolução das temperaturas medidas próximas ao solo (975hPa) e a 1100m acima do solo (850hPa).

Fonte: Adaptado de STULL, 1988.

Em complemento, a CLP estrutura-se da seguinte forma (Figura 14):

- Camada Superficial (CS) – Representa em média os primeiros 10% (~100m) da atmosfera imediatamente acima do solo. A região de fronteira entre a CS e o solo que está nos primeiros centímetros de ar, onde o transporte molecular predomina sobre o transporte turbulento, é definida como camada de interface (Stull,1988).
- Camada de Mistura Convectiva (CM) – O contínuo aquecimento solar durante o dia origina essa camada, através do fluxo de calor que produz movimentos verticais. Segundo Stull (1988), a convecção é o mecanismo dominante desta camada, os ventos são subgeostróficos, ou seja, o vetor da direção do vento cruza as isóbaras com um ângulo no sentido da baixa pressão. Na CM podem-se gerar regiões de intensa advecção de massa (fluxo de ar) e conseqüentemente a formação turbulência associada a cisalhamento de vento (WS).
- Camada Estável Noturna (CN) – Pouco antes do por do sol desenvolve-se próximo ao solo uma camada estável caracterizada por uma inversão de superfície, com poucas centenas de metros de espessura e estaticamente estável. Conforme STULL (1988), embora os ventos próximos à superfície possuam baixas velocidade, à medida que se aproximam da interface entre o topo da CN e a base da CR, é comum sofrerem aceleração chegando a velocidades supergeostróficas, dando origem aos jatos de baixos níveis (JBN) ou jatos noturnos (JN), já ilustrado na Figura 6. Tais jatos são resultado de um cisalhamento (WS) e geram a turbulência. Conforme citado por Folken (2008), esse jatos surgem em alturas de 10m a 100m.
- Camada Residual (CR) – Após o pôr do sol, a fonte de energia térmica cessa e a CM gradativamente extingue-se. Surge a CN, descrita anteriormente, e acima dela, uma região que ainda possui variáveis físicas semelhantes à recém extinta camada de mistura, portando o nome de camada residual.
- Zona de Entranhamento (ZE) / Camada de Inversão(CI) – É a região entre a Camada Limite Planetária e a Atmosfera Livre. Denominada de ZE durante o dia e de CI à noite. Segundo Foken (2008), a espessura da ZE / CI é aproximadamente de 10% da CLP e caracteriza-se por ser uma camada de

inversão térmica, ou seja, é uma região estaticamente estável com turbulência intermitente.

- Atmosfera Livre – Região da troposfera imediatamente acima da CLP. Na atmosfera livre, há fluxos turbulentos em menor quantidade e o escoamento laminar é o fator dominante.

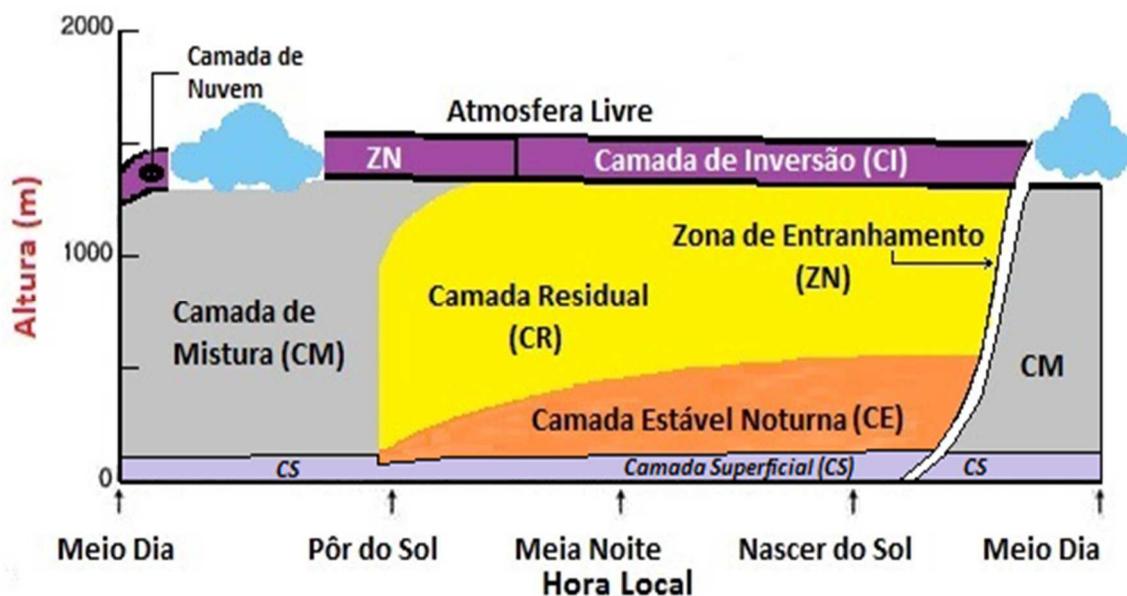


Figura 14: Estrutura diuturna da Camada Limite planetária.
Fonte: Adaptado de Stull (1988).

Sendo assim, uma vez que a CLP estende-se da superfície ate aproximadamente 1500m e o SODAR consegue coletar uma faixa de dados de 30m até 1000m de altura, segundo tabela 2, em relação ao nível do aeroporto em estudo, verifica-se a utilidade do equipamento para os estudos do comportamento do vento nos aeroportos do país como complemento das informações do vento em superfície obtidas por METAR.

3. RESULTADOS

No Brasil, equipamentos de detecção desse fenômeno em aeroportos são escassos, por isso os dados estatísticos ainda são gerados por informe de pilotos com base dos sistemas de alerta de alguns tipos de aeronaves, capazes de informar o perigo iminente. Tais informes são inseridos pelo observador meteorológico de uma EMS, no instante em que recebe tal informação, através do **Sistema de Controle Operacional de METeorologia (SISCOMET), software pertencente ao Comando da Aeronáutica.**

O Gráfico 3 mostra média mensal dos três (03) aeroportos do país onde há maior reporte dos fenômenos no período de quinze (15) anos. O Gráfico 4

mostra o comparativo de ocorrências de WS por reporte de piloto em relação detectado pelo SODAR.

Reportes Mensais de Gradiente de Vento em SBGR (1999 a 2013)

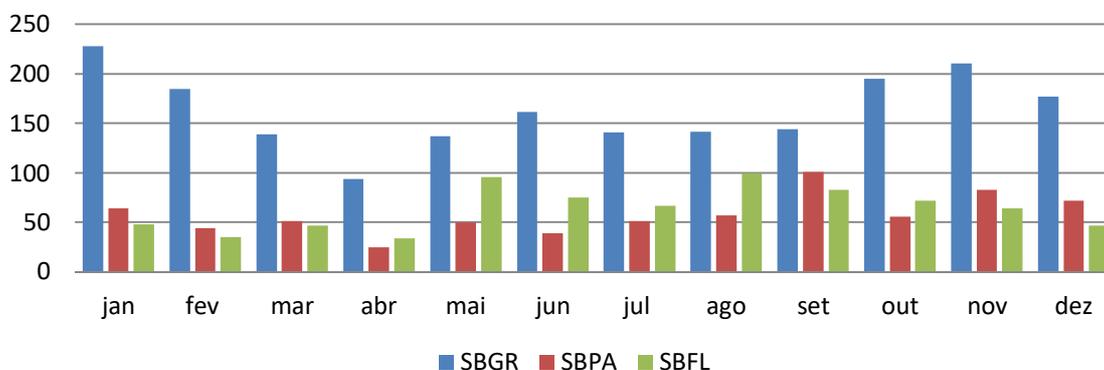


Gráfico 3: Distribuição mensal de cortante do vento nos três aeródromos de maior reporte do fenômeno no Brasil. O aeroporto SBGR apresenta uma maior variação ao longo do ano, com picos em janeiro e novembro.

Fonte: Adaptado de REDEMET.

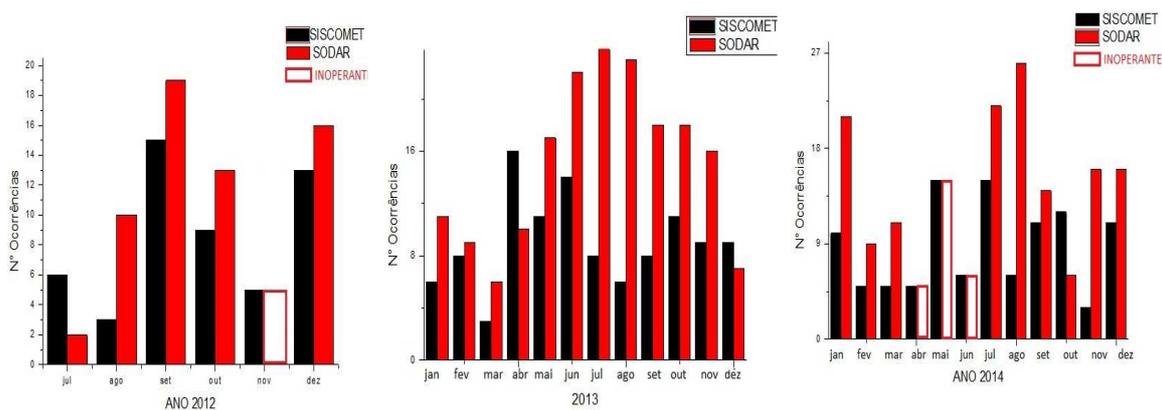


Gráfico 4: Comparação anual entre os totais de eventos mensais de WS registrados pelo SISCOMET e pelo SODAR do aeroporto SBGR.

Os gráficos deixam visível que, na maioria dos casos, o número de WS detectado pelo equipamento fixo no aeroporto é maior que o informado por pilotos. Isto indica que a estatística que é obtida hoje no Brasil é subestimada, uma vez que o SISCOMET é dependente da quantidade do tráfego de cada aeroporto enquanto o SODAR está fixo e gera dados de forma constante.

É importante ressaltar no Gráfico 4, que em julho de 2012 existiam apenas 12 dias de dados e em dezembro de 2013, havia apenas 10 dias de dados. É possível que este fator tenha contribuído para um maior número de ocorrências do SISCOMET em relação ao SODAR.

Com base no *Anuário Estatístico Operacional 2012*, o qual informa os movimentos operacionais dos 66 aeroportos administrados pela INFRAERO, no referido ano, pode-se verificar a importância do Aeroporto de Guarulhos/Cumbica, SBGR ao país e enfatizar a necessidade deste trabalho na prevenção de acidentes aeronáuticos devido ao imenso volume de aeronaves, cargas e passageiros que transitam diariamente neste local. Conforme informado pelo próprio anuário, os dados apresentados são obtidos através de formulários próprios preenchidos pelas Companhias Aéreas e enviados a cada aeroporto da rede INFRAERO.

O Gráfico 5 mostra a classificação decrescente dos dez aeroportos brasileiros da maior movimentação de aeronaves, pousos e decolagens, do ano de 2012. Pode-se observar que SBGR possuiu, no ano de 2012, um movimento de aproximadamente 274.000 por ano e pouco mais de 60.000 em relação ao segundo colocado, o Aeroporto de Congonhas (SBSP), localizado na cidade de São Paulo/SP.

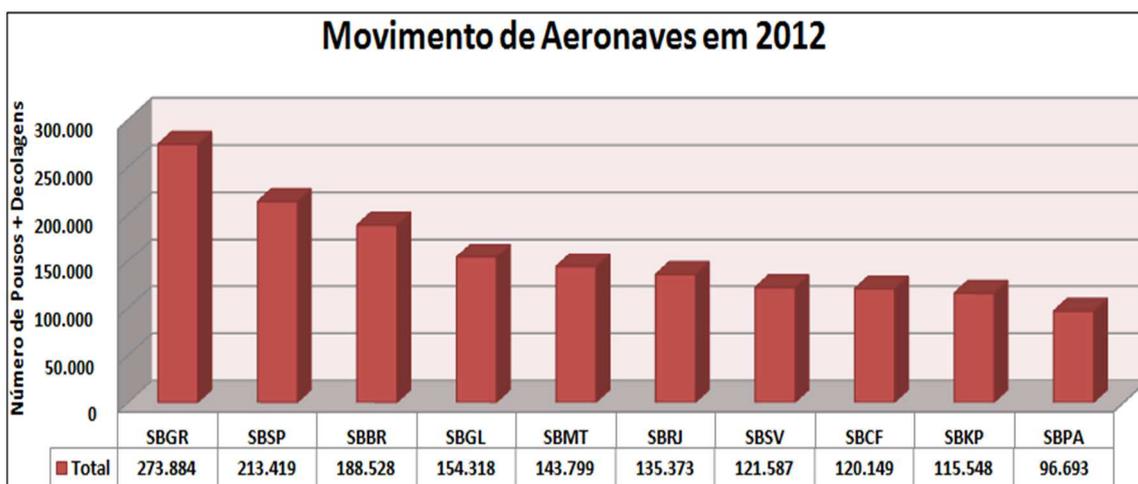


Gráfico 5: Os 10 aeroportos brasileiros com maior movimento de aeronaves no ano de 2012. Fonte: Anuário estatístico da INFRAERO, 2012.

Faz-se necessário observar o número de passageiros que transitaram em SBGR no mesmo ano. O Gráfico 6 mostra a classificação dos 10 aeroportos do país que apresentaram o maior fluxo de passageiros no ano de 2012. O Aeroporto de Guarulhos ficou em primeiro lugar com um movimento de quase 33 milhões de passageiros à frente do segundo de maior movimento do país, o aeroporto do Galeão, localizado na cidade do Rio de Janeiro/RJ, com quase 15,5 milhões de passageiros a menos.

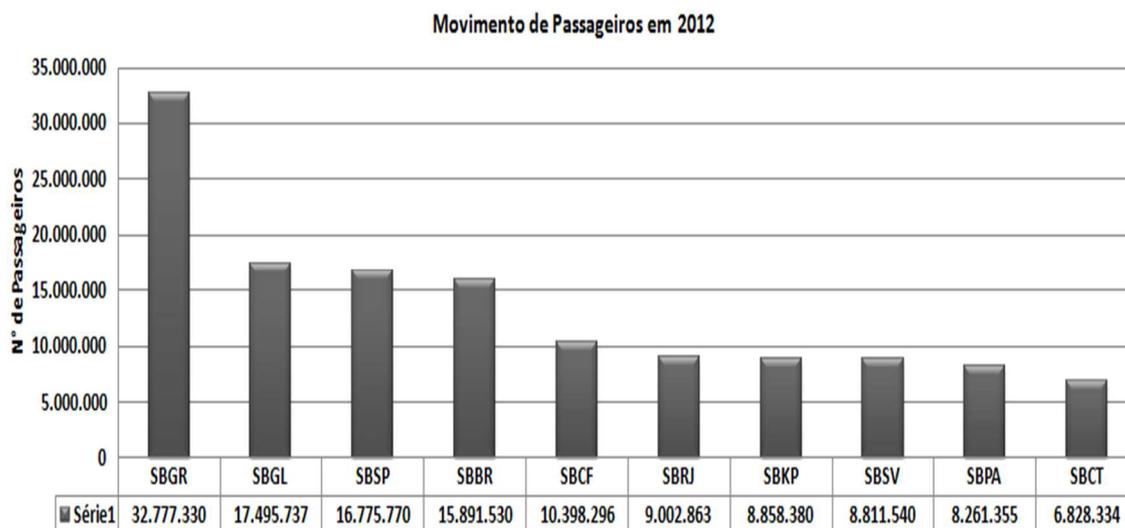


Gráfico 6: Classificação dos 10 aeroportos com maior fluxo de passageiros do ano de 2012.
Fonte: Anuário estatístico da INFRAERO, 2012.

3.1 Horário de ocorrência de WS versus movimento de passageiros

Dos fenômenos detectados, pelos dados obtidos, foram discriminados quatro horários diferentes, em porcentagem de ocorrências e utilizado o movimento típico de passageiros no aeroporto de SBGR. Conforme Gráfico 7, verifica-se que nos períodos da manhã e da noite, maiores fluxos do dia, o número de passageiros supera a marcação de 3500 por hora.

Em um período de 24 horas, a madrugada possui o menor fluxo de passageiros, bem como a menor porcentagem de WS, 16,59%; a tarde possui a maior porcentagem, em torno de 34,56%, porém há um sensível decréscimo no número de passageiros nesta faixa de horário; por fim, os períodos da manhã e noite apresentam um intenso movimento associado em média a 22,73% e 26,11% casos de WS, respectivamente. Todos estes valores de porcentagens equivalem à média de ocorrência entre ambas as pistas.

O gráfico 8 mostra o montante de passageiros em um período de 24h nos quatro períodos distintos (madrugada, manhã, tarde e noite) bem como a porcentagem, dos casos identificados de WS em cada cabeceira que os equipamentos estão localizados.

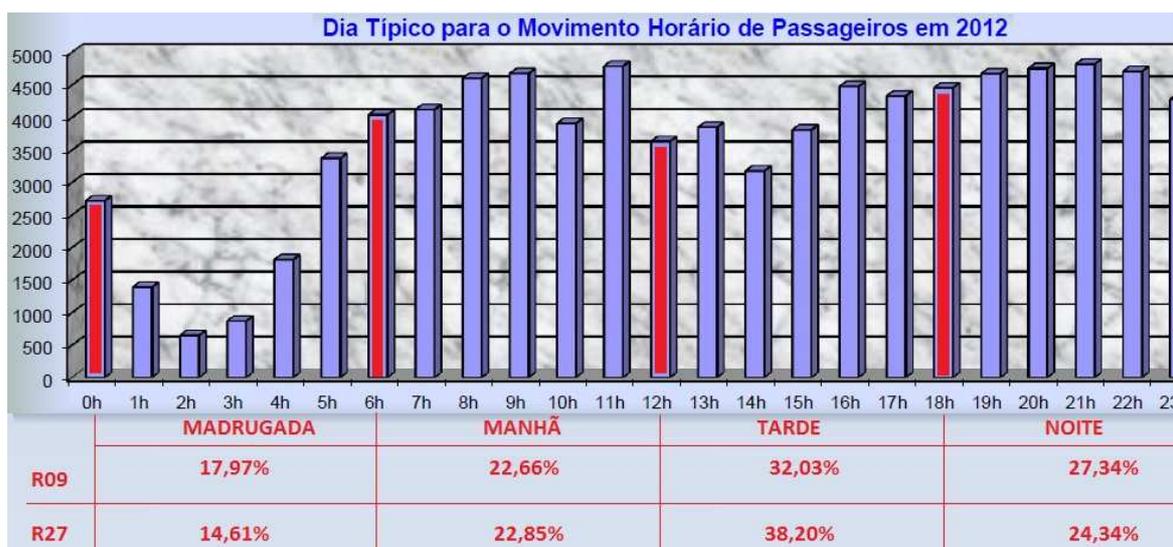


Gráfico 7: Movimento de passageiros em um dia típico e a porcentagem de ocorrência de WS por período em ambas cabeceiras.

Fonte: Adaptado de Anuário estatístico da INFRAERO, 2012.

3.2 Altura e intensidades dos casos identificados

Foram separadas as ocorrências de WS em três tipos de intensidades: moderado, forte e severo, tendo em vista as informações de informe dos pilotos extraídas do SISCOMET, nas quais não houve reporte de WS do tipo leve, conforme o Gráfico 8.

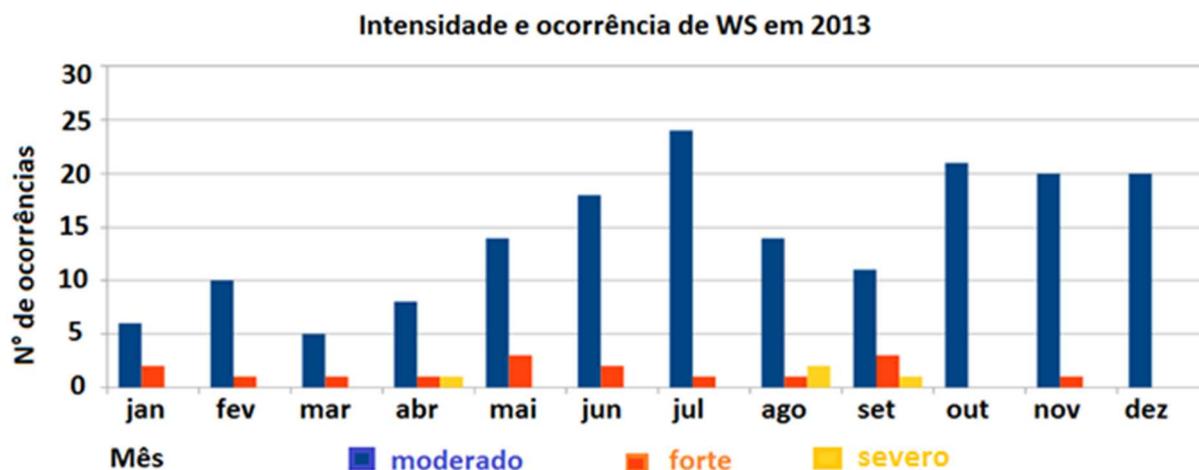


Gráfico 8: Variação mensal das intensidades de WS em SBGR no ano de 2013.

Sabendo-se que SBGR está a uma altitude de 750m, foi utilizado o *Global Mapper* para desenhar as curvas de nível do relevo em torno do aeródromo. A *Figura 15* mostra que o setor norte possui uma variação de altitude entre 900m e 1100m, ou seja, a variação aproximada de altura da

Serra Cantareira em relação ao local em estudo está no intervalo entre 150m e 350m. Conforme verificado nesta pesquisa, há uma significativa influência orográfica sobre o aeroporto quando os fluxos dos ventos estão no sentido de noroeste, norte ou nordeste.

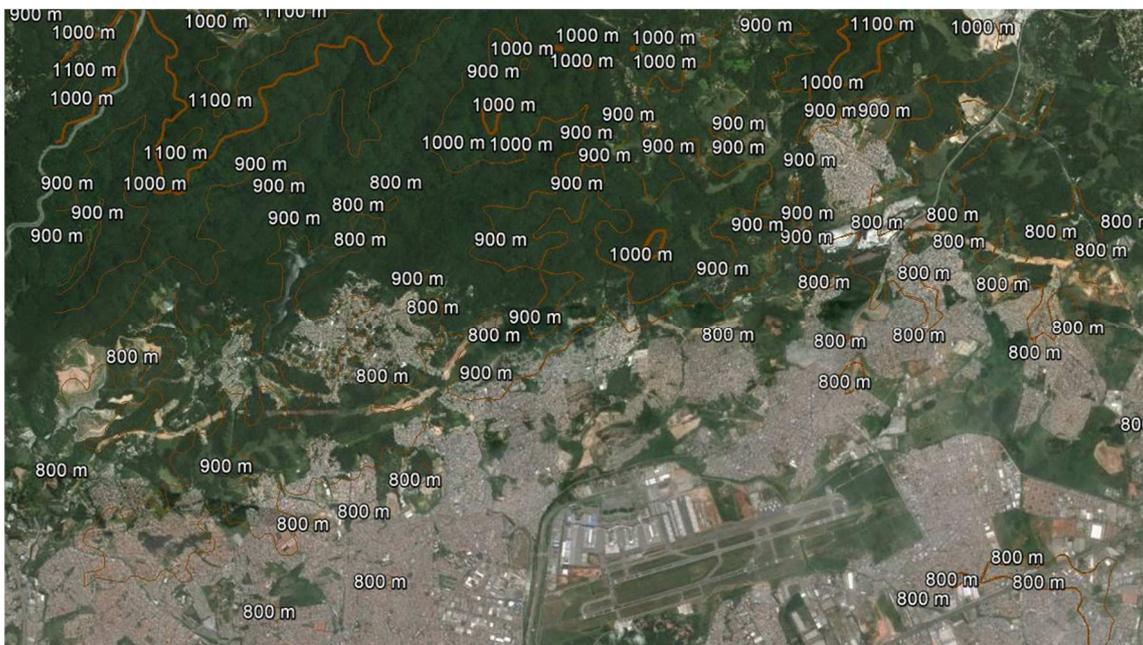


Figura 15: Curvas de nível, geradas pelo Global Mapper, do relevo em torno do aeroporto de Guarulhos.

Fonte: Google Maps e curvas SRTM retiradas no site da EMBRAPA.

Os fenômenos identificados foram discriminados em quatro (04) faixas de altura (Z), e após análise pode-se verificar que a faixa abaixo de 100m é detentora da predominância – maior que 90% se considerarmos a média de todos os dados - dos casos de WS, conforme a Tabela 3.

Tabela 3: Porcentagem de ocorrência de WS de acordo com cada faixa de altura e discriminada pelo ano de ocorrência.

Porcentagem de WS Identificada por Faixa de Altura				
Altura(Z)	$\leq 100m$	$100m < Z \leq 200m$	$200m < Z \leq 300m$	$300m < Z \leq 500m$
Ano 2012	89,83%	3,39%	0,00%	6,78%
Ano 2013	97,78%	0,00%	0,71%	1,51%
Ano 2014	90,13%	0,66%	0,66%	8,55%
Ano 2015	97,73%	2,27%	0,00%	0,00%

O Gráfico 9 mostra valores percentuais de WS, com base em sua intensidade do cisalhamento do vento. Esse fato é de vital importância, pois quanto mais próximo da superfície e maior a intensidade do fenômeno, menor será o tempo de reação para evitar o choque da aeronave com o solo.



Gráfico 9: Valores percentuais de WS, com base em sua intensidade e separados pelo ano de ocorrência no aeroporto de Guarulhos.

Observou-se ainda que alguns casos de WS perduravam por várias horas de forma contínua, sendo assim, criou-se uma tabela com o intuito de verificar a significância do fato. A

Tabela 4 mostra a relação do tempo de duração do cisalhamento do vento (WS) discriminado pela classificação da *Tabela 1*, ou seja, intensidade de *windshear*. Nota-se que a intensidade moderada do cisalhamento não perdura por mais de 30 minutos em mais de 60% dos casos, em situações de intensidade forte e severo, o tempo de duração é maior que três horas contínuas com 42% e 83% dos dados obtidos, respectivamente.

Tabela 4: Mostra o tempo médio de duração do cisalhamento do vento, em horas, associada a intensidade deste fenômenos em SBGR.

Tempo de Duração por Intensidade de WS no Aeroporto de Guarulhos (SBGR)						
Intensidade	Tempo	T≤0,5h	0,5<T≤1,0h	1,0h<T≤2h	2h<T≤3h	T>3h
		Moderado	<u>61%</u>	16%	15%	4%
	Forte	7%	11%	24%	16%	<u>42%</u>
	Severo	17%	0%	0%	0%	<u>83%</u>

3.3 Características das medições do SODAR

Antes da exposição dos conjuntos de casos estudados em função de sua severidade, cabe esclarecer algumas características específicas das medições com o SODAR, assim como sobre a forma gráfica com que os dados serão apresentados através do software APRun. Através da emissão de pulsos sonoros, o equipamento obtém um perfil vertical do vento horizontal e o software pode apresentar os dados de várias maneiras escolhidas pelo operador.

Uma vez que o fenômeno em questão é caracterizado pela variação vertical do vetor vento, o próprio APRun possui opções padrão para o display da intensidade e da direção de WS, sendo estes os gráficos a serem apresentados e explorados a seguir. Desta maneira, julga-se oportuno apresentar um caso particular detectado nas análises para destacar as feições de interesse das medições do perfil do vento, de modo a facilitar o entendimento dos casos estudados.

Um importante fator observado e que pode auxiliar no prognóstico de WS é um comportamento padrão para ocorrências que duram um intervalo de tempo maior que 30 minutos, como exemplificado no evento do dia 12 de setembro de 2013. As séries temporais da direção da WS entre 05 e 17UTC (*Figura 16*), da intensidade de WS entre 06 e 12UTC (*Figura 17*) e do perfil

medido do vento entre 00 e 12UTC (*Figura 18*) apresentam um dos casos analisados. Ao observar a direção da WS no software APRun (*Figura 17*), verifica-se uma faixa com direção norte-noroeste (NNW) e adjacente a esta faixa, o vetor direção da WS varia para leste-sudeste (ESE) ou leste-nordeste (ENE). A linha inferior desta faixa normalmente ocorre entre 100m e 200m e a parte superior, entre 300 e 400m, conforme o exemplo da Gráfico 9. Ademais, há mais fatores a serem verificados para ajudar na detecção e prognóstico de WS. Se há esta faixa central, o previsor pode analisar outros fatores como a direção do vetor vento horizontal pelo perfil vertical. Conforme a *Figura 18*, o vento varia de ESE (superfície) a NE (camadas mais elevadas), essa variação é gradativa e a velocidade do vento acima de 100m de altura, onde já se observa uma componente direcional de NE, é maior que $6,7\text{m.s}^{-1}$ (13kt).

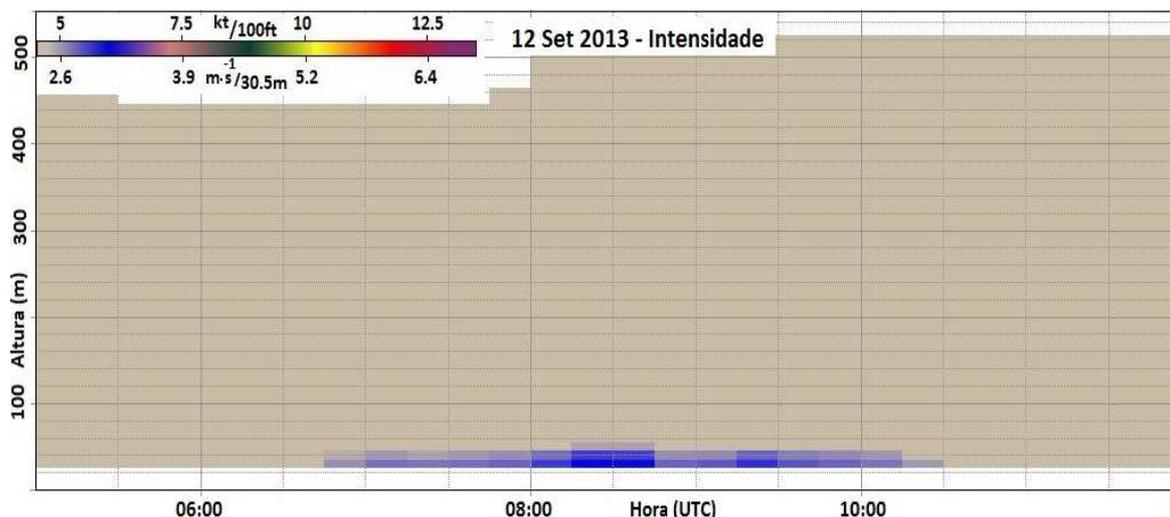


Figura 16: Tempo de duração das 07:00h às 10:15h e intensidade de WS, na faixa de moderada conforme os dados cujo maior índice foi às 08:45h a 30m com variação de $3,02 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}/30\text{m}$.

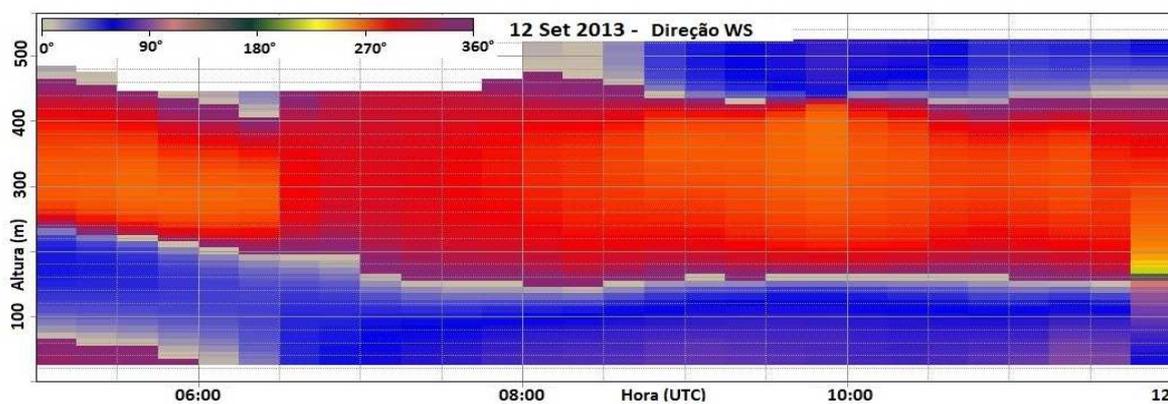


Figura 17: Variação da direção da WS mostra a faixa central no setor WNW (entre 270° e 300°) variando, acima e abaixo, para uma componente aproximadamente N e em verde, a medida que se distancia da faixa central, a direção muda para NE.

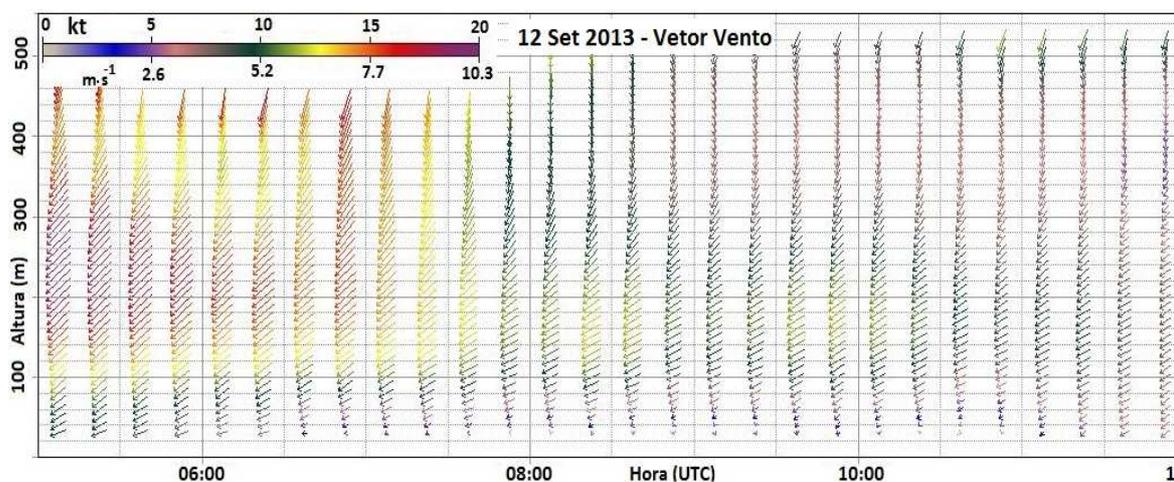


Figura 18: A figura mostra o perfil vertical do vento horizontal. Verifica-se vento NE entre 10kt e 15kt com componente direcional NE entre 100 m e 150 m. Às 07 UTC é detectado o fenômeno de WS, conforme Figura 16.

As informações de METAR durante todo o dia 12 de setembro de 2013 não apresentam WS, ou seja, não houve informe deste fenômeno por aeronaves em procedimento de pouso/decolagem; por consequência, não há registro no SISCOMET, ou seja, não aparece nas estatísticas. O vento máximo horizontal em superfície não ultrapassou 8kt (4,12 m.s-1).

O primeiro nível com informações do SODAR está a 30 m do solo (ou seja, 98,42ft), enquanto o vento de superfície do METAR é aferido na altura de 10m; portanto, há uma faixa entre 10m e 30m sem informações. No entanto, é clara a presença do fenômeno, com intensidade moderada, entre 0700UTC e 1015UTC.

As informações do perfil vertical para o horário próximo à ocorrência do evento do dia 12 de setembro de 2013 indicam uma clara mudança da direção da “winshear” em três faixas: da superfície até aproximadamente 150m acima do solo é de NE, muda pra NW no centro (entre 150m e 400m) e novamente volta para NE acima (Figura 19 a). Além disso, observa-se um pico do vento próximo a 200m de altura, similar a um jato (Figura 19Figura 19 b).

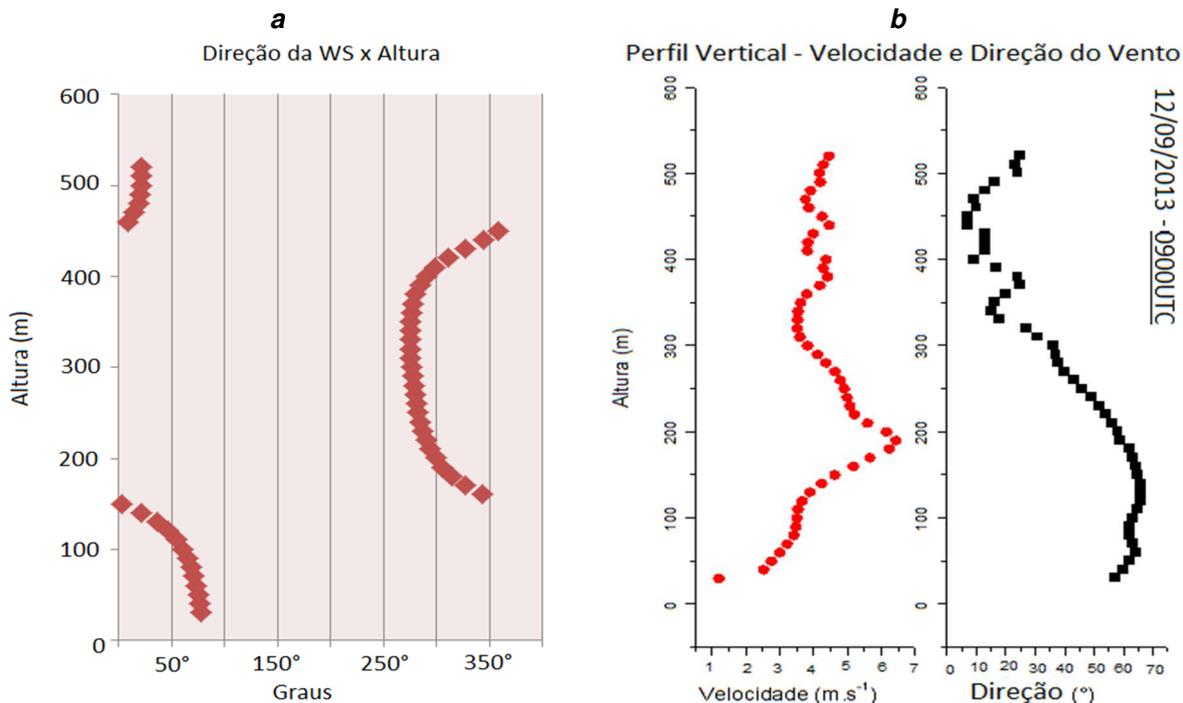


Figura 19: (A): Direção da WS do dia 12.09.2013 às 08:45UTC. (B): Perfil vertical de intensidade e direção do vento horizontal do dia 12.09.2013 às 09:00UTC.

Considerando a extensiva análise dos registros coletados por este equipamento entre Julho de 2012 e Março de 2015, os casos de windshear foram classificados de acordo com sua severidade e colecionados em subgrupos de maneira conjunta com outras informações meteorológicas relevantes para a interpretação individual e conjunta dos casos. Nos subcapítulos seguintes encontram-se apresentados os grupos de casos de maneira tentativamente padronizada com imagens de satélite e de radar (quando disponíveis), sendo cada caso brevemente descrito e comentado.

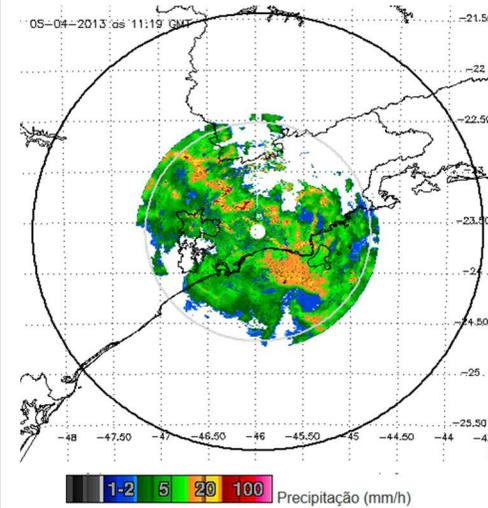
3.4 Casos observados de cisalhamento do vento

Conforme explicado anteriormente, os casos foram subdivididos em função da medição da intensidade do cisalhamento do vento realizada pelo SODAR e considerando os valores apresentados na Tabela 1. Cabe frisar novamente que a subdivisão “leve” não foi considerada nas análises pelo fato de não ter havido informe de WS leve por parte dos pilotos extraídas do SISCOMET, característica esta que deve estar relacionada ao costume dos pilotos com baixos níveis de turbulência e que certamente representa um risco menor de acidente. Assim sendo, as subdivisões adotadas foram severo, forte e moderado, as quais ocorrem respectivamente em porcentagens inferiores a 2% dos casos, entre 6 e 12% e entre 86 e 92% (Gráfico 9).

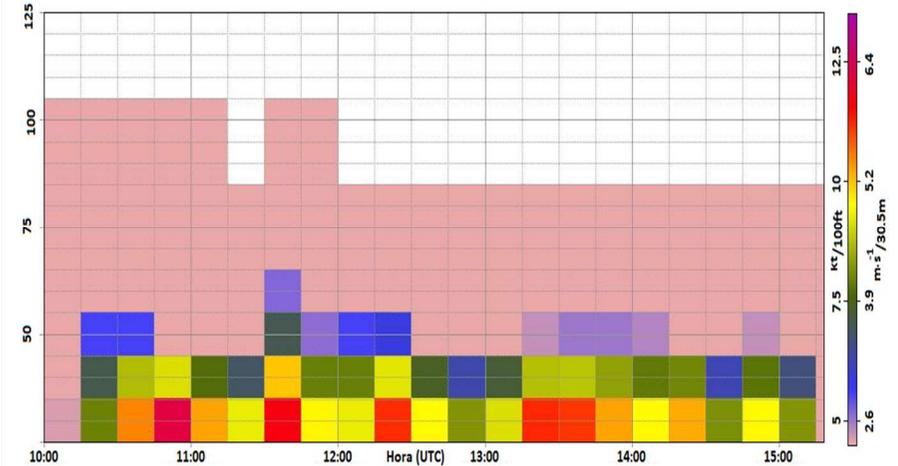
A coleção de situações é extensa e pode se tornar bastante cansativa uma vez que as mesmas informações são utilizadas para a interpretação de cada caso. Desta forma, optou-se por padronizar a apresentação dos casos de maneira agrupada (severos, fortes e moderados) e em ordem cronológica de ocorrência por categoria. Deste ponto em diante, cada caso em cada subdivisão ocupa uma página, encontrando-se organizado sempre com as correspondentes imagens de satélite e radar (quando disponíveis), além das imprescindíveis observações do SODAR e de um pequeno texto comentando a situação em particular. Cada imagem possui suas informações individuais, assim como as medições do SODAR. Por uma questão de facilidade e de clareza, as figuras de cada caso não serão individualmente numeradas, sendo os mesmos referidos por sua severidade e data de ocorrência, quando for o caso, na sessão de Discussões e Conclusões. Todos os casos de severos

estão apresentados, dada a quantidade restrita destas situações. Por sua vez, os casos de intensidade forte do ano de 2013 foram inseridos em sua totalidade, porém de intensidade moderada totalizam um número elevado que inviabiliza a apresentação de todos; desta forma, nestas categorias os casos foram selecionados de acordo com os meses do ano de 2013, acervo mais completo e contínuo, e/ou por suas especificidades.

WS SEVERO - 05 Abr 2013

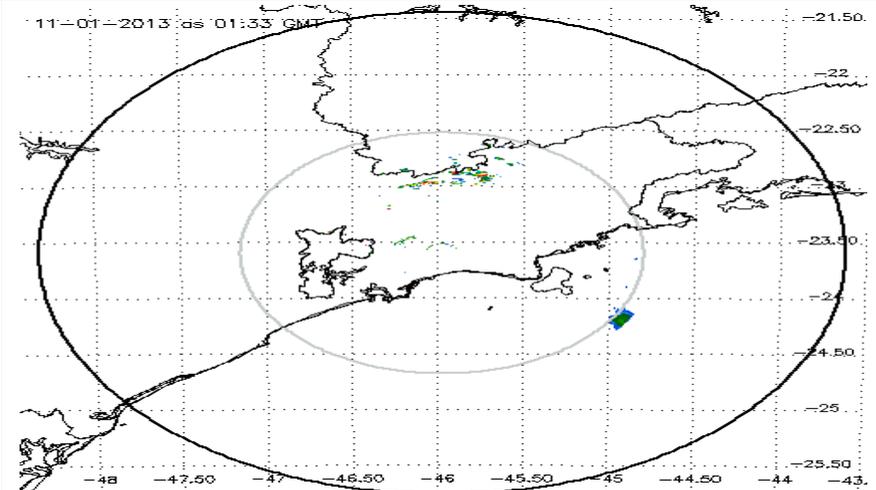


WS do dia 05 Abr 2013 - INTENSIDADE

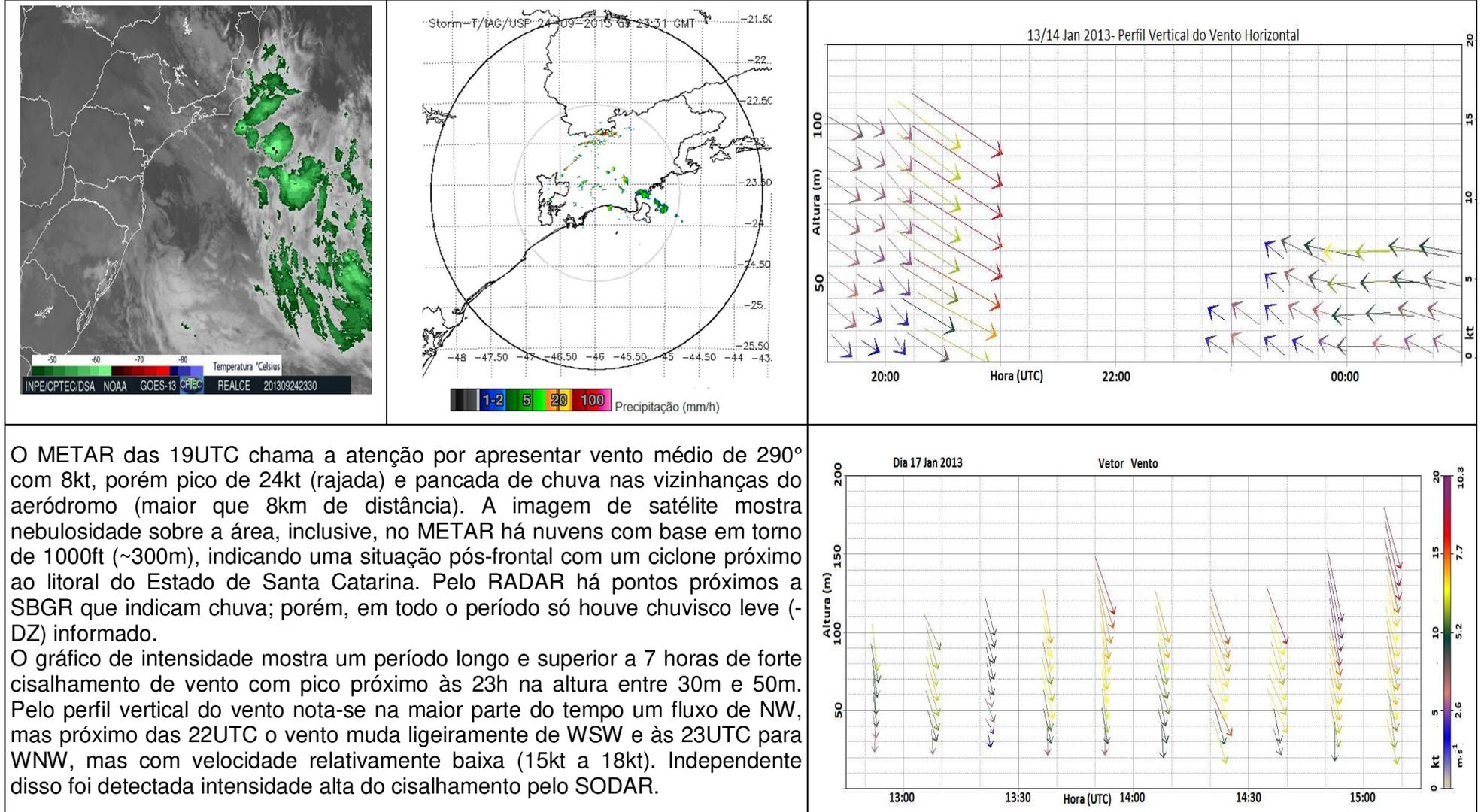


A imagem de satélite mostra sistema frontal sobre o estado de São Paulo e a imagem de RADAR mostra chuva no horário do fenômeno. O METAR informa chuva leve no período em questão e foi informado WS na R27L às 14UTC e 15UTC. Vento em superfície em torno de 10kt, predominante entre WNW a NW com rajada de 25kt às 15UTC.

A intensidade da WS mostra aproximadamente 5 horas de duração do fenômeno abaixo de 100m de altura e o perfil vertical do vento horizontal mostra a direção do vento de NW com mudança sensível de N à medida que atinge níveis mais próximos ao solo, ou seja, um sensível giro no sentido horário ao aproximar-se da superfície.



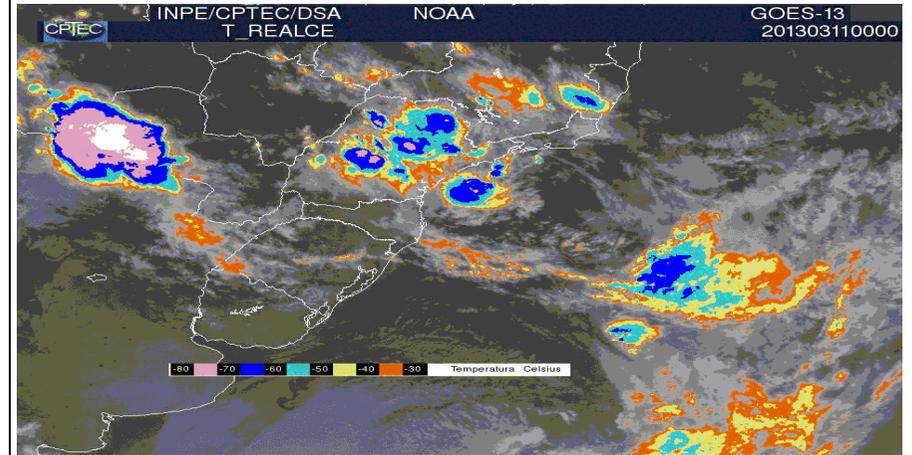
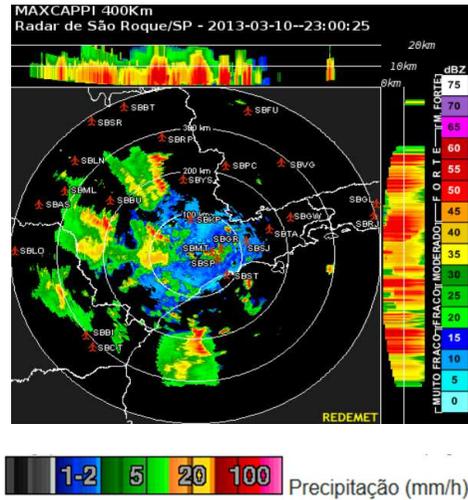
WS SEVERO - 24-25 Set 2013



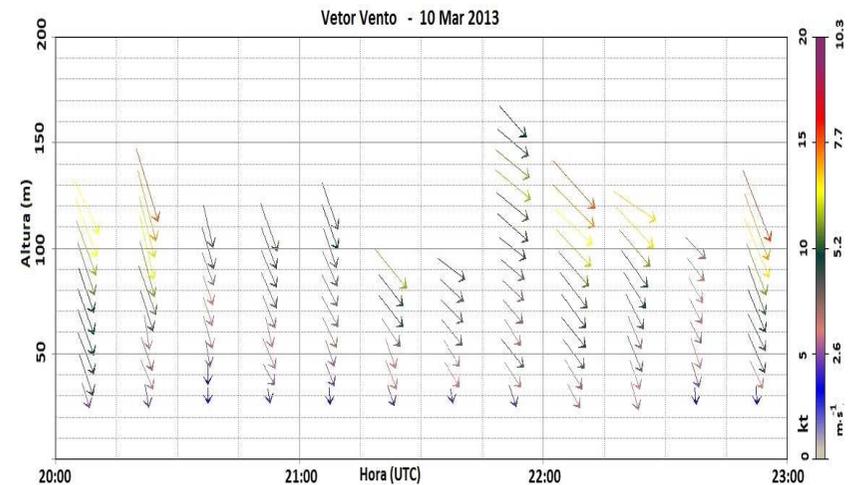
O METAR das 19UTC chama a atenção por apresentar vento médio de 290° com 8kt, porém pico de 24kt (rajada) e pancada de chuva nas vizinhanças do aeródromo (maior que 8km de distância). A imagem de satélite mostra nebulosidade sobre a área, inclusive, no METAR há nuvens com base em torno de 1000ft (~300m), indicando uma situação pós-frontal com um ciclone próximo ao litoral do Estado de Santa Catarina. Pelo RADAR há pontos próximos a SBGR que indicam chuva; porém, em todo o período só houve chuvisco leve (-DZ) informado.

O gráfico de intensidade mostra um período longo e superior a 7 horas de forte cisalhamento de vento com pico próximo às 23h na altura entre 30m e 50m. Pelo perfil vertical do vento nota-se na maior parte do tempo um fluxo de NW, mas próximo das 22UTC o vento muda ligeiramente de WSW e às 23UTC para WNW, mas com velocidade relativamente baixa (15kt a 18kt). Independente disso foi detectada intensidade alta do cisalhamento pelo SODAR.

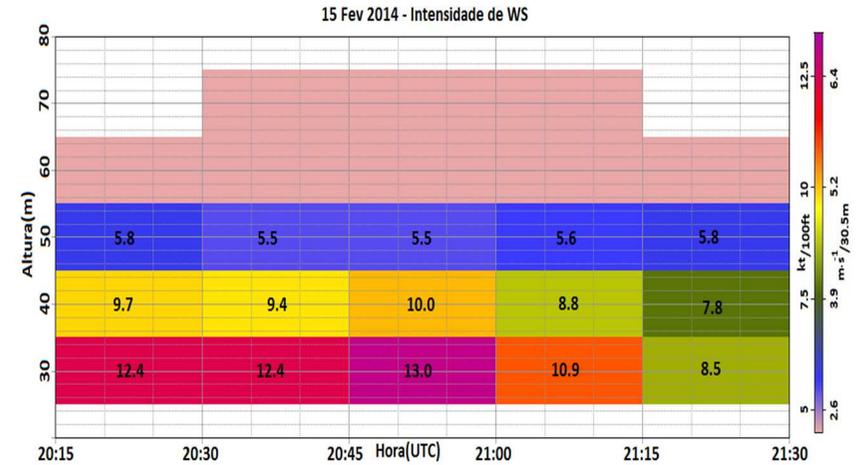
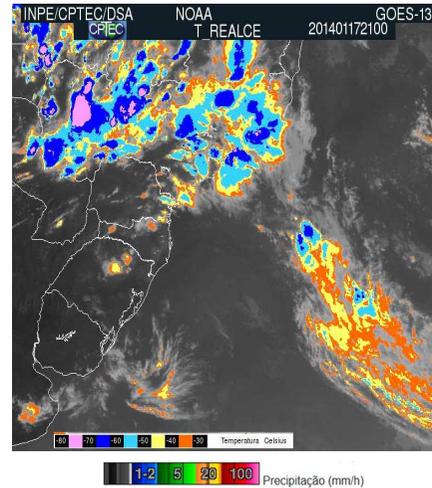
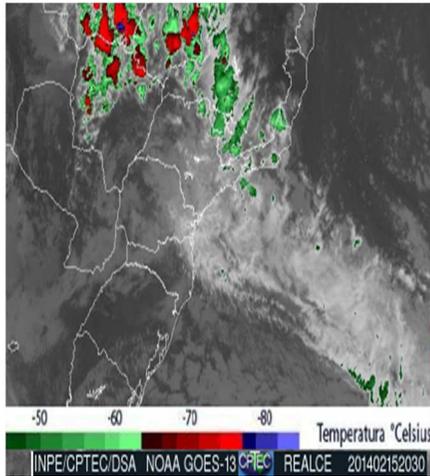
WS SEVERO - 04-05 Out 2013



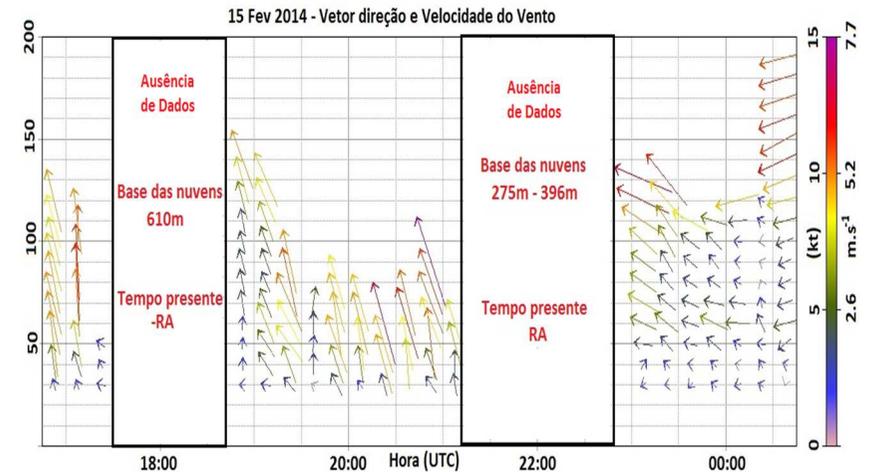
METAR informa ventos em torno de 09kt, todos de NW, base de nuvens entre 1900ft (~500m). A imagem de Satélite mostra uma situação de bastante nebulosidade com o Estado de São Paulo sob um sistema frontal. O RADAR não mostra nenhuma atividade de precipitação no horário próximo do período de maior intensidade, entre 22UTC e 23UTC, onde a intensidade chega a 12,8 kt/100ft. A espessura do fenômeno é predominante até 50m, mas há pontos que chegam a alturas superiores. Pelo perfil do vento, todos são de componente NW com um sensível giro horário ao se aproximar da superfície.



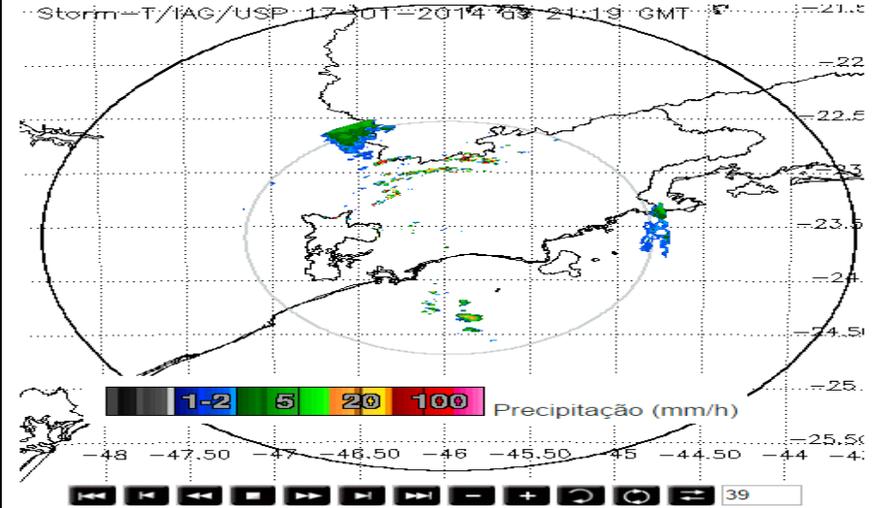
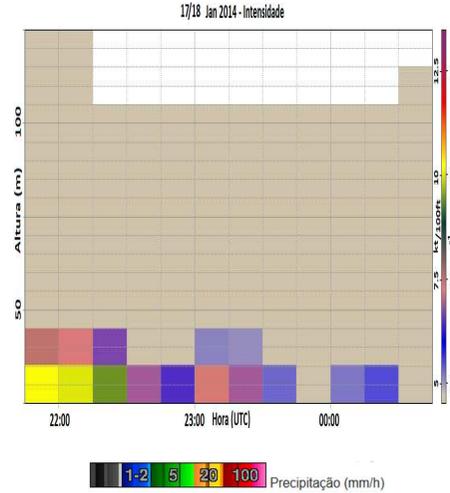
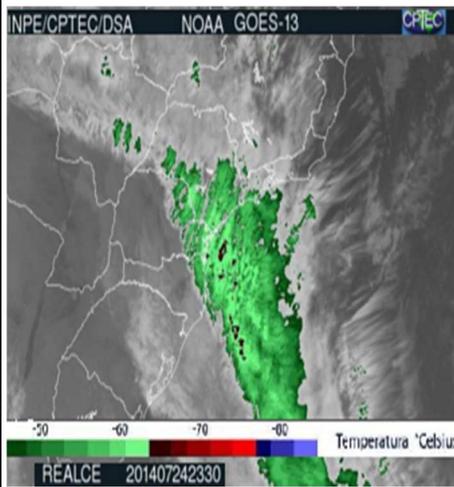
WS SEVERO - 15 Feb 2014



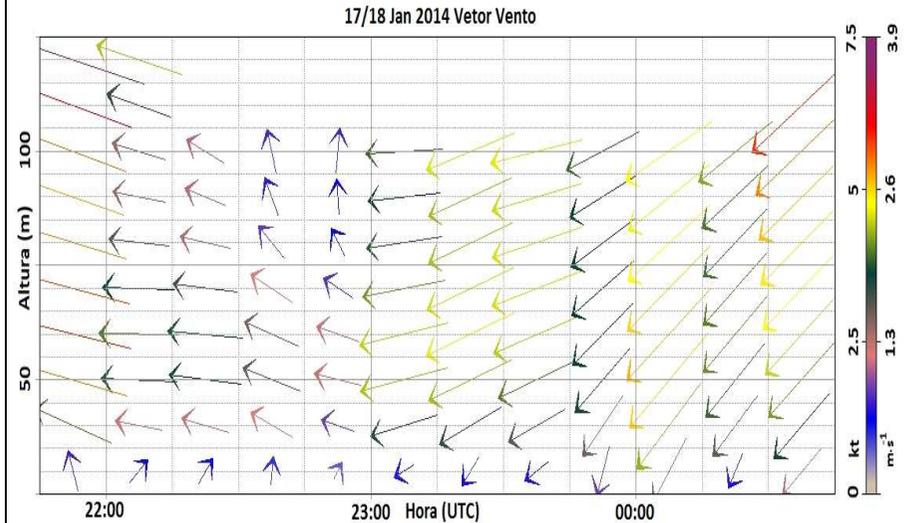
METAR mostra vento relativamente fraco em torno de 4kt, apenas chuva leve e base das nuvens próxima a 1000ft (~300m). A imagem de satélite mostra uma situação frontal e o RADAR mostra área de precipitação nas proximidades, mas nada de forma intensa sobre o aeródromo. A intensidade no período variou entre moderada e forte na faixa entre 30m e 50m de altura. Os ventos do METAR são predominantes de S a SE bem como na maior parte do perfil vertical, porém enquanto em superfície há vento pouco intenso, nos níveis acima o vento chega a 15kt. Diferente do vento de NW, este não sofre influência da Serra da Cantareira. O perfil de vento mostra dois períodos em que houve queda de sinal, possivelmente por causa de nebulosidade baixa e chuva.



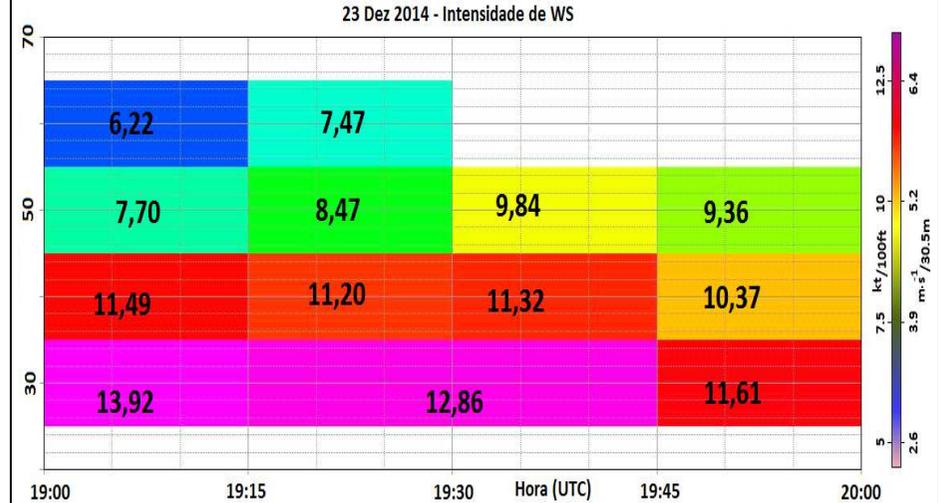
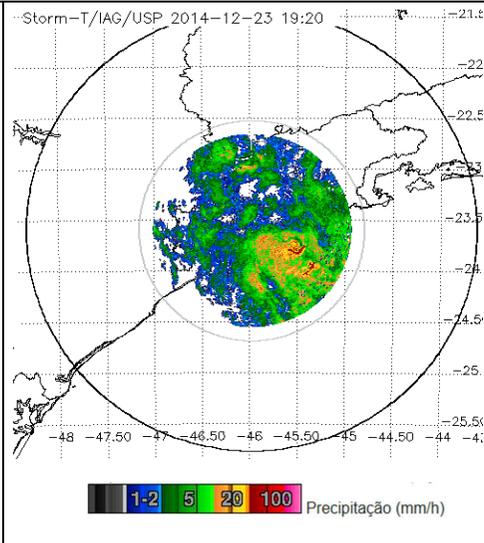
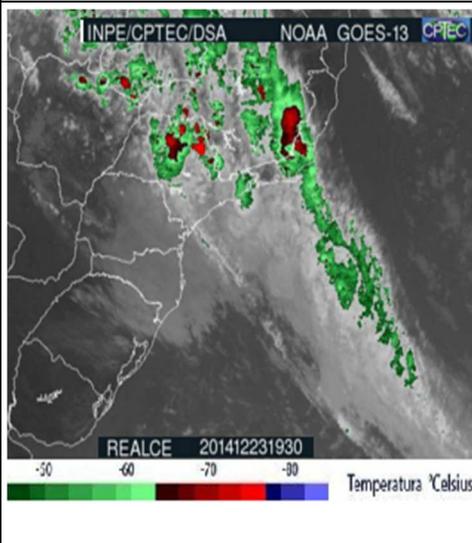
WS SEVERO - 24-25 Jul 2014



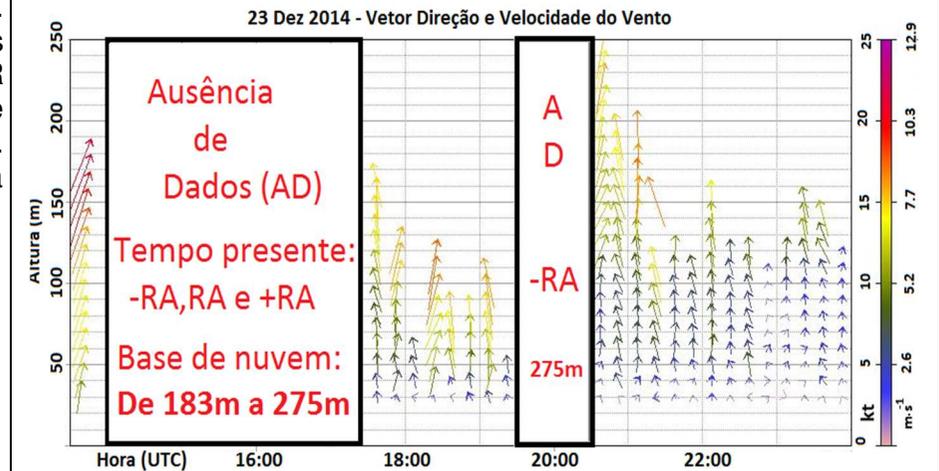
METAR reportou WS das 20UTC do dia 24 às 02UTC do dia 25. Pela imagem de satélite, há uma situação frontal que se aproxima e informações de METAR/RADAR registram chuva leve na região. Pelo gráfico de intensidade, o fenômeno também perdura por várias horas e com perfil de vento de NW (entre 15 e 30kt em sua maioria) com um ligeiro giro horário em direção à superfície.



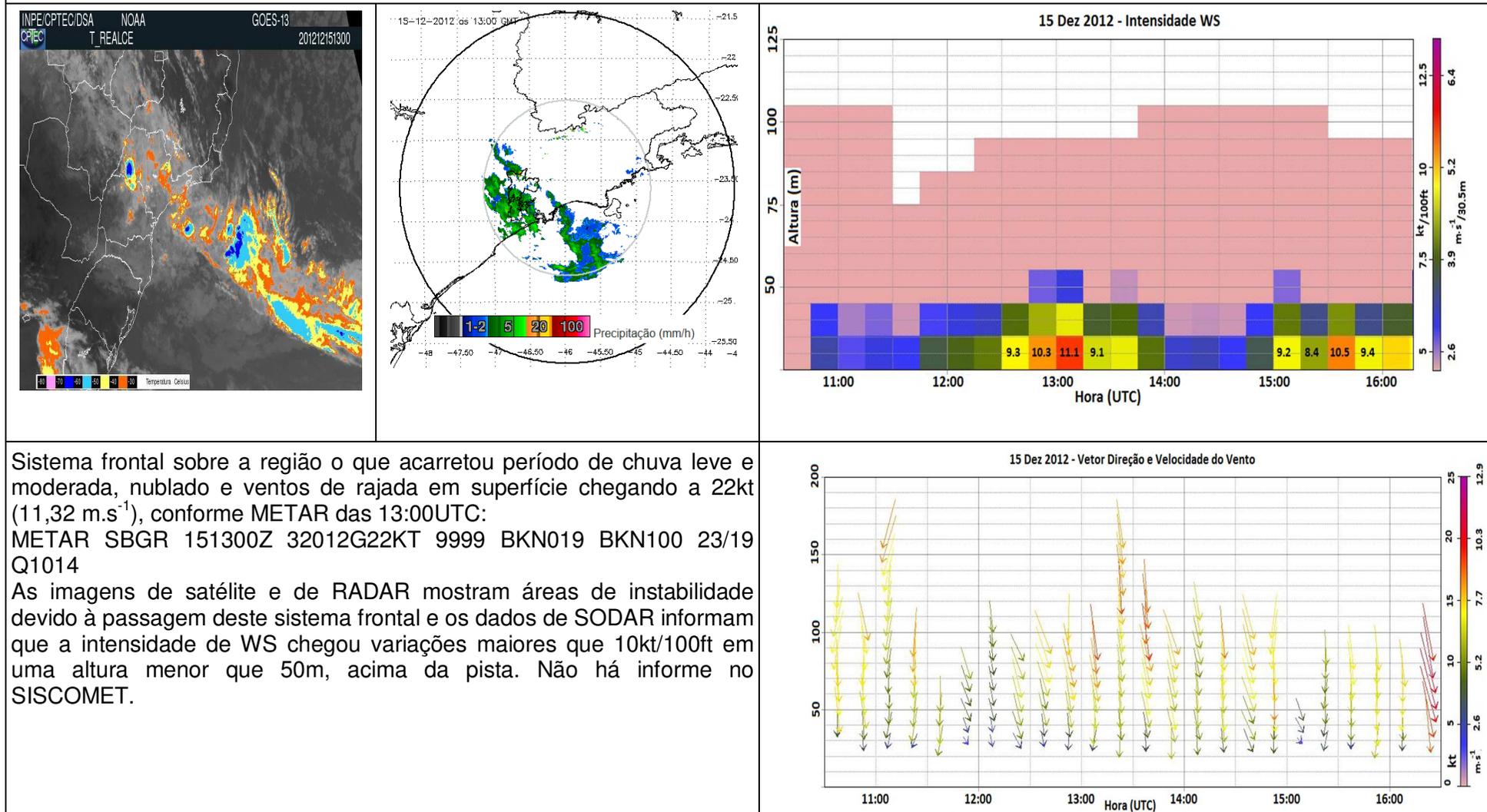
WS SEVERO - 23 Dez 2014



METAR mostra céu encoberto (8/8) entre 600ft (183m) e 900ft (275m). Variações de chuva leve (-RA), moderada (RA) e forte (+RA) nos horários das perdas de sinal. Satélite mostra típica situação frontal e o RADAR mostra chuva sobre a região. Os ventos de componente S e a intensidade de WS na faixa entre 30m e 70m variando de 6kt/100ft a quase 13kt/100ft. Interessante citar que não houve informe WS no METAR mesmo com esta situação, ou seja, nenhuma aeronave reportou tal fenômeno.



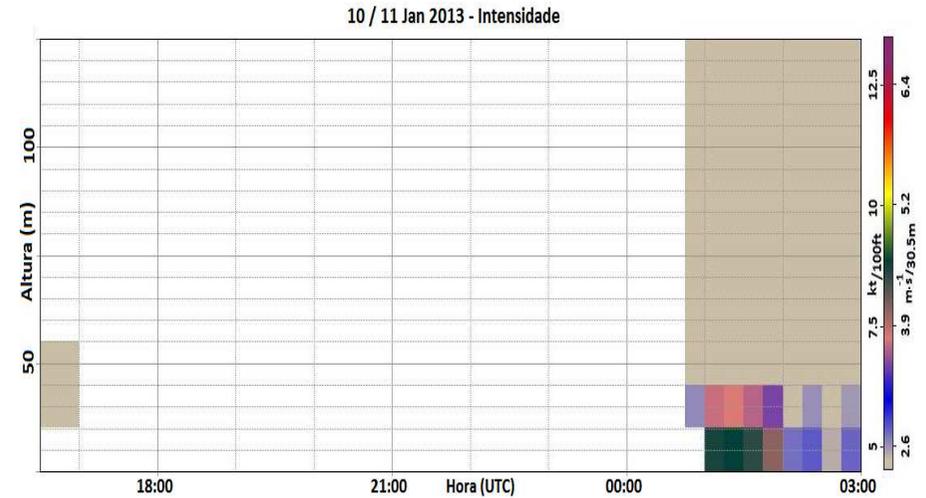
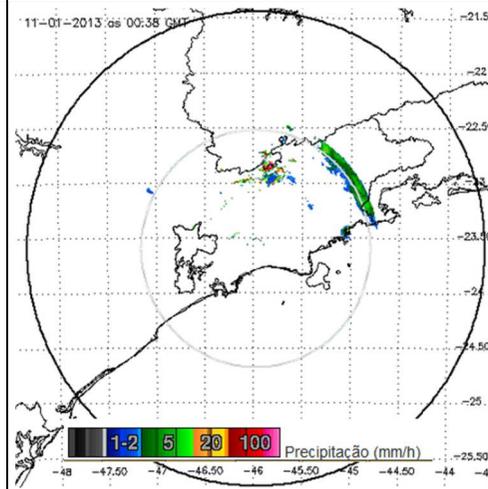
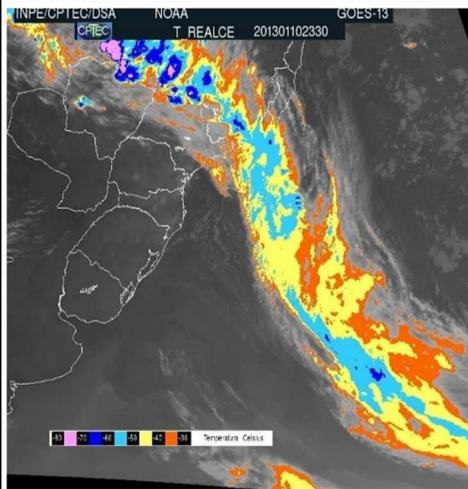
WS FORTE - 15 Dez 2012



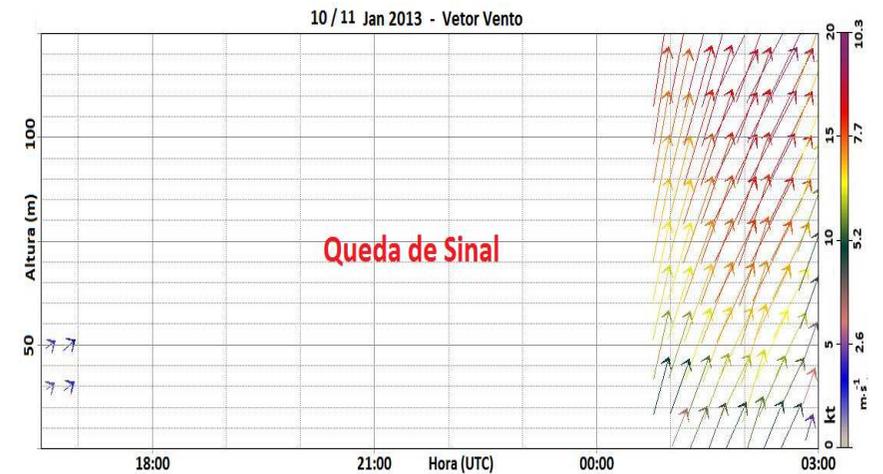
Sistema frontal sobre a região o que acarretou período de chuva leve e moderada, nublado e ventos de rajada em superfície chegando a 22kt ($11,32 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), conforme METAR das 13:00UTC:
 METAR SBGR 151300Z 32012G22KT 9999 BKN019 BKN100 23/19 Q1014

As imagens de satélite e de RADAR mostram áreas de instabilidade devido à passagem deste sistema frontal e os dados de SODAR informam que a intensidade de WS chegou variações maiores que 10kt/100ft em uma altura menor que 50m, acima da pista. Não há informe no SISCOMET.

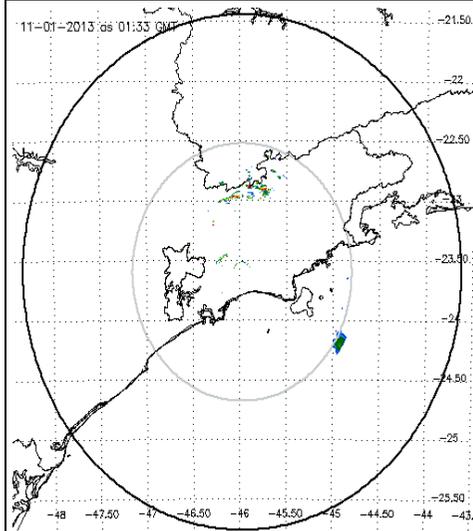
WS FORTE - 11 Jan 2013



METAR mostra ventos de componente sul e velocidade entre 3kt e 9kt, com base de nuvens em torno de 1500ft. Há uma falha de sinal entre 18UTC e 00UTC e houve chuva registrada no período da falha bem como vento de rajada às 18UTC de 22kt ($11,3 \text{ m.s}^{-1}$). O gráfico de intensidade mostra que a WS não ultrapassa a altura de 50m. É clara uma situação de influência de um sistema frontal e o RADAR não mostra atividade intensa no horário em que o cisalhamento é detectado após a volta dos dados. Não há informe no SISCOMET.

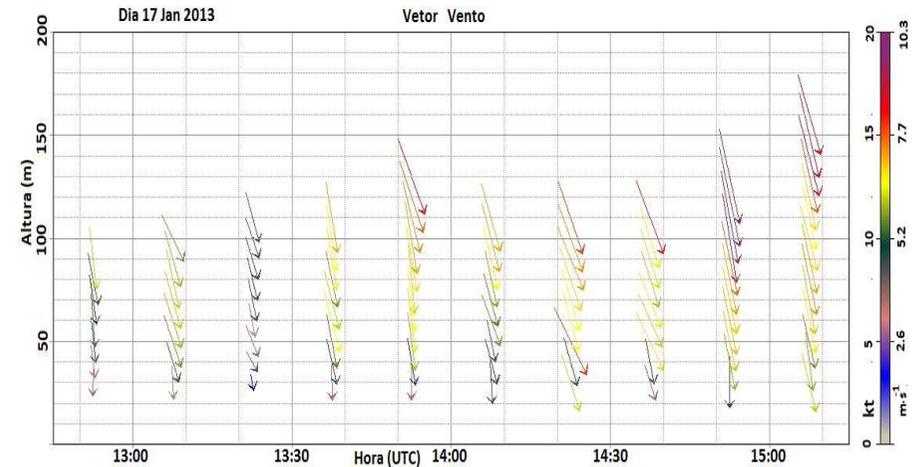
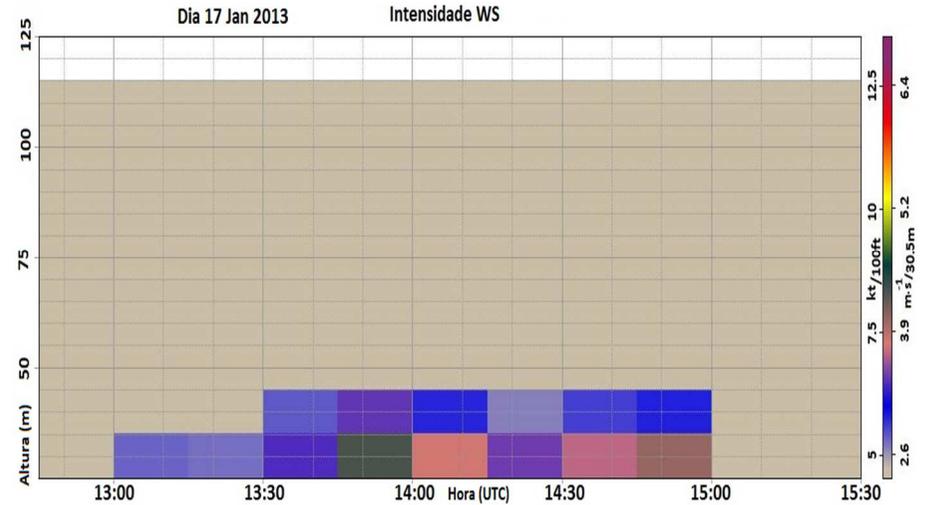


WS FORTE - 17 Jan 2013

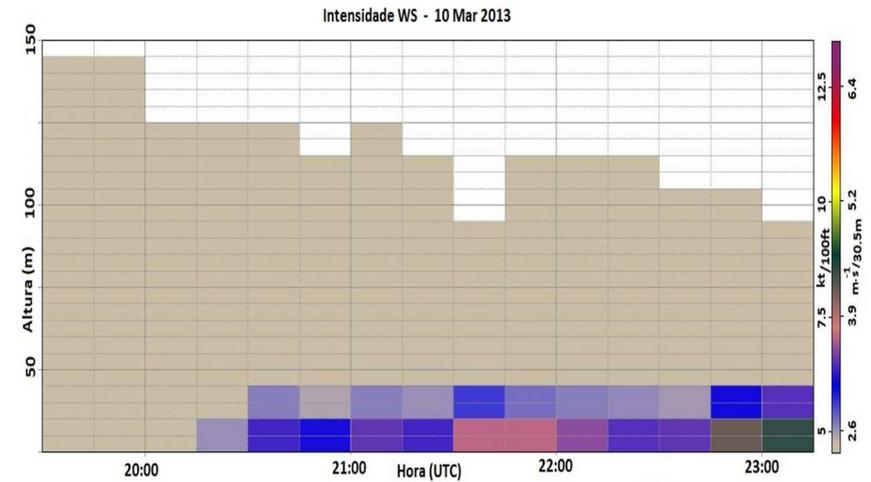
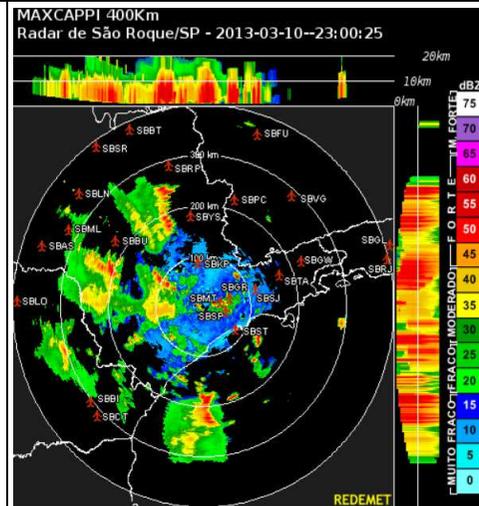


RADAR: Não há refletividade.

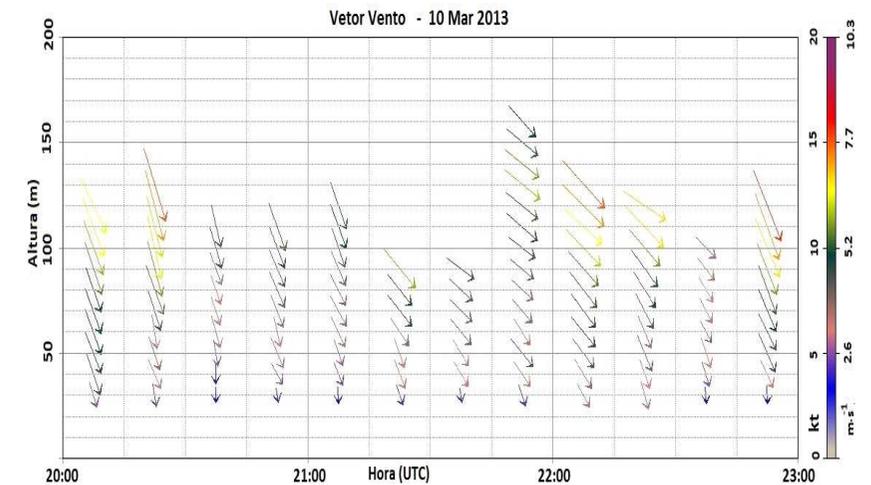
METAR mostra vento com predomínio entre WNW e NW e velocidade em torno de 10kt (5.2 m.s^{-1}), rajada de 22kt às 14UTC e nebulosidade de 3000ft (~900m). Não houve precipitação registrada bem como o RADAR não mostra refletividade no horário. Na imagem de satélite percebe-se nebulosidade sobre a região e uma corrente de jato no sul do país. O perfil vertical do vento horizontal mostra ventos de NW em altitude com sensível giro horário para no sentido da superfície com direção N. Na faixa entre 50m e 100m há um fluxo com velocidades entre 10 e 15kt enquanto acima desta faixa, entre 15kt e 20kt. No gráfico de intensidade não há WS acima de 50m e sua duração é de 2 horas. Houve 2 reportes no SISCOMET próximos ao horário.



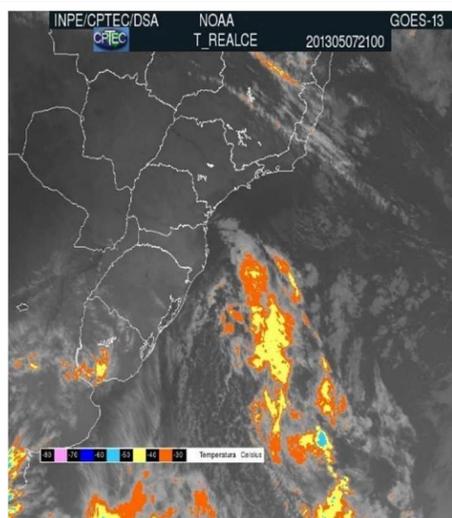
WS FORTE - 10 Mar 2013



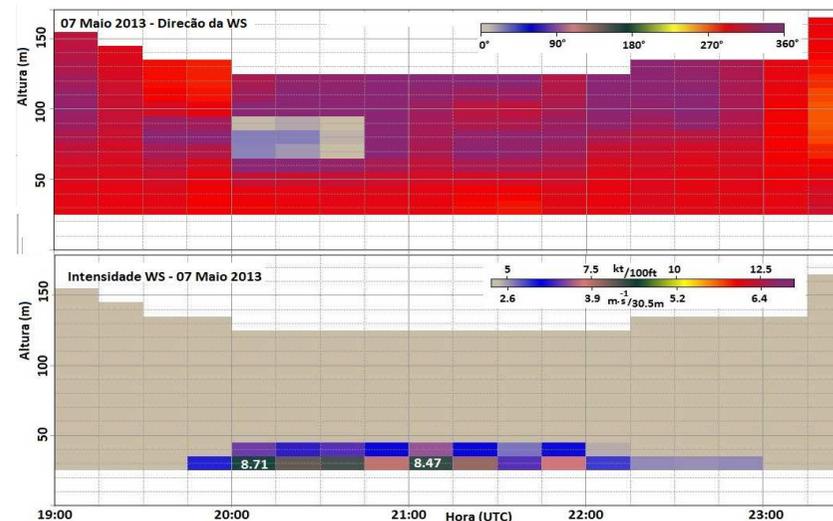
As imagens de satélite e RADAR mostram intensa atividade convectiva / precipitação. De acordo com o METAR, trovoada com chuva moderada (TSRA) e rajada de 28kt às 18UTC, pouco antes da WS. No período das 20UTC às 22UTC não houve precipitação nem trovoada sobre SBGR, apenas às 23UTC havia trovoada com chuva leve (-TSRA). A base das nuvens estava entre 2000ft (~600 m) e 4000ft (~1200 m). Vento em superfície de WNW a NW. O perfil vertical do vento descreve a componente de NW em altitude com mudança gradativa até a base dos dados (30 m) em componente NNW a N. O forte cisalhamento ficou restrito à faixa entre 30 m e 50 m e perdurou por quase 3 horas. Não houve informe no SISCOMET.



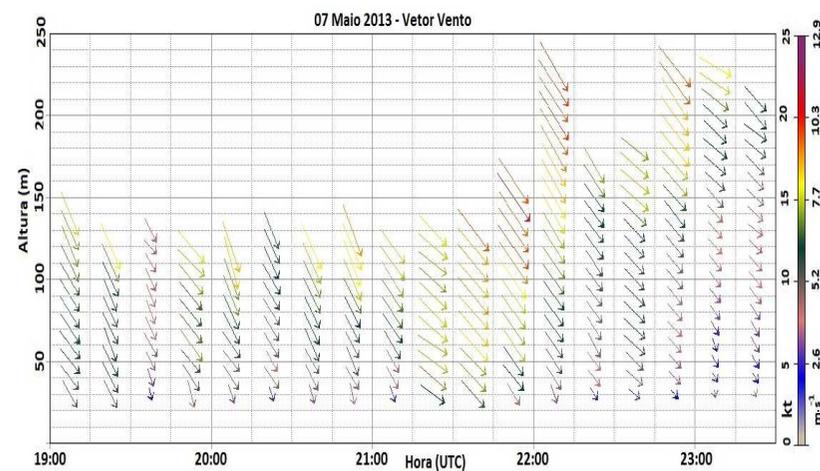
WS FORTE - 07 Mai 2013



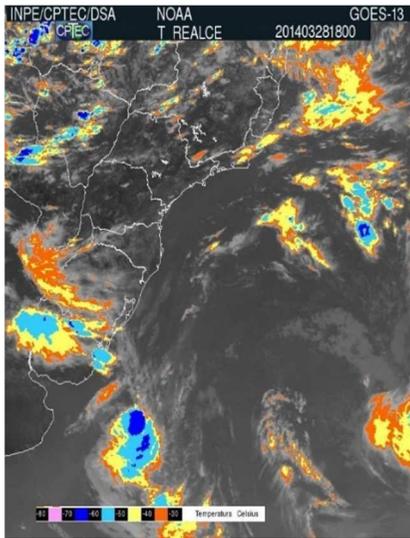
RADAR: Não há refletividade.



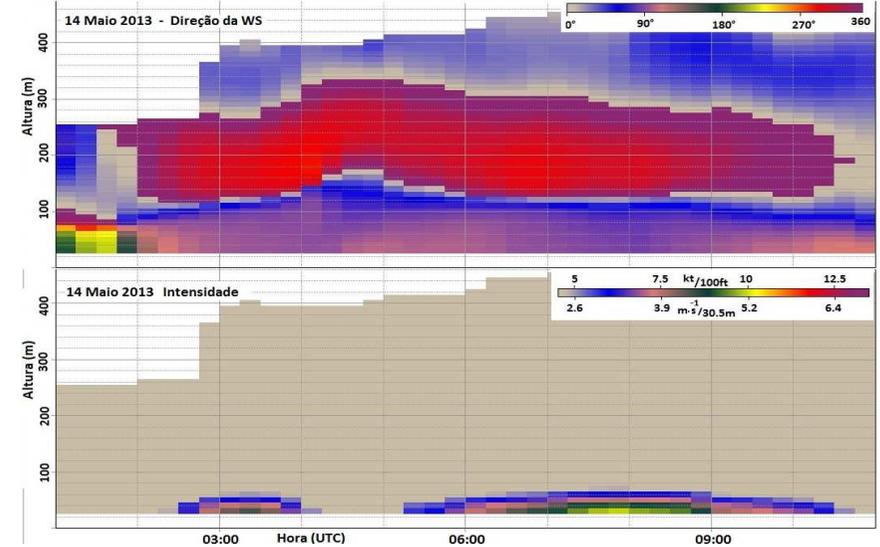
A imagem de satélite não mostra nebulosidade com precipitação sobre a região de São Paulo, assim com não há refletividade no RADAR nem informe de precipitação pelo METAR do dia 7 de maio de 2013. Ventos em superfície variaram entre WNW e NW durante o período e a velocidade não ultrapassou 8kt ($4,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Típico nestes casos em que não há sistema sobre a região e ocorre WS (normalmente moderada ou forte), é comum verificar na direção do cisalhamento uma faixa característica de N a NNE que se destaca para o previsor ou observador meteorológico e serve de alerta para previsão do fenômeno. Não está em destaque, porém às 18UTC esta faixa ocorre em maior espessura e normalmente desencadeia entre 1h e 2h após seu aparecimento. Não há registro no SISCOMET.



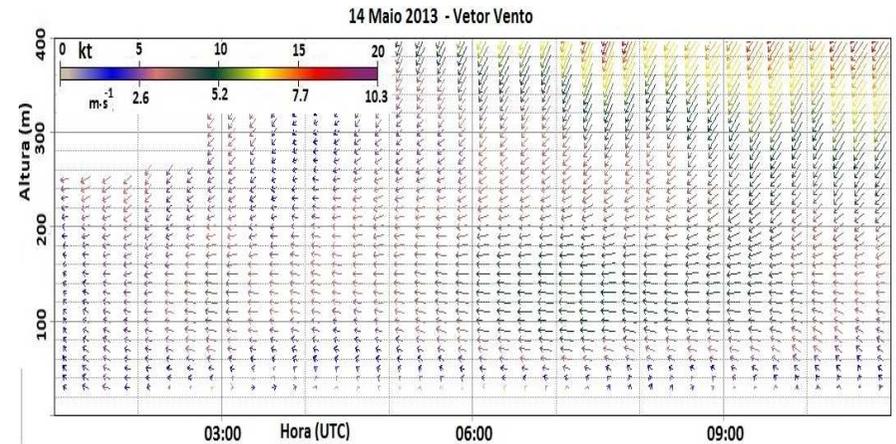
WS FORTE - 14 Mai 2013



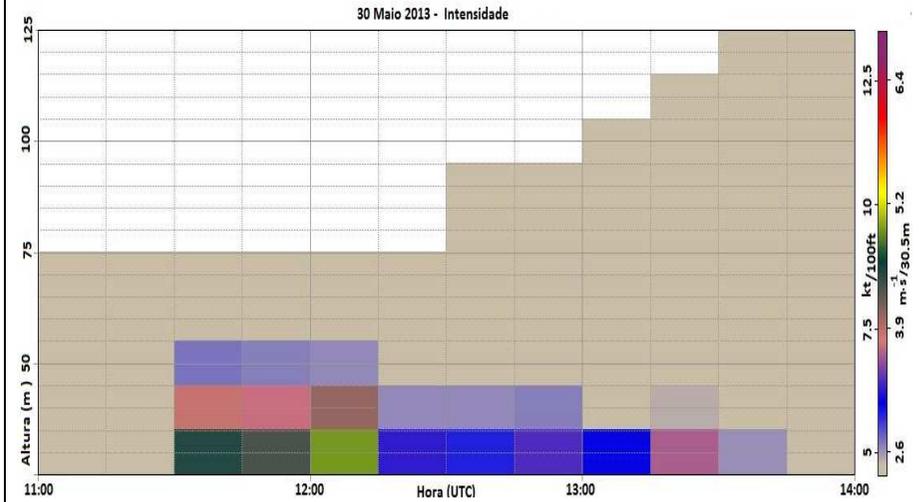
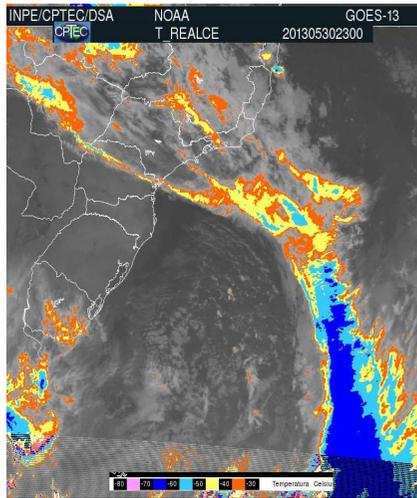
RADAR: Não há refletividade.



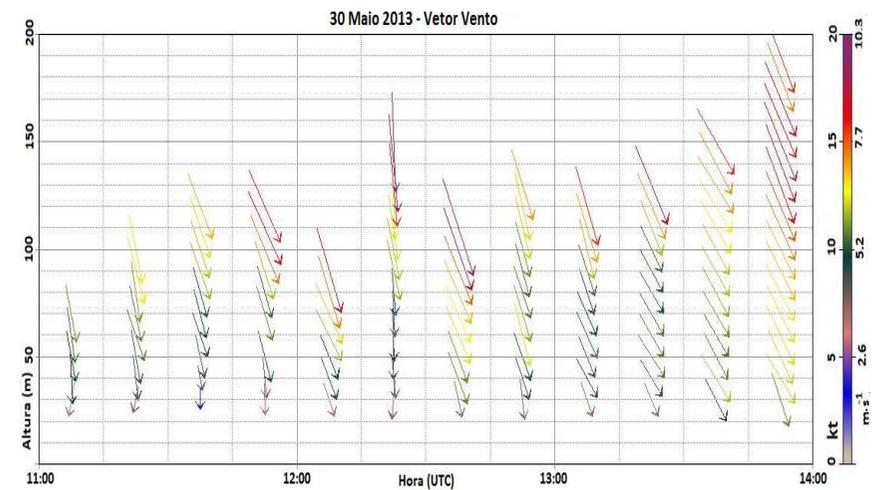
Pelo METAR, ventos de NE que não ultrapassam 7kt e não há registro de nuvens abaixo de 1500m, possível ausência de nebulosidade e de precipitação. Não há refletividade no RADAR. O perfil vertical do vento informa intensidades inferiores a 13kt ($6,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) abaixo de 300 m, maior elevação da Serra da Cantareira. Destaca-se a faixa de ventos entre 100m e 200m com velocidade próxima a 10kt, altura na qual é verificada a WS forte. Há também o giro dos ventos, típico no sentido horário em direção à superfície. Em complemento, na direção da WS é nítida uma faixa de N a NNW entre 100m e 300m que normalmente caracteriza WS abaixo de 100m quando ela se torna bem definida, conforme a imagem. Não há registro de WS no SISCOMET.



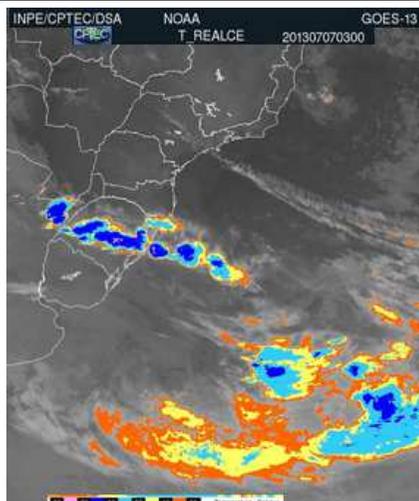
WS FORTE - 30 Mai 2013



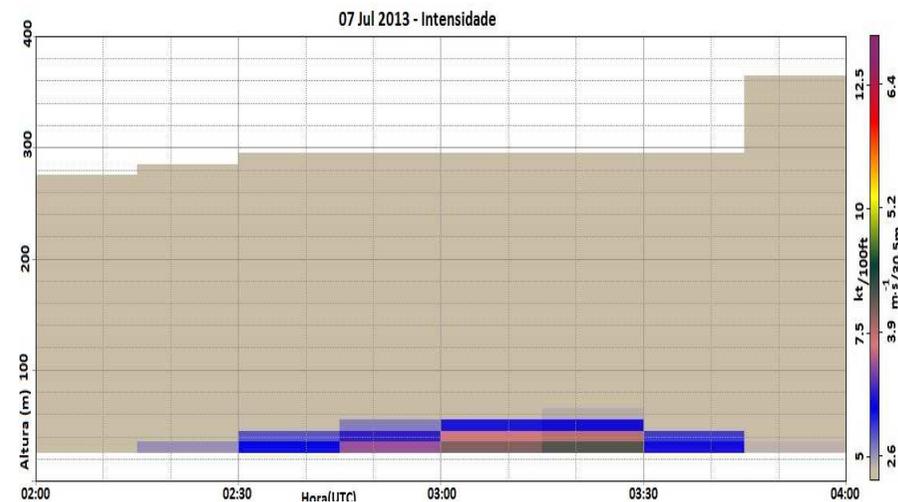
A imagem de satélite caracteriza um sistema frontal sobre o estado de São Paulo. No METAR, nuvens acima de 2000ft (~600m), ausência de precipitação e vento de NW em torno de 10kt (5.2 m.s⁻¹). O fenômeno não ultrapassou a altura de 60m e houve uma diminuição gradativa no perfil vertical do vento à medida que a altura diminui, além de um discreto giro horário. Houve quatro (04) informes no SISCOJET entre 8UTC e 12UTC.



WS FORTE - 07 Jul 2013

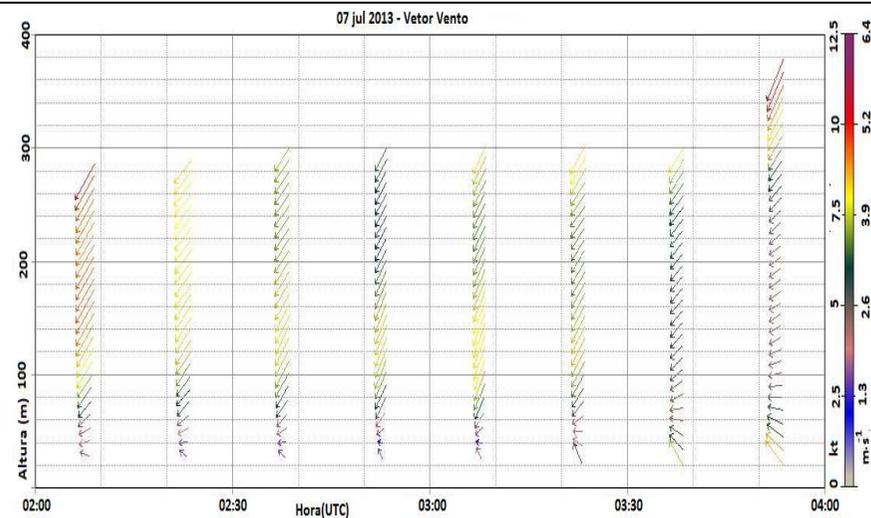


RADAR: Não há refletividade

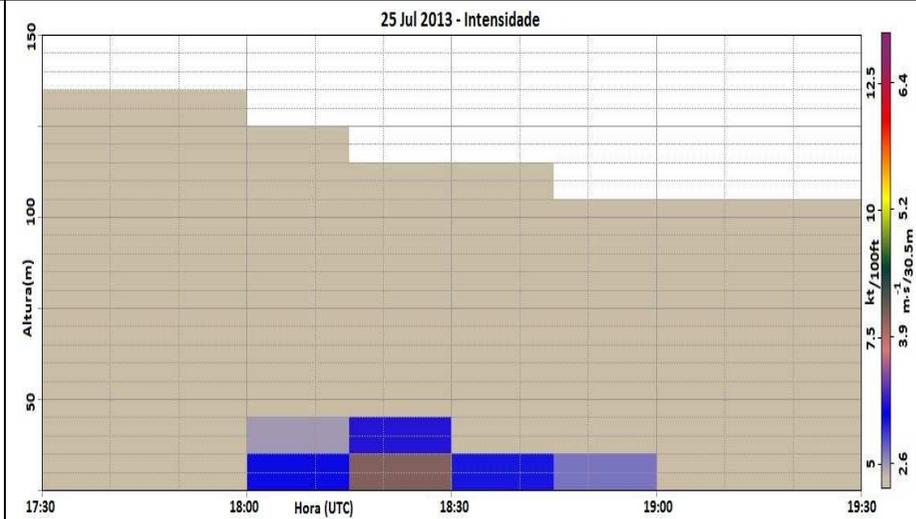
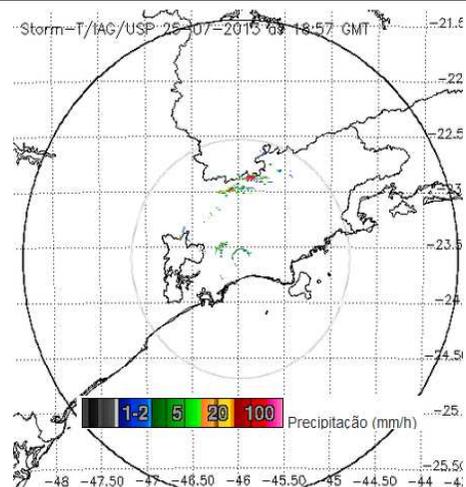
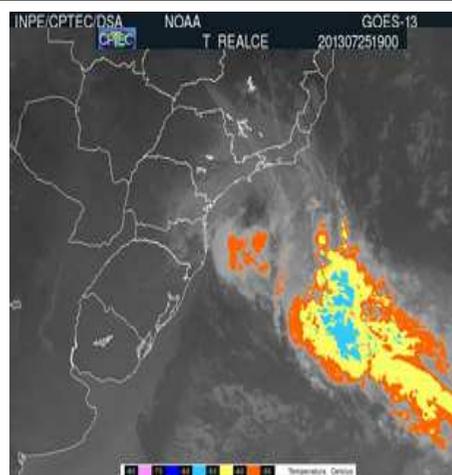


A imagem de satélite apresenta uma faixa de nebulosidade pouco intensa próxima à área em estudo e grandes áreas de instabilidade sobre o Rio Grande do Sul. O RADAR indica refletividade apenas no estado do Rio Grande do Sul. De acordo com o METAR, ventos entre 0kt (calmo) e 5kt (NE), além de ausência de nebulosidade abaixo de 1500 m.

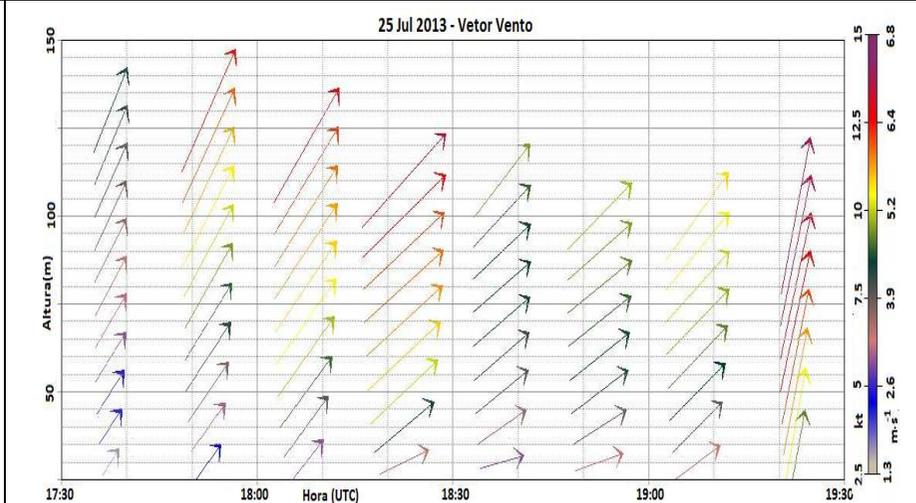
No perfil vertical, os ventos não ultrapassam 12kt ($6.4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) porém no horário de ocorrência de WS há uma variação brusca da direção do vento de NE para SE na faixa entre 100 m e 30 m. Não houve informe no SISCOMET.



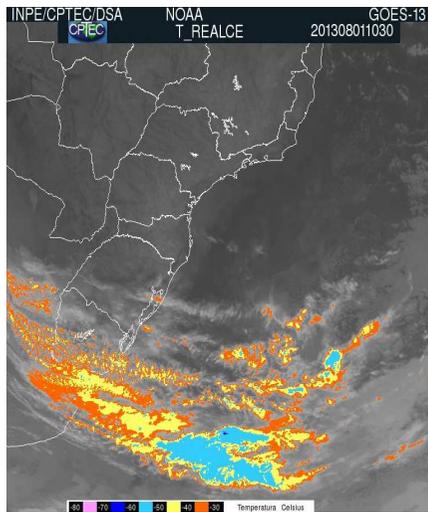
WS FORTE - 25 Jul 2013



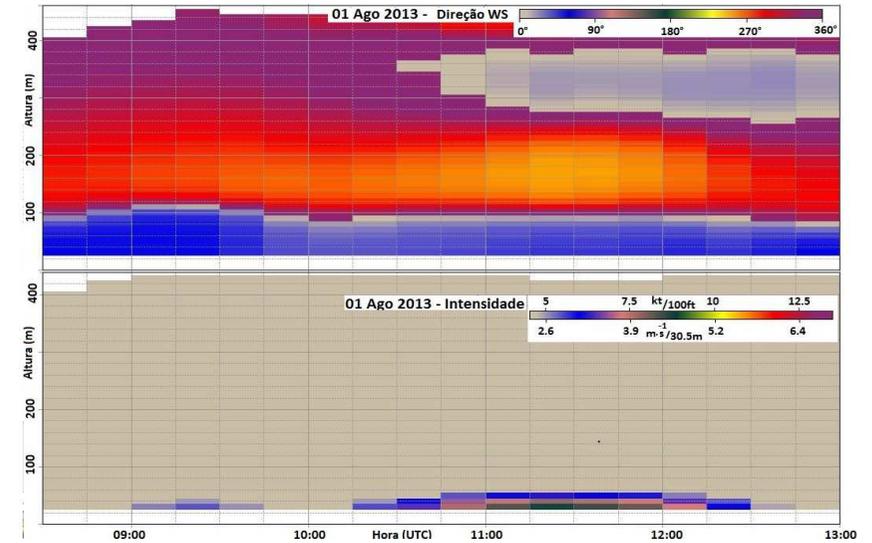
De acordo com a imagem de satélite, há nebulosidade baixa, confirmada pelo METAR. Um ciclone no litoral do estado de São Paulo influencia os ventos de componente Sul. No RADAR, não há refletividade sobre o aeroporto. Ainda pelo METAR, o vento em superfície é de SW, e havia nuvens com base de 1400ft (~427 m). O perfil vertical do vento mostra uma variação de 15kt a 100m para 6kt o que caracterizou tal detecção do WS.



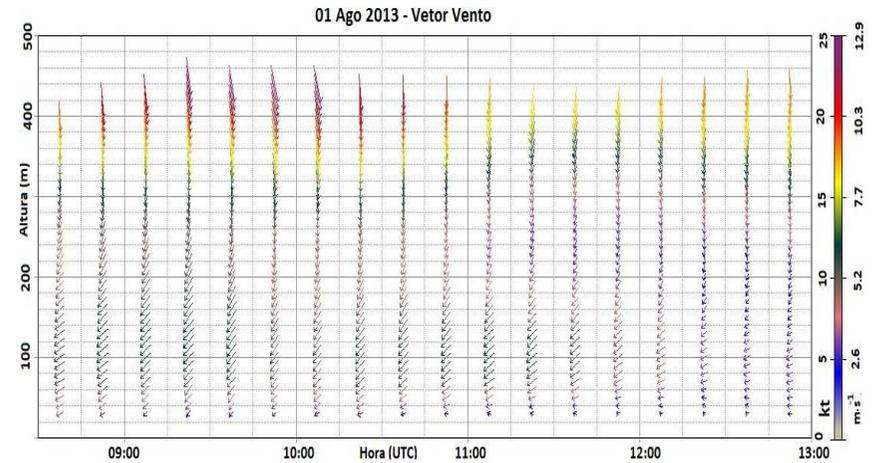
WS FORTE - 01 Ago 2013



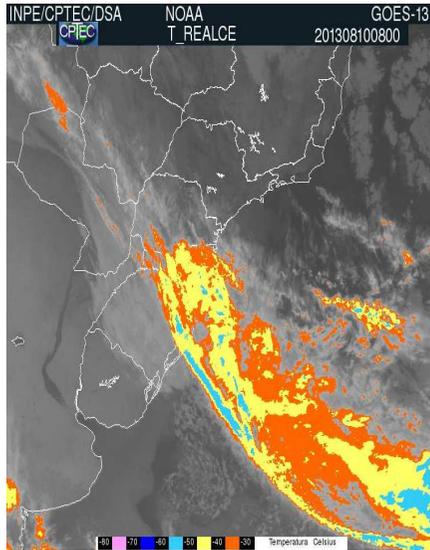
RADAR: Não há refletividade



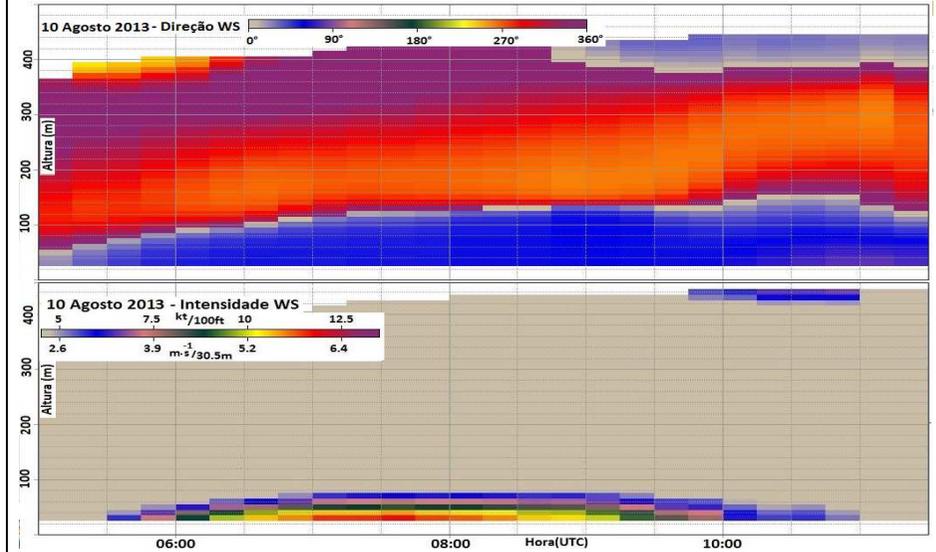
Nas imagens de satélite e de RADAR, não há sistema frontal ou nebulosidade sobre a região, o que confirma com a informação de METAR. Similar ao dia 14 de maio de 2013, logo acima da WS há um fluxo de vento de NE com velocidade entre 10kt e 15kt que diminui rapidamente. O maior valor do vento está acima de 300m com valores de 15 a 25kt. O gráfico da direção da WS explana uma variação da direção de NE abaixo de 100m, WSW a NW entre 100m e 250m e novamente muda para NNE acima de 250m, este gráfico auxilia na visualização e previsão de WS. Não há informe no SISCOMET.



WS FORTE - 10 Ago 2013



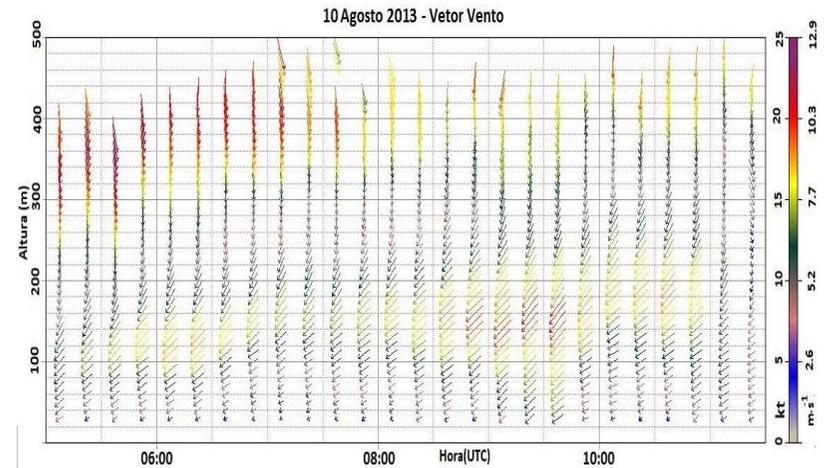
RADAR: Não há refletividade



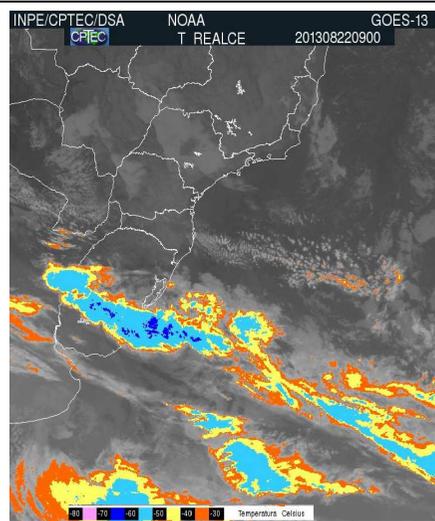
De acordo com as imagens de satélite e de RADAR, bem como pelo METAR, não há presença de nebulosidade abaixo de 1500m, os ventos são de E a NE e não ultrapassam 9kt ($4.6m.s^{-1}$) e há ausência de precipitação.

O gráfico da direção da WS mostra uma faixa característica de NE (em azul) até 100m e acima desta com direção variando de W / NW (alaranjado /vermelho). O fenômeno de WS inicia-se às 05:30UTC, conforme a intensidade, mas a faixa de direção começa a se formar pouco antes das 05:00UTC.

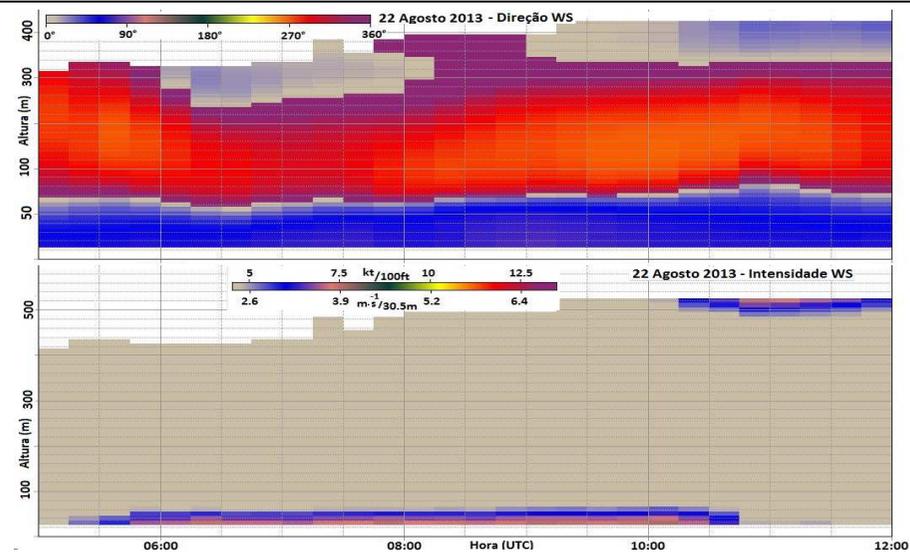
O perfil vertical do vento mostra uma característica de “jato” entre 100m e 200m com velocidades variando de 15kt a 20kt com direção NE. Não informado no SISCOMET.



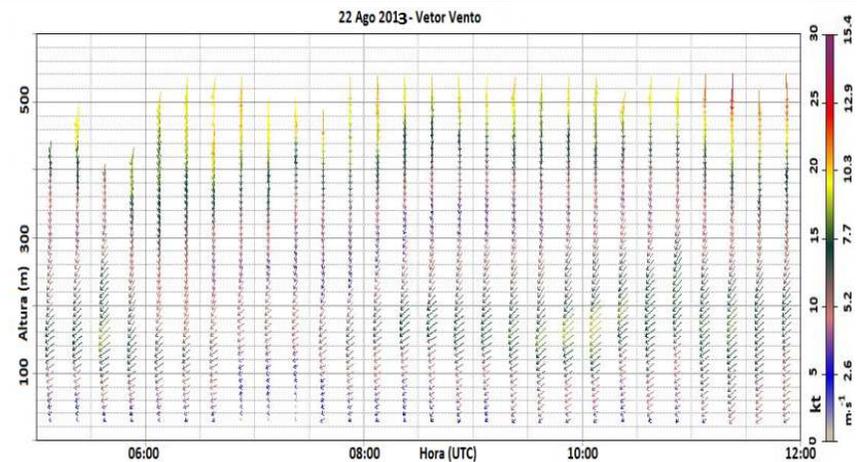
WS FORTE - 22 Ago 2013



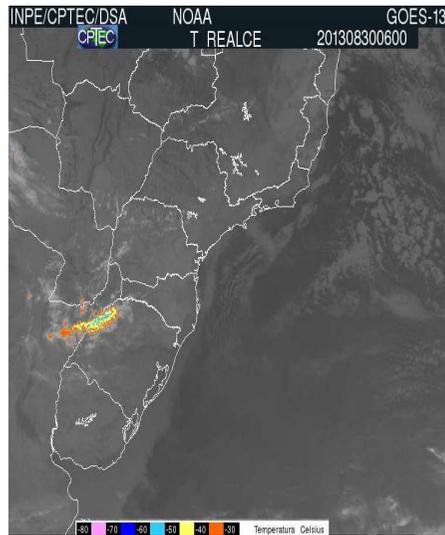
RADAR: Não há refletividade



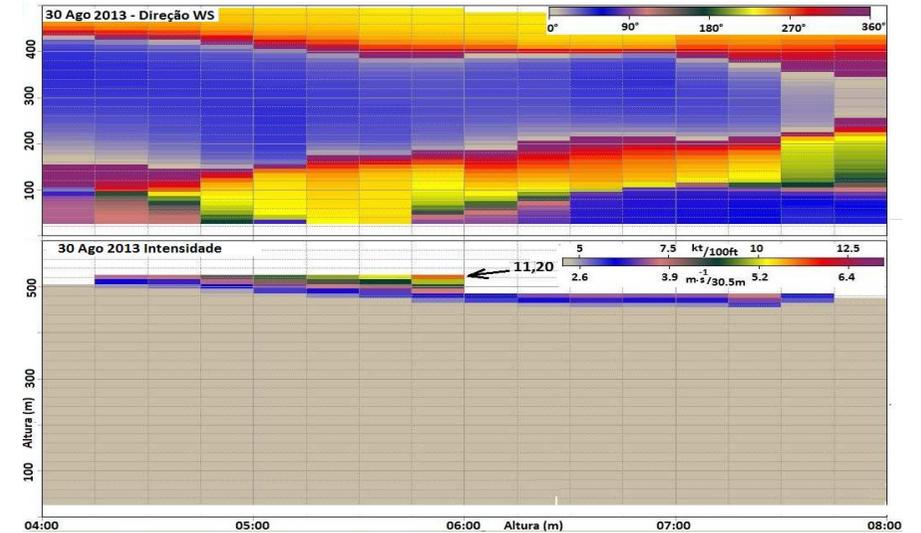
As imagens de satélite e o METAR possuem as mesmas características do evento do dia 10 de agosto de 2013. Os gráficos apresentam uma forma similar de variação de WS, tempo da intensidade, exceto valor numérico que está em torno de 7.5 kt/100ft bem como o perfil vertical do vento horizontal em termos de velocidade. Neste caso, em 500m é detectado também WS.



WS FORTE - 30 Ago 2013



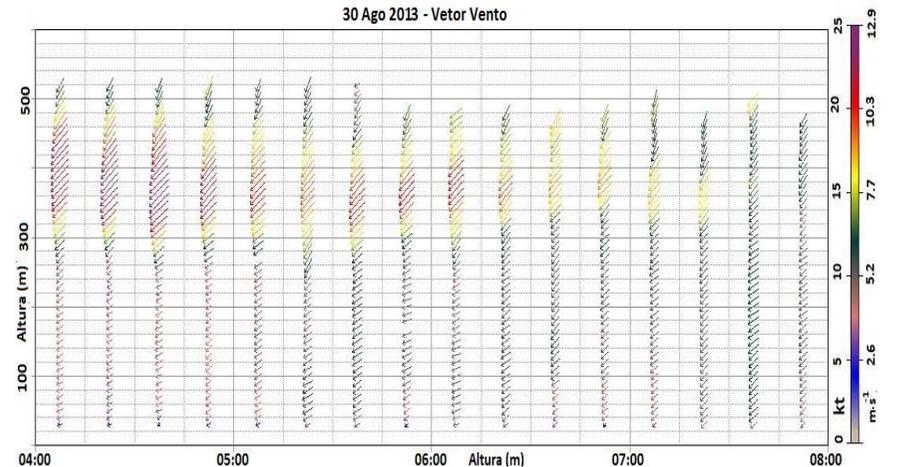
RADAR: Não há refletividade.



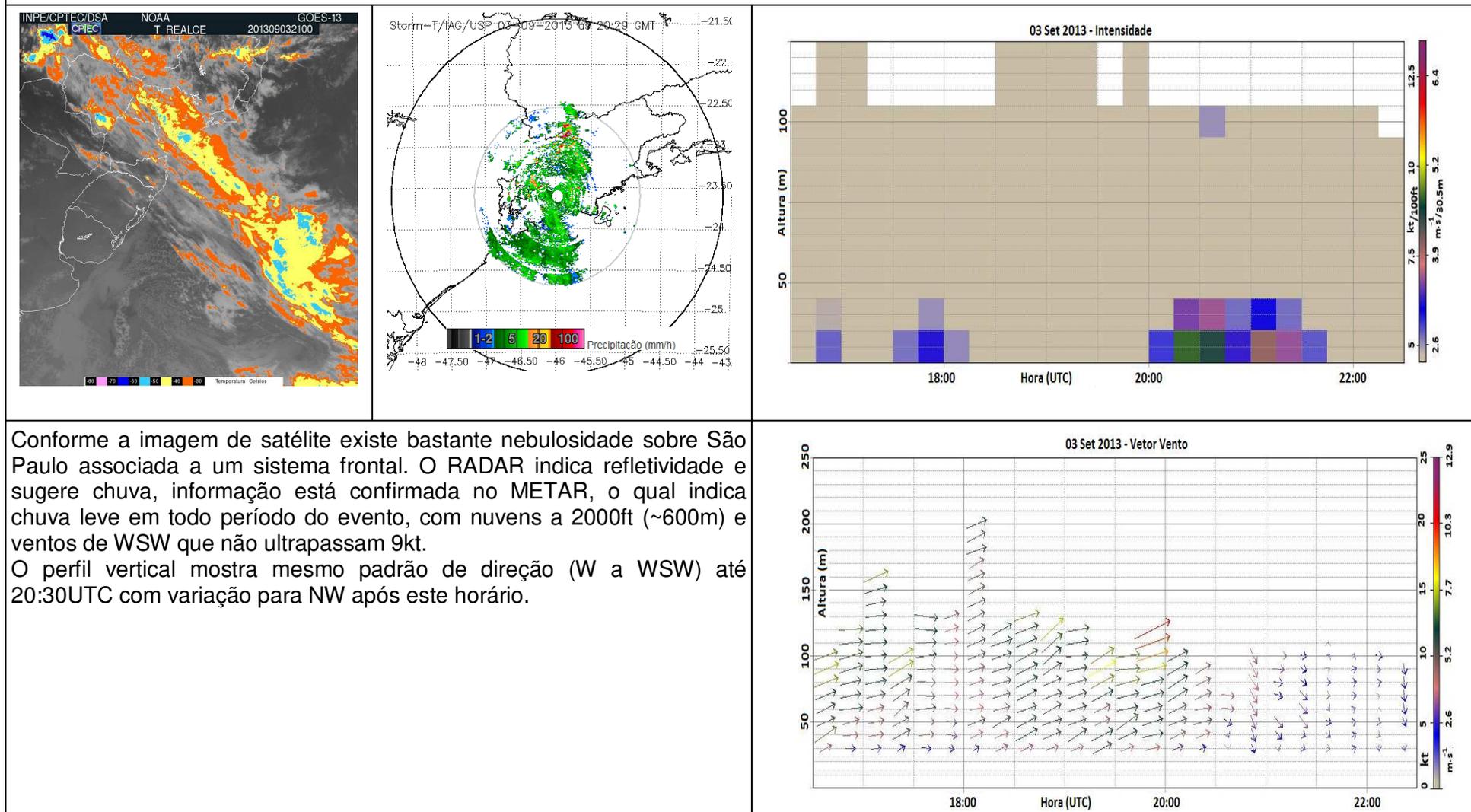
Este caso é diferente dos demais pois a *windshear* está a 500m de altura. A imagem de satélite não mostra sistema frontal e o radar não apresenta refletividade, porém a informação de METAR afirma que há nuvens a 300ft (~90m) com ventos de NE que não atingem 10kt.

O perfil vertical do vento mostra uma região entre 300m e 500m com características de “jato” que se desintensifica à medida que se aproxima das 08:00UTC.

O gráfico da direção de WS é similar ao padrão observado em 22 de agosto de 2013, porém com cores diferentes indicando as direções, faixa central de NE (azul) e faixas periféricas de SE (amarelo). Não há informe no SISCOMET.



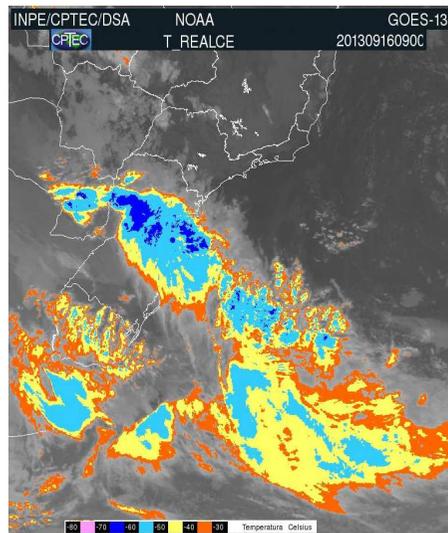
WS FORTE - 03 Set 2013



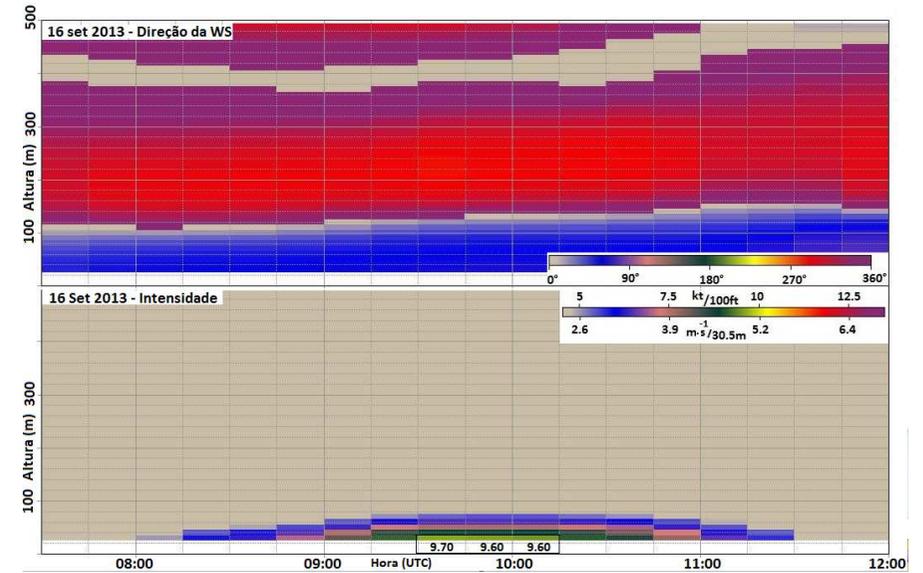
Conforme a imagem de satélite existe bastante nebulosidade sobre São Paulo associada a um sistema frontal. O RADAR indica refletividade e sugere chuva, informação está confirmada no METAR, o qual indica chuva leve em todo período do evento, com nuvens a 2000ft (~600m) e ventos de WSW que não ultrapassam 9kt.

O perfil vertical mostra mesmo padrão de direção (W a WSW) até 20:30UTC com variação para NW após este horário.

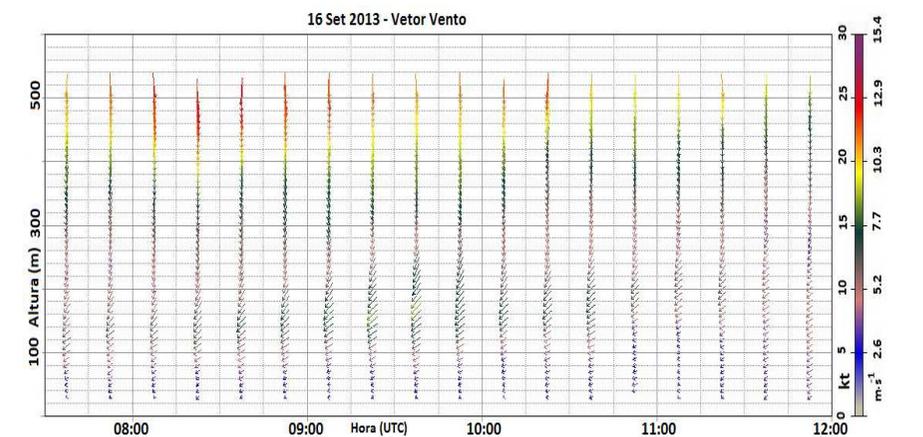
WS FORTE - 16 Set 2013



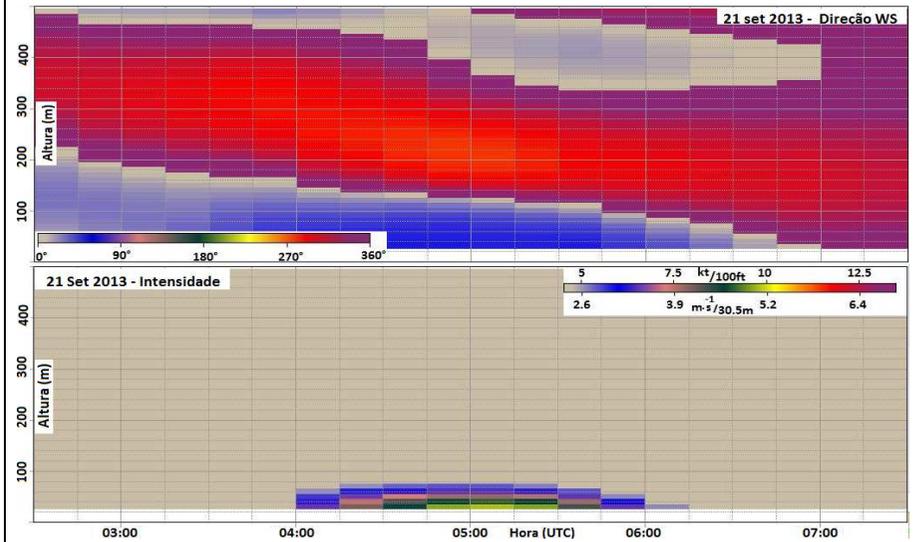
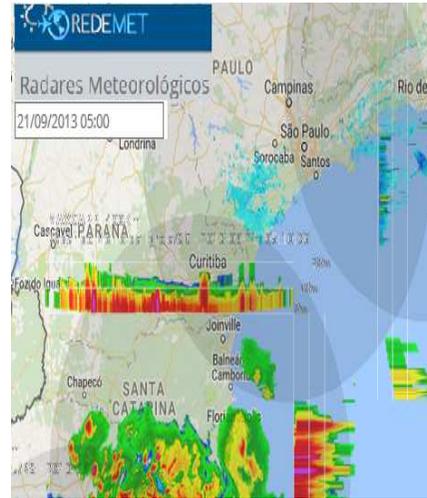
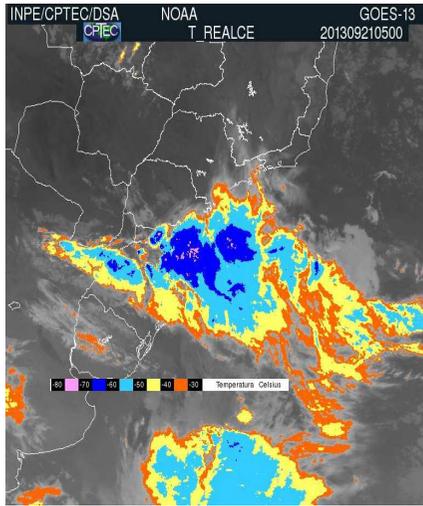
RADAR: Não há refletividade



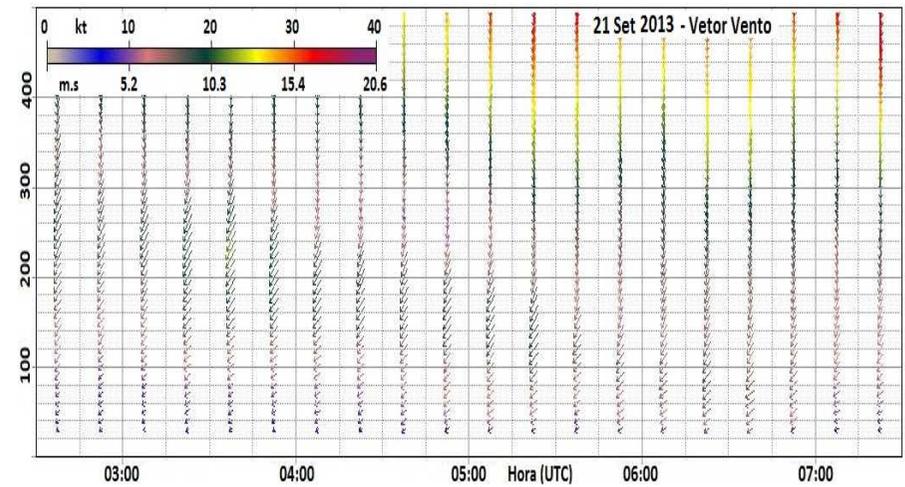
Na imagem de satélite, nota-se um sistema frontal no sul do país, mas sem afetar diretamente a região de interesse. Os gráficos mostram situação semelhante a outras já identificadas anteriormente (como a de 22/08/2013), com uma faixa acima de 100m com direção da WS de noroeste (vermelho) e abaixo, em azul, direção nordeste. O perfil vertical do vento descreve a região entre 100m e 200m com característica de jato com ventos em torno de 15kt e de componente nordeste (NE). Apenas observa-se vento com velocidade maior que 20kt acima do nível de 400m, ou seja, 100m acima dos pontos mais altos da Serra da Cantareira, em relação ao aeroporto. A intensidade possui máximo de 9,7kt/100ft e todo o evento dura mais que 3 horas.



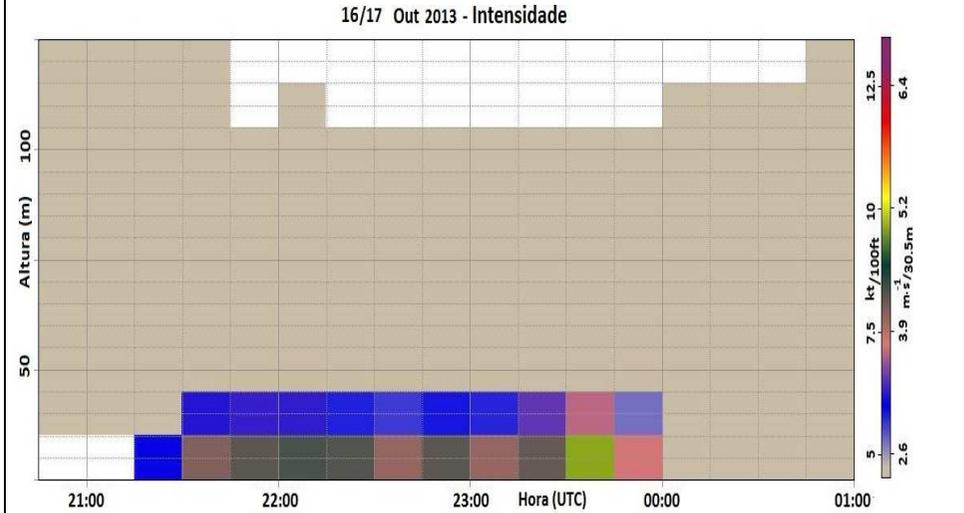
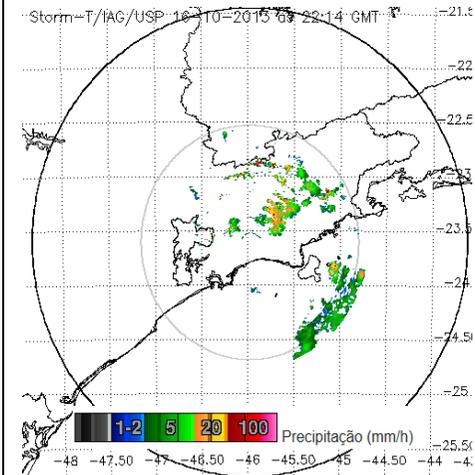
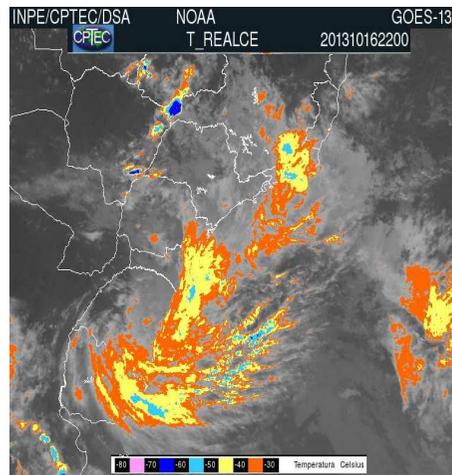
WS FORTE - 21 Set 2013



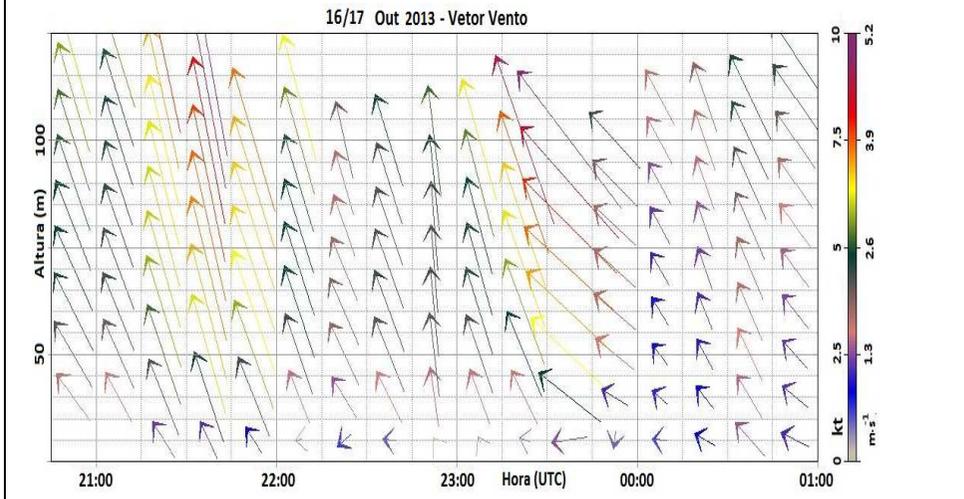
A imagem de satélite indica uma grande área de nebulosidade no litoral de São Paulo, mas o RADAR e o METAR não apresentam precipitação. Poucas nuvens e vento de leste com máximo de 8kt sobre SBGR. O cisalhamento teve duração de praticamente 2 horas, sendo suas características de direção da WS com o padrão de uma faixa central de noroeste (NW), em vermelho margeado com direções de N a NE. É possível observar que, pouco tempo depois do evento, geralmente até 2 horas após a WS cessar, a faixa se desconfigura e a direção NE chega a níveis abaixo de 100m.



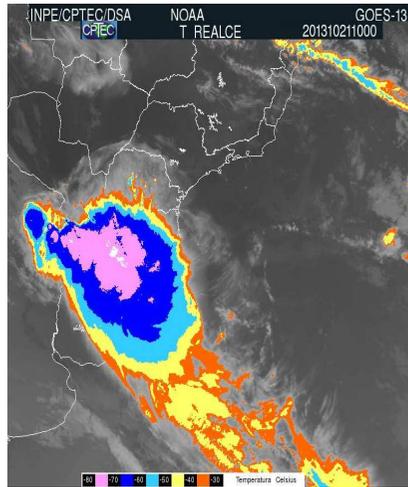
WS FORTE - 16 Out 2013



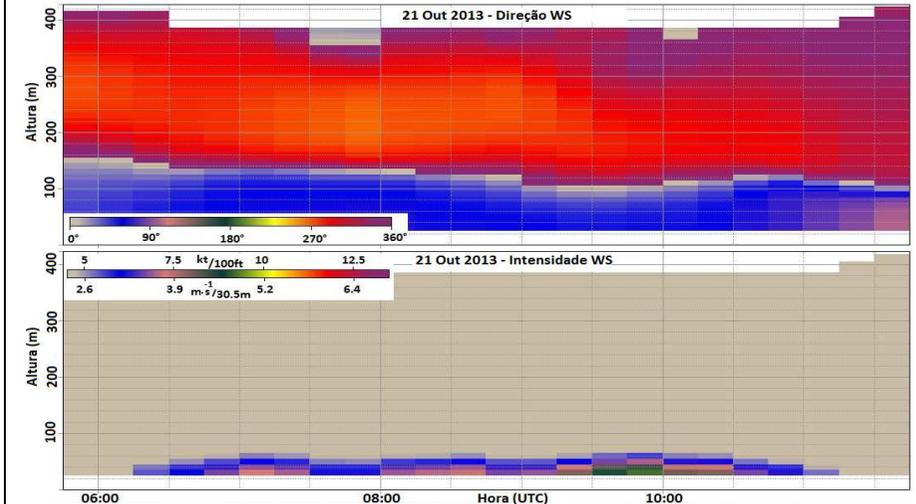
De acordo com a imagem de satélite, há um ciclone está sobre o estado do Rio Grande do Sul e a situação caracteriza-se como uma frontogênese. O Estado de São Paulo apresenta bastante nebulosidade, mas o RADAR mostra refletividade em regiões próximas e as informações de METAR apresentam chuva sobre SBGR, ventos de SE de até 4kt e nuvens baixas a 500ft (~150 m). O perfil vertical mostra ventos de sudeste se intensificando à medida que atinge alturas maiores, porém com máximos de 10kt ($5,2 \text{ m.s}^{-1}$).



WS FORTE - 21 Out 2013

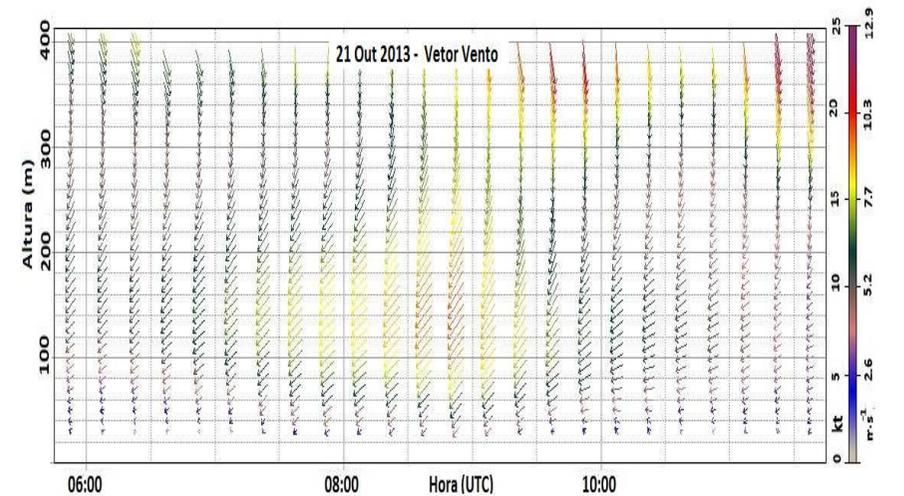


RADAR: Não há refletividade.

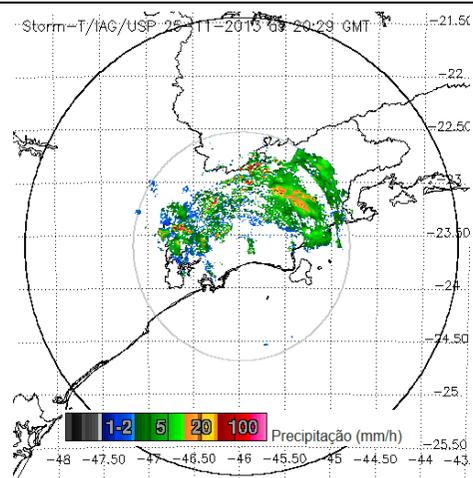
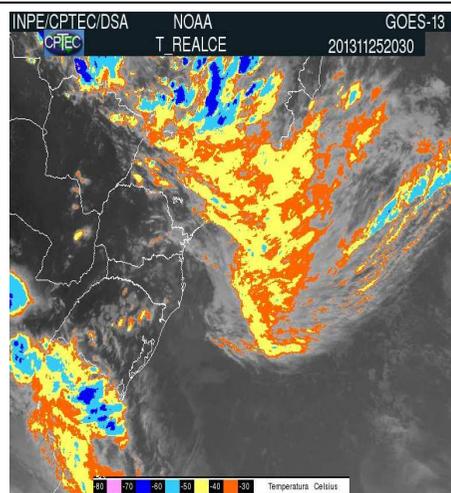


Na imagem de satélite há a presença de um complexo convectivo de mesoescala (CCM) sobre o Rio Grande do Sul e Santa Catarina, porém não mostra nada significativo sobre São Paulo. Os dados de METAR informam poucas nuvens sobre a região com vento de NE de até 9kt.

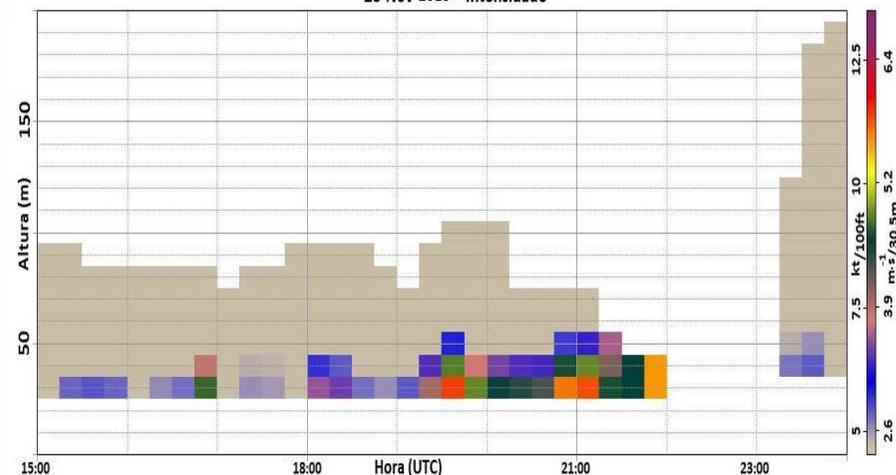
A faixa de entre 100m e 200m no perfil vertical do vento chama a atenção para ventos mais intensos com característica de “jato”. A *windshear* não ultrapassa os 100m de altura e sua direção mostra bem definida a faixa de NE (azul) e acima dela a de NW (vermelha). Essa característica é frequente quando há WS forte a moderada e perdura por várias horas bem como ausência de sistema frontal sobre o estado de São Paulo, porém já existe a frente ou sistema convectivo no sul do país.



WS FORTE - 25 Nov 2013

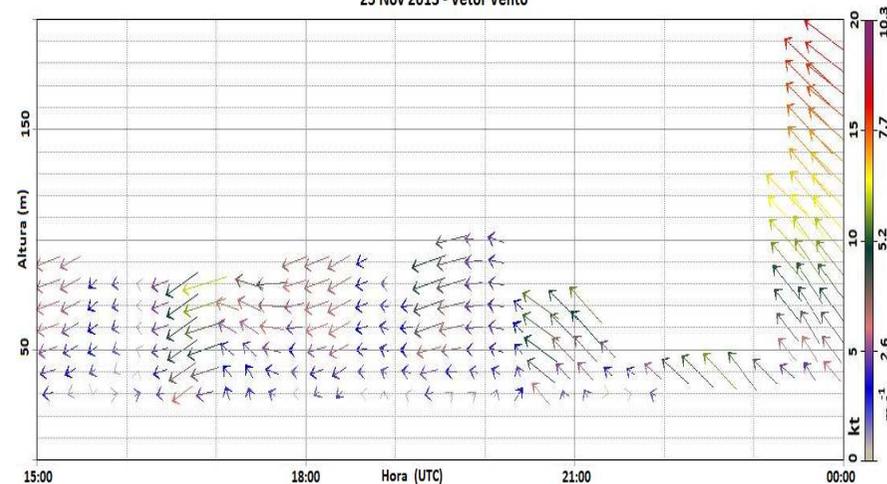


25 Nov 2013 - Intensidade

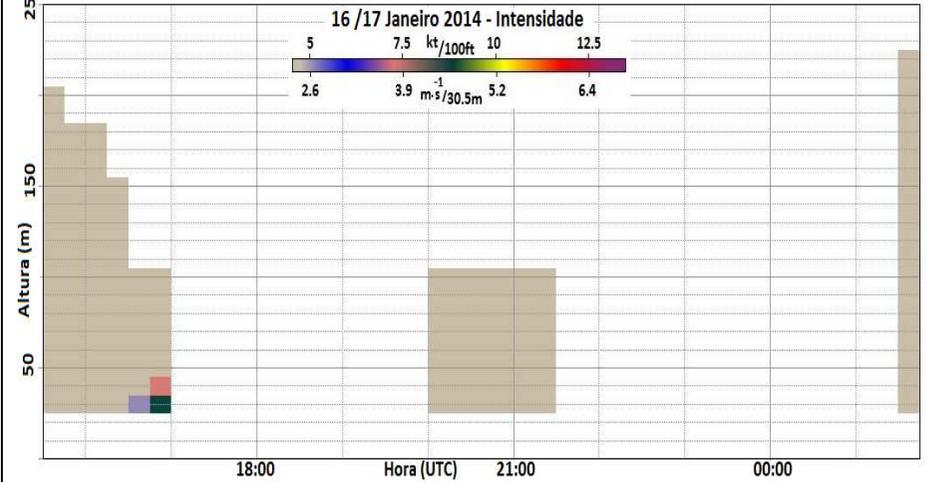
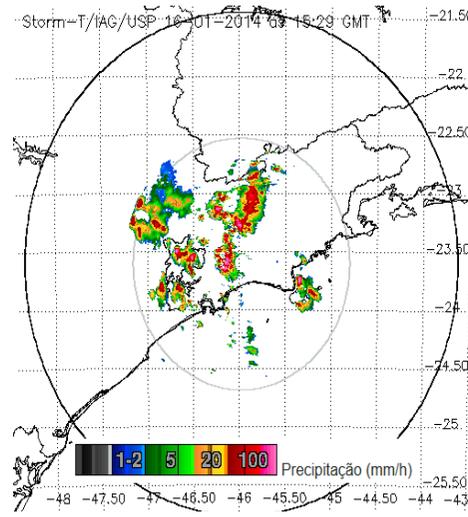
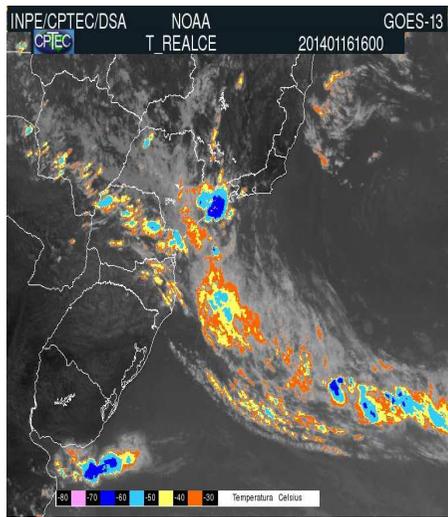


Conforme a imagem de satélite e do RADAR, São Paulo encontra-se sob a influência de bastante nebulosidade e precipitação confirmado pelo METAR que informa chuva leve e moderada e até chuvisco, em todo período. As nuvens são baixas a 700ft e vento de sul de até 7kt. Os dados ficaram restritos a menos de 100m, porém é visível a WS e a mudança dos ventos de leste para sudeste no gráfico do perfil vertical do vento às 20:00UTC. Há uma falha de sinal momentânea entre 22:00 sem que as condições do aeródromo tenham piorado a ponto de justificar a atenuação do sinal.

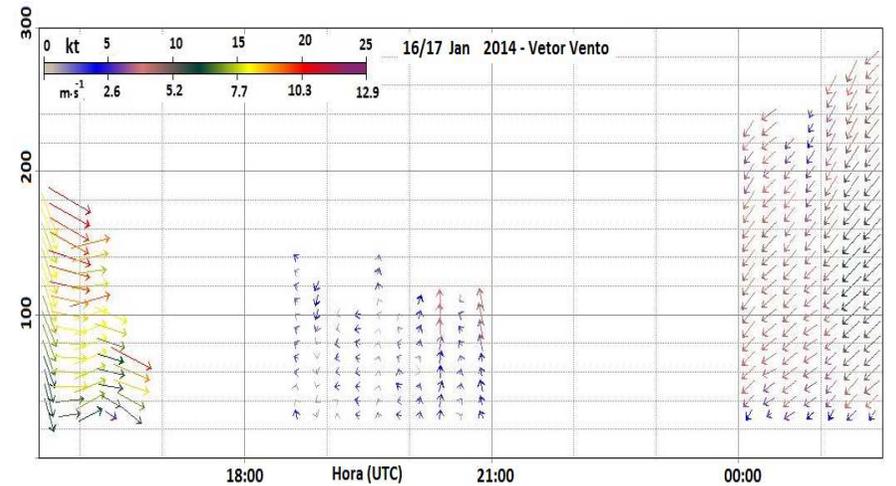
25 Nov 2013 - Vetor Vento



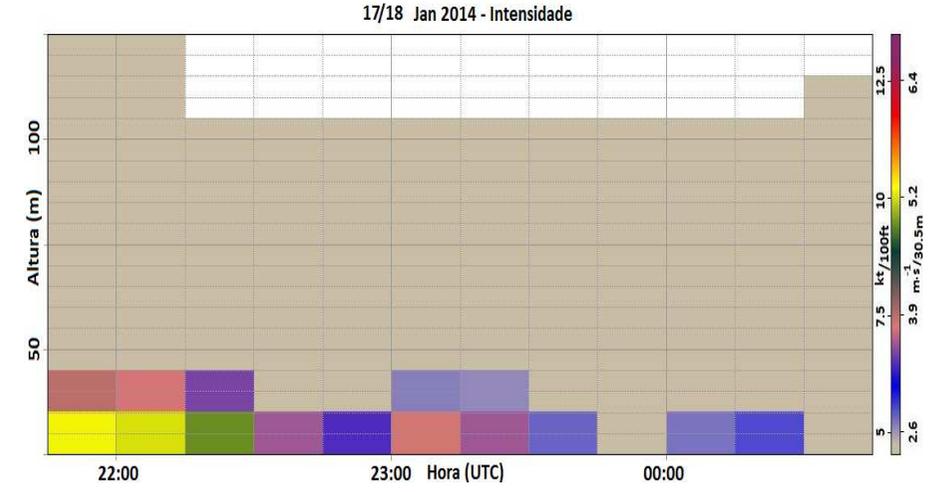
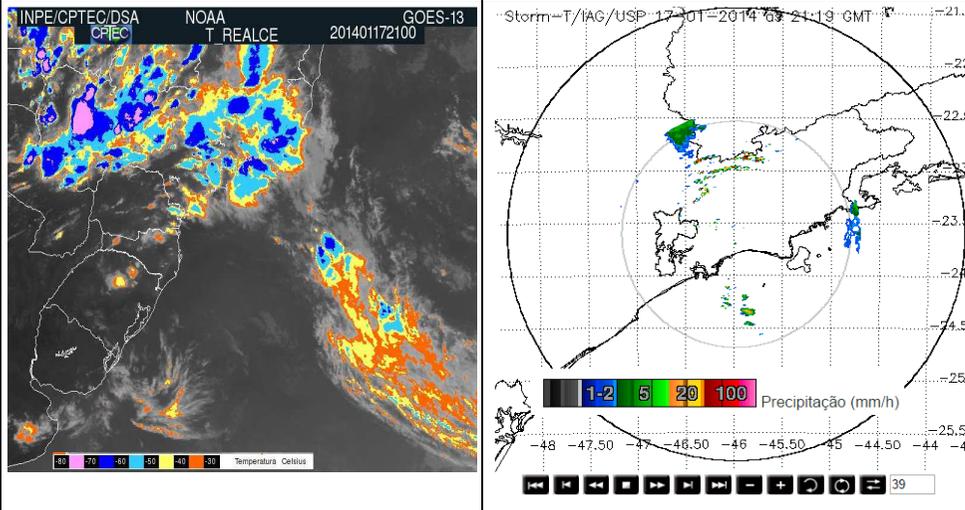
WS FORTE - 16 Jan 2014



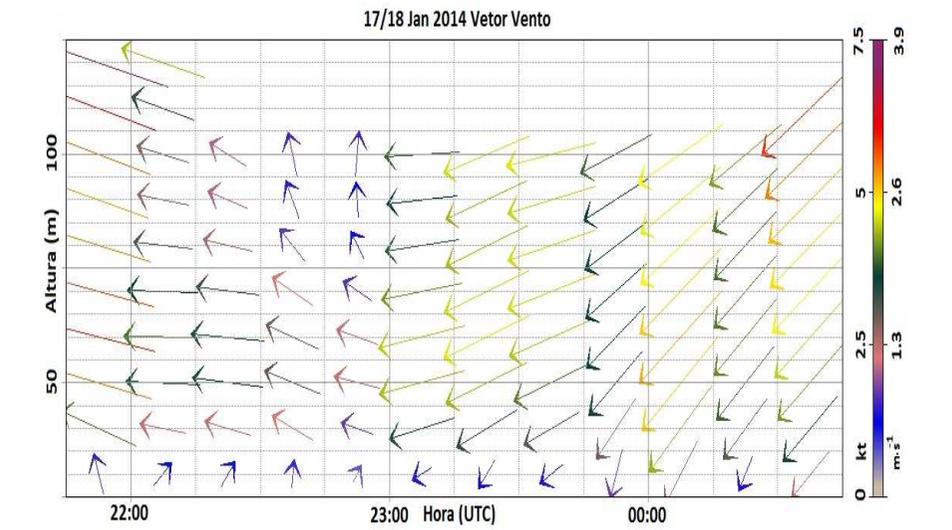
Há bastante atividade convectiva e precipitação pela imagem do satélite e pelo RADAR. No METAR, WS informada às 16:00UTC embora não haja registro no SISCOMET. Os ventos de rajada atingem 41kt ($\sim 21\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) e há trovoada constante na região. Nesse dia é esperada a perda de sinal, conforme observado nos gráficos. Após a instabilidade passar pela região, o vento torna-se bem homogêneo e de nordeste, visto no perfil vertical.



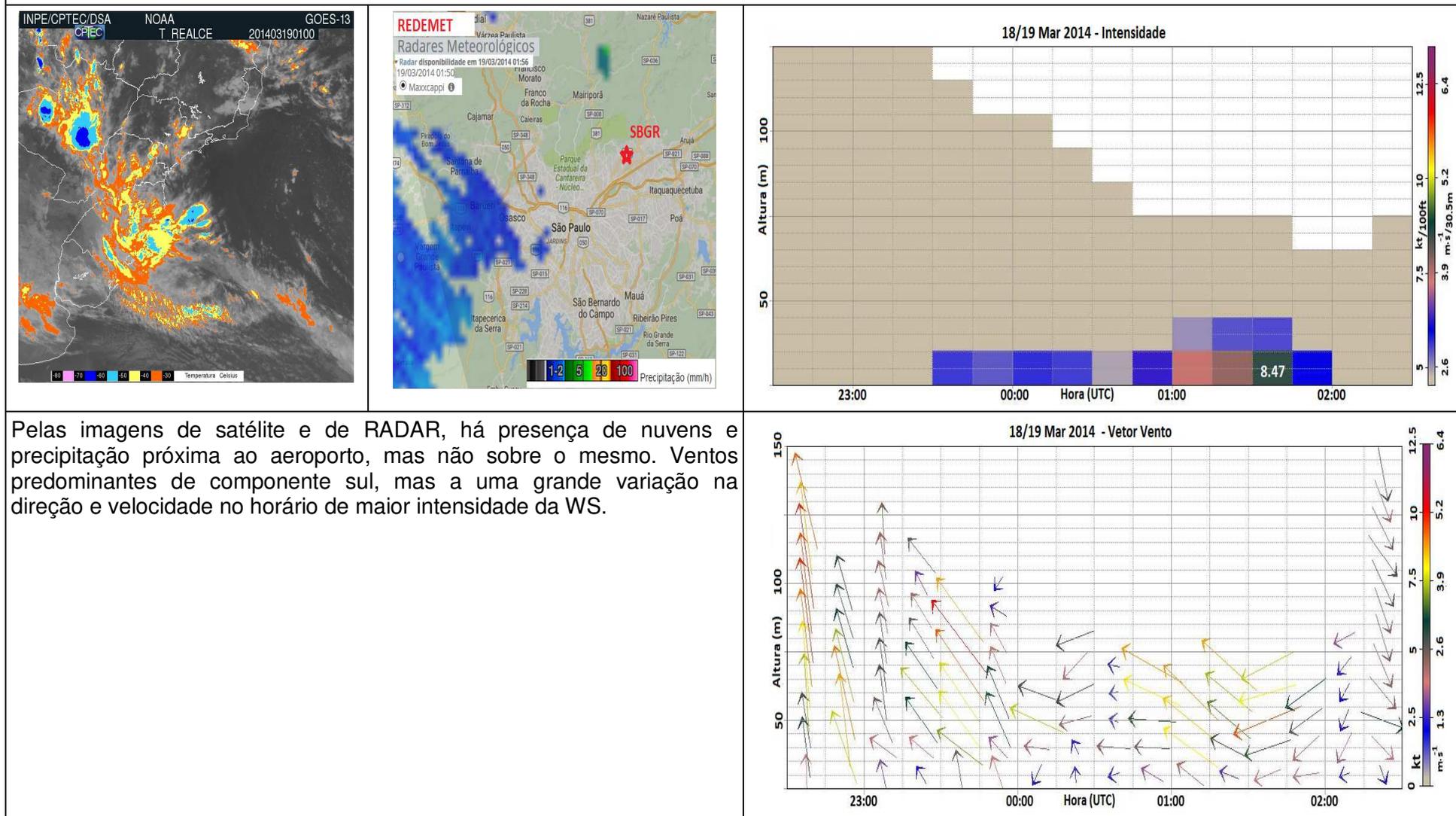
WS FORTE - 17 Jan 2014



A imagem de satélite comprova uma grande área de precipitação sobre São Paulo. No RADAR não fica evidente, mas o METAR informa trovoadas com chuva na região no período da WS, com ventos de até 20kt em superfície. Não há tal velocidade em níveis mais altos, conforme o perfil vertical do vento. Contudo, a direção do vento é bastante variável em cada faixa de altura o que contribui para os dados caracterizarem windshear. Não há informe no SISCOMET

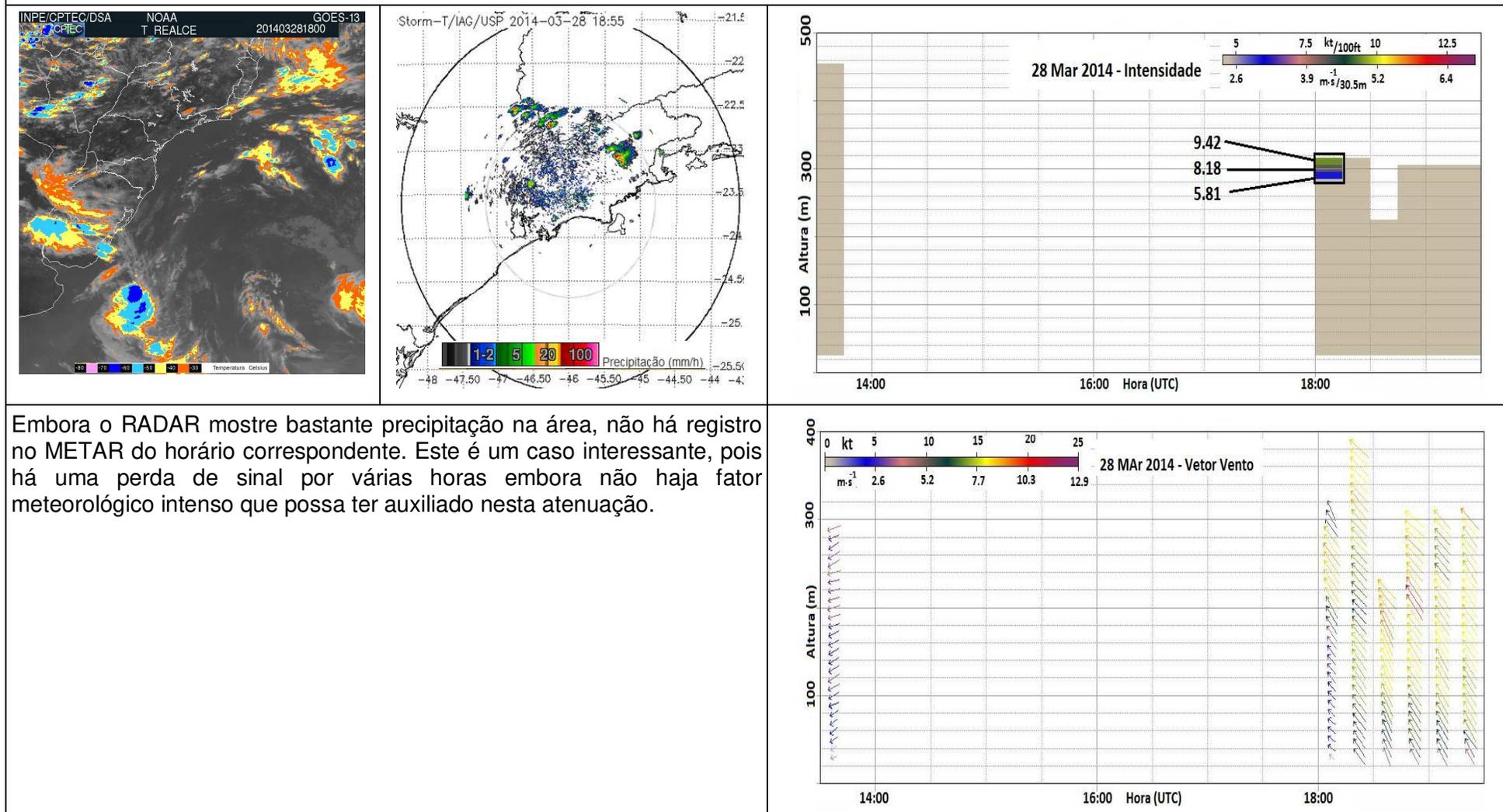


WS FORTE - 18-19 Mar 2014



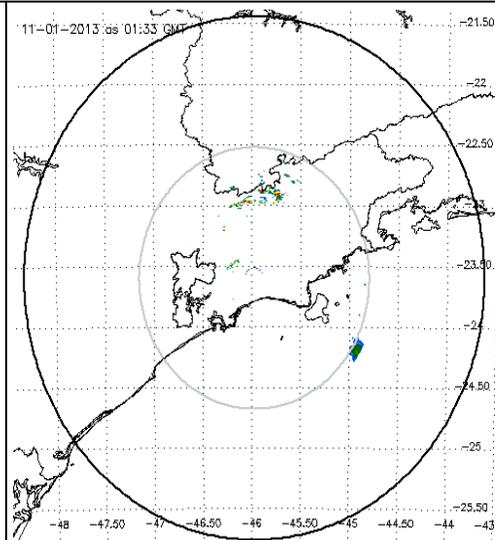
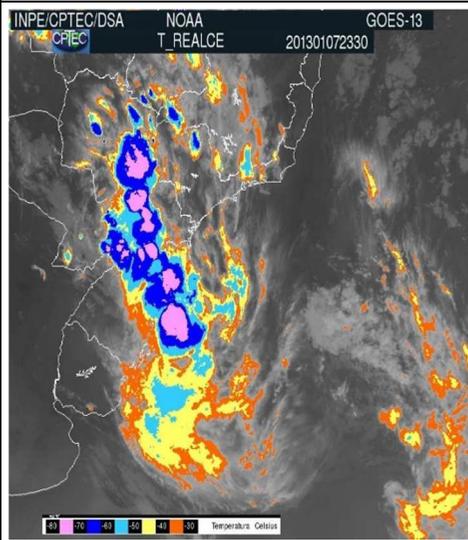
Pelas imagens de satélite e de RADAR, há presença de nuvens e precipitação próxima ao aeroporto, mas não sobre o mesmo. Ventos predominantes de componente sul, mas a uma grande variação na direção e velocidade no horário de maior intensidade da WS.

WS FORTE - 28 Mar 2014

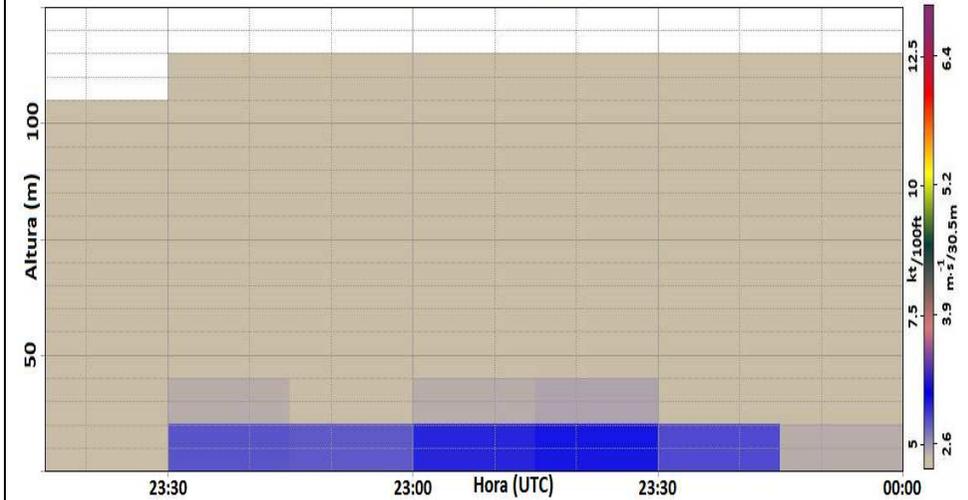


Embora o RADAR mostre bastante precipitação na área, não há registro no METAR do horário correspondente. Este é um caso interessante, pois há uma perda de sinal por várias horas embora não haja fator meteorológico intenso que possa ter auxiliado nesta atenuação.

WS Moderado - 07 Jan 2013



07 Jan 2013 - Intensidade



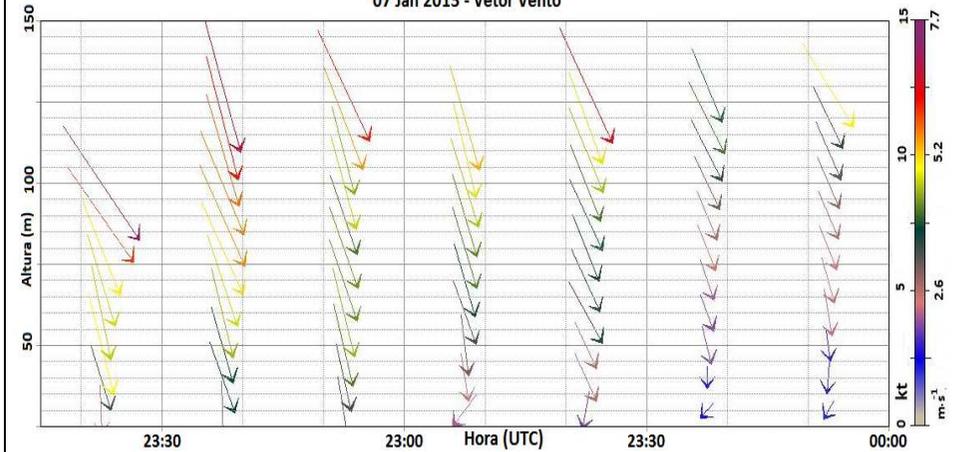
Apesar de um sistema com bastante atividade convectiva e um ciclone no sul do país, conforme a imagem de satélite, não há eco no RADAR nas proximidades de SBGR. Os exemplos de METAR mostram vento de WNW com máximo de 5kt, ausência de nuvens abaixo de 1500ft e visibilidade acima de 10km (CAVOK):

METAR SBGR 072200Z 32005KT CAVOK 27/18 Q1013 =

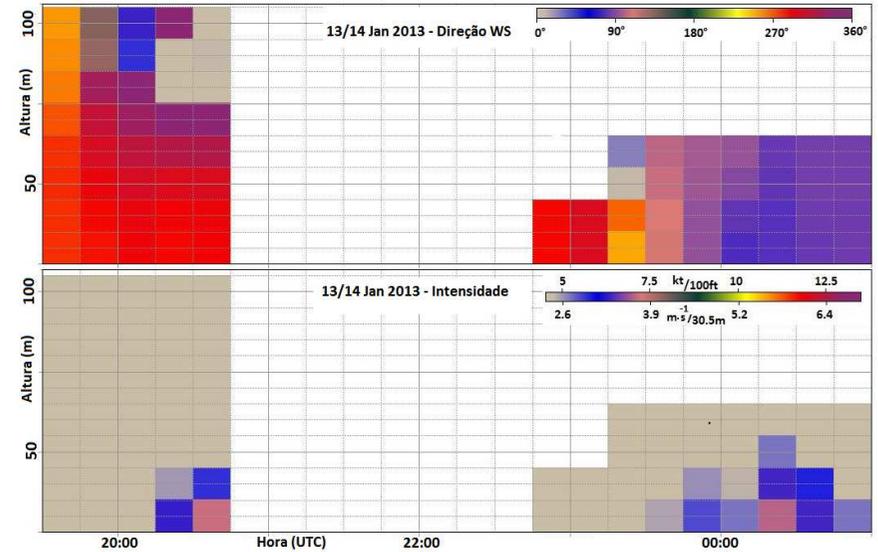
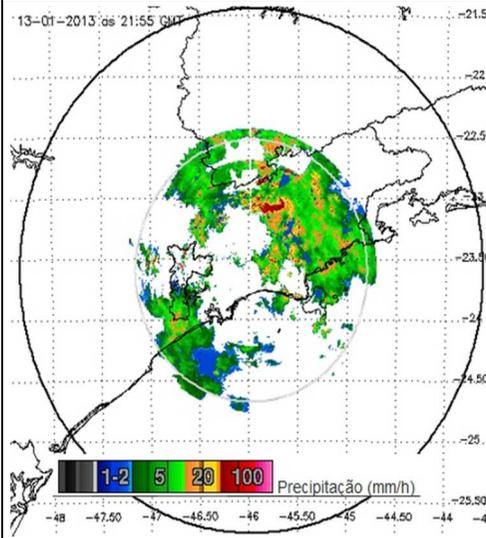
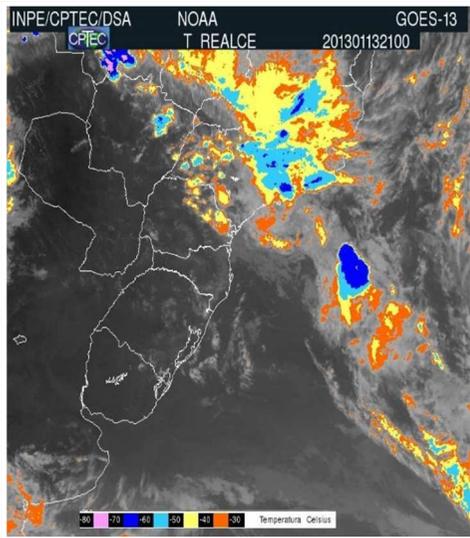
METAR SBGR 072300Z 29001KT CAVOK 26/19 Q1014 =

Contudo, o perfil vertical mostra o vento de NW de até 15kt em torno de 100m e diminuição gradativa de velocidade à medida que atinge alturas menores, além de um giro horário que entre 23UTC e 00UTC atinge direção NE a 30m de altura. Não há registro no SISCOMET.

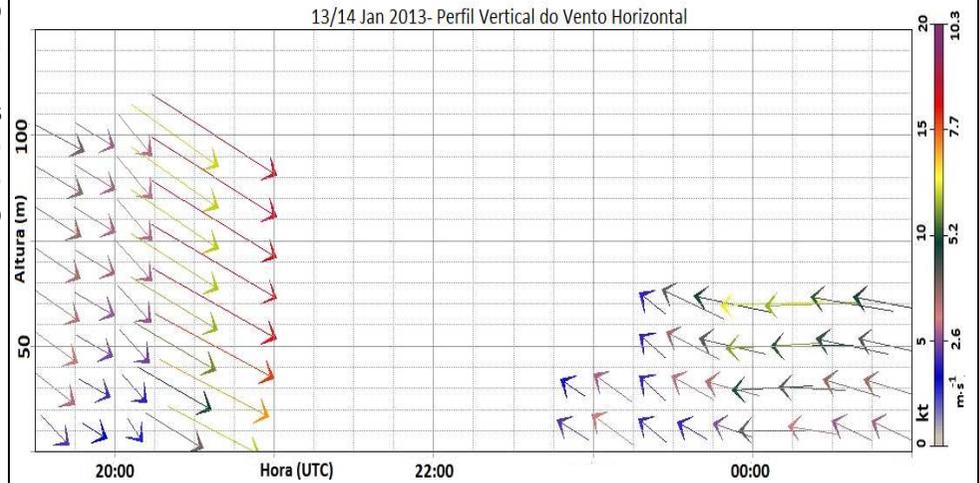
07 Jan 2013 - Vetor Vento



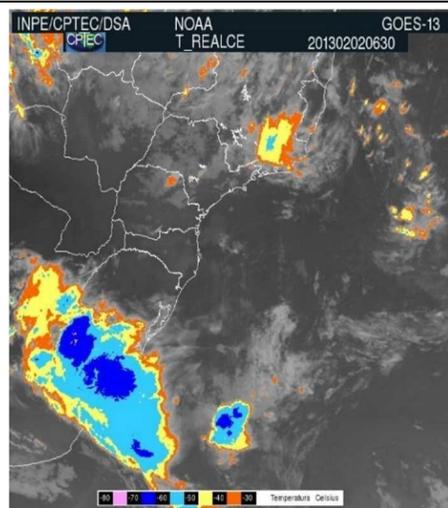
WS Moderado - 13 Jan 2013



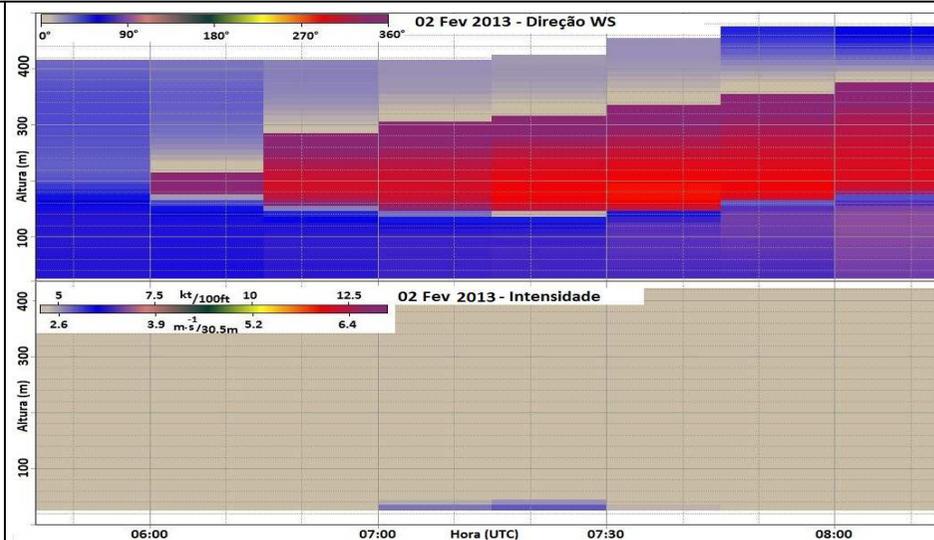
As informações da imagem de satélite, RADAR e METAR deixam claro que há um sistema frontal sobre a região, precipitação e nuvens com base mínima de 700ft (~213m). O perfil vertical mostra os ventos de NW se intensificando com o passar dos minutos até a falha de sinal às 21UTC. Com o retorno dos dados, após as 23UTC, o perfil da direção mudou para componente sul, especificamente SE. Durante a perda do sinal foi registrado apenas chuva leve sobre SBGR. Sem informe no SISCOMET.



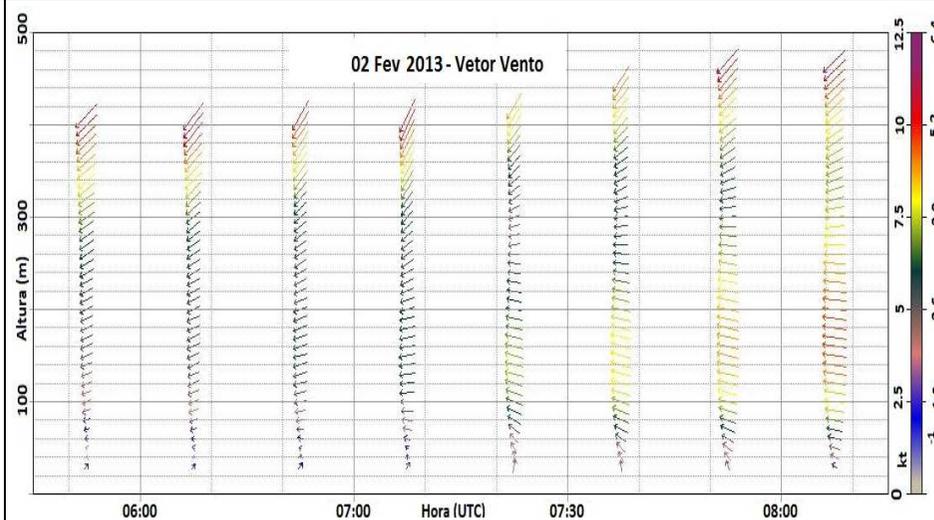
WS moderado - 2 Feb 2013



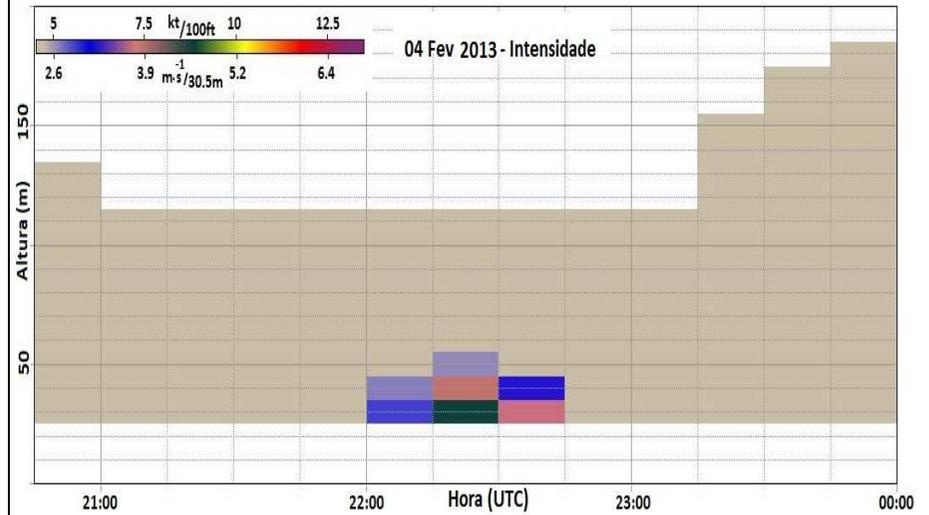
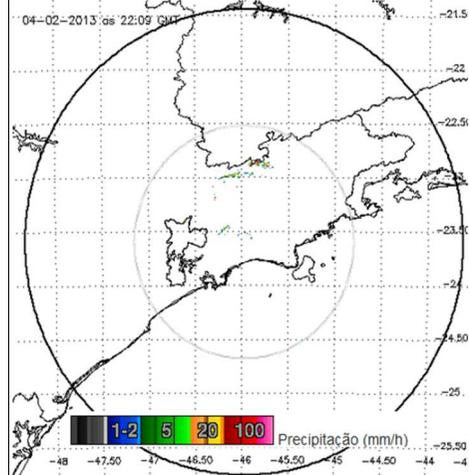
RADAR Nada Significativo



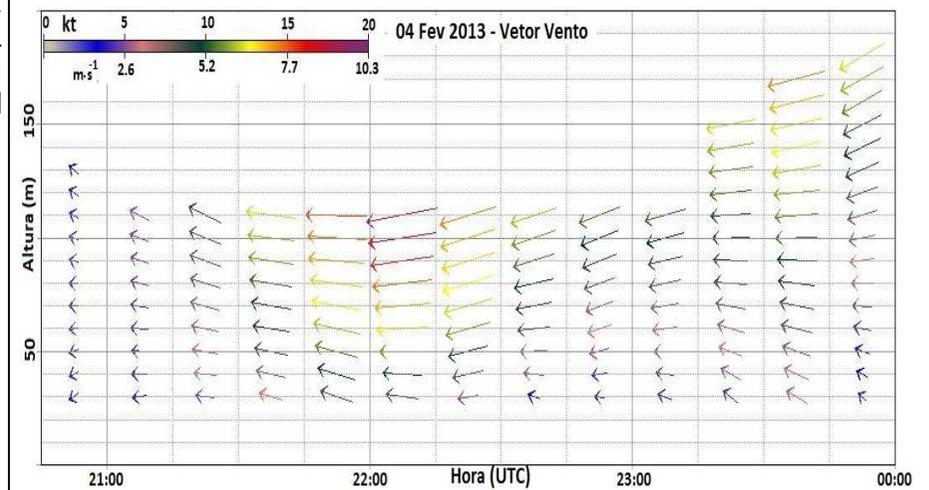
A imagem de satélite descreve o Vale do Paraíba e parte da grande São Paulo, inclusive SBGR com nebulosidade baixa confirmada pelo METAR. A direção do vento muda de NE às 6UTC para SE às 7UTC e novamente NE às 8UTC. Às 6UTC se configura uma faixa de direção de WS de NW margeada por direção NE abaixo e N acima e 1 hora depois ocorre WS entre 7UTC e 07:30UTC restrito a 30m de altura. O perfil vertical do vento apresenta forma similar a casos com este tipo de direção da WS.



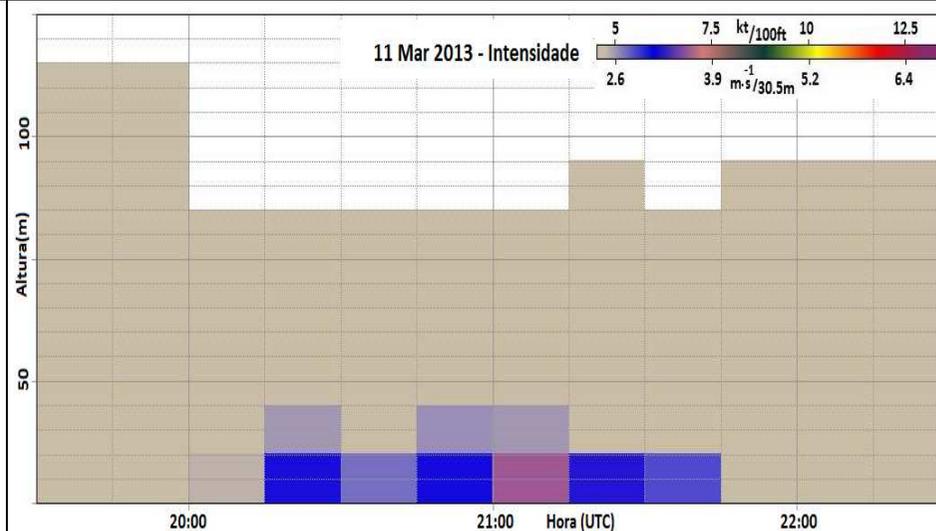
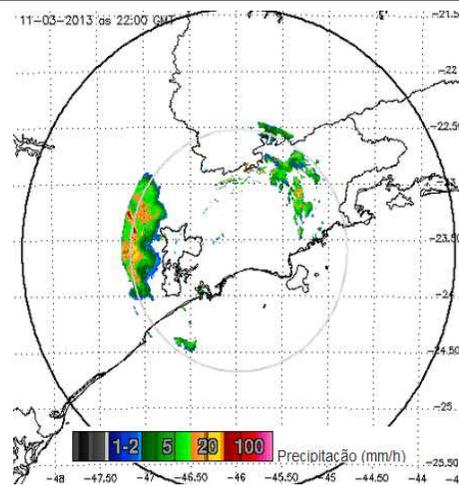
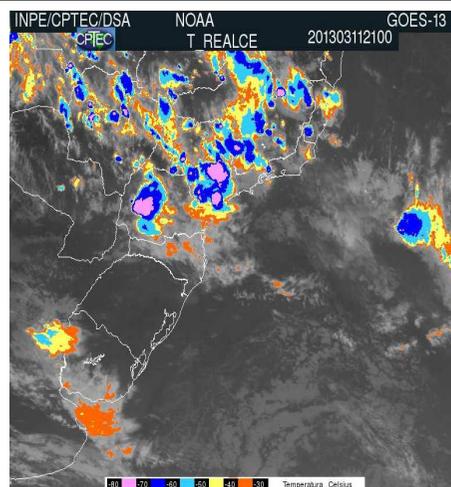
WS moderado - 04 Fev 2013



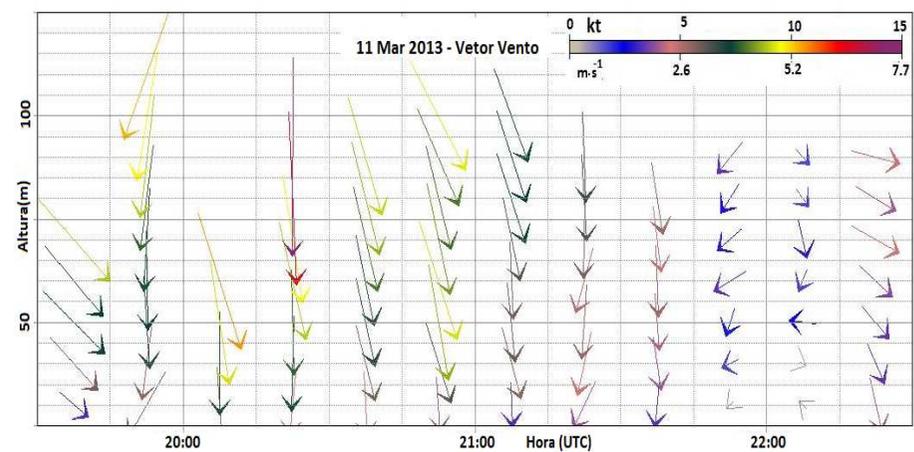
A imagem de satélite descreve uma situação pós-frontal e o METAR informa chuvisco e nuvens a 1000ft, embora no RADAR não haja refletividade. O vento em superfície é de SE entre 5kt e 8kt, mas em altitude muda de ESE a ENE no horário da WS, conforme o perfil vertical do vento horizontal.



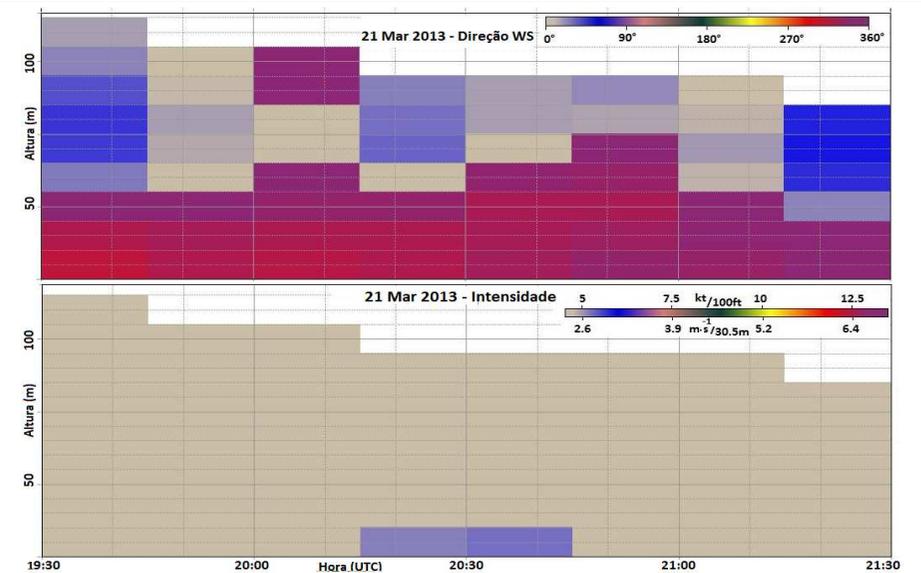
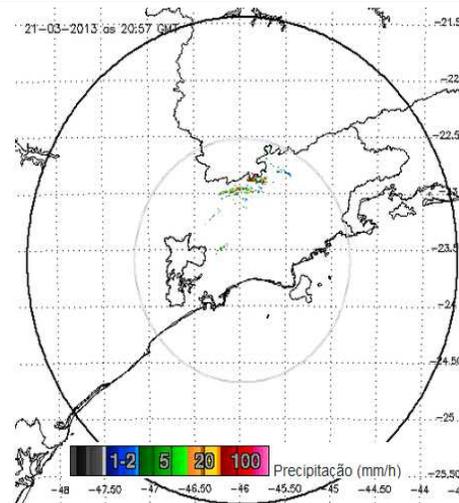
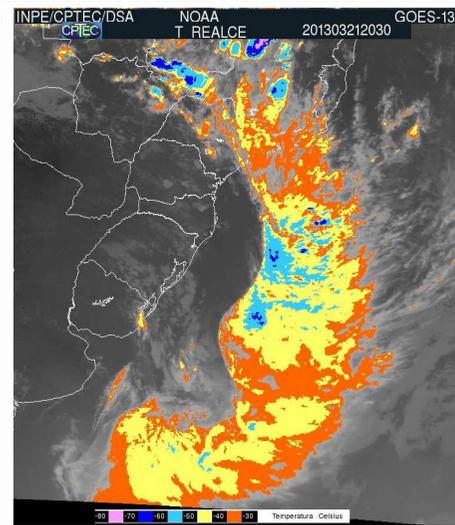
WS Moderado - 11 Mar 2013



De acordo com a imagem de satélite e o RADAR, há uma área de precipitação sobre a região, porém a informação de METAR não possui essa informação, mas informa ventos de oeste a noroeste com velocidades de até 7kt. O perfil vertical apresenta ventos de componente N variando com o tempo de NW a NE, com velocidades máximas entre 10kt e 15kt. Não há informe no SISCOMET.

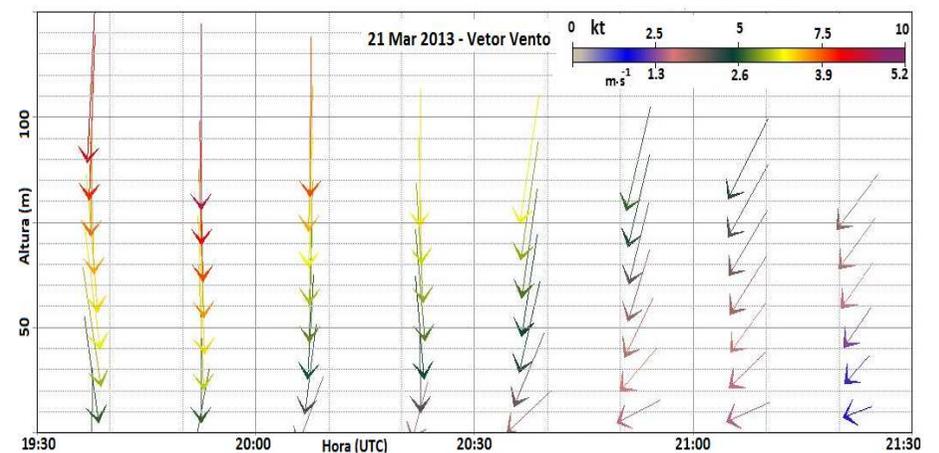


WS Moderado - 21 Mar 2013

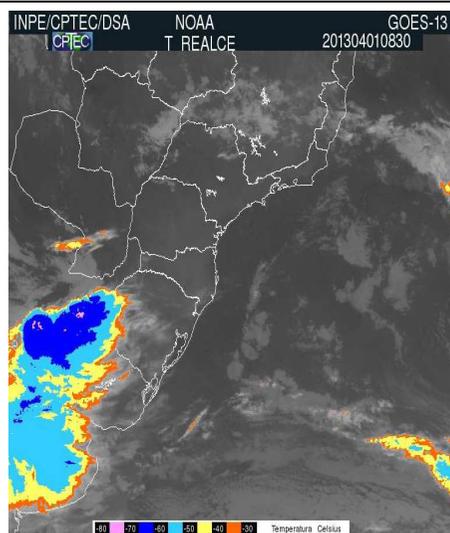


Um sistema frontal característico sobre o sudeste do país fica evidente na imagem de satélite, o qual está associado a um ciclone a sudeste da desembocadura do Rio da Prata; pelo RADAR e METAR, não há precipitação sobre SBGR.

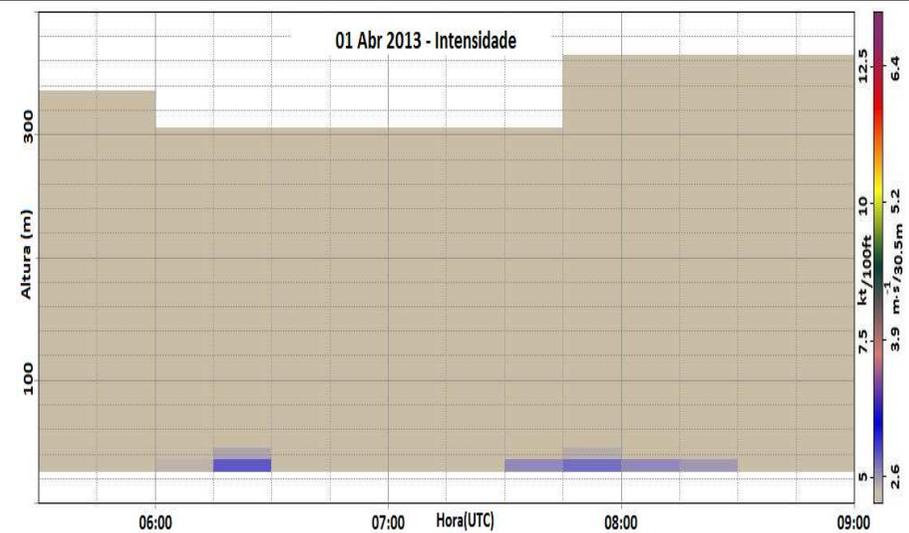
No perfil vertical do vento há velocidade máxima de apenas 10kt com direção de N a NE. E a direção da WS há variação de NNW a NNE com a altura. Observam-se duas faixas de cores diferentes e a delimitação em torno de 50m.



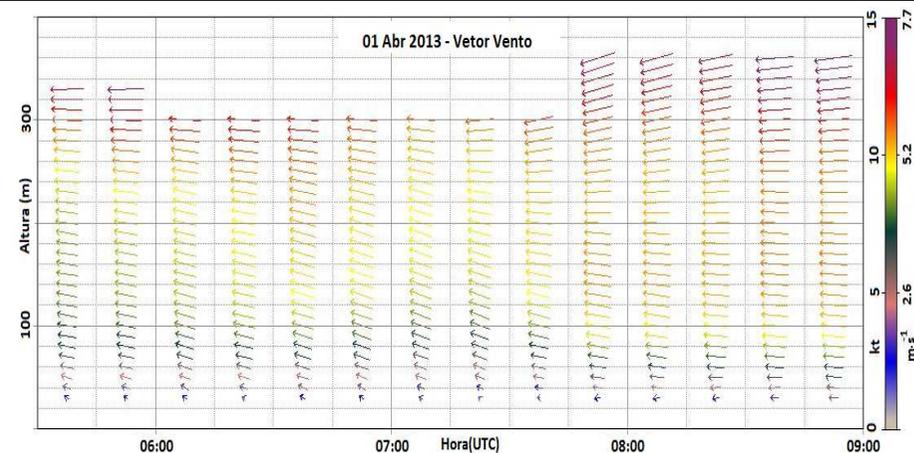
WS moderado - 1 Abr 2013



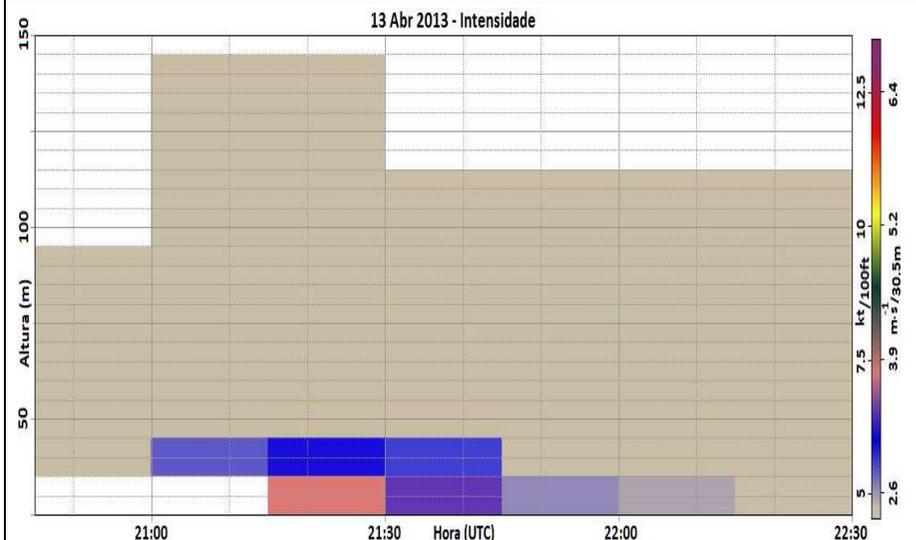
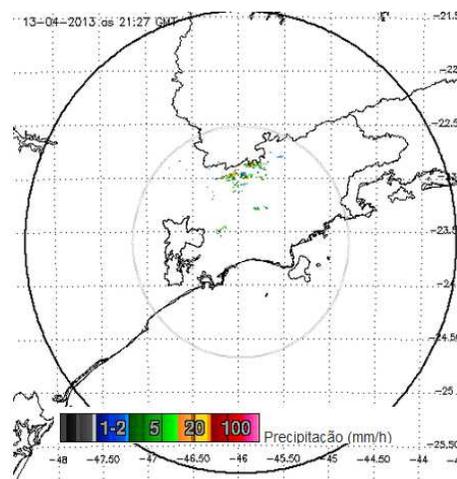
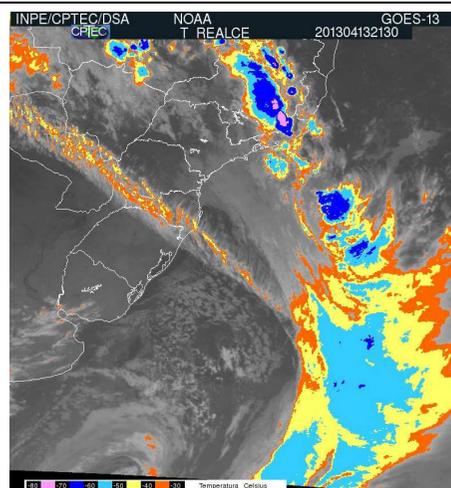
RADAR: Não há refletividade.



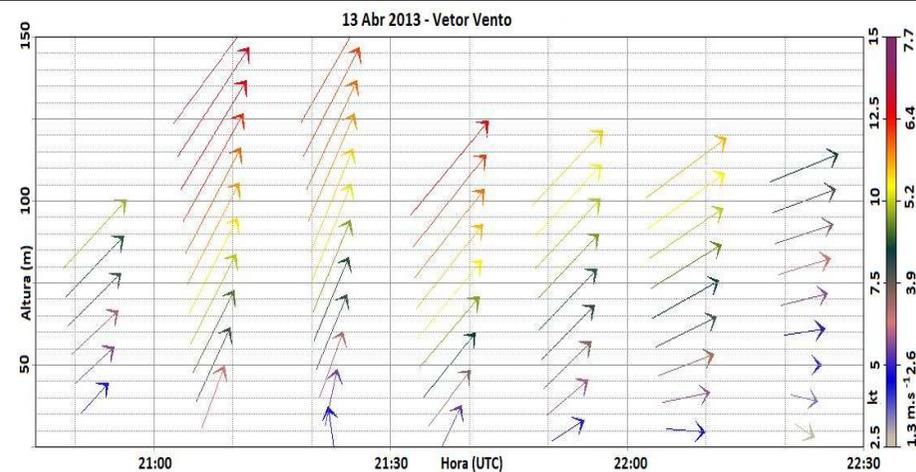
Este é um caso sem sistema frontal sobre a região em estudo, porém o perfil vertical apresenta-se de forma ordenada e velocidade que aumenta gradualmente na direção ESE em níveis mais baixos para direção ENE em alturas mais elevadas. O vento em superfície de componente NE com vento de 3kt.



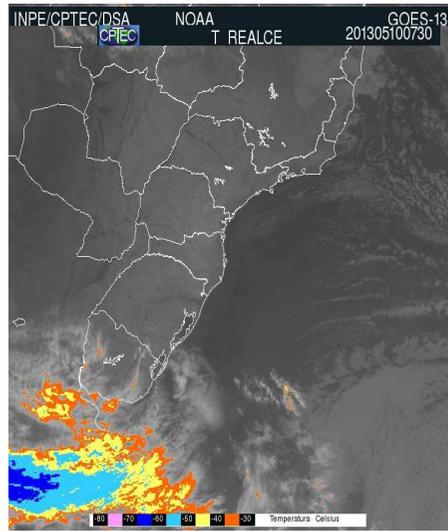
WS moderado - 13 Abr 2013



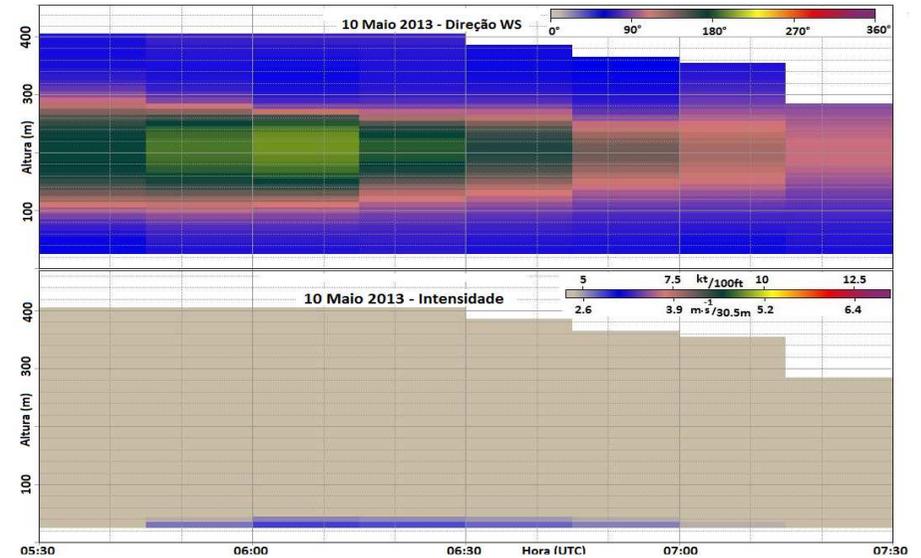
A imagem de satélite mostra um sistema frontal sobre a região com duas faixas de nebulosidade associadas a precipitação: uma ao norte de SP, sobre Rio de Janeiro e Minas Gerais, e outra e ao sul, sobre Santa Catarina. Embora o RADAR não mostre eco sobre SBGR, o METAR informa chuva leve. Os ventos em superfície e em altitude são quase todos de SW, porém o perfil mostra abaixo de 50m componentes de SSE a W. As velocidades não ultrapassam 15kt.



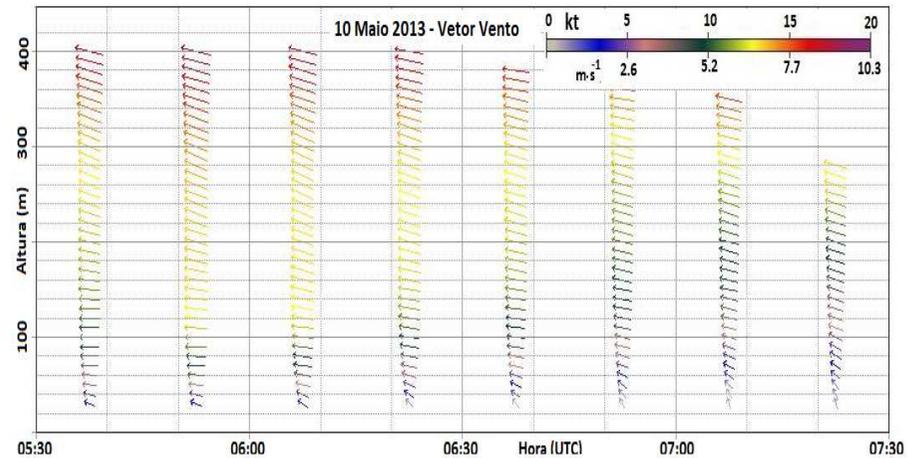
WS moderado - 10 Mai 2013



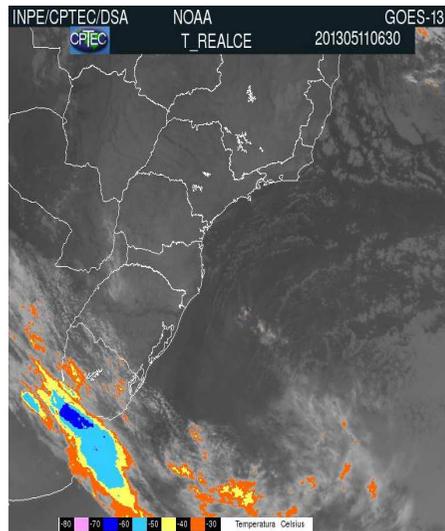
RADAR: Não há refletividade.



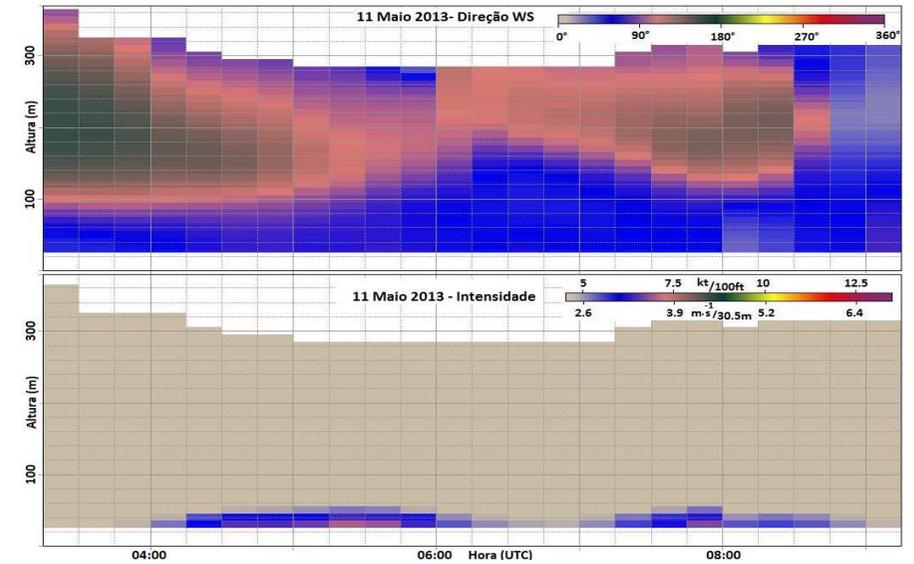
Este caso é semelhante ao do dia 01 de abril de 2013 com ausência de sistema frontal em São Paulo, mas com ventos ordenados de componente E a SE. A faixa muda a coloração, pois o cisalhamento está um pouco mais inclinado para SE. Mesmo assim o padrão é semelhante em termos de forma, ou seja, até 100m há uma direção específica, neste caso de NE, no centro entre 100m e 300m de S (em verde) e logo acima de 300m, novamente de NE (azul). Verifica-se na figura das intensidades da WS que o padrão em direção se desfaz após este período.



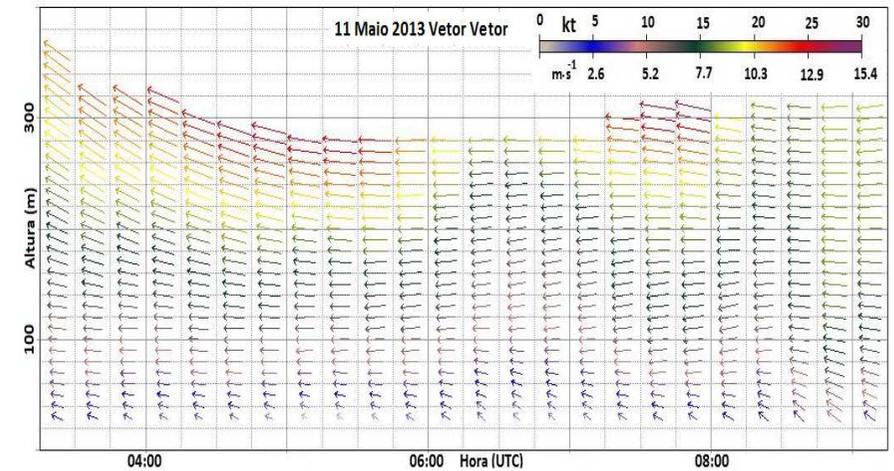
WS Moderado - 11 Mai 2013



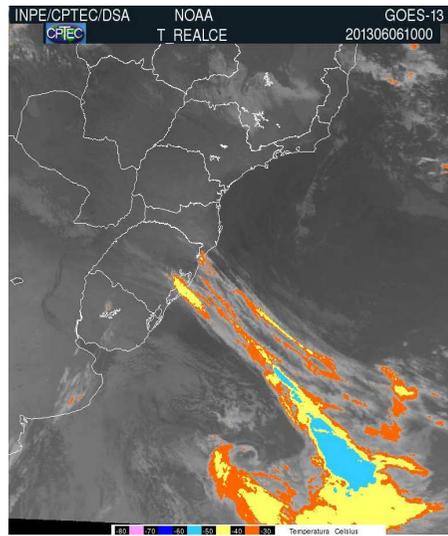
RADAR: Não há refletividade.



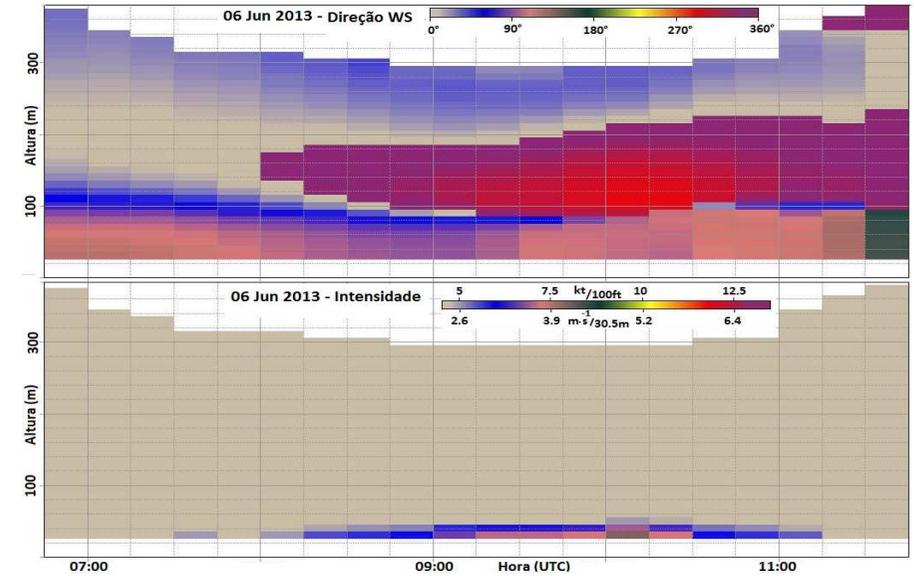
Na imagem de satélite, não há sistema frontal sobre São Paulo. No perfil vertical do vento é nítida a faixa próxima a 100m de ventos com velocidade em torno de 10kt ($5,2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). Logo abaixo, ocorre WS na altura inferior. Nota-se também uma pequena elevação desses ventos de 10kt no horário entre 6UTC e 7UTC o que acompanha com a diminuição da intensidade de WS pelo gráfico. A direção das WS também apresenta essa variação no mesmo modo. Este é um bom exemplo para analisar ocorrências de cisalhamento para previsão.



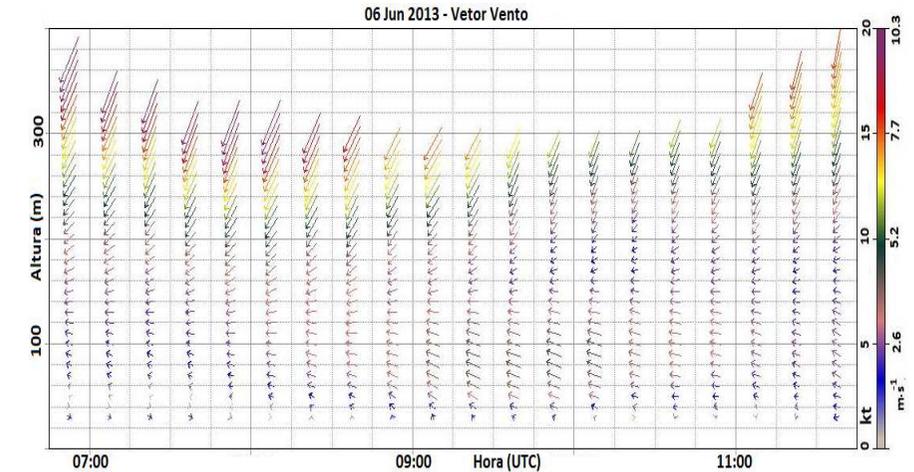
WS Moderado - 06 Jun 2013



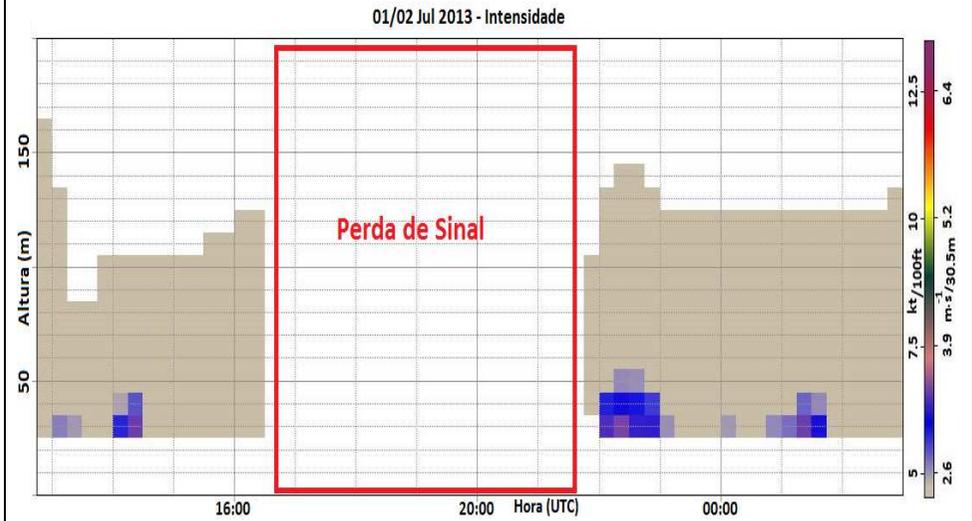
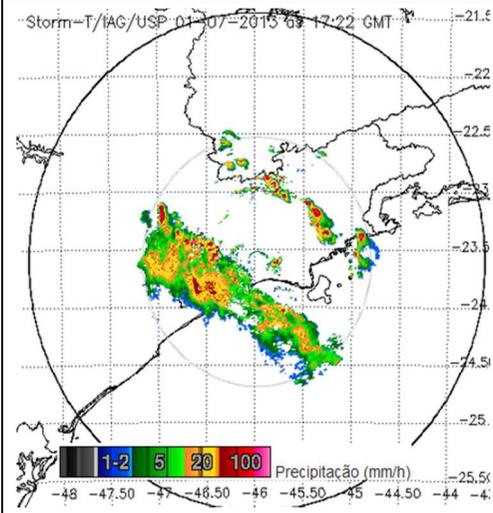
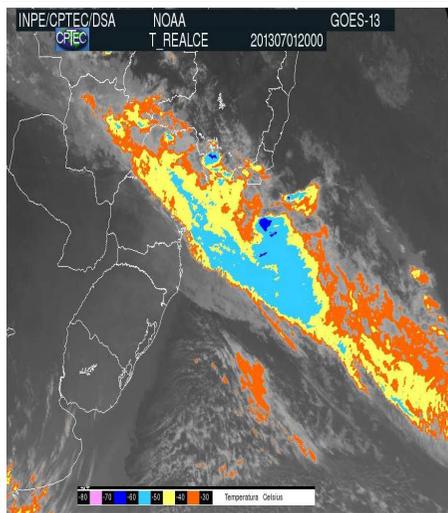
RADAR: Não há refletividade.



Este é mais um caso em que, ao reparar na figura de direção de WS, o observador nota que é provável haver WS abaixo de 100m devido à própria configuração desta direção que apresenta a faixa central entre 100m e 300m de NNW margeada acima e abaixo com outra direção, mesmo que abaixo o vento seja de ESE. Além de verificar que a partir das 8UTC a WS aparece, a figura de intensidade indica logo acima de 100m o “tubo”, a faixa em coloração roxo que se configura.

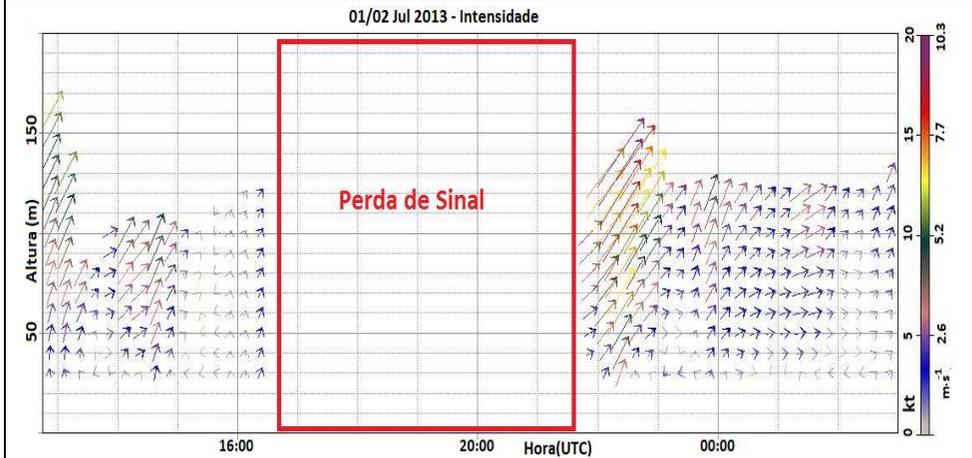


WS moderado - 01-02 Jul 2013

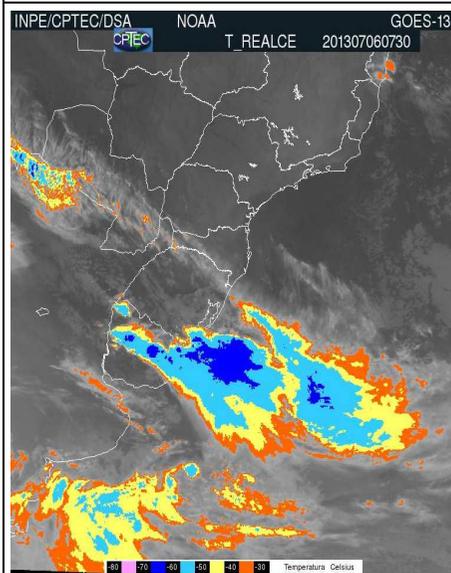


Sistema frontal sobre o estado de São Paulo. Precipitação forte a moderada e trovoada. Perda de sinal, vento de superfície de SW nos níveis vistos no perfil vertical do vento. Observa-se que são frequentes as perdas de sinal nos casos em que há precipitação e vento de componente S em todos níveis e com velocidades acima de 12kt. Há informe de WS no SISCOMET, e às 07:15 UTC há a informação:

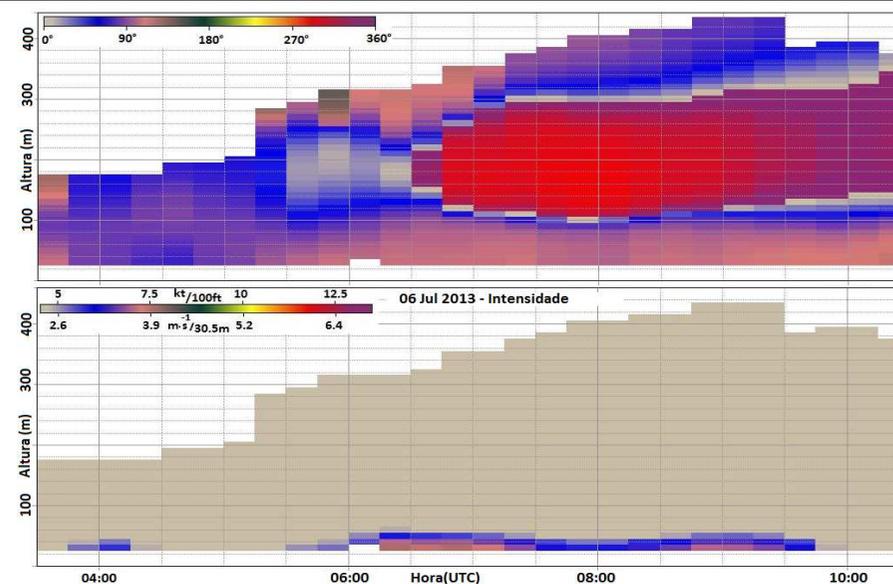
SPECI SBGR 010727Z 26012KT 2500 TSRA BKN006 SCT030CB 16/15 Q1021 WS R27R= .



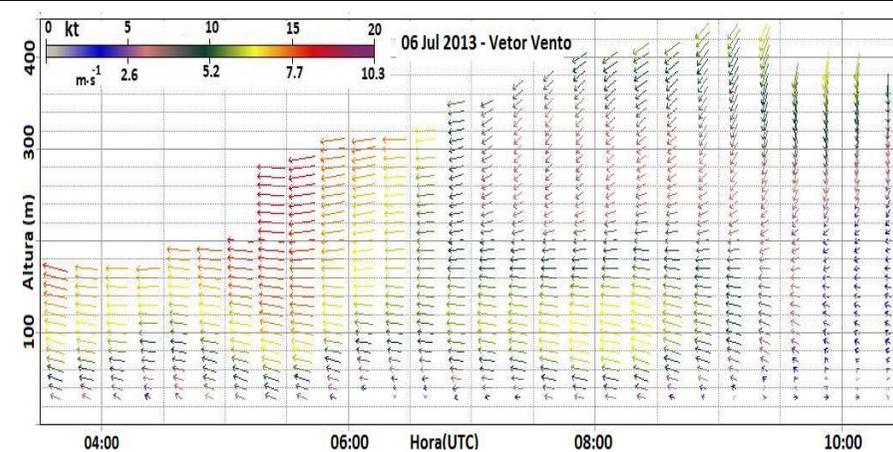
WS Moderado - 06 Jul 2013



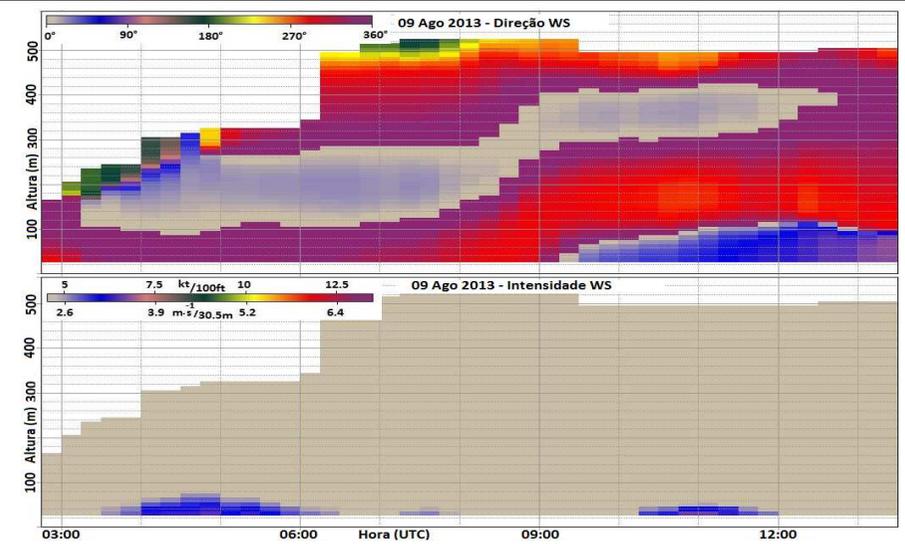
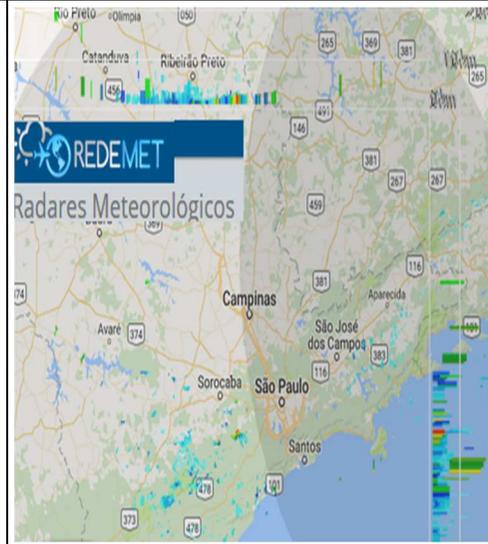
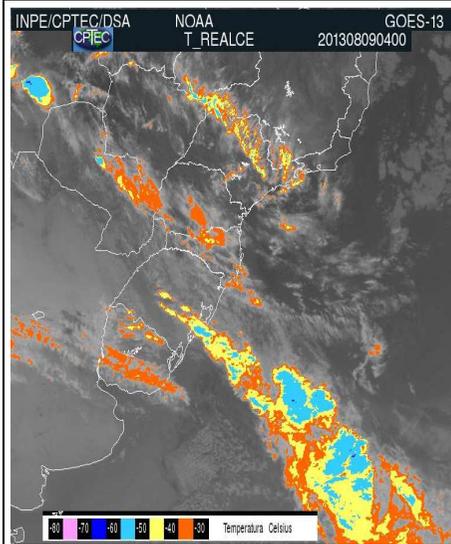
RADAR: Não há refletividade.



A direção da WS mostra a faixa entre 100 m e 300 m margeada com direções diferentes abaixo de 100 m e acima de 300 m com WS moderado abaixo de 100 m, como observado na figura de Intensidades.



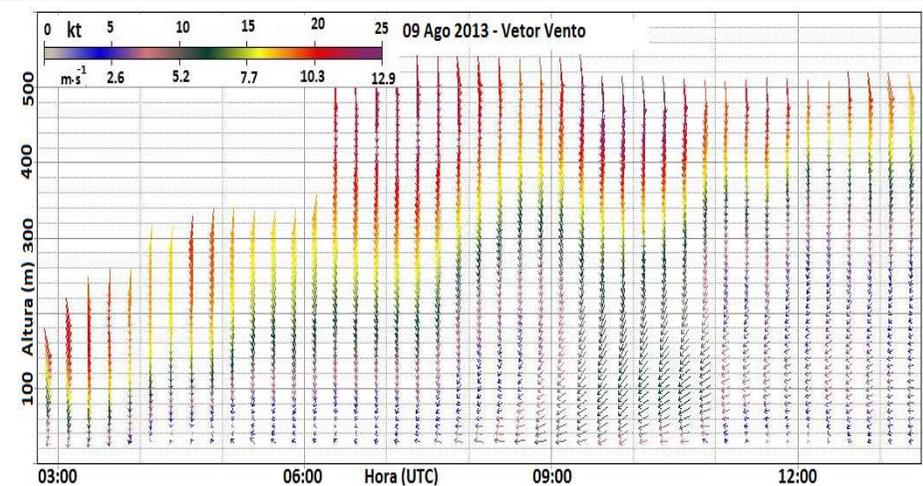
WS Moderado - 09 Ago 2013



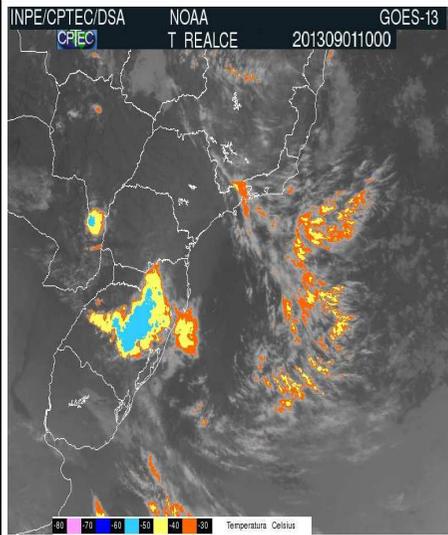
A imagem de satélite mostra uma área de instabilidade no estado de São Paulo que afeta especificamente o aeroporto de SBGR. Apesar desta nebulosidade, o METAR informa CAVOK durante todo o dia, ou seja, visibilidade acima de 10km, nenhuma nuvem abaixo de 1500m e sem tempo presente. Ventos de superfície de até 9kt ($4,8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) e de acordo com o METAR das 03:00UTC:

METAR SBGR 090300Z 01009KT CAVOK 21/12 Q1018=

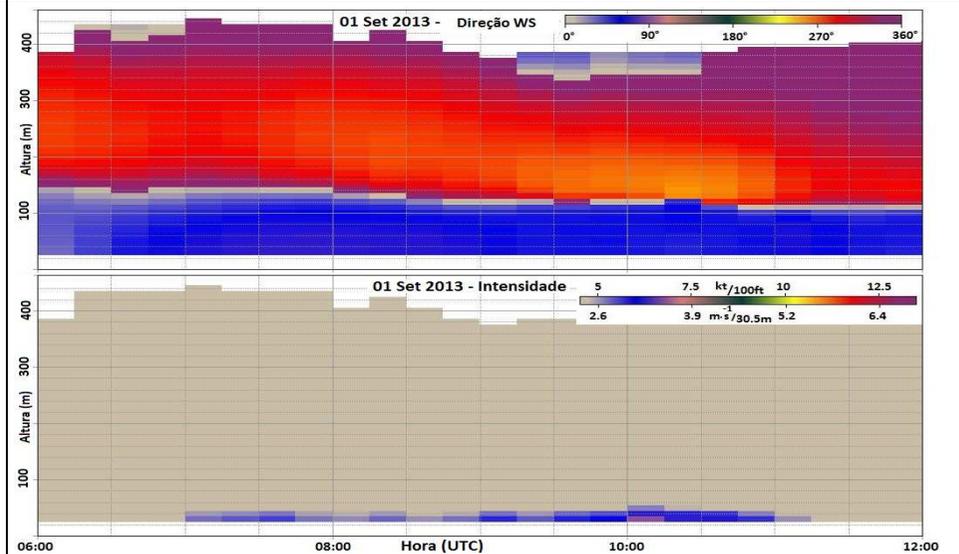
Verifica-se no perfil vertical que a velocidade dos ventos diminuem com a diminuição de altura à medida que o tempo passa, visível nas faixas em verde, amarelo e vermelho. Os ventos são de norte em níveis mais altos e giram no sentido horário em direção à superfície. Há faixas de direção da WS bem definidas nos dois períodos que ocorrem WS. Elas possuem características semelhantes e úteis para uma previsão, mas é necessário análise de forma individual.



WS Moderado - 01 Set 2013



RADAR: Não há refletividade.

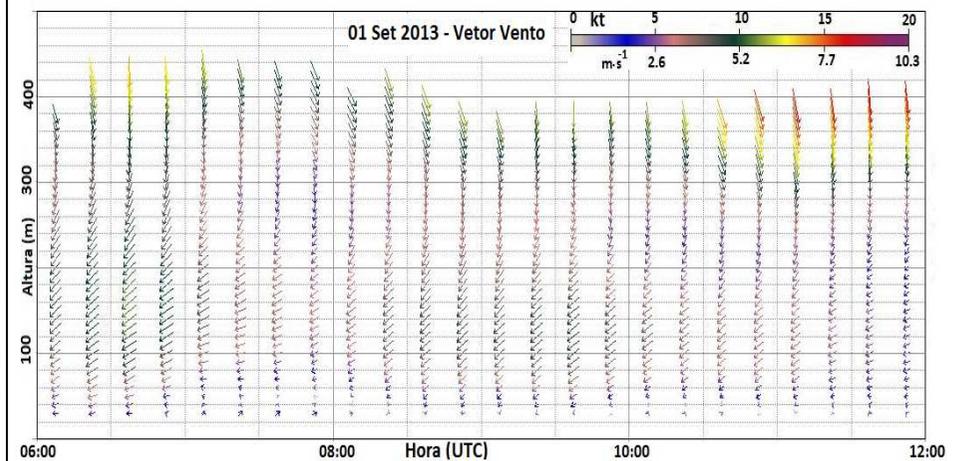


A imagem de satélite não apresenta instabilidade sobre SBGR nem eco no RADAR meteorológico. As informações de METAR são semelhantes às do dia 09/08/2013, ou seja, não há tempo presente, ventos não ultrapassam 7kt e sempre CAVOK.

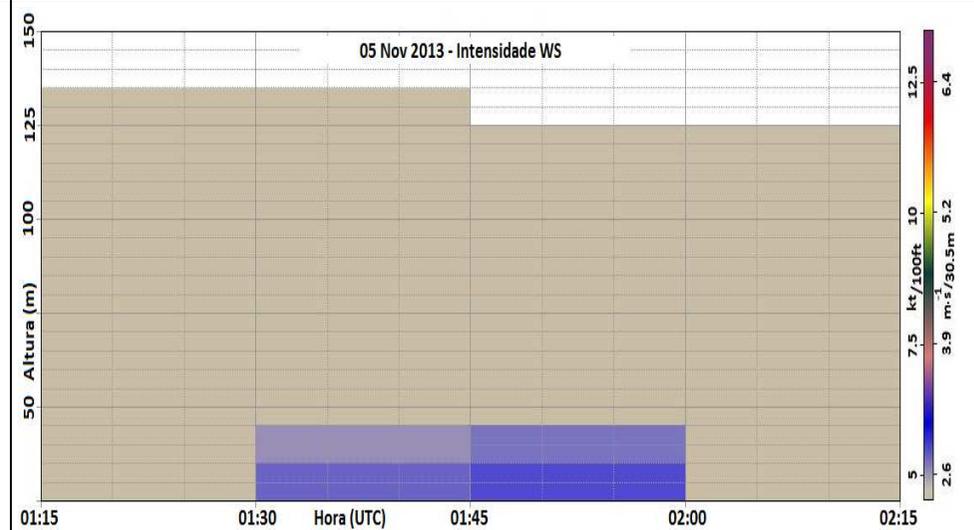
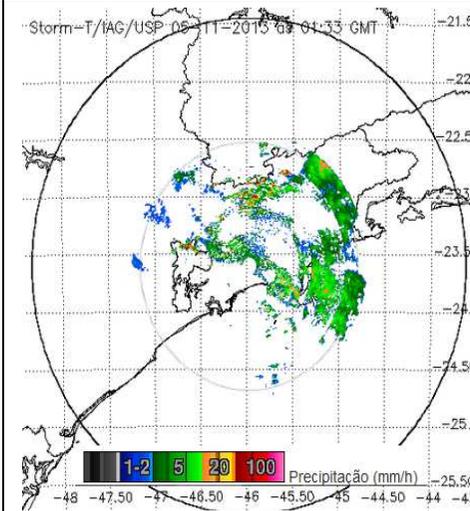
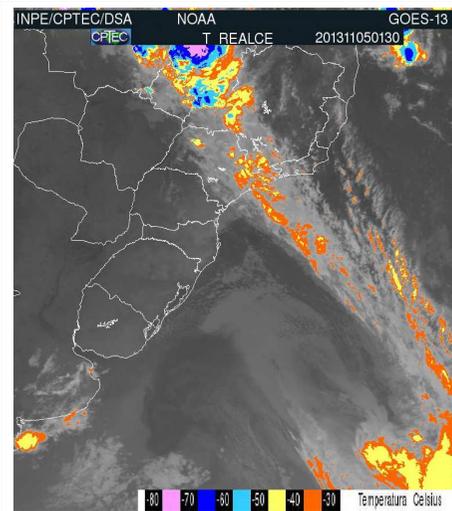
METAR SBGR 011000Z 09003KT CAVOK 13/11 Q1020=

A direção da WS é semelhante àquela do dia 09/08/2013 e reflete as mesmas características: a altura de 100m é o limiar da mudança brusca da direção entre NE (cor azul) e NW (cor vermelha) e o vetor dos ventos gira no sentido horário no sentido em que se aproxima da base das alturas.

A duração de 4 horas do evento é vista no gráfico de intensidade, o qual não ultrapassa a altura de 100m. Nota-se que os ventos não necessariamente atingem velocidades superiores a 15kt.



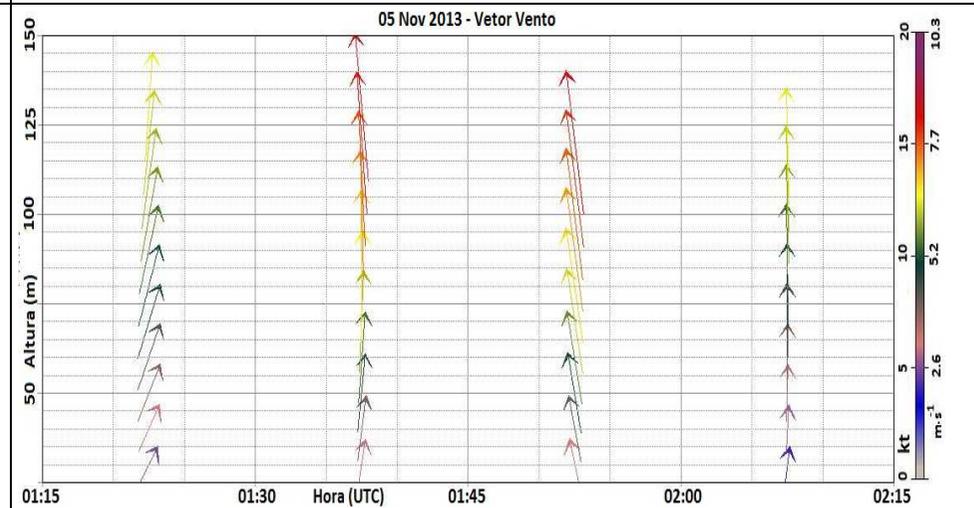
WS Moderado - 05 Novembro 2013



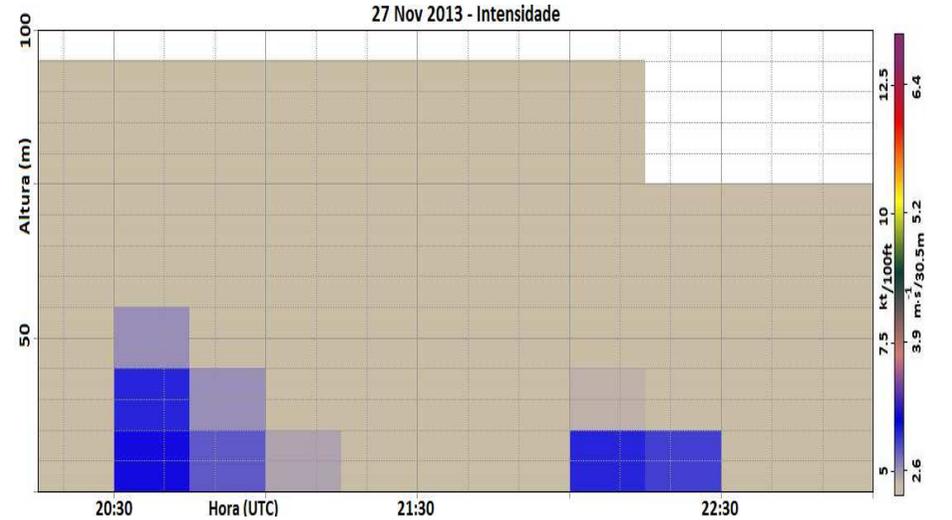
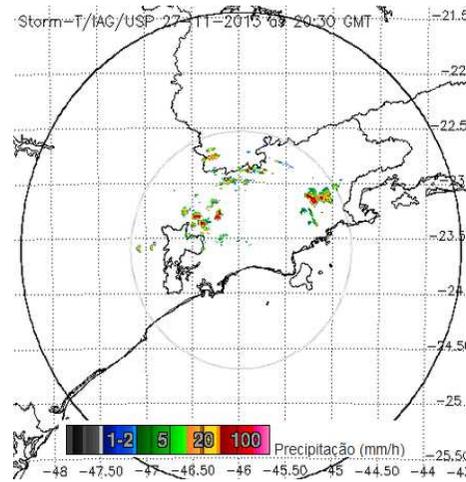
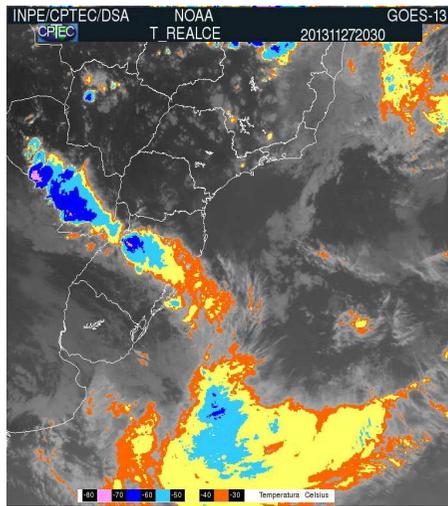
A imagem de satélite descreve um sistema frontal sobre a região e pode-se observar no RADAR refletividade que caracteriza chuva leve, confirmado pelo METAR.

METAR SBGR 050200Z 19004KT 5000 -RA BR BKN009 OVC015 16/15 Q1017=

Além disso, o METAR informa vento de 190° (SSW) com 04kt, visibilidade horizontal de 5000m, chuva leve (-RA) e névoa úmida (BR) com base de nuvem a 900ft e nublado (BKN009). O gráfico de intensidade delimita a WS das 01:30 às 02:00 e não atinge 50m de altura. O perfil vertical do vento informa ventos de componente S, variando de SE a SW e a velocidade varia de 5kt a 30m até 20kt em 150m, ou seja, uma variação de 15kt em 120m. Não informado WS no SISCOJET.



WS moderado - 27 Nov 2013



As imagens de satélite e de RADAR apresentam áreas de precipitação a NE da cidade de São Paulo, próximo a SBGR. A informação de METAR / SPECI reporta chuva leve (-RA) e trovoada (TS):

METAR SBGR 272000Z 19010KT 140V240 4000 -RA HZ BKN020

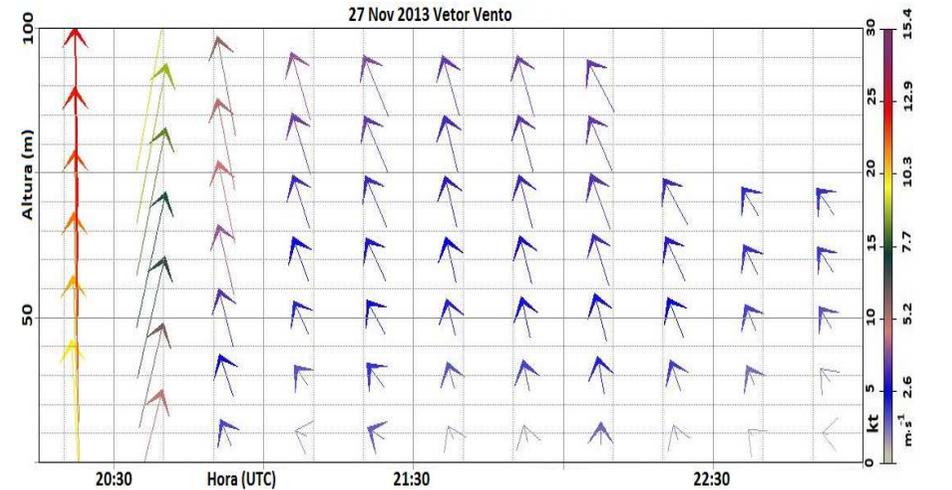
FEW050TCU BKN080 23/19 Q1009=

SPECI SBGR 272016Z 19007KT 130V230 4000 -TSRA BR BKN013

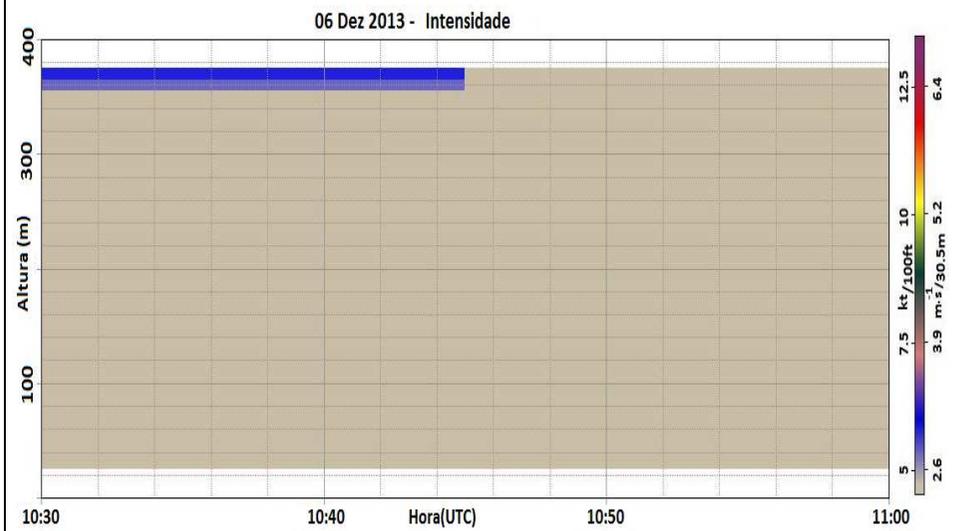
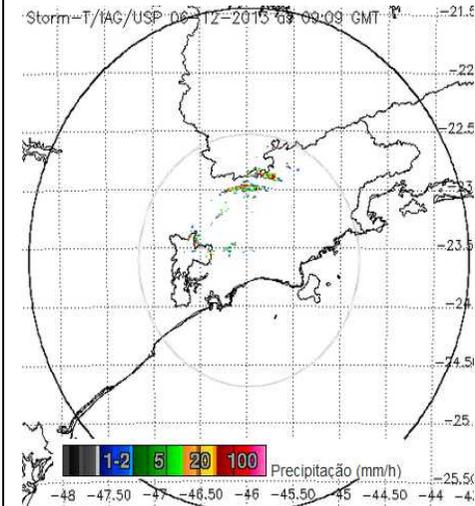
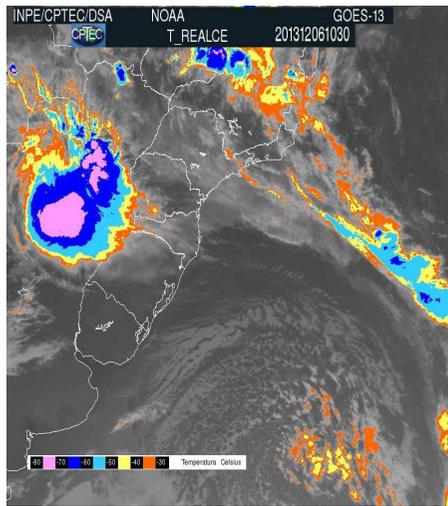
FEW040CB 22/19 Q1009 WS R09L=

Base de nuvens a 1300ft, ventos de 190° (SSW) com 10kt (~ 5.2m.s⁻¹) e informe de WS na cabeceira 09 da esquerda (WS R09L).

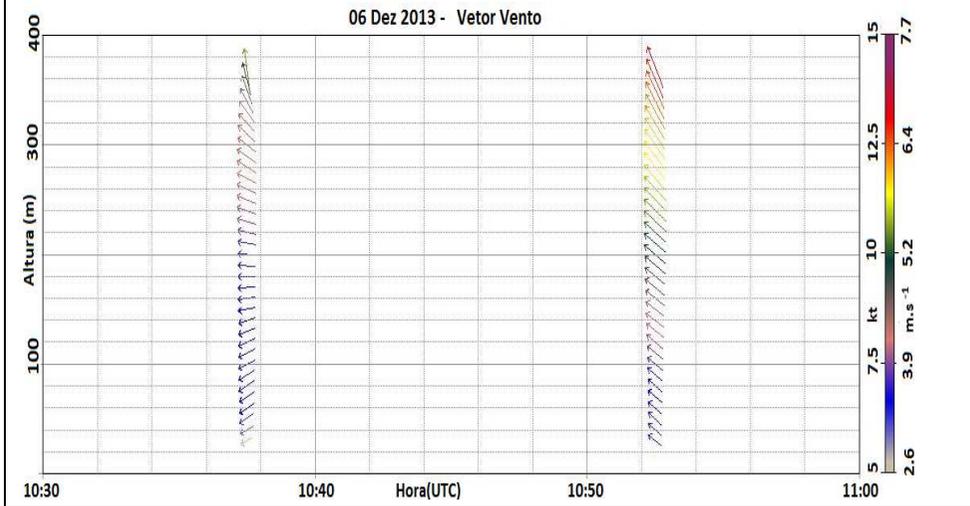
No perfil vertical do vento tem-se uma diminuição da velocidade à medida que os minutos transcorrem. Há uma variação de aproximadamente 10kt de 30m a 100m de altura de componente S.



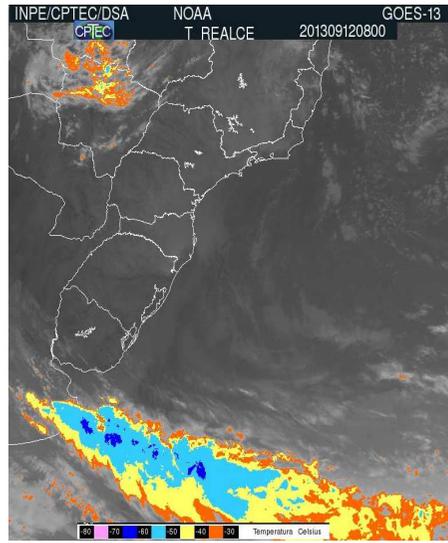
WS moderado - 06 Dez 2013



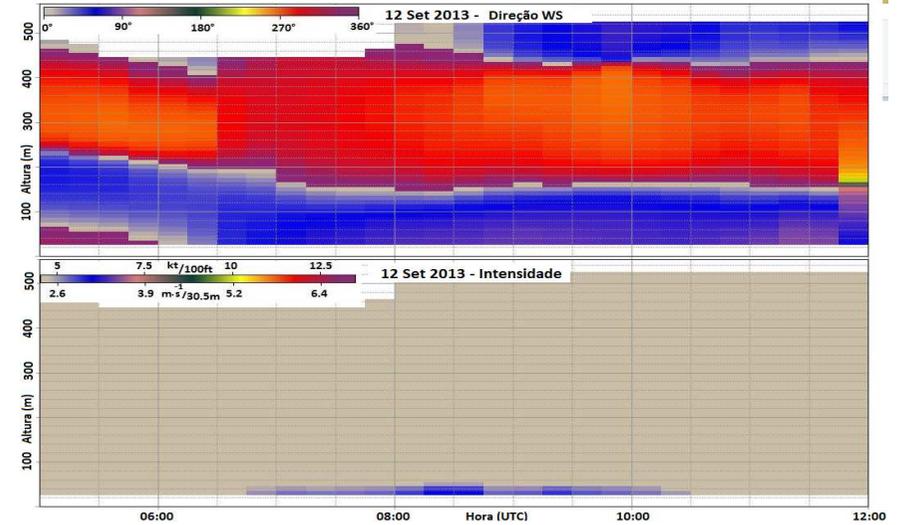
A imagem de satélite mostra um sistema frontal sobre a região de interesse. Das 10:00 às 11:00 o vento em superfície muda de direção de NE para SE. Há nebulosidade baixa de 1100ft (~330 m), visto no METAR. Este é um raro caso em que a WS está acima de 100m. O RADAR mostra eco na região próxima ao Aeroporto de Guarulhos, mesmo assim não há informe de precipitação conforme METAR.



WS Moderado - 12 Set 2014



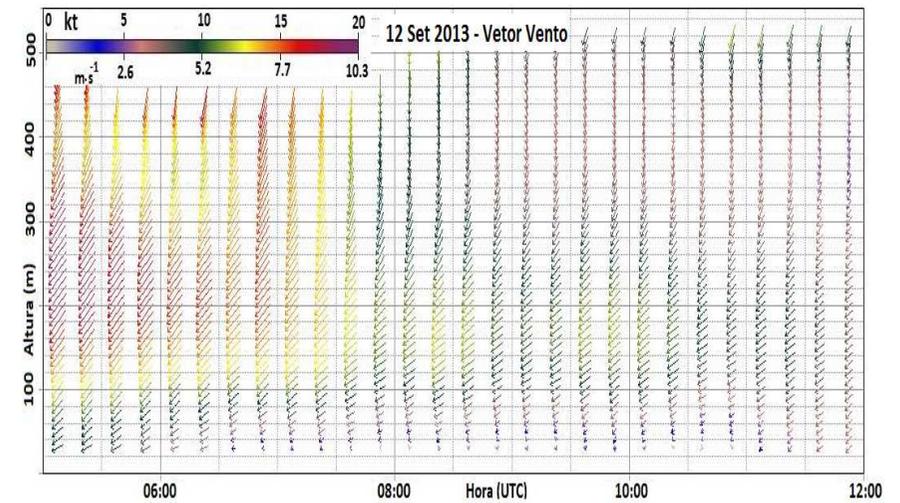
RADAR: Indisponível.



A Imagem de satélite mostra uma instabilidade ao sul do Brasil. Não há precipitação confirmada pelo METAR nem pelo RADAR.

METAR SBGR 120800Z 07004KT CAVOK 14/13 Q1020=

A intensidade da WS mostra que o fenômeno inicia às 06:45 e termina às 10:30. Nesse período o sistema de estratificação das faixas de NE (azul) e NW (vermelho) se define em torno das 05:45 e a partir das 11:30 há uma mudança do parâmetro, enfatizando uma faixa de segurança para previsão de início e fim de WS entre 1h e 2h.



4. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Considerando a grande quantidade apresentada de resultados compilados (382 casos moderados, 47 fortes e 6 severos)⁴, torna-se necessário discuti-los de forma única e organizada.

Do ponto de vista das situações meteorológicas com potencial de causar *windshear*, foi possível notar que a esmagadora maioria dos casos esteve associada à presença de convecção ou então a situações pré-frontais ou frontais sobre o aeródromo. Essas condições são notórias entre os observadores e pilotos, uma vez que instabilidades atmosféricas são comuns nestes casos, o que faz com que estes profissionais estejam, de certo modo, em alerta para situações de risco. Além destes, também ocorreram casos com a presença de complexos convectivos de mesoescala sobre a Região Sul do Brasil.

Em geral, estas situações relacionadas a casos severos e fortes de cisalhamento do vento ocorrem em função da intensificação do fluxo de componente norte sobre o Aeroporto de Guarulhos, o qual interage com a topografia da Serra da Cantareira originando o fenômeno.

No entanto, casos de *windshear* com intensidade forte e moderada podem ocorrer em situações não necessariamente associadas a condições frontais ou pré-frontais. Foram detectadas inúmeras situações pós-frontais em que o vento gira de SE para NE à medida que a altura aumenta, como o dia 7 de julho de 2013, ou com predomínio de SE em todos níveis, caso de 13 de abril de 2013, e isso pode produzir um evento de *windshear* independentemente da interação com a orografia dos arredores. Estes casos distinguem-se dos eventos severos e fortes mencionados no parágrafo anterior, pois os profissionais envolvidos não necessariamente estão com grau elevado de atenção quando comparado com as situações evidentemente instáveis.

Outro ponto relevante diz respeito à intensidade do vento de superfície, pois a intensidade do cisalhamento independe do escoamento superficial apenas. Além disto, detectaram-se casos moderados apesar de intensidades inferiores a 16kt ($\sim 8.23 \text{ m.s}^{-1}$) em todo perfil do vento. Isso faz com que as medições diretas pelo

4 Base de dados do SODAR da cabeceira 27 a qual há maior acervo contínuo.

SODAR sejam cruciais e imprescindíveis para o monitoramento deste tipo de situação.

É relevante identificar o padrão que, em muitos casos, apresenta uma faixa central com direção do cisalhamento de NW, acima de 100m de altura que auxilia a previsão de WS em até 2 horas de antecedência. Convencionou-se neste trabalho chamar tal faixa de tubulação ou tubo, em função de sua aparência nos gráficos. Há uma característica padrão em que este “tubo” se estabelece:

- geralmente entre 100m e 300m de altura;
- gera WS abaixo de 100m, que em muitos casos permanece por horas, perdurando durante a maior parte do tempo em que exista esta forma de tubulação;
- no perfil vertical dos ventos é comum as velocidades não ultrapassem 15kt em casos moderados e 20kt nos casos fortes;
- a direção dos ventos possuem um discreto giro horário no sentido para o solo;
- em muitos casos havia um sistema convectivo no sul do país, enquanto no estado de São Paulo não há atividade convectiva.

Conforme citado nas descrições anteriores, na maior parte dos casos este tubo forma-se entre 1 e 2 horas antes do primeiro sinal de WS, aproximadamente. Não foram detectados casos em que houve este tubo e pelo menos três dos tópicos acima não tenham sido identificados. É importante salientar a ausência deste tubo para situações de intensidade severa.

Através das informações comparadas entre SODAR e SISCOMET, mesmo em um curto período do tempo, conclui-se que o fenômeno estudado sempre foi subestimado em quantidade e pouco conhecido em relação à sua intensidade. Vale salientar a identificação da frequência diária de passageiros por aeronave com relação à porcentagem de fenômeno nos quatro períodos do dia.

5. LIMITAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A falta de equipamentos mais sofisticados nos aeroportos brasileiros, como LLWAS que mensura a média do vento em superfície – direção e velocidade – e RADAR Doppler, ambos presentes em alguns dos grandes aeroportos do mundo como nos Estados Unidos e Alemanha, para melhorar a análise e a prevenção de acidentes é um fator a ser considerado para o futuro aeroportuário no país, uma vez que o SODAR é sensível a interferências externas como temperatura, umidade/precipitação e som externo os quais podem atenuar o sinal a tal ponto de acarretar na perda total, conforme identificados em alguns casos já apresentados.

Aeroportos que têm como auxílio um Radar Doppler, são capazes de identificar e alertar órgãos de controle de tráfego aéreo (ATC) de uma iminente *microburst*, por exemplo. O aeroporto da cidade de Nova York (sigla ICAO: KJFK) possui LLWAS que alerta ao órgão ATC, isto possibilita à Torre de Controle (TWR) informar às aeronaves, antes mesmo delas atingirem a área aeroportuária, possibilitando cancelar o pouso, cujo termo aeronáutico é arremeter a aeronave, e evitar um propenso acidente. Por fim, ao término do alerta, as aeronaves podem retornar ao procedimento anterior e aterrissar com maior segurança. Tal procedimento proveniente desse equipamento ainda não é uma realidade em nosso país. No entanto, com treinamento dos profissionais de controle de tráfego aéreo e meteorologia e aperfeiçoamento do uso do SODAR também em Torres de Controle, é possível diminuir o risco de acidentes.

Como a cada ano há mais dados de SODAR, sugere-se para trabalhos futuros uma análise de um período de tempo maior. Outro ponto relevante para ser examinado é a inserção deste perfil de vento em simulações numéricas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASIAS, *Federal Aviation Administration* (FAA). Weather-related Aviation Accident Study 2003–2007. Fev 2010. Disponível em <<http://www.asias.faa.gov>>. Acesso em: 11 nov. 2015.

BOLETIM DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE METEOROLOGIA. *A Meteorologia e a Aeronáutica*, vol.29, nº3, nov. 2005. Disponível em: <<http://www.sbmet.org.br/>>. Acesso em: 20 nov. 2013.

BEAUDETTE, D.C., *Advisory Circular, U.S Department of Transportation, Federal Aviation Administration (FAA), AC00-54*, p.1-56, nov. 88. Disponível em: <http://www.faa.gov/regulations_policies/advisory_circulars/index.cfm/go/document.information/documentID/22291>. Acesso em: 27 dez. 2013.

BRASIL. *EMBRAPA. Curvas SRTM*. Disponível em <<https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/basedados.php>>. Acesso em: 24 mar. 2015.

BRASIL., INFRAERO Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária. *Anuário Estatístico Operacional 2012*. Disponível em: <<http://www.infraero.gov.br/index.php/br/estatisticas/estatisticas.html>> Acesso em : 15 mar. 2014

BRASIL., DECEA Departamento de Controle do Espaço Aéreo. *Anuário Estatístico de Tráfego Aéreo 2015*. Disponível em: <http://www.cgna.gov.br/wp-content/themes/cgna/documentos/do/anuarios/anuario_2015.pdf> Acesso em : 10 jan. 2017

CERQUEIRA F.S. et al. Ameaça à Aviação. *Revista CFOE*. p. 94. 2005. Disponível em <http://www.redemet.aer.mil.br/uploads/2014/04/ameaca_a_aviacao.pdf>. Acesso em : 20 fev. 2015.

COULTER R.L. and Kallistratova M. A., Two decades of progress in SODAR techniques: a review of 11 ISARS proceedings, 2003.

LITTLE C.G., Acoustic Methods for the Remote Probing of the Lower Atmosphere. *PROCEEDING OF THE IEEE*. VOL. 57. Nº. 4 , APRIL, p.571-578. , april,1969.

LIMA, R.S. Correlação de Vento de Rajadas com Variáveis de Superfície. INSTITUTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO – ICEA, p.21, jun.2008 Disponível em: <http://www.redemet.aer.mil.br/Artigos/rajada_sup_sbgr.pdf>. Acesso em: 02 fev. 2015.

FOGACCIA, C.V.C. Análise de eventos de turbulência e cisalhamento do vento na área do Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos. 2001. IV f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Departamento De Ciências Atmosféricas Instituto Astronômico e Geofísico Universidade De São Paulo, 2001.

FUJITA, T.T.; CARRACENA, F. An analysis of three weather-related aircraft accidents. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, v. 58, p. 1164-1181. 1977.

MANUAL ICAO: On Low-level Wind Shear, Doc 9817 AN/449, First edition, 2005.

FOKEN, T. *Micrometeorology*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. 06 p.

HARRIS C.M., Absorption of Sound in Air versus Humidity and Temperature. *The Journal of the Acoustical Society of America*, p.157, Feb, 1966. Disponível em: < <https://ccrma.stanford.edu/~joh/HarrisJASA66.pdf>>. Acesso em: 15 fev. 2016.

MCA 101-1/2015 - Instalação de Estações Meteorológicas de Superfície e de Altitude. Disponível em < <http://www.redemet.aer.mil.br> >. Acesso em 25 ago.2015.

MATSCHINSKE, M.R.; FREITAS, J.C. de. *Departamento de Controle do Espaço Aéreo- DECEA, Subdepartamento de Operações, windshear. 2012.* Disponível em < <http://www.redemet.aer.mil.br> >. Acesso em : 12 fev. 2014.

NASDAC, FAA Office of System Safety. *Review of Aviation Accidents Involving Weather Turbulence in the Unites States 1992 –2001.* Aug. 2004, [Reference Number: 04-551], Disponível em < www.nasdac.faa.gov>. Acesso em 11 nov.2015.

SILVA, W.L.; ALBUQUERQUE, F.; CARELLI J. *Curso ministrado na INFRAERO, dezembro de 2013.*

SITE AISWEB. Disponível em: < www.aisweb.aer.mil.br >. Acesso em 10 mar. 2015.

SITE MASTER. Disponível em: < www.master.iag.usp.br/http://master.iag.usp.br/pr/ensino/sinotica/aula01/ >. Acesso em: 02 fev. 2015.

SITE AVIÕES E MÚSICAS. Disponível em: < <http://www.avioesmusicas.com/> >. Acesso em 20 nov. 2014.

SITE REDEMET. Disponível em: < <http://www.redemet.intraer/windshear.php> >. Acesso em: 06 jan. 2014.

SITE Scintec. Disponível em: <http://www.scintec.com/english/CustomUpload/3740357034003700356036903500340036503600373035603690370037203640/MFAS_2012.pdf>. Acesso em 15 abr. 2014.

SITE SmartCockpit. Disponível em: <<http://www.smartcockpit.com/>>. Acesso em: 12 jan. 2014.

SITE University of Notre Dame. Disponível em: <<http://www3.nd.edu/~dynamics/efd/sodar.html>>. Acesso em: 06 jan. 2014.

SITE University of Salford Manchester. Disponível em: . Acesso em: 06 jan. 2014.

Scintec Flat Array Sodar – Hardware Manual Version 1.01.Ed. 2012. Disponível em: <<http://www.scintec.com/english/web/Scintec/>> Acesso em: jan.2014.

Scintec Flat Array Sodar - Software Manual APRun. version 1.22. october, 2010. Disponível em: <<http://www.scintec.com/english/web/Scintec/>> Acesso em: jan.2014.

SOUZA, Cleber Afonso de. *ASPECTOS SINÓTICOS ASSOCIADOS À OCORRÊNCIA DO JATO EM BAIXOS NÍVEIS NA AMÉRICA DO SUL - REANÁLISE NCEP/NCAR E SIMULAÇÃO COM O MCGA CPTEC/COLA.* 2010. 36 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – INPE, São José dos Campos, 2010. Disponível em: < <http://mtc-m16c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/jeferson/2005/05.17.11.24/doc/publicacao.pdf> >. Acesso em: 15 mar. 2014.

VILLELA, R.J. *Fique longe dos Cbs. Aeromagazine*, ano 8, n. 87, p. 32-34. 2001.

VILLELA, R.J. *Fator surpresa – O acidente de Kano, na Nigéria, foi o precursor da investigação sobre os efeitos do wind shear nas fases de aproximação e decolagem.* Aeromagazine, ano 9, n. 99, p. 26-27. 2002.