



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS FÍSICAS E MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

Daniel Adami Dutra

Análise da formação de “avenidas de nuvem” (*cloud streets*) no sul do Brasil

Florianópolis

2019

Daniel Adami Dutra

Título: Análise da formação de “avenidas de nuvem” (*cloud streets*) no sul do Brasil

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Meteorologia do Centro de Ciências Físicas e Matemáticas da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Meteorologia.
Orientador: Prof. Dr. Renato Ramos da Silva

Florianópolis

2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Adami Dutra, Daniel

Análise da formação de "avenidas de nuvem" (cloud streets)
no sul do Brasil / Daniel Adami Dutra ; orientador, Renato
Ramos da Silva, 2020.

77 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências
Físicas e Matemáticas, Graduação em Meteorologia,
Florianópolis, 2020.

Inclui referências.

1. Meteorologia. 2. Avenidas de Nuvem . 3. Região Sul
do Brasil . 4. Camada Limite Planetária. 5. Razão de
Aspecto. I. Ramos da Silva, Renato. II. Universidade
Federal de Santa Catarina. Graduação em Meteorologia. III.
Título.

Daniel Adami Dutra

Análise da formação de “avenidas de nuvem” (*cloud streets*) no sul do Brasil

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Meteorologia” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Meteorologia.

Prof. Dr. Wendell Rondinelli Gomes Farias

Coordenador do Curso de Meteorologia

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Renato Ramos da Silva

Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Wendell Rondinelli Gomes Farias

Avaliador

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Sylvio Luiz Mantelli Neto

Avaliador

Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 2019.

Dedico este trabalho aos meus pais Cláudio Jacobus Dutra (em memória) e Ione Maria Adami Dutra (em memória), por seus ensinamentos que me levaram a avançar em mais uma etapa da vida. Dedico este trabalho também, aos meus irmãos por seu apoio e incentivo a minha caminhada nesta fase acadêmica, aos meus filhos pelo exemplo de dedicação aos estudos, a minha esposa por me ajudar a me conhecer melhor nestes últimos anos e aos colegas e amigos que me apoiaram com entusiasmo, tornando esta minha passagem acadêmica um período de grande contentamento.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado este presente que é o curso de Meteorologia e especialmente aos meus pais Cláudio Jacobus Dutra (em memória) e Ione Maria Adami Dutra (em memória) pela vida, por compartilharem suas sabedorias e experiências, pela dedicação e empenho em garantir-me sustento e incentivarem-me a sempre aprender mais e nunca desistir. Saudades eternas.

A minha esposa, Miriam Reck Dutra e aos meus filhos Matheus Reck Dutra e Lucas Reck Dutra por me apoiarem e darem o exemplo de dedicação e foco nos estudo e pelo sacrifício despendido, além de todo apoio e carinho.

Aos meus colegas da Meteorologia, por sempre me respeitarem, me acolherem e trazerem ensinamentos de vida e acadêmico.

Aos meus irmãos Mônica Dutra Barbosa dos Santos e Davi Adami Dutra, por me indicarem o caminho e acreditarem no meu potencial.

Ao meu Professor-Orientador, Prof. Dr. Renato Ramos da Silva, por sua paciência, motivação, ensinamentos e orientação eficazes para o desenrolar deste trabalho, e sua valiosa contribuição no meu aperfeiçoamento na graduação. E principalmente por acreditar em mim e me conceder essa oportunidade na vida acadêmica.

Ao Prof. Dr. Reinaldo Haas, por seus importantes ensinamentos na área de modelagem numérica da atmosfera e programação.

Ao Prof. Dr. Wendell Rondinelli Gomes Farias por seu incentivo, seus ensinamentos acadêmicos, e, sobretudo por sempre procurar resolver assuntos acadêmicos e pessoais de maneira compreensiva.

Aos meus amigos e colegas de graduação, que fizeram parte desta jornada acadêmica e que com o decorrer do tempo tornaram-se meus amigos.

RESUMO

Cloud streets ocorrem em muitas regiões do planeta. Neste estudo o objetivo é avaliar a formação destas avenidas de nuvens na região sul do Brasil e as condições atmosféricas associadas à sua ocorrência. Análise de imagens dos satélites Terra e Aqua mostraram que estas avenidas ocorrem em várias regiões do sul e em todas as épocas do ano. Estas imagens foram usadas também para avaliar a distância média entre as nuvens. Dados de reanálises do programa ERA5 foram usados para avaliar os campos de vento e da altura da camada limite no local de ocorrência das avenidas de nuvem. Estimativas da Razão de Aspecto (RA) definida como a razão entre a distância entre avenidas e a altura da camada limite apresentou um valor médio de $4,4 \pm 2,0$, cuja estimativa está próxima dos valores obtidos em outras regiões continentais. Análise das condições dinâmicas a partir de campos de reanálise mostrou que as avenidas estavam alinhadas com a direção do vento predominante a 10 m. Análise de perfis termodinâmicos a partir de radiosondagens próximas mostraram em geral uma camada instável próximo da superfície, uma camada de inversão próximo da altura da camada limite e uma camada de atmosfera seca acima.

Palavras-chave: Sul do Brasil. Camada limite planetária. Razão de aspecto.

ABSTRACT

Cloud streets occur in many regions of the planet. In this study the objective is to evaluate the formation of these avenues of clouds in the southern region of Brazil and to estimate the atmospheric conditions associated with their formation. Analysis of images from the Terra and Aqua satellites showed that these avenues occur in several southern regions and at all times of the year. These images were also used to assess the average distance between clouds. Reanalysis data from the ERA5 program was used to assess the wind fields and the height of the boundary layer at the location of the cloud streets. Aspect Ratio (RA) estimates defined as the ratio between the distances between streets and the height of the boundary layer presented an average value of 4.4 ± 2.0 , whose estimate is close to the values obtained in other continental regions. Analysis of dynamic conditions from reanalysis fields showed that the avenues were aligned with the prevailing wind direction at 10 m height. Analysis of thermodynamic profiles from nearby radiosondes showed in general an unstable layer close to the surface, an inversion layer close to the height of the boundary layer and a dry atmosphere layer above.

Keywords: South of Brazil. Planetary boundary layer. Aspect ratio.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Ilustração de formação de avenidas de nuvem e seus rotores..... 19
- Figura 2 - (a) Imagem do satélite Terra onde ocorreu a formação de avenidas de nuvem e (b) imagem do satélite Aqua (com maior destaque) para a mesma região, indicando o local de ocorrência das avenidas de nuvem analisadas - delimitado pelo círculo tracejado amarelo, para 21 de junho de 2002.....29
- Figura 3 – (a) Imagem do satélite Aqua, onde ocorreu a formação de avenidas de nuvem, apresentando um trecho de avenidas selecionado com sua respectiva distância total - destacada por uma linha amarela entre setas azuis e (b) vetores de ventos a 10 m da superfície, e campos de camada limite (m) na região sul do Brasil, com o ponto em destaque indicando a altura da PBL para o local de interesse, no horário de 15Z, para 21 de junho de 2002.....30
- Figura 4 – (a) Isolinhas de corrente, o ponto em destaque para a latitude $30^{\circ}.42'$ S e a longitude $54^{\circ}.33'$ W, indica onde ocorreram as avenidas de nuvem e (b) Radiosondagem efetuada a partir do aeroporto de Porto Alegre – RS, para 21 de junho de 2002.....31
- Figura 5 – (a) Imagem do satélite Terra onde ocorreu a formação de avenidas de nuvem, indicando o local das avenidas analisadas – delimitado pelo círculo tracejado amarelo e (b) do satélite Aqua para a mesma região onde ocorreu a formação dessas avenidas, para 07 de setembro de 2002.....32
- Figura 6 – (a) Imagem do satélite Terra, onde ocorreu a formação de avenidas de nuvem, apresentando um trecho de avenidas selecionado com sua respectiva distância total - destacada por uma linha amarela entre setas azuis, e (b) vetores de vento a 10 m da superfície, e campos de camada limite (m) na região sul do Brasil, com o ponto em destaque indicando altura da PBL para o local de interesse, no horário de 15Z, para 07 de setembro de 2002.....33
- Figura 7 – (a) Isolinhas de corrente, o ponto em destaque para a latitude $29^{\circ}.29'$ S e a longitude $53^{\circ}.26'$ W, indica onde ocorreram as avenidas de nuvem e (b) Radiosondagem efetuada a partir do aeroporto de Porto Alegre - RS, para 07 de setembro de 2002.....34
- Figura 8 – (a) Imagem do satélite Terra onde ocorreu a formação de avenidas de nuvem indicando o local das avenidas analisadas - delimitada pelo círculo tracejado amarelo e (b) imagem do satélite Aqua para a mesma região onde ocorreu a formação dessas avenidas, para 17 de julho de 2014.....35
- Figura 9 – (a) Imagem do satélite Terra, onde ocorreu a formação de avenidas de nuvem, apresentando um trecho de avenidas selecionado com sua respectiva distância total - destacada por uma linha amarela entre setas azuis e (b) vetores de vento a 10 m da superfície, e campos de camada limite (m) na região sul do Brasil, com o ponto em destaque, indicando altura da PBL para o local de interesse, no horário de 15Z, para 17 de julho de 2004.....36
- Figura 10 – (a) Isolinhas de corrente, o ponto em destaque para a latitude $29^{\circ}.13'$ S e a longitude $53^{\circ}.21'$ W, indica onde ocorreram as avenidas de nuvem e (b) Radiosondagem efetuada a partir do aeroporto de Porto Alegre-RS, para 17 de julho de 2004.....37

Figura 11 – (a) Imagem do satélite Terra onde ocorreu a formação de avenidas de nuvem indicando o local das avenidas analisadas - delimitada pelo círculo tracejado amarelo e (b) imagem do satélite Aqua para a mesma região onde ocorreu a formação dessas avenidas, para 13 de agosto de 2004.....	38
Figura 12 – (a) Imagem do satélite Terra, onde ocorreu a formação de avenidas de nuvem, apresentando um trecho de avenidas selecionado com sua respectiva distância total - destacada por uma linha amarela entre setas azuis e (b) vetores de vento a 10 m da superfície, e campos de camada limite (m) na região sul do Brasil, com o ponto em destaque indicando altura da PBL para o local de interesse, no horário de 15Z, para 13 de agosto de 2004.....	39
Figura 13 – (a) Isolinhas de corrente, o ponto em destaque para a latitude 27°.34' S e a longitude 49°.14' W, indica onde ocorreram as avenidas de nuvem e (b) Radiosondagem efetuada a partir do aeroporto de Florianópolis – SC, para 13 de agosto de 2004.....	40
Figura 14 – (a) Imagem do satélite Terra onde ocorreu a formação de avenidas de nuvem indicando o local das avenidas analisadas - delimitada pelo círculo tracejado amarelo e (b) imagem do satélite Aqua para a mesma região onde ocorreu a formação dessas avenidas, para 07 de fevereiro de 2005.....	41
Figura 15 – (a) Imagem do satélite Terra, onde ocorreu a formação de avenidas de nuvem, apresentando um trecho de avenidas selecionado com sua respectiva distância total - destacada por uma linha amarela entre setas azuis e (b) vetores de vento a 10 m da superfície, e campos de camada limite (m) na região sul do Brasil, com o ponto em destaque indicando altura da PBL para o local de interesse, no horário de 15Z, para 07 de fevereiro de 2005.....	42
Figura 16 – (a) Isolinhas de corrente, o ponto em destaque para a latitude 27°.15' S e a longitude 50°.15' W, indica onde ocorreram as avenidas de nuvem e (b) Radiosondagem efetuada a partir do aeroporto de Florianópolis – SC, para 07 de fevereiro de 2005.....	43
Figura 17 - (a) Imagem do satélite Terra onde ocorreu a formação de avenidas de nuvem indicando o local das avenidas analisadas - delimitada pelo círculo tracejado amarelo e (b) imagem do satélite Aqua para a mesma região onde ocorreu a formação dessas avenidas, para 21 de junho de 2005.....	44
Figura 18 – (a) Imagem do satélite Terra, onde ocorreu a formação de avenidas de nuvem, apresentando um trecho de avenidas selecionado com sua respectiva distância total - destacada por uma linha amarela entre setas azuis e (b) vetores de vento a 10 m da superfície, e campos de camada limite (m) na região sul do Brasil, com o ponto em destaque indicando altura da PBL para o local de interesse, no horário de 15Z, para 21 de junho de 2005.....	45
Figura 19 – (a) Isolinhas de corrente, o ponto em destaque para a latitude 29°.26' S e a longitude 52°.16' W, indica onde ocorreram as avenidas de nuvem e (b) Radiosondagem efetuada a partir do aeroporto de Porto Alegre – RS, para 21 de junho de 2005.....	46
Figura 20 – (a) Imagem do satélite Terra onde ocorreu a formação de avenidas de nuvem indicando o local das avenidas analisadas - delimitada pelo círculo tracejado amarelo e (b) imagem do satélite Aqua para mesma região onde ocorreu a formação dessas avenidas, para 25 de fevereiro de 2010.....	47

Figura 21- (a) Imagem do satélite Terra, onde ocorreu a formação de avenidas de nuvem, apresentando um trecho de avenidas de nuvem selecionado com sua respectiva distância total - destacada por uma linha amarela entre setas azuis e (b) vetores de vento a 10 m da superfície, e campos de camada limite (m) na região sul do Brasil, com o ponto em destaque indicando altura da PBL para o local de interesse, no horário de 15Z, para 25 de fevereiro de 2010.....	48
Figura 22 – (a) Isolinhas de corrente, o ponto em destaque para a latitude 28°.43’ S e a longitude 51°.33’ W, indica onde ocorreram as avenidas de nuvem e (b) Radiosondagem efetuada a partir do aeroporto de Porto Alegre – RS, para 25 de fevereiro de 2010.....	49
Figura 23 – (a) Imagem do satélite Terra onde ocorreu a formação de avenidas de nuvem e (b) imagem do satélite Aqua para a mesma região de formação dessas avenidas, indicando o local analisado - delimitado pelo círculo tracejado amarelo (b), para 20 de agosto de 2011.....	50
Figura 24 – (a) Imagem do satélite Aqua, onde ocorreu a formação de avenidas de nuvem, apresentando um trecho de avenidas selecionado com sua respectiva distância total - destacada por uma linha amarela entre setas azuis e (b) vetores de vento a 10 m da superfície, e campos de camada limite (m) na região sul do Brasil, com o ponto em destaque indicando altura da PBL para o local de interesse, no horário de 15z, para 20 de agosto de 2011.....	51
Figura 25 – (a) Isolinhas de corrente, o ponto em destaque para a latitude 28°.18’ S e a longitude 54°.01’ W, onde ocorreram as avenidas de nuvem e (b) Radiosondagem efetuada a partir do aeroporto de Porto Alegre – RS (b), para 20 de agosto de 2011.....	52
Figura 26 - (a) Imagem do satélite Terra onde ocorreu a formação de avenidas de nuvem e (b) Imagem do satélite Aqua para a mesma região de formação de avenidas de nuvem indicando o local analisado - delimitado pelo círculo tracejado amarelo, para 23 julho de 2013.....	53
Figura 27 – (a) Imagem do satélite Aqua, onde ocorreu a formação de avenidas de nuvem, apresentando um trecho de avenidas selecionado com sua respectiva distância total - destacada por uma linha amarela entre setas azuis e (b) vetores de ventos a 10 m da superfície, e campos de camada limite (m) estimados para essa região (com a altura da camada limite estimada para o local na região sul do Brasil, com o ponto em destaque indicando a altura da PBL para o local de interesse, no horário de 15Z, para 23 de julho de 2013.....	54
Figura 28 – (a) Isolinhas de corrente, o ponto em destaque para a latitude 26°.09’ S e a longitude 49°.49’ W, onde ocorreram as avenidas de nuvem e (b) Radiosondagem efetuada a partir do aeroporto de Curitiba – PR (b), para 23 de julho de 2013.....	55
Figura 29 – (a) Imagem do satélite Terra onde ocorreu a formação de avenidas de nuvem e (b) imagem do satélite Aqua para mesma região de formação de avenidas de nuvem, indicando o local analisado - delimitado pelo círculo tracejado amarelo, para 24 de março de 2014.....	56
Figura 30 – (a) Imagem do satélite Aqua, onde ocorreu a formação de avenidas de nuvem, apresentando um trecho de avenidas selecionado com sua respectiva distância total - destacada por uma linha amarela entre setas azuis e (b) vetores de vento a 10 m da superfície,	

e de campos de camada limite (m) na região sul do Brasil, com o ponto em destaque indicando altura da PBL para o local de interesse, no horário de 15Z, para 24 de março de 2014.....	57
Figura 32 - Isolinhas de corrente, o ponto em destaque para a latitude 27°.58' S e a longitude 50°.58' W, indica onde ocorreram as avenidas de nuvem e (b) Radiosondagem efetuada a partir do aeroporto de Florianópolis – SC, para 24 de março de 2014.....	58
Figura 32 – (a) Imagem do satélite Terra onde ocorreu a formação de avenidas de nuvem, indicando a região analisada - delimitada pelo círculo tracejado amarelo e (b) imagem do satélite Aqua para a mesma região, para 18 de novembro de 2018.....	59
Figura 33 – (a) Imagem do satélite Terra, onde ocorreu a formação de avenidas de nuvem, apresentando um trecho de avenidas selecionado com sua respectiva distância total - destacada por uma linha amarela entre setas azuis e (b) vetores de vento a 10 m da superfície, e de campos de camada limite (m), na região sul do Brasil, com o ponto em destaque indicando altura da PBL a o para o local de interesse, no horário de 15Z, para 18 de novembro de 2014.....	60
Figura 34 – (a) Isolinhas de corrente, o ponto em destaque para a latitude 27°.14' S e a longitude 49°.32' W, indica onde ocorreram as avenidas de nuvem e (b) Radiosondagem efetuada a partir do aeroporto de Florianópolis – SC, para 18 de novembro de 2014.....	61
Figura 35 – (a) Imagem do satélite Terra, onde ocorreu a formação de avenidas de nuvem, indicando a região analisada - delimitada pelo círculo tracejado amarelo e (b) imagem do satélite Aqua para a mesma região, para 26 de fevereiro de 2018.....	62
Figura 36 – (a) Imagem do satélite Terra, onde ocorreu a formação de avenidas de nuvem, apresentando um trecho selecionado com sua respectiva distância total - destacada por uma linha amarela entre setas azuis e (b) vetores de vento a 10 m da superfície, e campos de altura da camada limite (m) na região sul do Brasil, com o ponto em destaque indicando a altura da PBL para o local de interesse, no horário de 15Z (b), para 26 de fevereiro de 2018.....	63
Figura 37 - (a) Isolinhas de corrente, o ponto no destaque para a latitude 31°.47' S e a longitude 52°.48' W, indica onde ocorreram as avenidas de nuvem e (b) Radiosondagem efetuada a partir do aeroporto de Porto Alegre – RS, para 26 de fevereiro de 2018.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Condições meteorológicas observadas na presença de avenidas de nuvem	21
Tabela 2– Análise exploratória de dados - Ocorrências de avenidas de nuvem constatadas em imagens de satélite referentes ao período de janeiro de 2000 a dezembro de 2018. (Ver anexo A).....	28
Tabela 3 - Estudos de 12 casos selecionados 2000-2018 e seus parâmetros estimados, para o local de ocorrência das avenidas de nuvem.....	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMTEX – Air Mass Transformation Experiment

Cbs – *Cumulus Nimbus*

dCE - Distância entre Cloud Streets (Avenidas de Nuvem)

ECMWF - European Centre for Medium-Range Weather Forecast

EOSDIS – Earth Observing System Data and Information System

ERA5 - Interim - ECMWF Reanalysis a partir de 1979

EUMETRAIN – International Training Project (sponsored by EUMETSAT to support and increase the use of meteorological satellite data)

EUMETSAT – European Organization for the Exploitation of Meteorological **Satellites**

GRADS – Grid Application Development Software

hPBL – height of the Planetary Boundary Layer (altura da Camada Limite Planetária)

KONTUR – Convection and turbulence

LT – Local Time (Hora Local)

MODIS - Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

NASA – National Aeronautics and Space Administration

NVA – Negative Vorticity Advection (Advecção de Vorticidade Negativa)

PBL – Planetary Boundary Layer (Camada Limite Planetária)

PR – Paraná

PVA - Positive Vorticity Advection (Advecção de Vorticidade Positiva)

RA - Razão de Aspecto

RS - Rio Grande do Sul

SBCT – Estação Brasil Curitiba (meteorológica)

SBFL – Estação Brasil Florianópolis (meteorológica)

SBPA – Estação Brasil Porto Alegre (meteorológica)

SC - Santa Catarina

Θ_w - Temperatura potencial do bulbo úmido

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS QUE FAVORECEM O DESENVOLVIMENTO DE AVENIDAS DE NUVEM.....	17
1.1.1	Aparência típica das Avenidas de Nuvem verificada por meio de seções transversais verticais.....	17
1.1.2	Características de formação das Avenidas de Nuvem.....	18
1.1.2.1	<i>Avenidas de Nuvem sobre os oceanos</i>	20
1.1.2.2	<i>Avenidas de Nuvem sobre continente</i>	20
1.1.2.3	<i>Parâmetros observados na formação das Avenidas de Nuvem.....</i>	21
1.1.2.4	<i>A Física das Avenidas de Nuvem.....</i>	22
1.2	QUESTÕES DE PESQUISA	23
2	OBJETIVOS	23
2.1	OBJETIVO GERAL.....	23
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
3	METODOLOGIA.....	25
3.1	IMAGENS DE SATÉLITE.....	25
3.2	DADOS DE REANÁLISE.....	25
3.3	DADOS DE RADIOSONDAGENS.....	26
3.4	DISTÂNCIA TOTAL E QUANTIDADE DE AVENIDAS DE NUVEM NO TRECHO ANALISADO.....	26
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	27
4.1	CASO 1 - 26 DE JUNHO DE 2002	28
4.2	CASO 2 - 07 DE SETEMBRO DE 2002	31
4.3	CASO 3 - 17 DE JULHO DE 2004	34
4.4	CASO 4 - 13 DE AGOSTO DE 2004	37
4.5	CASO 5 - 07 DE FEVEREIRO DE 2005.....	40
4.6	CASO 6 - 21 DE JUNHO DE 2005	43
4.7	CASO 7 - 25 DE FEVEREIRO DE 2010.....	46

4.8	CASO 8 - 20 DE AGOSTO DE 2011	49
4.9	CASO 9 - 23 DE JULHO DE 2013	52
4.10	CASO 10 - 24 DE MARÇO DE 2014	55
4.11	CASO 11 – 18 DE NOVEMBRO DE 2014	58
4.12	CASO 12 – 26 DE FEVEREIRO DE 2018	61
5	CONCLUSÃO.....	65
	REFERÊNCIAS	67
	APÊNDICE A – Scripts do GRADS	70
	ANEXO A – Avenidas de nuvens identificadas por 72 imagens de satélite para a região sul do Brasil a partir de dados dos satélites Terra e Aqua - NASA.	73

1 INTRODUÇÃO

As avenidas de nuvem constituem-se em nuvens *cumulus* alongadas formando filas que são orientadas de modo paralelo à direção do vento. Essas nuvens são formadas por rolos de convecção de ar quente ascendente e ar frio descendente. O ar quente, à medida que sobe gradualmente na atmosfera vai se resfriando. Assim que a umidade existente na massa de ar quente e úmida esfria e passa a se condensar, ocorre formação de nuvens. Ao mesmo tempo, o ar frio e seco desce em cada lado da zona de formação da nuvem, e isso cria uma área sem nuvens. A ocorrência de várias dessas massas de ar subindo e descendo alternadas e alinhando-se com o vento produz as avenidas de nuvem. As condições para a formação destas avenidas de nuvem tem sido objeto de alguns estudos teóricos e observacionais (BROWN, 1970, 1980; KUETTNER, 1970; LEMONE, 1974).

Esses rolos convectivos ou vórtices de rolos de ar rotativo, alinhados horizontalmente (avenidas de nuvem) são orientados paralelamente ao solo, na camada limite planetária (PBL). Esses tipos de rolo de convecção horizontal têm sido registrados por aviões e imagens de satélite nos últimos 30 anos. Algumas observações mostram diferentes características se as avenidas estão mais ou menos espaçadas e, portanto existem ainda muitas dúvidas sobre sua formação (BRUMER, 1999). Portanto, sua compreensão necessita ainda de estudos sobre uma gama ainda maior de dados observacionais e simulações através de modelos numéricos. Vistas do chão elas configuram-se como linhas de nuvens *cumulus* com alinhamento paralelo ao vento de baixo nível.

Vários estudos tem verificado que esses rolos são significativos para a dinâmica do transporte vertical de calor sensível e latente, umidade e poluentes do ar dentro da camada limite. Esses estudos foram realizados, com base em dados observacionais obtidos em diversas regiões do planeta tais como: o Mar do Japão (ASAI; MIURA, 1981; TSUBOKI; FUJIYOSHI; WAKAHAMA, 1989; MEZRIN et al., 2003; NAKAI, S.; KOYURU, I.; MISUMI, R.; PARK, S-G.; KOBAYASHI, T., 2005), os Grandes Lagos - USA (LEMONE, 1974; NIZIOL, T. A.; SNYDER, W. R.; WALDSTRICHER, 1995); a Amazônia (RAMOS DA SILVA et al., 2011), a cidade de Beijing – China (MIAO a, b Shiguang; CHEN b, 2008), a cidade de Hyytiälä sul da Finlândia (BUZORIUS et al., 2001), o Mar do Norte – Experimento KONTUR (BRUMMER, B.; BAKAN, S.; HINZPETER, 1985), o leste do mar da China e sudoeste das ilhas do Japão – Experimento AMTEX (LENSCHOW, D.H.; STEPHENS, 1978), o Lago Michigan – USA

(YANG; GEERTS, 2006), o Mar do Labrador e Canadá e Groenlândia (RENFREW; MOORE, 1999; LIU; MOORE, 2004), o Oceano Atlântico Norte (MELFI; PALM, 2011), o Canal Inglês e o Mar da Irlanda (NORRIS, J.; VAUGHAN, G.; SCHULTZ, D.M., 2013), o Golfo da Finlândia (MAZON, J.; NIEMELA, S.; PINO, D.; SAVIJARVI, H.; VIHMA, T., 2015), o Mar Báltico (ANDERSON, T.; NILSONSSON, 1990; ANDERSSON, T.; GUSTAFSSON, 1994), e agora na região sul do Brasil (DUTRA, D. A.; RAMOS DA SILVA, R., 2020).

As avenidas de nuvem, geralmente alinhadas com a direção do vento predominante, dependem, contudo, da evolução da convecção e da altura da PBL na região onde se formam (WECKWERTH, T. M.; WILSON, J. W.; WAKIMOTO, 1995), e estão associadas, na maioria dos casos, com rotores (onde o movimento é ascendente na região de suas formações e descendente nas regiões de suas ausências). Estes sistemas de nuvens também têm sido estudados por alguns modelos numéricos, com o objetivo de entender sua formação e desenvolvimento (DAILEY; FOVELL, 1999; LIU et al., 2004). Admite-se também a possibilidade destas avenidas de nuvem estarem relacionadas a formação posterior de sistemas de maior intensidade, como nuvens *cumulunimbus* tropicais (RAMOS DA SILVA, R. et al., 2011). Portanto, é de grande importância estudá-las observando sua formação na PBL, e o balanço de radiação que ocorre, bem como verificar a possibilidade dessas nuvens prenunciarem tempestades.

Neste estudo, usamos análise de dados meteorológicos de radiosondagem efetuadas a partir de aeroportos, imagens de satélites de órbita polar Terra e Aqua da NASA (ambos com sensor MODIS) e, dados de reanálise do modelo numérico ECMWF para melhor entender os processos físicos/dinâmicos envolvidos na formação de avenidas de nuvem na região sul do Brasil.

Alinhando-se à direção do fluxo de vento, essas nuvens desenvolvem-se sobre grandes áreas planas, como os oceanos, os grandes lagos, ou ao longo de largos e extensos rios com interfaces de florestas em suas margens, ou mesmo sobre áreas continentais ou superfícies de gelo. Exemplos de avenidas de nuvem foram registradas (por imagens de satélite), sobre as margens da Lagoa dos Patos (região metropolitana de Porto Alegre) no estado do Rio Grande do Sul, ou sobre regiões de Planícies (região metropolitana de Porto Alegre e sudeste), ou de Planaltos nos estados do Rio Grande do Sul (região do Planalto Médio), Santa Catarina e Paraná. Algumas dessas observações serão identificadas e abordadas neste trabalho.

1.1 CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS QUE FAVORECEM O DESENVOLVIMENTO DE AVENIDAS DE NUVEM

Se o ar ambiente estiver próximo da saturação, a condensação pode ocorrer em correntes ascendentes produzidas a partir da rotação de rolos. O movimento de afundamento de ar frio e seco produzido entre pares alternados de rolos evaporarão as nuvens, criando regiões com ausência das mesmas. Isso, combinado com as correntes ascendentes de ar quente e úmido, produzirá “linhas” ou avenidas de nuvem. Esse fluxo aéreo produzido pelas avenidas de nuvem tem sido utilizado na aviação, por pilotos de planador em seus deslocamentos, pois isso lhes permite que voem em linha reta a grandes distâncias, derivando daí o termo "avenidas de nuvem”.

As condições mais favoráveis para o desenvolvimento dos rolos ocorrem quando a camada mais baixa de ar é instável, e mais acima é observada uma camada de inversão (camada estável de ar). Também, deve haver em geral, um vento de fraco a moderado, e isso ocorre frequentemente quando o ar superior está diminuindo, como em condições anticiclônicas, ou é mais comumente encontrado quando o nevoeiro de radiação se forma durante a noite (ETLING, D; BROWN, R. A.,1993a). A convecção ocorre abaixo da camada de inversão, com o aumento do ar em térmicas abaixo das nuvens e aprofundando no ar entre as avenidas de nuvem. O cisalhamento do vento gera energia que produz instabilidades dinâmicas, as quais resultam em energia turbulenta. Já o vento em níveis mais altos, favorece o desenvolvimento dos rolos, e a energia convectiva é responsável por sua modificação.

Explicar de maneira exata o processo responsável pela formação e desenvolvimento de rolos horizontais é uma tarefa complexa, mas pode ser melhor compreendida a partir dos seguintes artigos utilizados como referência: (ETLING, D.; BROWN, R. A., 1993, 1993a,b; WECKWERTH, T. M. et al., 1995; YOUNG, G. S. et al., 2002).

1.1.1 Aparência típica das Avenidas de Nuvem verificada por meio de seções transversais verticais

A dinâmica das avenidas de nuvem é bem peculiar e difere muito da dinâmica de outras nuvens. A maior parte dos processos envolvidos e necessários a sua formação, ocorre nos primeiros 1-2 km mais baixos da atmosfera. Estes processos estão na faixa de escala

micro/meso e não baroclínica na escala sinótica. No entanto, seções transversais de variáveis atmosféricas podem ajudar a detectar o ambiente sinótico no qual as avenidas de nuvem costumam se desenvolver (EUMETRAIN, 2020), como por exemplo:

- Temperatura potencial do bulbo úmido (Θ_w)

A temperatura potencial do bulbo úmido diminui com a altura nos níveis mais baixos, sinalizando uma estratificação instável. Próximo ao nível de 800 hPa (~2km), Θ_w começa a subir novamente, mostrando que houve uma mudança para estratificação ou inversão estável.

- Ventos

Os ventos tendem a aumentar com a altura na camada instável e, apresentam um perfil sensível à variação da altura. Essas variações dos ventos em pequena escala, observadas em dados de radiossondagem, são de difícil representação nos modelos numéricos.

- Temperatura

A ocorrência de avenidas de nuvem, geralmente se dá em um surto de ar frio e seco, logo atrás de frentes frias (como já foi mencionado), normalmente em áreas de advecção fria. Observa-se que o máximo de advecção fria localiza-se no meio da camada convectiva.

1.1.2 Características de formação das Avenidas de Nuvem

As avenidas de nuvens desenvolvem-se a partir de pares de rolos de ar com rotação contrária entre si, e posicionam-se paralelas ao vento médio da PBL (Figura 1). São atribuídas como causas de sua formação, a convecção na presença de um vento moderado e/ou instabilidades dinâmicas do ponto de inflexão no perfil desse vento (ETLING, D.; BROWN, R. A., 1993a).

Uma teoria inicial sobre as características prévias destas nuvens de rolos (apoiada por observações a partir de aeronaves em vários experimentos de campo) indicou que elas podem ser alinhadas de 20° a 30° para a esquerda no hemisfério norte (para a direita no hemisfério sul) do vento predominante em ambientes estratificados estáveis, ou 18° para a esquerda no hemisfério norte (para a direita no hemisfério sul) do vento predominante para ambientes neutros, e quase paralelas ao vento predominante para ambientes convectivos (ETLING, D.; BROWN, R. A., 1993).

As avenidas de nuvem podem atingir em média um comprimento entre 20-200 km e uma largura entre 2-10 km. Observadas sobre o mar, constata-se que sua formação é constituída de nuvens cúmulos individuais alinhadas uma após a outra, o que lembra um formato de uma grade sequencial (EUMETRAIN, 2020).

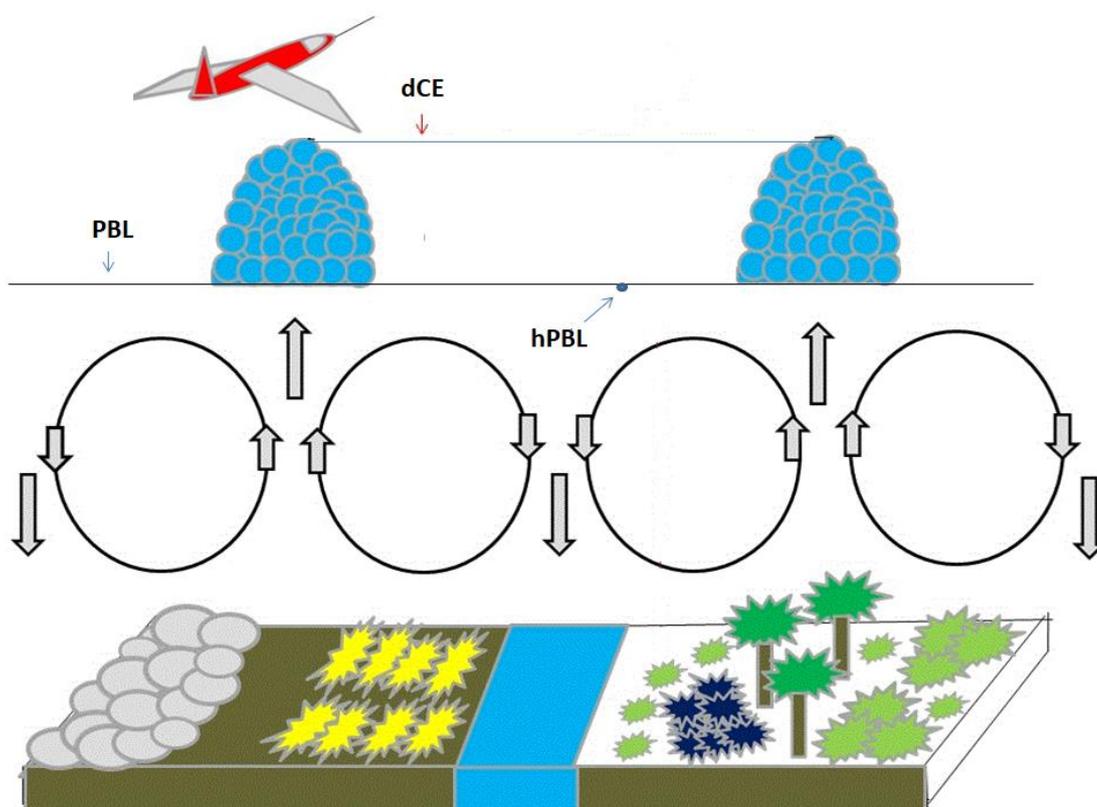


Figura 1 - Ilustração de formação de avenidas de nuvem e seus rotores.

A profundidade de um rolo convectivo é geralmente a profundidade da PBL, que normalmente é da ordem de 1-2 km. Estudos experimentais mostraram que a Razão de Aspecto (RA), definida como a razão entre o comprimento de onda do rolo e a altura da camada limite varia entre 2 e 6. No entanto, em algumas situações, a RA pode ser da ordem de 10. Já, a duração de um rolo convectivo, pode ser de algumas horas ou até dias (ETLING, D.; BROWN,

R. A., 1993b). Uma revisão recente apresentou que a RA média para continentes é da ordem de 3.15 ± 0.7 (YOUNG et al., 2002), enquanto a RA teórica é da ordem de 2.83 (BROWN, 1980).

1.1.2.1 Avenidas de Nuvem sobre os oceanos

Durante surtos de ar frio e seco de escala sinótica, oriundos de continentes e deslocando-se sobre os oceanos próximos com temperaturas mais quentes, constata-se eventos de formação de avenidas de nuvem ocorrendo logo após à passagem de uma frente fria (ETLING, D; BROWN, R. A., 1993a). A princípio, o ar frio que se desloca da superfície da terra ou do gelo, sofre alteração devido à transferência vertical de calor e umidade da superfície da água subjacente. Logo a seguir, forma-se uma inversão térmica na atmosfera, que tem sua base elevada conforme vai se afastando da costa. Essa inversão muitas vezes é estimulada pela Advecção de Vorticidade Negativa (NVA) e o posterior movimento de afundamento no fluxo contra o vento do eixo central ao nível de 500 hPa. A transformação da massa de ar pode ocasionar a formação de nuvens que, em determinadas condições, resultam nas avenidas de nuvem. Então, num determinado momento, após o surto de ar frio, a camada instável se torna mais profunda, e o fluxo se torna mais ciclônico e a partir daí, as avenidas de nuvem quase-bidimensionais evoluem para a formação de células abertas tridimensionais. Na região de ar ascendente entre pares de rolos, a convecção aumenta devido à Advecção de Vorticidade Positiva (PVA), formando nuvens *cumulus* em linhas (EUMETRAIN, 2020).

1.1.2.2 Avenidas de Nuvem sobre continente

Avenidas de nuvem podem desenvolver-se também sobre superfícies terrestres, em área continental e, observações dessas avenidas sobre a terra foram analisadas a partir de imagens de satélite por (KUETTNER, 1971; WESTON, 1980; MULLER et al., 1985). Também foram objeto de estudo e pesquisa na Amazônia, mais precisamente na campanha de campo COBRA-PARÁ Caixuanã Observações na Biosfera, Rio e Atmosfera do Pará (RAMOS DA SILVA, R. et al., 2011), através de experimentos com instrumentos, análise de imagens e modelagem numérica de alta resolução que mostraram ser muito comum a ocorrência dessas formações de nuvens naquela região, constatando que as avenidas alinhavam-se com os ventos Alísios e geralmente eram bem formadas no horário de 15:00 UTC (12:00LT), por (RAMOS DA SILVA, R. et al., 2011).

O aquecimento da superfície da terra aumenta a instabilidade nas camadas mais baixas. A alta pressão fornece a inversão de subsidência necessária para limitar a convecção. Além disso, por causa da advecção fria, o vetor de vento girante também ocorre e as avenidas de nuvem podem então se formar. Devido à maior variação da rugosidade observada em terra, o padrão das avenidas de nuvem é mais irregular do que no mar (onde apresenta-se mais simétrico). Já, o efeito orográfico, é um fator que pode prejudicar uma melhor conformação das avenidas de nuvem em regiões continentais, assim como uma PBL muito baixa pode inibir sua formação (ATKINSON; ZHANG, 1996; SANG, 1999). A Tabela 1 apresenta um resumo das principais condições atmosféricas observadas na formação de *cloud streets*.

Tabela 1 – Condições meteorológicas observadas na presença de avenidas de nuvem

Evento	Descrição
Precipitação	Nada significativa
Temperatura	Não há mudança significativa
Ventos (ou Rajadas de vento)	De superfície, moderados ou fortes (18-36 Km/h)

Fonte: (EUMETRAIN, 2020)

Avenidas de nuvem podem dar origem à convecção de células abertas e ocasionalmente produzir alguma precipitação de chuvas ou neve, sobre o mar. Normalmente, não há precipitação associada a avenidas de nuvem em região continental, mas pode haver desenvolvimento de Cbs, devido à ação de forçantes dinâmicas, como a PVA ou o aquecimento diurno.

1.1.2.3 Parâmetros observados na formação das Avenidas de Nuvem

Os seguintes parâmetros podem ser observados quando ocorre a formação das avenidas de nuvem (EUMETRAIN, 2020):

- Os ventos da superfície são de moderados a fortes (18 km/h a 36 km/h), e alinhados à esquerda no hemisfério norte (à direita no hemisfério sul) das avenidas de nuvem.

- Analisando a instabilidade, observa-se que o perfil todo é geralmente instável na camada em que as avenidas de nuvem são formadas.
- Constata-se que a profundidade da camada instável tem uma altura de 1,5-2,0 km em geral, sendo limitada por uma inversão térmica. Isso pode ser verificado através de perfis de radiosondagem.
- A análise do perfil do vento na camada instável indica um perfil curvo para sua direção (os ventos giram na parte mais baixa da camada instável e então retornam a partir do nível médio). Não há grande variação de direção dos ventos, na camada instável, ficando em torno dos 20-30 graus (também no hemisfério sul). A velocidade do vento deve aumentar com a altura podendo ser da ordem de 36 km/h na parte média ou superior da camada de convecção. Em níveis mais acima, o vento pode diminuir ou aumentar. Os modelos numéricos de previsão não conseguem representar essa variação em pequena escala, pois o nível de resolução dos mesmos é menor e não adequado para isso.
- O indicativo de Temperatura em 1000/850 hPa sugere que as avenidas de nuvem frequentemente se desenvolvem sob ligeira advecção fria, verificada normalmente na parte posterior de uma frente fria. A observação dos contornos de altura nos indica que eles são quase retos ou suavemente curvados no sentido anticiclônico. Nos casos de formação de avenidas de nuvem sobre o mar, verifica-se que a área mais desenvolvida e extensa das avenidas de nuvem localiza-se na parte superior da região entre rolos, onde ocorre a convecção de ar quente e úmido.
- É notada a existência de Advecção de Vorticidade Negativa (NVA) em nível de 500 hPa, ao constatar-se a influência de um obstáculo mais elevado ou então pela aproximação de uma crista superior.

1.1.2.4 A Física das Avenidas de Nuvem

Vórtices de rolagem horizontal na camada limite são responsáveis pela organização de avenidas de nuvem e estas se formam nas partes ascendentes desse sistema de cilindros. Tal formação é ocasionada por dois tipos de instabilidade: instabilidade dinâmica (inflexão) e instabilidade térmica, que podem agir de forma independente, mas não são facilmente notadas em um fluxo real.

A instabilidade dinâmica surge a partir de um ponto de inflexão no componente de velocidade do vento, perpendicular ao sistema de rolagem. Este ponto de inflexão é causado por uma combinação do fluxo de cisalhamento da camada de Ekman e advecção fria. Como resultado do atrito, os ventos nos níveis mais baixos se desviarão com a altura. Esse efeito de fricção diminui com o aumento da altura e, portanto, o vento tenderá a recuar devido à advecção fria presente. Como consequência do giro deste vetor de vento nas camadas mais baixas, um sistema de cilindros se desenvolve (EUMETRAIN, 2020).

A instabilidade do ponto de inflexão pode se desenvolver em ambiente de estratificação neutra ou mesmo ligeiramente estável da baixa troposfera. No entanto, avenidas de nuvem geralmente ocorrem sob condições de estratificação instável, limitada por uma camada de inversão acima (Instabilidade Térmica). Esta instabilidade é criada quando o ar frio flui sobre uma superfície relativamente quente. Portanto, é mais provável que os dois tipos de instabilidades possam agir juntos, levando ao desenvolvimento de vórtice e à formação de avenidas de nuvem (EUMETRAIN, 2020). Brown (1972) descobriu que, sob condições de estratificação instável, a instabilidade dinâmica é aumentada pela instabilidade térmica. Saber se a instabilidade dinâmica ou a instabilidade térmica é mais dominante, para a formação das avenidas de nuvem, ainda é uma questão ainda a ser melhor estudada.

1.2 QUESTÕES DE PESQUISA

As seguintes questões guiam o presente trabalho:

1. São observadas avenidas de nuvem no sul do Brasil?
2. Quais condições meteorológicas favorecem o desenvolvimento destas avenidas de nuvem?
3. Como se formam e quais as características destas avenidas de nuvem?

2 OBJETIVOS

Nas seções abaixo estão descritos o objetivo geral e os objetivos específicos deste Trabalho de Conclusão de Curso.

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar a ocorrência e compreender os processos físicos envolvidos na formação, na evolução e no comportamento das avenidas de nuvem na região Sul do Brasil.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Avaliar a ocorrência das avenidas de nuvem na região Sul do Brasil a partir de imagens de satélite.

2. Observar as condições dinâmicas e termodinâmicas desta região que favorecem o surgimento e desenvolvimento deste fenômeno.
3. Compreender os processos físicos envolvidos neste fenômeno.

3 METODOLOGIA

3.1 IMAGENS DE SATÉLITE

Foram feitas análises diárias de imagens de alta resolução dos satélites Terra e Aqua, da NASA (portal EOSDIS Worldview <https://worldview.earthdata.nasa.gov> da NASA – National Aeronautics and Space Administration). Para detectar essas formações de nuvens, numa análise geral, foi usado o critério subjetivo e selecionadas 72 imagens (72 ocorrências) de avenidas de nuvem. Numa análise mais detalhada desse grupo de imagens de satélite foram escolhidas 12 imagens (12 casos) de avenidas que melhor representaram este tipo de formação de nuvem. Teve-se o cuidado, ao selecionar essas 12 imagens, para que as mesmas contemplassem diferentes locais de ocorrência do evento na região sul do Brasil, para o período de janeiro de 2000 a dezembro de 2018.

O satélite Terra, desenvolvido e operado pela NASA, é de órbita polar e héliosíncrona, e situa-se a 705 km da superfície da Terra e possui um sensor MODIS que permite imagens de alta resolução da Terra ao longo de sua trajetória. Já o satélite Aqua, desenvolvido pelos EUA em parceria com Japão e Brasil e operado pela NASA, é igualmente de órbita polar e héliosíncrona, situa-se à mesma distância da superfície do planeta, que o satélite Terra, e também possui um sensor MODIS. Geralmente o satélite Terra passa pelo sul do Brasil por volta de 10:30LT e o satélite Aqua por volta de 13:30LT. Com base nestas imagens foram selecionados doze casos mais significativos para estudo, (conforme já foi mencionado). Através destas imagens, para os doze casos estudados foi estimada a distância média entre as avenidas.

3.2 DADOS DE REANÁLISE

Dados da altura da PBL foram obtidos dos campos de reanálise ERA5 elaborados a partir do modelo do ECMWF disponíveis no portal <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>. Estes dados foram estimados com a finalidade de encontrar o parâmetro de razão de aspecto (RA), definido como a razão entre a distância média entre avenidas (dCE) e a altura da camada limite (hPBL) local (Young & Sikora, et al., 2002), ou seja, $(RA = dCE/hPBL)$.

Campos atmosféricos do banco de dados de reanálise ERA5 do ECMWF foram usados também para avaliar as condições de larga escala durante a ocorrência de cada evento. Foram produzidos gráficos a partir desses dados de reanálises para permitir essas avaliações, e com o objetivo de melhorar o entendimento dos processos envolvidos na formação de avenidas de nuvem. O Apêndice A apresenta um exemplo de script usado para gerar os campos usando o software *opengrads*.

3.3 DADOS DE RADIOSONDAGENS

Os dados de radiosondagens efetuadas a partir do aeroporto de Curitiba-PR, Florianópolis-SC e Porto Alegre-RS foram usados com o objetivo de avaliar a estrutura termodinâmica da atmosfera próxima dos eventos analisados. Sob esse aspecto ressaltamos que devido às dificuldades em se conseguir dados de radiosondagem de estações mais próximas aos eventos para os dias escolhidos (pois não haviam dados de radiosondagem para o horário de 15Z), então adotamos dados obtidos a partir de radiosondagens em aeroportos de três capitais (naquele mais próximo ao evento). Os dados de radiosondagens obtidos em estações meteorológicas destes aeroportos e disponíveis no portal

<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> da University of Wyoming – College of Engineering contemplam apenas horários padrões de 00Z e 12Z. Como o horário de melhor formação das avenidas de nuvem em região continental acontece em torno das 15Z (ETLING, D. AND BROWN, 1993), optamos por utilizar o horário de radiosondagem das 12Z. Este horário apresenta dados que indicam condições para/e desenvolvimento de avenidas de nuvem.

3.4 DISTÂNCIA TOTAL E QUANTIDADE DE AVENIDAS DE NUVEM NO TRECHO ANALISADO

Para cada um dos doze casos, foi selecionada uma imagem do satélite Terra ou Aqua, com melhor representatividade e aproximação da região de ocorrência de avenidas de nuvem no portal <https://worldview.earthdata.nasa.gov>, e salva como arquivo kmz, para o portal <https://earth.google.com/web>, onde foi possível medir a distância total do trecho escolhido, fazer a contagem do número de avenidas existentes no trecho e, calcular a distância média entre avenidas de nuvem (dCE) para o trecho. Tal escolha do trecho foi feita subjetivamente, e sua medição foi realizada utilizando-se da régua virtual, disponível nesta ferramenta. A ferramenta automaticamente forneceu a distância total dos trechos, ao traçar-se um ponto inicial e um ponto final, posicionados no topo das avenidas e de um extremo a outro do trecho, projetando-se cada ponto aos eixos centrais das respectivas avenidas.

Os ventos predominantes a 10 m, nas datas e horários de ocorrência dos eventos também foram avaliados a partir dos dados de reanálise ERA5 que geraram campos de vetores de vento (indicando direção e velocidade) e de campos da altura da camada limite (estimando-se a PBL num ponto médio da distância total). Também foram geradas isolinhas de correntes, indicando o vento predominante sua direção e sua intensidade no local onde de formação das avenidas de nuvem, para os casos estudados. Foram feitas então, comparações dos dados de reanálises com os dados de radiosondagens realizadas em aeroportos mais próximos a essas formações de avenidas, e confrontados com as imagens de satélite selecionadas, visando constatar o alinhamento das avenidas de nuvem com o vento predominante e as condições termodinâmicas presentes.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são apresentados os resultados da ocorrência de avenidas de nuvem a partir da análise das imagens de satélite e das avaliações das condições atmosféricas baseadas em dados de radiosondagens e dados de reanálise.

Inicialmente, foram analisadas as imagens de satélite e os resultados mostraram que em geral ocorrem muitos casos de avenidas de nuvem no sul do Brasil em todas as épocas do ano. No Anexo A é apresentado um quadro com os principais casos detectados através das imagens de satélite. A Tabela 2 apresenta o número de ocorrências de avenidas de nuvem estimadas para o período de janeiro/2000 a dezembro/2018 baseadas em observações subjetivas diárias das imagens de satélite. São apresentadas apenas as formações que tiveram melhor representação espacial. Os resultados indicam que ocorreram formações de avenidas de nuvem com maior frequência no verão (26), outono (25) e inverno (15) para o grupo de 72 imagens analisadas. Nota-se uma incidência maior dessas formações na estação do verão, em relação às outras estações. No período do verão no hemisfério sul é esperado que tanto a superfície dos continentes quanto das águas do Oceano Atlântico se aqueçam bem mais do que nas outras estações do ano. Assim, a convecção torna-se mais intensa e frequente tanto no oceano quanto no continente. Nesta estação, as frentes frias normalmente são menos intensas e se deslocam pela região sul do Brasil num período menor. Considerando essas características da estação, e analisando as imagens de satélite foi possível constatar que houve um favorecimento para surgirem avenidas de nuvem no verão, embora tenha levemente superado o número de ocorrências, do período da estação do outono. No outono, devido a transição para temperaturas mais frias a tendência é de diminuição da convecção, reduzindo assim, as condições para formação de avenidas de nuvem, apesar de ter sido registrado um número de ocorrências do evento, quase igual ao que foi observado no verão, para o grupo de imagens selecionadas. No inverno, como a passagem de frentes frias mais intensas e duradouras e de massas de ar frio de maiores dimensões, os surtos de ar frio aconteceram com uma certa frequência. Isso favoreceu o surgimento das avenidas, embora a convecção tenha diminuído, como é o esperado nessa estação. Sendo assim, constatamos que o número de ocorrências do evento foi um pouco mais da metade do número de eventos ocorrido no verão ou no outono. Mesmo assim, o número de ocorrências do evento é considerável para a estação, pois no período as advecções de ar frio são mais frequentes e a perda de radiação de onda longa é mais acentuada no continente. Isso favorece a inversão térmica em determinados períodos do dia, o que pode vir a formar avenidas de nuvem. Na estação da primavera, a incidência de formação de avenidas de nuvem foi bem menor que nas demais estações, para o mesmo grupo de imagens, embora nesta estação do ano, a presença de convecção na atmosfera seja também considerável. Podemos considerar também que essa estação caracteriza-se como sendo um período de transição entre o inverno e o verão. Portanto, sujeito à influência, de temperaturas ainda frias do final do inverno, e migrando aos poucos para temperaturas mais elevadas do início do verão.

Tabela 2– Análise exploratória de dados - Ocorrências de avenidas de nuvem constatadas em imagens de satélite referentes ao período de janeiro de 2000 a dezembro de 2018. (Ver anexo A).

Estação	Quantidade	Ano																	
		2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Verão (21/dez a 21/mar)	26	3	3				2		1		1			2	1	2	2	1	8
Outono (22/mar a 20/jun)	25				1			1		1		1		1	2	5	6	4	3
Inverno (21/jun a 22/set)	15			2		2	1			1		2	1	2	2	1	1		
Primavera (23/set a 20/dez)	06											1	2		3				
Total	72	3	3	2	1	2	3	1	1	2	1	4	3	5	8	8	9	5	11

A seguir são apresentados resultados de análise de 12 casos que foram selecionados para melhor estudo das condições de formação das avenidas de nuvens. Estes estudos para os 12 casos abordados, permitiram aprofundar as análises sobre a formação e características dessas nuvens. São apresentados também resultados das análises das radiosondagens e campos de direção e intensidade do vento predominante nos locais dos eventos. As análises do comportamento desse vento, e a verificação do alinhamento de nuvens *cumulus* paralelamente à direção desse vento de superfície, puderam nos trazer a comprovação e caracterização da ocorrência do fenômeno nos doze casos analisados.

4.1 CASO 1 - 21 DE JUNHO DE 2002

As Figuras 2, 3 e 4 apresentam resultados para o caso ocorrido em 21 de Junho de 2002. As imagens mostram a formação de avenidas de nuvem na região sudoeste do estado do Rio Grande do Sul na divisa com o Uruguai. As Figuras 2(a) e 2(b) apresentam imagens dos satélites Terra e Aqua, respectivamente. Na Figura 2(a) captada pelo satélite Terra nota-se que, embora já exista a formação de avenidas de nuvem neste horário, sua visualização fica prejudicada devido à formação de nuvens mais acima na troposfera. Porém na Figura 2(b) captada pelo satélite Aqua, é possível ter uma melhor visualização das avenidas de nuvem formadas na região em destaque (círculo tracejado amarelo).

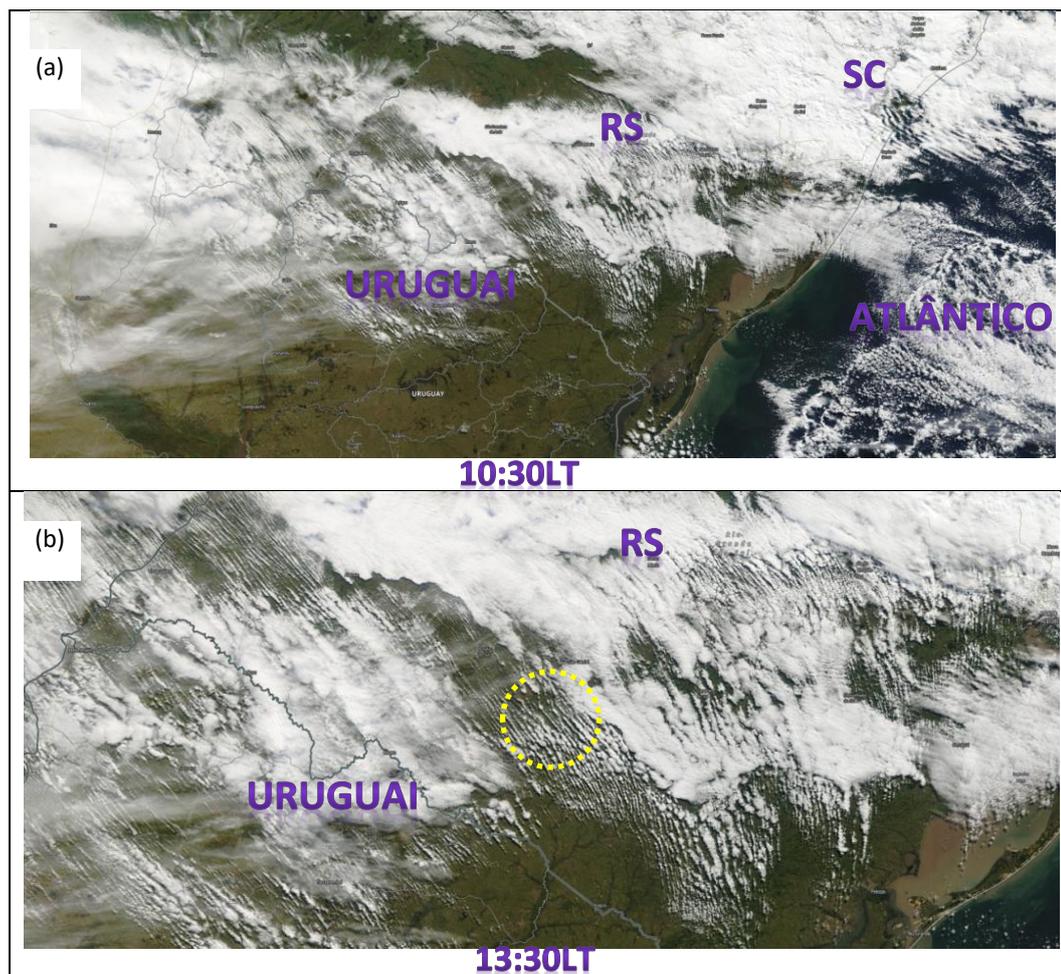


Figura 2 - (a) Imagem do satélite Terra onde ocorreu a formação de avenidas de nuvem e (b) imagem do satélite Aqua (com maior destaque) para a mesma região, indicando o local de ocorrência das avenidas de nuvem analisadas - delimitado pelo círculo tracejado amarelo, para 21 de junho de 2002.

A Figura 3(a) apresenta a imagem de satélite juntamente com o local de medida da distância total, e o número de avenidas. Os resultados mostram que a distância para o trecho selecionado foi de 54840 m e foi observado um número de 17 avenidas. A partir destes resultados foi calculada a distância média de 3226 m entre as avenidas. A Figura 3(b) apresenta o gráfico de vetores de vento e a altura da camada limite local, que foi estimada em 815 m para a região. A partir destes dados foi estimada uma razão de aspecto no valor de 3.9 (Tabela 3). Foram feitas análises e comparações entre a imagem de satélite e o campo de vetores de vento Figuras 3(a) e 3(b) e constatou-se que as avenidas de nuvem presentes na região, estavam praticamente alinhadas à direção do vento predominante de sudeste (SE).

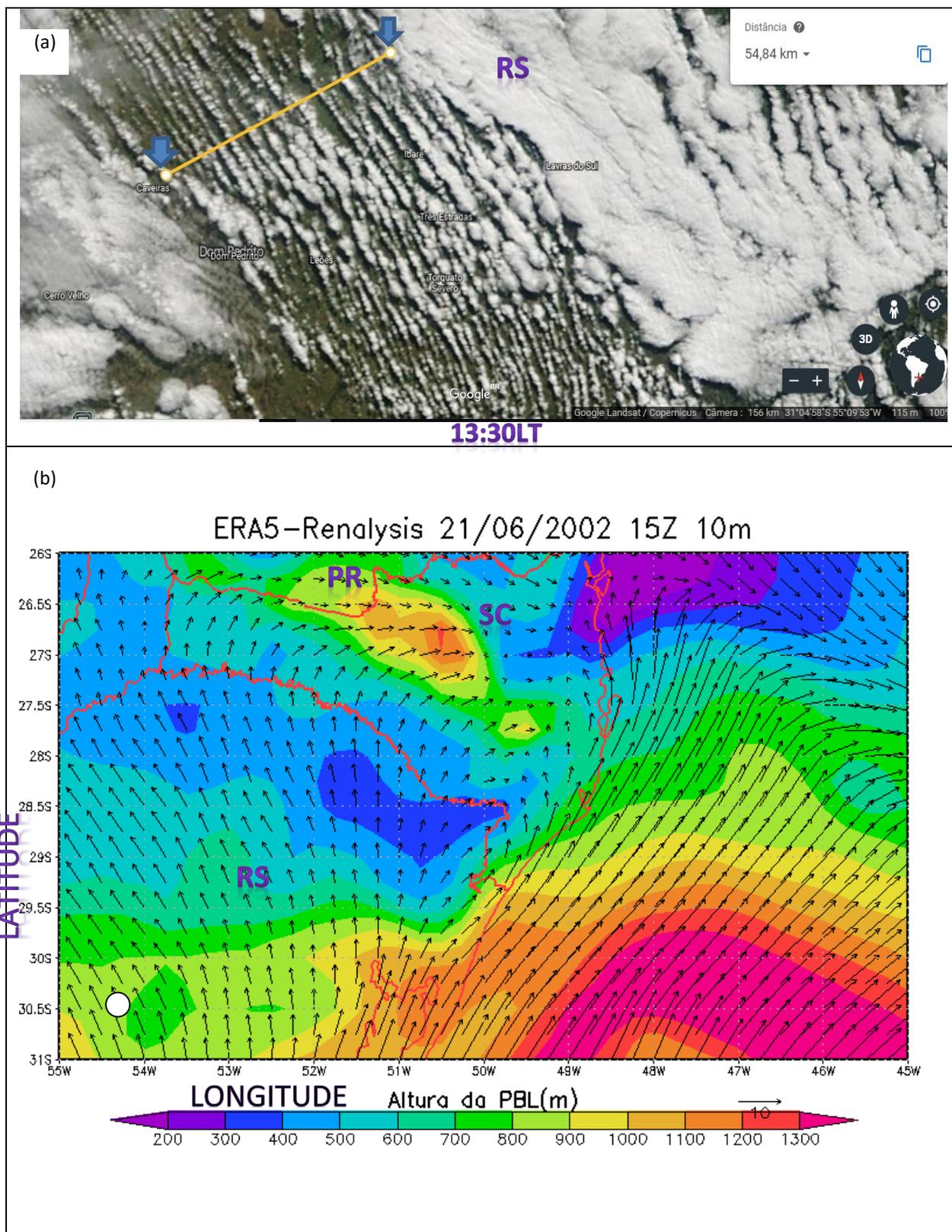


Figura 3 – (a) Imagem do satélite Aqua, onde ocorreu a formação de avenidas de nuvem, apresentando um trecho de avenidas selecionado com sua respectiva distância total - destacada por uma linha amarela entre setas azuis e (b) vetores de ventos a 10 m da superfície, e campos de camada limite (m) na região sul do Brasil, com o ponto em destaque indicando a altura da PBL para o local de interesse, no horário de 15Z, para 21 de junho de 2002.

A Figura 4(a) mostra que a direção do vento predominante foi de Sudeste (SE) e sua velocidade estimada em ~ 6.1 m/s a 10 m da superfície e no horário de 15Z. Verificamos através da Figura 4(b), da radiosondagem para 12Z, uma formação de nuvem logo acima dos níveis mais baixos da atmosfera. Nota-se a existência de uma camada de inversão acima de 1582 m. Também se observa acima de 3112 m a existência de uma camada de ar mais seco. O cisalhamento do vento é baixo. Embora distante, a sondagem permite inferir que as condições da atmosfera local estavam favoráveis à formação de avenidas de nuvem.

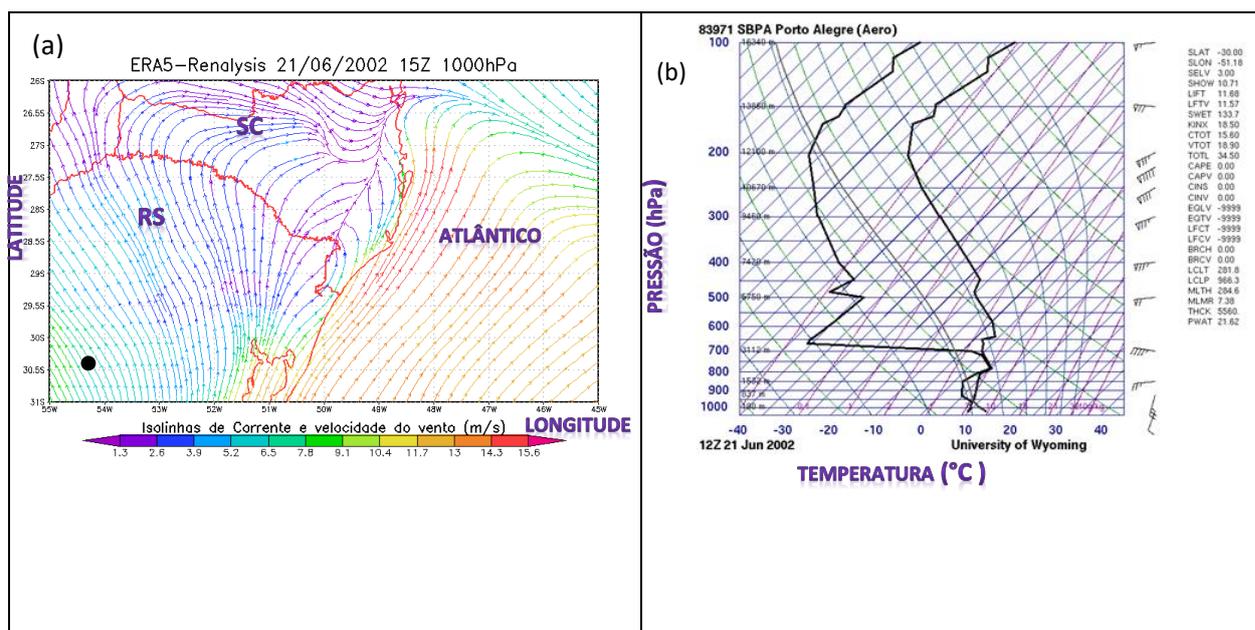


Figura 4 – (a) Isolinhas de corrente, o ponto em destaque para a latitude $30^{\circ}.42'$ S e a longitude $54^{\circ}.33'$ W, indica onde ocorreram as avenidas de nuvem e (b) Radiosondagem efetuada a partir do aeroporto de Porto Alegre – RS, para 21 de junho de 2002.

4.2 CASO 2 - 07 DE SETEMBRO DE 2002

As Figuras 5, 6 e 7 apresentam resultados para o caso ocorrido em 07 de setembro 2002. As Figuras 5(a) e 5(b) apresentam imagens dos satélites Terra e Aqua. As imagens mostram a formação de avenidas de nuvem na região centro-oeste do estado do Rio Grande do Sul. Na Figura 5(a) captada pelo satélite Terra é possível visualizar uma formação de avenidas de nuvem na região em destaque (círculo tracejado amarelo). Porém na Figura 5(b), captada pelo satélite Aqua não é mais possível visualizar essa formação de avenidas devido à presença de nuvens mais acima na atmosfera.

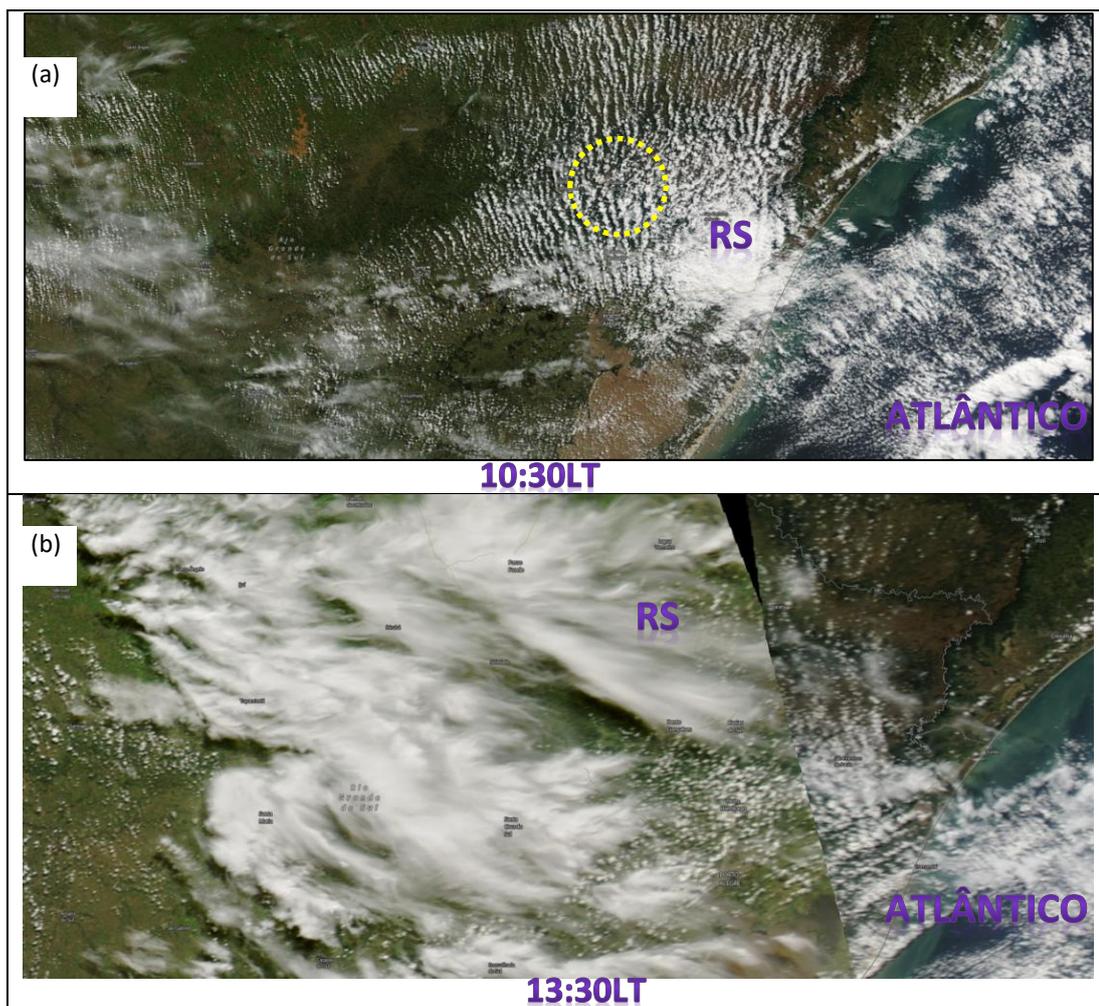


Figura 5 – (a) Imagem do satélite Terra onde ocorreu a formação de avenidas de nuvem, indicando o local das avenidas analisadas – delimitado pelo círculo tracejado amarelo e (b) do satélite Aqua para a mesma região onde ocorreu a formação dessas avenidas, para 07 de setembro de 2002.

A Figura 6(a) apresenta a imagem de satélite juntamente com o local de medida da distância total, e o número de avenidas. Os resultados mostram que a distância para o trecho selecionado foi de 78920 m e foi observado um número de 16 avenidas. A partir destes resultados foi calculada a distância média de 4932 m entre as avenidas. A Figura 6(b) apresenta o gráfico de vetores de vento e a altura da camada limite local, estimada em 1088 m. para a região. A partir destes dados foi estimada uma razão de aspecto no valor de 4.5 (Tabela 3) Foram feitas análises e comparações entre a imagem de satélite e o campo de vetores de vento Figuras 6(a) e 6(b) e constatou-se que as avenidas de nuvem presentes na região, estavam praticamente alinhadas à direção do vento predominante de sul (S).

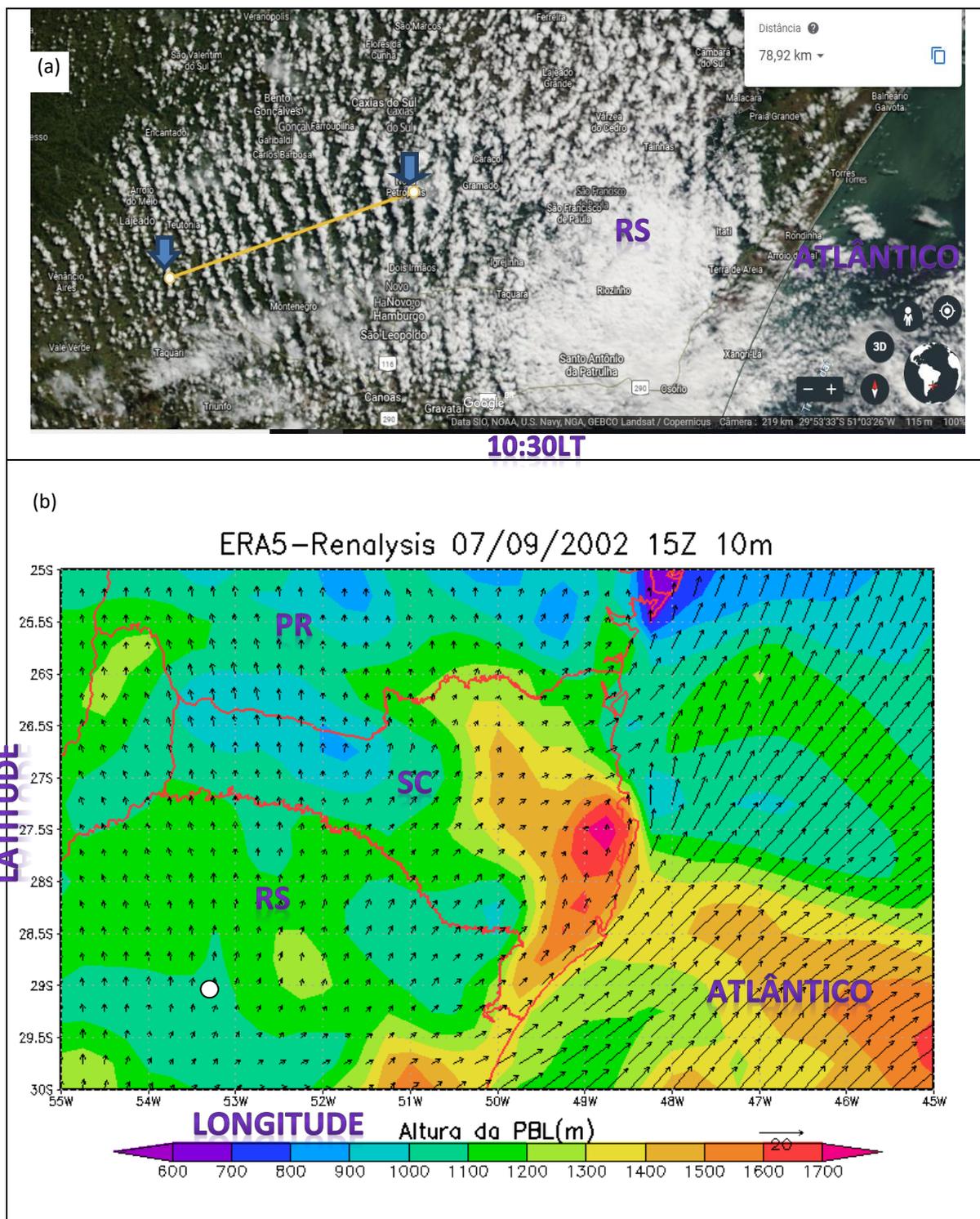


Figura 6 – (a) Imagem do satélite Terra, onde ocorreu a formação de avenidas de nuvem, apresentando um trecho de avenidas selecionado com sua respectiva distância total - destacada por uma linha amarela entre setas azuis, e (b) vetores de vento a 10 m da superfície, e campos de camada limite (m) na região sul do Brasil, com o ponto em destaque indicando altura da PBL para o local de interesse, no horário de 15Z, para 07 de setembro de 2002.

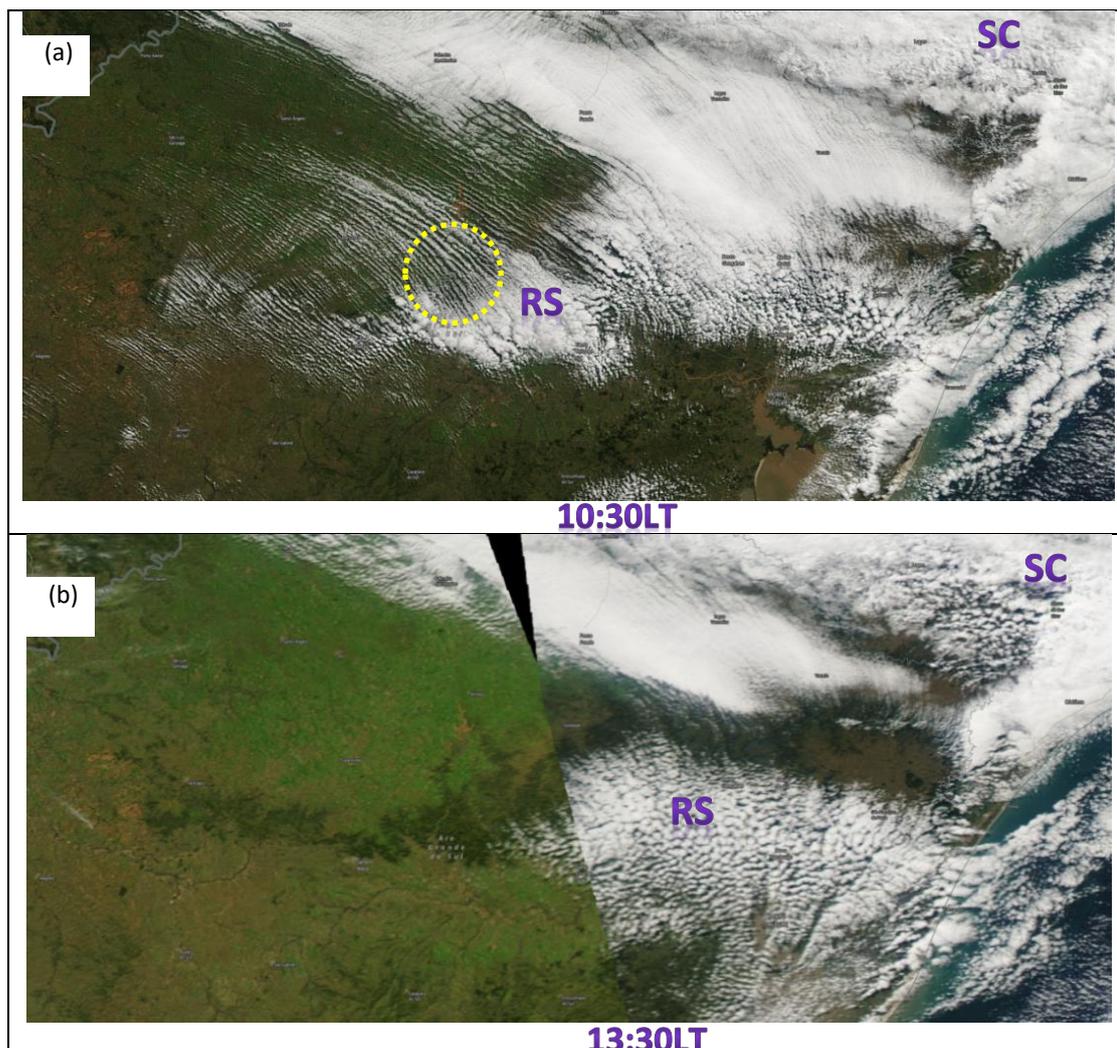


Figura 8 – (a) Imagem do satélite Terra onde ocorreu a formação de avenidas de nuvem indicando o local das avenidas analisadas - delimitada pelo círculo tracejado amarelo e (b) imagem do satélite Aqua para a mesma região onde ocorreu a formação dessas avenidas, para 17 de julho de 2014.

A Figura 9(a) apresenta a imagem de satélite juntamente com o local de medida da distância total, e o número de avenidas. Os resultados mostram que a distância para o trecho selecionado foi de 59110 m e foi observado um número de 17 avenidas. A partir destes resultados foi calculada a distância média de 3447 m entre as avenidas. A Figura 9(b) apresenta o gráfico de vetores de vento e a altura da camada limite local, estimada em 713 m para a região. A partir destes dados foi estimada uma razão de aspecto no valor de 4.8 (Tabela 3). Foram feitas análises e comparações entre a imagem de satélite e o campo de vetores de vento Figuras 9(a) e 9(b) e constatou-se que as avenidas de nuvem presentes na região, estavam praticamente alinhadas à direção do vento predominante de sudeste (SE).

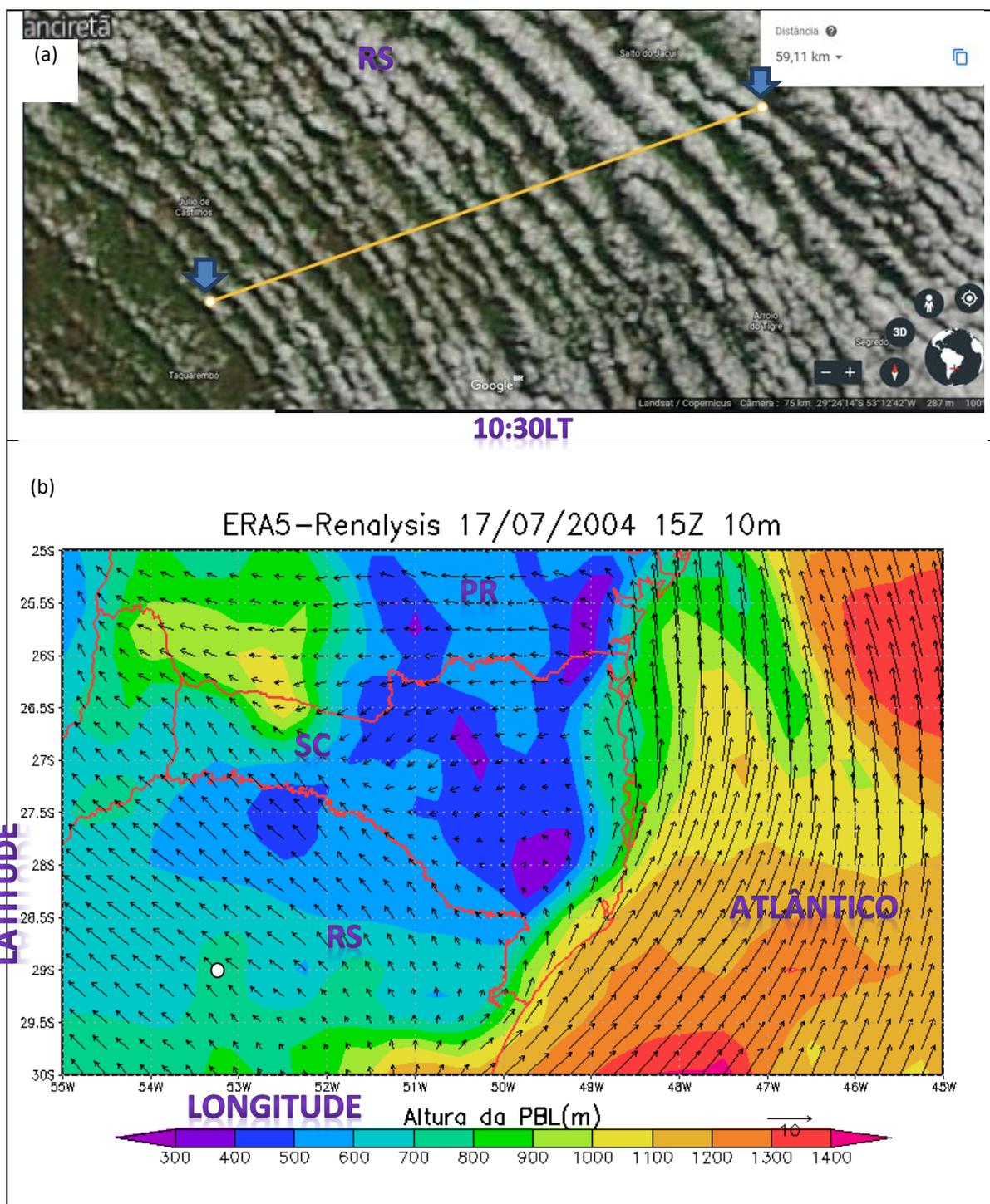


Figura 9 – (a) Imagem do satélite Terra, onde ocorreu a formação de avenidas de nuvem, apresentando um trecho de avenidas selecionado com sua respectiva distância total - destacada por uma linha amarela entre setas azuis e (b) vetores de vento a 10 m da superfície, e campos de camada limite (m) na região sul do Brasil, com o ponto em destaque, indicando altura da PBL para o local de interesse, no horário de 15Z, para 17 de julho de 2004.

A Figura 10(a) mostra que a direção do vento predominante foi de sudeste (SE) e sua velocidade estimada em ~ 3.8 m/s a 10 m da superfície e no horário de 15Z. Verificamos através da Figura 10(b) da radiosondagem para 12Z, uma formação de nuvem logo acima dos níveis mais baixos da atmosfera. Nota-se a existência de uma camada de inversão acima de 895 m. Também se observa a partir de 895 m a existência de uma camada de ar mais seco. O cisalhamento do vento é baixo. Então inferimos que as condições da atmosfera local estavam favoráveis à formação de avenidas de nuvem.

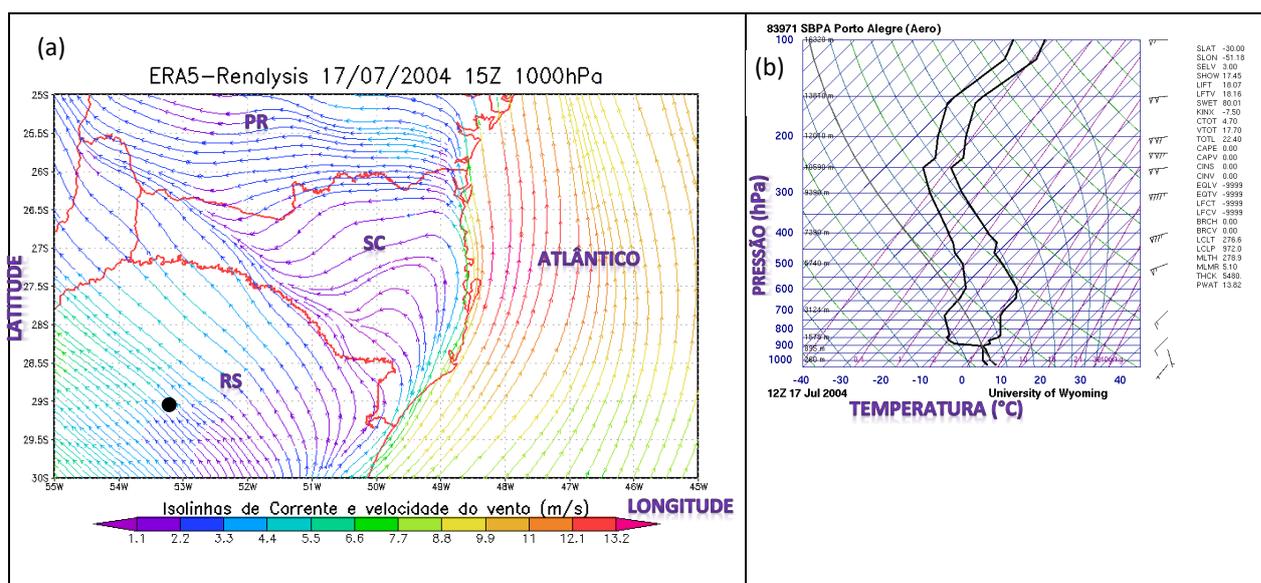


Figura 10 – (a) Isolinhas de corrente, o ponto em destaque para a latitude $29^{\circ}.13'$ S e a longitude $53^{\circ}.21'$ W, indica onde ocorreram as avenidas de nuvem e (b) Radiosondagem efetuada a partir do aeroporto de Porto Alegre-RS, para 17 de julho de 2004.

4.4 CASO 4 - 13 DE AGOSTO DE 2004

As Figuras 11, 12 e 13 apresentam resultados para o caso ocorrido em 13 de agosto de 2004. As Figuras 11(a) e 11(b) apresentam imagens dos satélites Terra e Aqua, respectivamente. As imagens mostram a formação de avenidas de nuvem na região do Vale do Itajaí no estado de Santa Catarina. Na Figura 11(a), captada pelo satélite Terra, é possível visualizar uma formação de avenidas de nuvem na região em destaque. Na Figura 11(b), captada pelo satélite Aqua, é possível ainda visualizar essa formação de avenidas, mas nota-se que ela já não é tão intensa e aparentemente influenciou a formação de nuvens mais espessas na direção das avenidas.

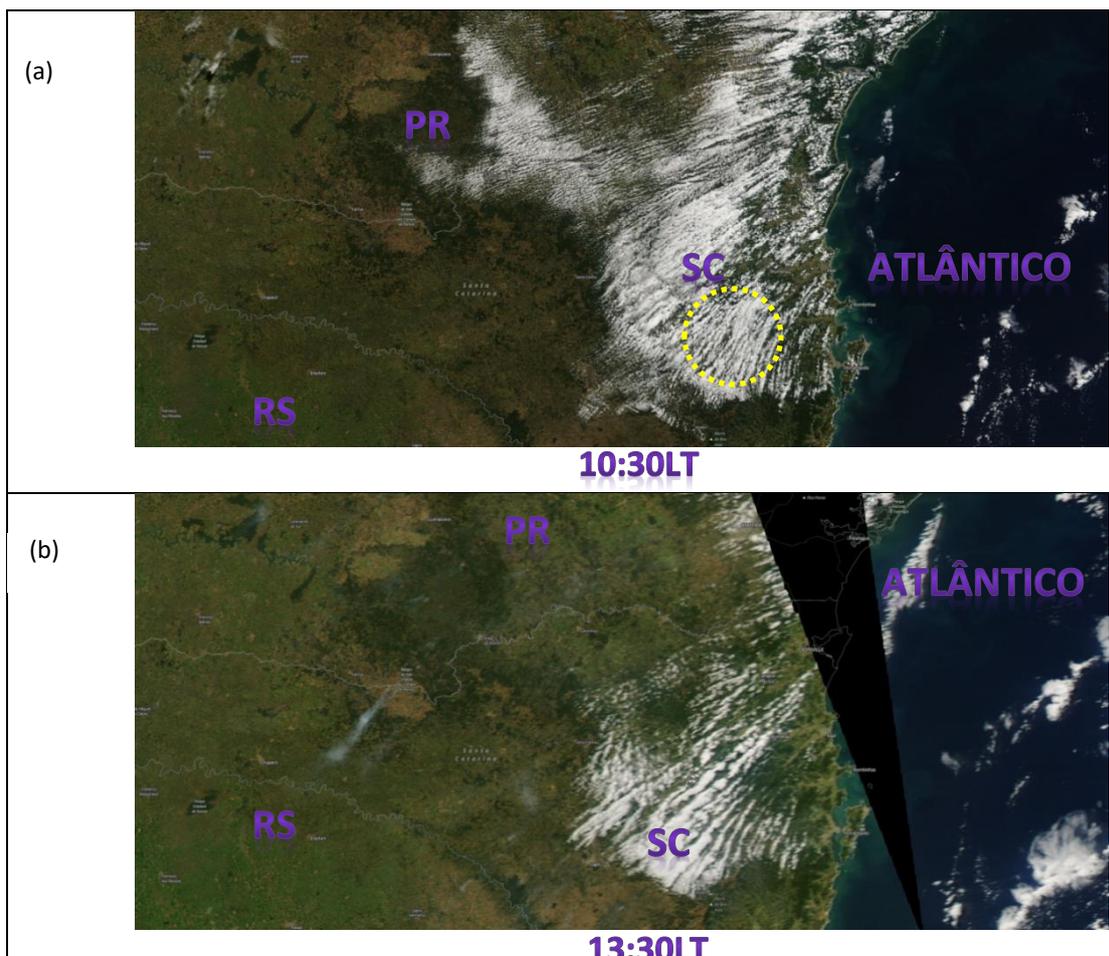


Figura 11 – (a) Imagem do satélite Terra onde ocorreu a formação de avenidas de nuvem indicando o local das avenidas analisadas - delimitada pelo círculo tracejado amarelo e (b) imagem do satélite Aqua para a mesma região onde ocorreu a formação dessas avenidas, para 13 de agosto de 2004.

A Figura 12(a) apresenta a imagem de satélite juntamente com o local de medida da distância total, e o número de avenidas. Os resultados mostram que a distância para o trecho selecionado foi de 64050 m e foi observado um número de 17 avenidas. A partir destes resultados foi calculada a distância média de 3768 m entre as avenidas. A Figura 12(b) apresenta o gráfico de vetores de vento e altura da camada limite local, estimada em 1299 m para a região. A partir destes dados foi estimada uma razão de aspecto no valor de 2.9 (Tabela 3). Foram feitas análises e comparações entre a imagem de satélite e o campo de vetores de vento Figuras 12(a) e 12(b) e constatou-se que as avenidas de nuvem presentes na região, estavam praticamente alinhadas à direção do vento predominante de nordeste (NE).

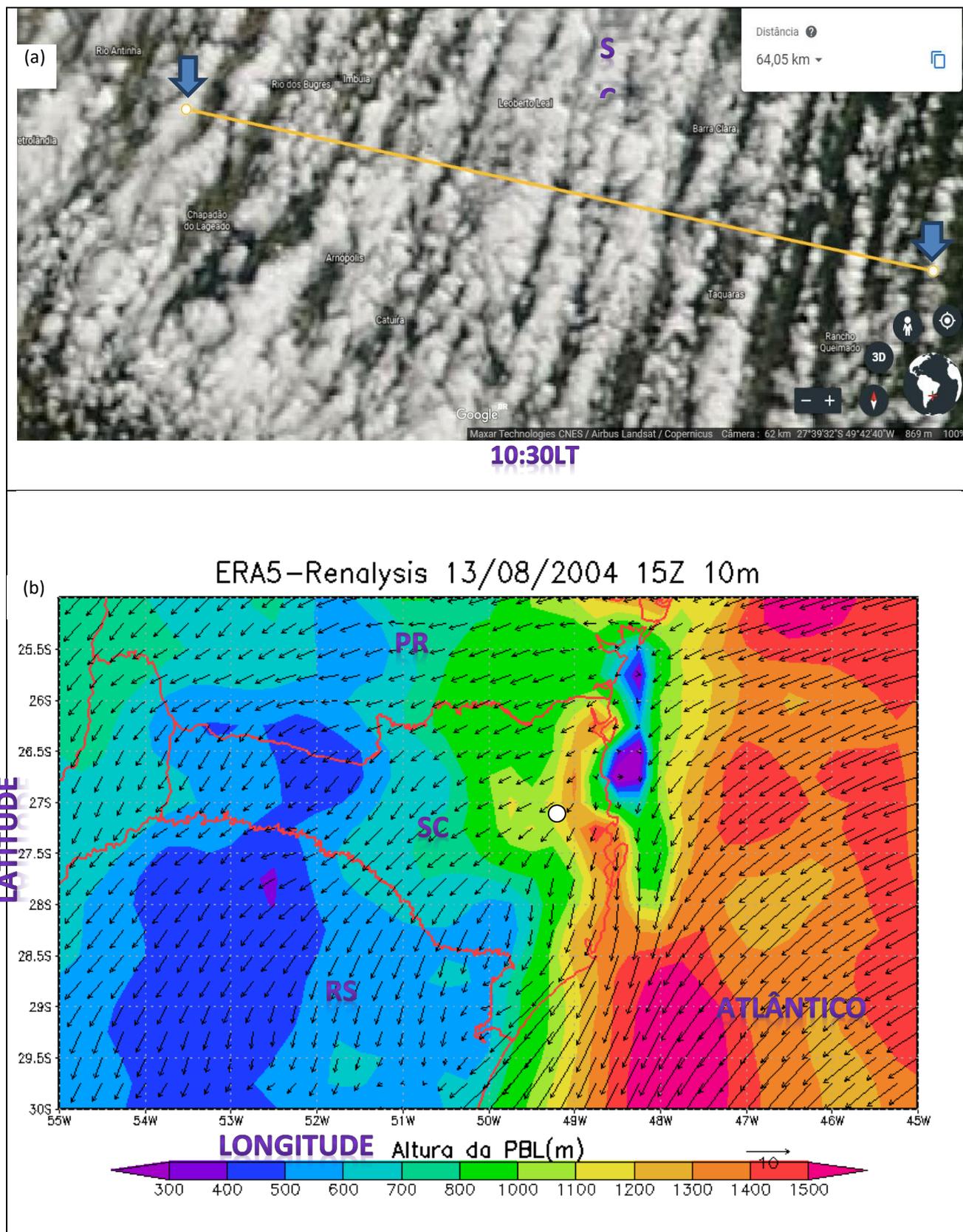


Figura 12 – (a) Imagem do satélite Terra, onde ocorreu a formação de avenidas de nuvem, apresentando um trecho de avenidas selecionado com sua respectiva distância total - destacada por uma linha amarela entre setas azuis e (b) vetores de vento a 10 m da superfície, e campos de camada

limite (m) na região sul do Brasil, com o ponto em destaque indicando altura da PBL para o local de interesse, no horário de 15Z, para 13 de agosto de 2004.

A Figura 13(a) mostra que a direção do vento predominante foi de nordeste (NE) e sua velocidade estimada em ~ 2.9 m/s a 10 m da superfície e no horário de 15Z. Verificamos através da Figura 13(b), da radiosondagem para 12Z, que não há ainda a formação de nuvens logo acima dos níveis mais baixos da atmosfera. Nota-se a existência de uma camada de inversão acima de 1607 m. Também se observa a partir de 1607 m a existência de uma camada de ar mais seco. O cisalhamento do vento também é baixo. Então inferimos que as condições da atmosfera local estavam favoráveis à formação de avenidas de nuvens.

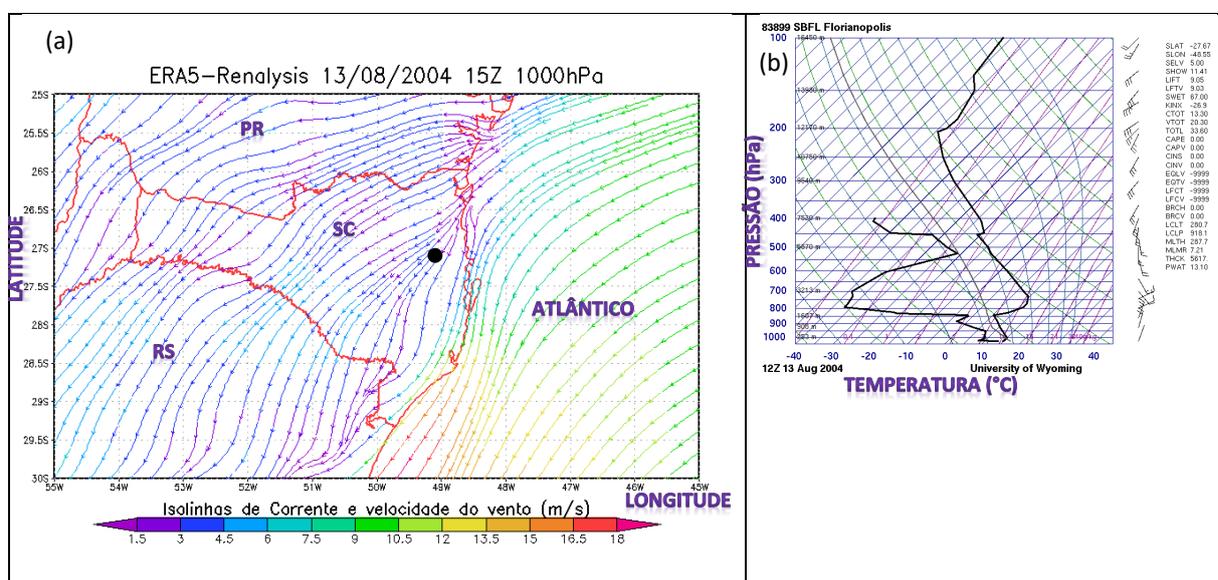


Figura 13 – (a) Isolinhas de corrente, o ponto em destaque para a latitude $27^{\circ}.34'$ S e a longitude $49^{\circ}.14'$ W, indica onde ocorreram as avenidas de nuvem e (b) Radiosondagem efetuada a partir do aeroporto de Florianópolis – SC, para 13 de agosto de 2004.

4.5 CASO 5 - 07 DE FEVEREIRO DE 2005

As Figuras 14, 15 e 16 apresentam resultados para o caso ocorrido em 13 de agosto de 2004. As Figuras 14(a) e 14(b) apresentam imagens dos satélites Terra e Aqua. As imagens mostram a formação de avenidas de nuvem na região do meio-oeste do estado de Santa Catarina. Na Figura 14(a) captada pelo satélite Terra é possível visualizar uma formação de avenidas de nuvem na região em destaque (círculo tracejado amarelo). Na Figura 14(b), captada pelo satélite Aqua, nota-se que a formação de avenidas se desfez e evoluiu para células

abertas e aparentemente influenciou a formação de nuvens mais espessas na direção das avenidas.

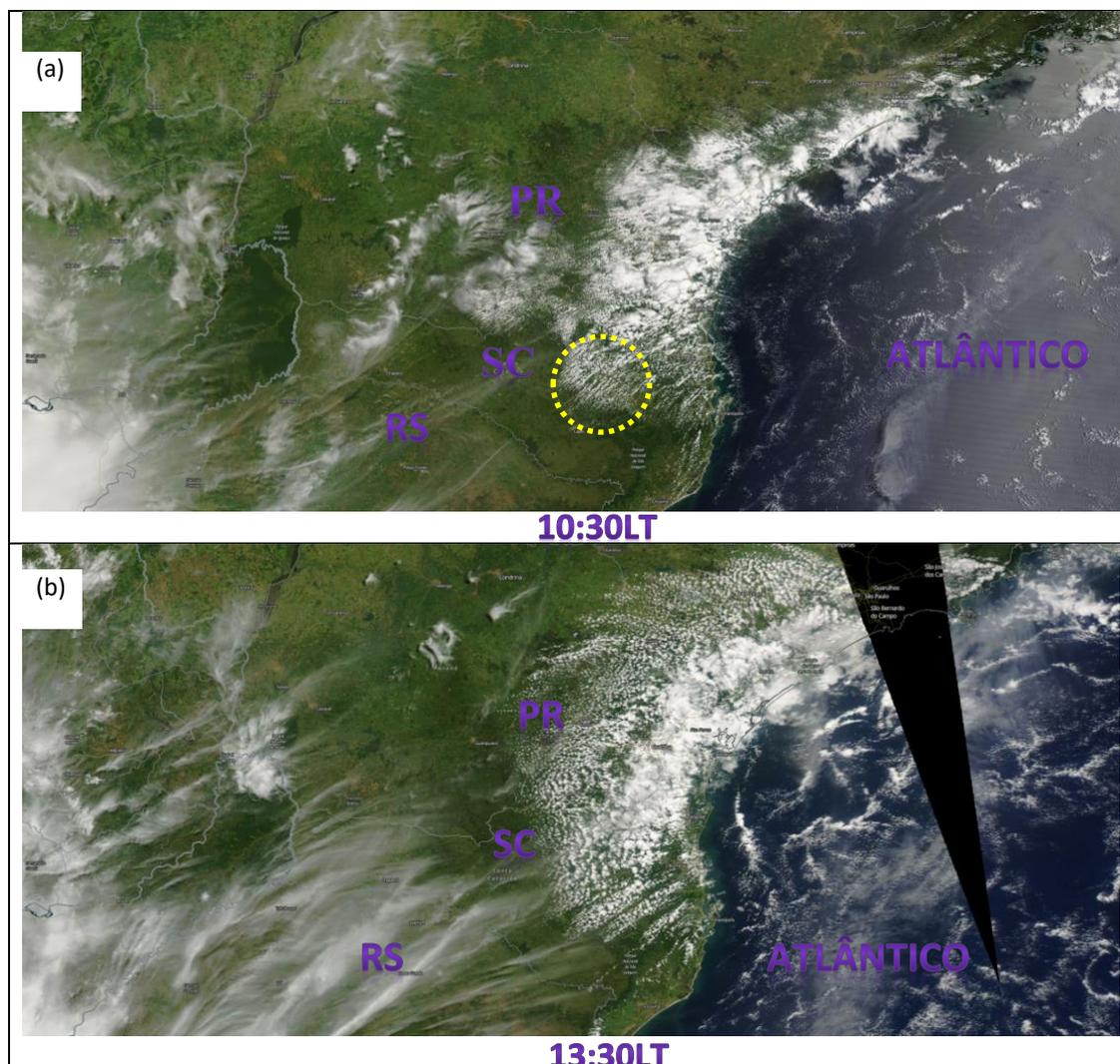


Figura 14 – (a) Imagem do satélite Terra onde ocorreu a formação de avenidas de nuvem indicando o local das avenidas analisadas - delimitada pelo círculo tracejado amarelo e (b) imagem do satélite Aqua para a mesma região onde ocorreu a formação dessas avenidas, para 07 de fevereiro de 2005.

A Figura 15(a) apresenta a imagem de satélite juntamente com o local de medida da distância total, e o número de avenidas. Os resultados mostram que a distância para o trecho selecionado foi de 47560 m e foi observado um número de 17 avenidas. A partir destes resultados foi calculada a distância média de 2798 m entre avenidas. A Figura 15(b) apresenta o

gráfico de vetores de vento e a altura da camada limite local, estimada em 1348 m para a região. A partir destes dados foi estimada uma razão de aspecto no valor de 2.1 (Tabela 3). Foram feitas análises e comparações entre a imagem de satélite e o campo de vetores de vento Figuras 15(a) e 15(b) e constatou-se que as avenidas de nuvem presentes na região, estavam praticamente alinhadas à direção do vento predominante de nordeste (NE).

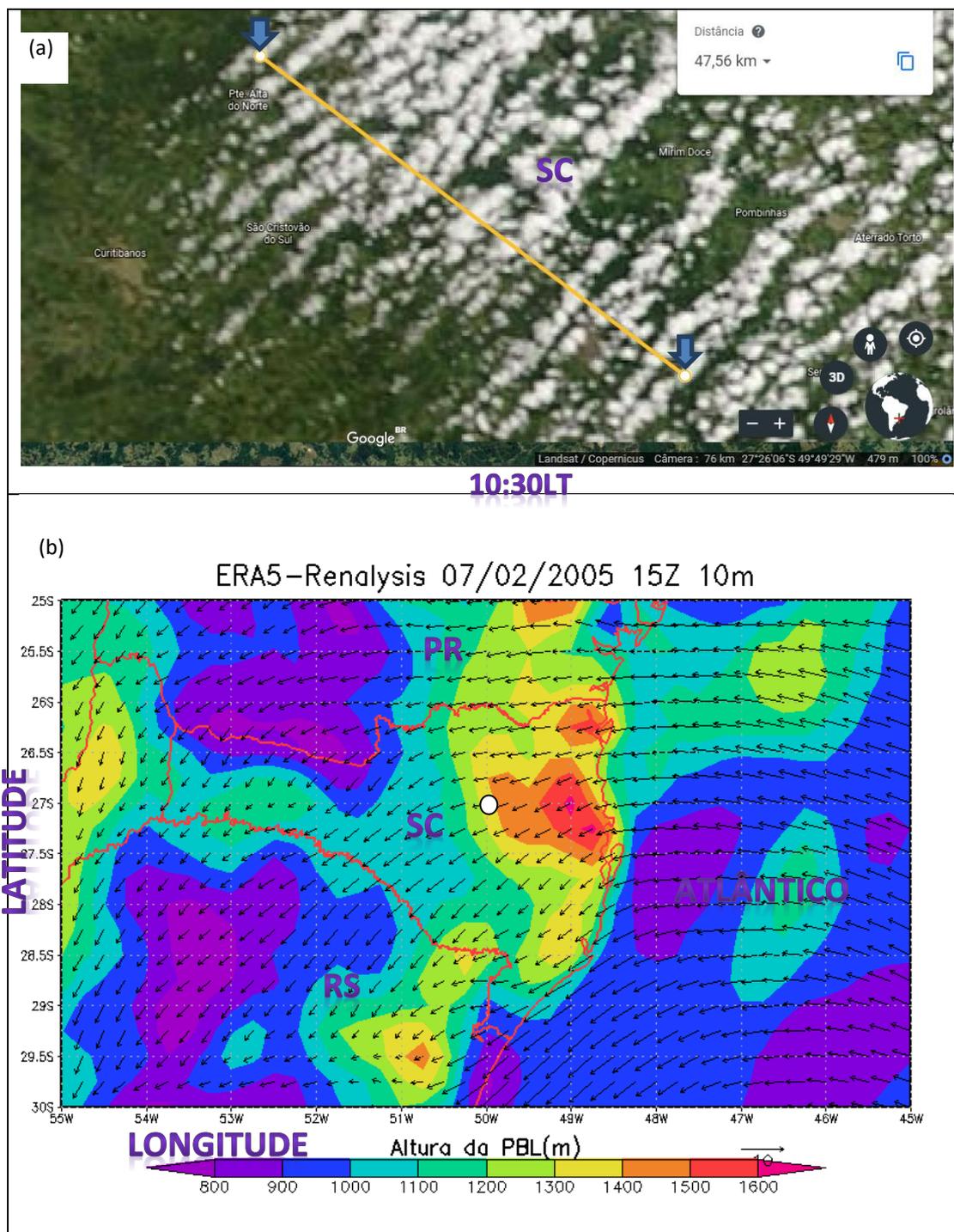


Figura 15 – (a) Imagem do satélite Terra, onde ocorreu a formação de avenidas de nuvem, apresentando um trecho de avenidas selecionado com sua respectiva distância total - destacada por uma linha amarela entre setas azuis e (b) vetores de vento a 10 m da superfície, e campos de camada limite (m) na região sul do Brasil, com o ponto em

destaque indicando altura da PBL para o local de interesse, no horário de 15Z, para 07 de fevereiro de 2005.

A Figura 16(a) mostra que a direção do vento predominante foi de nordeste (NE) e sua velocidade estimada em ~ 3.4 m/s a 10 m da superfície e no horário de 15Z. Verificamos através das Figuras 16(b), da radiosondagem para 12Z, que não há ainda a formação de nuvens logo acima dos níveis mais baixos da atmosfera. Nota-se a existência de uma camada de inversão acima de 1190 m, e outra acima de 2134 m. Também se observa a partir de 2134 m a existência de uma camada de ar mais seco. O cisalhamento do vento também é baixo. Então inferimos que as condições da atmosfera local estavam favoráveis à formação de avenidas de nuvens.

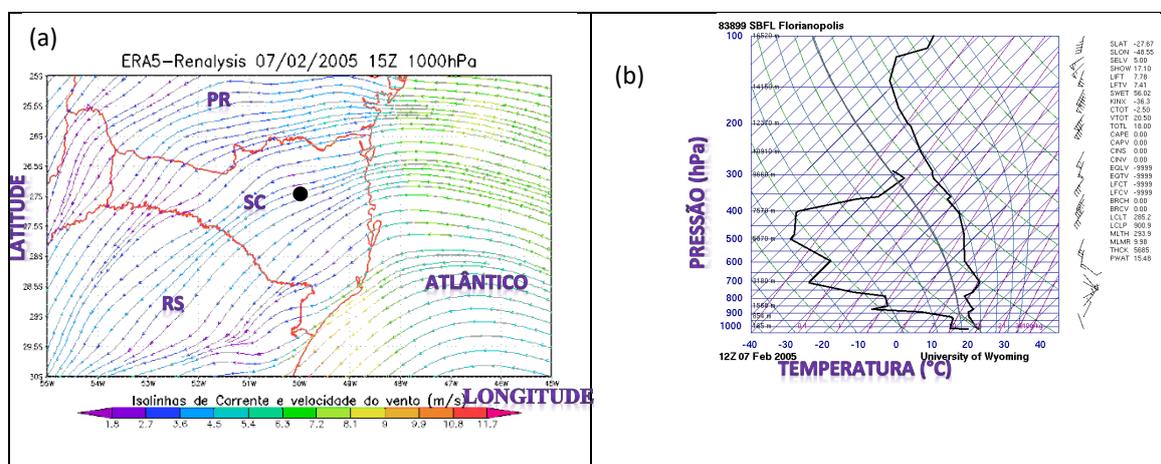


Figura 16 – (a) Isolinhas de corrente, o ponto em destaque para a latitude $27^{\circ}.15'$ S e a longitude $50^{\circ}.15'$ W, indica onde ocorreram as avenidas de nuvem e (b) Radiosondagem efetuada a partir do aeroporto de Florianópolis – SC, para 07 de fevereiro de 2005.

4.6 CASO 6 - 21 DE JUNHO DE 2005

As Figuras 17, 18 e 19 apresentam resultados para o caso ocorrido em 21 de junho de 2005. As Figuras 17(a) e 17(b) apresentam a imagens dos satélites Terra e Aqua. As imagens mostram a formação de avenidas de nuvem na região centro-oeste do estado do Rio Grande do Sul. Na Figura 17(a) captada pelo satélite Terra é possível visualizar uma formação de avenidas de nuvem na região em destaque (círculo tracejado amarelo). Na Figura 17(b), captada pelo satélite Aqua, nota-se a formação de avenidas se desfez e evoluiu para células abertas.

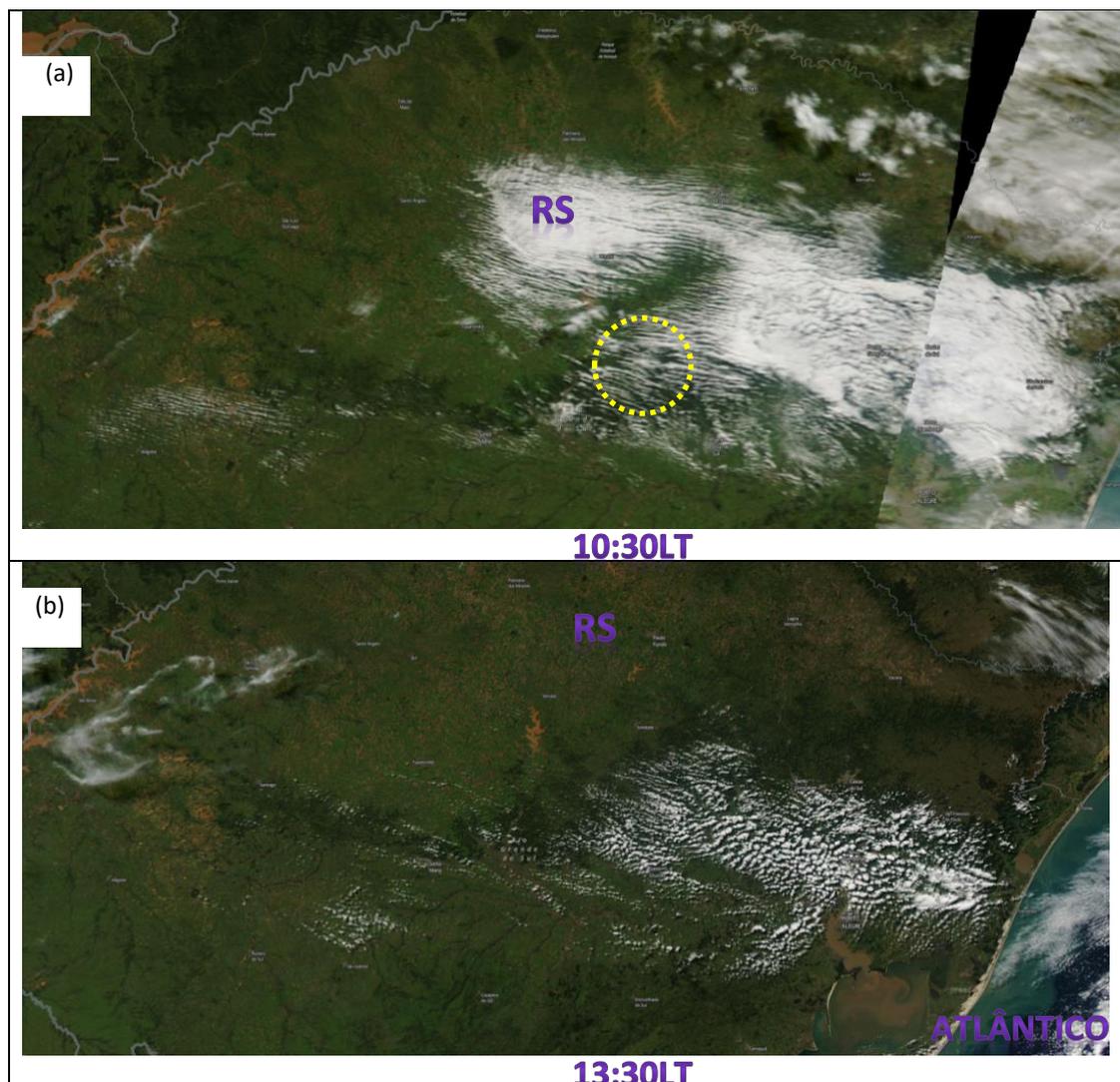


Figura 17- (a) Imagem do satélite Terra onde ocorreu a formação de avenidas de nuvem indicando o local das avenidas analisadas - delimitada pelo círculo tracejado amarelo e (b) imagem do satélite Aqua para a mesma região onde ocorreu a formação dessas avenidas, para 21 de junho de 2005.

A Figura 18(a) apresenta a imagem de satélite juntamente com o local de medida da distância total, e o número de avenidas. Os resultados mostram que a distância para o trecho selecionado foi de 32250 m e foi observado um número de 12 avenidas. A partir destes resultados foi calculada a distância média de 2687 m entre avenidas. A Figura 18(b) apresenta o gráfico de vetores de vento e altura da camada limite local, estimada em 718 m para a região. A partir destes dados foi estimada uma razão de aspecto no valor de 3.7 (Tabela 3). Foram feitas análises e comparações entre a imagem de satélite e o campo de vetores de vento Figuras 18(a) e 18(b) e constatou-se que as avenidas de nuvem presentes na região, estavam praticamente alinhadas à direção do vento predominante de sudeste (SE).

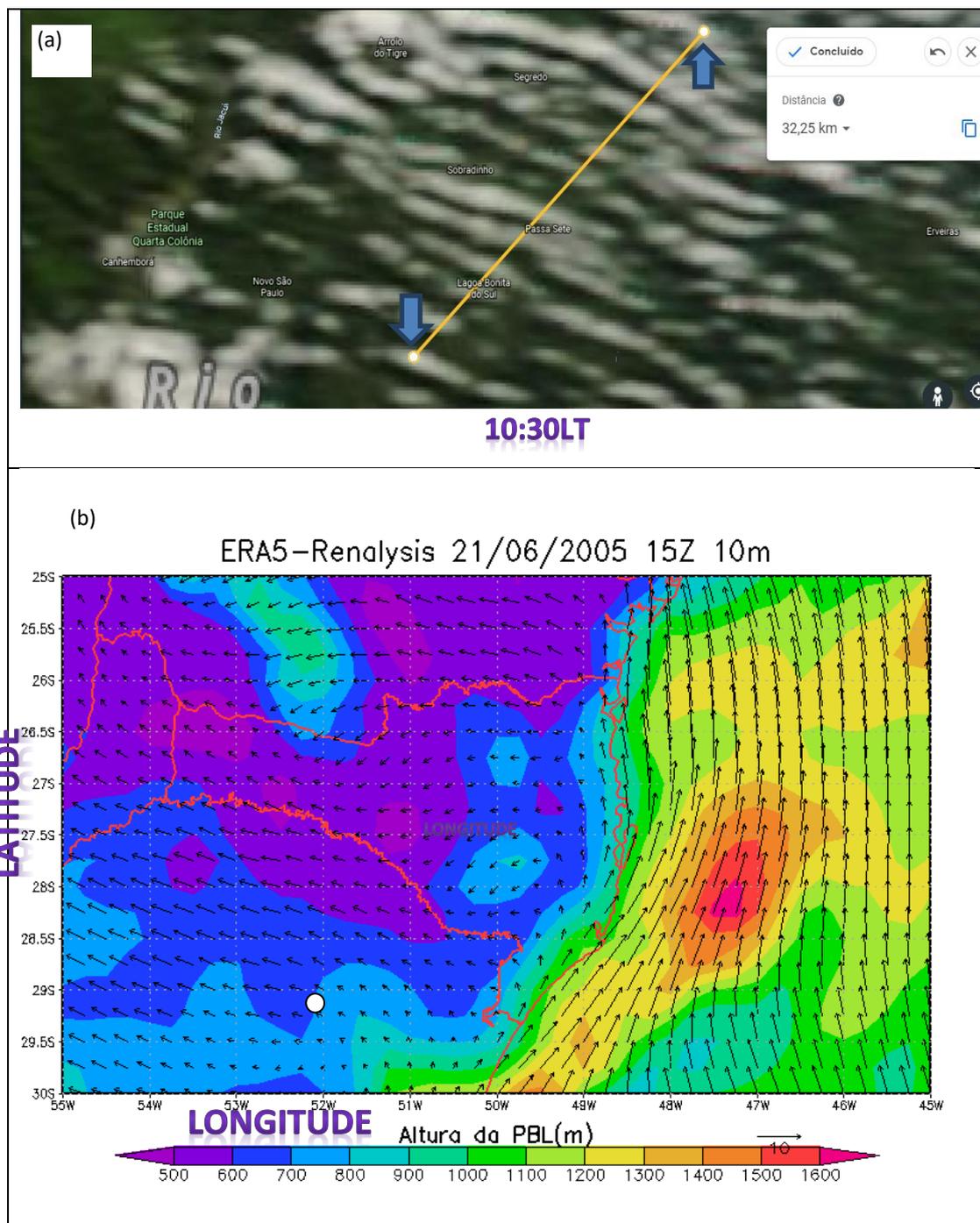


Figura 18 – (a) Imagem do satélite Terra, onde ocorreu a formação de avenidas de nuvem, apresentando um trecho de avenidas selecionado com sua respectiva distância total - destacada por uma linha amarela entre setas azuis e (b) vetores de vento a 10 m da superfície, e campos de camada limite (m) na região sul do Brasil, com o ponto em destaque indicando altura da PBL para o local de interesse, no horário de 15Z, para 21 de junho de 2005.

A Figura 19(a) mostra que a direção do vento predominante foi de sudeste (SE) e sua velocidade estimada em ~ 1.4 m/s a 10 m da superfície e no horário de 15Z. Verificamos

através da Figura 19(b), da radiosondagem para 12Z, que não há ainda a formação de nuvens logo acima dos níveis mais baixos da atmosfera. Nota-se a existência de uma camada de inversão acima de 1193 m, e outra acima de 1565 m. Também se observa a partir de 718 m a existência de uma camada de ar mais seco. O cisalhamento do vento também é baixo. Então, inferimos que as condições da atmosfera local estavam favoráveis à formação de avenidas de nuvens.

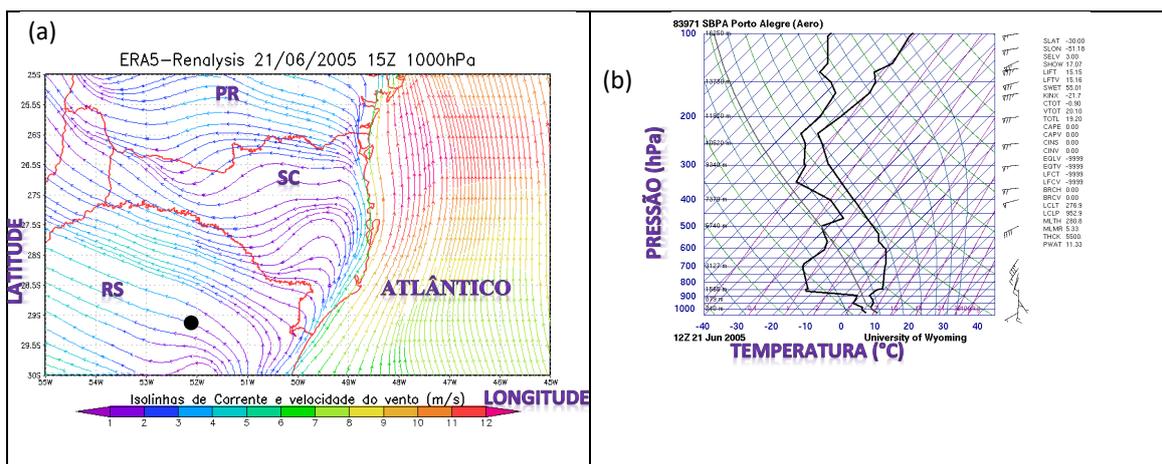


Figura 19 – (a) Isolinhas de corrente, o ponto em destaque para a latitude $29^{\circ}.26' S$ e a longitude $52^{\circ}.16' W$, indica onde ocorreram as avenidas de nuvem e (b) Radiosondagem efetuada a partir do aeroporto de Porto Alegre – RS, para 21 de junho de 2005.

4.7 CASO 7 - 25 DE FEVEREIRO DE 2010

As Figuras 20, 21 e 22 apresentam resultados para o caso ocorrido em 25 de fevereiro de 2010. As Figuras 20(a) e 20(b) apresentam as imagens dos satélites Terra e Aqua. As imagens mostram a formação de avenidas de nuvem na região nordeste do estado do Rio Grande do Sul. Na Figura 20(a) captada pelo satélite Terra é possível visualizar uma formação de avenidas de nuvem na região em destaque (círculo tracejado amarelo). Na Figura 20(b), captada pelo satélite Aqua, essa formação de avenidas se desfez e evoluiu para células abertas e aparentemente influenciou a formação de nuvens mais espessas na direção das avenidas.

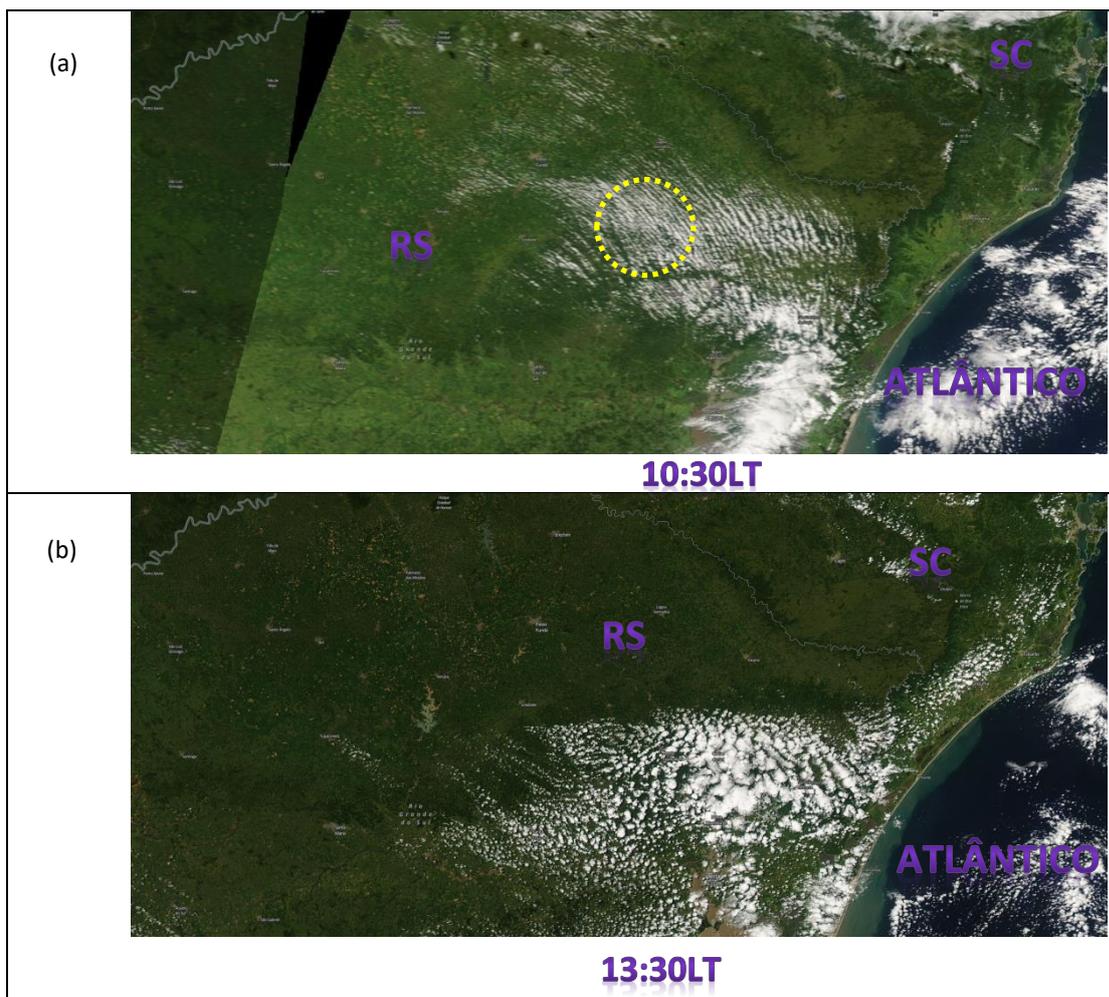


Figura 20 – (a) Imagem do satélite Terra onde ocorreu a formação de avenidas de nuvem indicando o local das avenidas analisadas - delimitada pelo círculo tracejado amarelo e (b) imagem do satélite Aqua para mesma região onde ocorreu a formação dessas avenidas, para 25 de fevereiro de 2010.

A Figura 21(a) apresenta a imagem de satélite juntamente com o local de medida da distância total, e o número de avenidas. Os resultados mostram que a distância para o trecho selecionado foi de 45940 m e foi observado um número de 15 avenidas. A partir destes resultados foi calculada a distância média de 3063 m entre avenidas. A Figura 21(b) apresenta o gráfico de vetores de vento e altura da camada limite local, estimada em 995 m para a região. A partir destes dados foi estimada uma razão de aspecto no valor de 3.1 (Tabela 3). Foram feitas análises e comparações entre a imagem de satélite e o campo de vetores de vento Figuras 21(a) e 21(b) e constatou-se que as avenidas de nuvem presentes na região, estavam praticamente alinhadas à direção do vento predominante de sudeste (SE).

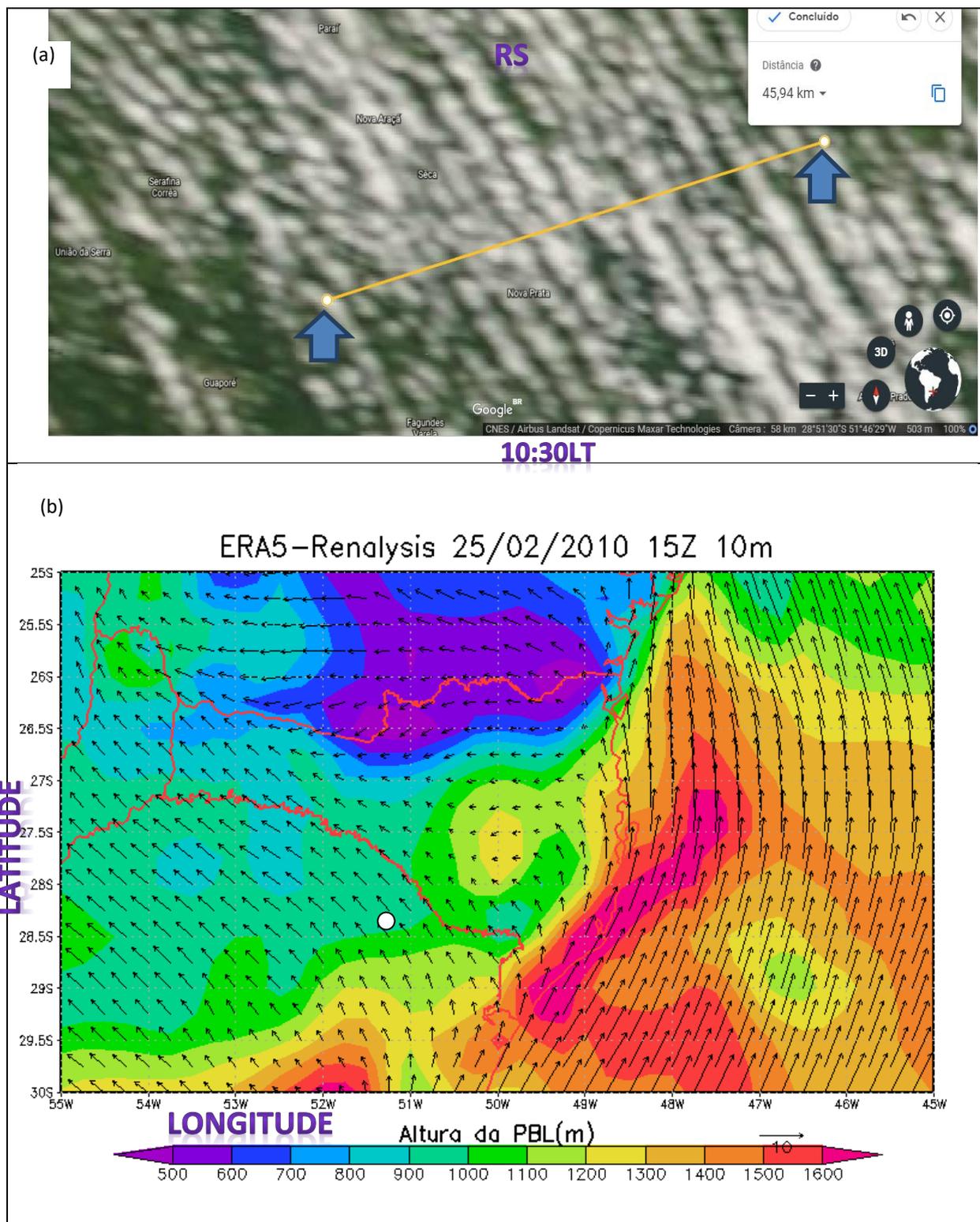


Figura 21- (a) Imagem do satélite Terra, onde ocorreu a formação de avenidas de nuvem, apresentando um trecho de avenidas de nuvem selecionado com sua respectiva distância total - destacada por uma linha amarela entre setas azuis e (b) vetores de vento a 10 m da superfície, e campos de camada limite (m) na região sul do Brasil, com o ponto em destaque indicando altura da PBL para o local de interesse, no horário de 15Z, para 25 de fevereiro de 2010.

A Figura 22(a) mostra que a direção do vento predominante foi de sudeste (SE) e sua velocidade estimada em ~ 2.9 m/s a 10 m da superfície e no horário de 15Z. Verificamos através da Figura 22(b), da radiosondagem para 12Z, que não há ainda a formação de nuvens logo acima dos níveis mais baixos da atmosfera. Nota-se a existência de uma camada de inversão acima de 1932 m. Também se observa a partir de 1932 m a existência de uma camada de ar mais seco. O cisalhamento do vento também é baixo. Então inferimos que as condições da atmosfera local estavam favoráveis à formação de avenidas de nuvem.

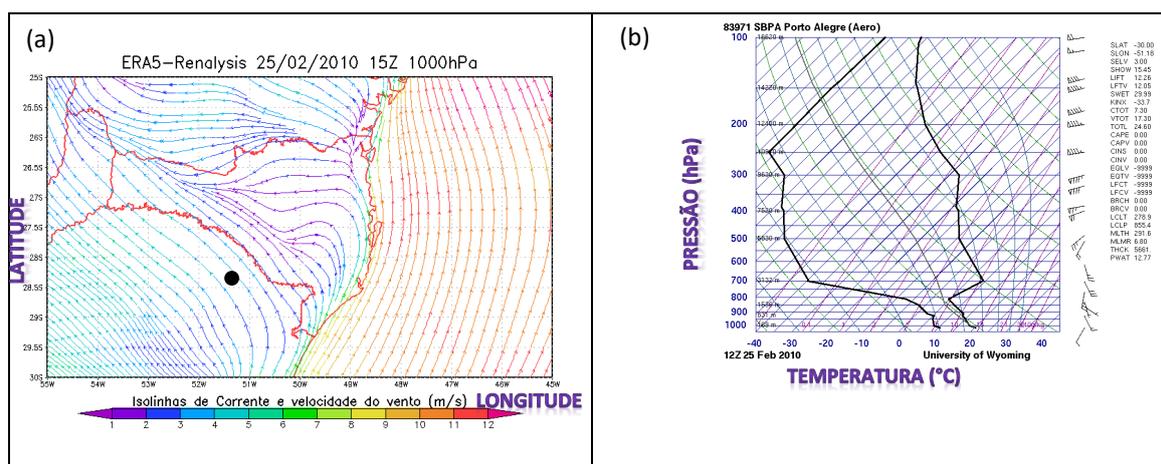


Figura 22 – (a) Isolinhas de corrente, o ponto em destaque para a latitude $28^{\circ}.43'$ S e a longitude $51^{\circ}.33'$ W, indica onde ocorreram as avenidas de nuvem e (b) Radiosondagem efetuada a partir do aeroporto de Porto Alegre – RS, para 25 de fevereiro de 2010.

4.8 CASO 8 - 20 DE AGOSTO DE 2011

As Figuras 23, 24 e 25 apresentam resultados para o caso ocorrido em 20 de agosto de 2011. As Figuras 23(a) e 23(b) apresentam as imagens dos satélites Terra e Aqua. As imagens mostram a formação de avenidas de nuvem na região nordeste do estado do Rio Grande do Sul. Na Figura 23(a) captada pelo satélite Terra nota-se que, embora já exista a formação de avenidas de nuvem, sua caracterização é melhor visualizada na Figura 23(b) captada pelo satélite Aqua, na região em destaque (círculo tracejado amarelo).

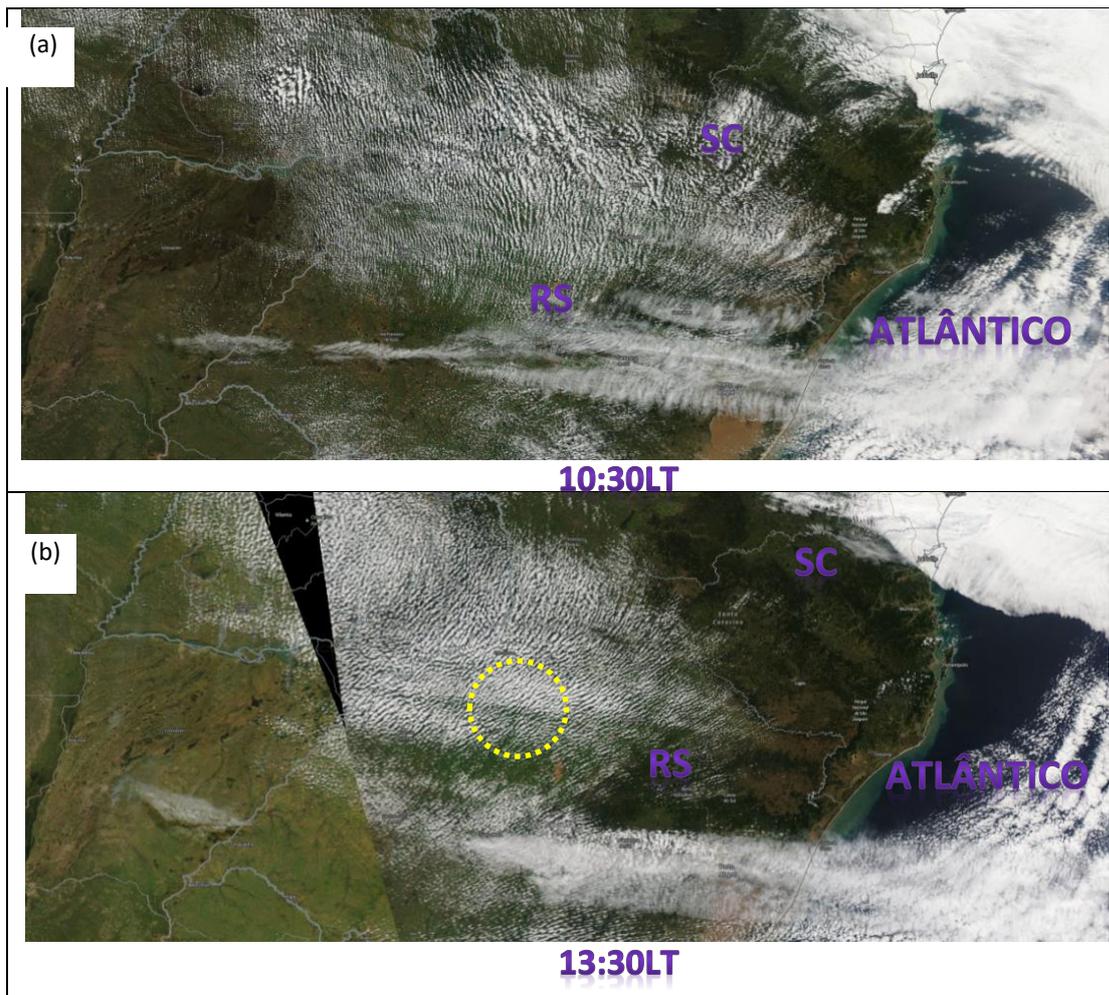


Figura 23 – (a) Imagem do satélite Terra onde ocorreu a formação de avenidas de nuvem e (b) imagem do satélite Aqua para a mesma região de formação dessas avenidas, indicando o local analisado - delimitado pelo círculo tracejado amarelo, para 20 de agosto de 2011.

A Figura 24(a) apresenta a imagem de satélite juntamente com o local de medida da distância total, e o número de avenidas. Os resultados mostram que a distância para o trecho selecionado foi de 60660 m e foi observado um número de 12 avenidas. A partir destes resultados foi calculada a distância média de 5055 m entre as avenidas. A Figura 24(b) apresenta o gráfico de vetores de vento e altura da camada limite local, estimada em 1081 m para a região. A partir destes dados foi estimada uma razão de aspecto no valor de 4.7 (Tabela 3). Foram feitas análises e comparações entre a imagem de satélite e o campo de vetores de vento Figuras 24(a) e 24(b) e constatou-se que as avenidas de nuvem presentes na região, estavam praticamente alinhadas à direção do vento predominante de sudoeste (SW).

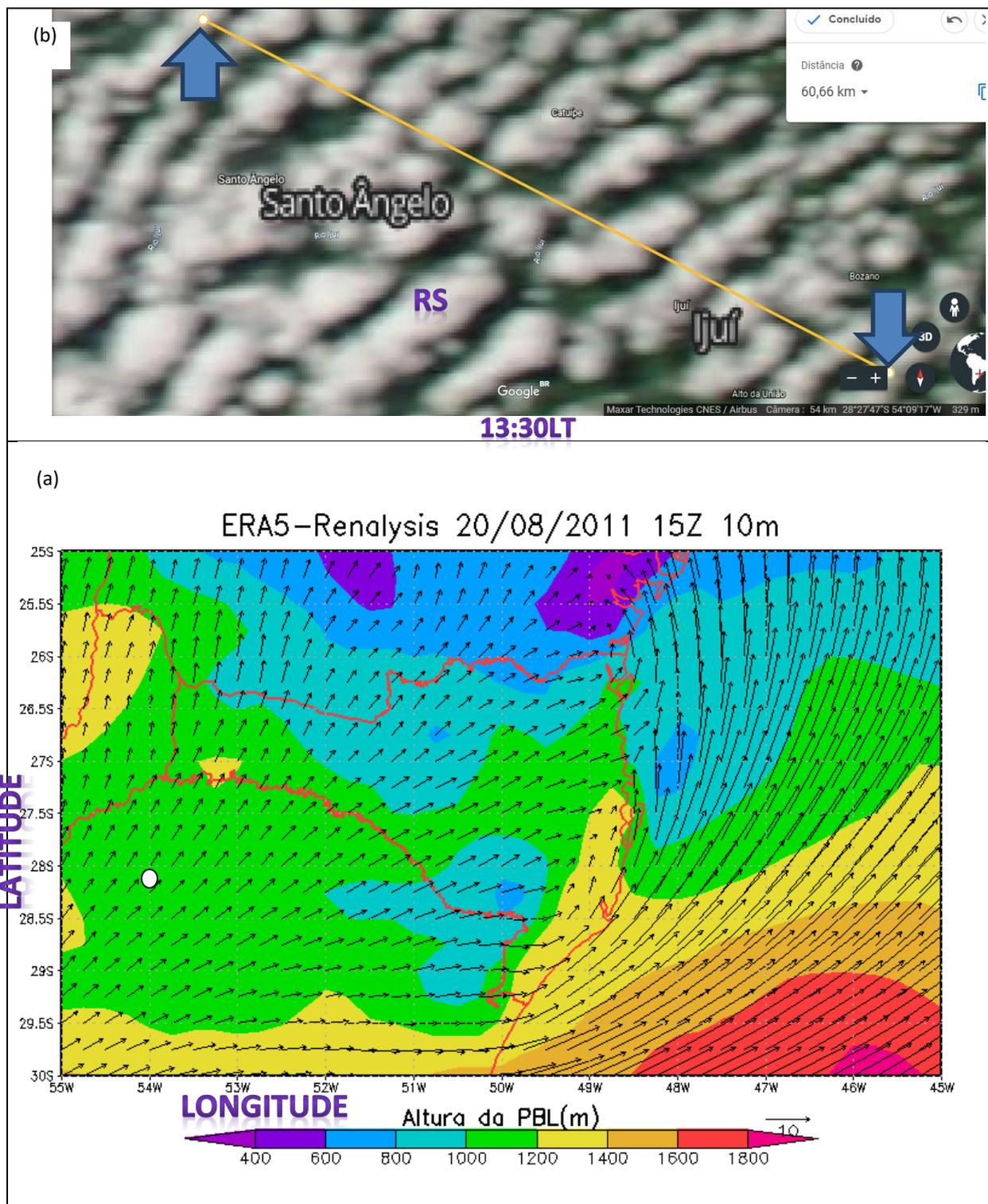


Figura 24 – (a) Imagem do satélite Aqua, onde ocorreu a formação de avenidas de nuvem, apresentando um trecho de avenidas selecionado com sua respectiva distância total - destacada por uma linha amarela entre setas azuis e (b) vetores de vento a 10 m da superfície, e campos de camada limite (m) na região sul do Brasil, com o ponto em destaque indicando altura da PBL para o local de interesse, no horário de 15Z, para 20 de agosto de 2011.

A Figura 25(a) mostra que a direção do vento predominante foi de sudoeste (SW) e sua velocidade estimada em $\sim 4.0\text{m/s}$ a 10 m da superfície e no horário de 15Z. Verificamos através das Figuras 25(b), da radiosondagem para 12Z, que embora ainda não tivesse ocorrido a formação de nuvens logo acima dos níveis mais baixos da atmosfera, existia uma tendência para que isso acontecesse. Nota-se a existência de uma camada de inversão acima de 907 m, e outra acima de 1157 m. Também se observa a partir de 1157 m a presença de uma camada de ar mais seco. O cisalhamento do vento também estava baixo. Então inferimos que as condições da atmosfera local estavam favoráveis à formação de avenidas de nuvens.

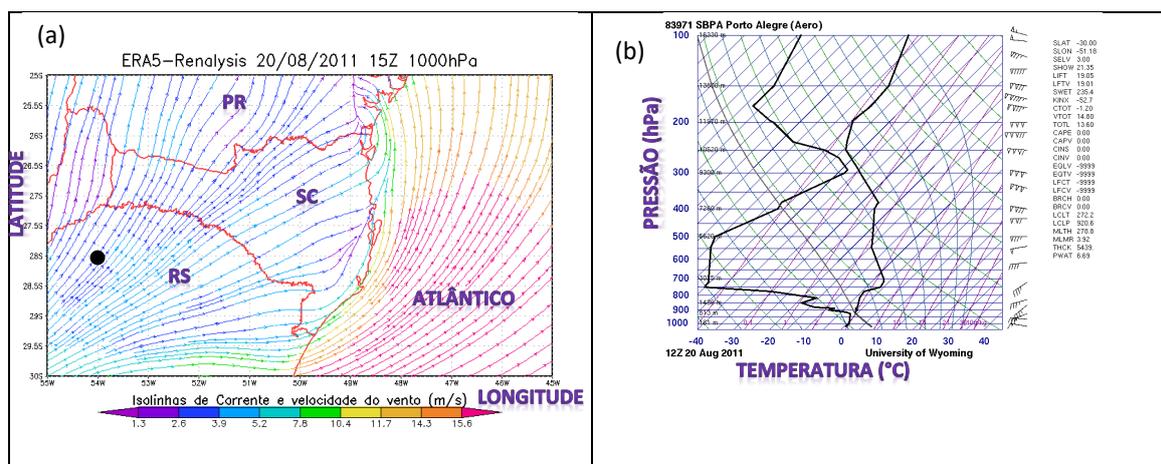


Figura 25 – (a) Isolinhas de corrente, o ponto em destaque para a latitude $28^{\circ}.18' \text{ S}$ e a longitude $54^{\circ}.01' \text{ W}$, onde ocorreram as avenidas de nuvem e (b) Radiosondagem efetuada a partir do aeroporto de Porto Alegre – RS (b), para 20 de agosto de 2011.

4.9 CASO 9 - 23 DE JULHO DE 2013

As Figuras 26, 27 e 28 apresentam resultados para o caso ocorrido em 23 de julho de 2013. As Figuras 26(a) e 26(b) apresentam as imagens dos satélites Terra e Aqua. As imagens mostram a formação de avenidas de nuvem na região nordeste do estado de Santa Catarina na divisa com o estado do Paraná. Na Figura 26(a) captada pelo satélite Terra nota-se que já estão se formando algumas avenidas de nuvem. Na Figura 26(b), captada pelo satélite Aqua, é possível visualizar que houve uma maior formação dessas avenidas na região em destaque (círculo tracejado amarelo).

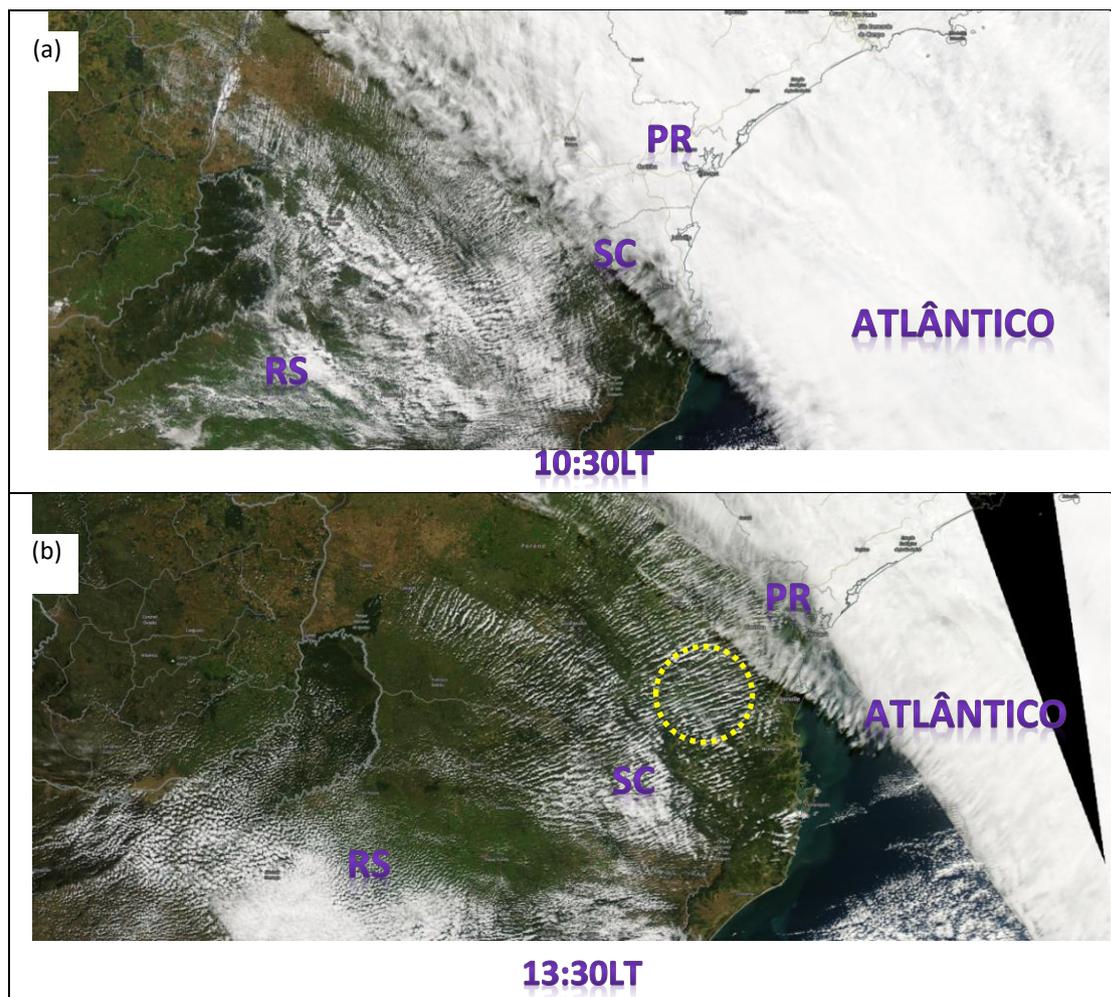


Figura 26 - (a) Imagem do satélite Terra onde ocorreu a formação de avenidas de nuvem e (b) Imagem do satélite Aqua para a mesma região de formação de avenidas de nuvem indicando o local analisado - delimitado pelo círculo tracejado amarelo, para 23 julho de 2013.

A Figura 27(a) apresenta a imagem de satélite juntamente com o local de medida da distância total, e o número de avenidas. Os resultados mostram que a distância para o trecho selecionado foi de 126580 m e foi observado um número de 17 avenidas. A partir destes resultados foi calculada a distância média de 7446 m entre as avenidas. A Figura 27(b) apresenta o gráfico de vetores de ventos e a altura da camada limite local, estimada em 831 m para a região. A partir destes dados foi estimada uma razão de aspecto no valor de 9.0 (Tabela 3). Foram feitas análises e comparações entre a imagem de satélite e o campo de vetores de vento Figuras 27(a) e 27(b) e constatou-se que as avenidas de nuvem presentes na região, estavam praticamente alinhadas à direção do vento predominante de sudoeste (SW).

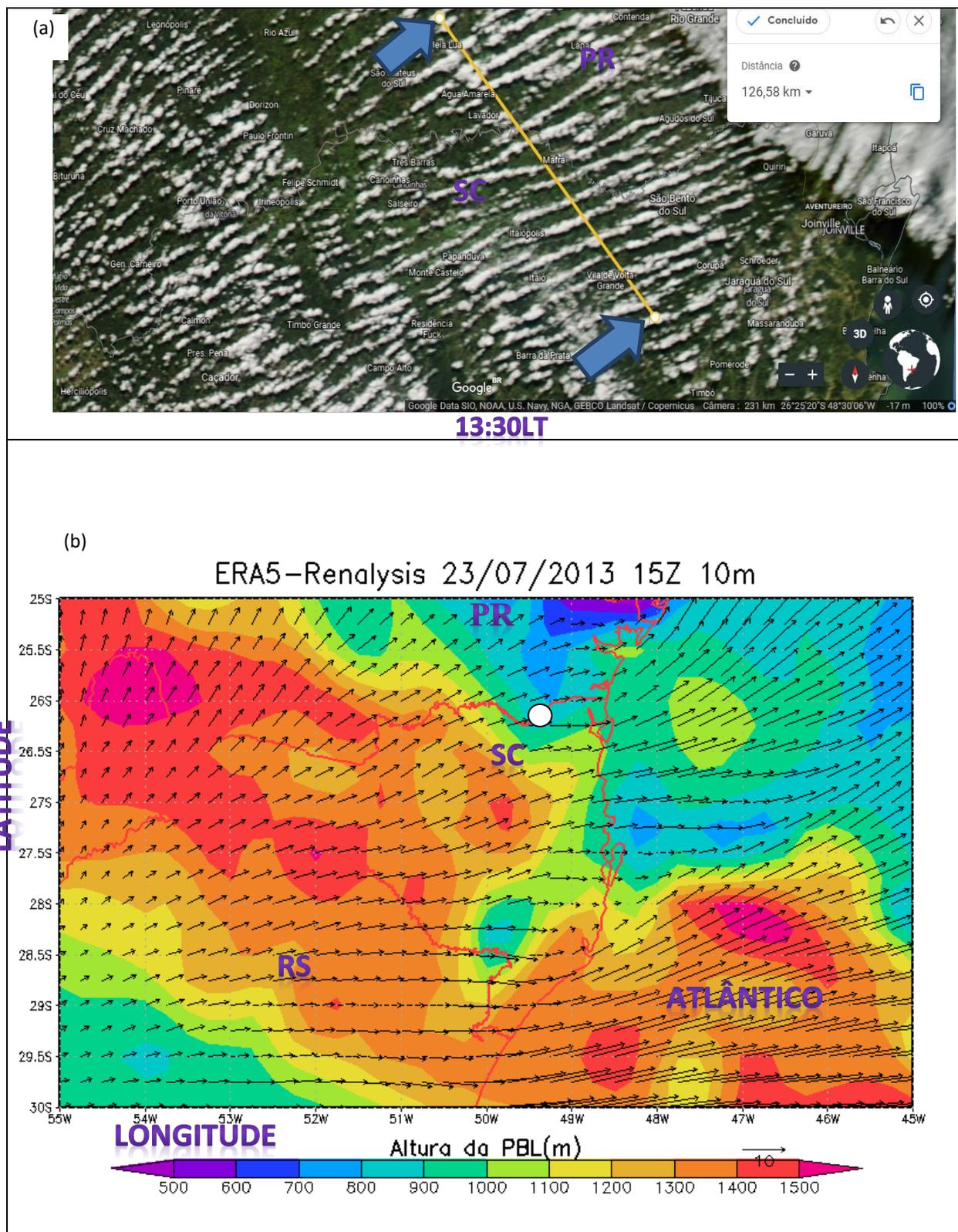


Figura 27 – (a) Imagem do satélite Aqua, onde ocorreu a formação de avenidas de nuvem, apresentando um trecho de avenidas selecionado com sua respectiva distância total - destacada por uma linha amarela entre setas azuis e (b) vetores de ventos a 10 m da superfície, e campos de camada limite (m) na região, a região sul do Brasil, com o ponto em destaque indicando a altura da PBL para o local de interesse, no horário de 15Z, para 23 de julho de 2013.

A Figura 28(a) mostra que a direção do vento predominante foi de sudoeste (SW) e sua velocidade estimada em ~ 3.2 m/s a 10 m da superfície e no horário de 15Z. Verificamos através da Figura 28(b), da radiosondagem para 00Z (não está disponível para 12Z), ocorre a formação de nuvens logo acima dos níveis mais baixos da atmosfera. Nota-se a existência de uma camada de inversão acima de 953 m. Também se observa a partir de 3091 m a existência de uma camada de ar mais e seco. O cisalhamento do vento também é baixo. Então inferimos que as condições da atmosfera local já eram favoráveis à formação de avenidas de nuvens, mesmo antes de 12Z.

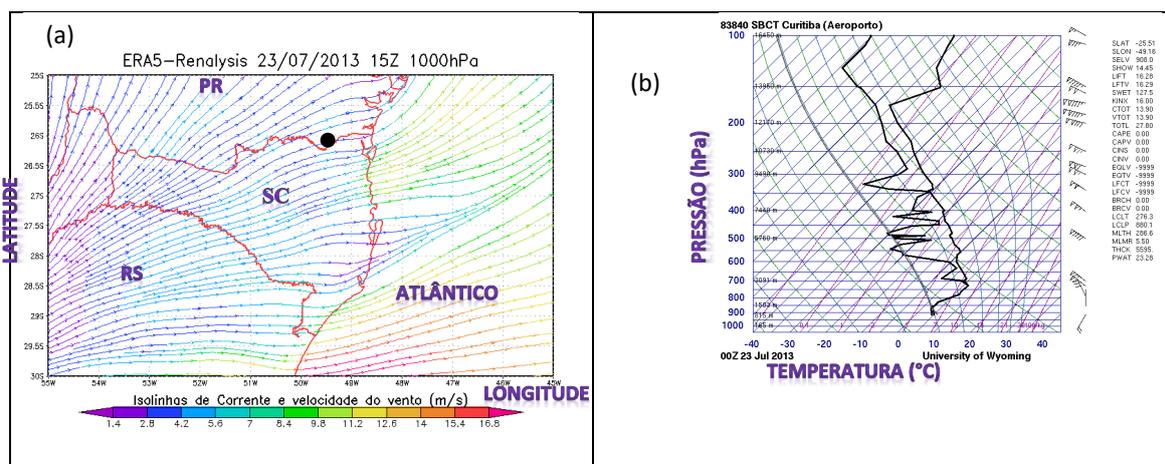


Figura 28 – (a) Isolinhas de corrente, o ponto em destaque para a latitude $26^{\circ}.09'$ S e a longitude $49^{\circ}.49'$ W, onde ocorreram as avenidas de nuvem e (b) Radiosondagem efetuada a partir do aeroporto de Curitiba – PR (b), para 23 de julho de 2013.

4.10 CASO 10 - 24 DE MARÇO DE 2014

As Figuras 29, 30 e 31 apresentam resultados para o caso ocorrido em 24 de março de 2014. As Figuras 29(a) e 29(b) apresentam as imagens dos satélites Terra e Aqua. As imagens mostram a formação de avenidas de nuvem na região do planalto serrano do estado de Santa Catarina. Na Figura 29(a) captada pelo satélite Terra, nota-se o desenvolvimento inicial de uma pequena formação de avenidas de nuvem no estado, próximo a uma cobertura de nuvens quase na divisa com o estado de Santa Catarina. Na Figura 29(b), captada pelo satélite Aqua, é possível visualizar que houve uma grande formação dessas avenidas na região em destaque (círculo tracejado amarelo).

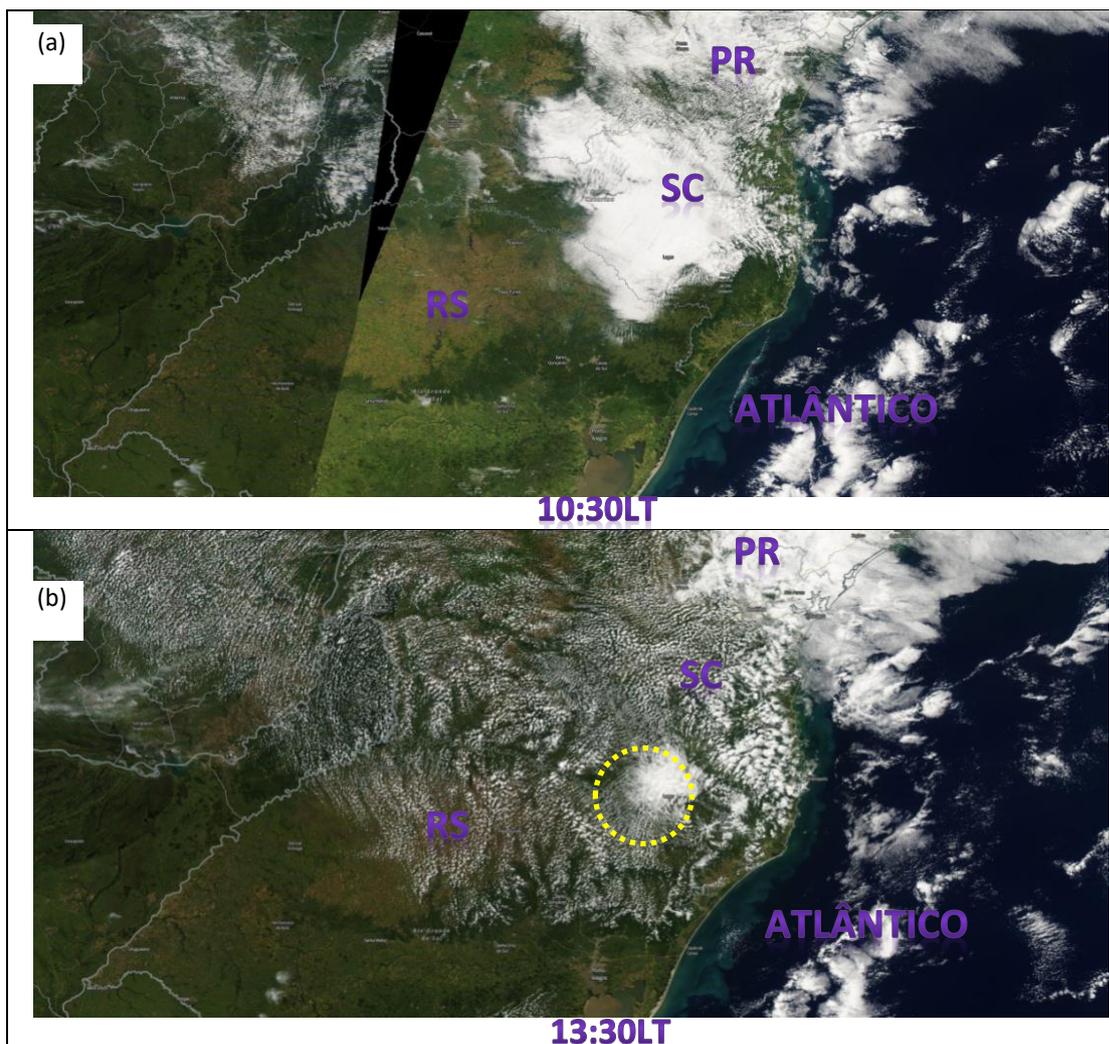


Figura 29 – (a) Imagem do satélite Terra onde ocorreu a formação de avenidas de nuvem e (b) imagem do satélite Aqua para mesma região de formação de avenidas de nuvem, indicando o local analisado - delimitado pelo círculo tracejado amarelo, para 24 de março de 2014.

A Figura 30(a) apresenta a imagem de satélite juntamente com o local de medida da distância total, e o número de avenidas. Os resultados mostram que a distância para o trecho selecionado foi de 27840 m e foi observado um número de 10 avenidas. A partir destes resultados foi calculada a distância média de 2784 m entre as avenidas. A Figura 30(b) apresenta o gráfico de vetores de vento e a altura da camada limite local, estimada em 940 m para a região. A partir destes dados foi estimada uma razão de aspecto no valor de 3.0 (Tabela 3). Foram feitas análises e comparações entre a imagem de satélite e o campo de vetores de vento Figuras 30(a) e 30(b) e constatou-se que as avenidas de nuvem presentes na região, estavam praticamente alinhadas à direção do vento predominante de nordeste (NE).

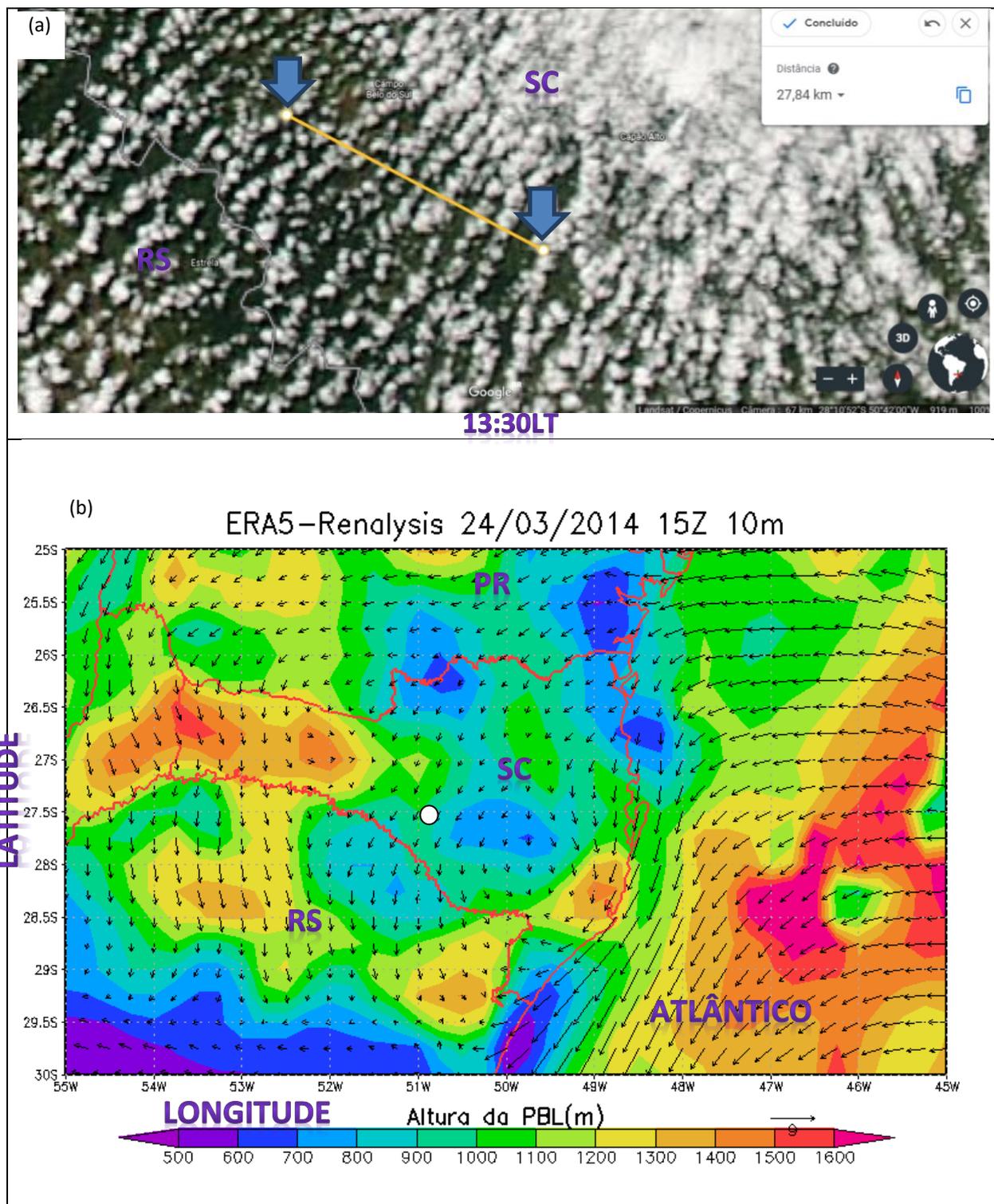


Figura 30 – (a) Imagem do satélite Aqua, onde ocorreu a formação de avenidas de nuvem, apresentando um trecho de avenidas selecionado com sua respectiva distância total - destacada por uma linha amarela entre setas azuis e (b) vetores de vento a 10 m da superfície, e de campos de camada limite (m) na região sul do Brasil, com o ponto em destaque indicando altura da PBL para o local de interesse, no horário de 15Z, para 24 de março de 2014.

A Figura 31(a) mostra que a direção do vento predominante foi de nordeste (NE) e sua velocidade estimada em ~ 1.0 m/s a 10 m da superfície e no horário de 15Z. Verificamos através das Figuras 31(b), da radiosondagem para 12Z, que não há ainda a formação de nuvens logo acima dos níveis mais baixos da atmosfera. Nota-se a existência de uma camada de inversão acima de 1949 m característica da presença de avenidas de nuvem. Também se observa a partir de 1949 m a existência de uma camada de ar mais seco, e um baixo cisalhamento do vento. Então inferimos que as condições da atmosfera local estavam favoráveis à formação de avenidas de nuvem.

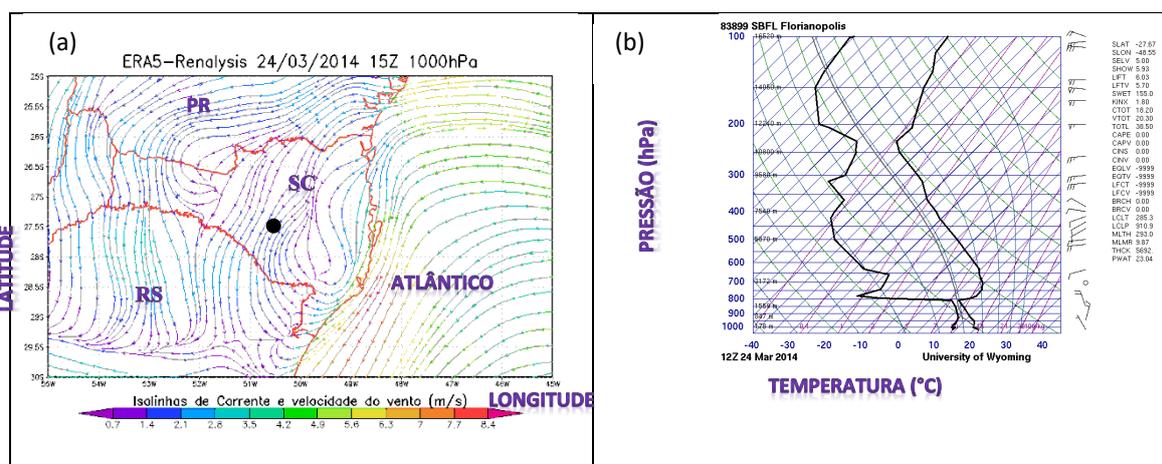


Figura 31 – (a) Isolinhas de corrente, o ponto em destaque para a latitude $27^{\circ}.58'$ S e a longitude $50^{\circ}.58'$ W, indica onde ocorreram as avenidas de nuvem e (b) Radiosondagem efetuada a partir do aeroporto de Florianópolis – SC, para 24 de março de 2014.

4.11 CASO 11 – 18 DE NOVEMBRO DE 2014

As Figuras 32, 33 e 34 apresentam resultados para o caso ocorrido em 18 de novembro de 2014. As Figuras 32(a) e 32(b) apresentam as imagens dos satélites Terra e Aqua. As imagens mostram a formação de avenidas de nuvem na região do vale do Itajaí no estado de Santa Catarina. Na Figura 32(a) captada pelo satélite Terra, é possível visualizar uma formação de avenidas de nuvem, embora já exista alguma evolução dessas avenidas para formação de células abertas. Na Figura 32(b), captada pelo satélite Aqua, nota-se que a maioria das avenidas de nuvem evoluiu para células abertas na região em destaque (círculo tracejado amarelo) e talvez para possíveis Cbs sobre o oceano próximo da costa.

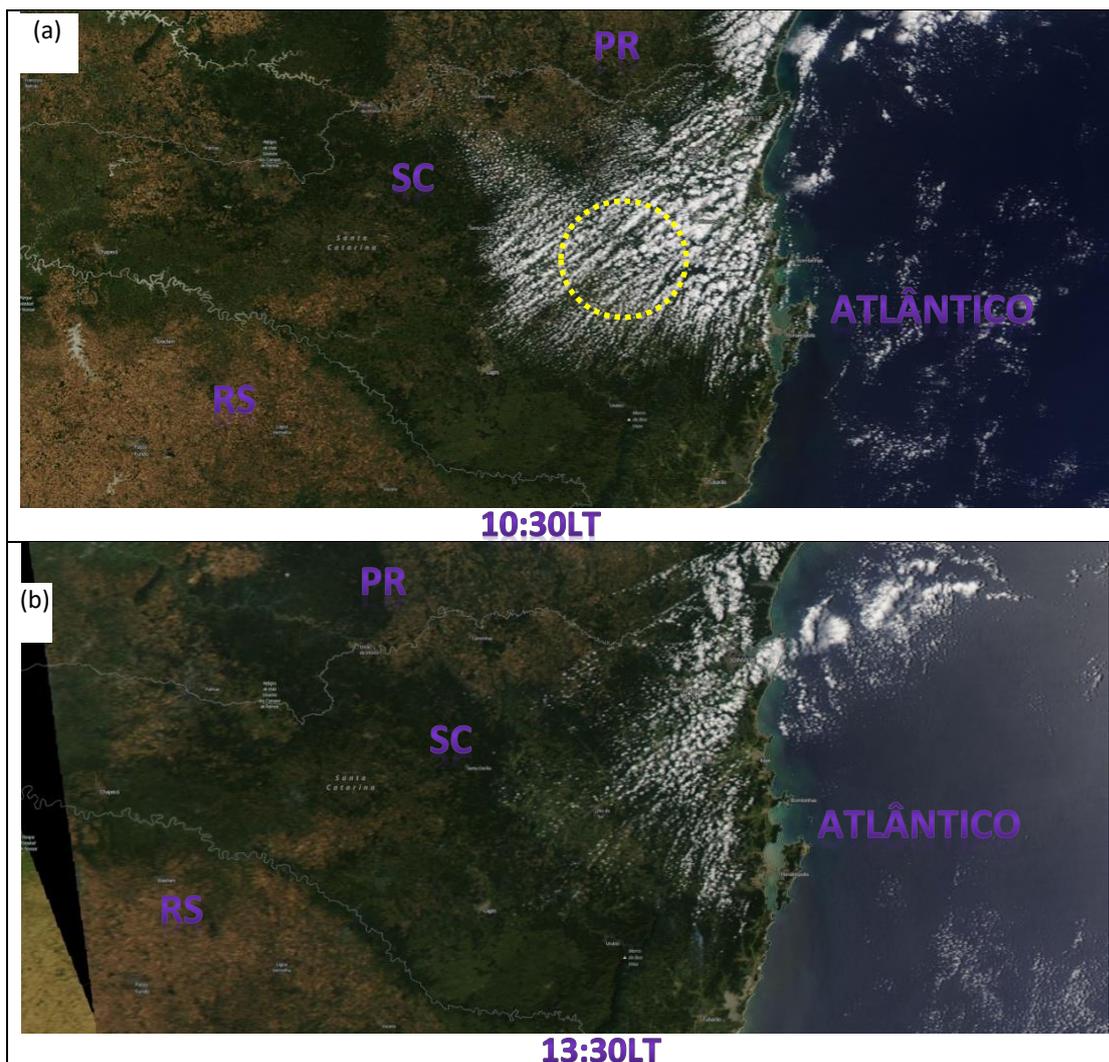


Figura 32 – (a) Imagem do satélite Terra onde ocorreu a formação de avenidas de nuvem, indicando a região analisada - delimitada pelo círculo tracejado amarelo e (b) imagem do satélite Aqua para a mesma região, para 18 de novembro de 2018.

A Figura 33(a) apresenta a imagem de satélite juntamente com o local de medida da distância total, e o número de avenidas. Os resultados mostram que a distância para o trecho selecionado foi de 97760 m e foi observado um número de 20 avenidas. A partir destes resultados foi calculada a distância média de 4888 m entre as avenidas. A Figura 33(b) apresenta o gráfico de vetores de vento e a altura da camada limite local, estimada em 1527 m para a região. A partir destes dados foi estimada uma razão de aspecto no valor de 3.2 (Tabela 3). Foram feitas análises e comparações entre a imagem de satélite e o campo de vetores de vento Figuras 33(a) e 33(b) e constatou-se que as avenidas de nuvem presentes na região, estavam praticamente alinhadas à direção do vento predominante de nordeste (NE).

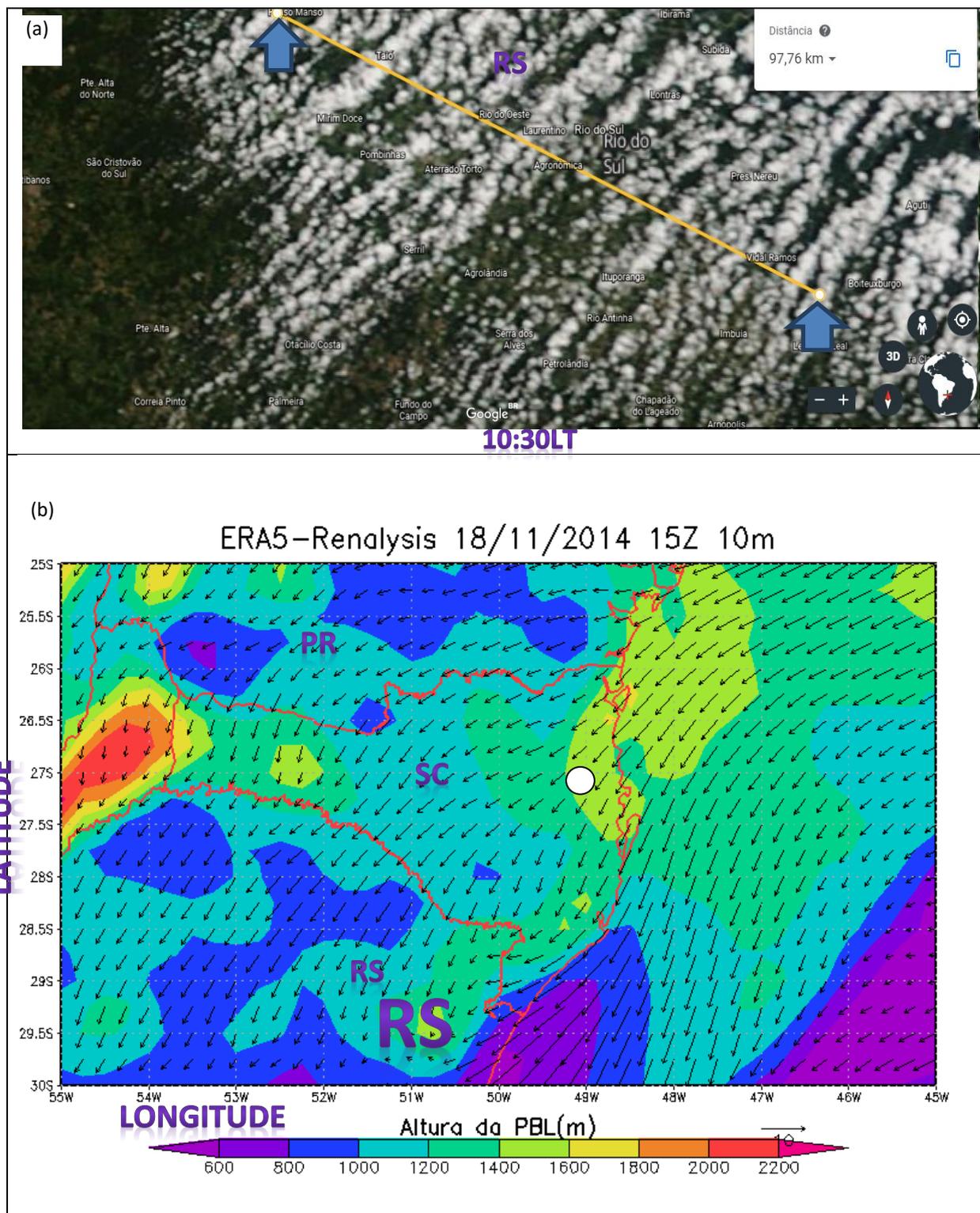


Figura 33 – (a) Imagem do satélite Terra, onde ocorreu a formação de avenidas de nuvem, apresentando um trecho de avenidas selecionado com sua respectiva distância total - destacada por uma linha amarela entre setas azuis e (b) vetores de vento a 10 m da superfície, e de campos de camada limite (m), na região sul do Brasil, com o ponto em destaque indicando altura da PBL a o para o local de interesse, no horário de 15Z, para 18 de novembro de 2014.

A Figura 34(a) mostra que a direção do vento predominante foi de nordeste (NE) e sua velocidade estimada em $\sim 4.0\text{m/s}$ a 10 m da superfície e no horário de 15Z. Verificamos através da Figura 34(b), da radiosondagem para 12Z, que não há ainda a formação de nuvens logo acima dos níveis mais baixos da atmosfera. Nota-se a existência de uma camada de inversão acima de 1340 m, e outra acima de 1986 m e uma camada mais seca acima. Também se observa a partir de 1534 m a existência de um baixo cisalhamento do vento. Então inferimos que as condições da atmosfera local estavam favoráveis à formação de avenidas de nuvem.

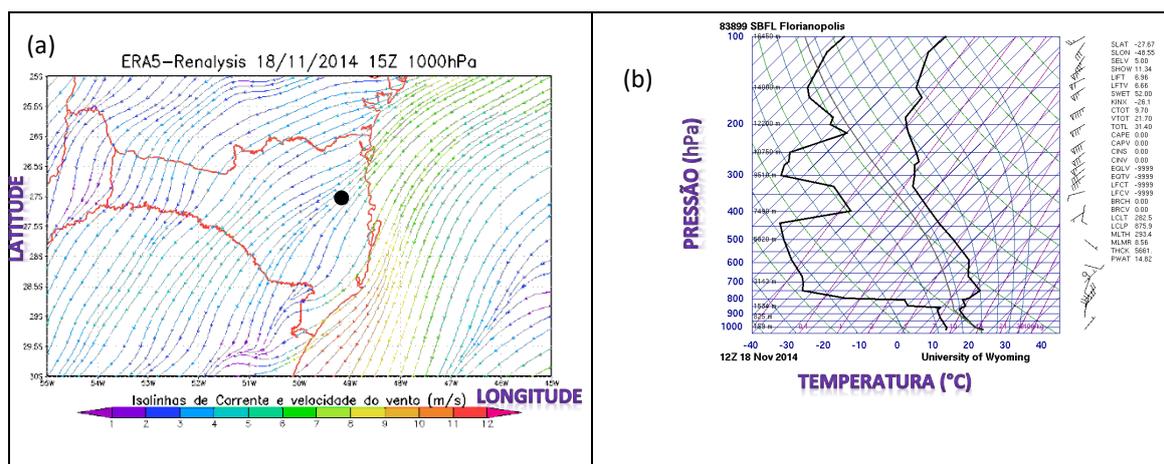


Figura 34 – (a) Isolinhas de corrente, o ponto em destaque para a latitude $27^{\circ}.14' S$ e a longitude $49^{\circ}.32' W$, indica onde ocorreram as avenidas de nuvem e (b) Radiosondagem efetuada a partir do aeroporto de Florianópolis – SC, para 18 de novembro de 2014.

4.12 Caso 12 – 26 de fevereiro de 2018

As Figuras 35, 36 e 37 apresentam resultados para o caso ocorrido em 26 de fevereiro de 2018. As Figuras 35(a) e 35(b) apresentam a imagem dos satélites Terra e Aqua. As imagens mostram a formação de avenidas de nuvem na região sudeste do estado do Rio Grande do Sul. Na Figura 35(a) captada pelo satélite Terra é possível visualizar uma formação de avenidas de nuvem na região em destaque (círculo tracejado amarelo). Na Figura 35(b), captada pelo satélite Aqua, observa-se que essa formação de avenidas está se desfazendo e evoluindo para células abertas e é possível notar a formação de algumas nuvens mais espessas (talvez Cbs) sobre a margem da Lagoa dos Patos próxima ao oceano e no oceano próximo a costa.

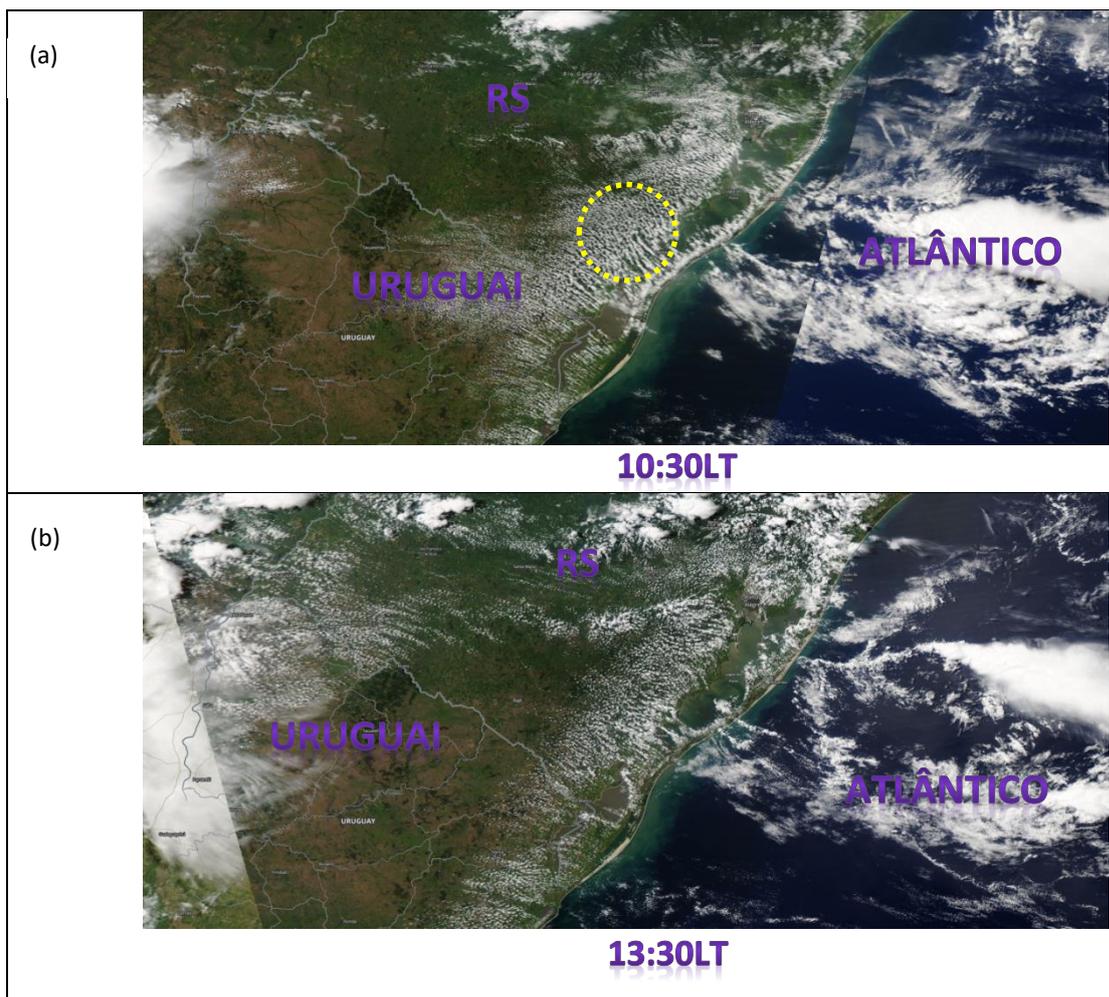


Figura 35 – (a) Imagem do satélite Terra, onde ocorreu a formação de avenidas de nuvem, indicando a região analisada - delimitada pelo círculo tracejado amarelo e (b) imagem do satélite Aqua para a mesma região, para 26 de fevereiro de 2018.

A Figura 36(a) apresenta a imagem de satélite juntamente com o local de medida da distância total, e o número de avenidas. Os resultados mostram que a distância para o trecho selecionado foi de 63310 m e foi observado um número de 13 avenidas. A partir destes resultados foi calculada a distância média de 4870 m entre as avenidas. A Figura 36(b) apresenta o gráfico de vetores de vento e a altura da camada limite local, estimada em 632 m para a região. A partir destes dados foi estimada uma razão de aspecto no valor de 7.7 (Tabela 3). Foram feitas análises e comparações entre a imagem de satélite e o campo de vetores de vento Figuras 36(a) e 36(b) e constatou-se que as avenidas de nuvem presentes na região, estavam praticamente alinhadas à direção do vento predominante de sudeste (SE).

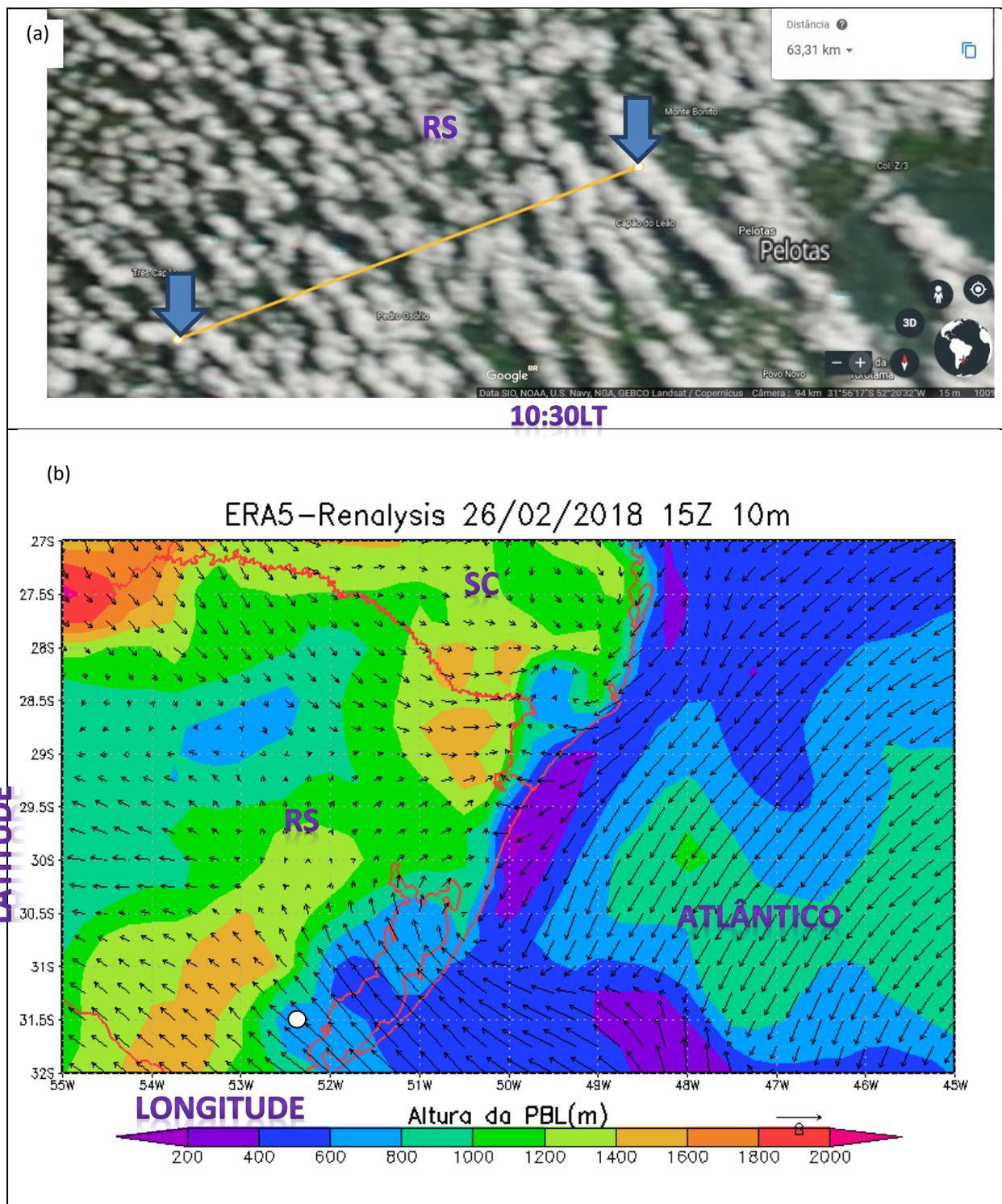


Figura 36 – (a) Imagem do satélite Terra, onde ocorreu a formação de avenidas de nuvem, apresentando um trecho selecionado com sua respectiva distância total - destacada por uma linha amarela entre setas azuis e (b) vetores de vento a 10 m da superfície, e campos de altura da camada limite (m) na região sul do Brasil, com o ponto em destaque indicando a altura da PBL para o local de interesse, no horário de 15Z (b), para 26 de fevereiro de 2018.

A Figura 37(a) mostra que a direção do vento predominante foi de sudeste (SE) e sua velocidade estimada em $\sim 4.0\text{m/s}$ a 10 m da superfície e no horário de 15Z. Verificamos através da Figura 37(b), da radiosondagem para 12Z, que não há ainda a formação de nuvens logo acima dos níveis mais baixos da atmosfera e existe uma camada mais seca acima. No entanto, esta sondagem está distante do local de formação das avenidas de nuvens.

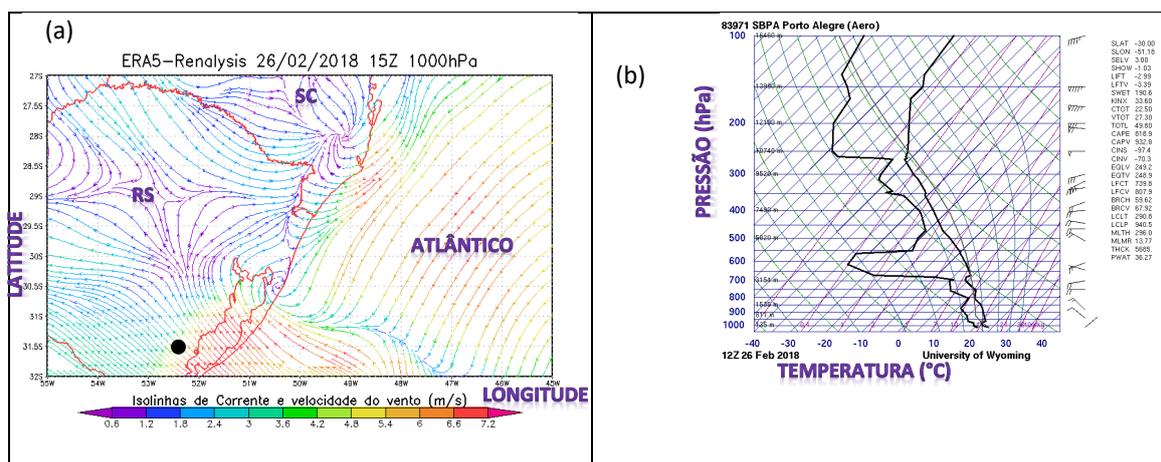


Figura 37 - (a) Isolinhas de corrente, o ponto no destaque para a latitude $31^{\circ}.47' \text{ S}$ e a longitude $52^{\circ}.48' \text{ W}$, indica onde ocorreram as avenidas de nuvem e (b) Radiosondagem efetuada a partir do aeroporto de Porto Alegre – RS, para 26 de fevereiro de 2018.

A Tabela 3 apresenta um resumo dos resultados observados nas principais ocorrências de avenidas de nuvem nos casos que foram estudados. É possível verificar que os ventos predominantes foram de nordeste (4), sudeste (5), sudoeste (2) e sul (1). Os ventos de nordeste contribuem para uma advecção de ar quente e úmido e favorecem a formação de rolos assim como, intensificam a convecção local e formação das nuvens cúmulos na região sul do Brasil. Nota-se que a velocidade do vento predominante a 10 m da superfície, esteve próxima da faixa entre 3.0 m/s ($\sim 11 \text{ km/h}$) e 4.0 m/s (14.5 km/h), correspondendo a uma brisa leve e brisa fraca respectivamente, segundo a escala de Beaufort. Mas, notamos que ocorreu também, para um vento predominante com velocidade de 6.1 m/s ($\sim 22 \text{ km/h}$), brisa moderada, e para um vento médio predominante com velocidade de 1.0 m/s (3.6 km/h). Já, a altura média da camada limite variou entre 600 m e 1400 m, independente da estação do ano. A distância média entre avenidas de nuvem oscilou no intervalo de 2700 m a 7500 m e, a razão de aspecto das avenidas de nuvem variou na faixa de 2.1 a 9.0, com valor médio de 4.4 ± 2.0 . Esses valores são compatíveis com estimativas feitas em outros lugares do planeta, relatados nas referências bibliográficas.

Tabela 3 - Estudos de 12 casos selecionados 2000-2018 e seus parâmetros estimados, para o local de ocorrência das avenidas de nuvem.

Caso	Data	Direção do vento	Velocidade do vento (m/s)	Altura da camada limite – hPBL (m)	Distância média entre avenidas de nuvem – dCE (m)	Razão de Aspecto - RA
1	21jun2002	↙	6.1	815	3226	3.9
2	07set2002	↑	3.8	1088	4932	4.5
3	17jul2004	↙	3.8	713	3447	4.8
4	13ago2004	↙	2.9	1299	3768	2.9
5	07fev2005	↙	3.4	1348	2798	2.1
6	21jun2005	↙	1.4	718	2687	3.7
7	25fev2010	↙	2.9	995	3063	3.1
8	20ago2011	→	4.0	1081	5055	4.7
9	23jul2013	→	3.2	831	7446	9.0
10	24mar2014	↙	1.0	940	2780	3.0
11	18nov2014	↙	4.0	1527	4880	3.2
12	26fev2018	↙	4.0	632	4870	7.7

5 CONCLUSÃO

As análises diárias das imagens de satélite, selecionadas, indicaram a ocorrência de avenidas de nuvens, na região sul do Brasil em todas as estações do ano, mas com maior ocorrência no verão quando a convecção está mais frequente. Os casos estudados comprovaram que avenidas alinham-se quase que paralelas aos ventos predominantes de superfície. As imagens de satélite permitiram selecionar trechos de ocorrência de avenidas de nuvem, estimar sua distância média entre as avenidas. Dados de reanálises permitiram estimar a altura da camada limite na região de estudo. Os dados encontrados possibilitaram calcular a razão de aspecto, cujos valores ficaram próximos aos encontrados em outras regiões do planeta para regiões continentais, que em média foi de 3.15 ± 0.7 (YOUNG et al., 2002). Dados de

radiosondagem próximas à ocorrência destas avenidas mostraram que em todos os casos havia uma camada seca acima da camada limite, sendo este, portanto um fator termodinâmico fundamental para sua formação.

Um melhor entendimento destas avenidas de nuvens deverá ser feito no futuro através de experimentos numéricos, análise de cartas sinóticas e análise de dados para verificar a influência na ocorrência de sistemas que possam contribuir dinamicamente na evolução das avenidas de nuvem em sistemas mais complexos (*cumulunimbus*, por exemplo). Este estudo poderá melhorar o entendimento do comportamento dessas nuvens como possíveis precursoras de algumas tempestades, melhorar o entendimento dos campos de vento, e aprimorar o conhecimento dos campos de radiação. Maiores estudos a este respeito poderão vir a acrescentar ainda melhorias na previsão de curto prazo.

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, T.; NILSONSSON, S. Topographically induced convective snowbands over the Baltic Sea and their precipitation distribution. **Weather and Forecasting**, v. 5, p. 299–312, 1990.
- ANDERSSON, T.; GUSTAFSSON, N. Coast of Departure and Coast of Arrival: Two Important Concepts for the Formation and Structure of Convective Snowbands over Seas and Lakes. **Monthly weather review**, v. 122, n. 6, p. 1036–1049, 1994.
- ASAI, T.; MIURA, Y. An analytical study of meso-scale vortex-like disturbances observed around Wakes Bay area. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 59, p. 832–843, 1981.
- ATKINSON, B. W.; ZHANG, J. W. Mesoscale shallow convection in the atmosphere. **Reviews of Geophysics**, v. 34, n. 4, p. 403–431, 1996.
- BROWN, R. A. A Secondary Flow Model for the Planetary Boundary Layer. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 27, may, p. 742–757, 1970.
- BROWN, R. A. Longitudinal instabilities and secondary flows in the planetary boundary layer: A review. **Reviews of Geophysics And Space Physics**, v. 18, n. 3, p. 683–697, 1980.
- BRUMER, B. Roll and cell convection in wintertime arctic cold-air outbreak. **Journal of Atmospheric Sciences**, v. 56, p. 2613–263, 1999.
- BRUMMER, B.; BAKAN, S.; HINZPETER, H. Kontur: Observations of cloud streets and open cellular structures. In: **Elsevier Science Publishers Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam - Printed in The Netherlands**, v.9, p. 281–296, 1985.
- BUZORIOUS, G.; RANNIK, Ü.; NILSSON, D.; KULMALA, M.R. Vertical fluxes and micrometeorology during aerosol particle formation events. **Tellus, Series B: Chemical and Physical Meteorology**, v. 53, n. 4, p. 394–405, 2001.
- DAILEY, P. S.; FOVELL, R. G. Numerical Simulation of the Interaction between the Sea-Breeze Front and Horizontal Convective Rolls . Part I : Offshore Ambient Flow. **American Meteorological Society**, v. 127, May, p. 858–878, 1999.
- ETLING, D; BROWN, R. A. Roll vortices in the planetary boundary layer: a review. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 65, November, p. 215–248, 1993a.
- ETLING, D; BROWN, R. A. ROLL VORTICES IN THE PLANETARY BOUNDARY LAYER: A REVIEW *. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 65, p. 215–248, 1993b.
- ETLING, D. AND BROWN, R. A. Roll Vortices in the Planetary Boundary Layer: a Rewiew *. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 65, p. 215–248, 1993.
- EUMETRAIN. **Cloud streets**. Disponível em:
<<http://www.eumetrain.org/satmanu/CMs/CIstr>>. Acesso em 15.02.2020.

- KUETTNER, J. P. Thermal Wave Soaring. In: 12th OSTIV Congress, Alpine, USA. **Anais...** Alpine, USA: 1970.
- KUETTNER, J. P. Cloud bands in the earth's atmosphere: Observations and Theory. <http://www.tandfonline.com/loi/zela19>, v. 23, n. 4–5, p. 404–426, 1971.
- LEMONE, M. A. Measurements of the Airflow in and around cloud streets. **American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc**, 1974.
- LENSCHOW, D.H.; STEPHENS, P. L. Airborne Measurements of the Structure of Thermals. In: XVI OSTIV Congress, Châteauroux, France. **Anais...** Châteauroux, France: 1978.
- LIU, A. Q.; MOORE, G.W. K.; TSUBOKI, K.; RENFREW, I.A. A high-resolution simulation of convective roll clouds during a cold-air outbreak. **Geophysical Research Letters**, v. 31, February, p. 1–4, 2004.
- LIU, A. Q.; MOORE, G. W. K. Lake-Effect Snowstorms over Southern Ontario, Canada, and Their Associated Synoptic-Scale Environment. **Monthly Weather Review**, v. 132, 1972, p. 2595–2609, 2004.
- MAZON, J.; NIEMELA, S.; PINO, D.; SAVIJARVI, H.; VIHMA, T., 2015. Snow bands over the Gulf of Finland in wintertime. **Tellus, Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography**, v. 67, n. 1, 2015.
- MELFI, S. H. .; PALM, S. P. Estimating the Orientation and Spacing of Midlatitude Linear Convective Boundary Layer Features: Cloud Streets. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 69, n. 1, p. 352–364, 2011.
- MEZRIN, M. Y.; STAROKOLTSEV, E. V.; FUJIYOSHI, Y.; YOSHIZAKI, M. Contribution of different scales to integral moisture transport based on aircraft observations over the Sea of Japan. **Atmospheric Research journal homepage**, v. 69, April, p. 109–124, 2003.
- MIAO, SHIGUANG; CHEN, F. Formation of horizontal convective rolls in urban areas. **Atmospheric Research journal homepage**, v. 89, p. 298–304, 2008.
- NAKAI, S.; KOYURU, I.; MISUMI, R.; PARK, S-G.; KOBAYASHI, T. A Classification of Snow Clouds by Doppler Radar Observations at Nagaoka , Japan. **SOLA**, v.1, March 2000, p. 161–164, 2005.
- NIZIOL, T. A.; SNYDER, W. R.; WALDSTRICHER, J. S. Winter Weather Forecasting throughout the Eastern United States. Part IV: Lake Effect Snow. **WEATHER AND FORECASTING**, v. 10, p. 61–77, 1995.
- NORRIS, J.; VAUGHAN, G.; SCHULTZ, D.M. Snowbands over the english channel and irish sea during cold-air outbreaks. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 139, n. 676, p. 1747–1761, 2013.
- RAMOS DA SILVA, R. R.; GANDU, A. W.; SILVA DIAS, M. A. F.; SÁ, L. D. A. Cloud streets and land-water interactions in the Amazon. **Biogeochemistry**, 2011.
- RENFREW, I. A.; MOORE, G. W. K. An Extreme Cold-Air Outbreak over the Labrador Sea : Roll Vortices and Air – Sea Interaction. **American Meteorological Society**, October, p. 2379–2394, 1999.

SANG, J. G. Cloud bands induced by isolated mountains. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 125, January, p. 2723–2741, 1999.

TSUBOKI, K.; FUJIYOSHI, Y.; WAKAHAMA, G. Structure of a Land Breeze and Snowfall Enhancement at the Leading Edge. **Journal of Meteorological Society of Japan**, v. 67, n. 5, p. 757–770, 1989.

WECKWERTH, TAMMY M.; WILSON JAMES W.; WAKIMOTO, R. M. Thermodynamic variability within the convective boundary layer due to horizontal convective rolls. **Monthly Weather Review**, v. 124, p. 769–784, 1995.

YANG, Q.; GEERTS, B. Horizontal convective rolls in cold air over water: Buoyancy characteristics of coherent plumes detected by an airborne radar. **Monthly Weather Review**, v. 134, n. 9, p. 2373–2396, 2006.

YOUNG, G. S.; Kristovich, D. A. R.; Hjelmfelt, M. R.; Foster, R. C. Supplement to Rolls, Streets, Waves, and More. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 83, July, p. 1000–1001, 2002.

YOUNG, G. S.; SIKORA, T. D. Mesoscale Stratocumulus Bands cauded by Gulf Stream meanders. **Monthly Weather Review**, v. 131, September, p. 2177–2191, 2003.

APÊNDICE A – Scripts do GRADS

Script 1) Programa na linguagem *Grads* que gera um gráfico de isolinhas de corrente (ventos predominantes), com suas orientações e velocidades a 10 m da superfície na região Sul do Brasil (continente e oceano Atlântico):

```
reinit
```

```
* abrir os arquivos netcdf
```

```
sdfopen coper13ago2004-1000hPa.nc
```

```
set display color white
```

```
c
```

```
set grads off
```

```
* seleciona arquivo com contornos dos estados
```

```
set mpdset /home/clima/grads/brmap_hires
```

```
set map 2 1 7
```

```
*selecionar o dia 13/08/2004
```

```
* selecionar area
```

```
set lat -30 -25
```

```
set lon 305 315
```

```
set z 1
```

```
*display ventos
```

```
set gxout shaded
```

```
set gxout stream
```

```
du;v;mag(u,v)
```

```
run cbarn.gs
```

```
draw xlab Longitude
```

```
draw yla Latitude
```

```
draw title ERA5-Renalysis 13/08/2004 15Z 1000hPa
```

```
*salva a figura
```

```
printim era5-13ago200415Z1000hPa.gif
```

Script 2) Programa na linguagem *Grads* - gera um gráfico de vetores de ventos predominante a 10 m da superfície e, campos de camada limite na região Sul do Brasil (continente sul americano e oceano Atlântico):

```
reinit
* abrir os arquivos netcdf
sdfopen coper26fev201815utca.nc
set display color white
c
set grads off
* seleciona arquivo com contornos dos estados
set mpdset /home/clima/grads/brmap hires
set map 2 1 7
* selecionar area
set lat -32 -25
set lon 305 315
set z 1
* display camada limite
set gxout shaded
dblh
run cbarn.gs
*display ventos
d u10;v10
draw xlab Longitude
draw ylab Latitude
draw title ERA5-Renalysis 26/02/2018 15Z 10 m
*salva a figura
printim era5-26fev201815Z1000hPa_VTCL.gif
* display ventos e altura da camada limite planetaria
```

set lat -31

set lon -52

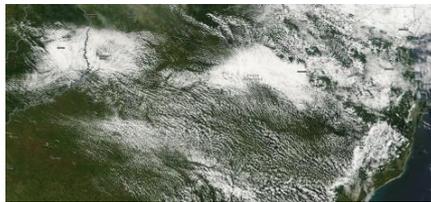
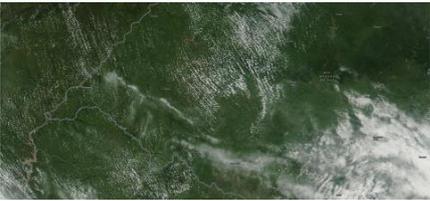
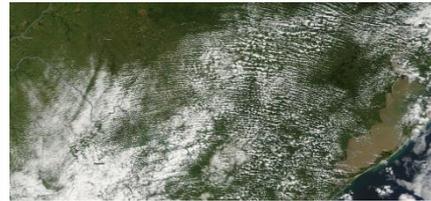
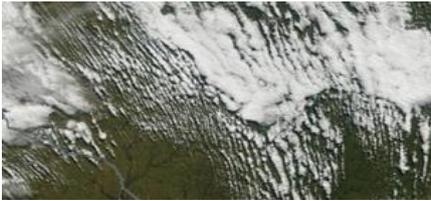
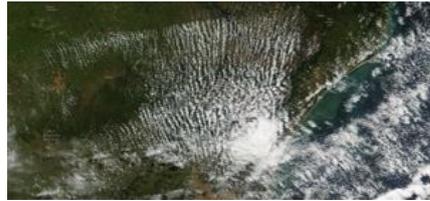
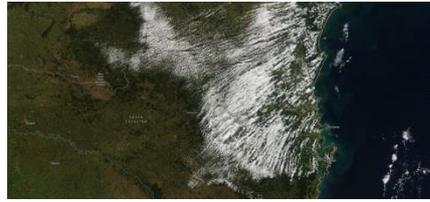
d u10

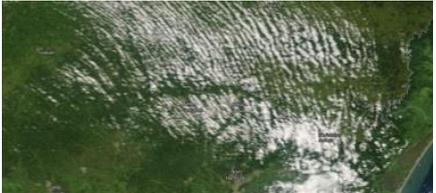
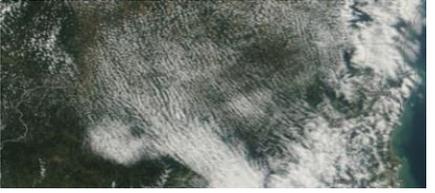
d v10

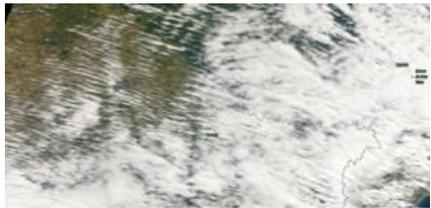
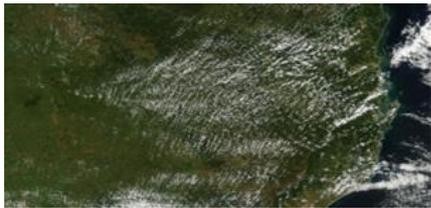
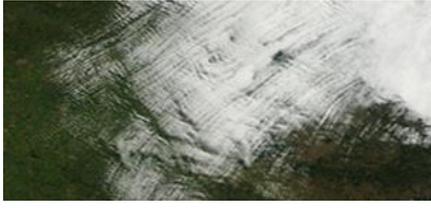
d mag(u10,v10)

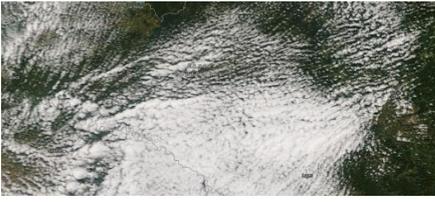
d blh

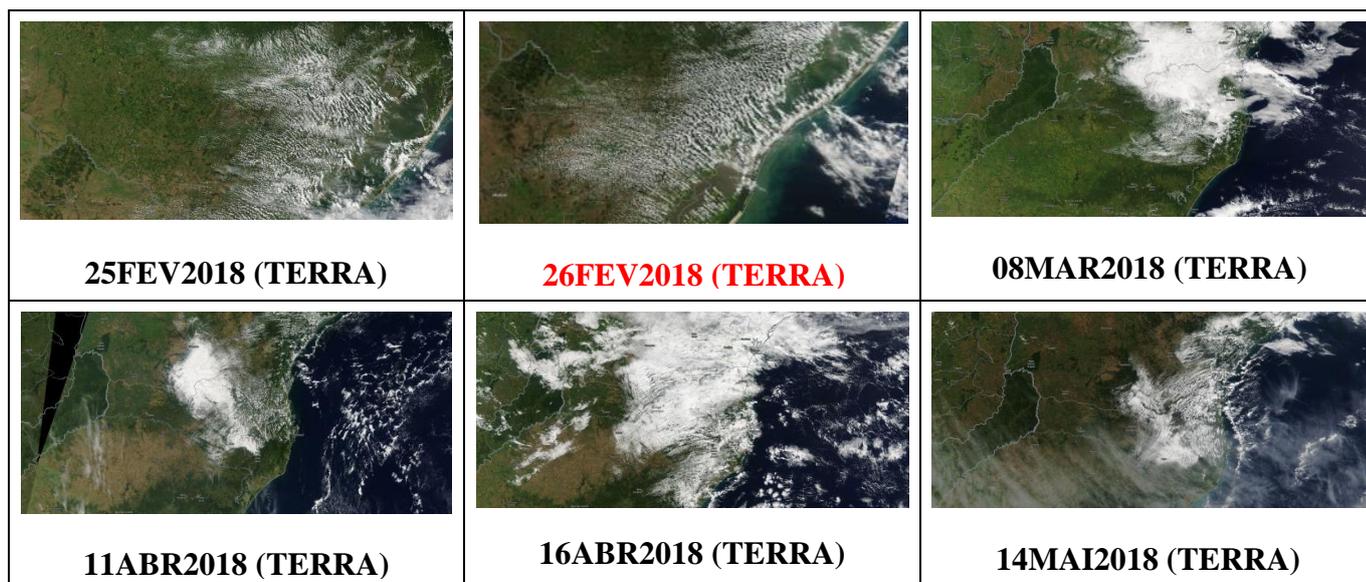
ANEXO A – Avenidas de nuvens identificadas por 72 imagens de satélite para a região sul do Brasil a partir de dados dos satélites Terra e Aqua - NASA.

		
08MAR2000 (TERRA)	11MAR2000 (TERRA)	18MAR2000 (TERRA)
		
25JAN2001 (TERRA)	11FEV2001 (TERRA)	12MAR2001 (TERRA)
		
21JUN2002 (AQUA)	07SET2002 (TERRA)	02MAI2003 (TERRA)
		
17JUL2004 (TERRA)	13AGO2004 (TERRA)	01FEV2005 (TERRA)
		
07FEV2005 (TERRA)	21JUN2005 (TERRA)	13MAI2006 (TERRA)

		
26DEZ2008 (TERRA)	30ABR2009 (TERRA)	21AGO2009 (TERRA)
		
25FEV2010 (TERRA)	11MAI2011(TERRA)	20AGO2011 (AQUA)
		
21AGO2011 (TERRA)	23OUT2011 (TERRA)	13SET2012 (TERRA)
		
07DEZ2012 (TERRA)	20DEZ2012 (TERRA)	25DEZ 2012 (TERRA)
		
30MAI2013 (AQUA)	23JUL2013 (AQUA)	26JUL2013 (TERRA)
		
02FEV2013 (TERRA)	15JAN2014 (TERRA)	24MAR2014 (AQUA)

		
02ABR2014 (TERRA)	21SET2014 (TERRA)	22SET2014 (TERRA)
		
15NOV2014 (TERRA)	18NOV2014 (TERRA)	29NOV2014
		
12FEV2015 (TERRA)	02MAR2015 (TERRA)	25MAR2015 (AQUA)
		
03ABR2015 (TERRA)	04ABR2015 (TERRA)	27ABR2015 (TERRA)
		
30ABR2015 (AQUA)	25JUN2015 (TERRA)	08FEV2016 (TERRA)
		
16MAR2016 (TERRA)	30MAR2016 (TERRA)	08ABR2016 (TERRA)

 <p>17ABR2016 (TERRA)</p>	 <p>28ABR2016 (TERRA)</p>	 <p>23MAI2016 (TERRA)</p>
 <p>08JUN2016 (TERRA)</p>	 <p>10AGO2016 (TERRA)</p>	 <p>26FEV2017 (TERRA)</p>
 <p>28MAR2017 (TERRA)</p>	 <p>22ABR2017 (TERRA)</p>	 <p>06MAI2017 (TERRA)</p>
 <p>10JUN2017 (TERRA)</p>	 <p>03JAN2018 (TERRA)</p>	 <p>29JAN2018 (TERRA)</p>
 <p>31JAN2018 (TERRA)</p>	 <p>06FEV2018 (TERRA)</p>	 <p>23FEV2018(TERRA)</p>



FONTE: EOSDIS Worldview(<https://worldview.earthdata.nasa.gov>)