



Ministério da  
**Ciência, Tecnologia  
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m18/2014/01.20.11.25-TDI

## MODELAGEM NUMÉRICA DO TRANSPORTE DE EMISSÕES VULCÂNICAS: CASO DO VULCÃO PUYEHUE

Claudio Augusto Borges Pavani

Dissertação de Mestrado do Curso  
de Pós-Graduação em Meteorolo-  
gia, orientada pelo Dr. Saulo Ri-  
beiro de Freitas, aprovada em 04  
de fevereiro de 2014.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP8W/3FJUGQ8>>

INPE  
São José dos Campos  
2014

**PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

**CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):****Presidente:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

**Membros:**

Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr<sup>a</sup> Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Germano de Souza Kienbaum - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr<sup>a</sup> Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

**BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

**REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

**EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Maria Tereza Smith de Brito - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da  
**Ciência, Tecnologia  
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m18/2014/01.20.11.25-TDI

## MODELAGEM NUMÉRICA DO TRANSPORTE DE EMISSÕES VULCÂNICAS: CASO DO VULCÃO PUYEHUE

Claudio Augusto Borges Pavani

Dissertação de Mestrado do Curso  
de Pós-Graduação em Meteorolo-  
gia, orientada pelo Dr. Saulo Ri-  
beiro de Freitas, aprovada em 04  
de fevereiro de 2014.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP8W/3FJUGQ8>>

INPE  
São José dos Campos  
2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Pavani, Claudio Augusto Borges.

P288m Modelagem numérica do transporte de emissões vulcânicas: caso do vulcão Puyehue / Claudio Augusto Borges Pavani. – São José dos Campos : INPE, 2014.

xxiv + 158 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m18/2014/01.20.11.25-TDI)

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2014.

Orientador : Dr. Saulo Ribeiro de Freitas .

1. modelagem numérica. 2. dispersão de poluentes. 3. vulcões. 4. métodos de advecção. I.Título.

CDU 551.509.313.1:551.21

---



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aprovado (a) pela Banca Examinadora  
em cumprimento ao requisito exigido para  
obtenção do Título de **Mestre** em  
**Meteorologia**

Dr. Julio Pablo Reyes Fernandez



---

Presidente / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Saulo Ribeiro de Freitas



---

Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Edmilson Dias de Freitas



---

Convidado(a) / USP / São Paulo - SP

*Este trabalho foi aprovado por:*

maioria simples

unanimidade

Aluno (a): **Claudio Augusto Borges Pavani**

**São José dos Campos, 04 de Fevereiro de 2014**



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço pela paciência, apoio e confiança fornecidos pelo Saulo Freitas; pelo apoio financeiro e moral vindo do meu pai; pela companhia da minha ex-namorada; e pela companhia de minha alma gêmea, a Júlia. Agradeço também pelo apoio técnico fornecido pelo grupo de pesquisas GMAI, em especial ao Marcos Yoshida, Ricardo Siqueira, Demerval Moreira, Rodrigo Braz e Fernanda Silva. Agradeço ao Gilson Ronchi. Por fim agradeço a Deus, que fez com que de forma casual e probabilística as coisas dessem certo.





## RESUMO

A modelagem do transporte de cinzas vulcânicas é de grande importância para o entendimento da interação entre a atividade vulcânica e o clima, assim como é de grande valia para minimizar a possibilidade de acidentes e danos financeiros causados por estas atividades, principalmente à aviação. Para simular o transporte de cinzas vulcânicas foi implementado no modelo BRAMS uma estimativa de emissão de cinzas vulcânicas baseada na correlação entre altura de injeção da pluma vulcânica e taxa de emissão de cinzas. Posteriormente foi feita uma análise de sensibilidade do modelo, alterando suas configurações e comparando com dados observados, buscando assim as melhores configurações para a modelagem do transporte das cinzas e a possibilidade da implementação de um sistema operacional de emergência, que possui por finalidade prever a posição da pluma vulcânica. O referido sistema emergencial será de grande importância para a aviação e defesa civil. Os resultados mostram que o sistema possui relativamente boa capacidade de simular o evento do vulcão Puyehue em termos de localização horizontal e vertical das cinzas, bem como a sedimentação sobre a superfície no entorno deste.



# **NUMERICAL MODELING OF THE TRANSPORT OF VOLCANIC EMISSIONS: CASE OF PUYEHUE VOLCANO**

## **ABSTRACT**

Modeling volcanic ash transport is of great importance for understanding the interaction between volcanic activity and climate, as well as of great value to minimize the possibility of accidents and financial damage caused by these activities, mainly for aviation. In order to simulate the transport of volcanic ash, was implemented in BRAMS model an estimate of volcanic ash emission based on correlation between height injection of volcanic plume and ash emission rate. After was done a sensitivity analysis of the model by changing its settings and comparing with observed data, thus searching the best settings for modeling transport of ash and the possibility of implementing an emergency operating system, which has the aim to predict the position of volcanic plume. This emergency system is of great importance to aviation and civil protection. In general, the modeling system was able to simulate the main features of the recent eruption activity of the Puyehue volcano, mainly the horizontal and vertical transport of ash and the sedimentation process over the local area.



## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pg.</u>
Figura 1.1 – Vulcões potencialmente ativos no mundo. ....	2
Figura 2.1: Amostras de cinzas .....	6
Figura 2.2 – Distribuição de partículas depositadas, obtida através de uma grande quantidade de amostras durante a erupção do vulcão Fuego da Guatemala de 14 de outubro de 1974. ....	7
Figura 2.3- Mapa mostra as áreas de responsabilidade do VAACs. ....	8
Figura 2.4 A modelagem da pluma vulcânica feita pelo modelo PUFF, fornecido pelo instituto de geofísica da universidade Fairbanks do Alasca. ....	16
Figura 2.5 - Relação entre altura de injeção da pluma vulcânica em km por log da taxa de emissão em kg/s. Fonte: Adaptado de Mastin (2009). ....	17
Figura 2.6- Correlação entre altura de injeção da pluma vulcânica e velocidade dos ventos simulados no modelo numérico BENT. ....	18
Figura 3.1 – Esquerda, imagem da região onde se encontra o vulcão Puyehue. Direita, foto da coluna eruptiva no dia em que o vulcão iniciou suas atividades eruptivas. ....	21
Figura 3.2 - A imagem do topo é uma imagem noturna, sensor MODIS, do satélite Aqua da NASA. A linha amarela atravessando a imagem do MODIS corresponde ao local onde foi feito o perfil vertical pelo CALIPSO, este perfil é mostrado na parte inferior desta figura. ....	22
Figura 3.3- A imagem mostra a intensidade de partículas na coluna atmosfera. A série começa em 05/06/2011, um dia após o início da atividade eruptiva, e vai até o dia 13 do mesmo mês. ....	23
Figura 3.4 - Carta sinótica do CPTEC referente ao dia 10/06/2011. As altas transientes sobre a região do vulcão chileno contribuíram para levar as cinzas vulcânicas para latitudes mais baixas. ....	24
Figura 3.5: Média anual da direção e intensidade dos ventos para o período de 1979 até 1995 para a altitude de 850mb. ....	25
Figura 3.6: Média anual da direção e intensidade dos ventos para o período de 1979 até 1995 para a altitude de 200mb. ....	25
Figura 3.7 - Vegetação da região de Neuquén coberta por cinzas vulcânicas, dia 16 de junho de 2011. ....	26
Figura 3.8 - Altura de injeção do vulcão Puyehue por tempo. Dados diários fornecidos pelo OVDAS e SI. ....	27
Figura 3.9 - Altura de injeção do vulcão Puyehue por tempo, apenas aos dois primeiros meses. Dados diários fornecidos pelo OVDAS e SI. ....	28
Figura 3.10 - Dispersão diária da pluma. Dados diários fornecidos pelo OVDAS e SI. ....	28
Figura 3.11 - Correlação entre altura de injeção e dispersão da pluma; dados diários fornecidos pelo OVDAS e SI. ....	29
Figura 3.12 - Correlação entre altura de injeção e dispersão da pluma; apenas aos dois primeiros meses. Dados diários fornecidos pelo OVDAS e SI. ....	29

Figura 3.13 Altura de injeção por quantidade de abalos sísmicos por hora (média horária referente ao dia). Utilizando dados diários fornecidos pelo OVDAS. ....	30
Figura 3.14: Localização geográfica das estações permanentes e temporárias da AERONET, a direita exemplar dos fotômetros solar operado pela rede.....	32
Figura 3.15: Composição de IR10 em cinza e IR10-IR12 em colorido. Dia 06 de junho de 2011, com esta técnica foi possível detectar cinzas. Imagem fornecida pelo DSA/INPE. ....	34
Figura 3.16: Composição de IR10 em cinza e IR10-IR12 em colorido. Dia 22 de junho de 2011, não foi possível detecta cinzas, pois estas ficaram abaixo das nuvens. Imagem fornecida pelo DSA/INPE. ....	34
Figura 3.17: Percurso do satélite CALIPSO.....	35
Figura 3.18: Trajeto selecionado através do programa view_HDF. As cores mostram o valor de latitude da trajetória. ....	36
Figura 3.19: “Vertical Feature Mask”, fornece o perfil vertical de aerossóis atmosféricos, vide tabela C.3. O percurso que corresponde a esta imagem se encontra na figura 3.16.....	36
Figura 3.20: “Vertical Feature Mask” focalizado sobre a região de interesse. O percurso que corresponde a esta imagem se encontra na Figura 3.17.....	37
Figura 4.1 – Partículas maiores caem mais rapidamente que partículas menores.....	39
Figura 4.2: Histograma referente aos dados da tabela 4.1.....	40
Figura 4.3: Correlação entre altura de injeção e taxa de emissão.....	41
Figura 4.4: Correlação encontrada com os dados da tabela 1 que se encontram no artigo do Mastin et al (2009).....	42
Figura 4.5: Correlação encontrada utilizando os dados da tabela 3 que se encontram no artigo do Mastin et al (2009). ....	44
Figura 4.6: Média das correlações obtidas por vários autores sobre a altura de injeção e a taxa de emissão. Função obtida: $H=0,31(6)M^{0,240(14)}$ . .... Os três primeiros dados são fornecidos no artigo do Webster et. al. (2012). * Utilizando dados fornecidos no artigo do Mastin, et al. (2009). *** O valor da média é obtido através de uma média simples (pois não há a incerteza de todas as medidas) e sua incerteza é o desvio padrão.....	46
Figura 4.7: Altura de injeção (fornecido) com sua incerteza (equação 4.22), obtida pela correlação entre altura de injeção e taxa de emissão. ....	48
Figura 4.8: Média das correlações obtidas por vários autores sobre a taxa de emissão e altura de injeção. Função obtida: $M=167(110)H^{4,18(24)}$ . .... Os três primeiros dados são fornecidos no artigo do Webster et al. (2012). * Utilizando dados fornecidos no artigo do Mastin, et al. (2009). *** O valor da média é obtido através de uma média simples (pois não há a incerteza de todas as medidas) e sua incerteza é o desvio padrão.....	49
Figura 4.9: Taxa de emissão (equação 4.26) com sua incerteza (equação 4.29), obtida pela correlação entre altura de injeção e taxa de emissão. ....	50
Figura 4.10: Exemplo de como seria a distribuição da massa de cinzas vulcânicas caso houvesse uma erupção com altura de injeção de 10,5km.....	51
Figura 4.11: Concentração de cinzas tipo 1 em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e campo de vento à 8 km de altura. Dia 05/06/11 às 03Z. Advecção original, não monotônica. ....	58

Figura 4.12: Advecção da concentração de cinzas tipo 1 e campo de vento em 8km de altura. Dia 05/06/11 às 03Z. Advecção original, não monotônica. ....	58
Figura 4.13: Concentração de cinzas do tipo 1 a 8 km de altura sobre o trajeto A .....	59
Figura4.14: Perfil vertical da concentração de cinzas tipo 1 e 7 sobre o trajeto “B”. Eixo y é altura em metros, e o eixo x marca a posição latitudinal e longitudinal referente ao trajeto “B”. Advecção original é representado pelas linhas de contorno. ....	60
Figura4.15: Concentração vertical de cinzas do tipo 5 para latitude de -37° no dia 07 de junho de 2011 às 9 UTC. Esquerda advecção original, direita advecção monotônica... ..	61
Figura4.16: Concentração vertical de cinzas do tipo 6 para longitude de -66.7° no dia 07 de junho de 2011 às 9 UTC. Esquerda advecção original, direita advecção monotônica. ....	61
Figura 4.17: Local da passagem do satélite CALIPSO. A barra de cores representa o valor da latitude para cada cor na trajetória.....	62
Figura 4.18: Concentração de cinzas vulcânicas integrado na coluna atmosférica em $\mu\text{g}/\text{m}^2$ utilizando esquema de advecção original. A linha tracejada representa a trajetória do satélite CALIPSO, sendo “A” o início da trajetória. ....	63
Figura 4.19: Imagem fornecida pelo DSA relativo ao caso estudado. Para mais detalhes ler capítulo 3.4.1 desta dissertação. ....	63
Figura 4.20: Perfil vertical da concentração de cinzas vulcânicas, simulação feita com 30 km de resolução horizontal. Esquerda simulação realizada com advecção monotônica e na direita advecção original. A linha pela qual passa este percurso está representada na figura 4.18.....	64
Figura 4.21: Atenuação total do retroespalhamento para o comprimento de onda 532 mm, período das 17:51:48,5 às 18:05:17,2 do dia 05/06/2011. O círculo vermelho mostra uma região em que não houve atenuação total do retroespalhamento.....	65
Figura 4.22: “Vertical Feature Mask”. A macha amarela representa “stratospheric layer” e esta classificação significa tanto nuvens acima da tropopausa como aerossóis. A mancha preta significa que o sinal foi totalmente atenuado devido a absorção ocorrida pela grande concentração de aerossóis. ....	66
Figura 4.23: Local da passagem do satélite CALIPSO. A barra de cores representa o valor da latitude na trajetória. ....	67
Figura 4.24: Concentração de cinzas vulcânicas integrado na coluna atmosférica em $\mu\text{g}/\text{m}^2$ utilizando advecção original. A linha tracejada representa a trajetória do satélite CALIPSO, sendo “A” o início da trajetória. ....	67
Figura 4.25: Composição de imagens, IR10 em cinza e IR10-IR12 em colorido, imagem fornecida pelo DSA-INPE. ....	68
Figura 4.26: Perfil vertical da concentração de cinzas vulcânicas, sobre o percurso representado na Figura 4.18. Esquerda simulação realizada com advecção monotônica e na direita advecção original.....	68
Figura 4.27: Perfil vertical dos aerossóis observados pelo satélite CALIPSO. Em amarelo está “stratospheric layer”, que neste caso representa cinzas vulcânicas. A mancha preta significa que não foi possível observar, pois o sinal de retroespalhamento foi totalmente atenuado. ....	69

Figura 4.28: Concentração vertical de cinzas do tipo 5 para latitude de $-37^{\circ}$ no dia 07 de junho de 2011 às 9 UTC. Esquerda advecção original, direita advecção monotônica...	70
Figura 4.29: Concentração de cinzas do tipo 4, altura de 10 km, longitude de $-69^{\circ}$ , dia 06/06/2011 às 9Z, simulação feita com 5 km de resolução horizontal. O círculo em vermelho destaca a posição de uma oscilação espúria gerada pela advecção original, esta representada pela linha verde. ....	71
Figura 4.30: Perfil vertical da concentração de cinzas vulcânicas, simulação feita com 5 km de resolução horizontal. Na esquerda simulação realizada com advecção monotônica ligada (ADVMENT ON) e na direita desligada (ADVMENT OFF). A linha pela qual passa este percurso está representada na figura 4.29.....	72
Figura 4.31: Perfil vertical da concentração de cinzas vulcânicas, simulação feita com 5km de resolução horizontal. Na esquerda simulação realizada com advecção monotônica e na direita advecção original. ....	73
Figura 4.32: Concentração de cinzas vulcânicas sobre o trajeto do satélite. A esquerda, simulação utilizando análises do CPTEC, na direita reanálise do ECMWF (ERA). ....	75
Figura 4.33: Diferença entre as concentrações obtidas utilizando análise do CPTEC menos reanálise do ERA.....	75
Figura 4.34: Diferença percentual entre as concentrações obtidas utilizando análise CPTEC menos reanálise ERA.....	76
Figura 4.35: Concentração de cinzas vulcânicas sobre o trajeto do satélite. Esquerda simulação utilizando análise CPTEC, na direita utilizando reanálise ECMWF (ERA). 77	77
Figura 4.36: Diferença entre as concentrações utilizando análise CPTEC menos reanálise ERA.....	77
Figura 4.37: Diferença percentual entre as concentrações utilizando análise CPTEC menos reanálise ERA.....	78
Figura 4.38: Perfil vertical da concentração de cinzas vulcânicas sobre a trajetória do satélite. Esquerda simulação utilizando análise CPTEC, direita previsão CPTEC.....	79
Figura 4.39: Diferença da concentração de cinzas vulcânicas, entre previsão e análise.80	80
Figura 4.40: Diferença percentual entre previsão e análise para o caso estudado.....	80
Figura 4.41: Perfil vertical da concentração de cinzas vulcânicas sobre o trajeto do satélite. Esquerda simulação utilizando análise CPTEC, direita previsão CPTEC.....	81
Figura 4.42: Diferença da concentração de cinzas vulcânicas, entre previsão e análise.82	82
Figura 4.43: Diferença percentual entre previsão e análise para o caso estudado.....	82
Figura 4.44: Imagem fornecida pelo DSA para o dia 08/06/11 às 0UTC. ....	83
Figura 4.45: Quantidade de cinzas integrada na coluna atmosférica utilizando análise CPTEC.....	84
Figura 4.46: Quantidade de cinzas integrada na coluna atmosférica utilizando previsão CPTEC, previsão inicializado às 00Z do dia 04JUN2011. ....	84
Figura 4.47: Quantidade de cinzas integrada na coluna atmosférica previsão menos Análise (Figura 4.49-Figura 4.48).....	85
Figura 4.48: Diferença percentual da quantidade de cinzas integrada na coluna atmosférica, previsão menos Análise. ....	85



Figura 4.49: Perfil vertical da concentração de cinzas vulcânicas sobre a trajetória do satélite. Esquerda simulação sem assimilação no centro, direita com assimilação fraca no centro. ....	86
Figura 4.50: Diferença da concentração de cinzas vulcânicas, sem assimilação no centro menos assimilação fraca. ....	87
Figura 4.51: Diferença percentual da concentração de cinzas vulcânicas, sem assimilação no centro menos assimilação fraca. ....	87
Figura 4.52: Perfil vertical da concentração de cinzas vulcânicas. Esquerda, simulação sem assimilação no centro, direita assimilação fraca no centro. ....	88
Figura 4.53: Diferença da concentração de cinzas vulcânicas, sem assimilação no centro menos assimilação fraca. ....	88
Figura 4.54: Diferença percentual da concentração de cinzas vulcânicas, sem assimilação no centro menos assimilação fraca. ....	89
Figura 4.55: Perfil vertical da concentração de cinzas vulcânicas sobre a trajetória do satélite. Esquerda simulação com assimilação no centro forte, direita assimilação no centro fraca. ....	90
Figura 4.56: Diferença da concentração de cinzas vulcânicas, assimilação forte menos assimilação fraca. ....	90
Figura 4.57: Diferença percentual da concentração de cinzas vulcânicas, assimilação forte menos assimilação fraca. ....	91
Figura 4.58: Perfil vertical da concentração de cinzas vulcânicas sobre a trajetória do satélite. Esquerda simulação com assimilação forte, direita assimilação fraca. ....	92
Figura 4.59: Diferença da concentração de cinzas vulcânicas, assimilação forte menos assimilação fraca. ....	92
Figura 4.60: Diferença percentual da concentração de cinzas vulcânicas, assimilação forte menos assimilação fraca. ....	93
Figura 4.61: Imagem fornecida pelo DSA relativo ao dia 08 junho de 2011 às 06UTC. ....	94
Figura 4.62: Integral das cinzas vulcânicas na coluna atmosférica utilizando assimilação fraca no centro. ....	94
Figura 4.63: Integral das cinzas vulcânicas na coluna atmosférica em $\mu\text{g}/\text{m}^2$ utilizando assimilação forte no centro e campo de ventos à 8km de altitude. ....	95
Figura 4.64: Diferença da Integral das cinzas vulcânicas na coluna atmosférica utilizando assimilação forte no centro menos utilizando assimilação fraca. ....	95
Figura 4.65: Diferença percentual da Integral das cinzas vulcânicas na coluna atmosférica utilizando assimilação forte no centro menos utilizando assimilação fraca. ....	96
Figura 4.66: Perfil vertical das cinzas vulcânicas sobre o trajeto B referente à Figura 4.62. ....	97
Figura 4.67: Perfil vertical das cinzas vulcânicas sobre o trajeto B referente à Figura 4.63. ....	97
Figura 4.68: Diferença do perfil vertical das cinzas vulcânicas, referente ao trajeto B da Figura 4.64. ....	98

Figura 4.69: Diferença percentual do perfil vertical das cinzas vulcânicas, referente ao trajeto B da Figura 4.65.....	98
Figura 5.1: Concentração de cinzas vulcânicas em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sobre o trajeto do CALIPSO. Simulação utilizando valores máximo, médio e mínimo para altura de injeção e taxa de emissão.....	102
Figura 5.2: Concentração de cinzas vulcânicas em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sobre o trajeto do CALIPSO. Simulação utilizando valores máximo, médio e mínimo para altura de injeção e taxa de emissão.....	103
Figura 5.3: Imagem fornecida pelo DSA relativo ao dia 07 de junho de 2011 às 06Z.	104
Figura 5.4: Integral das cinzas vulcânicas na coluna atmosférica. Ensemble com valores máximo, médio e mínimo.....	105
Figura 5.5: Diferença da concentração de cinzas vulcânicas integrado na coluna atmosférica, valor máximo – valor médio.....	106
Figura 5.6: Diferença percentual da concentração de cinzas vulcânicas integrado na coluna atmosférica, valor máximo – valor médio.....	106
Figura 5.7: Ensemble da concentração de cinzas a 10 km de altura.....	107
Figura 5.8: Ensemble da integral de cinzas vulcânicas na coluna atmosférica.....	108
Figura 5.9: Diferença da concentração de cinzas vulcânicas integrado na coluna atmosférica, valor máximo – valor médio.....	109
Figura 5.10: Diferença percentual da concentração de cinzas vulcânicas integrado na coluna atmosférica, valor máximo – valor médio.....	109
Figura 5.11: Perfil vertical da concentração de cinzas sobre o trajeto B da Figura 4.88.....	111
Figura 5.12: Diferença da concentração de cinzas vulcânicas, valor máximo – valor médio.....	112
Figura 5.13: Trajetória do satélite CALIPSO para o dia 16/06/11 entre às 17:37 e 17:44Z.....	112
Figura 5.14: Concentração de cinzas vulcânicas integrado na coluna atmosférica, linha representa a trajetória do satélite CALIPSO, sendo o ponto “A” o início da trajetória.....	113
Figura 5.15: Imagem fornecida pelo DSA referente ao dia 16/06/11 às 18Z.....	113
Figura 5.16: Ensemble do perfil vertical das cinzas vulcânicas sobre o trajeto desenhado na figura 5.15.....	114
Figura 5.17: Perfil vertical dos aerossóis observados pelo satélite CALIPSO sobre a trajetória da figura 5.13. Em amarelo está “stratospheric layer”, que neste caso representa cinzas vulcânicas. O círculo em vermelho mostra a região de interesse. ...	115
Figura 5.18: Trajetória do satélite CALIPSO para o dia 18 de junho de 2011 por volta das 12:26 às 12:33 UTC. As cores representam os valores de latitude.....	116
Figura 5.19: Imagem fornecida pelo DSA. Dia 18 de junho de 2011 às 12:30 UTC...	116
Figura 5.20: Integral das cinzas na coluna atmosférica usando o valor médio do ensemble. A reta representa a trajetória do satélite, onde “A” marca o início da trajetória.....	117

Figura 5.21: Perfil vertical dos aerossóis observados pelo satélite CALIPSO sobre a trajetória da Figura 5.18. Em amarelo está “stratospheric layer”, que neste caso representa cinzas vulcânicas.....	117
Figura 5.22: Perfil vertical da concentração de cinzas vulcânicas sobre o trajeto da Figura 5.20. Pintado representa ensemble de valor máximo, enquanto o contorno representa o de valor médio.....	118
Figura 5.23: Ensemble do perfil vertical de cinzas vulcânicas sobre a cidade de Porto Alegre no período dos dias 8 de junho de 2011 ao dia 16 de junho de 2011.....	120
Figura 5.24: Ensemble da concentração de cinzas vulcânicas a 48 metros (primeiro nível no modelo) sobre a superfície da cidade de Porto Alegre, do dia 8 de junho ao dia 16.....	120
Figura 5.25: Deposição de cinzas no território argentino para os 23 primeiros dias após a erupção.....	122
Figura 5.26: Integral da deposição de cinzas nos primeiros 23 dias após a erupção. Dados referentes à simulação de ensemble com valor máximo.....	123
Figura 5.27: Integral da deposição de cinzas nos primeiros 23 dias após a erupção. Dados referentes à simulação utilizando valores médio e mínimo de ensemble.....	123
Figura 5.28: Deposição de cinzas sobre o território argentino medidas obtidas entre os 3 e 55 primeiros dias após a erupção.....	124
Figura 5.29: Integral da deposição de cinzas nos primeiros 40 dias após a erupção. Ensemble utilizando valor máximo.....	125
Figura 5.30: Integral da deposição de cinzas nos primeiros 40 dias após a erupção. Ensemble utilizando valor médio e mínimo.....	125
Figura 5.31: Profundidade óptica em Trelew, o círculo em vermelho mostra o momento da chegada das cinzas vulcânicas sobre a cidade.....	126
Figura 5.32: Distribuição volumétrica do tamanho da partícula $dV(r)$ em $\mu\text{m}^3$ por comprimento da partícula em $\mu\text{m}$ .....	127
Figura 5.33: Expoente de Angstrom 440/370 nm, as flechas indicam regiões de queda no expoente de angstrom.....	127
Figura 5.34: Integral da quantidade de cinzas sobre a cidade de Trelew em $\mu\text{g}/\text{m}^2$ ....	128
Figura 5.35: Perfil vertical das cinzas sobre a cidade de Trelew utilizando o ensemble de valor máximo.....	128
Figura 5.36: Profundidade óptica e Expoente de Angstrom para a cidade de Trelew.....	129
Figura 5.37: Integral da quantidade de cinzas sobre a cidade de Trelew, foco sobre o período que apresentou maior concentração.....	130
Figura 5.38: Perfil vertical das cinzas sobre a cidade de Trelew utilizando o ensemble de valor máximo.....	130
Figura 5.39: Imagem fornecida pelo DSA relativo ao dia em que o modelo mostrou maior concentração de cinzas sobre Trelew.....	131
Figura 5.40: Profundidade óptica e Expoente de Angstrom para a cidade de Buenos Aires.....	132
Figura 5.41: Integral da quantidade de cinzas sobre a cidade de Buenos Aires.....	132

Figura 5.42: Perfil vertical das cinzas sobre a cidade de Buenos Aires utilizando o ensemble de valor máximo. ....	133
Figura 5.43: Integral da quantidade de cinzas sobre a cidade de Buenos Aires, foco sobre o período que apresentou maior concentração. ....	133
Figura 5.44 Imagem fornecida pelo DSA para o dia em que a AERONET colocou maior profundidade óptica sobre Buenos Aires. ....	134
Figura 5.45: Imagem fornecida pelo DSA para o dia em que o modelo mostrou maior concentração de cinzas sobre Buenos Aires. ....	134
Figura 6.1: Ilustração da diferença entre a altura de injeção devido à posição do sensor. ....	139
Figura C.1: Posição espacial dos dados da variável Feature_Classification_Flag. ....	154

## LISTA DE TABELAS

	<b><u>Pág.</u></b>
Tabela 1.1 – Atividades vulcânicas no mundo.....	2
Tabela 2.1 – Principais efeitos sobre a saúde humana causado por cinzas vulcânicas e principais medidas preventivas.....	10
Tabela 4.1: Distribuição do tamanho das partículas.....	40
Tabela 4.2: Configurações técnicas das simulações.....	56
Tabela 5.1: Resultados obtidos a partir da análise do material particulado, coletado nos filtros.....	119
Tabela C.1: Resolução espacial da variável Feature_Classification_Flag.....	153
Tabela C.2: Tipos de aerossóis para diferentes comprimentos de onda do sensor CALIOP.....	155
Tabela C.3: Classificação segundo a variável Feature_Classification_Flag.....	157



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AERONET	AErosol RObotic NET work
ADVMNT ON	Advecção monotônica ligada
ADVMNT OFF	Advecção monotônica desligada
AOT	Aerosol Optical Thickness
BRAMS	Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modelling System
CALIOP	Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization
CALIPSO	Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations
CCATT-BRAMS	Coupled Chemistry-Aerosol -Tracer Transport model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modelling System.
CCVC	Complexo Vulcânico Puyehue-Cordón Caulle
CLP	Camada Limite Planetária
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DSA	Divisão de Satélites Ambientais
ECEF	Earth Centered, Earth Fixed
ECR	Earth Centered Rotational
FALL3D	É um modelo Euleriano para transporte e deposição de cinzas vulcânicas. Desenvolvido no Barcelona Supercomputing Center.
FEPAM	Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luis Roessler.
GRADS	Grid Analysis and Display System
HDF	Hierarchical Data Format
IDL	Interface Description Language
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

LIDAR	Light Detection And Ranging
Log	logaritmo
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MSH	Monte Santa Helena.
NAME	Numerical Atmospheric dispersion Modeling Environment; UK's Met Office
NASA	National Aeronautics and Space Administration.
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
OMI	Ozone Monitoring Instrument
OVDAS	Observatório Volcanológico de los Andes del Sur
PSCs	Polar Stratospheric Clouds
PUFF	Volcanic Ash Tracking Model; do Geophysical Institute, University of Alaska Fairbanks
Kft	Kilo thousand feet
Km	Quilômetros
SEVIRI	Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager
SI	Smithsonian Institution
TAI	Time expressed in International Atomic Time
USGS	U.S. Geological Survey
UTC	Coordinated Universal Time
VAAC	Volcanic Ash Advisory Centers



## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1.	Motivação.....	1
1.2.	Atividades vulcânicas no mundo.....	1
1.3.	Objetivos: .....	2
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	5
2.1.	Gases vulcânicos e seus impactos .....	5
2.2.	Cinzas vulcânicas e seus impactos .....	6
2.3.	Impactos ao clima.....	10
2.4.	Fundamentação física do modelo BRAMS.....	12
2.5.	Estimativas de Emissão de Cinzas Vulcânicas .....	15
2.6.	Conceitos básicos a cerca dos sensores que foram utilizados a bordo dos satélites.....	19
2.6.1.	Satélite de orbita polar Aqua.....	19
2.6.2.	Satélite geoestacionário Meteosat-8 .....	19
2.6.3.	Satélite de orbita polar CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations).....	19
3	ESTUDO DE CASO, VULCÃO PUYEHUE.....	21
3.1.	Influência das condições sinóticas sobre a dispersão de cinzas na região .....	21
3.2.	Impactos econômicos causados pelo vulcão Puyehue .....	26
3.3.	Dados obtidos em superfície: .....	26
3.3.1.	A altura de injeção e dispersão da pluma vulcânica .....	26
3.3.2.	Dados sismológicos .....	30
3.3.3.	Dados coletados pela FEPAM em Porto Alegre.....	31
3.3.4.	Cartografia das cinzas vulcânicas depositadas .....	31
3.3.5.	Dados de propriedades ópticas de aerossóis via AERONET.....	32
3.4.	Dados obtidos por Satélite.....	33
3.4.1.	Utilização dos dados do Satélite Meteosat-8 .....	33
3.4.2.	Utilização dos dados do Satélite CALIPSO .....	34
4	METODOLOGIA E TESTES DE SENSIBILIDADE .....	39
4.1.	Estruturação.....	39
4.1.1.	Diâmetro das cinzas vulcânicas ejetadas na atmosfera.....	39
4.1.2.	Correlação entre altura de injeção e taxa de emissão .....	40
4.1.3.	Propagando a incerteza em relação à altura de emissão. ....	47
4.1.4.	Propagando a incerteza em relação à taxa de emissão.....	48
4.1.5.	Distribuição das partículas na coluna ejetada .....	51
4.2.	Dados observados.....	51

4.3. Análise de sensibilidade .....	52
4.3.1. Introdução: .....	52
4.3.2. Configurações do modelo: .....	54
4.3.3. Sensibilidade ao esquema de advecção: .....	56
4.3.4. Condições de contorno: .....	74
4.3.5. Forma de assimilação: .....	86
5 DESENVOLVIMENTO DO ENSEMBLE DE DISPERSÃO DE CINZAS E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS SIMULADOS .....	101
5.1. Introdução: .....	101
5.2. Avaliação dos resultados modelados utilizando dados de satélite. ....	102
5.3. Análise dos resultados do modelo utilizando dados coletados pelo FEPAM-RS .	119
5.4. Análise dos resultados do modelo utilizando cartográficas de sedimentação.....	121
5.5. Análise dos resultados do modelo utilizando dados fornecidos pela AERONET.	126
6 CONCLUSÕES.....	137
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	141
APÊNDICE A – Calculo da advecção horizontal através do GRADS .....	149
APÊNDICE B - Parametrização de difusão horizontal akmin .....	151
APÊNDICE C- Sensor LIDAR-CALIPSO .....	153

# **1 INTRODUÇÃO**

## **1.1. Motivação**

Modelar a dispersão de cinzas e gases ejetados pelos vulcões possui sua importância para a meteorologia, pois estes influenciam no clima e no tempo. Possui importância financeira, pois causam danos à agricultura, à agropecuária, às estruturas, a materiais e à aviação. Possui importância à saúde e ao meio ambiente, pois causam danos a estes.

Prever posição e concentração das cinzas vulcânicas suspensas na atmosfera é de grande valia principalmente à atividade de transporte aéreo. Para a agricultura e a segurança de estruturas como residências, é de grande importância prever a quantidade de cinzas depositadas na superfície.

## **1.2. Atividades vulcânicas no mundo**

Na América do Sul assim como em todo o mundo há grande quantidade de vulcões, alguns ativos e outros que podem entrar em atividade a qualquer momento. Quando ativos, influenciam no clima e são responsáveis por acidentes, danos financeiros e danos à saúde. Prever a posição das cinzas suspensas na atmosfera emitidas pela atividade vulcânica, e estimar a quantidade de cinzas depositada na superfície é essencial para minimizar os potenciais danos causados.

No mundo existem cerca de 550 vulcões e desses, em média, 20 estão em atividade a todo momento (SMITHSONIAN INSTITUTION (SI), 2012b) como, por exemplo, o vulcão Puyehue no Chile que entrou em erupção no dia 04/06/11 e ficou em atividade até por volta do mês de julho de 2012, (OVDAS, 2014) .

Quando os vulcões possuem histórico documentado de atividade eruptiva ou são considerados potencialmente ativos, são denominados vulcões históricos. A Figura 1.1 mostra onde se encontram estes vulcões no mundo, enquanto a Tabela 1.1 demonstra a atividade vulcânica no mundo.

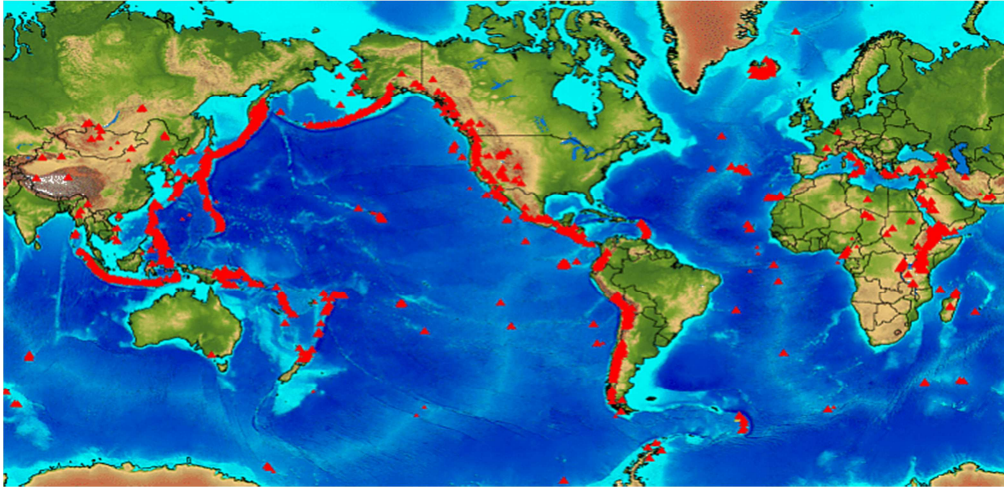


Figura 1.1 – Vulcões potencialmente ativos no mundo.  
 Fonte: Smithsonian Institution (2012b)

Tabela 1.1 – Atividades vulcânicas no mundo.

Erupções ocorrendo agora:	cerca de 20
A cada ano:	50-70
Cada década:	cerca de 160
Erupções históricas:	cerca de 550
Erupções Holoceno conhecidas (últimos 10.000 anos):	cerca de 1300

Fonte: Adaptado do Smithsonian Institution (2012b)

### 1.3. Objetivos:

O objetivo deste trabalho consiste em fazer a modelagem numérica da emissão, transporte, dispersão e deposição das cinzas vulcânicas, utilizando o modelo meteorológico BRAMS e seu componente de química atmosférica (CCATT), versão mais recente, 5.0, aplicado ao evento eruptivo do vulcão Puyehue que entrou em erupção no ano de 2011.

Para alcançar este objetivo, foi necessário concluir três etapas:

**1ª Estruturação do modelo:** Consiste em estruturar o modelo para possibilitá-lo na modelagem da dispersão das cinzas vulcânicas, obtendo e implementando os parâmetros e dados de entrada que são necessários.

**2º Dados observados:** Consiste em obter dados observados para comparar com a saída do modelo.

**3º Análise de sensibilidade:** Consiste na busca pela melhor configuração do modelo no sentido de prever o transporte e deposição das cinzas vulcânicas com maior acurácia.

Feito isto será possível averiguar a possibilidade da implementação de um sistema emergencial que teria por finalidade monitorar e prever a posição das cinzas vulcânicas caso ocorra uma erupção vulcânica, e avaliar a qualidade do modelo em relação a dados observados.



## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. Gases vulcânicos e seus impactos

Os principais gases emitidos pelos vulcões em ordem decrescente de volume e massa são: vapor de água ( $H_2O$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ) e dióxido de enxofre ( $SO_2$ ). Também são emitidos em uma quantidade pequena outros gases como sulfato de hidrogênio (ácido sulfídrico,  $H_2S$ ), hidrogênio ( $H_2$ ), monóxido de carbono ( $CO$ ), cloreto de hidrogênio (ácido clorídrico,  $HCl$ ), fluoreto de hidrogênio (ácido fluorídrico,  $HF$ ) e hélio ( $He$ ). A quantidade destes compostos varia de acordo com o magma da região segundo U.S. Geological Survey disponível em <http://volcanoes.usgs.gov/hazards/gas/index.php> acessado em 13 de fevereiro de 2012.

O ácido clorídrico destrói a camada de ozônio, e permanece na estratosfera entre dois a três anos. A camada de ozônio é importante, pois impede que uma grande quantidade de radiação ultravioleta incida na superfície este tipo radiação propicia o aparecimento de câncer de pele em pessoas e animais expostos. A emissão de ácido clorídrico pelos vulcões não é o suficiente para descompensar o equilíbrio natural, pois ozônio é formado através da interação do oxigênio com a radiação ultravioleta na estratosfera, permitindo assim um equilíbrio natural entre formação e destruição de ozônio ([http://www.geology.sdsu.edu/how\\_volcanoes\\_work/climate\\_effects.html](http://www.geology.sdsu.edu/how_volcanoes_work/climate_effects.html)).

Os gases mais prejudiciais aos animais, ao homem, à agricultura e aos patrimônios em geral, são: dióxido de enxofre, dióxido de carbono e fluoreto de hidrogênio. O gás dióxido de enxofre ao reagir com a molécula de água forma ácido sulfúrico, podendo assim gerar chuva ácida. O dióxido de carbono é mais pesado que o ar gerando concentrações letais em vales próximos aos vulcões que se encontram em erupção. O ácido fluorídrico também conhecido como fluoreto de hidrogênio, além de contribuir para chuva ácida contamina a superfície e a água com flúor que, em altas concentrações, é prejudicial à saúde dos animais e das pessoas.

Gases como: dióxido de enxofre, sulfureto de hidrogênio, cloreto de hidrogênio e fluoreto de hidrogênio afetam a saúde humana provocando irritação das vias

respiratórias e em altas concentrações a morte; estes gases também contribuem para a formação de chuva ácida.

## 2.2. Cinzas vulcânicas e seus impactos

As cinzas vulcânicas são densas, extremamente abrasivas e levemente corrosivas, conduzem eletricidade quando molhadas e não se dissolvem em água. Estas são emitidas num amplo espectro de tamanho e forma. As menores podem viajar centenas de milhares de quilômetros e ficarem suspensas na atmosfera durante dias, dependendo da velocidade vertical dos ventos, altura em que foram injetadas na atmosfera, tamanho das partículas e sua densidade. As cinzas vulcânicas (Fig 2.1) não são produtos da combustão, são geradas devido à destruição da rocha através da rápida expansão dos gases dentro da mesma (<http://volcanoes.usgs.gov/ash/properties.html>). Elas possuem distribuição de tamanho que obedecem normalmente uma distribuição gaussiana, por exemplo, na Figura 2.2 mostra a distribuição de partículas depositadas, obtida através de uma grande quantidade de amostras durante a erupção do vulcão Fuego da Guatemala de 14 de outubro de 1974, nesta figura (Fig 2.2) as cinzas se comportam como uma gaussiana dupla com assimetria negativa. A distribuição do tamanho das partículas depositadas muda conforme a distância em que a amostra é coletada, quando próximo ao vulcão há maior quantidade de partículas de diâmetro maior, quanto mais afastada do vulcão maior a quantidade de partículas com menor diâmetro.

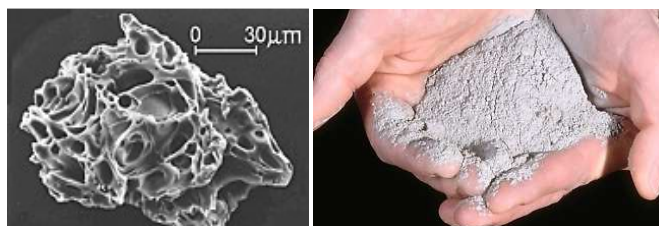


Figura 2.1: Amostras de cinzas. Fonte: <http://volcanoes.usgs.gov>



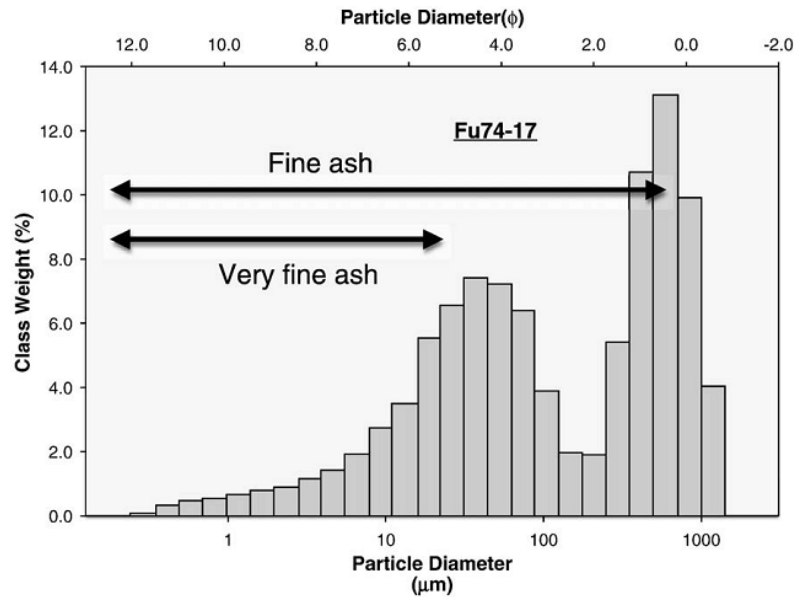


Figura 2.2 – Distribuição de partículas depositadas, obtida através de uma grande quantidade de amostras durante a erupção do vulcão Fuego da Guatemala de 14 de outubro de 1974.

Fonte: Rose et al. (2009).

As cinzas vulcânicas, por serem corrosivas, causam impacto na aviação, provocando degradação de vários componentes da estrutura de uma aeronave. Por serem minúsculas, elas penetram nas entradas de ar, bloqueiam filtros e pequenas passagens de ar, afetam a pressurização e a climatização da cabine; porém o dano mais preocupante é causado nos motores, uma vez que as cinzas derretem ao entrarem no motor, devido ao calor, mas depois se solidificam em regiões mais frias do mesmo, danificando-o a ponto de pará-lo (MENDONÇA, 2011). As consequências dos danos gerados às aeronaves podem ser imediatas ou demorar alguns dias para aparecerem. Para corrigir os danos gerados pelas cinzas vulcânicas na aeronave são necessários programas de manutenção e detalhadas inspeções, geralmente com altos custos operacionais, por exemplo, em 1990 um avião 747-400, quase novo, sofreu danos devido às cinzas vulcânicas, o custo para conserto foi superior a 80 milhões de dólares americanos; enquanto a perda financeira do aeroporto internacional Anchorage devido ao cancelamento dos voos durante os meses de erupção, foi estimado por volta de 2,6 milhões de dólares americanos (MENDONÇA, 2011); logo é mais barato cancelar os voos do que consertar os

aviões. Este fator contribui para demonstrar a importância da previsão e monitoramento do transporte da pluma vulcânica à aviação.

Os equipamentos de bordo do avião, incluindo radares, não são eficientes para detectarem cinzas vulcânicas, conseqüentemente a melhor maneira para se prevenir um acidente aeronáutico devido ao encontro com cinzas vulcânicas é evitando voar em áreas onde elas tenham sido detectadas ou que haja a possibilidade de sua presença (MENDONÇA, 2011). Desta forma o monitoramento e previsão do movimento das cinzas vulcânicas se tornam indispensáveis para uma aviação segura, e esta informação tem que chegar à operação aeronáutica rapidamente para se adotar medidas de gerenciamento de riscos.

Com o intuito de manter os aviadores informados a respeito da localização das cinzas vulcânicas foram criados os Volcanic Ash Advisory Centers – VAAC, vide figura 2.3. São nove Centros que permitem a troca de informações entre observatórios de vulcões, agências e institutos de meteorologia, centros de controle de tráfego aéreo e operadores de aeronaves (MENDONÇA, 2011).

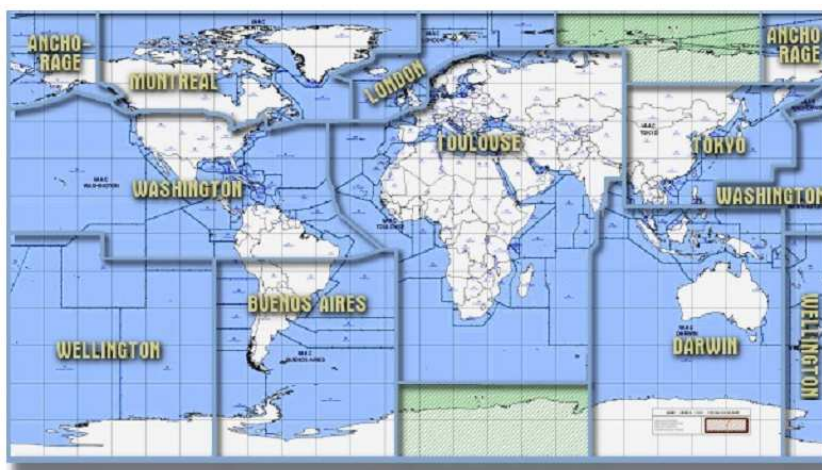


Figura 2.3- Mapa mostra as áreas de responsabilidade do VAACs.  
Fonte: Meteo France (2012).

O problema da aviação com respeito às cinzas vulcânicas ganhou repercussão mundial durante a erupção do vulcão Eyjafjallajökull na Islândia em 2010, as nuvens de cinzas expelidas pelo vulcão colocaram a Europa em um caos aéreo, com o cancelamento de milhares de voos, fechamento de aeroportos em diversos países e um prejuízo calculado em 2,2 bilhões de dólares

americanos (MEMES, 2012); mais de 300 aeroportos foram fechados, levando ao cancelamento de mais de 100.000 voos em 20 países, deixando cerca de dez milhões de passageiros com seus voos cancelados ou atrasados até a reabertura do tráfego aéreo da Europa no começo de abril (ISLÂNDIA – Eyjafjallajökull, 2012). Se os voos não fossem cancelados, os prejuízos financeiros seriam maiores devido ao alto custo de manutenção das aeronaves e haveria a possibilidade ocorrer acidentes.

No Brasil, nos últimos doze anos mais de 60 aeronaves, a maioria aviões de grande porte, sofreram danos devido à presença de cinzas vulcânicas, em sete dessas ocorrências os motores apagaram (MENDONÇA, 2011).

A agricultura e agropecuária são afetados principalmente pelas cinzas depositadas, sendo assim necessário prever a quantidade de cinzas depositadas para estimar os danos causados e tomar medidas preventivas. As cinzas podem danificar ou até matar as plantas por soterramento e além disto, por possuírem flúor as deixam tóxicas, pois este composto químico é tóxico quando ingerido em grandes quantidades. Os animais ao se alimentarem de pasto contaminado com cinzas vulcânicas podem sofrer os seguintes danos: dano aos ossos, perda de peso, diminuição da produção de leite, diminuição da qualidade da lã e pode levar a morte.

A Tabela 2.1 mostra os principais danos que as cinzas vulcânicas podem causar, é importante enfatizar que a queda de telhados devido ao acúmulo de cinzas vulcânicas é responsável por uma parcela significativa das mortes provocadas pelos vulcões, e estas mortes poderiam ser evitadas pela atuação da defesa civil, se esta fosse informada com antecedência a possibilidade e a quantidade de cinzas depositada sobre a região.

Tabela 2.1 – Principais efeitos sobre a saúde humana causado por cinzas vulcânicas e principais medidas preventivas.

<b>Principais Efeitos sobre a Saúde Humana e Principais Medidas Preventivas</b>			
<b>Consequência</b>	<b>Efeitos na saúde</b>	<b>Monitoração</b>	<b>Medida preventiva</b>
<b>Respiratório</b>			
Inalação de cinzas < 10 microm de diâmetro	Exacerbação de doenças pré-existentes de pulmão	Monitorar partículas totais em suspensão (PTS)  Monitorar partículas de cinzas < 10 microm de diâmetro	Usar máscaras de alta eficiência  Proteger a casa e escritórios de infiltração de cinzas
Inalação de sílica livre em cinzas vulcânicas	Silicose crônica silicose é uma reação (cicatrização) fibrosa dos pulmões causada pela inalação de sílica cristalina	Determinar o conteúdo de sílica respirável das cinzas  Monitorar a alta exposição de indivíduos	Equipamento de proteção respiratória
<b>Oculares (olhos)</b>			
Corpos estranhos nos olhos	Conjuntivite, abrasões da córnea	Monitorar a direção do vento e da produção de cinzas	Óculos de proteção
<b>Mecânico</b>			
Quedas de cinzas nos telhados	Trauma, incluindo a morte		Evitar o acúmulo excessivo de cinzas sobre os telhados
Acidentes automobilísticos de estradas escorregadias e pouca visibilidade	Trauma, incluindo a morte	Monitorar áreas que receberão queda de cinzas e manter-se informado sobre as condições e encerramento de estradas	Controle de tráfego  Pré-notificação de erupção o que fazer durante uma queda de cinzas

Fonte: Adaptado de USGS, Health (2012).

### 2.3. Impactos ao clima

Os vulcões geram impactos ao clima alterando o balanço radiativo, gerando tanto o efeito de esfriamento global, como o efeito de aquecimento global. O efeito de esfriamento é predominante em curto prazo, pois depende de partículas e aerossóis e esses ficam poucos dias suspensos na atmosfera. O efeito de aquecimento é predominante em longo prazo, pois este efeito é gerado pelos gases e esses permanecem durante anos na atmosfera.

O efeito de resfriamento é gerado pelas cinzas vulcânicas e pelo aerossol de ácido sulfúrico. Este aerossol é formado pela reação química entre o dióxido de enxofre liberado pela erupção, normalmente injetado diretamente na baixa estratosfera, formando gotas de ácido sulfúrico com o vapor de água ali presente, estes aerossóis de ácido sulfúrico são altamente reflexivos e, dessa forma reduzem a quantidade de luz solar que chega à troposfera e superfície. Isso gera um aquecimento na baixa estratosfera devido à absorção da radiação refletida de volta ao espaço (USGS, 2012).

As cinzas vulcânicas também possuem a propriedade de refletir a luz solar, gerando assim resfriamento. A diminuição da temperatura por um breve período de tempo é o efeito mais instantâneo e significativo ao clima depois da ocorrência de uma grande erupção vulcânica. Quando as cinzas são injetadas diretamente na estratosfera estas podem ficar por um longo período de tempo suspensas na atmosfera, por exemplo, em 15 de junho de 1991, quando o vulcão Pinatubo, nas Filipinas, entrou em erupção, os aerossóis providos das erupções vulcânicas se espalharam pelo globo em poucos meses, esfriando a temperatura da superfície da Terra por três anos após a erupção. Durante esta erupção no auge do efeito de resfriamento houve um decréscimo superior a 1,3 graus Kelvin na temperatura global, segundo U.S. Geological Survey em *Volcanic Gases and Climate Change Overview 2012*.

O efeito de aquecimento é gerado devido à liberação de gases do efeito estufa, principalmente o vapor de água e dióxido de carbono. Como estes gases permanecem por bastante tempo na atmosfera, o efeito de aquecimento predomina sobre o efeito de resfriamento em longo prazo, pois os aerossóis e as cinzas vulcânicas ficam poucos dias suspensos na atmosfera, enquanto os gases permanecem por anos. Os vulcões lançam em média  $0,26 \cdot 10^{12}$  toneladas de  $\text{CO}_2$  na atmosfera por ano, enquanto as atividades antrópicas lançam  $35 \cdot 10^{12}$  toneladas, ou seja as emissões antrópicas de  $\text{CO}_2$  são aproximadamente 135 vezes superiores a emissão vulcânica (USGS, 2012); logo a emissão vulcânica não é peça chave para o aumento deste tipo de gás estufa.

## 2.4. Fundamentação física do modelo BRAMS

Para modelar a dispersão de cinzas vulcânicas é necessário modelar o campo de vento e este é obtido resolvendo as equações que regem a dinâmica da atmosfera, incluindo constituintes químicos. O seguinte conjunto de equações mais a equação de gás ideal são assumidos governar a evolução temporal da atmosfera, sendo seu estado futuro determinado a partir do conhecimento do seu estado inicial.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -\vec{v} \cdot \nabla \vec{v} - \frac{1}{\rho_a} \nabla p - g \vec{k} - 2\vec{\Omega} \times \vec{v} + \vec{F}_{visc} \\ \frac{\partial \rho_a}{\partial t} = -\nabla \cdot \rho_a \vec{v} \\ \frac{\partial \theta}{\partial t} = -\vec{v} \cdot \nabla \theta + Q_\theta \\ \frac{\partial r_n}{\partial t} = -\vec{v} \cdot \nabla r_n + Q_{r_n} \\ \frac{\partial s_{[\eta]}}{\partial t} = -\vec{v} \cdot \nabla s_{[\eta]} + Q_{s_{[\eta]}} \end{array} \right. \quad (2.1)$$

A primeira equação é a equação fundamental de Navier-Stokes, esta estabelece a evolução temporal da velocidade ( $\vec{v}$ ) de um fluido em um referencial não inercial; a segunda é a conservação de massa do ar; a terceira é a primeira lei da termodinâmica; a quarta é a equação de conservação de massa de água em todas as fases de estado existentes em termos da razão de mistura de massa ( $r_n = \rho_n / \rho_a$ ), as fases de estado são denotadas pelo índice ( $n$ ). O ultimo termo da equação é a equação da continuidade de massa para gases e aerossóis, em que ( $Q_{s_{[\eta]}}$ ) representa matematicamente um complexo conjunto de processos químicos e físicos que atuam na produção ou perda de massa, aumentando assim a razão de mistura ( $s$ ) de uma determinada partícula ou gás ( $\eta$ ). Esses processos químicos e físicos são: emissões antropogênicas, deposição seca, deposição úmida, fotodissociação, reações químicas, emissões por queimadas, emissões vulcânicas, etc.

Em regiões onde ocorrem grande emissões de aerossóis e gases como queimadas, cidades e vulcões o efeito dos aerossóis se faz importante no

aspecto radiativo e de microfísica de nuvens, sendo assim o ultimo termo da equação 2.1 precisa ser incluída no modelo, pois a solução deste termo altera as forçantes  $(Q_\theta)$  e  $(Q_{r_n})$ . A forçante  $(Q_\theta)$  representa genericamente os processos diabáticos, como o saldo do balanço radiativo e a mudança de fase da água. A forçante  $(Q_{r_n})$  representa os termos fontes e sumidouros de água nas suas três fases. O conjunto de equações 2.1 se encontra mais detalhado em Freitas et al. (2009).

O sistema de Equações 2.1 não possui solução analítica, necessitando, portanto, da busca de solução numérica através de alguma metodologia de discretização, como, por exemplo, diferenças finitas. A discretização impõe solução em pontos específicos, distribuídos numa grade; fazendo com que a solução passe a representar uma média estatística dentro de cada célula da grade.

A decomposição de Reynolds é largamente utilizada para a solução numérica do sistema de equações 2.1. Neste procedimento, cada variável (s) é separada em termos de sua média ( $\bar{s}$ ) e de sua flutuação em torno da média ( $s'$ ) conforme a formula 2.2:

$$s = \bar{s} + s' \quad 2.2$$

Aplicando o procedimento de Reynolds à equação de continuidade, obtêm-se:

$$\frac{\partial \bar{s}}{\partial t} + \underbrace{\bar{u} \frac{\partial \bar{s}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{s}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{s}}{\partial z}}_{\text{I}} = - \frac{1}{\rho_0} \underbrace{\left( \frac{\partial \rho_0 \overline{u's'}}{\partial x} + \frac{\partial \rho_0 \overline{v's'}}{\partial y} + \frac{\partial \rho_0 \overline{w's'}}{\partial z} \right)}_{\text{II}} + \overline{Q_s} \quad 2.3$$

onde o termo I representa o transporte resolvido (advecção na escala da grade) e o termo II a contribuição do transporte não-resolvido (transporte subgrade gerado por turbulência, convecção, etc.). O termo  $(\rho_0)$  representa a densidade do ar no estado básico a partir da qual as flutuações são calculadas. No entanto, a limitação computacional não nos permite a solução desta com todos os termos simultaneamente, por isto é necessário resolver cada processo independentemente e, então, agregar as mudanças resultantes de cada cálculo

parcial para compor uma solução aproximada para a equação 2.3. Desta forma a equação 2.3 é aproximada pelo sistema de equações 2.4:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left( \frac{\partial \bar{s}}{\partial t} \right)_{adv} = - \sum_i \bar{u}_i \frac{\partial \bar{s}}{\partial x_i} \\ \left( \frac{\partial \bar{s}}{\partial t} \right)_{CLP}^{turb} = - \frac{1}{\rho_0} \sum_i \frac{\partial \rho_0 (\overline{u'_i s'})_{turb}}{\partial x_i} \\ \left( \frac{\partial \bar{s}}{\partial t} \right)_{conv} = - \frac{1}{\rho_0} \sum_i \frac{\partial \rho_0 (\overline{u'_i s'})_{conv}}{\partial x_i} \\ \dots \\ \left( \frac{\partial \bar{s}}{\partial t} \right)_Q = \overline{Q_s} \end{array} \right. \quad 2.4$$

Onde os índices (*adv*), (*turb*) (*CLP*) e (*conv*) expressam respectivamente os processos de advecção na escala da grade, turbulência dentro da camada limite planetária (CLP) e transporte convectivo por nuvens rasas e profundas não resolvidas explicitamente.

A solução para a tendência da razão de mistura de um determinado composto é então obtida a partir da soma das soluções parciais do conjunto de equações 2.4, conforme a formula 2.5.

$$\left( \frac{\partial \bar{s}}{\partial t} \right) = \left( \frac{\partial \bar{s}}{\partial t} \right)_{adv} + \left( \frac{\partial \bar{s}}{\partial t} \right)_{CLP}^{turb} + \left( \frac{\partial \bar{s}}{\partial t} \right)_{conv} + \dots + \left( \frac{\partial \bar{s}}{\partial t} \right)_Q \quad 2.5$$

Uma vez obtida a tendência da razão de mistura, esta é atualizada através da equação 2.6:

$$\bar{s}(t + \Delta t) = \bar{s}(t) + \left( \frac{\partial \bar{s}}{\partial t} \right) \Delta t \quad 2.6$$

onde ( $\Delta t$ ) representa o intervalo de tempo da integração.

Um dos fatores que alteram a razão de mistura ( $\bar{s}$ ) é a deposição e, neste caso, a deposição de partículas vulcânicas. Devido à ação da gravidade, partículas suficientemente pesadas não se movem verticalmente com a mesma



velocidade das massas de ar, mas possuem uma velocidade de queda, conhecida como velocidade terminal. A velocidade terminal ( $V_{fall}$ ) de uma partícula considerando uma atmosfera em repouso é dada pela formula 2.7. A origem desta formula se encontra detalhado em Pruppacher (1997).

$$V_{fall} = \frac{2r^2(\rho_{part}-\rho_{air})gG_i}{9\eta_{air}} \quad (2.7)$$

Onde ( $r$ ) é o raio da partícula, ( $\rho_{part}$ ) e ( $\rho_{ar}$ ) são a densidade da partícula e do ar respectivamente, ( $g$ ) é aceleração da gravidade, ( $\eta_{ar}$ ) é a viscosidade dinâmica do ar (dependente da temperatura) e ( $G_i$ ) é um fator para corrigir os desvios do regime de Stokes, no qual o raio da partícula é muito maior que o livre caminho médio do ar<sup>1</sup>. Desta forma, quando partículas estão imersas em um fluido que possui velocidade vertical não nula, sua velocidade vertical efetiva ( $W_{ef}$ ) se dá por

$$w_{ef} = w_{ar} - V_{fall} \quad (2.8)$$

em que ( $w_{ar}$ ) é a velocidade vertical do ar.

No modelo BRAMS a deposição seca ocorre quando partícula atinge a superfície. Há também o processo de sedimentação úmida, este acontece quando a partícula se encontra com água precipitante, removendo a partícula da atmosfera e depositando-a na superfície abaixo, entretanto no presente trabalho a deposição úmida não foi considerada.

## 2.5. Estimativas de Emissão de Cinzas Vulcânicas

Com o intuito de minorar os prejuízos causados pelos vulcões, principalmente à aviação, a parametrização de emissões vulcânicas no âmbito de modelos de transporte atmosféricos vem sendo implementada em vários sistemas como no modelo NAME da Met Office do Reino Unido; BRAMS (FREITAS, 2009, LONGO, 2013) do Brasil; WRF-Chem (STUEFFER, 2013) PUFF; FALL3D da Espanha entre outros. A Figura 2.4 mostra o produto fornecido pelo Instituto de Geofísica da Universidade Fairbanks do Alasca. Este produto mostra os

---

<sup>1</sup> Livre caminho médio: Distância média percorrida por uma partícula até que esta se colida com outra partícula.

vulcões no mundo e a simulação da dispersão de cinzas vulcânicas utilizando o modelo PUFF.

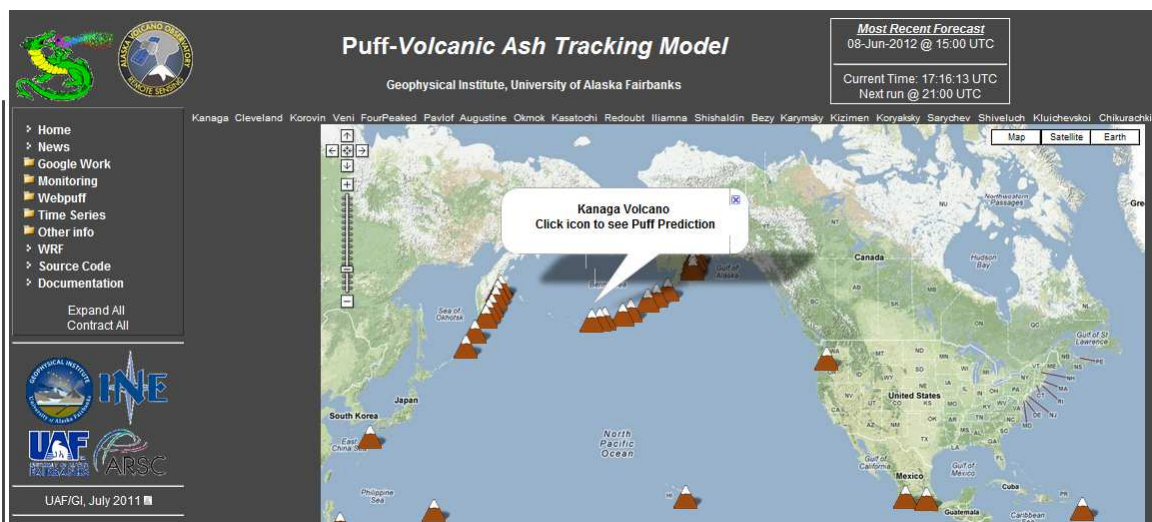


Figura 2.4 A modelagem da pluma vulcânica feita pelo modelo PUFF, fornecido pelo instituto de geofísica da universidade Fairbanks do Alasca.

Fonte: Geophysical Institute, University of Alaska Fairbanks (2012)

Conhecer ou estimar a taxa de emissão de cinzas ejetadas pelo vulcão é de grande importância, pois esta variável é fundamental para estimar a concentração de cinzas suspensas na atmosfera e a quantidade destas depositadas na superfície. A quantidade de cinzas depositadas é um dado importante para a agricultura e para a defesa civil, como já mencionado anteriormente, e estimar a densidade de cinzas suspensas na atmosfera é uma informação importante para a aviação. Porém, a taxa de emissão é uma variável de difícil medição, tornando-se necessário obtê-la através da correlação entre variáveis que são mais fáceis e rápidas de serem obtidas. Estudos mostraram que existe correlação entre a taxa de emissão e a altura de injeção, esta correlação já foi estudada por muitos autores, como por exemplo, no trabalho do Mastin et al. (2009); onde os autores colocam a correlação entre altura de injeção e taxa de emissão para muitos vulcões, demonstrado na Figura 2.5.

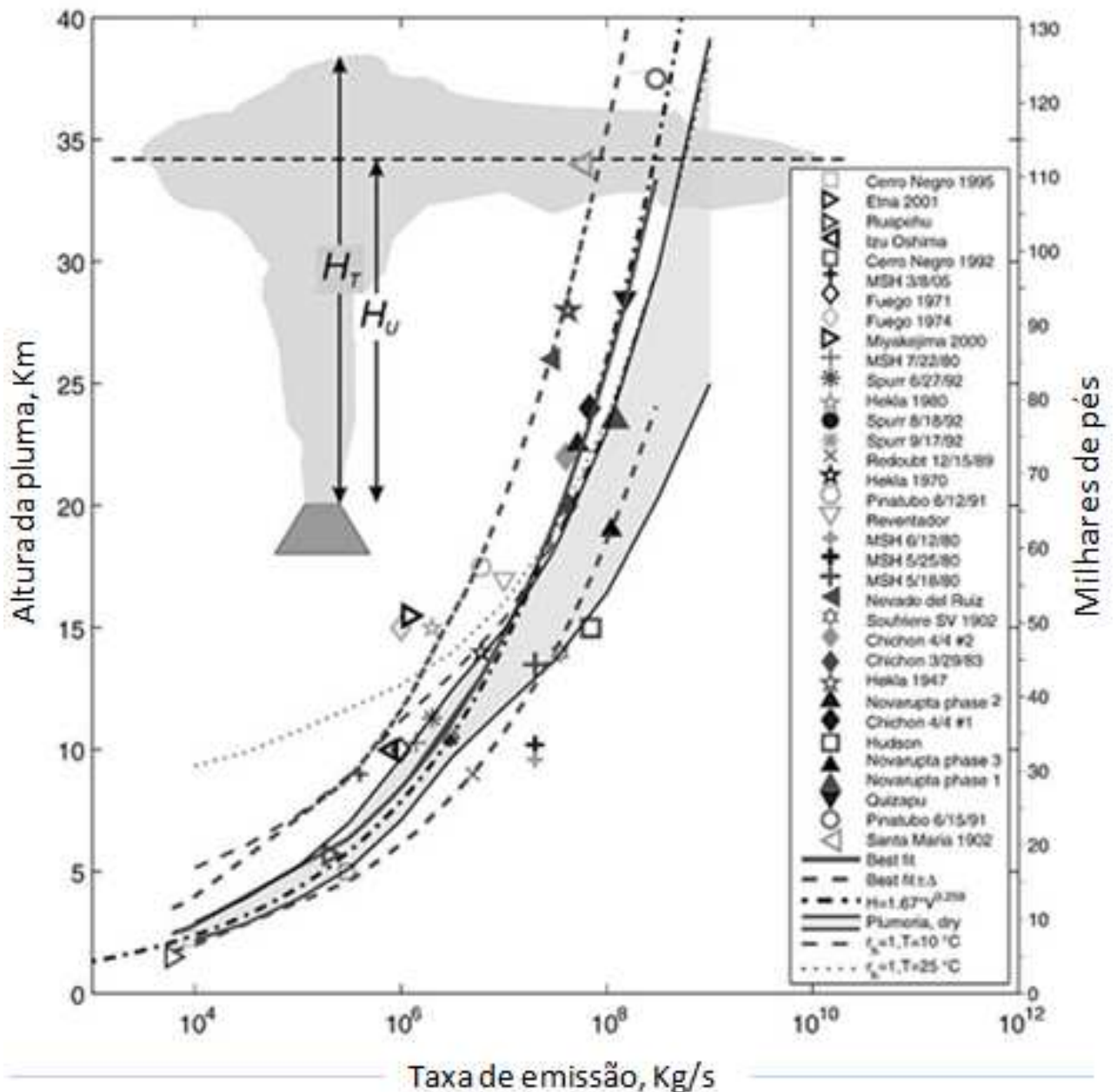


Figura 2.5 - Relação entre altura de injeção da pluma vulcânica em km por log da taxa de emissão em kg/s.

Fonte: Adaptado de Mastin (2009)

A correlação entre altura de injeção e taxa de emissão não é precisamente estabelecida, pois depende de muitos fatores, como o tipo de magma; quantidade de água presente no magma e quantidade de umidade específica presente na atmosfera, os quais contribuem ao aumento da altura de injeção devido a liberação de calor latente. Há dependência também da velocidade do vento, pois essa contribui com o entranhamento de ar mais frio no material ejetado, diminuindo a altura de injeção. No artigo do Bursik (2009) foi feito um

estudo sobre o efeito do entranhamento da coluna eruptiva devido à velocidade horizontal do vento; nele são utilizados os modelos numéricos ATHAM e BENT. A Figura 2.6 demonstra a altura de injeção da pluma vulcânica para duas diferentes velocidades horizontais, simulado pelo modelo numérico BENT; pode-se ver nesta figura que quanto maior a velocidade horizontal do vento maior o entranhamento, causando uma diminuição da altura de injeção. Nesta figura ao lado esquerdo é simulado uma atmosfera com vento horizontal de 3 m/s, pluma chega a 12.500 m de altura, no lado direito uma atmosfera com vento horizontal igual a 50 m/s a pluma chega a 5000 m de altura.

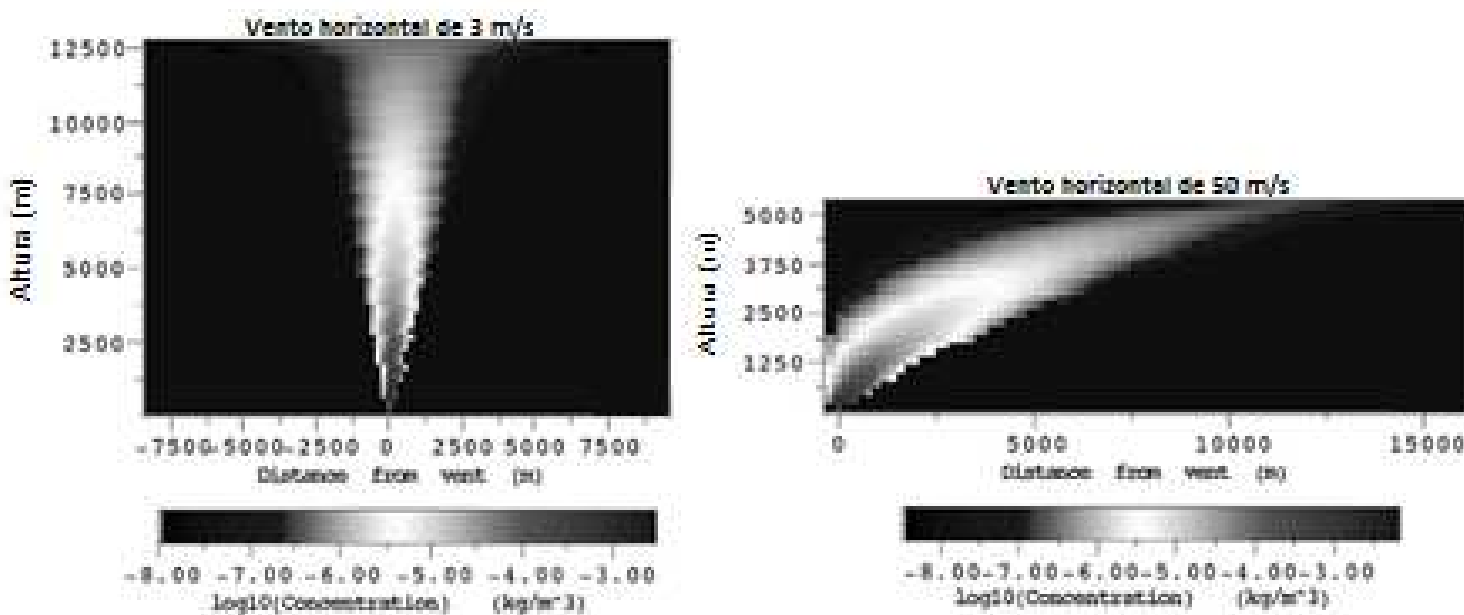


Figura 2.6- Correlação entre altura de injeção da pluma vulcânica e velocidade dos ventos simulados no modelo numérico BENT.

Fonte: Adaptado de Bursik (2009)

No artigo do Kaminski et al (2011), a correlação entre altura de injeção e taxa de emissão encontrada é separada em dois valores, um valor de correlação para alturas inferiores a 12 km e outro para alturas superiores a 12 km. Esta separação é fisicamente plausível, pois a estratosfera é uma região que exige maior energia para ocorrer movimento ascendente, pois é uma região de inversão térmica.

## **2.6. Conceitos básicos a cerca dos sensores que foram utilizados a bordo dos satélites.**

### **2.6.1. Satélite de orbita polar Aqua.**

Neste satélite há os instrumentos de medição MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) e OMI (Ozone Monitoring Instrument). O MODIS opera em 36 canais espectrais que variam do visível ao infravermelho para mais detalhes olhe os sites [http://aqua.nasa.gov/about/instrument\\_modis.php](http://aqua.nasa.gov/about/instrument_modis.php) e <http://www.sat.cnpm.embrapa.br/conteudo/aqua.htm>. O OMI detecta a radiação solar retroespalhada no canal do visível e ultravioleta próximo, sendo capaz de detectar a presença de ozônio (O<sub>3</sub>), dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>), dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), formaldeídos (OHCHO), nuvens e aerossóis.

### **2.6.2. Satélite geoestacionário Meteosat-8**

Este satélite possui o sensor SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager), gera imagens a cada 15 minutos com resolução de 3km (SHELDON; GÖRAN, 2007; SIMONE et al, 2011).

### **2.6.3. Satélite de orbita polar CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations)**

Este satélite possui o instrumento CALIOP (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization) que tem por finalidade fornecer o perfil vertical de partículas que se encontram na atmosfera. O CALIOP carrega um sensor ativo de detecção óptica chamado LIDAR (Light Detection And Ranging), é um sensor ativo, pois envia pulsos rápidos de laser através da atmosfera. O tempo entre o envio do sinal, pulso laser, e seu retorno fornece a distância da partícula em relação ao aparelho de medição. Este sensor consegue distinguir diferentes tipos de aerossóis devido à forma diferenciada de absorção e reflexão dos aerossóis para diferentes comprimentos de onda do laser, que no caso do CALIOP são utilizados os comprimentos de onda de 532 nm e 1064 nm.

Os dados fornecidos por este satélite estão mais detalhados no Apêndice C, Sensor LIDAR-CALIPSO.



### 3 ESTUDO DE CASO, VULCÃO PUYEHUE.

Em 04 de junho de 2011 por volta das 20:15 UTC entrou em erupção o vulcão Puyehue que se encontra localizado no Complexo Vulcânico Puyehue-Cordón Caulle (CCVC), na “Región de los rios” no Chile (Figura 3.1).

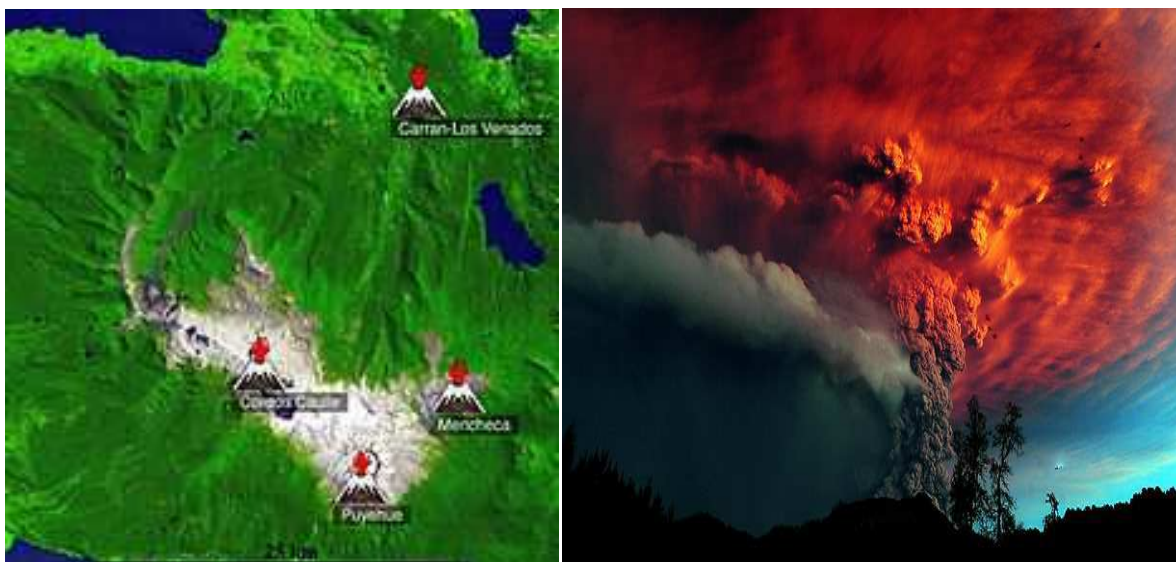


Figura 3.1 – Esquerda, imagem da região onde se encontra o vulcão Puyehue. Direita, foto da coluna eruptiva no dia em que o vulcão iniciou suas atividades eruptivas.

Fonte: Mapa: NASA Aster vulcão arquivos;

Foto: The atlats (2012)

O vulcão Puyehue é do tipo estratovulcão, sua elevação é de aproximadamente 2,236 m e sua proeminência é de aproximadamente 1800 m. Estratovulcão é um vulcão em formato de cone. Elevação é a altura em relação ao nível médio do mar e proeminência, altura em relação à superfície ao redor.

#### 3.1. Influência das condições sinóticas sobre a dispersão de cinzas na região

Em altos níveis, aproximadamente 200 hPa, sobre a região do complexo vulcânico do Puyehue se encontra a região dos jatos polar e subtropical. Estes jatos são fortes ventos de oeste que compõem as ondas de Rossby, estas ondas se encontram normalmente entre 30° a 60° de latitude e sua altitude em torno de 10 a 15 km, a altitude em que os jatos se encontram depende de sua latitude, quanto maior a latitude, ou seja, mais próximo dos polos, menor é a altitude dos jatos. Podemos ver na Figura 3.2 que as cinzas foram ejetadas até

13 km de altura em relação ao nível médio do mar, ou seja, foi ejetado até a altura dos jatos. A parte inferior desta figura é uma imagem feita utilizando dados do CALIPSO. A parte superior da Figura 3.2 é uma imagem noturna adquirida pelo sensor MODIS do satélite Aqua, a falsa cor é feita através da luz infravermelha observada. A imagem foi rotacionada de forma que o norte aponte para a direita.

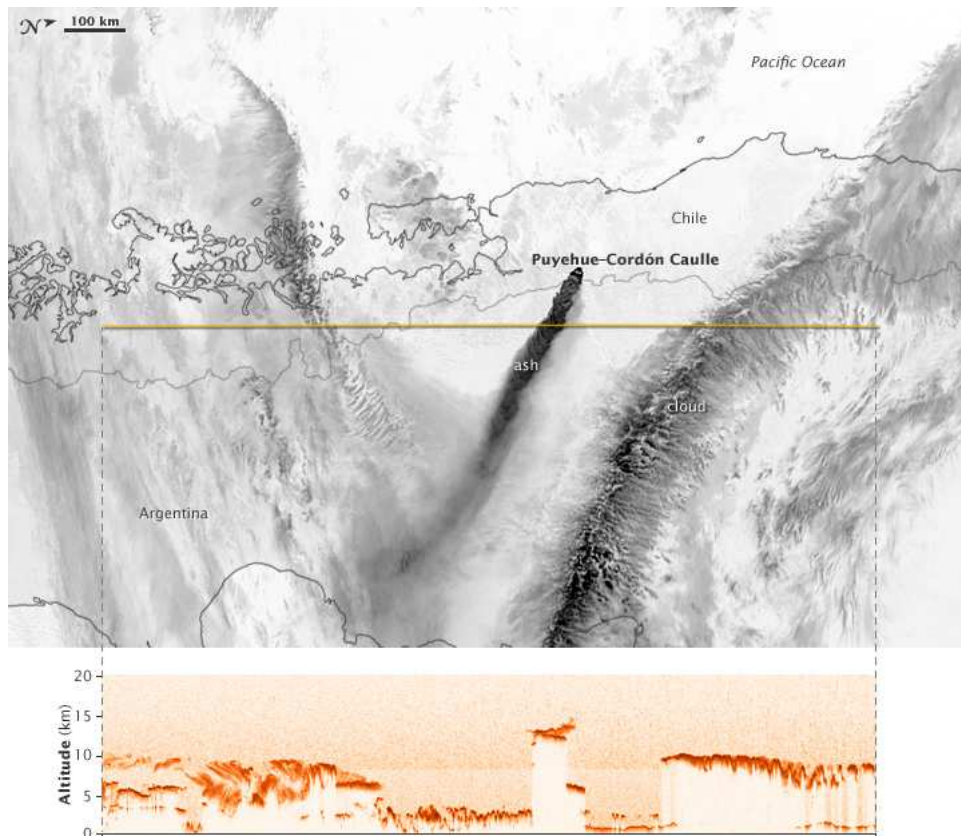


Figura 3.2 - A imagem do topo é uma imagem noturna, sensor MODIS, do satélite Aqua da NASA. A linha amarela atravessando a imagem do MODIS corresponde ao local onde foi feito o perfil vertical pelo CALIPSO, este perfil é mostrado na parte inferior desta figura.  
Fonte: NASA, Natural Hazards (2012)

Após as cinzas entrarem na região dos jatos, estas percorrem rapidamente grandes distâncias, como mostrado na Figura 3.3, onde cinzas vulcânicas do vulcão estudado deram a volta no mundo através das correntes de jatos. A Figura 3.3 representa um conjunto de imagens medidos pelo sensor OMI o qual se encontra a bordo do satélite Aura.





Figura 3.3- A imagem mostra a intensidade de partículas na coluna atmosfera. A série começa em 05/06/2011, um dia após o início da atividade eruptiva, e vai até o dia 13 do mesmo mês.

Fonte: NASA, Natural Hazards (2012)

No caso estudado um fator meteorológico que contribuiu para que as cinzas chegassem a latitudes menores como a latitude do Rio Grande do Sul, foram a presença das altas transientes sobre a região do vulcão chileno. As altas transientes contribuem para a injeção de ar frio nas latitudes mais baixas, como mostrado na Figura 3.4, referente ao dia 10/06/2011, um dos dias em que foram observadas cinzas vulcânicas no Estado do Rio Grande do Sul.

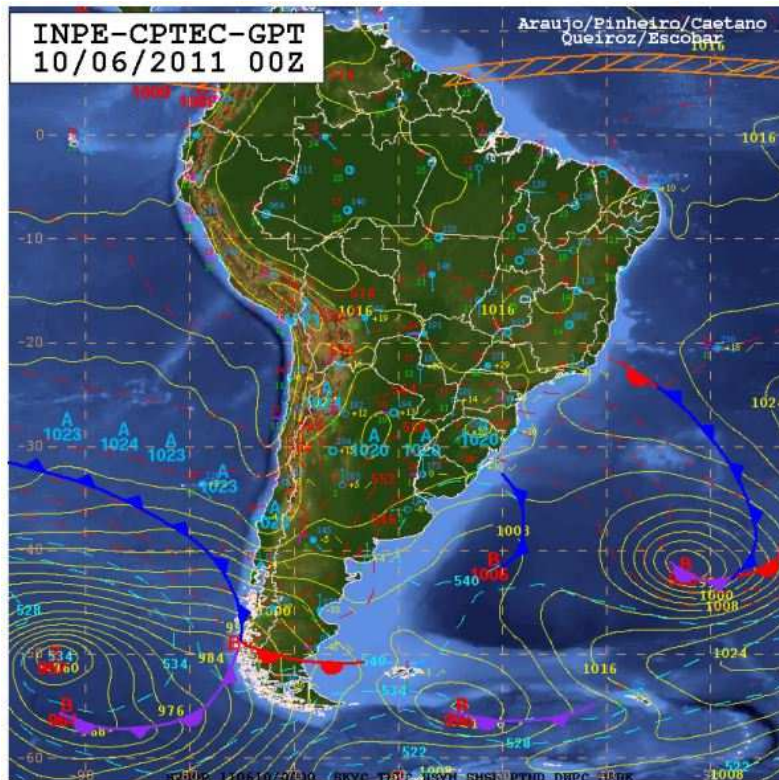


Figura 3.4 - Carta sinótica do CPTEC referente ao dia 10/06/2011. As altas transientes sobre a região do vulcão chileno contribuíram para levar as cinzas vulcânicas para latitudes mais baixas.  
 Fonte: Andrade e Souza (2011)

O vulcão estudado se encontra em uma região cuja direção do vento é predominantemente de oeste, tanto em baixos níveis como em altos níveis. Este predomínio é gerado pelo aquecimento diferencial da superfície da Terra somado ao efeito coriolis. As Figuras 3.5 e 3.6 mostram um estudo climatológico<sup>2</sup> feito pelo NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), nestas figuras é possível visualizar que há o predomínio de ventos de oeste sobre a região.

<sup>2</sup> Climatologia se refere à análise de 30 anos, porem no trabalho do NOAA, vide figuras 3.5 e 3.6 foram feitos uma média anual da velocidade do vento durante o período de 27 anos.

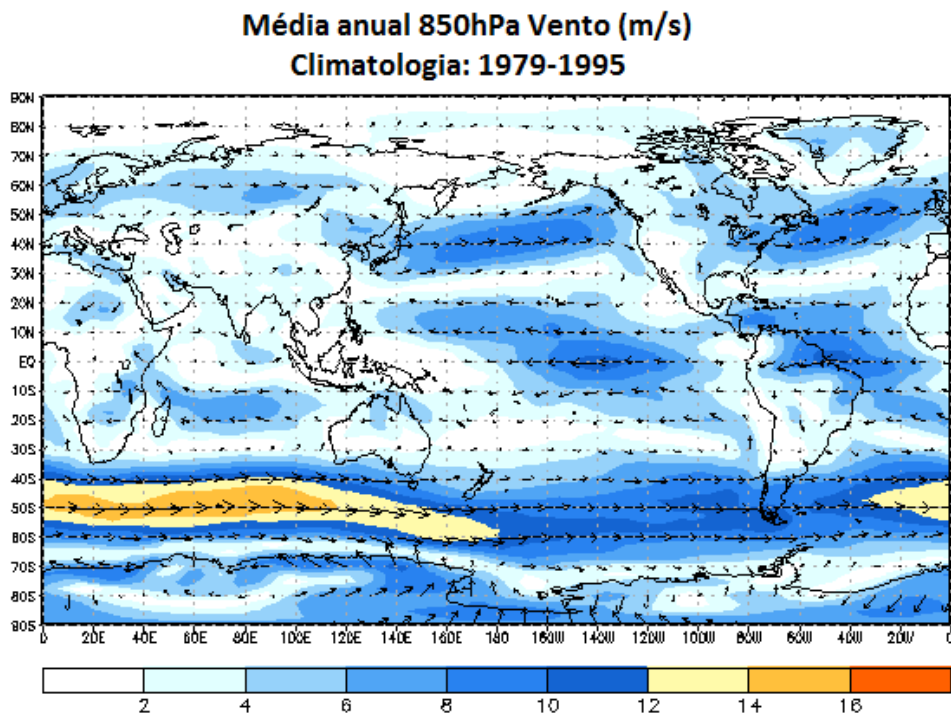


Figura 3.5: Média anual da direção e intensidade dos ventos para o período de 1979 até 1995 para a altitude de 850mb  
Fonte: Adaptado do NOAA (2013)

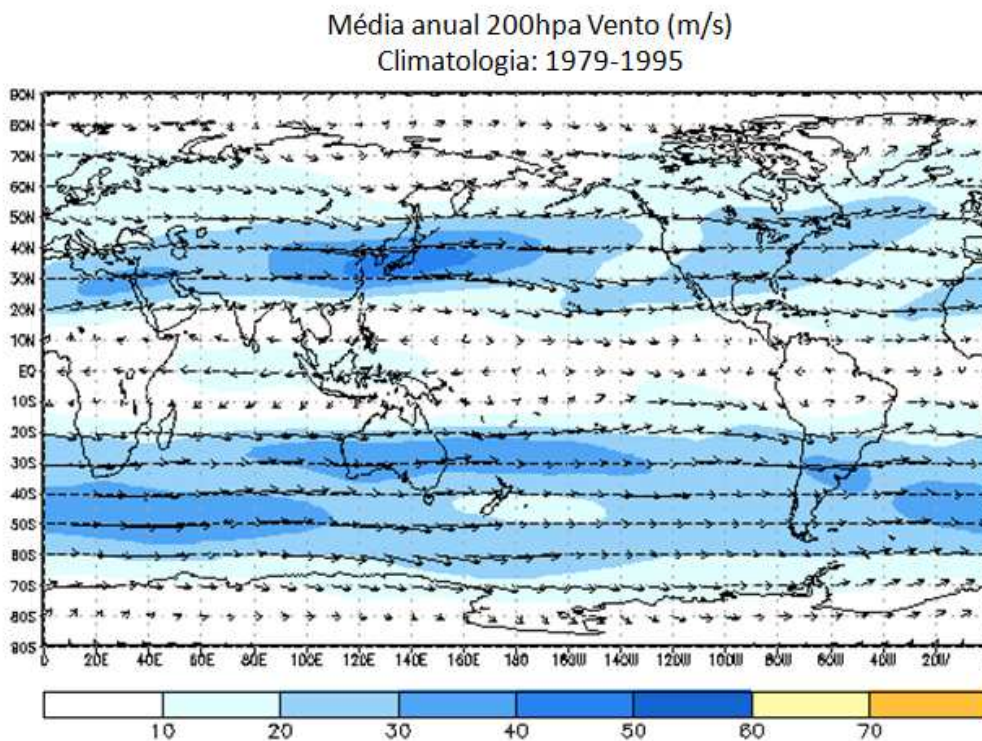


Figura 3.6: Média anual da direção e intensidade dos ventos para o período de 1979 até 1995 para a altitude de 200mb  
Fonte: Adaptado do NOAA (2013)

### **3.2. Impactos econômicos causados pelo vulcão Puyehue**

Durante a erupção do vulcão chileno Puyehue em 2011, a Argentina teve um prejuízo estimado de 50 milhões de pesos (EXAME, 2012) devido ao fechamento de muitos aeroportos por vários dias. As cinzas chegaram a afetar o sul do Brasil e alguns voos foram cancelados. Mais de 5 mil criadores de ovelhas na Argentina foram prejudicados nas províncias mais afetadas, tais como: Neuquén, Chubut e Río Negro. Estas regiões ficaram cobertas por aproximadamente 30 cm de cinzas (Figura 3.7) e houve também perdas econômicas devido à diminuição da quantidade de turistas.



Figura 3.7 - Vegetação da região de Neuquén coberta por cinzas vulcânicas, dia 16 de junho de 2011.

Fonte: Eluniversal (2012)

### **3.3. Dados obtidos em superfície:**

#### **3.3.1. A altura de injeção e dispersão da pluma vulcânica.**

O Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur (OVDAS), no Chile, fornece desde o dia 14/06/11 diariamente dados referente a altura de injeção da pluma vulcânica, dispersão da pluma ao longo do dia, extensão da pluma e dados sísmológicos. A altura de injeção é fornecida através de triangulação de câmeras digitais próximo ao vulcão, estas medem a altura de injeção relativa ao local de emissão da pluma. A dispersão e extensão da pluma são obtidas através de imagens de satélite; e os dados sísmológicos são obtidos através de

um sismógrafo. Pelo fato de não fornecer dados logo após o início das atividades vulcânicas, foi necessário utilizar os dados do instituto Smithsonian (SI) nos primeiros dias. O SI não fornece tantos detalhes em seus relatórios e estes são semanais, enquanto os relatórios do OVDAS são diários. Da conjuntura destas duas fontes de dados foram feitos os gráficos seguintes, Figuras 3.8 a 3.13. Os dados são referentes ao início da erupção, dia 04/06/11, até o dia 16/03/12, dia correspondente a ultima atualização do banco de dados.

Com o intuito de diminuir o custo computacional foram simulados somente os dois primeiros meses posteriores ao início das atividades eruptivas, ou seja, do dia 04/06/11 até o dia 04/08/11. As Figuras 3.9 e 3.11 são gráficos referentes ao período simulado. As fontes dos dados utilizados nas figuras 3.8 a 3.13 se encontram em OVIDAS (2012a) e Smithsonian (2012c).

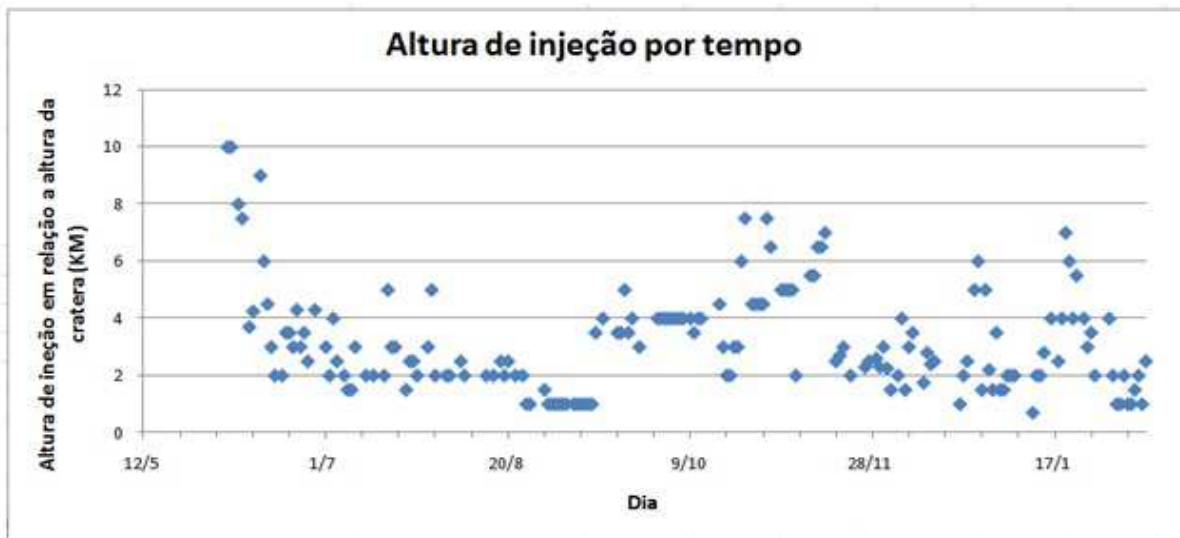


Figura 3.8 - Altura de injeção do vulcão Puyehue por tempo. Dados diários fornecidos pelo OVDAS e SI.

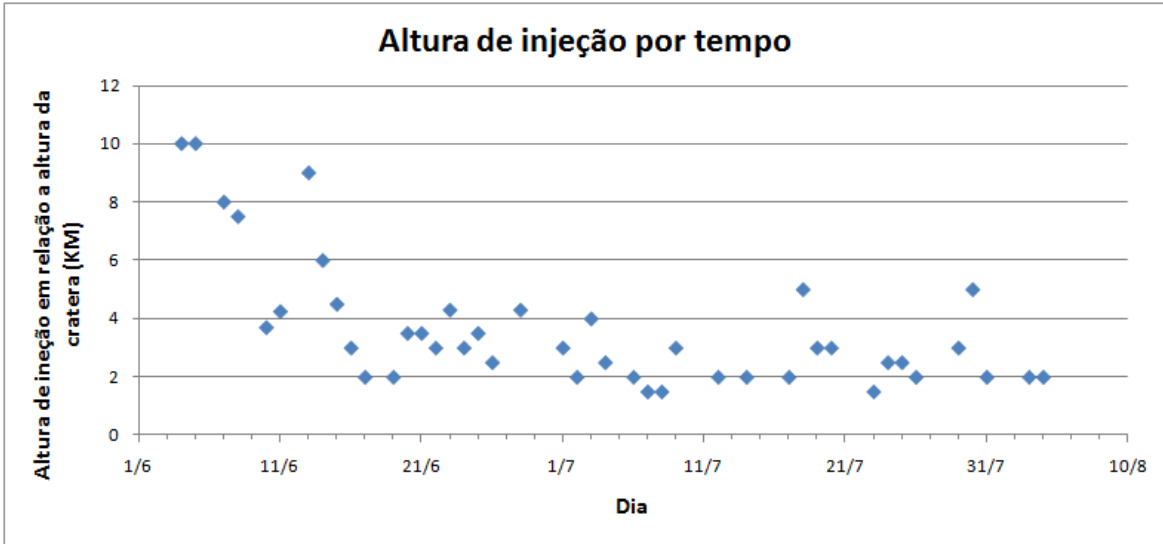


Figura 3.9 - Altura de injeção do vulcão Puyehue por tempo, apenas aos dois primeiros meses. Dados diários fornecidos pelo OVDAS e SI .

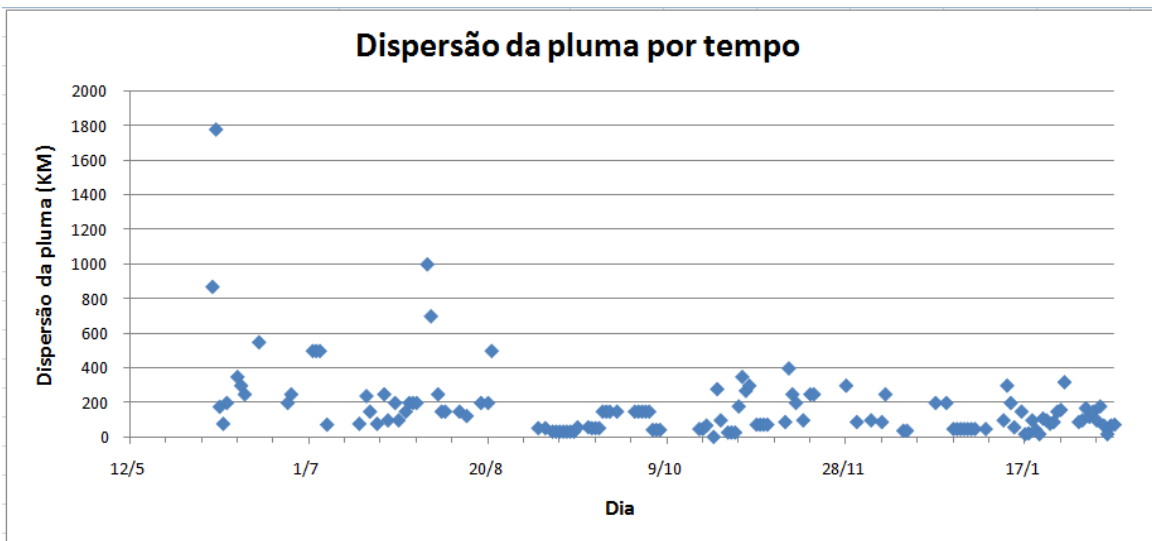


Figura 3.10 - Dispersão diária da pluma. Dados diários fornecidos pelo OVDAS e SI.



Figura 3.11 - Correlação entre altura de injeção e dispersão da pluma; dados diários fornecidos pelo OVDAS e SI.

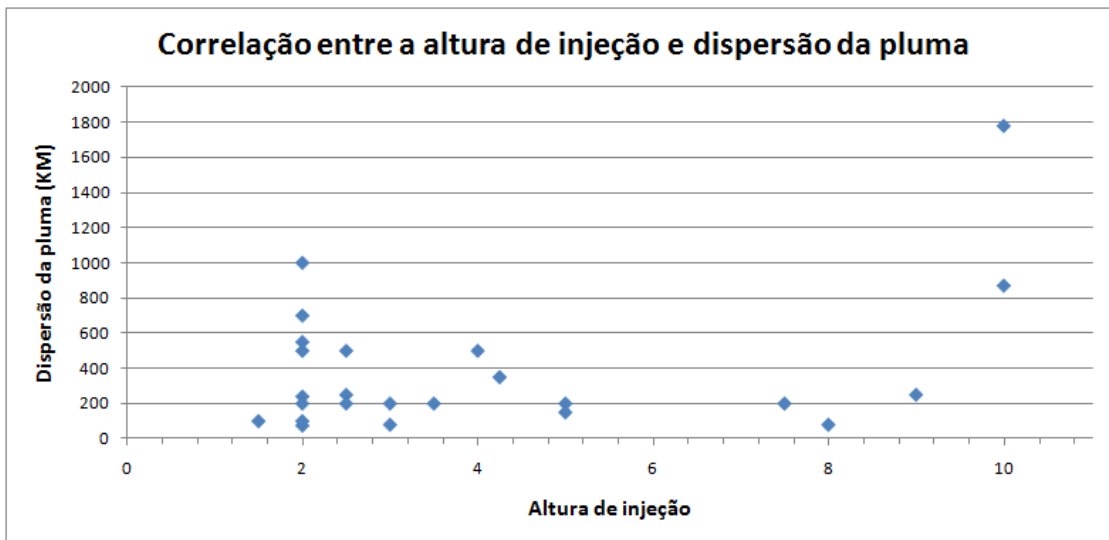


Figura 3.12 - Correlação entre altura de injeção e dispersão da pluma; apenas aos dois primeiros meses. Dados diários fornecidos pelo OVDAS e SI .

É de se esperar que quanto maior a altura de injeção, maior será a dispersão da pluma, porém os gráficos das Figuras 3.10 e 3.11 demonstram que esta correlação não é trivial, pois dependem muito de fatores meteorológicos, principalmente a direção e velocidade do vento; logo existe a necessidade de vincular a dispersão de cinzas vulcânicas com o modelo de transporte e meteorológico.

### 3.3.2. Dados sismológicos

As atividades vulcânicas produzem abalos sísmicos, quanto maior a atividade vulcânica espera-se que maior seja a atividade sismológica próxima ao vulcão. Utilizando os dados diários fornecidos pelo OVDAS, foi analisado se há correlação entre a altura de injeção e dados sismológicos, esta correlação é de muita valia para todos os modelos de dispersão de cinzas vulcânicas no mundo, pois os dados sobre altura de injeção não são possíveis de serem observados todos os dias devido a condições meteorológicas ou pelo fato dos equipamentos não se encontrarem posicionados e instalados; equipamentos como satélites, câmeras e aviões de pesquisa. Porém, após fazer muitas análises estatísticas e combinação entre variáveis, foi verificado não haver correlação nenhuma entre as variáveis sismológicas e altura de injeção. Uma possível explicação para isto é o fato de os dados serem diários, ou seja, possuírem baixa resolução temporal; além de não serem fornecidas as incertezas e as medidas possuem pouca acurácia. Tudo isto contribui para uma baixa qualidade dos dados, tornando-se impossível encontrar uma correlação satisfatória. Um exemplo é mostrado na Figura 3.13, a qual demonstra não haver correlação entre altura de injeção e média de abalos sísmicos por hora; esta é uma das dez correlações testadas utilizando dados sismológicos.

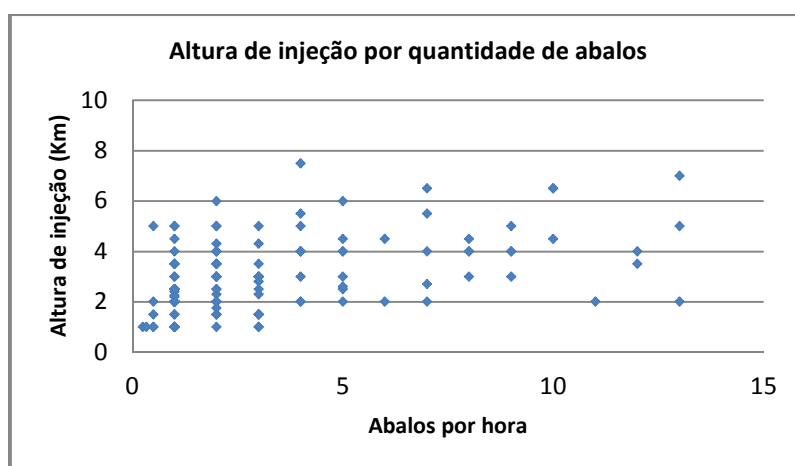


Figura 3.13 Altura de injeção por quantidade de abalos sísmicos por hora (média horária referente ao dia). Utilizando dados diários fornecidos pelo OVDAS.



### **3.3.3. Dados coletados pela FEPAM em Porto Alegre**

No dia 10 de junho de 2011, uma nuvem de cinzas finas atingiu Porto Alegre, Florianópolis e Curitiba. A nuvem ficou concentrada entre 6.000 e 7.600 metros de altitude (LIMA et al., 2011).

As cinzas que atingiram Porto Alegre foram coletadas por técnicos da Fundação Estadual de Proteção Ambiental do Estado do Rio Grande do Sul - FEPAM-RS, nos dias 09, 10, e 14 de junho em filtros acoplados a estações semiautomáticas de monitoramento da qualidade do ar. Estas estações estão situadas na Região Metropolitana de Porto Alegre.

Analises da composição química destas cinzas afirmam que elas são muito ricas em  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , por ser ricas em óxidos “leves” pode haver contribuição positiva na manutenção das cinzas em suspensão (LIMA et al., 2011). Conhecer a composição química e o formato das partículas é de grande importância para modelar a influência destes compostos sobre o balanço radiativo.

### **3.3.4. Cartografia das cinzas vulcânicas depositadas**

Fazendo um levantamento bibliográfico foram encontrados quatro cartografias de cinzas vulcânicas depositadas, relativo ao evento eruptivo estudado. Estas cartografias se encontram nas seguintes bibliografias “Morfologia e química de cinzas do vulcão Puyehue depositadas na região metropolitana de Porto Alegre em junho de 2011” Lima et al (2011); “La actividad el complejo volcánico Puyehue – Cordón Caulle y su impacto sobre el territorio de la república Argentina” Bermúdez (2011); “Estado de situación derivado de las cenizas del complejo volcánico Puyehue–Cordón Caulle en la provincia del Chubut y recomendaciones al productor”, informe elaborado pela Estación Experimental Agropecuaria Chubut y el SENASA (2011) ; “Monitoreo de La distribución de cenizas volcánicas en Río Negro y Neuquén: situación a los 6 meses de la erupción”, Gaitán et al (2011); “ Cartografía del área afectada por cenizas volcánicas en las provincias de Río Negro y Neuquén” Gaitán et al (2011).

### 3.3.5. Dados de propriedades ópticas de aerossóis via AERONET

O AErosol RObotic NETwork (AEORNET) consiste de uma rede global de fotômetros solares instalados em superfície e coordenada pela NASA com a finalidade de monitorar a abundância e as propriedades radiativas intrínsecas das partículas de aerossóis atmosféricos. A Figura 3.14 mostra o mapa das estações permanentes e temporárias da AERONET e um exemplar dos fotômetros operados pela rede.

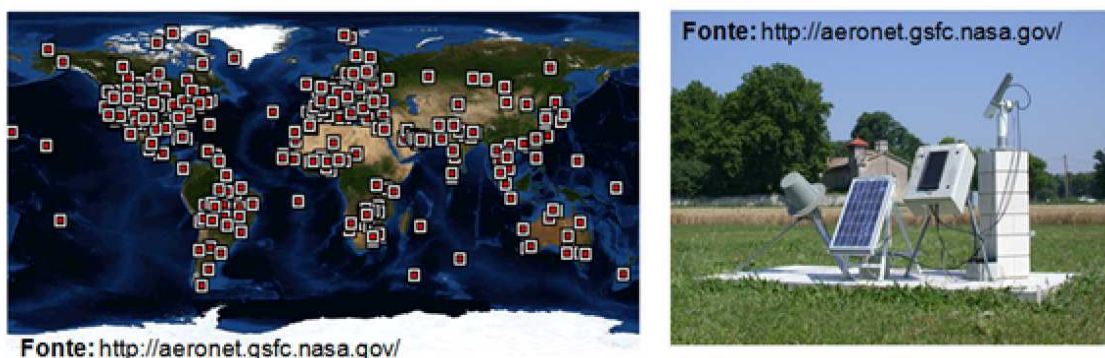


Figura 3.14: Localização geográfica das estações permanentes e temporárias da AERONET, a direita exemplar dos fotômetros solar operado pela rede.  
Fonte: Aerosol Robotc Net Work (AERONET) (2013)

A abundância das partículas presentes na coluna atmosférica é dada pela espessura óptica dos aerossóis (AOT, do termo inglês Aerosol Optical Thickness) uma medida baseada na atenuação da radiação espectral solar. As propriedades radiativas intrínsecas obtidas são as relacionadas ao tamanho do conjunto de partículas e à sua capacidade de espalhar e absorver a radiação. As propriedades intrínsecas são importantes na identificação da natureza das partículas, por exemplo, partículas oceânicas são em geral maiores e menos absorvedoras do que as partículas emitidas pelas queimadas, conseqüentemente, as primeiras apresentam em geral expoente de Angstrom menor e albedo simples maior.

Para o presente estudo, os dados das estações da AERONET na região sul da América do Sul, nomeadamente as de Trelew e Buenos Aires, foram utilizadas para analisar a presença e a influência das características ópticas de cinzas do

vulcão Chileno nas propriedades óptica-radiativas do aerossol atmosférico obtidas observadas pelos instrumentos das estações.

As duas variáveis de particular interesse são a espessura óptica dos aerossóis e o expoente de Angstrom. Além da caracterização da presença da cinza vulcânica, a série temporal da espessura óptica observada foi comparada com a série temporal da quantidade de cinzas integrada na coluna atmosférica simulada, visando avaliar o prognóstico do modelo no que diz respeito à distribuição espacial e temporal da pluma.

### **3.4. Dados obtidos por Satélite**

Esta seção trata da utilização dos dados obtidos pelos principais satélites utilizados.

#### **3.4.1. Utilização dos dados do Satélite Meteosat-8**

Sabendo-se que as cinzas vulcânicas possuem absorção de radiação infravermelha termal no comprimento de onda 10.8  $\mu\text{m}$  (IR10) maior do que 12  $\mu\text{m}$  (IR12), isto faz com que a temperatura de brilho observada no IR10 seja menor, ou seja, quando há presença de cinzas vulcânicas, a diferença com o IR12 torna-se negativa. Quanto mais negativa é esta diferença, maior a quantidade de cinzas detectadas (nota técnica; Costa, 2011).

Os comprimentos de onda IR10 e IR12 se localizam na região espectral da janela atmosférica, são transparentes à radiação infra-vermelha (IR) emitida pela superfície. Porém o IR12 é menos transparente do que o IR10, devido à absorção do vapor de água próximo à superfície, sendo assim a diferença entre IR10 e IR12 é geralmente positiva sob condições de céu claro, e nula na presença de nuvens opacas. No entanto, esta configuração se inverte na presença de cinzas vulcânicas, pois a absorção destas é maior em IR10 do que IR12 (Costa, 2012).

Utilizando o sensor SEVIRI a bordo do satélite Meteosat-8, no trabalho da Simone et al. (2012) é feita a diferença entre IR10 e IR12, IR10-IR12, com fundo IR10, gerando assim imagens a cada 15 minutos, vide Figuras 3.15 e 3.16 como exemplos.

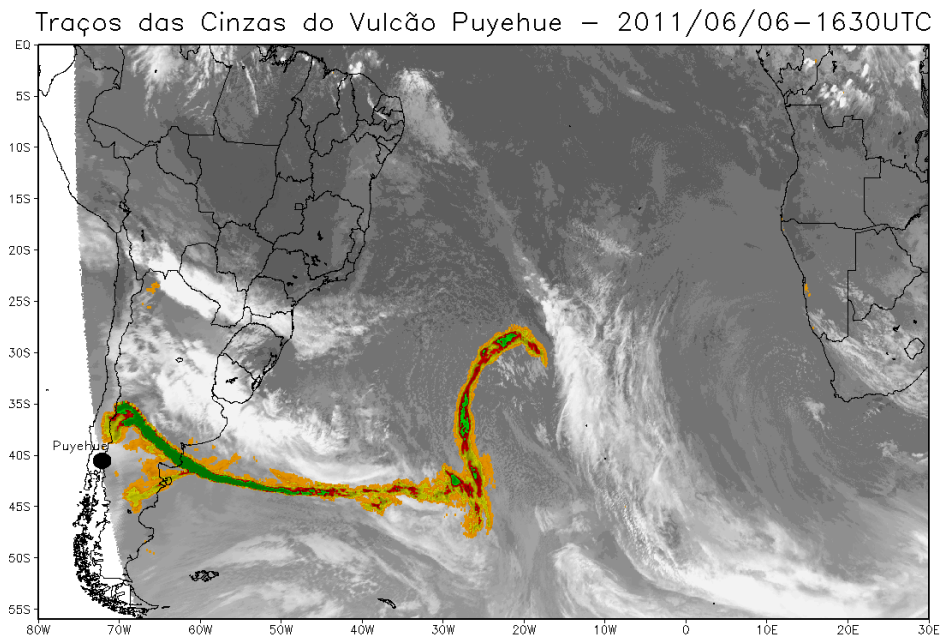


Figura 3.15: Composição de IR10 em cinza e IR10-IR12 em colorido. Dia 06 de junho de 2011, com esta técnica foi possível detectar cinzas. Imagem fornecida pelo DSA/INPE.

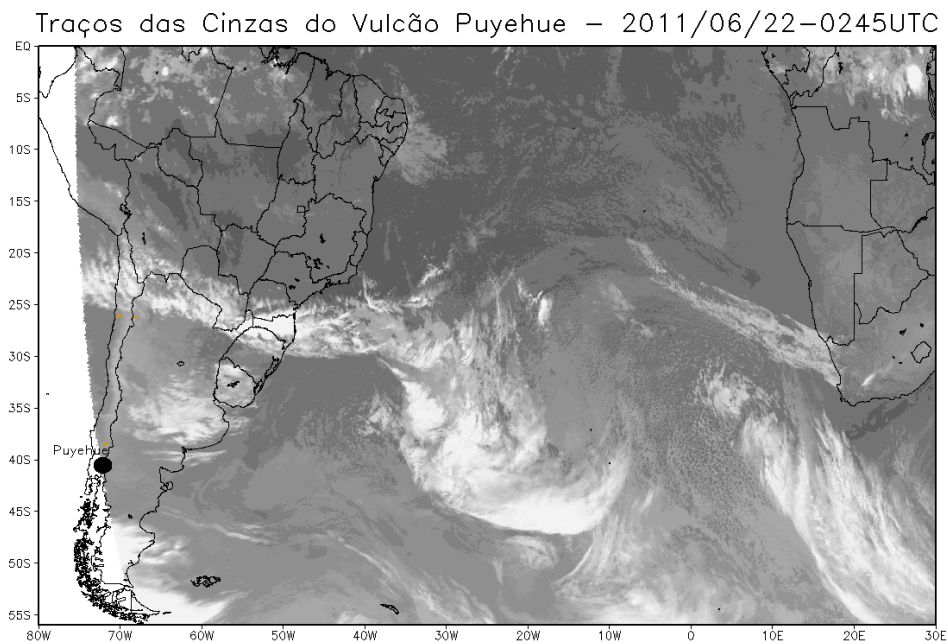


Figura 3.16: Composição de IR10 em cinza e IR10-IR12 em colorido. Dia 22 de junho de 2011, não foi possível detecta cinzas, pois estas ficaram abaixo das nuvens. Imagem fornecida pelo DSA/INPE.

### 3.4.2. Utilização dos dados do Satélite CALIPSO

Os dados do instrumento CALIOP que se encontra a bordo do satélite CALIPSO podem ser vistos através do programa HDFView fornecido pela NASA, e através do script chamado view\_HDF escrito em IDL (Interface Description Language) fornecido pela NASA.

Com o view\_HDF é possível formar figuras como exemplo Figuras 3.17 e 3.18. Com o mesmo programa é possível selecionar a região que deseja analisar, podendo fazer um zoom sobre a região desejada, veja como exemplo Figuras 3.19 e 3.20 que são um zoom sobre uma região de interesse.

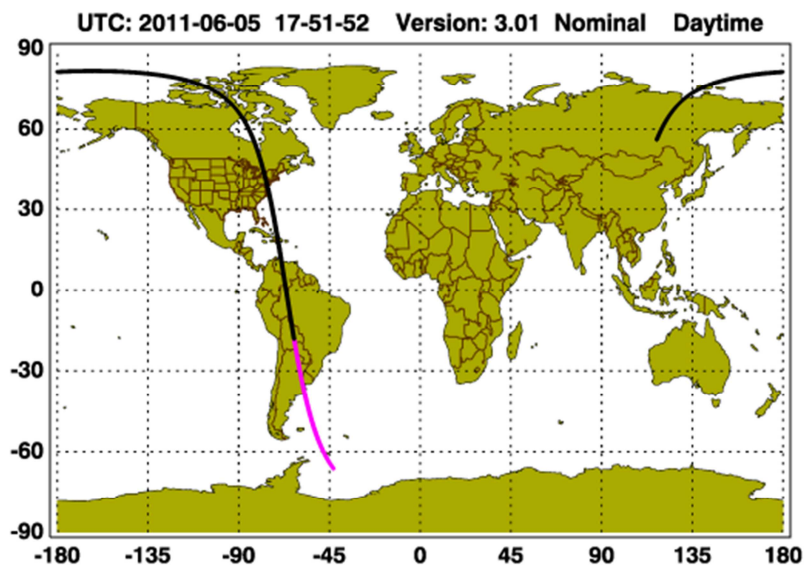


Figura 3.17: Percurso do satélite CALIPSO

Fonte: National Eeronautics and Space Administration (NASA)  
(2013c)

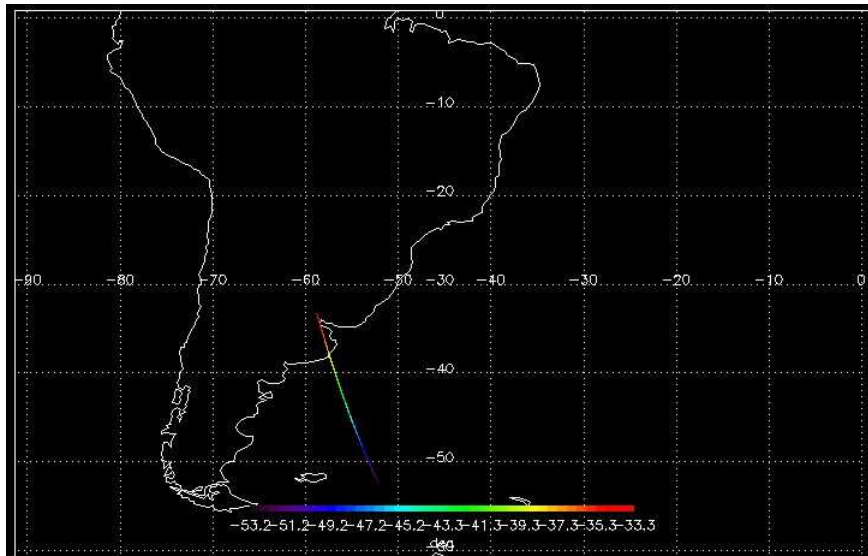


Figura 3.18: Trajeto selecionado através do programa view\_HDF. As cores mostram o valor de latitude da trajetória.

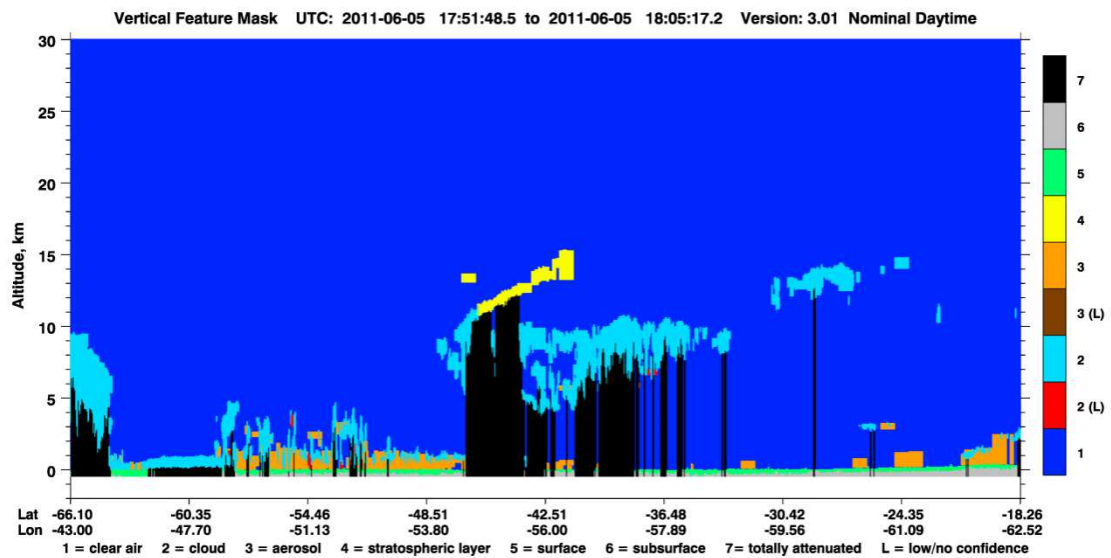


Figura 3.19: “Vertical Feature Mask”, fornece o perfil vertical de aerossóis atmosféricos, vide tabela C.3. O percurso que corresponde a esta imagem se encontra na figura 3.16.

Fonte: National Eeronautics and Space Administration (NASA) (2013c)

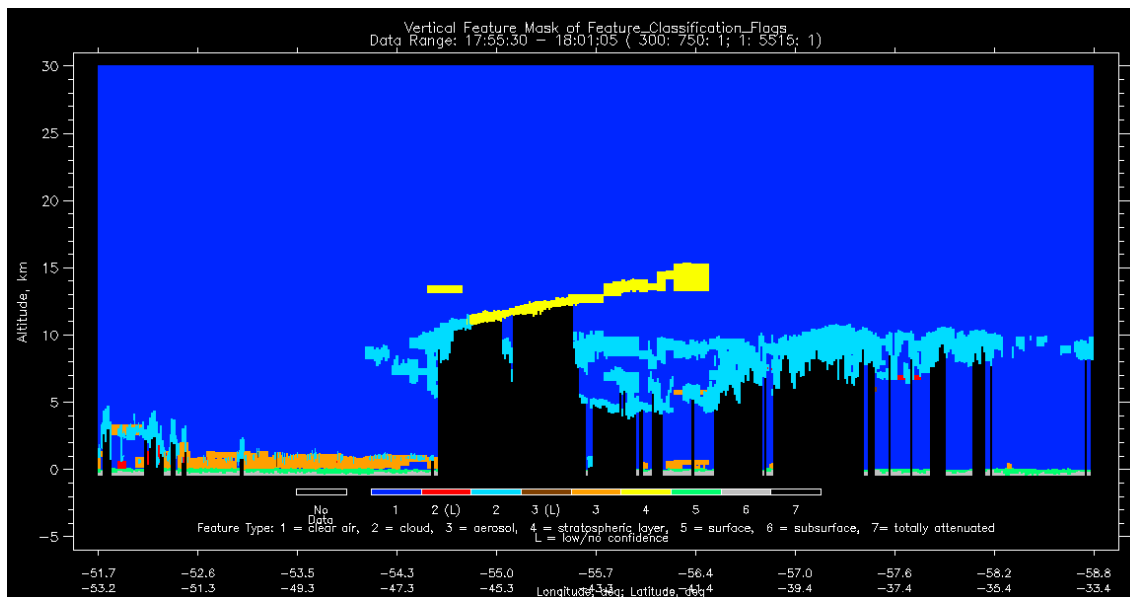


Figura 3.20: “Vertical Feature Mask” focalizado sobre a região de interesse. O percurso que corresponde a esta imagem se encontra na Figura 3.17.

Não é possível criar imagens de retroespalhamento utilizando o programa view\_HDF, porem fornece no site já citado imagens feitas automaticamente, [http://www-calipso.larc.nasa.gov/products/lidar/browse\\_images/production/](http://www-calipso.larc.nasa.gov/products/lidar/browse_images/production/), veja a Figura 4.21 como um exemplo.





## 4 METODOLOGIA E TESTES DE SENSIBILIDADE

A metodologia será dividida em três partes, a primeira parte será chamada de “estruturação”, a segunda de “dados observados” e a terceira “análise de sensibilidade”.

### 4.1. Estruturação

A estruturação consiste em desenvolver os componentes do modelo necessários para possibilitar a simulação numérica do transporte de cinzas vulcânicas.

#### 4.1.1. Diâmetro das cinzas vulcânicas ejetadas na atmosfera

É de suma importância conhecer o diâmetro das partículas ejetadas na atmosfera, pois esta altera sua velocidade terminal segundo à fórmula 2.7. Quanto maior a partícula maior sua velocidade terminal, fazendo com que as partículas maiores caiam primeiro, e as partículas menores permaneçam mais tempo suspensas na atmosfera, como representado na figura 4.1.

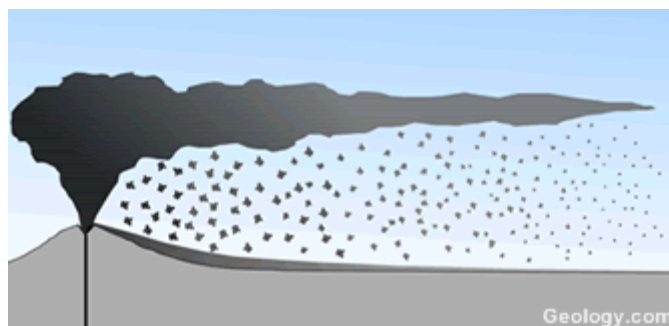


Figura 4.1 – Partículas maiores caem mais rapidamente que partículas menores.  
Fonte: Geology.com (2012).

A distribuição do tamanho das partículas ejetadas pelo vulcão está baseada no estudo feito sobre a erupção do vulcão Monte Santa Helena (MSH) ocorrida em 1980 (LIPMAN et al. 1982). Deste estudo foi elaborada a distribuição de tamanho das partículas ejetadas pelo vulcão conforme mostra a Tabela 4.1, os dados da Tabela 4.1 estão representados pelo histograma que se encontra na Figura 4.2. Os valores implementados no modelo referentes ao tamanho das partículas são os valores da quarta coluna da Tabela 4.1, raio médio da partícula, e na quinta coluna o nome dado à partícula (cinza vulcânica) emitida.

Tabela 4.1: Distribuição do tamanho das partículas.

Diâmetro da Partícula (mm)	Phi	Diâmetro médio da partícula (mm)	Raio médio da partícula (mm)	Nome da partícula	Porcentagem de Massa
2-1	-1→0	1,5	0,75	ash10	2
1-0,5	0→1	0,75	0,375	ash9	4
0,5-0,25	1→2	0,375	0,1875	ash8	11
0,25-0,125	2→3	0,1875	0,09375	ash7	9
0,125-0,0625	3→4	0,09375	0,04688	ash6	9
0,0625-0,0312	4→5	0,04685	0,02343	ash5	13
0,0312-0,0156	5→6	0,0234	0,0117	ash4	16
0,0156-0,0078	6→7	0,0117	0,00585	ash3	16
0,0078-0,0039	7→8	0,00585	0,00293	ash2	10
<0,0039	>8	0,00195	0,00098	ash1	10

Fonte: baseado no Lipman et al. (1982).

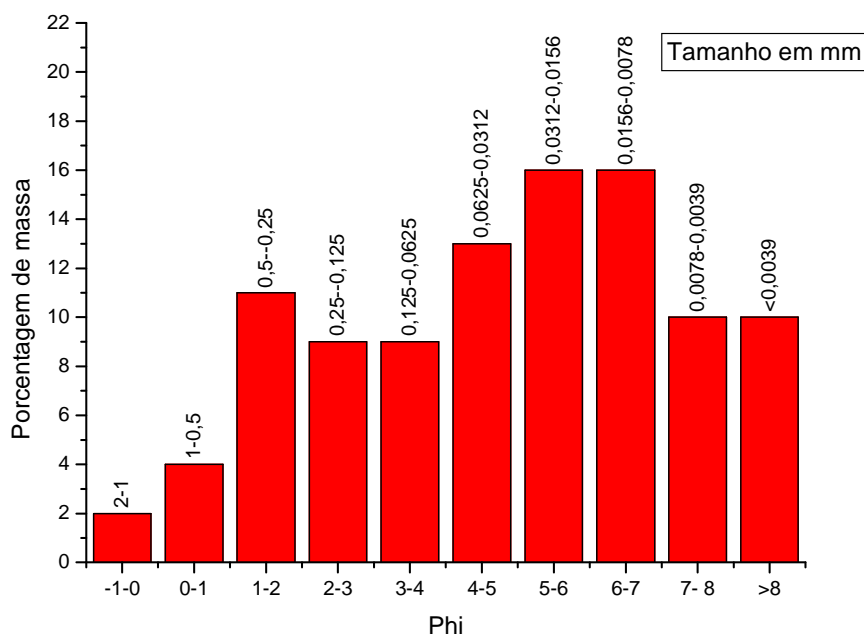


Figura 4.2: Histograma referente aos dados da tabela 4.1.

Outro fator que altera a velocidade terminal é o valor da densidade da partícula, ( $\rho_{part}$ ) da equação 2.7. Será considerado um único valor para a densidade de cinzas vulcânicas,  $2.500 \text{ kg/m}^3$ , cuja é a densidade do magma, baseado em Mastin et al., (2009).

#### 4.1.2. Correlação entre altura de injeção e taxa de emissão

Como mencionado no Capítulo 1.6, muitos autores mostraram existir uma correlação entre altura de injeção e a taxa de emissão das cinzas vulcânicas. Como a taxa de emissão é de difícil medição, pode-se utilizar esta correlação para estimar a massa eruptiva.

Foi feito um levantamento bibliográfico com o intuito de encontrar a melhor correlação. No artigo do Webster et al., (2012) são fornecidos três correlações, mostrado pela figura 4.3. A primeira correlação mostrada se refere à correlação desenvolvida pelo NOAA para o modelo VAFTAD (Volcanic Ash Forecast Transport And Dispersion) Dacre et al., (2011), a segunda obtida por Mastin et al., (2009) e a terceira pelo Sparks et al., (1997 section 5.2). No artigo de Mastin et al., (2009), foram fornecidas duas tabelas contendo dados de altura de injeção e sua respectiva taxa de emissão. As tabelas se encontram no artigo de Mastin et al., (2009), Tabelas 1 e 3. Com os dados da primeira tabela desse artigo, foi feito o gráfico que se encontra na Figura 4.4, e com os dados da terceira tabela foi feito o gráfico que se encontra na Figura 4.5. Ambos os gráficos (Figuras 4.4 e 4.5) foram feitos no programa Origin versão 6.1.

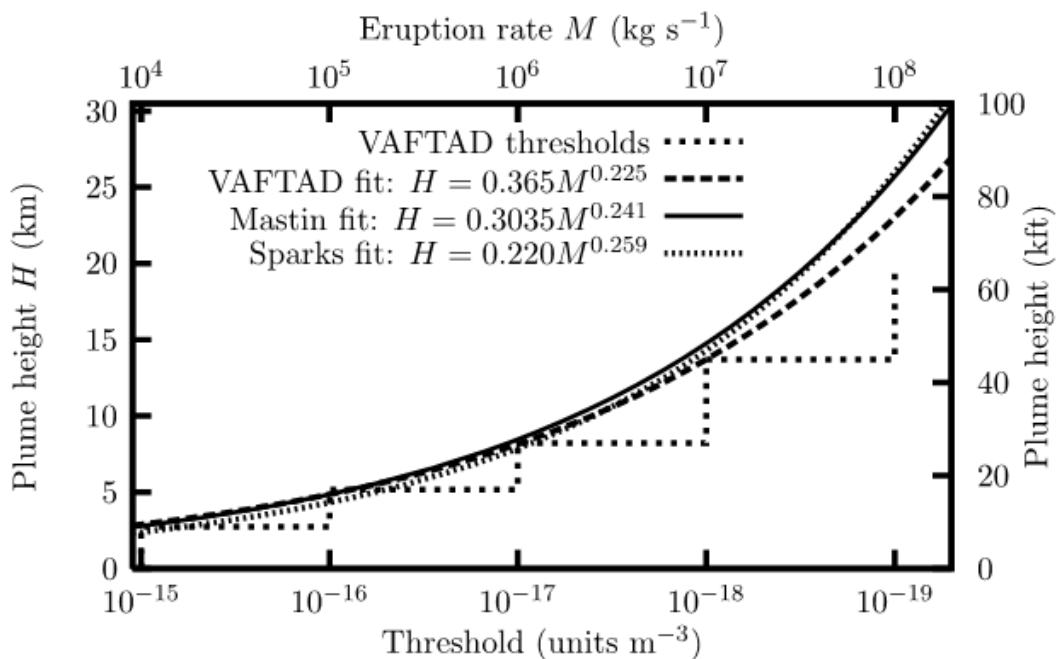


Figura 4.3: Correlação entre altura de injeção e taxa de emissão.  
 Fonte: Webster et al. (2012)

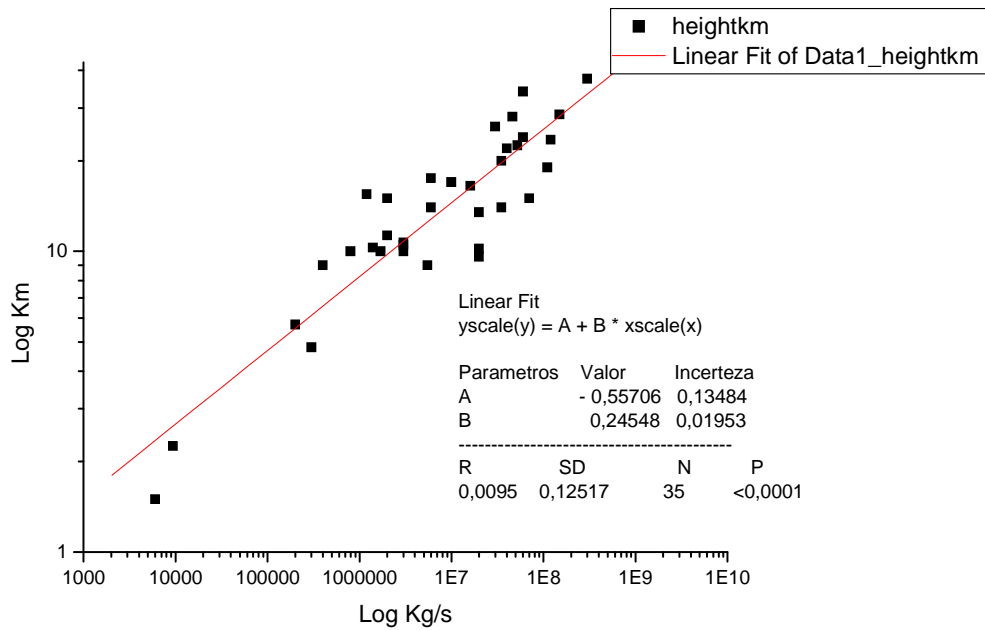


Figura 4.4: Correlação encontrada com os dados da tabela 1 que se encontram no artigo do Mastin et al (2009).

A regressão linear encontrada dos dados mostrados na Figura 4.4 foi:

$$y = -0,56(14) + 0,245(19)x \quad (4.1)$$

Para facilitar notações futuras a formula 4.1 será representada pela formula 4.2.

$$y = A + Bx \quad (4.2)$$

Porem como os eixos da figura 4.1 estão em escala logarítmica de base dez, é necessário fazer a seguinte transformação:

$$y = ax^b, \text{ em que } A = \log(a) \quad \text{e} \quad B = b \quad (4.3)$$

Aplicando a equação 4.3 na equação 4.2 obtemos a função de correlação entre altura de injeção e taxa de emissão fornecida pela Figura 4.4, equação 4.4.

$$H = 0,277M^{0,245} \quad (4.4)$$

Sendo H quilômetros e M quilos por segundos.

A incerteza do parâmetro (b) da equação 4.3 é igual a incerteza do (B) da equação 4.2, fornecida diretamente pelo gráfico, porém para encontrar a incerteza do parâmetro (a) é necessário fazer uma propagação de incertezas.

A propagação de incertezas para o parâmetro “a” se faz buscando a função de correlação entre o parâmetro (a) da equação 4.3 e o parâmetro (A) da equação 4.2., obtendo a equação 4.5.

$$a = 10^A \quad (4.5)$$

Na equação 4.5 o parâmetro (A) possui incerteza, logo para calcular a incerteza do o parâmetro (a) aplica-se a equação 4.6 (Vuolo J. h.,1999, cap 8).

$$\sigma_a^2 = \left( \frac{\partial f(A)}{\partial A} \right)^2 \sigma_A^2 \quad (4.6)$$

em que  $f(A) = 10^A \quad (4.7)$

Assim a incerteza do termo multiplicador para quando os eixos do gráfico estão em log é calculada pela equação 4.8.

$$\sigma_a^2 = (10^A * \ln 10)^2 \sigma_A^2 \quad (4.8)$$

Desta forma é possível obter a correlação entre altura de injeção e taxa de emissão, juntamente com sua incerteza. Com os parâmetros fornecidos pelos dados da Figura 4.4, foi obtido a correlação mostrada pela equação 4.9. Na qual o (H) representa a altura de injeção em km, o (M) a taxa de emissão em kg/s e o número entre parênteses representa a incerteza nas últimas casas decimais. Esta correlação representa o quarto valor do gráfico da Figura 4.6.

$$H=0,28(9)M^{0,245(19)} \quad (4.9)$$

Utilizando os dados da tabela três do artigo de Mastin et al (2009), foi feito o gráfico que se encontra na Figura 4.5.

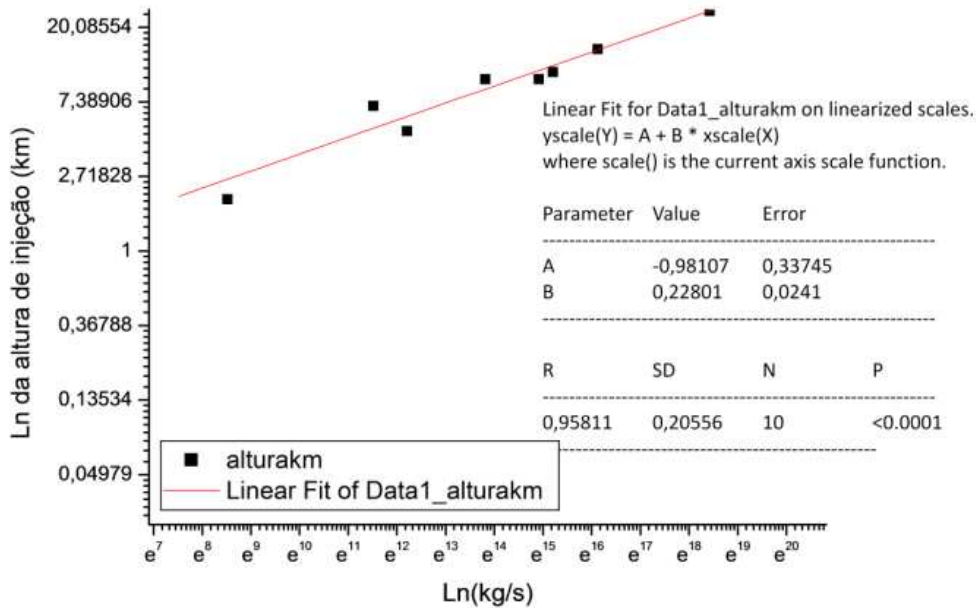


Figura 4.5: Correlação encontrada utilizando os dados da tabela 3 que se encontram no artigo do Mastin et al (2009).

A regressão linear encontrada na Figura 4.5 foi:

$$y = -0,98(33) + 0,228(24)x \quad (4.10)$$

Para facilitar notações futuras a formula 3.10 será representada pela formula 4.11

$$y = A + Bx \quad (4.11)$$

Porém como os eixos da Figura 3.5 estão em escala logarítmica natural (Ln), é necessário fazer a seguinte transformação:

$$y = ax^b, \text{ em que } A = \ln(a) \quad \text{e} \quad B = b \quad (4.12)$$

Aplicando a equação 4.12 na equação 4.11 obtemos a função de correlação entre altura de injeção e taxa de emissão fornecida pela Figura 4.5. Esta correlação está representada pela equação 4.13.

$$H = 0,375M^{0,228} \quad (4.13)$$

A incerteza do parâmetro (b) (equação 4.12) é igual a incerteza do (B) (equação 4.11), fornecida diretamente pelo gráfico da Figura 4.5. Porém para

encontrar a incerteza do parâmetro (a) é necessário fazer uma propagação de incertezas.

A propagação de incertezas para o parâmetro (a) se faz buscando a função de correlação entre o parâmetro (a) (equação 4.12) e o parâmetro (A) (equação 4.11). Esta correlação entre os parâmetros (a) e (A) é obtida através da equação 4.12, gerando a equação 4.14.

$$a = e^A \quad (4.14)$$

Para calcular a incerteza do o parâmetro (a) aplica-se a equação 15 (VUOLO 1999).

$$\sigma_a^2 = \left( \frac{\partial f(A)}{\partial A} \right)^2 \sigma_A^2 \quad (4.15)$$

em que  $f(A) = e^A \quad (4.16)$

Assim a incerteza do termo multiplicador no caso em que os eixos do gráfico estão em ln é calculada pela equação 4.17.

$$\sigma_a^2 = (e^A)^2 \sigma_A^2 \quad (4.17)$$

Desta forma é possível obter a correlação entre altura de injeção e taxa de emissão juntamente com sua incerteza. Utilizando os parâmetros fornecidos pela Figura 4.5 foi obtida a correlação representada pela equação 4.18. Esta correlação representa o quinto valor que se encontra no gráfico da Figura 3.6.

$$H=0,37(13)M^{0,228(24)} \quad (4.18)$$

Buscando uma função que melhor represente os vulcões foi feita uma média de todas as funções encontradas pelos diversos autores, isto é, foi feito a média de todos os parâmetros "a" (Multiplica) e "b" (Potência), e calculado o desvio padrão desses parâmetros, vide Figura 4.6. A incerteza desses parâmetros é representada pelo desvio padrão da média, pois como não é fornecida a incerteza de todos os autores não há como fazer uma média ponderada, em

outras palavras, não poderá levar em consideração as incertezas que foram encontradas, equações 4.9 e 4.18. A função média encontrada e sua respectiva incerteza estão representadas no gráfico da figura 4.6.

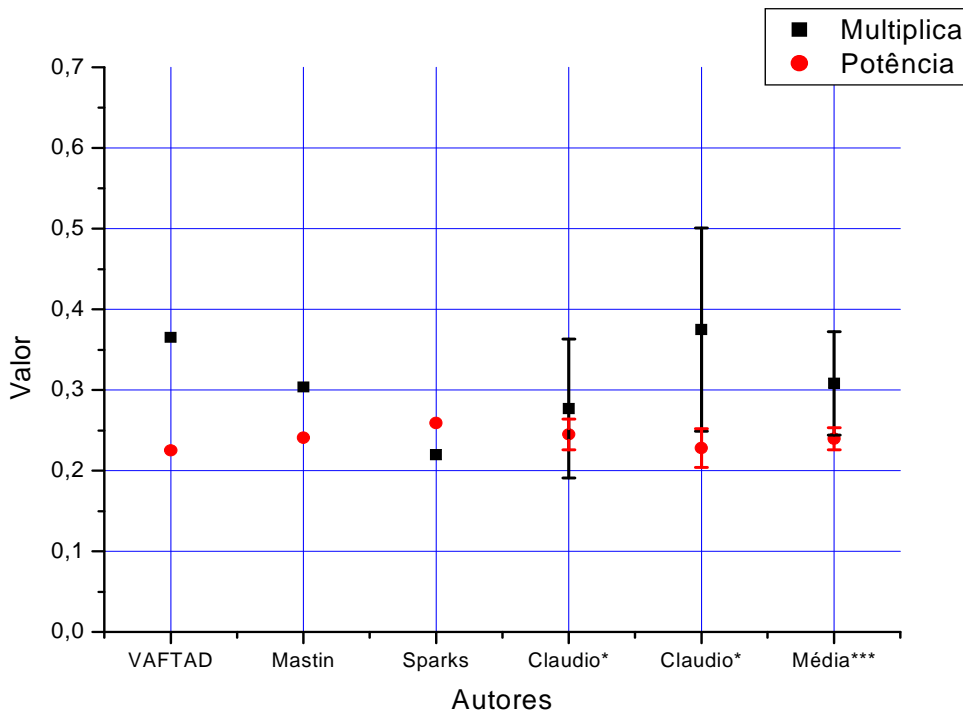


Figura 4.6: Média das correlações obtidas por vários autores sobre a altura de injeção e a taxa de emissão. Função obtida:  $H=0,31(6)M^{0,240(14)}$ . Os três primeiros dados são fornecidos no artigo do Webster et. al. (2012). \* Utilizando dados fornecidos no artigo do Mastin, et al. (2009). \*\*\* O valor da média é obtido através de uma média simples (pois não há a incerteza de todas as medidas) e sua incerteza é o desvio padrão.

Através da média das funções encontradas, vide Figura 4.6, a correlação entre altura de injeção (km) e taxa de emissão (kg/s) é fornecido pela equação 4.19.

$$H=0,31(6)M^{0,240(14)} \tag{4.19}$$

A incerteza da correlação encontrada se justifica devido a fatores como a variabilidade natural dos fenômenos, como já mencionados no capítulo 1.6, e, também, devido aos erros inerentes aos processos de medição dos dados.



Na prática, a altura de injeção não pode ser obtida no tempo real da ocorrência do fenômeno, pois os instrumentos de medição podem não estarem preparados. A medição da altura de injeção pode ser obtida através de: instrumentos a bordo de aeronaves, imagens de satélites e sensores em superfície, como câmaras fotográficas. Em função disto, há a necessidade de colocar no modelo uma altura de injeção inicial ('default') para, quando o vulcão entrar em erupção uma informação preliminar seja estabelecida. Esta informação preliminar é a base de dados do Mastin et al (2009), na qual a altura de injeção é definida em função de eventos eruptivos prévios ocorridos.

#### 4.1.3. Propagando a incerteza em relação à altura de emissão.

Através da correlação encontrada (equação 4.19), pode-se obter o quanto a incerteza destes parâmetros influencia na altura de injeção. Para facilitar notações posteriores, a equação 4.19 será escrita da seguinte maneira:

$$H = aM^b, \text{ para quaisquer (a) e (b) constantes} \quad (4.20)$$

Havendo incerteza nos termos (a) e (b), para calcular a incerteza relativa à altura aplica-se a formula 4.21. (vide Vuolo 1999, cap 8).

$$\sigma_H^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial a}\right)^2 \sigma_a^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial b}\right)^2 \sigma_b^2 \quad (4.21)$$

em que  $f = aM^b$

Logo a incerteza relativa à altura se dá pela formula 4.22.

$$\sigma_H^2 = (M^b)^2 \cdot \sigma_a^2 + (a \cdot M^b \cdot \ln(M) \cdot 1)^2 \cdot \sigma_b^2 \quad (4.22)$$

Segundo equação 4.19, os argumentos para a equação 4.22 são:

$$a = 0,31 \quad \sigma_a = 0,06$$

$$b = 0,240 \quad \sigma_b = 0,014$$

$$M = \left(\frac{H}{0,31}\right)^{\frac{1}{0,240}} \quad (4.23)$$

H = dado de entrada em km.

Aplicando esta correlação aos dados observados, Figura 3.7, obtêm-se a Figura 4.7.

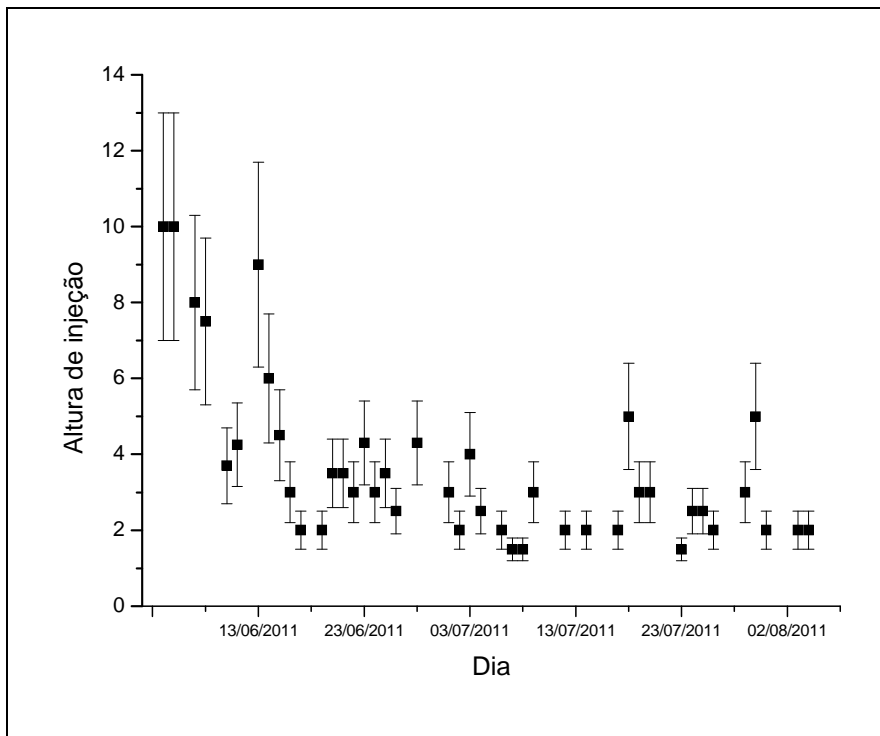


Figura 4.7: Altura de injeção (fornecido) com sua incerteza (equação 4.22), obtida pela correlação entre altura de injeção e taxa de emissão.

#### 4.1.4. Propagando a incerteza em relação à taxa de emissão.

Isolando a taxa de emissão, (M), da equação 4.20, equação que representa a correlação entre altura de injeção e taxa de emissão, obtêm-se a equação 4.23.

$$M = \left(\frac{H}{a}\right)^{\frac{1}{b}} \quad (4.23)$$

Substituindo:

$$\left(\frac{1}{a}\right)^{\frac{1}{b}} = c \quad \text{e} \quad \frac{1}{b} = d \quad (4.24)$$

Em que (a),(b),(c) e (d) são constantes positivas. Obtêm-se a equação 4.25.

$$M = c(H)^d \quad (4.25)$$

Aplicando a transformação mostrada pela equação 4.24 nos dados da Figura 4.6, obtém-se o gráfico da Figura 4.8, em que os valores encontrados são relativos ao formato da equação 4.25, em que, o termo (c) se refere ao termo Multiplicador e o termo (d) se refere ao termo Potência.

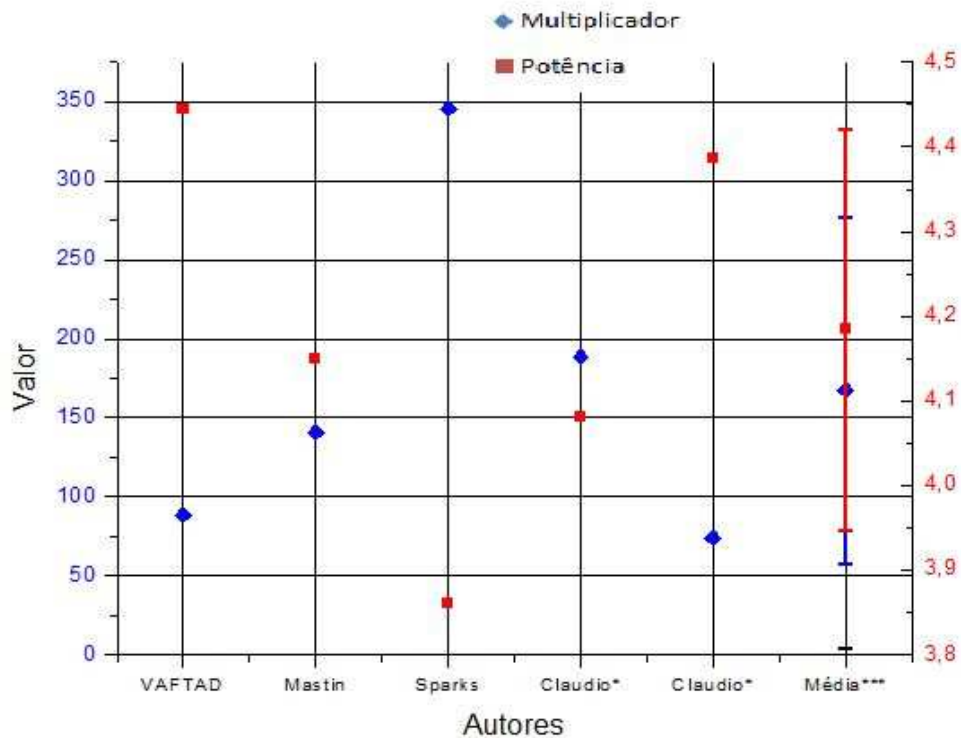


Figura 4.8: Média das correlações obtidas por vários autores sobre a taxa de emissão e altura de injeção. Função obtida:  $M=167(110)H^{4,18(24)}$ .  
 Os três primeiros dados são fornecidos no artigo do Webster et al. (2012).  
 \* Utilizando dados fornecidos no artigo do Mastin, et al. (2009).  
 \*\*\* O valor da média é obtido através de uma média simples (pois não há a incerteza de todas as medidas) e sua incerteza é o desvio padrão.

Através da média das funções encontradas, vide Figura 4.8, a correlação entre taxa de emissão (kg/s) e altura de injeção (km) é fornecido pela equação 4.26.

$$M=167(110).(H)^{4,18(24)} \tag{4.26}$$

Para obter a incerteza da taxa de emissão (M), é aplicado a formula 4.27, pois tanto o termo (c) como o (d) possuem incerteza (vide Vuolo J. h.,1999, cap 8).

$$\sigma_m^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial c}\right)^2 * \sigma_c^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial d}\right)^2 * \sigma_d^2 \tag{4.27}$$

Em que  $f = c(H)^d$  (4.28)

Logo, a incerteza relativa à taxa de emissão se dá pela formula 4.29.

$$\sigma_m^2 = (H^d)^2 \cdot \sigma_c^2 + ((c \cdot H)^d \cdot \ln(H \cdot c) \cdot 1)^2 \cdot \sigma_d^2 \quad (4.29)$$

Segundo a equação 4.26, os argumentos para a equação 4.29 são:

$$c = 167 \quad \sigma_c = 110$$

$$d = 4,18 \quad \sigma_d = 0,24$$

H = dado de entrada em Km.

Aplicando esta correlação aos dados observados, Figura 3.7, obtém-se a Figura 4.9, que mostra a taxa de emissão, calculada pela formula 4.26, com sua incerteza dada pela equação 4.29.

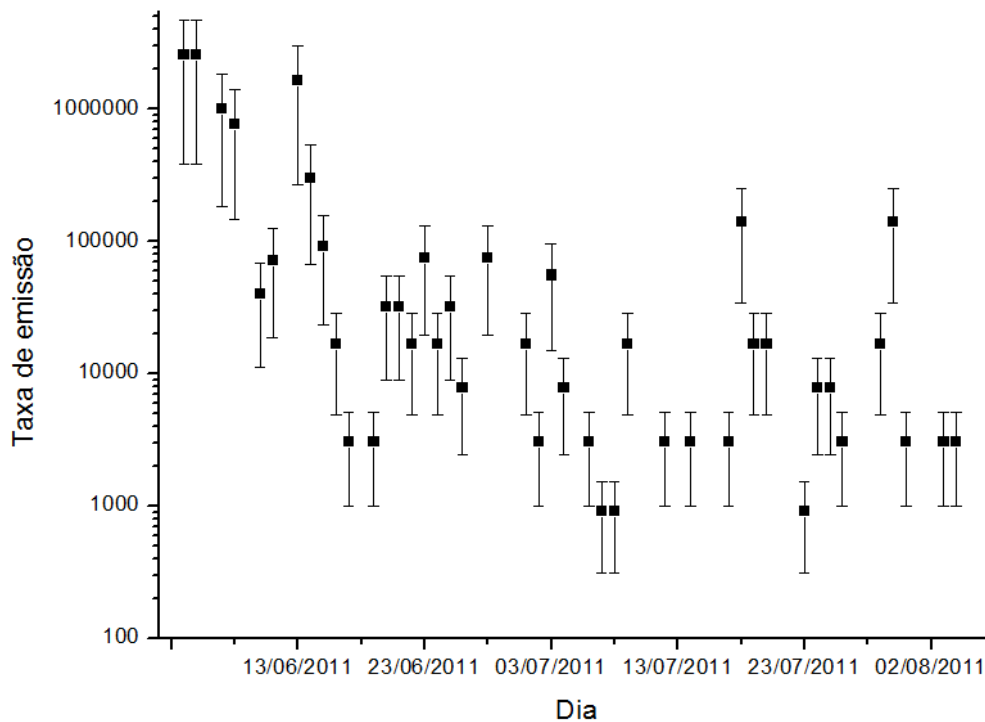


Figura 4.9: Taxa de emissão (equação 4.26) com sua incerteza (equação 4.29), obtida pela correlação entre altura de injeção e taxa de emissão.

Segundo Webster et al., (2012), uma pequena incerteza na altura de injeção representa uma grande incerteza na taxa de emissão, a Figura 4.9 vai de acordo com esta afirmação.

#### 4.1.5. Distribuição das partículas na coluna ejetada

Durante uma erupção vulcânica as partículas são injetadas da abertura vulcânica<sup>3</sup> até uma altura formando uma distribuição tipo cogumelo. No entanto, a maior parte é ejetada uma camada denominada camada de injeção, como pode ser observado nas Figuras já mencionadas 2.5 e 3.1. Sendo assim, Stuefer et al. (2012) propuseram uma distribuição das partículas emitidas pelo vulcão na seguinte forma: 25% da massa emitida é distribuída linearmente por toda a coluna abaixo da camada de injeção, e 75% da massa é distribuída na camada de injeção cujo formato é representado por uma parábola, como mostrado na Figura 4.10.

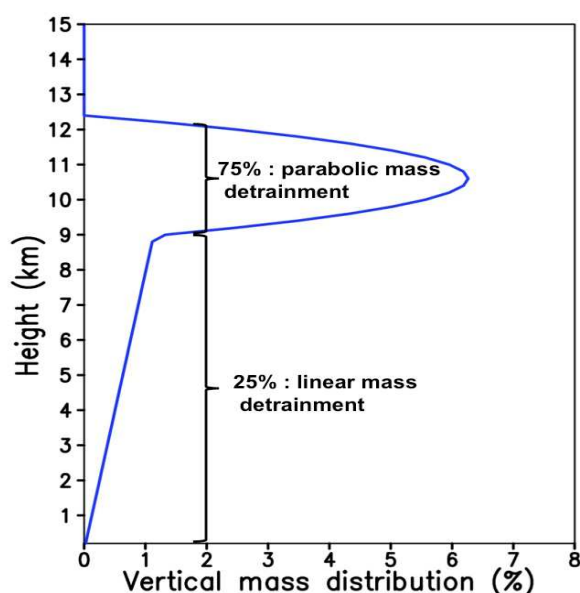


Figura 4.10: Exemplo de como seria a distribuição da massa de cinzas vulcânicas caso houvesse uma erupção com altura de injeção de 10,5km.

#### 4.2. Dados observados

Esta seção consiste em explicar onde foram utilizados os dados observados.

A altura de injeção utilizada para a modelagem da dispersão das cinzas vulcânicas será a altura fornecida pelo SI e OVDAS, conforme mostrado na Figura 3.7. Este é o único dado observacional de entrada no modelo em relação às atividades vulcânicas.

<sup>3</sup> Em inglês: volcanic vent

A concentração de cinzas próxima à superfície obtida pelo modelo será comparada com dados de concentração medidos em superfície, como no caso do FEPAM do Rio Grande do Sul, que forneceu a concentração de cinzas suspensas na atmosfera coletada por seus filtros.

A quantidade de cinzas depositadas segundo o modelo será comparado com cartografias de deposição de cinzas vulcânicas.

A dispersão de cinzas, assim como a altura da pluma, obtidas pelo modelo, serão comparadas com imagens de satélite.

### **4.3. Análise de sensibilidade**

#### **4.3.1. Introdução:**

Com o intuito de encontrar a melhor configuração do modelo BRAMS para a modelagem do transporte e sedimentação de cinzas vulcânicas foram feitas análises de sensibilidade e acurácia do modelo, modificando alguns parâmetros e configurações. Essas análises foram divididas em quatro partes, descritas como:

- a) Tipo de advecção.
- b) Fonte de condição de contorno (cc).
- c) Forma de assimilação dos dados de cc.
- d) Parametrização de altura de injeção (Ensemble).

O item “a” se refere à modelagem do transporte da pluma vulcânica testando diferentes esquemas de advecção entre a versão original do modelo BRAMS/RAMS e a nova, chamada monotônico, introduzida por Freitas et al. (2012), esta preserva a monotonicidade do campo que está sendo advectado. A nova versão de advecção minimiza os erros de dispersão do método de integração introduzindo pequeno aumento da difusão numérica, isto a faz ser mais apropriada para simular o transporte de material emitido por fontes extremamente concentradas (FREITAS et al. 2012).

O item “b” se refere em utilizar diferentes fontes de dados atmosféricos para uso como condição de contorno para a integração do modelo regional, as quais se dividem em:

i. Análises do CPTEC e reanálises do ECMWF

Neste caso as condições iniciais e de contorno serão providas pelas análises do CPTEC e reanálises do ECMWF. O objetivo será comparar a análise<sup>4</sup> do CPTEC com a reanálise do ECMWF, que constitui uma referência em termos de qualidade.

ii. Caso combinando análise + previsão: somente CPTEC.

Neste caso foi utilizada uma combinação de análises e previsões associadas para prover as condições de contorno para a simulação da dispersão da pluma. Se esse caso, previsão mais análise for compatível com CPTEC somente análise, torna-se possível implementar um produto operacional para o monitoramento das cinzas vulcânicas, produto de grande valia para a aviação. A previsão do modelo global é feita pelo modelo numérico “puro” sem influência de dados observados; os dados observados entram somente na inicialização deste.

O item “c” se refere a mudar a forma como os dados da região de contorno serão assimilados. Existem duas formas de ocorrer à assimilação: a assimilação “lateral” e a assimilação “lateral mais centro”. No caso do BRAMS a assimilação é feita via relaxação newtoniana (nudging). No tipo assimilação lateral o modelo regional sofre a influência do modelo global somente sobre as bordas laterais e no topo; no centro é integrado livremente (utilizando somente as equações governantes do modelo). No tipo de assimilação lateral mais centro os dados de análise ou previsão do modelo global influenciam tanto nas bordas como no centro do modelo regional, sendo que no centro a influência é tipicamente menor. A assimilação ocorre através da relaxação newtoniana dada pela equação 4.30.

$$N = \left( \frac{v_o - v}{\Delta T} \right) \quad (4.30)$$

---

<sup>4</sup> Análise é o modelo numérico com assimilação de dados observados

Em que ( $v_o$ ) é o valor do modelo global; ( $v$ ) o valor obtido pelo modelo regional; ( $\Delta T$ ) representa escala de tempo em que esta influência será aplicada, o valor de ( $\Delta T$ ), é inversamente proporcional a influência da assimilação no modelo. Esta influência altera a resposta final segundo à fórmula 4.31; em que (F) representa os termos de física do modelo, (D) os de dinâmica do modelo e (N) a contribuição da assimilação. O valor de ( $\Delta T$ ) para região lateral é 900 segundos, isto significa grande influência, e foram testados para a região interna os valores de 43.200 segundos, pouca influência, e 3.600 segundos, influência mediana.

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = F + D + N \quad (4.31)$$

O Item “d” refere-se à mudança dos valores da correlação “altura de injeção e taxa de emissão”. Pelo fato de haver incerteza nos parâmetros desta correlação, é possível fazer um ensemble da dispersão da pluma incluindo os valores máximo, médio e mínimo, estes valores são mostrados nas Figuras 4.7 e 4.8.

#### **4.3.2. Configurações do modelo:**

Este capítulo se trata a respeito das configurações técnicas utilizadas para fazer as simulações no modelo BRAMS.

A Tabela 4.2 mostra as principais configurações. “Resolução horizontal” é o espaçamento de grade.”Início” é o início da simulação. “Tempo de integração” é quanto tempo que será simulado, utilizando 5 km de resolução foi simulado 4 dias, ou seja 96 horas. “CHEMISTRY” igual a zero significa apenas transporte de aerossóis, não é incluso interações radiativas com o mesmo. “CCATT” modelo CCATT de química e aerossóis ligado. “Radiação” mecanismo de interação radiativa CARMA. “FRQANL” frequência de output das análises, 3 horas, ou seja, 10800 segundos.

Sobre as configurações de grade, “NNXP” quantidade de pontos de grade no eixo longitudinal. “NNYP” quantidade de pontos de grade no eixo latitudinal.



“NNZP” quantidade de pontos de grade na vertical. “NZG” quantidade de camadas de solo. “NZS” número máximo de camadas de neve.

Sobre a resolução vertical, “Resolução vertical” é a resolução vertical em metros sobre o primeiro nível do modelo, 100 metros. “Taxa de aumento da espessura” é a taxa de aumento da espessura, por exemplo o segundo nível vertical terá espessura de 110 metros. “Espessura máxima” o máximo de espessura em metros, após atingir este valor, não há mais aumento da espessura, os próximos níveis até a borda superior terão esta espessura.

Sobre o tempo de integração, “DTLONG” período em que os processos são atualizados dentro da grade. “NACOUST” números de períodos de integração para cada DTLONG. “CHEM\_TIMESTEC” frequência de integração química.

Sobre assimilação da região de contorno, “NUDLAT” número de pontos de grade na borda lateral. “TNUDLAT” frequência de assimilação na borda lateral em segundos. “TNUDTOP” frequência de assimilação na borda superior em segundos. “ZNUDTOP” a assimilação sobre a borda superior começa nesta altura e vai até o topo.

Sobre as configurações que variaram, “ADVMNT” é o processo de advecção, monotônico ou original. “TNUDCENT” é a frequência de assimilação no centro em segundos. “IAPR” é a região de contorno a ser assimilada.

Tabela 4.2: Configurações técnicas das simulações.

<b>Configurações</b>		
Resolução horizontal	30 km	5 km
Início	04 de jun de 2011 às 0 UTC	04 de jun de 2011 às 0 UTC
Tempo de integração (horas)	varia	96
CHEMISTRY	0	0
CCATT	ligado	ligado
conceção profunda e rasa	ligado	ligado
Radiação	CARMA	CARMA
FRQANL (segundos)	10800	10800
<b>Configurações da grade</b>		
Centro da grade	latitude -45; longitude -30	latitude -40; longitude -65
NNXP	444	660
NNYP	222	440
NNZP	48	48
NZG	7	7
NZS	1	1
<b>Resolução vertical</b>		
Resolução vertical (metros)	100	100
Taxa de aumento da espessura	1,1	1,1
espessura máxima (metros)	500	500
<b>Tempo de integração</b>		
DTLONG	20	4
NACoust	4	2
CHEM_Timestep	20	4
<b>Assimilação da região de contorno</b>		
NUDLAT	25	25
TNUDLAT (segundos)	900	900
TNUDTOP (segundos)	10800	10800
ZNUDTOP (metros)	15000	15000
<b>Configurações que variaram</b>		
ADVMNT	varia	varia
TNUDCENT (segundos)	varia	43200
IAPR	varia	análise CPTEC

#### 4.3.3. Sensibilidade ao esquema de advecção:

Com o intuito de verificar qual o melhor tipo de advecção para transporte de emissões vulcânicas, foram analisadas duas frentes: Primeira, encontrar oscilações numéricas espúrias geradas pelo processo de advecção de campo de massa com grandes gradientes. Segunda, comparar com dados observados.

Para encontrar as oscilações numéricas espúrias, temos como referência Freitas et al. (2012), nela podemos observar três formas de encontrar estas oscilações. São elas:

- 1ª Fortes oscilações próximo a grandes emissões, vide Figuras 16 e 17 de Freitas et. al. (2012).
- 2º Queda do valor de concentração próximo a um pico. Vide Figura 8 de Freitas et. al. (2012) e Figura 4.28 deste trabalho como exemplo.
- 3º Oscilações na vertical, Vide Figura 12 do Freitas et al. (2012) e Figuras 4.9 e 4.10 deste trabalho como exemplo.

Foram feitas duas rodadas do modelo BRAMS com 30 km de resolução horizontal, para o período de 04/06/11 até 19/06/11; uma com advecção monotônica (ADVMNT ON ou apenas ON) e a outra com a advecção original, não monotônica (ADVMNT OFF ou apenas OFF). Nestas simulações foram analisados a advecção de razão de mistura de cinzas no campo horizontal, pois quanto maior a advecção, maior a possibilidade de ocorrer oscilações espúrias. A forma como é calculada a advecção horizontal no programa computacional GrADS se encontra no Apêndice A.

Ainda com o intuito de facilitar a observação de oscilações espúrias foi retirada do modelo a função “noneg”, esta tem por finalidade transformar todo valor de concentração negativa em um valor nulo, pois oscilações numéricas espúrias podem gerar concentrações negativas. Então foram feitas mais duas simulações, com as seguintes configurações: resolução 30 km, akmin 1, assimilação no centro de 43200s, período simulado de 04/06/11 até 19/06/11, sendo uma simulação com advecção ON e outra OFF. Akmin é um parâmetro que modula a intensidade da difusão numérica horizontal para propiciar maior estabilidade na integração do modelo, seu valor padrão é um, quanto maior o valor do akmin maior a difusão horizontal, e menor o ruído do modelo, para mais informações veja o apêndice B.

Mesmo após retirar o “noneg”, não foi possível encontrar as oscilações numéricas espúrias, próximo a grandes emissões, como exemplo a figura 4.11, a qual mostra que não foram geradas oscilações espúrias próximo à fonte

emissora, mesmo havendo valores intensos de advecção, os valores de advecção estão representados na Figura 4.12. O trajeto denominado “A” é o trajeto pelo qual foi analisada a concentração, Figura 4.13; o trajeto denominado “B” é o trajeto pelo qual foi feito o perfil vertical, Figura 4.14.

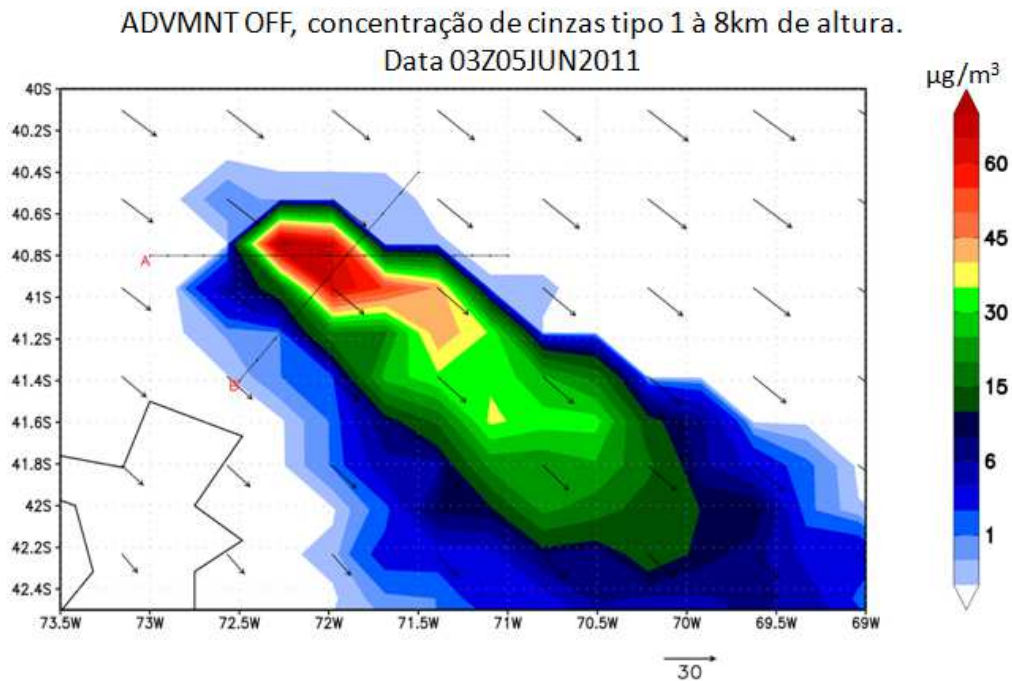


Figura 4.11: Concentração de cinzas tipo 1 em  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  e campo de vento à 8 km de altura. Dia 05/06/11 às 03Z. Advecção original, não monotônica.

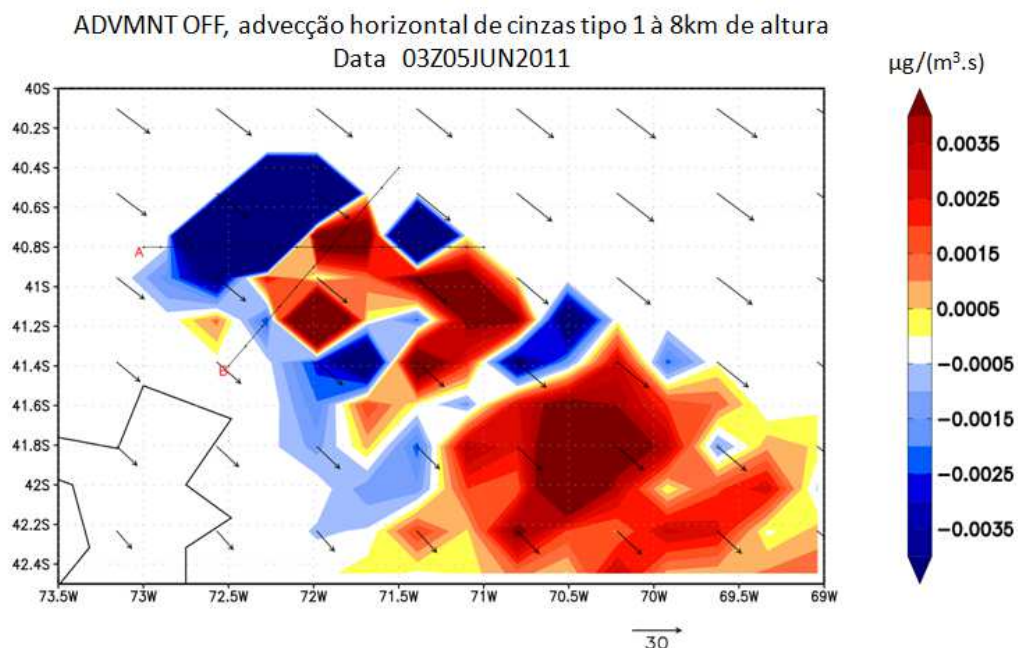


Figura 4.12: Advecção da concentração de cinzas tipo 1 e campo de vento em 8km de altura. Dia 05/06/11 às 03Z. Advecção original, não monotônica.

Utilizando o trajeto “B” desenhado nas Figuras 4.11 e 4.12, é possível mostrar que não foram observadas oscilações ou valores negativos na concentração próxima a um pico. Isto não ocorreu somente para cinzas do tipo 1, como mostrado na Figura 4.13, mas ocorreu para todos os tipos de cinzas neste trajeto neste dia.

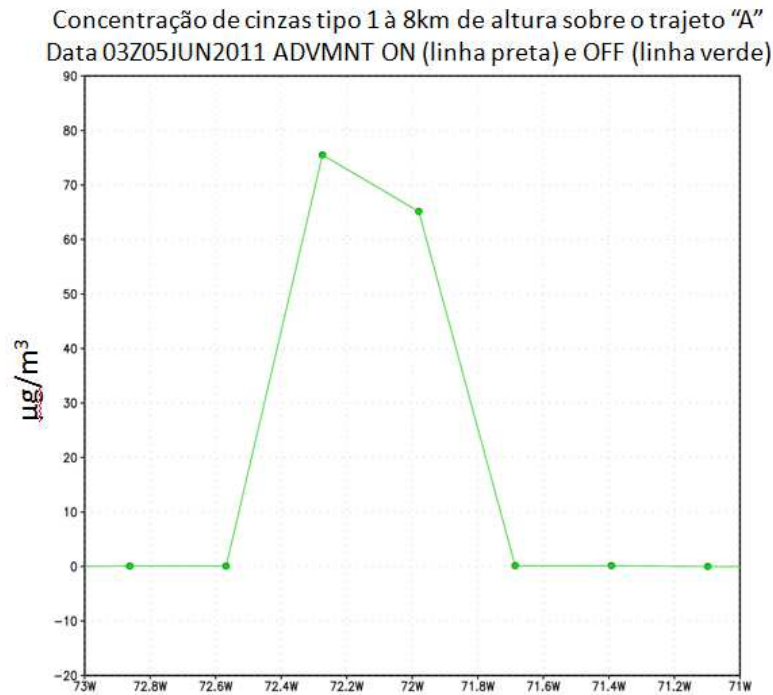


Figura 4.13: Concentração de cinzas do tipo 1 a 8 km de altura sobre o trajeto A .

Fazendo um corte transversal à pluma vulcânica, trajeto “B” da Figura 4.11 e 4.13, observa-se na Figura 4.14 que não ocorreram oscilações espúrias na vertical para cinzas do tipo 1 e 7, o mesmo foi feito para todos os tipos de cinzas, e em nenhum apresentou oscilações.

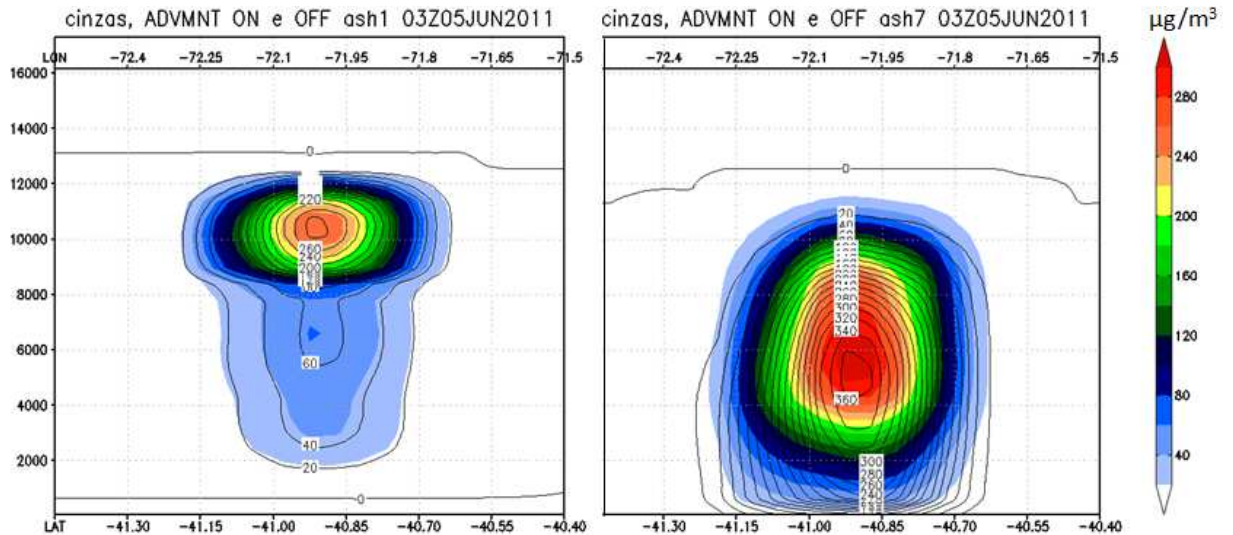


Figura 4.14: Perfil vertical da concentração de cinzas tipo 1 e 7 sobre o trajeto “B”. Eixo y é altura em metros, e o eixo x marca a posição latitudinal e longitudinal referente ao trajeto “B”. Advecção original é representado pelas linhas de contorno.

Apesar de não aparecer oscilações numéricas espúrias na Figura 4.14, pelo fato da resolução vertical ser menor que a horizontal, foi possível encontrar outros casos em que esta oscilação se manifestou de forma evidente, mostrando que o novo esquema de advecção, advecção monotônica, pelo ponto de vista numérico é melhor do que o antigo esquema de advecção, vide Figuras 4.15 e 4.16.

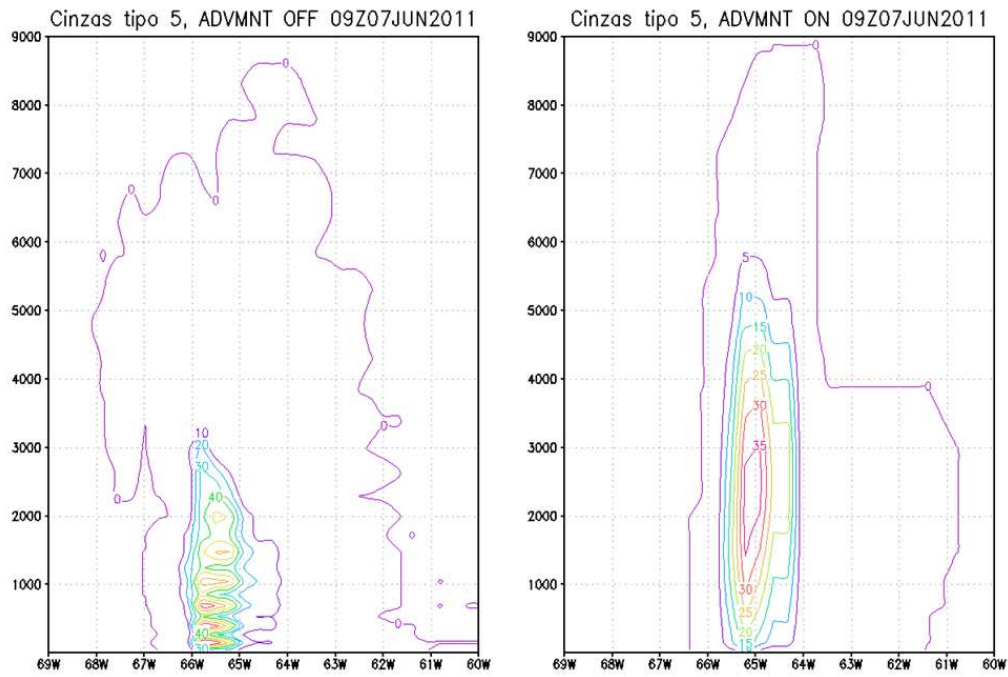


Figura4.15: Concentração vertical de cinzas do tipo 5 para latitude de  $-37^{\circ}$  no dia 07 de junho de 2011 às 9 UTC. Esquerda advecção original, direita advecção monotônica.

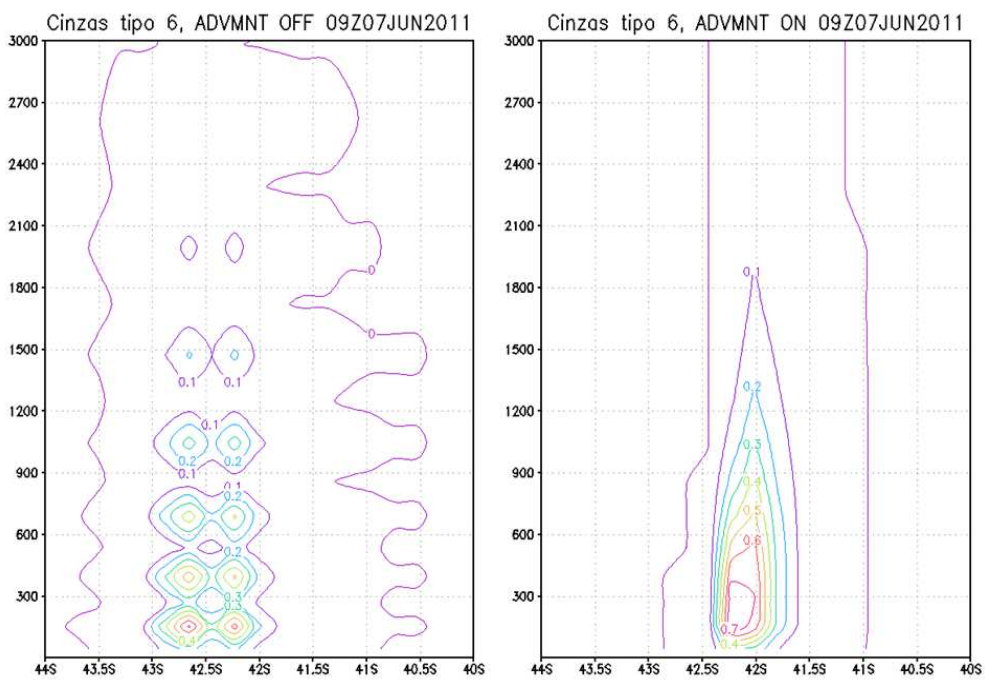


Figura4.16: Concentração vertical de cinzas do tipo 6 para longitude de  $-66.7^{\circ}$  no dia 07 de junho de 2011 às 9 UTC. Esquerda advecção original, direita advecção monotônica.

Como mostrado nas Figuras 4.15 e 4.16 podemos ver claramente que foi gerado oscilações espúrias para advecção original e não na monotônica, sendo assim, do ponto de vista numérico a nova advecção é mais apropriada que a adveccção antiga.

Para verificar do ponto de vista observacional qual é o melhor esquema de advecção, foram utilizados dados do satélite CALIPSO, pois este mostra com precisão a posição dos aerossóis na atmosfera.

No dia 05 de junho de 2011 entre às 17:57 e 17:59Z o satélite CALIPSO passou por uma pluma de cinzas vulcânicas. Utilizando o programa view\_hdf fornecido pela NASA, foi construída a Figura 4.17 que se refere à trajetória do satélite em relação à superfície da Terra. A Figura 4.18 mostra a quantidade de cinzas integrada na coluna atmosférica  $\mu\text{g}/\text{m}^2$ , nesta figura há desenhado uma linha, um *cross-section*, que representa a trajetória do satélite. Sobre esta trajetória os valores de concentração vertical obtidos pelo modelo, Figura 4.20, são comparados com a posição dos aerossóis observados pelo satélite, Figuras 4.21 e 4.22.

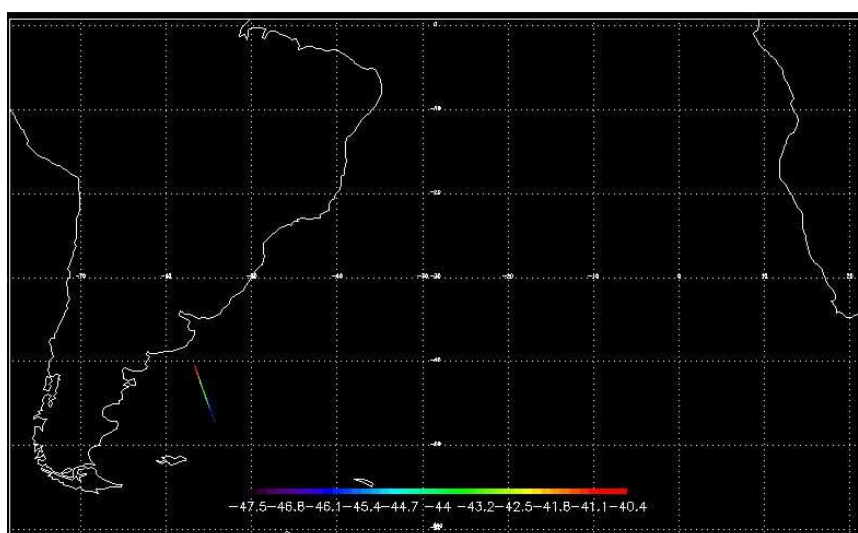


Figura 4.17: Local da passagem do satélite CALIPSO. A barra de cores representa o valor da latitude para cada cor na trajetória.



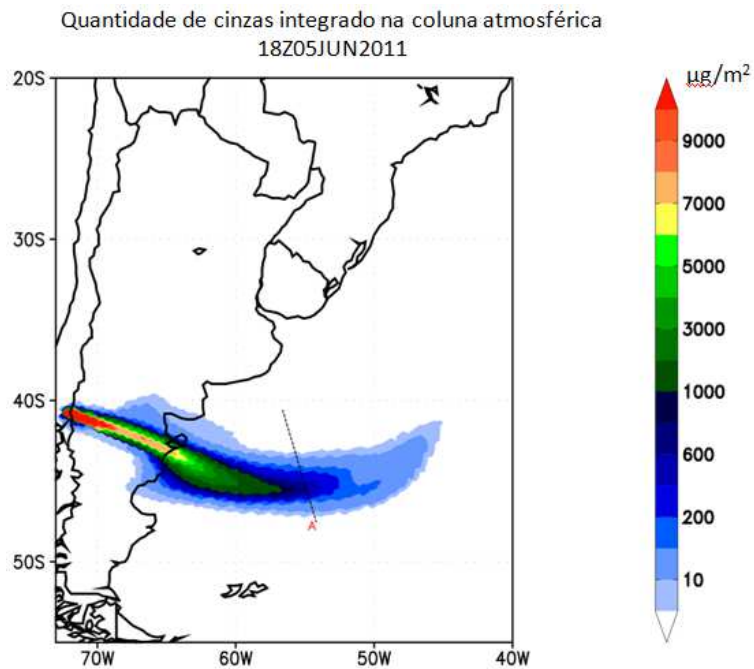


Figura 4.18: Concentração de cinzas vulcânicas integrado na coluna atmosférica em  $\mu\text{g}/\text{m}^2$  utilizando esquema de advecção original. A linha tracejada representa a trajetória do satélite CALIPSO, sendo “A” o início da trajetória.

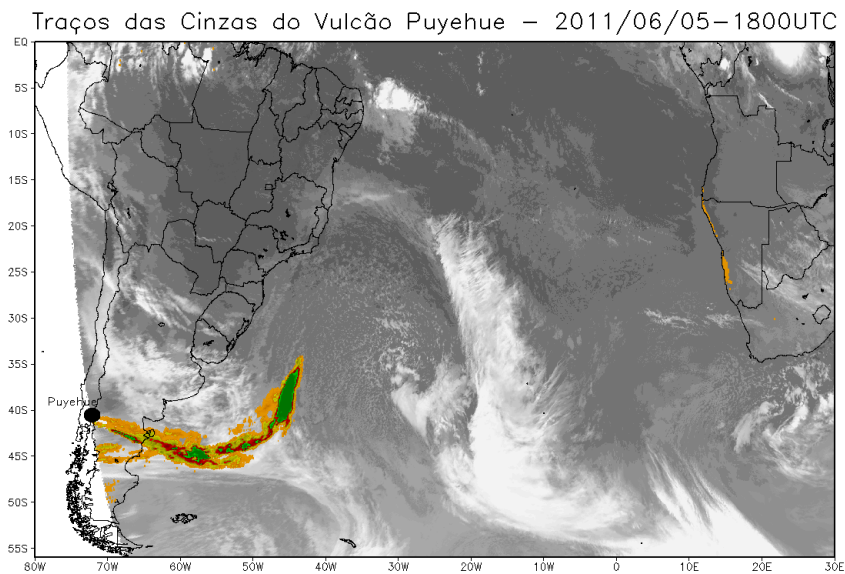


Figura 4.19: Imagem fornecida pelo DSA relativo ao caso estudado. Para mais detalhes ler capítulo 3.4.1 desta dissertação.

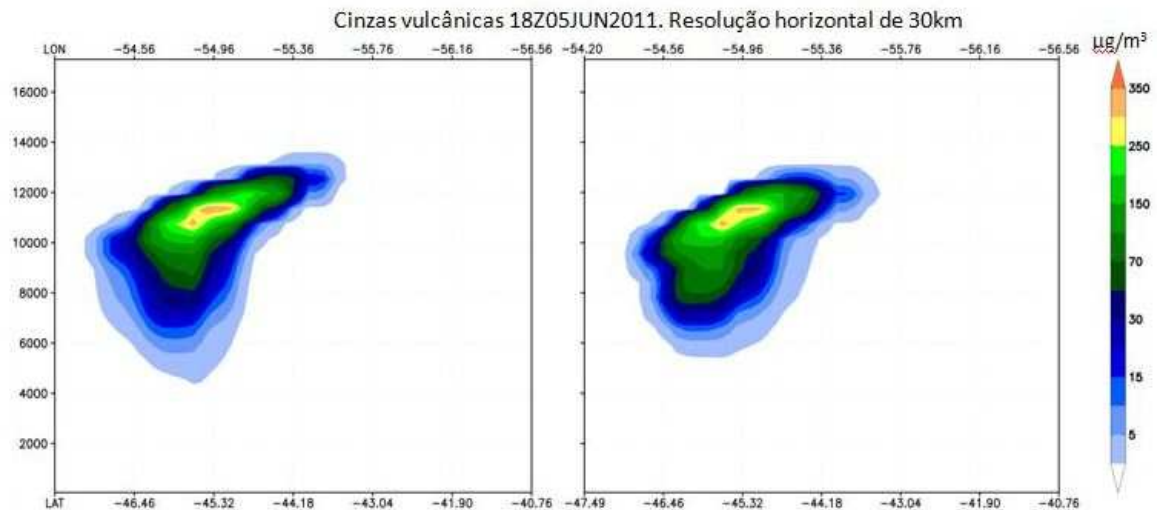


Figura 4.20: Perfil vertical da concentração de cinzas vulcânicas, simulação feita com 30 km de resolução horizontal. Esquerda simulação realizada com advecção monotônica e na direita advecção original. A linha pela qual passa este percurso está representada na figura 4.18.

Podemos ver na figura 4.20 que não houve diferença significativa na concentração e posição das cinzas vulcânicas. É observada uma pequena queda na taxa de concentração no núcleo da pluma, na região próxima a latitude  $-45.6^\circ$  e longitude  $-54.8^\circ$  para ambos os casos. A maior concentração de cinzas, cor verde e amarela se encontram entre 10 e 12 km, latitude entre  $-46^\circ$  e  $-44^\circ$ , e longitude entre  $-55.5^\circ$  e  $-55.3^\circ$ .

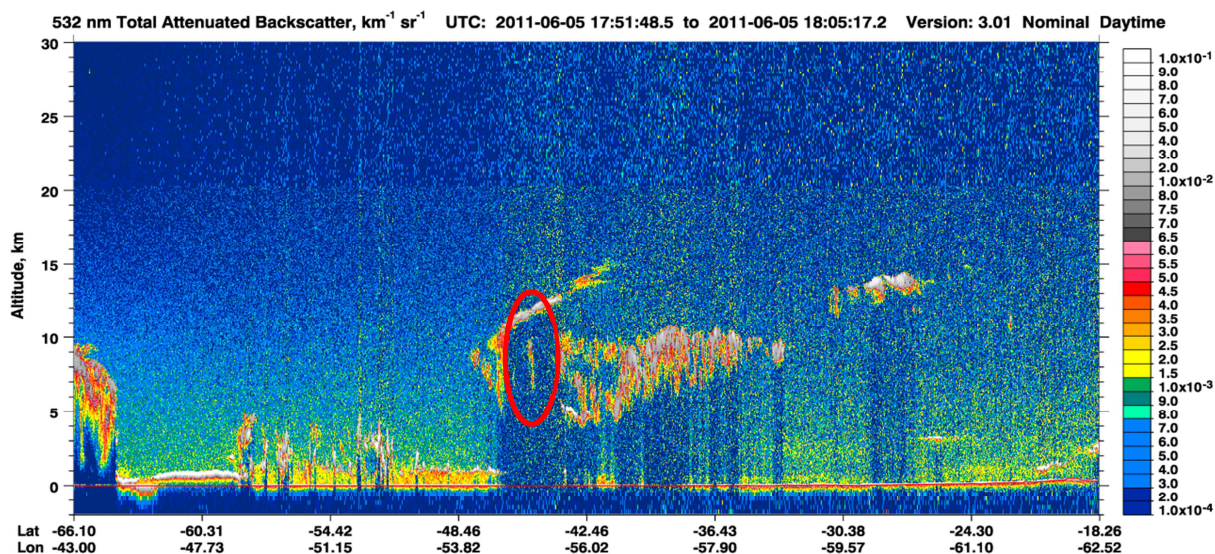


Figura 4.21: Atenuação total do retroespalhamento para o comprimento de onda 532 mm, período das 17:51:48,5 às 18:05:17,2 do dia 05/06/2011. O círculo vermelho mostra uma região em que não houve atenuação total do retroespalhamento.

Fonte: Adaptado de National Eeronautics and Space Administration (NASA) (2013c)

Podemos observar na Figura 4.21 sobre a região de interesse, latitude de  $-48,46^{\circ}$  a  $-42,46^{\circ}$ , que a região com maior atenuação do retroespalhamento se encontra entre 10 e 12 km de altura, coincidindo com a altura em que o modelo colocou a maior densidade de cinzas, vide figura 4.22. Sobre a região marcada pelo círculo vermelho, podemos observar que o sinal de retroespalhamento não foi totalmente atenuado, que denota uma queda na concentração de aerossóis.

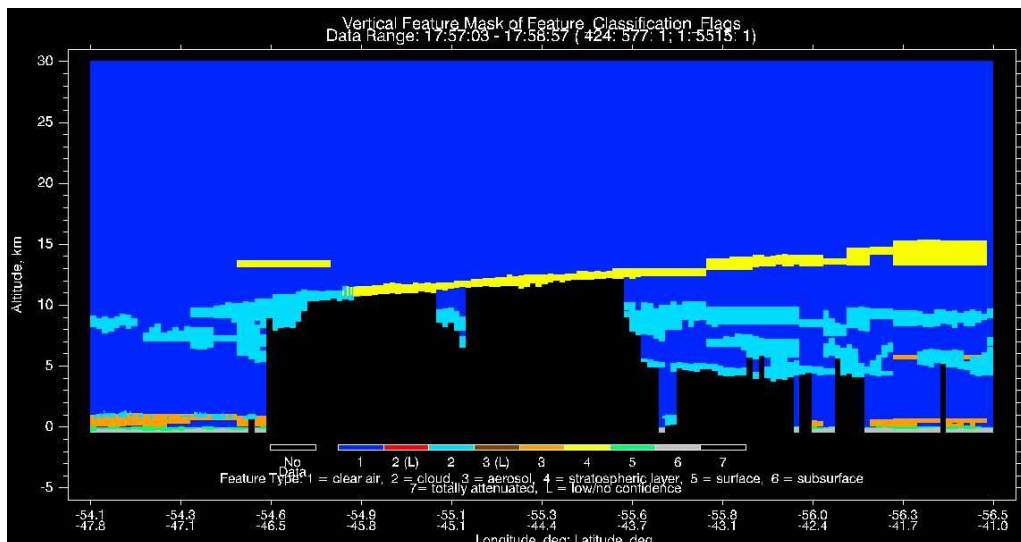


Figura 4.22: “Vertical Feature Mask”. A mancha amarela representa “stratospheric layer” e esta classificação significa tanto nuvens acima da tropopausa como aerossóis. A mancha preta significa que o sinal foi totalmente atenuado devido a absorção ocorrida pela grande concentração de aerossóis.

Podemos observar na Figura 4.22 que houve uma grande concentração de cinzas vulcânicas entre 10 e 12 km, entre as latitudes de  $-46,5^\circ$  e  $-43,7^\circ$  e longitude  $-54,6^\circ$  e  $-55,6^\circ$ . Observa-se também que sobre a latitude  $-45,1^\circ$  e longitude  $-55,1^\circ$  há uma diminuição da concentração de cinzas, pois não ocorre a completa atenuação do sinal.

Comparando as Figuras 4.21 e 4.22 com a Figura 4.20, podemos observar que a posição das cinzas vulcânicas se aproxima da altura e posição das cinzas observado pelo sensor a bordo do satélite CALIPSO. Aparentemente o modelo foi preciso o suficiente para registrar a ocorrência de uma pequena diminuição da concentração de cinzas que foi observado dentro da pluma vulcânica, fato evidenciado pelo círculo vermelho na Figura 4.15, a localização desta pequena diminuição da concentração de cinzas obtida pelo modelo coincidiu com a localização obtida pelo satélite.

Podemos concluir que para este caso, não houve diferença significativa entre os esquemas de advecção, vide Figura 4.20, e ambas corresponderam satisfatoriamente com o observado pelo satélite CALIPSO.

Outro caso de interesse, ocorrido no dia 05/06/2011 entre às 05:59 e 06:00Z, o satélite CALIPSO amostrou por uma pluma de cinzas vulcânicas. A Figura 4.23 mostra a trajetória do satélite em relação à superfície da Terra. A Figura 4.24

mostra a quantidade de cinzas simulada pelo modelo integrada na coluna atmosférica em unidades de  $\mu\text{g}/\text{m}^2$ , nesta figura está desenhado uma linha que representa a trajetória do satélite. Sobre esta trajetória os valores de concentração vertical obtidos pelo modelo, Figura 4.26, são comparados com a posição da pluma observada pelo satélite, Figuras 4.27 e 4.28. A NASA fornece uma imagem sobre este evento, vide Figura 3.2 deste trabalho.

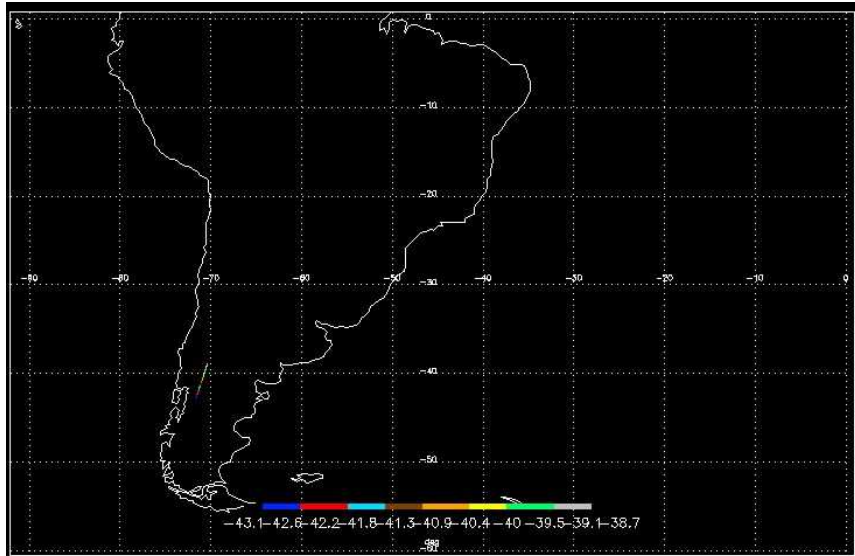


Figura 4.23: Local da passagem do satélite CALIPSO. A barra de cores representa o valor da latitude na trajetória.

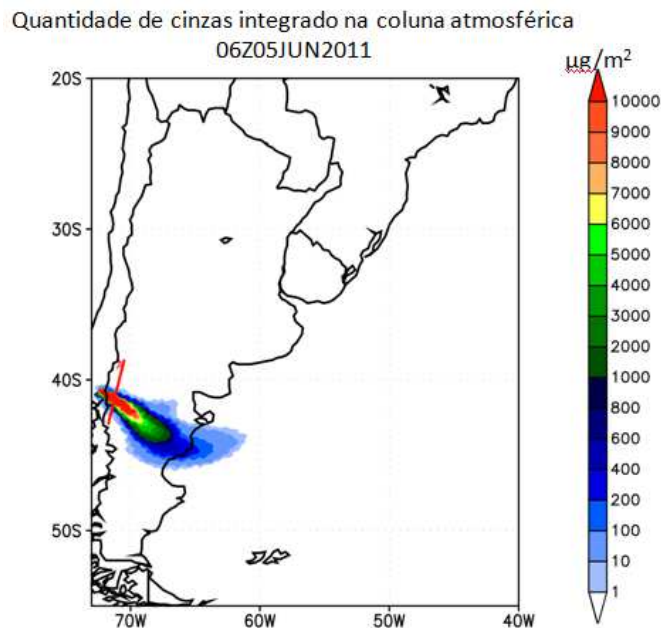


Figura 4.24: Concentração de cinzas vulcânicas integrado na coluna atmosférica em  $\mu\text{g}/\text{m}^2$  utilizando advecção original. A linha tracejada representa a trajetória do satélite CALIPSO, sendo "A" o início da trajetória.

Traços das Cinzas do Vulcão Puyehue – 2011/06/05–0600UTC

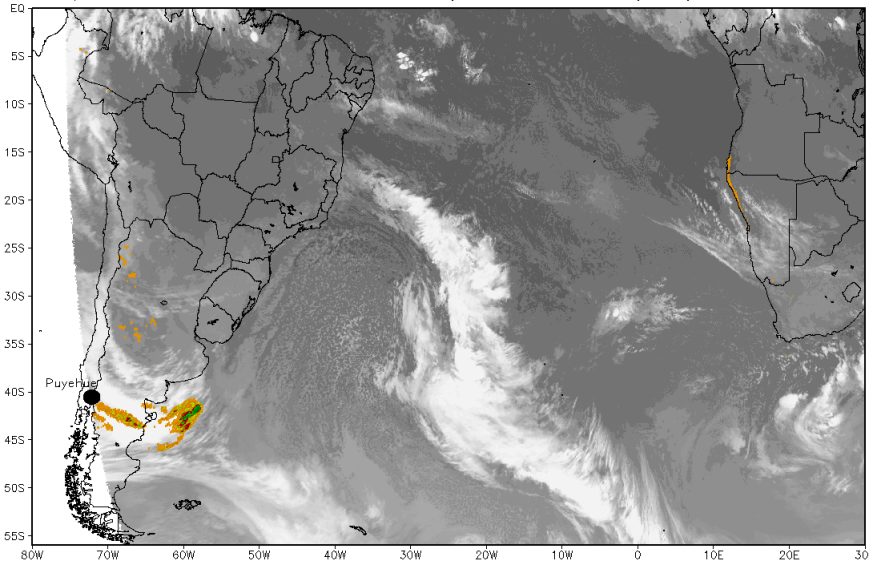


Figura 4.25: Composição de imagens, IR10 em cinza e IR10-IR12 em colorido, imagem fornecida pelo DSA-INPE.

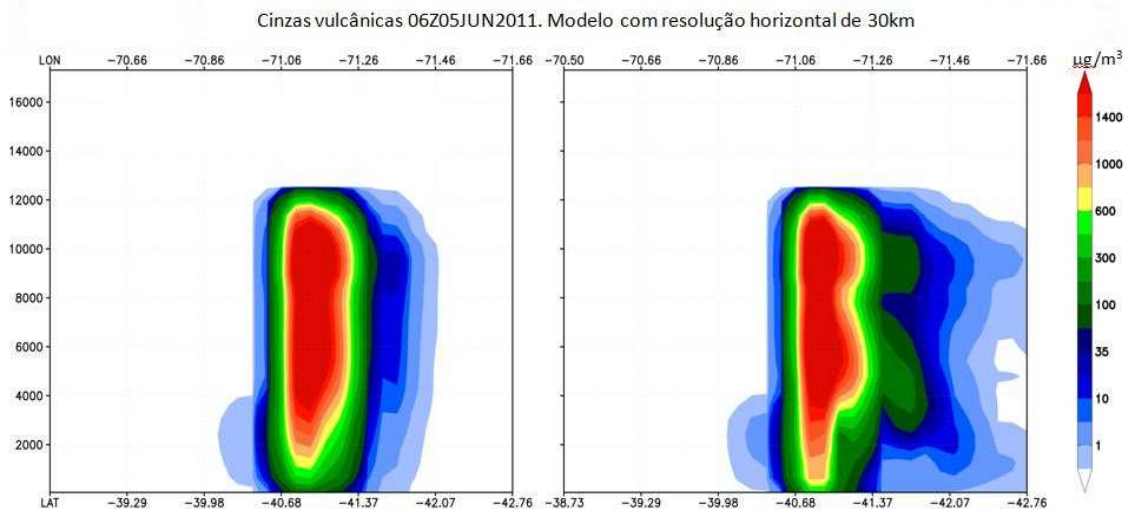


Figura 4.26: Perfil vertical da concentração de cinzas vulcânicas, sobre o percurso representado na Figura 4.18. Esquerda simulação realizada com advecção monotônica e na direita advecção original.

Podemos ver na Figura 4.26 que as cinzas se concentram aproximadamente na latitude de  $-40.4^{\circ}$  a  $-41.4^{\circ}$  e longitude de  $-71.0^{\circ}$  a  $-71.3^{\circ}$  a 12 km de altura. A altitude do terreno nesta região utilizando 30 km de resolução é 939,45 metros, ou seja, aproximadamente 1 km, logo, as cinzas vulcânicas se encontram em torno de 13 km de altitude. Podemos observar que houve uma dispersão maior da pluma para a advecção não monotônica, Figura 4.26 à direita.

Podemos observar na Figura 4.27 que os aerossóis estratosféricos, representados em cor amarela, que neste caso são constituídos primariamente de cinzas vulcânicas, possuem grande concentração, pois o sinal de retroespalhamento foi totalmente atenuado, e sua localização está entre 12 e 13 km de altitude, detectada sobre a latitude de  $-40,9^{\circ}$  à  $-41,4^{\circ}$  e longitude  $-71,0^{\circ}$  à  $-71,2^{\circ}$  sobre o percurso tracejado nas Figuras 4.17 e 4.18. É possível observar que não ocorre propagação de cinzas para latitudes inferiores a  $-41.4$ , isto mostra que a advecção nova é superior a advecção antiga, pois olhando a Figura 4.26, podemos ver que a advecção antiga, possui uma propagação acentuada de cinzas para latitudes mais baixas, o que não é observado pelo satélite, Figura 4.27.

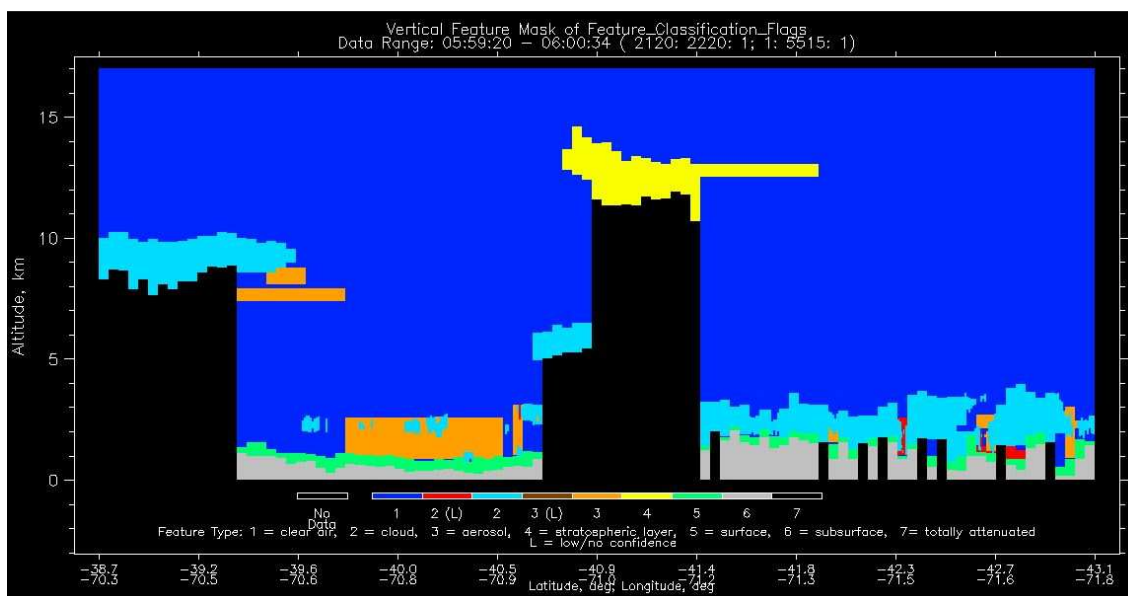


Figura 4.27: Perfil vertical dos aerossóis observados pelo satélite CALIPSO. Em amarelo está “stratospheric layer”, que neste caso representa cinzas vulcânicas. A mancha preta significa que não foi possível observar, pois o sinal de retroespalhamento foi totalmente atenuado.

Com o intuito de observar a capacidade do modelo, foi feita uma nova simulação, agora com resolução horizontal de 5 km, e sem forçar o modelo a produzir oscilações espúrias devido à advecção, ou seja, foi reposto no modelo a função “noneg”. Para observar da diferença entre simular com 30 km e 5 km de resolução horizontal foram analisados os mesmos casos mostrados anteriormente.

Sem forçar o surgimento de oscilações espúrias, tornou-se muito difícil encontrá-las, mesmo utilizando resolução de 5 km.

Não foi encontrado oscilações espúrias próximo à fonte emissora, mesmo havendo valores intensos de advecção, porem pelo fato da resolução vertical ser maior que a resolução horizontal, foi possível encontrar muitos casos em que esta oscilação se manifestou de forma evidente, mostrando que o novo esquema de advecção do ponto de vista numérico é melhor também utilizando 5 km de resolução horizontal, vide Figura 4.28.

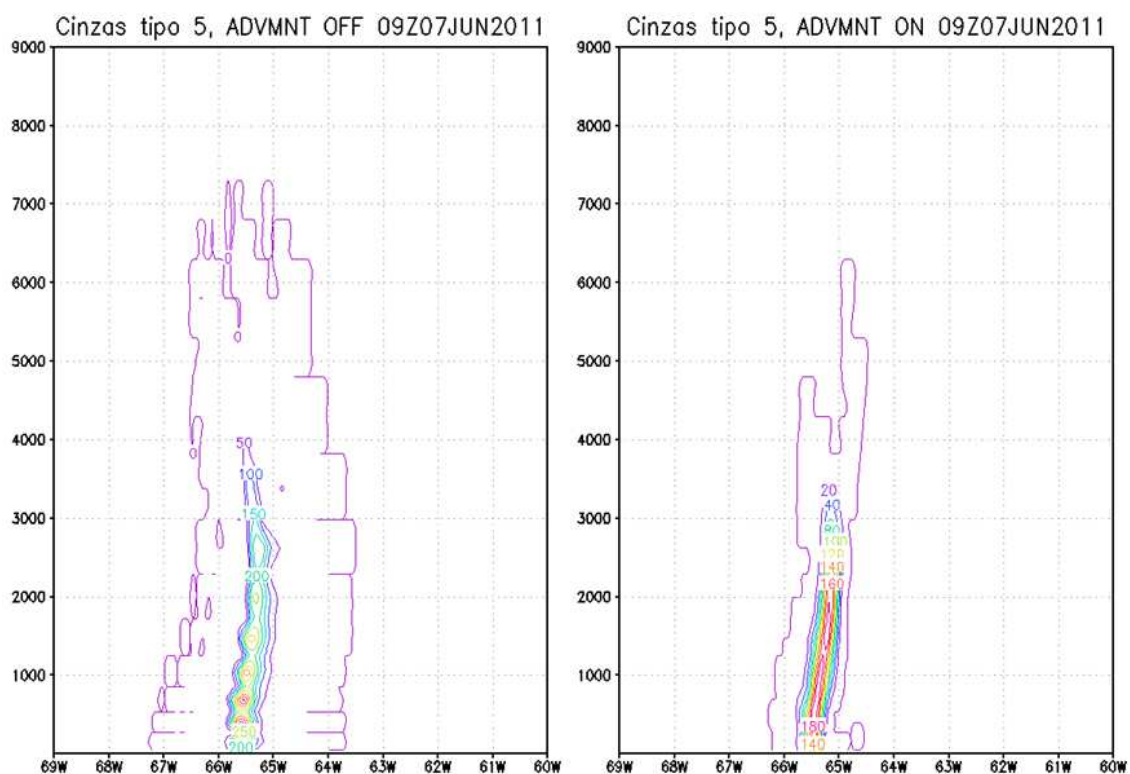


Figura4.28: Concentração vertical de cinzas do tipo 5 para latitude de  $-37^{\circ}$  no dia 07 de junho de 2011 às 9 UTC. Esquerda advecção original, direita advecção monotônica.

A Figura 4.29 mostra que foi possível observar a ocorrência de oscilações próximas a um pico, o círculo em vermelho destaca a posição da oscilação. Esta oscilação foi encontrada para todos os tipos de cinzas nesta posição e tempo; porem foi escolhido mostrar somente um tipo de cinza para não haver informações redundantes. Podemos ver também nesta figura, que a oscilação



espúria não ocorre para a advecção monotônica, mostrando que esta é melhor do ponto de vista numérico.

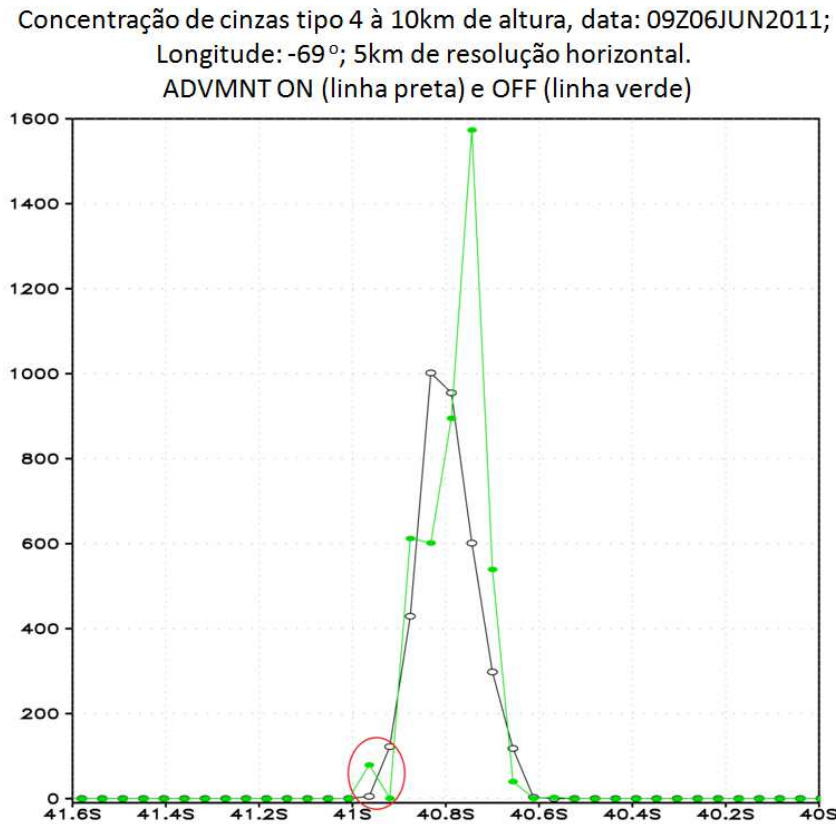


Figura 4.29: Concentração de cinzas do tipo 4, altura de 10 km, longitude de  $-69^{\circ}$ , dia 06/06/2011 às 9Z, simulação feita com 5 km de resolução horizontal. O círculo em vermelho destaca a posição de uma oscilação espúria gerada pela advecção original, esta representada pela linha verde.

Comparando com o observado pelo CALIPSO para o caso do dia 05/06/2011 entre às 17:57 e 17:59Z, figuras 4.15 e 4.16, com o obtido pelo modelo, Figura 4.30.

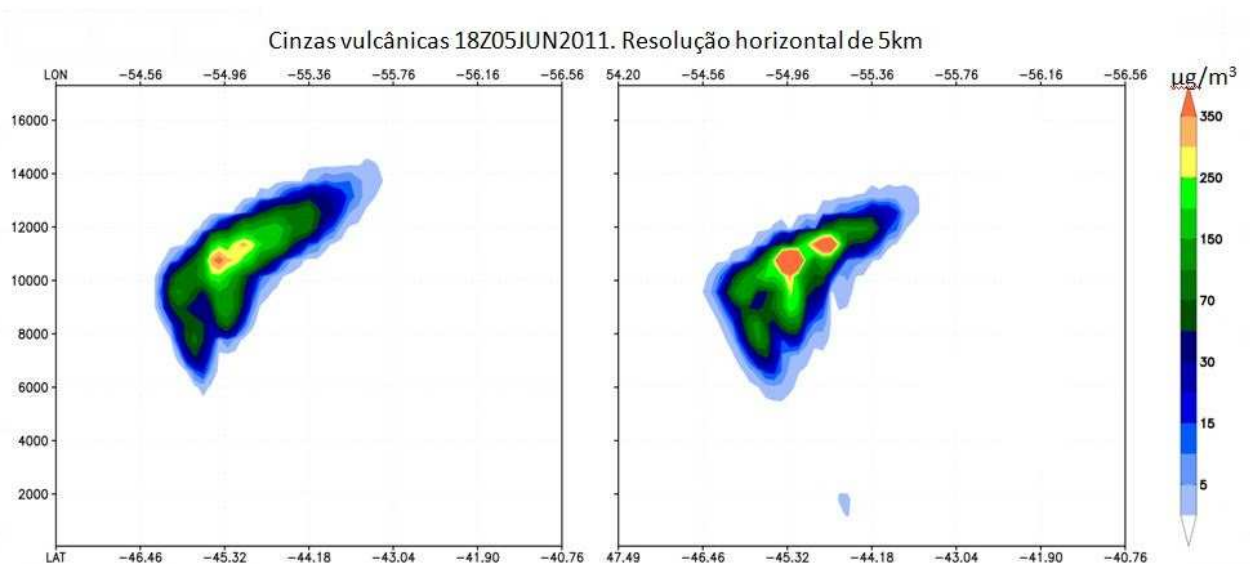


Figura 4.30: Perfil vertical da concentração de cinzas vulcânicas, simulação feita com 5 km de resolução horizontal. Na esquerda simulação realizada com advecção monotônica ligada (ADVMNT ON) e na direita desligada (ADVMNT OFF) . A linha pela qual passa este percurso está representada na figura 4.29.

Analisando a Figura 4.30, podemos observar a queda na taxa de concentração no núcleo da pluma foi encontrada, na região em torno da latitude  $-44.9^{\circ}$  para a figura da esquerda e  $-44.8^{\circ}$  para a figura da direita. A maior concentração de cinzas, cor verde e amarela se encontram entre 10 e 12 km, latitude entre  $-46^{\circ}$  e  $-44^{\circ}$ , e longitude entre  $-55.5^{\circ}$  e  $-55.3^{\circ}$ . Comparando com o observado, Figura 4.16 a diminuição da concentração de cinzas no centro da pluma está localizada na latitude de  $-45,1^{\circ}$ ; o modelo com 30km de resolução colocou em  $-45,6^{\circ}$  e com 5km em  $-44.9^{\circ}$  (ON) e  $-44.8^{\circ}$  (OFF), logo o modelo se mostrou mais preciso com 5km de resolução usando advecção monotônica (ON).

Agora analisando o caso do dia 05/06/2011 entre às 05:59 e 06:00Z, cujo observado pelo satélite está representado nas figuras 4.17 e 4.22, e o simulado está representado pela figura 4.31.

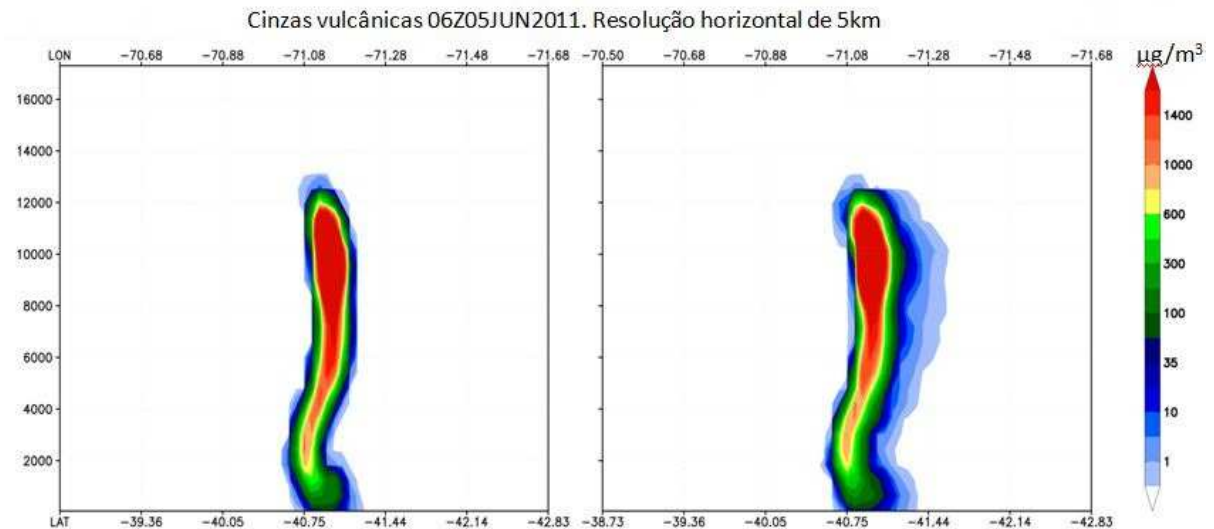


Figura 4.31: Perfil vertical da concentração de cinzas vulcânicas, simulação feita com 5km de resolução horizontal. Na esquerda simulação realizada com advecção monotônica e na direita advecção original.

Podemos observar na Figura 4.32 que as cinzas se concentram aproximadamente na latitude de  $-40.75^{\circ}$  a  $-41.1^{\circ}$  e longitude de  $-71.08^{\circ}$  a  $-71.18^{\circ}$  a 12 km de altura, isto levando em consideração as cinzas acima de 6 km de altura. Como a altitude do terreno nesta região utilizando 5km de resolução é 1096,43 metros, ou seja aproximadamente 1,1 km, a altitude das cinzas vulcânicas se encontram em torno de 13 km de altitude. Houve uma dispersão maior da pluma utilizando a advecção original; porem esta dispersão foi mais sutil utilizando 5 km de resolução horizontal em relação a utilizar 30 km.

Comparando o resultado da modelagem, Figura 4.31, com o observado, Figura 4.27, pode-se ver que o modelo obteve bons resultados sobre a altura e posição da pluma. A posição da pluma segundo o modelo foi de 13 km de altitude, localizado na latitude de  $-40.75^{\circ}$  a  $-41.1^{\circ}$  e longitude de  $-71.08^{\circ}$  a  $-71.18^{\circ}$  sobre a trajetória do satélite. O observado mediu altitude entre 12 e 13 km, localizado em altitude de  $-40,9^{\circ}$  à  $-41,4^{\circ}$  o e longitude  $-71,0^{\circ}$  à  $-71,2^{\circ}$ . Utilizando o modelo com 30 km de resolução foi obtido na seguinte localização: latitude de  $-40.4^{\circ}$  a  $-41.4^{\circ}$  e longitude de  $-71.0^{\circ}$  a  $-71.3^{\circ}$ , 13 km de altitude. Podemos observar que ao alterar a resolução horizontal de 30 km para 5km, não houve ganhos significativos na precisão para este caso porem, tem-se que levar em consideração que neste caso o satélite passou muito próximo à fonte emissora, vide Figura 4.24.

Concluimos neste primeiro experimento, que a advecção monotônica se mostrou melhor numericamente, pois não gera oscilações espúrias, e também houve melhora na posição da pluma em relação aos dados observados. Com o aumento da resolução horizontal para 5km não houve ganhos de precisão próximo a fonte emissora, porém longe da fonte emissora houve ganho de precisão.

#### **4.3.4. Condições de contorno:**

-Caso I análise CPTEC e reanálise ERA do ECMWF

Este experimento tem por finalidade avaliar qual a melhor condição de contorno atmosférica para a simulação do transporte de cinzas, usando dados de análise do CPTEC, cujo nome técnico é GAMRAM T126, ou reanálise do ECMWF (ERA) com resolução de grade de 1,5 graus.

Foram feitas duas simulações cada uma com 30 km de resolução horizontal, durante 15 dias a começar pelo dia 04/06/11, sem assimilação no centro, diferenciando entre as duas simulações apenas o tipo de dado assimilado na região de contorno (bordas do domínio da grade). Para averiguar qual a melhor condição de contorno, os resultados gerados pelo modelo foram comparados com dados observados, principalmente dados do CALIPSO devido sua precisão na localização de aerossóis.

Para o caso do dia 05/06/2011 entre às 17:57 e 17:59Z, cujo observado pelo satélite CALIPSO está representado nas Figuras 4.21 e 4.22 será comparado com os resultados obtidos pelo modelo, representado na Figura 4.32.

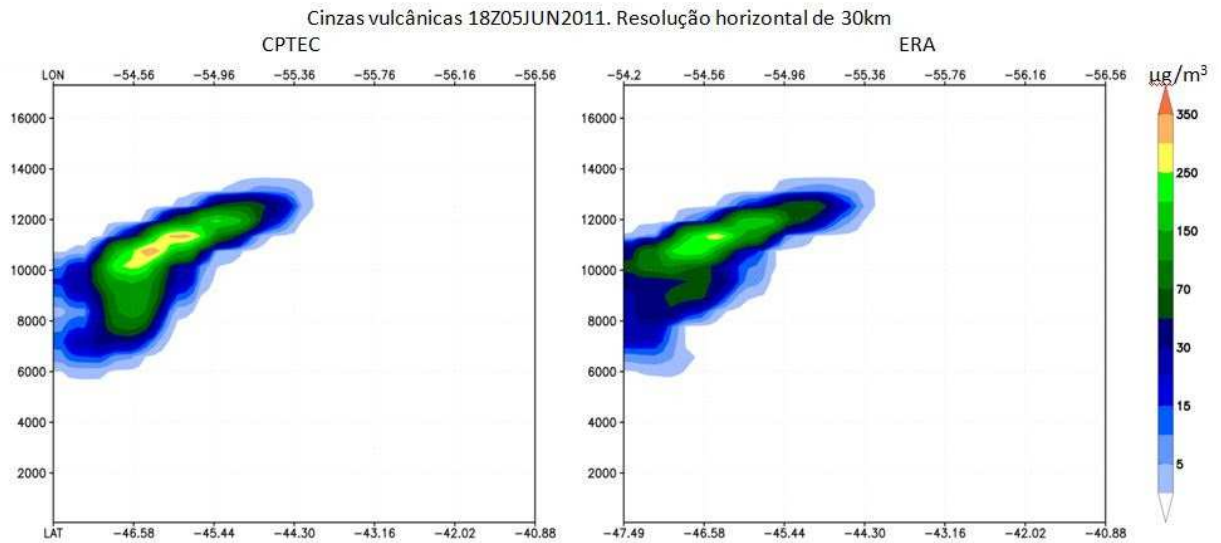


Figura 4.32: Concentração de cinzas vulcânicas sobre o trajeto do satélite. A esquerda, simulação utilizando análises do CPTEC, na direita reanálise do ECMWF (ERA).

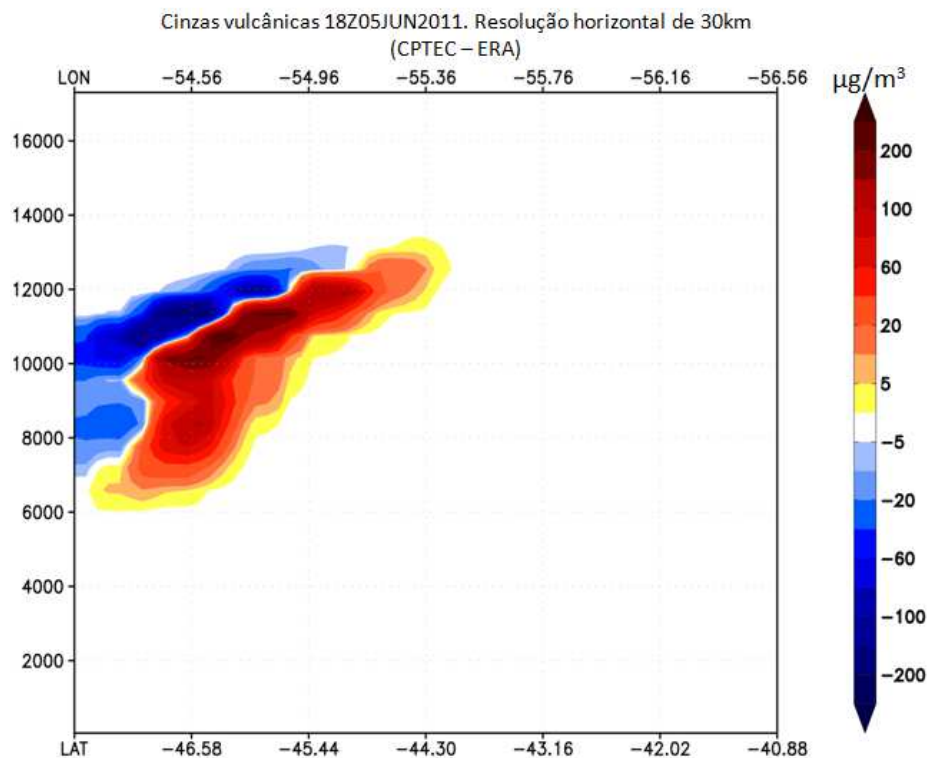


Figura 4.33: Diferença entre as concentrações obtidas utilizando análise do CPTEC menos reanálise do ERA.

É de grade valia analisar também a diferença percentual entre as simulações para saber se a diferença de concentração é significativa ou não. A diferença percentual (*Diffpercentual*) envolvendo números negativos é dada pela equação 4.32. Esta equação retira a possibilidade de existir números infinitos positivos, porem há a possibilidade de existir números infinitos negativos; para

mascarar estes valores foram ignorados todos os valores cuja diferença percentual seja inferior a -1000%.

$$Diffpercentual = \frac{(A-B)}{(A+B)/2} 100 \quad (4.32)$$

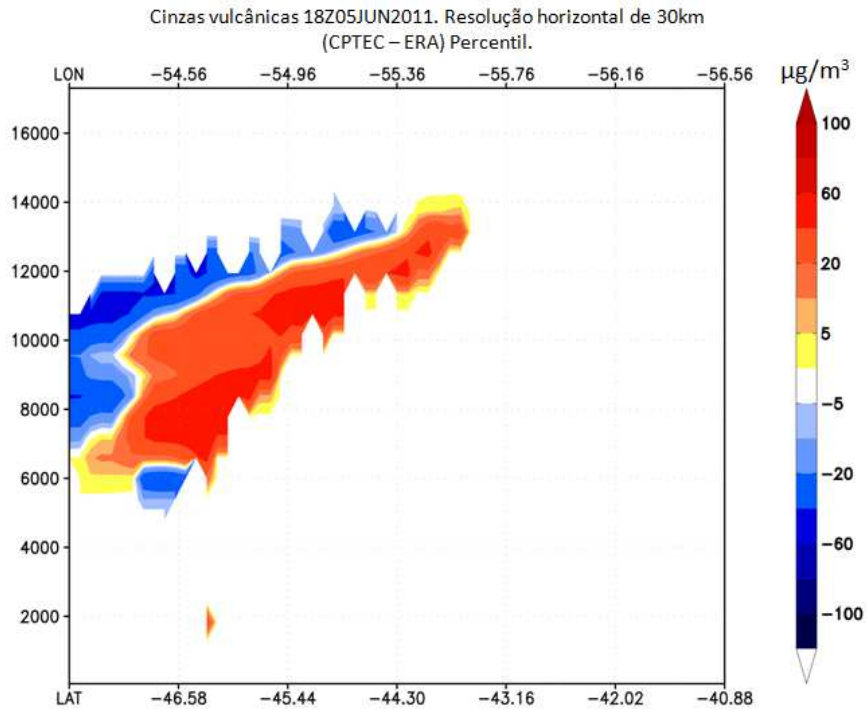


Figura 4.34: Diferença percentual entre as concentrações obtidas utilizando análise CPTEC menos reanálise ERA.

Analisando as figuras 4.32, 4.33 4.34, podemos observar que utilizando borda CPTEC houve um deslocamento da pluma para a direita, ficando mais próximo do observado pelo CALIPSO, figuras 4.21 e 4.22.

Para o caso do dia 05/06/2011 entre às 05:59 e 06:00Z, cujo observado pelo satélite está representado na Figura 4.27, e o obtido pelo modelo Figura 4.35.

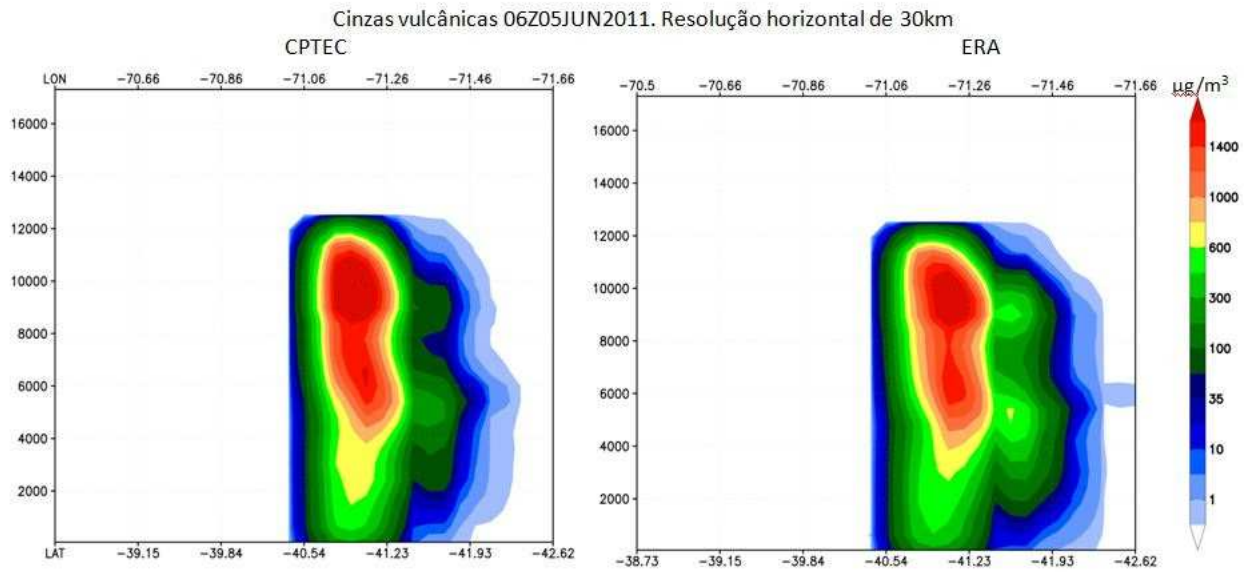


Figura 4.35: Concentração de cinzas vulcânicas sobre o trajeto do satélite. Esquerda simulação utilizando análise CPTEC, na direita utilizando reanálise ECMWF (ERA).

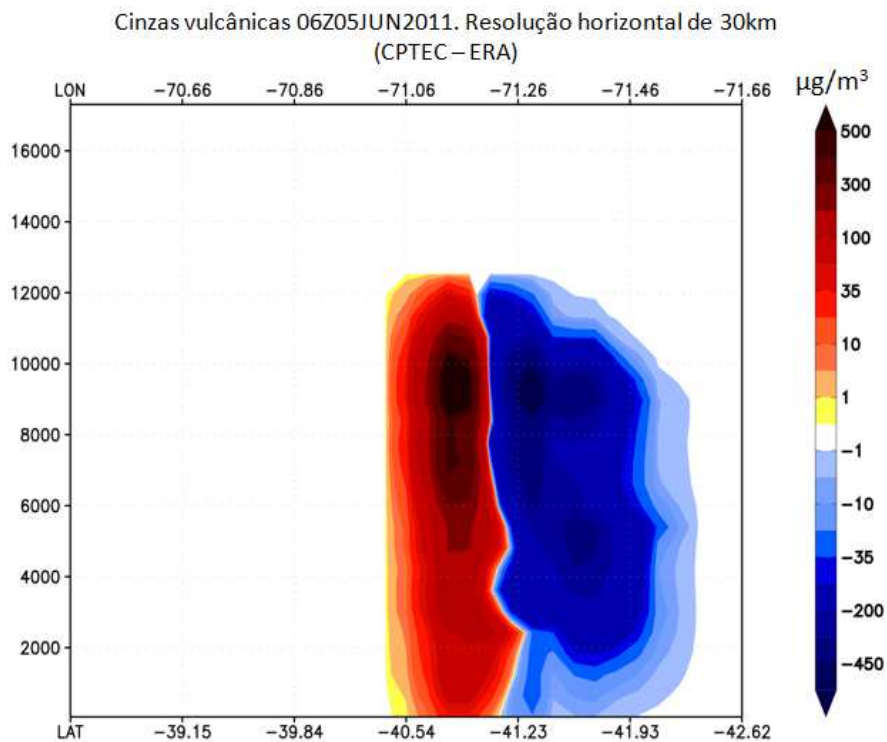


Figura 4.36: Diferença entre as concentrações utilizando análise CPTEC menos reanálise ERA.

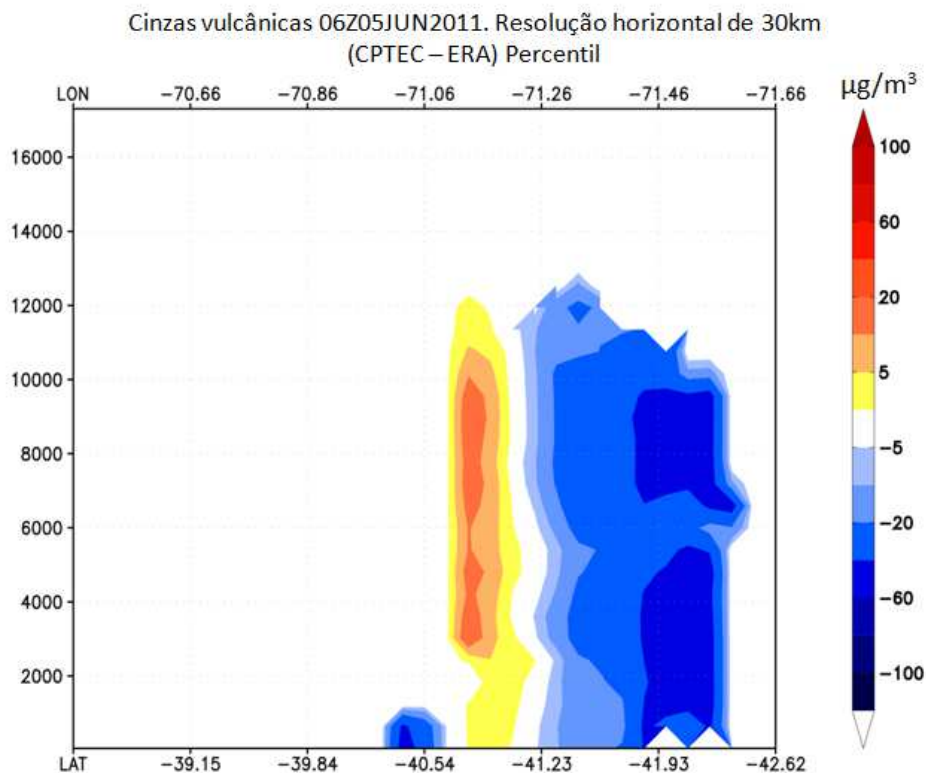


Figura 4.37: Diferença percentual entre as concentrações utilizando análise CPTEC menos reanálise ERA.

Podemos observar nas figuras 4.35, 4.36 e 4.37 que ao utilizar dados de reanálise ERA, as cinzas foram para latitudes mais baixas, porém ao observar o medido pelo CALIPSO, figura 4.27, as cinzas não passam da latitude 41.4 sul sobre o trajeto de detecção do satélite logo, neste caso, utilizar dados de análise CPTEC se mostrou mais preciso.

Conclui-se que em todos os casos analisados, utilizando o uso de condições de contorno do CPTEC se mostrou mais próximo do observado pelo CALIPSO do que utilizando condições de contorno do ERA.

#### -Caso II dados de análise e de previsão do CPTEC

Este experimento tem por finalidade observar o quanto se distancia os resultados quando se altera a melhor condição de contorno encontrada, análise CPTEC, em relação a região de contorno previsão CPTEC, em outras palavras, será analisado o quanto a previsão do modelo se distancia da análise, e qual a melhor do ponto de vista observacional.



Para este experimento foram simulados 10 dias, a começar pelo dia 04/06/11, cada dia possui sete dias de previsão, pois sete dias é o tempo máximo da previsão disponível no Tupã<sup>5</sup>. Como nos demais experimentos utilizou-se uma resolução horizontal de 30 km. Para averiguar a qualidade da previsão, os resultados gerados pelo modelo foram comparados com dados do satélite CALIPSO e combinações de imagens do Meteosat-8 fornecido pelo DSA-INPE.

No caso do dia 05/06/2011 entre às 17:57 e 17:59Z, a figura 4.39 mostra a concentração de cinzas vulcânicas, sobre a trajetória do satélite, na esquerda análise CPTEC e na direita previsão CPTEC; o contorno previsão CPTEC para este caso inicializado dia 04/06 às 0 UTC .

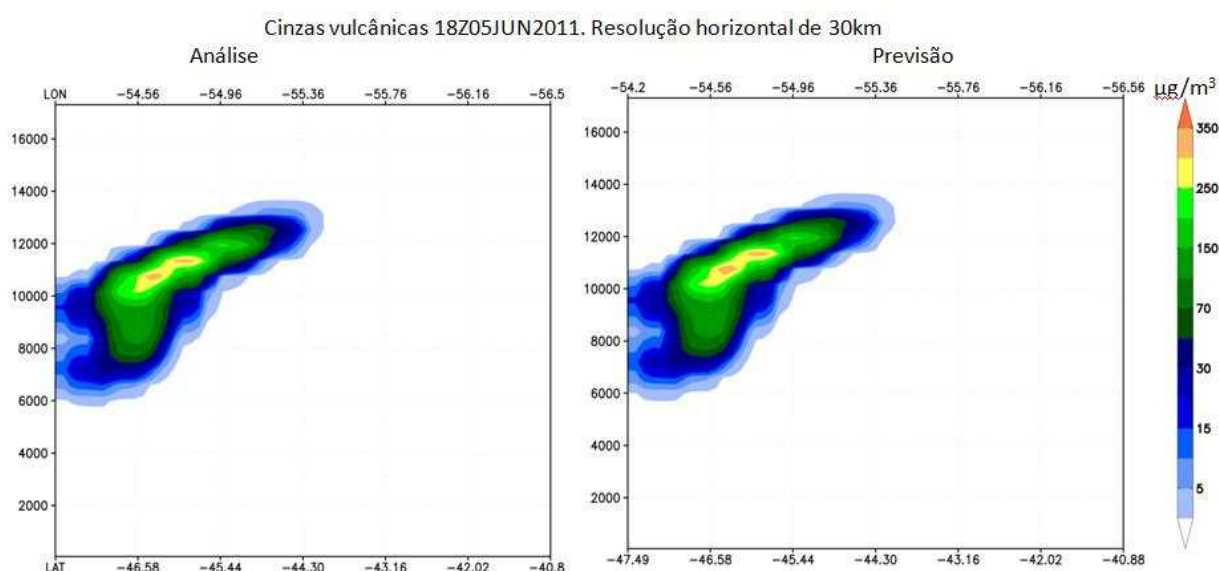


Figura 4.38: Perfil vertical da concentração de cinzas vulcânicas sobre a trajetória do satélite. Esquerda simulação utilizando análise CPTEC, direita previsão CPTEC.

A diferença da concentração de cinzas vulcânicas da Figura 4.38 está representada na Figura 4.39.

<sup>5</sup> Tupã é o supercomputador do INPE, o mais rápido do hemisfério sul atualmente, 2013.

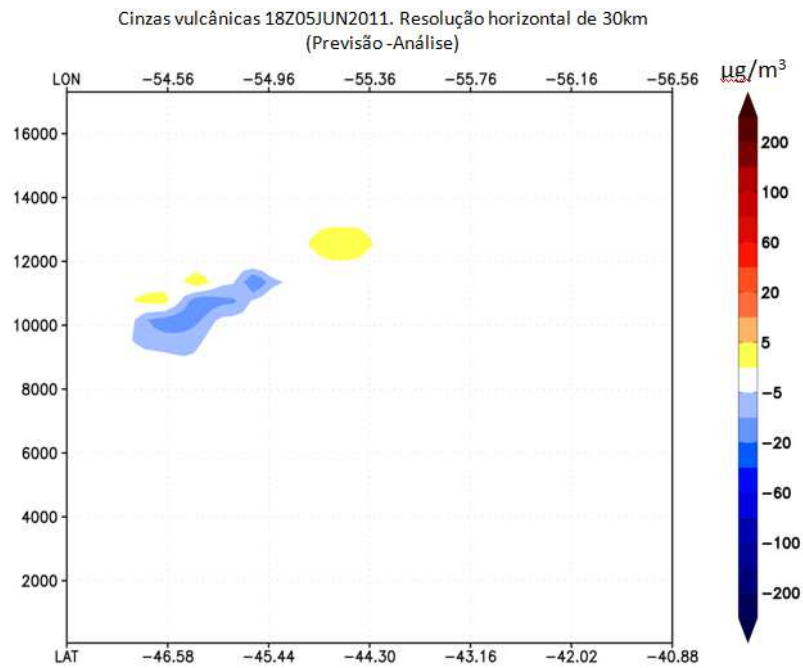


Figura 4.39: Diferença da concentração de cinzas vulcânicas, entre previsão e análise.

A Figura 4.40 mostra a diferença percentual entre previsão e análise para o caso estudado.

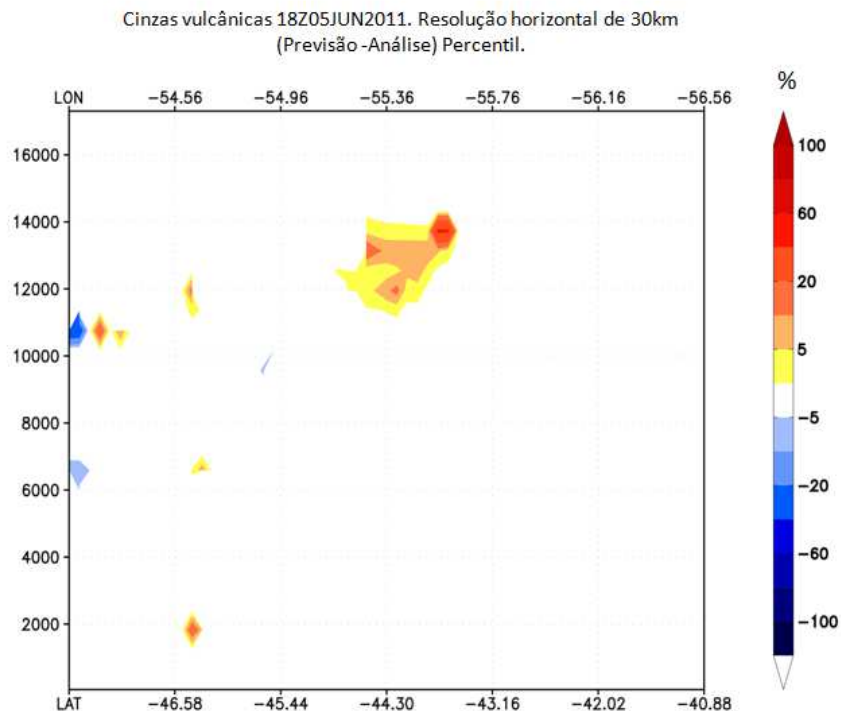


Figura 4.40: Diferença percentual entre previsão e análise para o caso estudado.

Na Figura 4.38, podemos notar que a diferença não é perceptível, ao fazer a diferença (Figura 4.39) e diferença percentual (Figura 4.40), observa-se que há

pouca diferença entre a simulação utilizando análise e utilizando previsão, logo, o modelo foi capaz de prever de forma bem aproximada a posição e concentração da pluma vulcânica em relação ao uso de análises atmosféricas.

No caso do dia 05/06/2011 entre às 05:59 e 06:00Z, a figura 4.41 mostra a concentração de cinzas vulcânicas sobre o percurso do satélite, na esquerda análise e na direita previsão. O contorno previsão CPTEC para este caso foi gerado pela previsão do modelo global inicializado no dia 04/06 às 0 UTC .

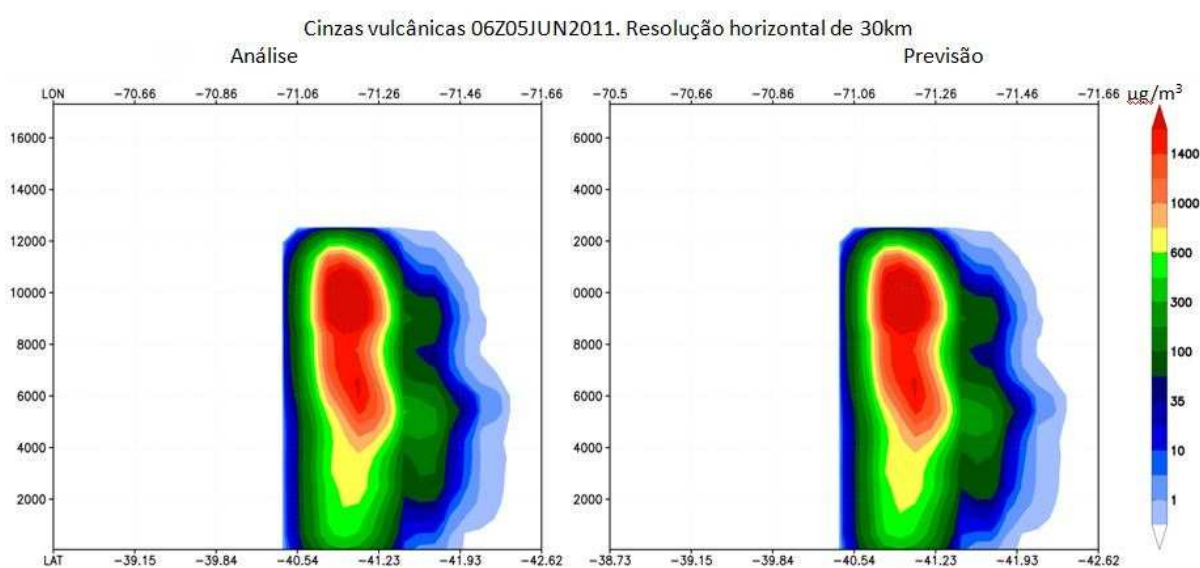


Figura 4.41: Perfil vertical da concentração de cinzas vulcânicas sobre o trajeto do satélite. Esquerda simulação utilizando análise CPTEC, direita previsão CPTEC.

A diferença da concentração de cinzas vulcânicas referentes à Figura 4.41 está representada na Figura 4.42.

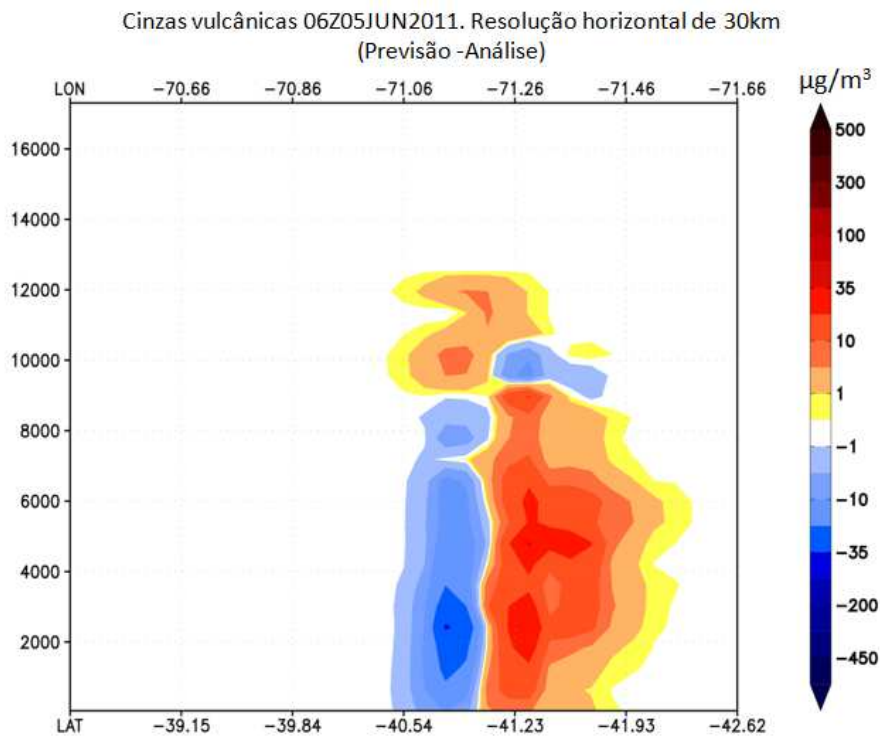


Figura 4.42: Diferença da concentração de cinzas vulcânicas, entre previsão e análise.

A Figura 4.43 mostra a diferença percentual entre previsão e análise para o caso estudado.

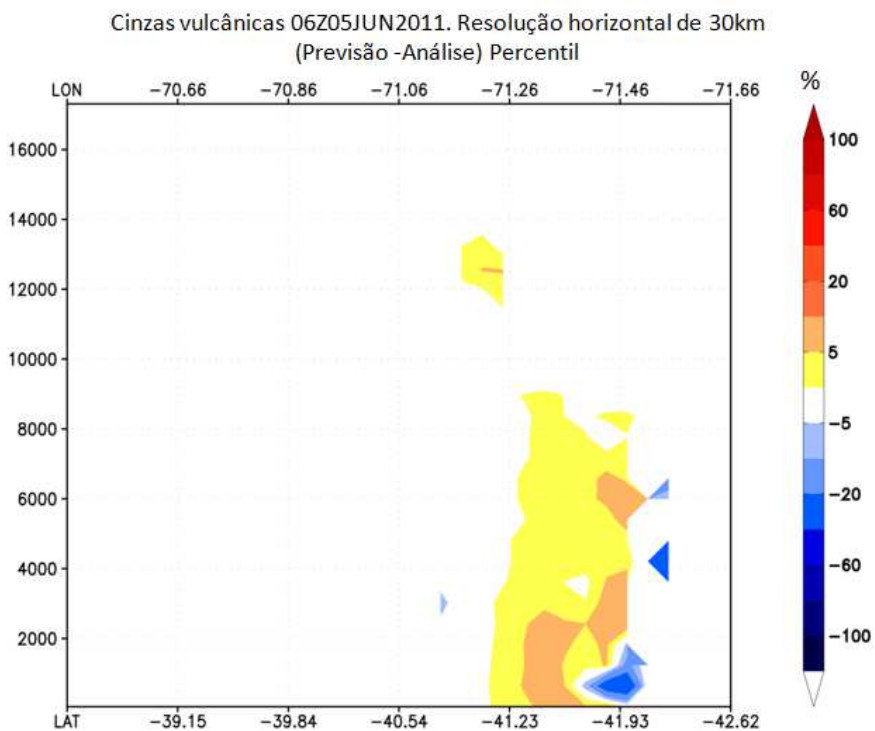


Figura 4.43: Diferença percentual entre previsão e análise para o caso estudado.

Na Figura 4.41, não possível ver diferenças significativas entre previsão e análise, porem ao fazer a diferença percebemos que a previsão colocou as cinzas em latitudes inferiores à detectada pelo satélite CALIPSO, mostrando que a análise é sutilmente mais precisa do que a previsão, como era de se esperar; porém a diferença percentual não ultrapassa 10% (cor laranja claro), logo, o modelo foi capaz de prever com relativa exatidão a posição e a concentração da pluma vulcânica em relação a utilizar borda análise.

Seria de grande proveito avaliar se o modelo foi capaz de prever a chegada de cinzas vulcânicas no Brasil. Pela imagem fornecida pelo DSA, Figura 4.44, pode-se observar a presença de cinzas vulcânicas sobre o litoral sul do país, principalmente sobre o litoral de Santa Catarina. Vale lembrar que as cinzas que se encontram abaixo das nuvens não são detectadas. Pelo fato do satélite CALIPSO ter ficado fora de operação nos dias 4/06/11 e dias 06/06 ao dia 14/06, não há dados dele para este evento.

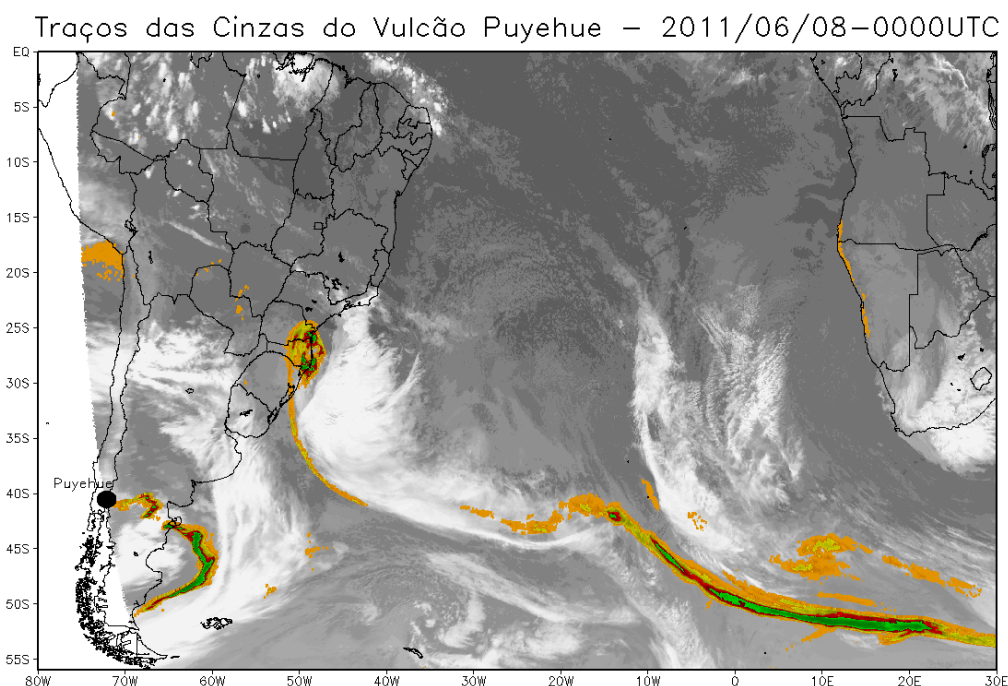


Figura 4.44: Imagem fornecida pelo DSA para o dia 08/06/11 às 0000UTC.

Na previsão, Figura 4.46, observa-se que as cinzas vulcânicas não chegam até o litoral norte de Santa Catarina, isto é enfatizada pela diferença percentual, Figura 4.48, que mostra valores na margem de -80 a -100% sobre o litoral norte de Santa Catarina, Paraná e São Paulo.

Quantidade de cinzas integrado na coluna atmosférica  
Análise, 00Z08JUN2011

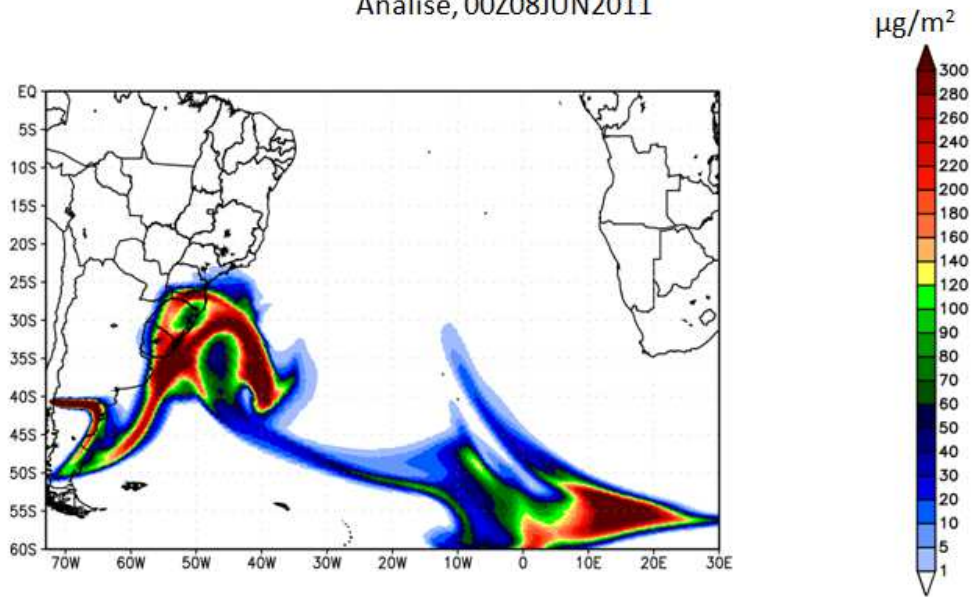


Figura 4.45: Quantidade de cinzas integrada na coluna atmosférica utilizando análise CPTEC.

Quantidade de cinzas integrado na coluna atmosférica  
Previsão para 00Z08JUN2011

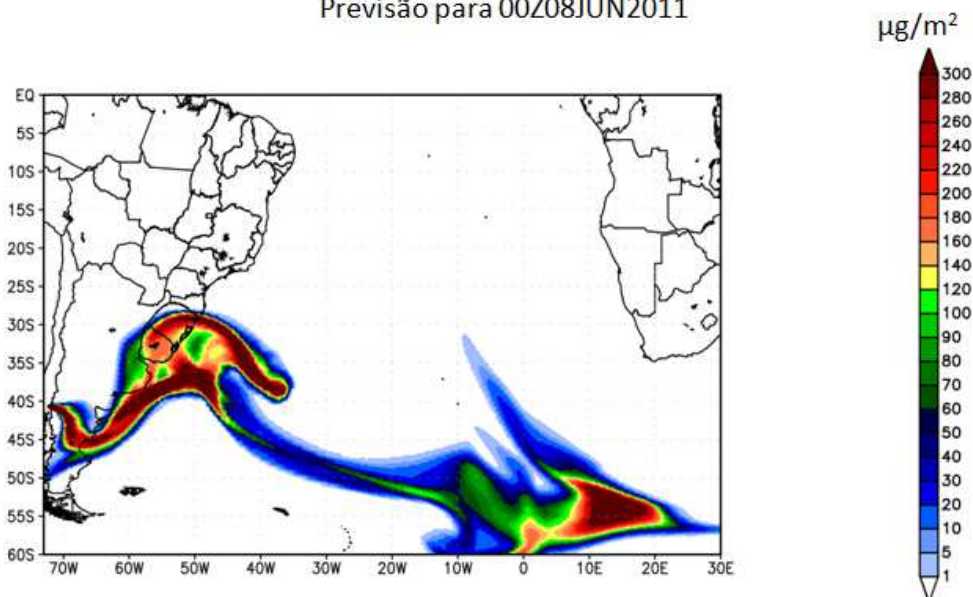


Figura 4.46: Quantidade de cinzas integrada na coluna atmosférica utilizando previsão CPTEC, previsão inicializado às 00Z do dia 04JUN2011.

Quantidade de cinzas integrado na coluna atmosférica  
(Previsão-Análise), 00Z08JUN2011

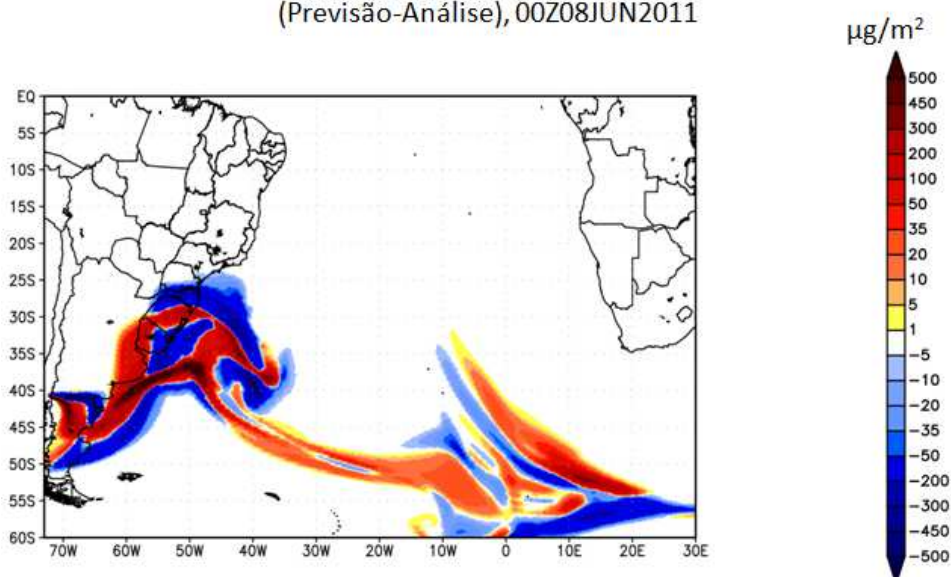


Figura 4.47: Quantidade de cinzas integrada na coluna atmosférica previsão menos Análise (Figura 4.49-Figura 4.48).

Quantidade de cinzas integrado na coluna atmosférica  
Previsão-Análise, diferença percentual, 00Z08JUN2011

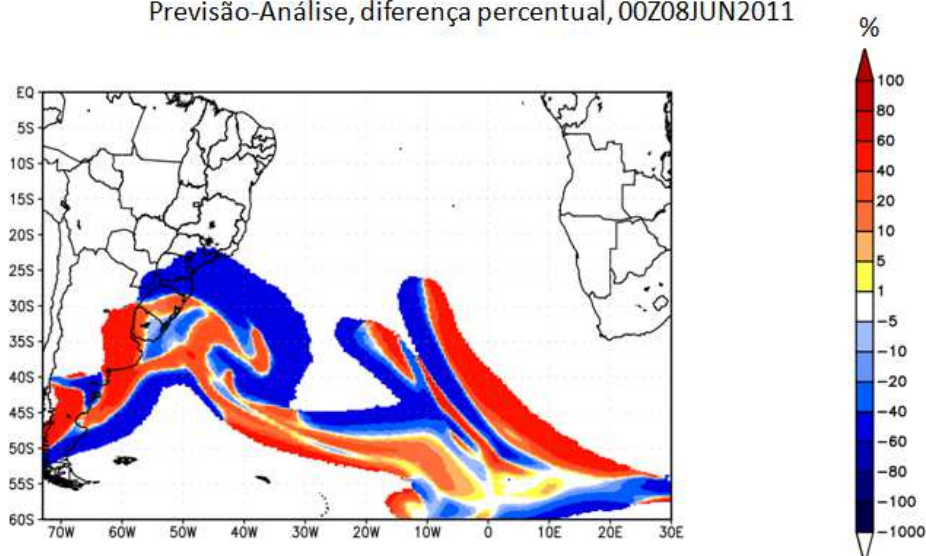


Figura 4.48: Diferença percentual da quantidade de cinzas integrada na coluna atmosférica, previsão menos Análise.

Concluí-se que o modelo BRAMS conseguiu fazer a previsão das cinzas vulcânicas com exatidão relativamente próximo ao vulcão, porem quando se analisou o caso em que as cinzas chegaram mais ao norte do continente sul americano, observou-se que utilizando região de contorno análise se mostrou superior a utilizar previsão. Com isto pode-se afirmar que é possível implementar um sistema emergencial capaz de monitorar e prever a posição das cinzas vulcânicas caso ocorra uma erupção.

### 4.3.5. Forma de assimilação:

Este experimento tem por finalidade verificar se a assimilação no centro (nudging no centro) melhora a resposta do modelo, e se há diferença entre uma assimilação fraca, 43200 segundos, ou mais forte, 3600 segundos. Foram feitas três simulações, cada uma com 30 km de resolução horizontal, 15 dias de simulação a começar pelo dia 04/06/11, diferenciando entre elas apenas à assimilação no centro com escalas de relaxação de 43200s, 3600s ou sem assimilação.

Primeiramente foi comparado entre a assimilação fraca e sem assimilação. Foi obtido que assimilação fraca é melhor, posteriormente foi comparado assimilação fraca e forte, foi obtido que assimilação forte é sutilmente melhor.

Os dados observados que foram utilizados para comparar com as simulações foram, imagens compostas fornecidas pelo DSA, e imagens do CALIPSO. Sobre os dados do CALIPSO, com o intuito de não gerar excesso de figuras no trabalho, foram analisados os casos já mencionados anteriormente.

No caso do dia 05/06/11 entre às 17:57 e 17:59Z, cujos dados observados pelo satélite CALIPSO são representados nas figuras 4.21 e 4.22, e o observado pelo produto DSA na figura 4.19; a figura 4.49 representa o obtido pelo modelo.

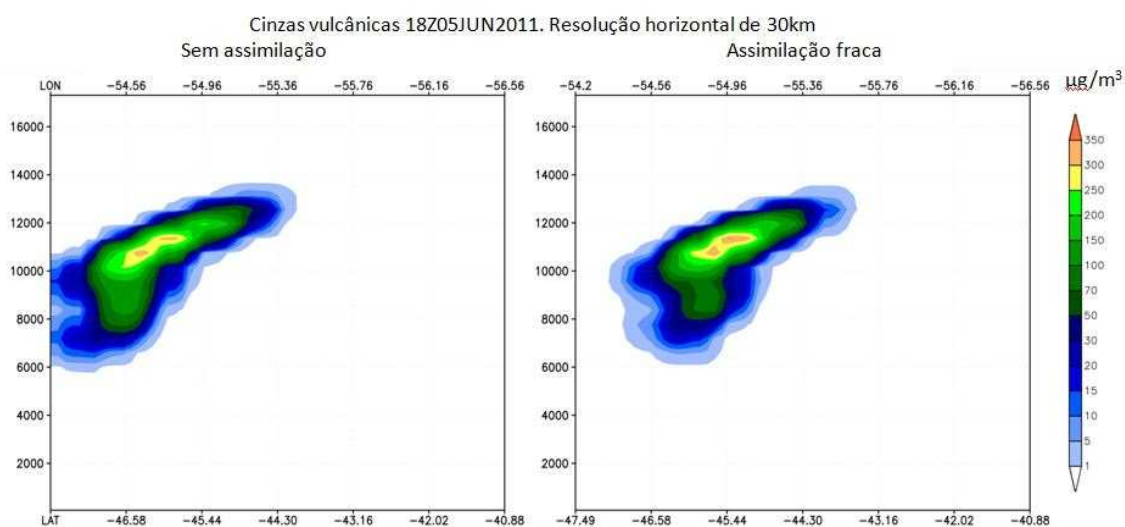


Figura 4.49: Perfil vertical da concentração de cinzas vulcânicas sobre a trajetória do satélite. Esquerda simulação sem assimilação no centro, direita com assimilação fraca no centro.



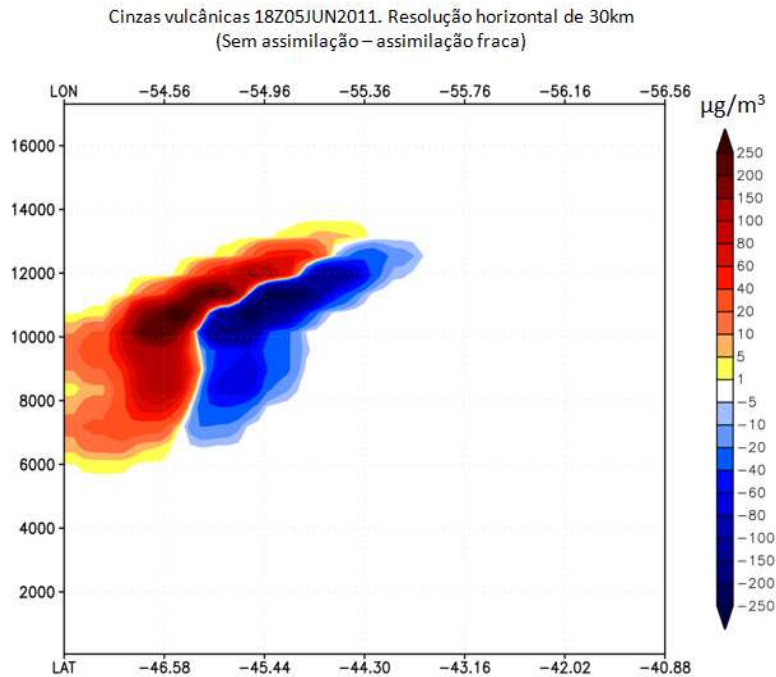


Figura 4.50: Diferença da concentração de cinzas vulcânicas, sem assimilação no centro menos assimilação fraca.

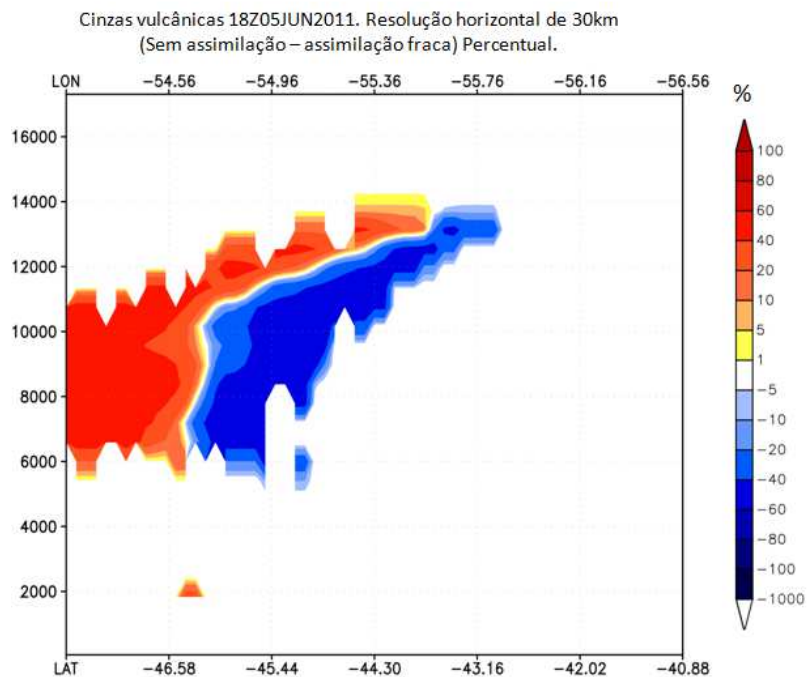


Figura 4.51: Diferença percentual da concentração de cinzas vulcânicas, sem assimilação no centro menos assimilação fraca.

Comparando as Figuras 4.49 a 4.51 com o observado, Figuras 4.21 e 4.22, vemos claramente que houve uma melhora da posição da pluma simulada em relação ao observado pelo satélite CALIPSO, logo, para este caso, houve

melhora perceptível utilizando-se assimilação no centro do domínio do modelo de transporte.

Para o caso das 06Z do dia 05/06/11, cujos dados observados pelo satélite CALIPSO está representado na Figura 4.27, e o observado pelo produto DSA Figura 4.25; e o obtido pelo modelo está representado na Figura 4.52.

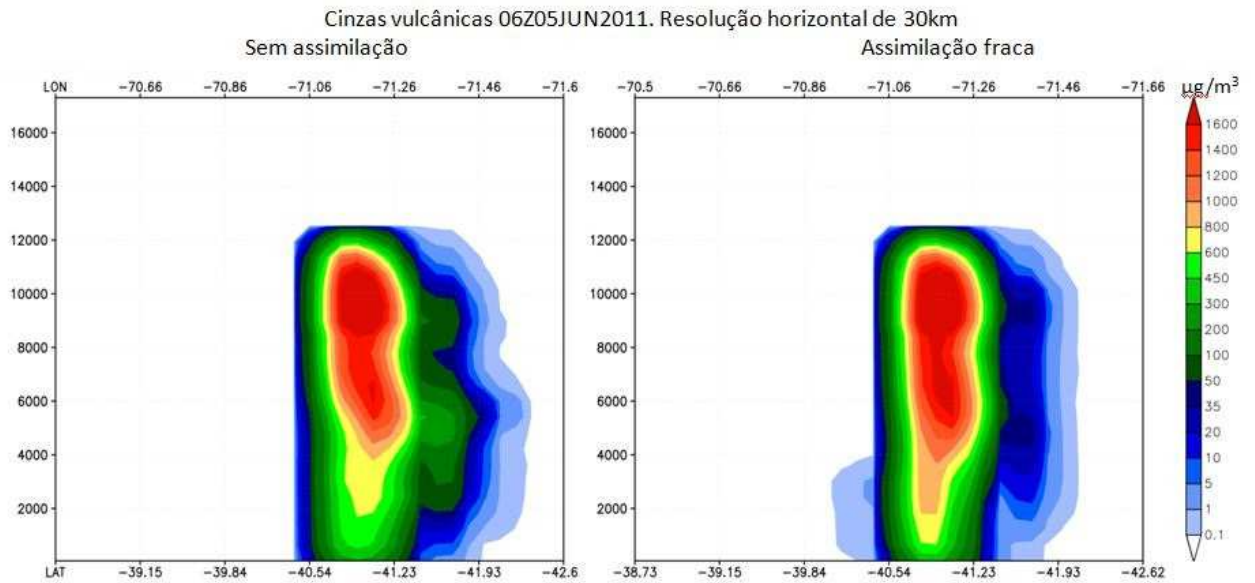


Figura 4.52: Perfil vertical da concentração de cinzas vulcânicas. Esquerda, simulação sem assimilação no centro, direita assimilação fraca no centro.

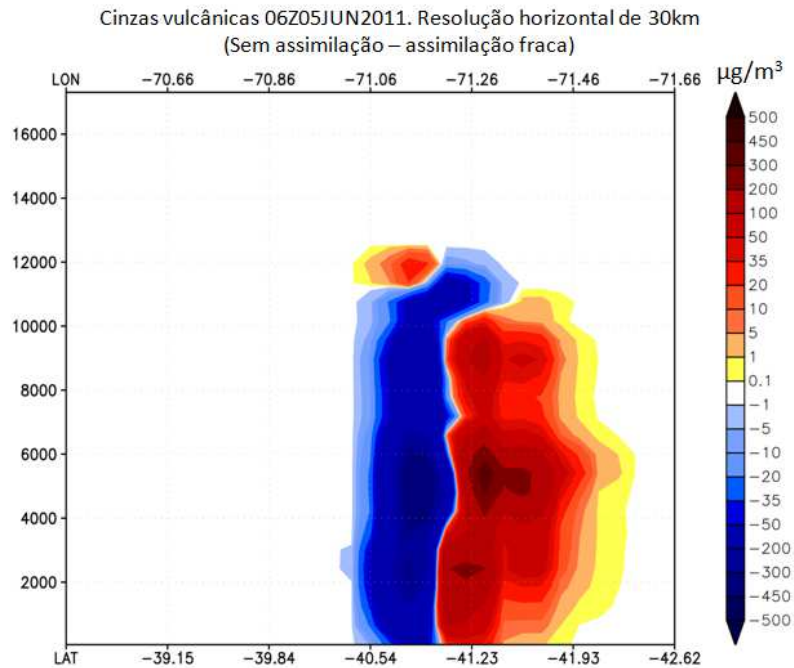


Figura 4.53: Diferença da concentração de cinzas vulcânicas, sem assimilação no centro menos assimilação fraca.

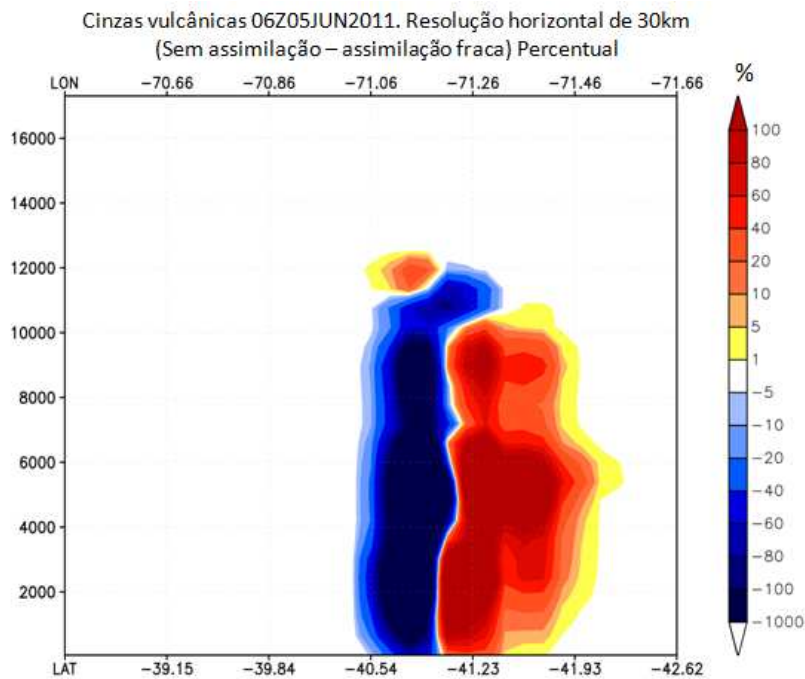


Figura 4.54: Diferença percentual da concentração de cinzas vulcânicas, sem assimilação no centro menos assimilação fraca.

Comparando as figuras 4.52 a 4.54 com o observado, figura 4.27, vemos claramente que houve melhora da posição da pluma simulada em relação a observada pelo satélite CALIPSO, logo houve melhora utilizando assimilação central.

A seguir será analisado se há melhora ao aumentar a força da assimilação central de 43200 segundos para 3600 segundos.

Analisando o caso do dia 05 de junho de 2011 entre às 17:57 e 17:59, a Figura 4.55 mostra a concentração de cinzas obtido pelo modelo para o trajeto do CALIPSO. A esquerda da figura utilizando assimilação no centro forte, e a direita da figura utilizando assimilação no centro fraca.

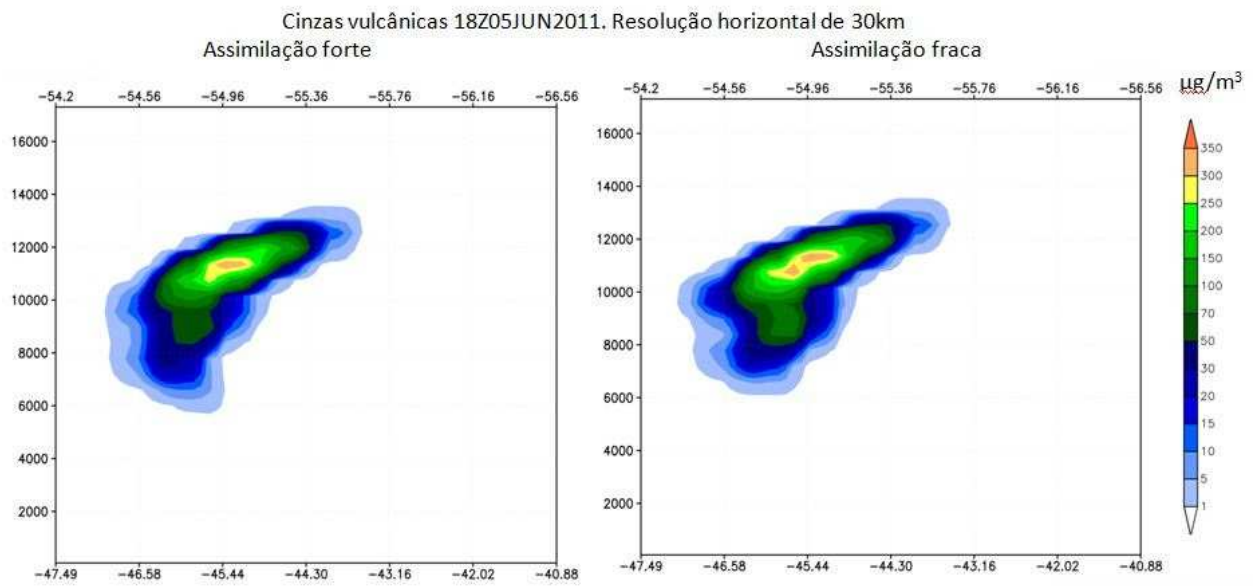


Figura 4.55: Perfil vertical da concentração de cinzas vulcânicas sobre a trajetória do satélite. Esquerda simulação com assimilação no centro forte, direita assimilação no centro fraca.

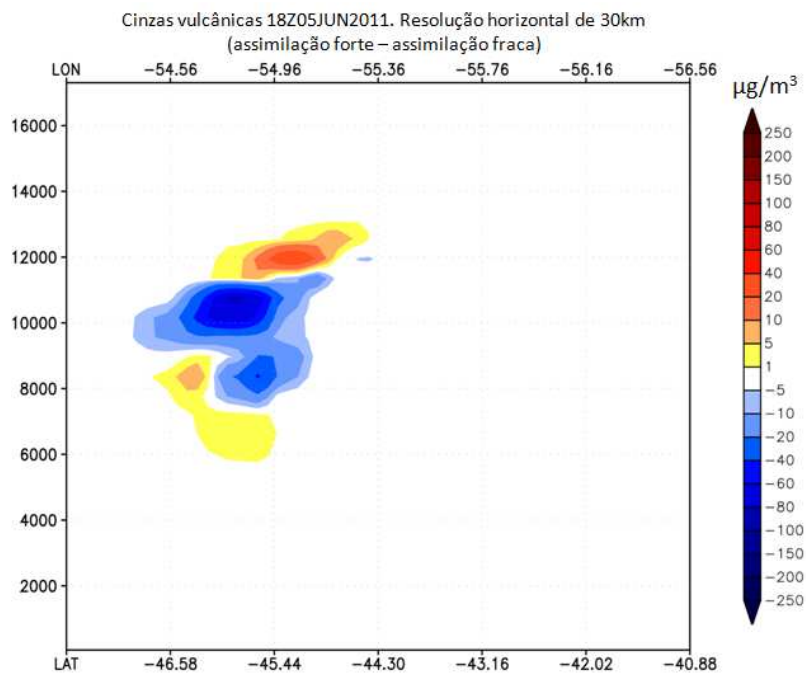


Figura 4.56: Diferença da concentração de cinzas vulcânicas, assimilação forte menos assimilação fraca.

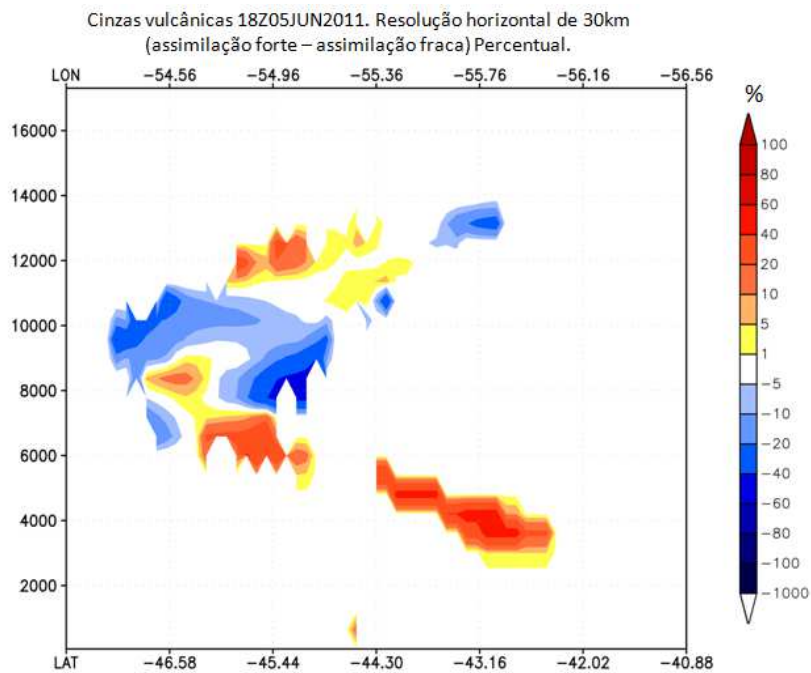


Figura 4.57: Diferença percentual da concentração de cinzas vulcânicas, assimilação forte menos assimilação fraca.

Na Figura 4.57 há uma grande diferença percentual em uma região que não apresenta diferença nenhuma, Figura 4.56; isto se deve a diferença entre ruídos da ordem infinitesimal, que ao se fazer a diferença percentual estes ruídos aparecem.

Ao observar as Figuras 4.56 e 4.57, vemos uma aleatoriedade na diferença, isto indica que para este caso não há ganhado significativos na resposta do modelo ao aumentar a força de assimilação.

A seguir a mesma análise para o caso do dia 05/06/11 das 05:59 às 06:00Z, a figura 4.63 mostra o valor de concentração obtido pelo modelo para este caso.

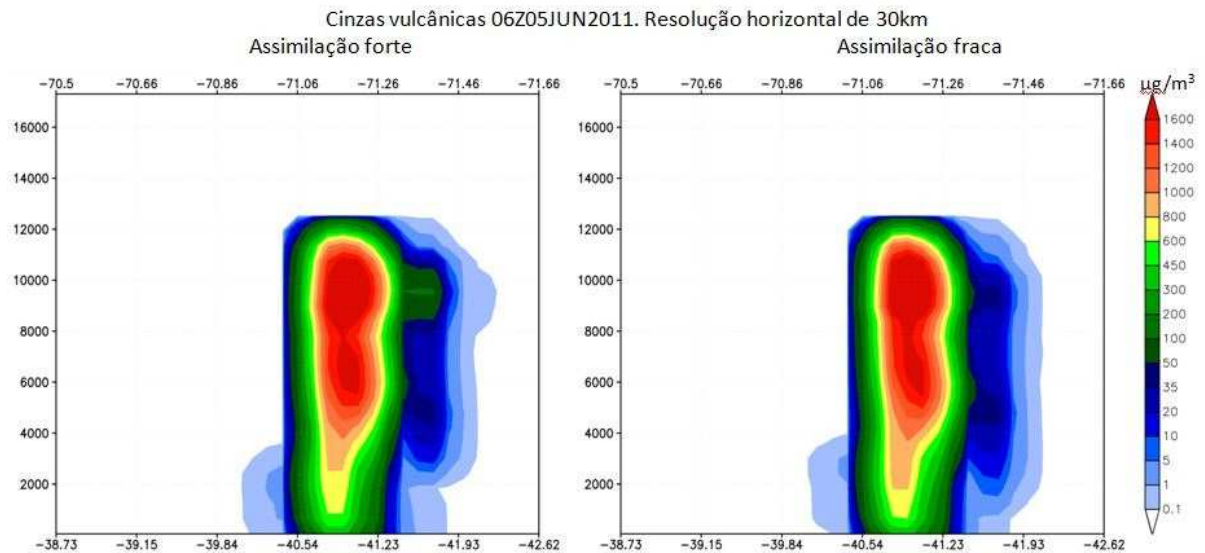


Figura 4.58: Perfil vertical da concentração de cinzas vulcânicas sobre a trajetória do satélite. Esquerda simulação com assimilação forte, direita assimilação fraca.

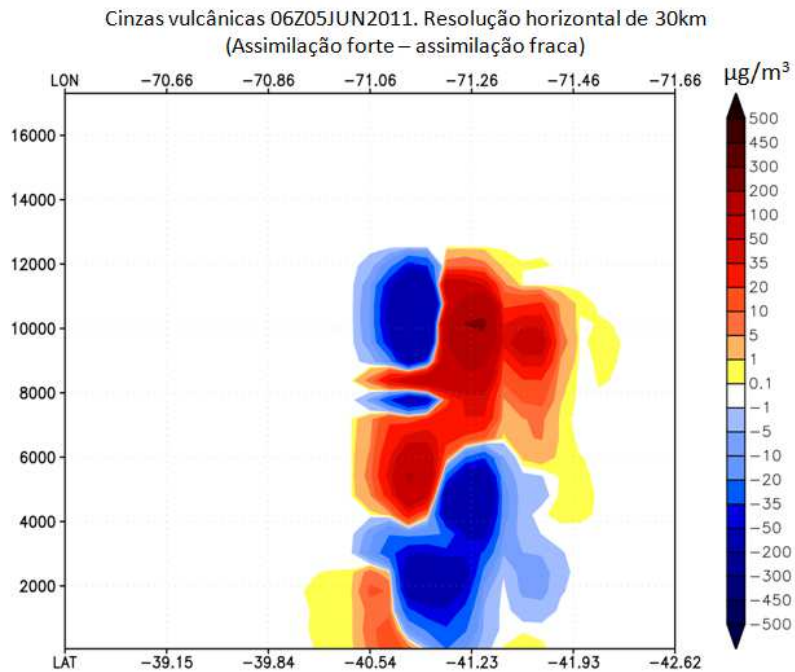


Figura 4.59: Diferença da concentração de cinzas vulcânicas, assimilação forte menos assimilação fraca.

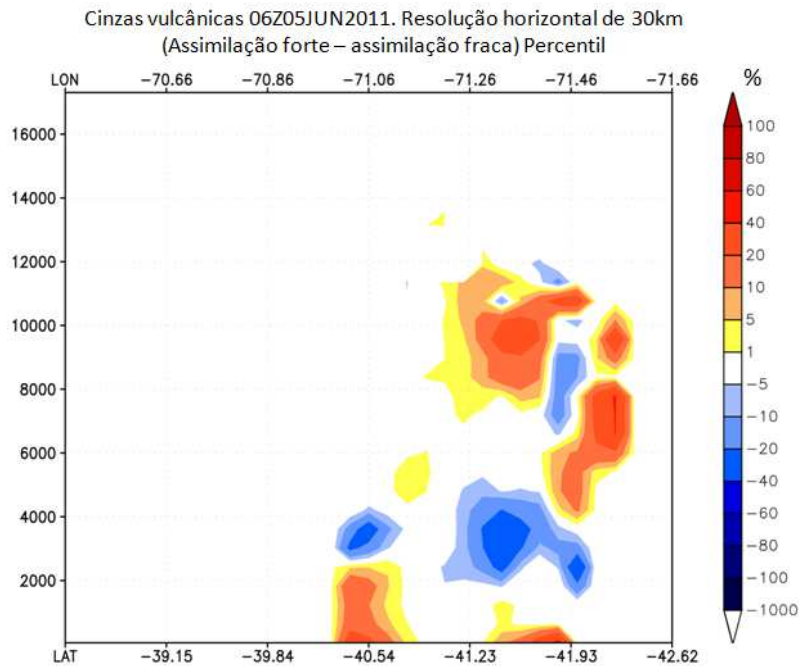


Figura 4.60: Diferença percentual da concentração de cinzas vulcânicas, assimilação forte menos assimilação fraca.

Ao observar a aleatoriedade das variações, olhe Figuras 4.59 e 4.60, podemos concluir que não há diferença significativa entre utilizar assimilação forte ou fraca para este caso.

Com o intuito de averiguar qual o melhor tipo de assimilação, foi procurado um caso extremo. Observando as imagens fornecidas pelo DSA, no dia 08/06/11 às 06Z, figura 4.66, podemos ver dois eventos interessantes nesta imagem, um é a convergência de cinzas vulcânicas abaixo da África do Sul, em torno da latitude  $50^{\circ}$  sul e longitude  $20^{\circ}$  leste, e outro é uma frente fria sobre o sul de Minas Gerais e Rio de Janeiro. As cinzas vulcânicas acompanharam a zona de convergência da frente fria, porém, devido velocidade terminal das cinzas estas desceram para a altitude em que se encontram as nuvens impedindo assim que sejam detectadas pelo produto da DSA.

Traços das Cinzas do Vulcão Puyehue – 2011/06/08–0600UTC

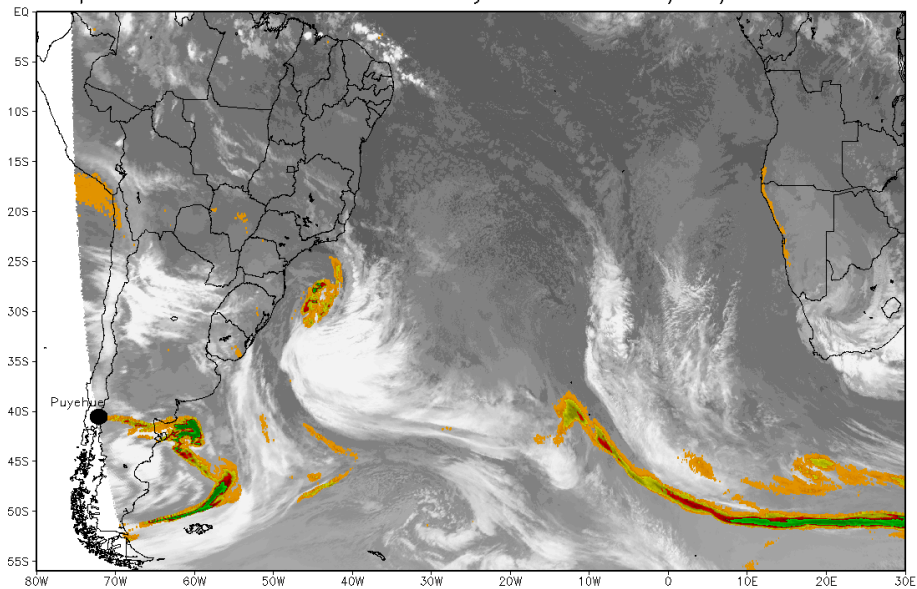


Figura 4.61: Imagem fornecida pelo DSA relativo ao dia 08 junho de 2011 às 06UTC.

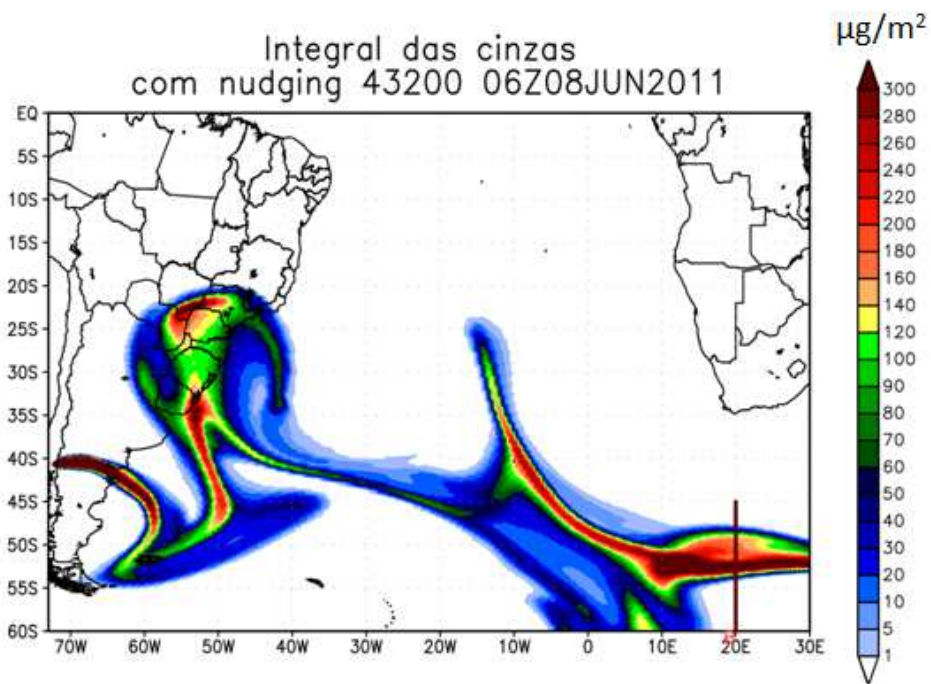


Figura 4.62: Integral das cinzas vulcânicas na coluna atmosférica utilizando assimilação fraca no centro.



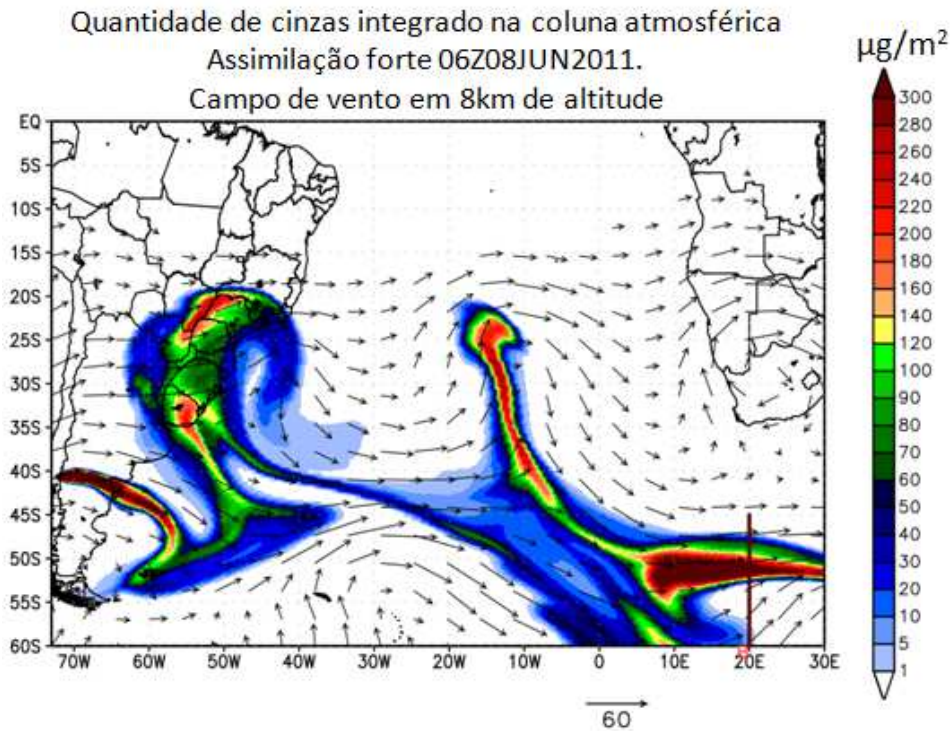


Figura 4.63: Integral das cinzas vulcânicas na coluna atmosférica em  $\mu\text{g}/\text{m}^2$  utilizando assimilação forte no centro e campo de ventos à 8km de altitude.

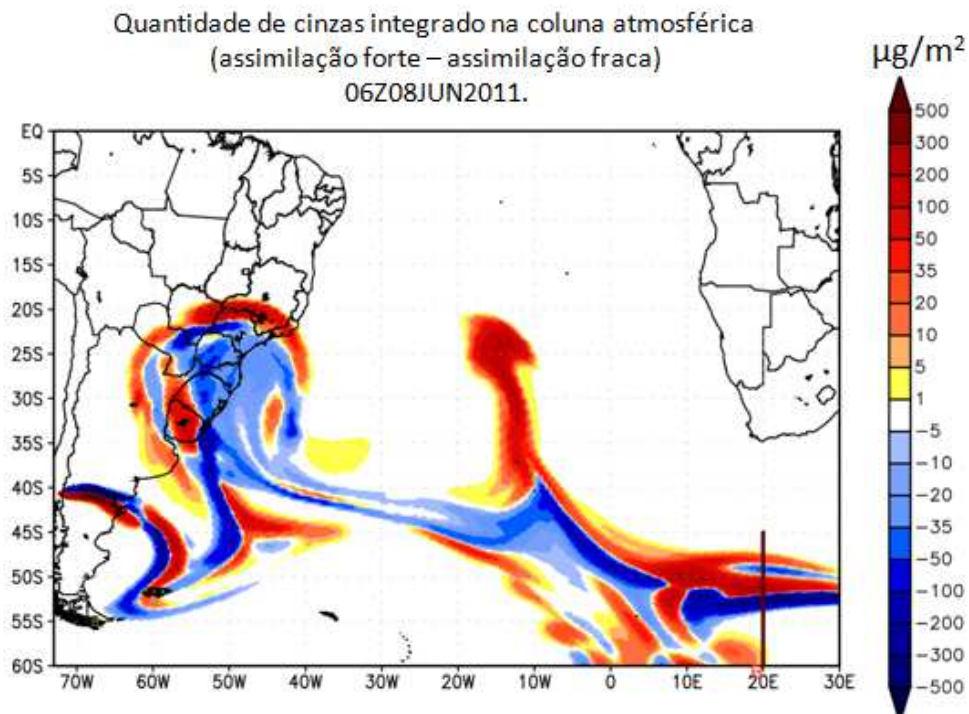


Figura 4.64: Diferença da Integral das cinzas vulcânicas na coluna atmosférica utilizando assimilação forte no centro menos utilizando assimilação fraca.

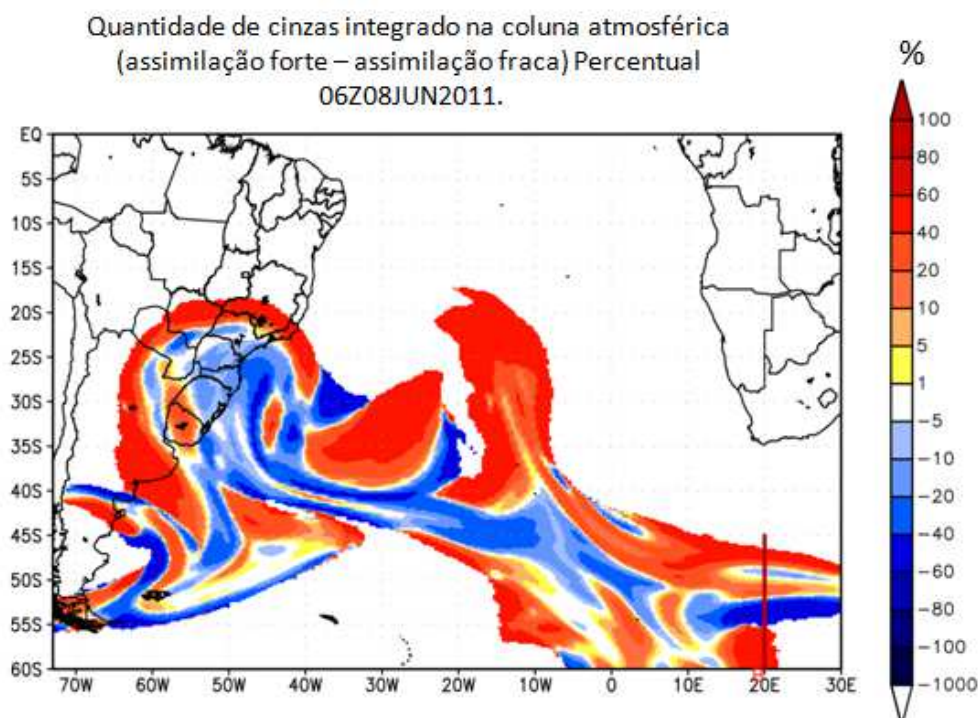


Figura 4.65: Diferença percentual da Integral das cinzas vulcânicas na coluna atmosférica utilizando assimilação forte no centro menos utilizando assimilação fraca.

Comparando o resultado do modelo, Figuras 4.62 a figura 4.65 com o observado, Figura 4.61, podemos observar que utilizando assimilação forte as cinzas foram advectadas mais ao norte, tanto sobre a região de convergência ao Sul da África como no cavado da frente fria sobre a América do Sul. Ao colocar as cinzas mais ao norte sobre estas regiões o modelo ficou mais próximo do observado pelo satélite mostrando que assimilação forte é melhor do que assimilação fraca.

Análise do perfil vertical de cinzas sobre a linha B desenhada nas figuras de 4.62 a 4.65.

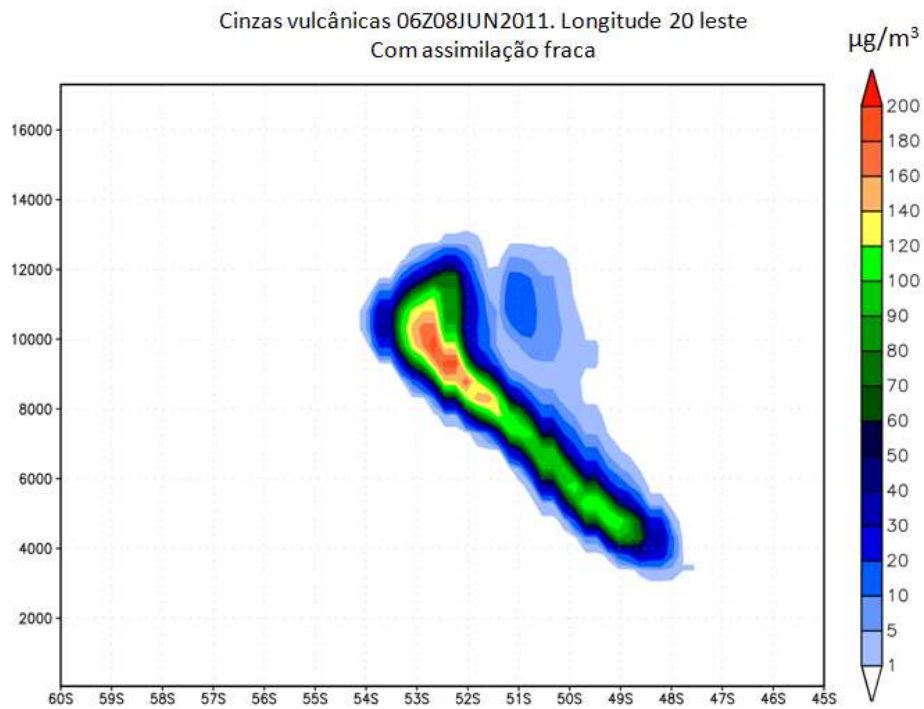


Figura 4.66: Perfil vertical das cinzas vulcânicas sobre o trajeto B referente à Figura 4.62.

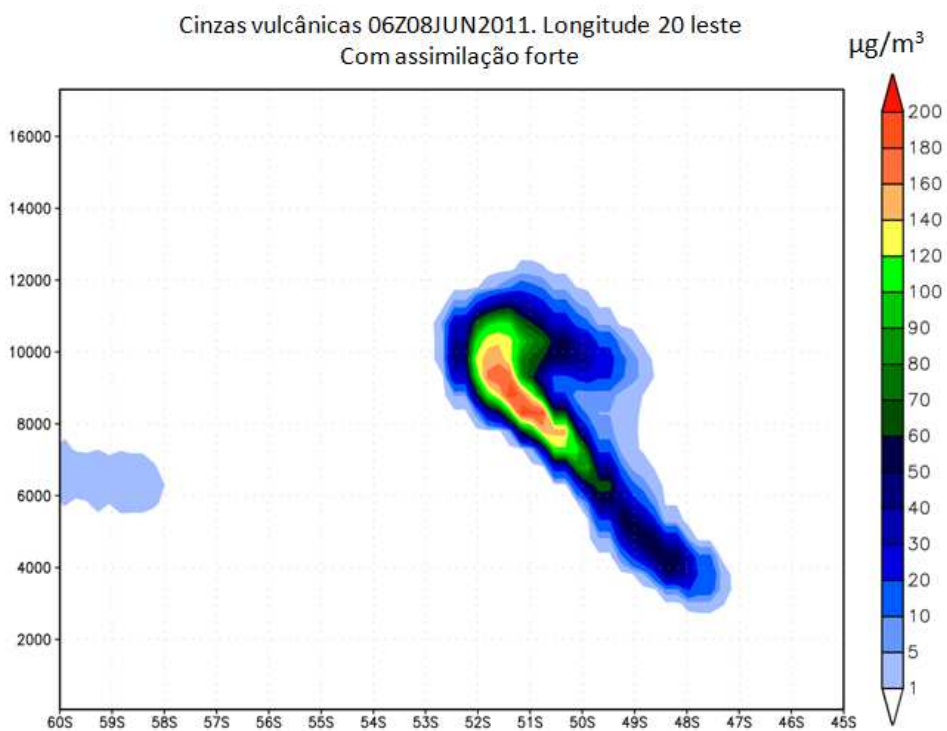


Figura 4.67: Perfil vertical das cinzas vulcânicas sobre o trajeto B referente à Figura 4.63.

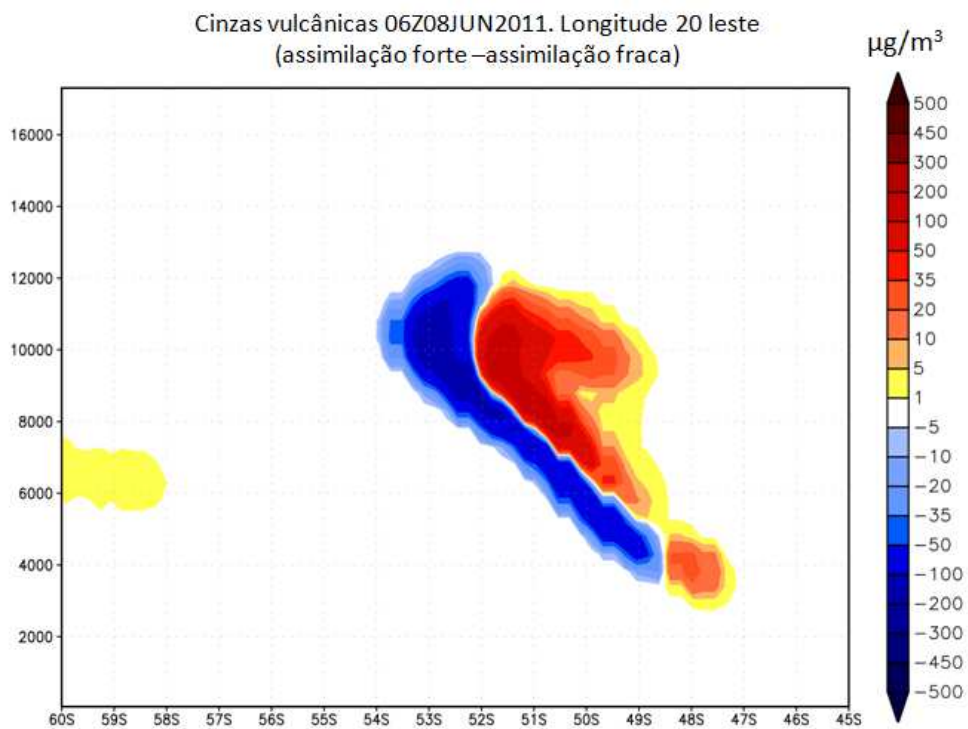


Figura 4.68: Diferença do perfil vertical das cinzas vulcânicas, referente ao trajeto B da Figura 4.64.

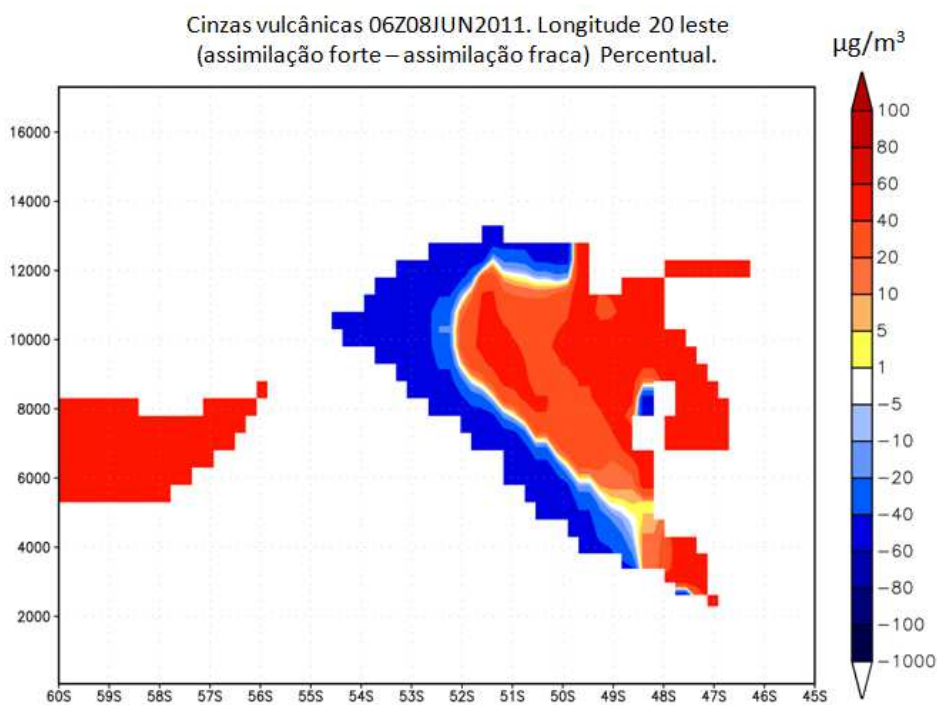


Figura 4.69: Diferença percentual do perfil vertical das cinzas vulcânicas, referente ao trajeto B da Figura 4.65.

Pelas Figuras 4.68 e 4.69, podemos observar que as cinzas foram deslocadas um pouco mais ao norte, aproximando-se mais do obtido pelo satélite, Figura

4.61. Logo, a assimilação forte foi sutilmente superior em precisão do que assimilação fraca.

Conclui-se que ao utilizar assimilação no centro houve uma melhora significativa, e ao aumentar a frequência de assimilação no centro de 43200 segundos (fraca) para 3600 segundos (forte) houve uma melhora sutil em relação aos dados observados pelos satélites CALIPSO e Meteosat-8 (imagens fornecidas pelo DSA-INPE).



## 5 DESENVOLVIMENTO DO ENSEMBLE DE DISPERSÃO DE CINZAS E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS SIMULADOS

### 5.1. Introdução:

Este experimento tem por finalidade fazer um ensemble (conjunto) de simulações de dispersão das cinzas vulcânicas e avaliar os resultados simulados. O ensemble foi possível devido à incerteza na correlação entre altura de injeção e taxa de emissão, olhe capítulos 4.1.2 deste trabalho.

Para este experimento foram utilizadas as melhores configurações encontradas até o presente momento, são elas:

- Tipo de advecção: monotônico
- Condição de contorno: apenas as análises do CPTEC
- Modo de assimilação no centro do domínio do modelo: forte (3600s)

Foram feitas três simulações, cada uma com 30 km de resolução horizontal, 40 dias de simulação a começar pelo dia 04 de junho de 2011, diferenciando entre elas apenas o valor de entrada; valores máximo, médio e mínimo de altura de injeção e taxa de emissão.

Após fazer as simulações por ensemble e comparar os resultados com os dados observados foram observadas algumas inconsistências em relação aos dados observados. Foram reavaliados todos os cálculos relativos à velocidade terminal e cálculo da quantidade de cinzas sedimentadas e também foram feitos novos levantamentos bibliográficos. Nestes novos levantamentos bibliográficos foram observados que segundo o U.S. Geological Survey<sup>6</sup>, a densidade das cinzas vulcânicas variam de 500 a 1300 kg/m<sup>3</sup> quando secas, e de 1000 a 2000 kg/m<sup>3</sup> quando molhadas e compactadas; e segundo Barbaro L., (2012), a densidade das cinzas ejetadas pelo vulcão Puyehue em 2011 variaram de 750 a 903 kg/m<sup>3</sup>; estes valores de densidade são mais condizentes do que utilizar a densidade do magma, obtido em Bursik et al. (2009), logo a densidade das cinzas vulcânicas foi alterada para 900 kg/m<sup>3</sup>.

---

<sup>6</sup> Vide bibliografia “volcanic ash: effects & mitigations strategies, buildings”

Após fazer estas correções no código do modelo, foram refeitos os experimentos.

## 5.2. Avaliação dos resultados modelados utilizando dados de satélite.

Para o caso das 18Z do dia 05 de junho de 2011, cujos dados fornecidos pelo satélite CALIPSO estão representados nas Figuras 4.11, 4.15 e 4.16; e o produto DSA pela Figura 4.13; a Figura 5.1 representa o perfil vertical de cinzas na atmosfera para cada caso, utilizando os valores máximo, médio e mínimo respectivamente.

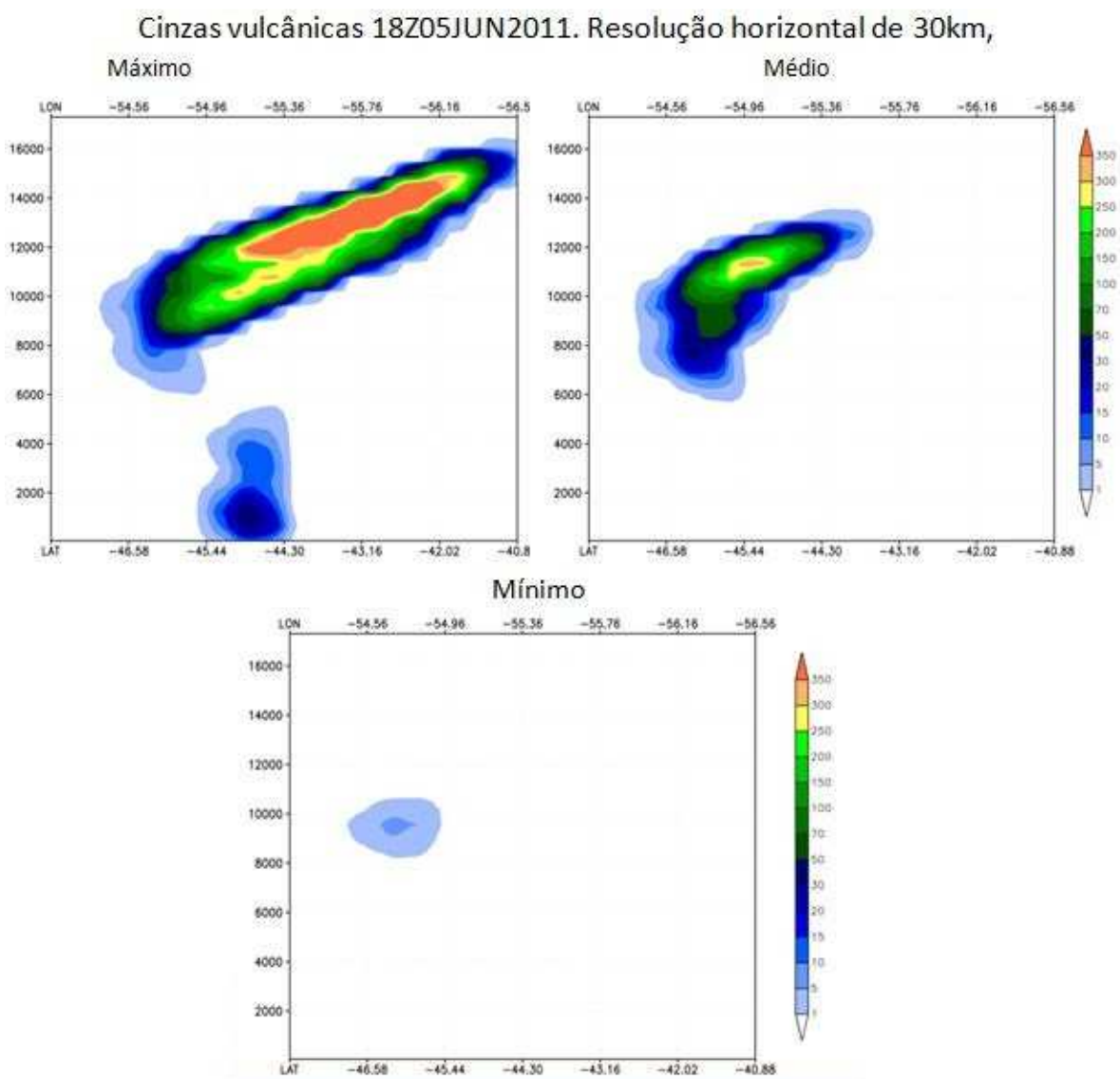


Figura 5.1: Concentração de cinzas vulcânicas em  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  sobre o trajeto do CALIPSO. Simulação utilizando valores máximo, médio e mínimo para altura de injeção e taxa de emissão.



Comparando-se a posição da pluma simulada, Figura 5.1, com o observado pelo satélite, Figuras 4.15 e 4.16, observa-se claramente que o valor médio obteve melhor resultado para este caso.

Para o caso das 06Z do dia 05/06/11, cujos dados observados pelo satélite CALIPSO estão representados pelas Figuras 4.17 e 4.22; e o produto DSA pela Figura 4.19; a Figura 5.2 representa o perfil vertical de cinzas na atmosfera para cada caso, utilizando os valores máximo, médio e mínimo respectivamente.

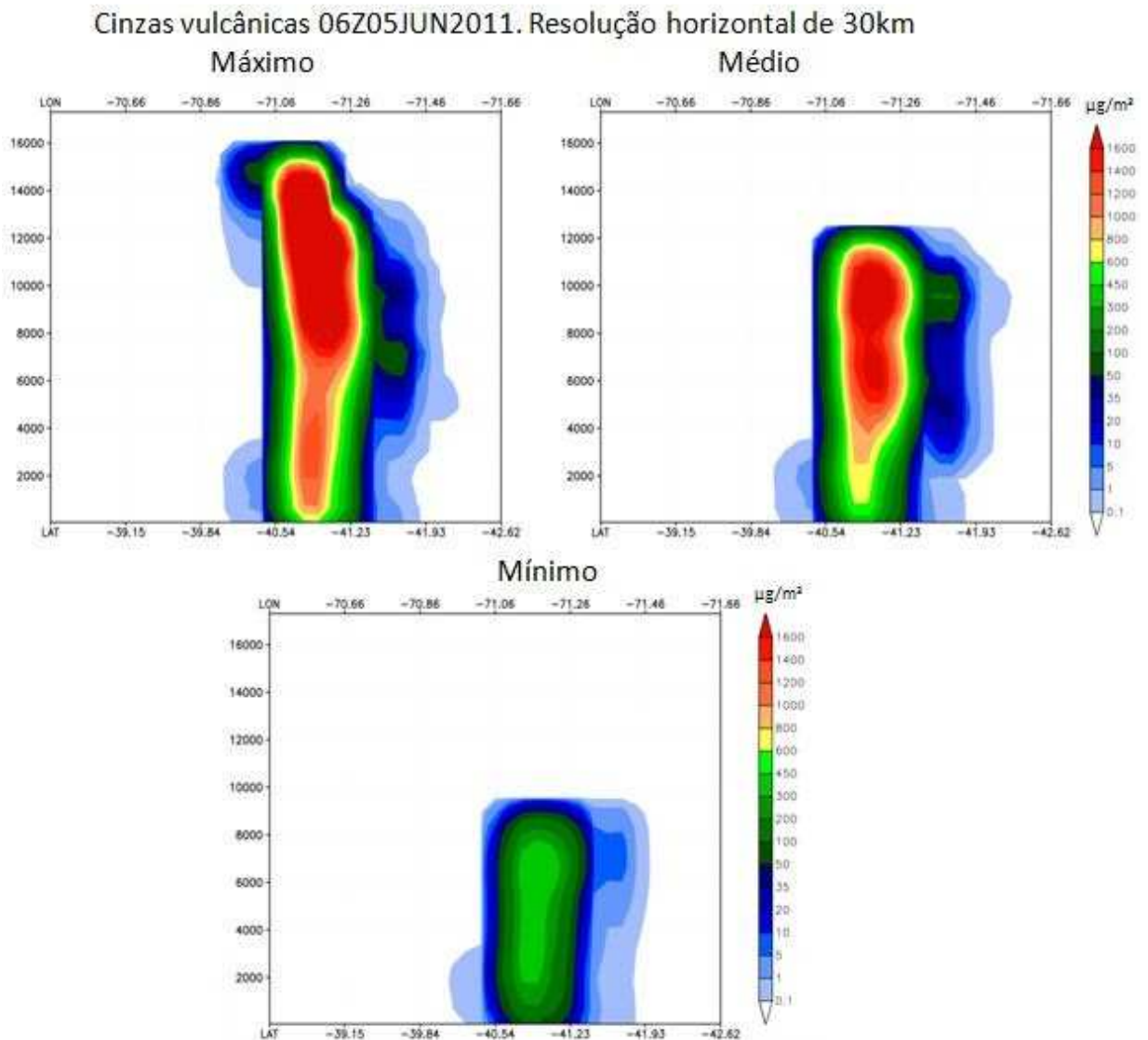


Figura 5.2: Concentração de cinzas vulcânicas em  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  sobre o trajeto do CALIPSO. Simulação utilizando valores máximo, médio e mínimo para altura de injeção e taxa de emissão.

Comparando a altura de injeção obtida pelo CALIPSO, Figura 4.22, obtemos evidentemente que o valor médio mostrou melhor resultado.

No dia 07/06/11 a imagem fornecida pelo DSA, Figura 5.3, mostra que neste momento as cinzas que se encontram em altas altitudes estão beirando a divisa entre Paraguai e Argentina e passam rente ao Uruguai. Sabe-se que estas cinzas estão altas, pois estão acima das nuvens, senão não seriam detectadas; e ao analisar o deslocamento da pluma observando um conjunto de imagens, foi possível observar que estas cinzas acompanham o campo de vento referente ao campo de vento do modelo a 10 a 11 km de altura. Não há dados do CALIPSO neste dia, pois ele estava fora de operação.

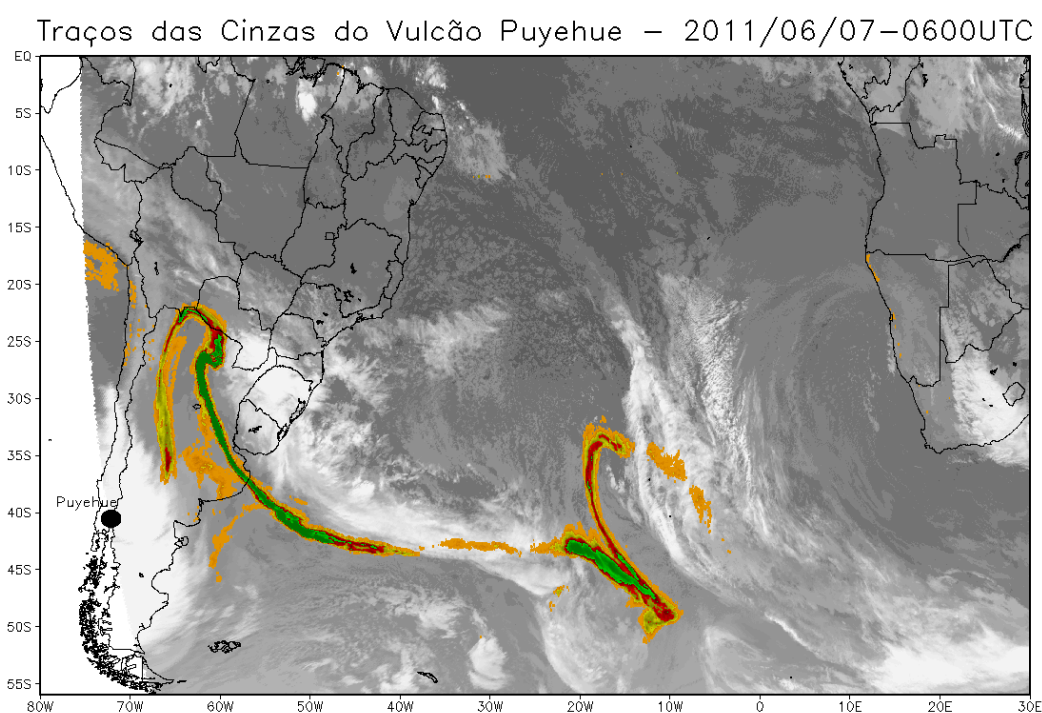


Figura 5.3: Imagem fornecida pelo DSA relativo ao dia 07 de junho de 2011 às 06Z.

Comparando a Figura 5.3 com a 5.4, podemos ver que o valor mínimo foi o que mais se distanciou do observado; já o valor máximo se mostrou melhor do que o valor médio, pois chegou mais próximo do Paraguai e passou rente ao Uruguai.

Quantidade de cinzas integrado na coluna atmosférica data: 06Z07JUN2011

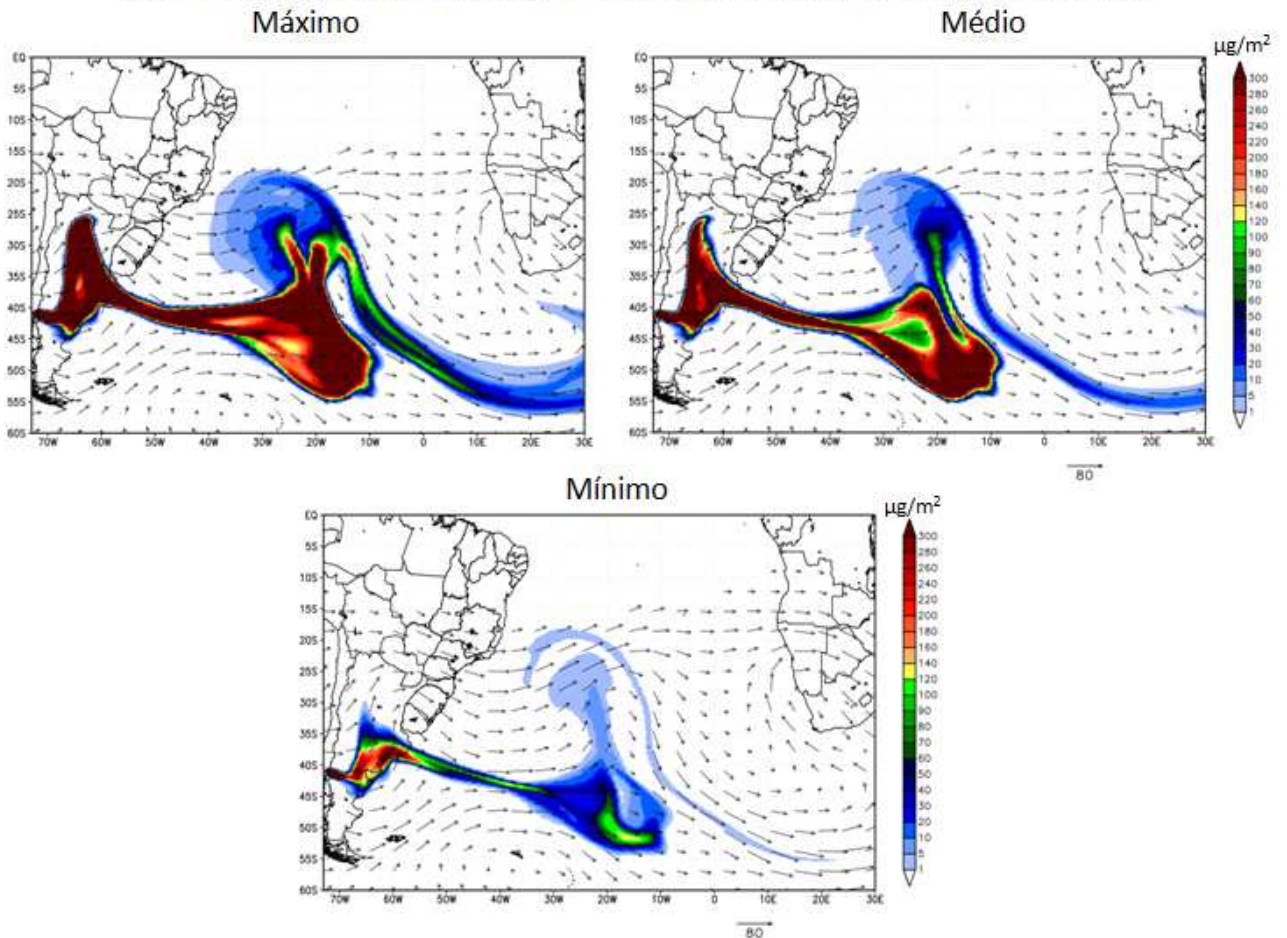


Figura 5.4: Integral das cinzas vulcânicas na coluna atmosférica. Ensemble com valores máximo, médio e mínimo.

Pelo fato do ensemble de valor mínimo se distanciar mais do observado que os outros, iremos comparar apenas a diferença entre os ensembles de valor máximo e o de valor médio Figuras 5.5 e 5.6.

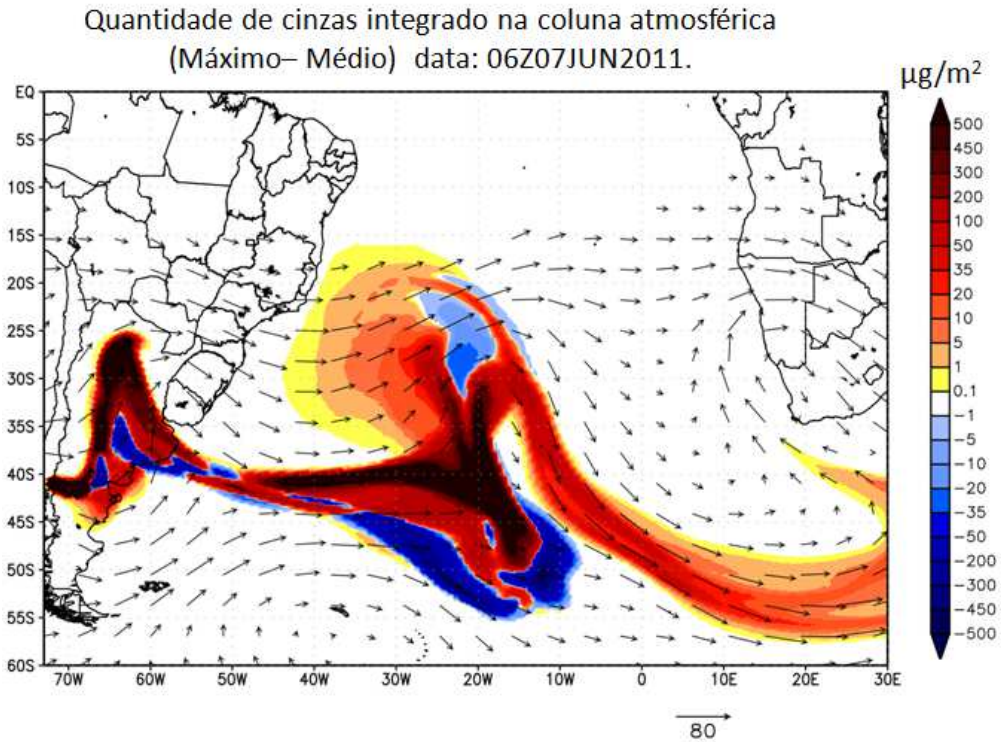


Figura 5.5: Diferença da concentração de cinzas vulcânicas integrado na coluna atmosférica, valor máximo – valor médio.

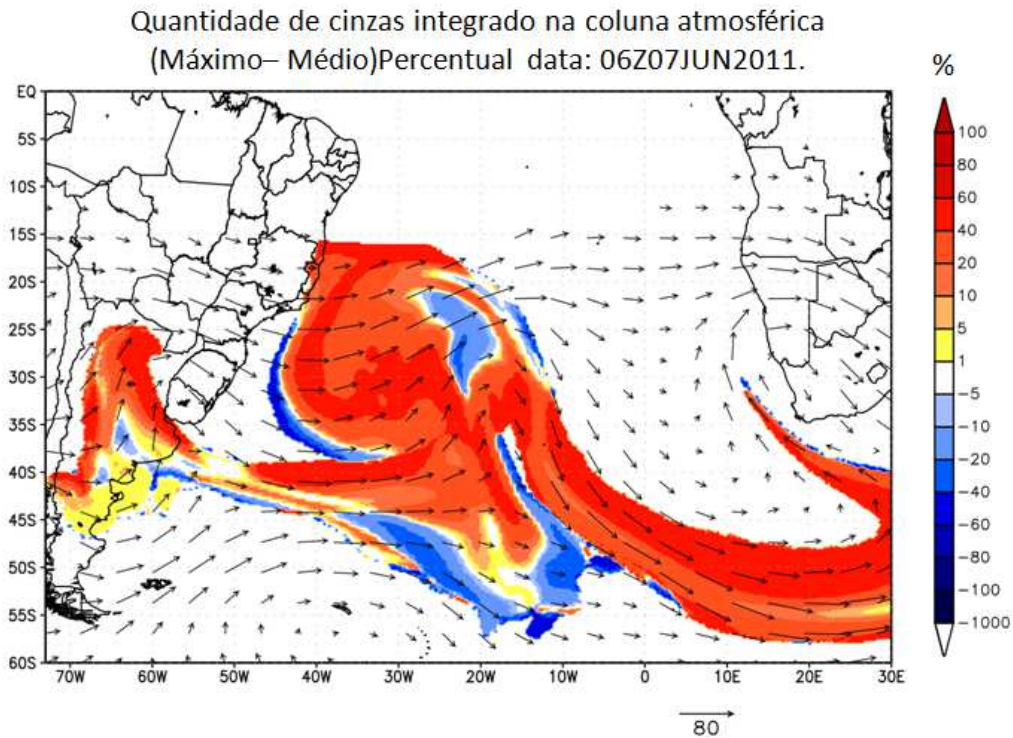


Figura 5.6: Diferença percentual da concentração de cinzas vulcânicas integrado na coluna atmosférica, valor máximo – valor médio.

Analisando as Figuras 5.5 e 5.6 é inferido que utilizando o valor máximo as cinzas foram deslocadas mais ao norte, ficando sutilmente mais próximo ao observado.

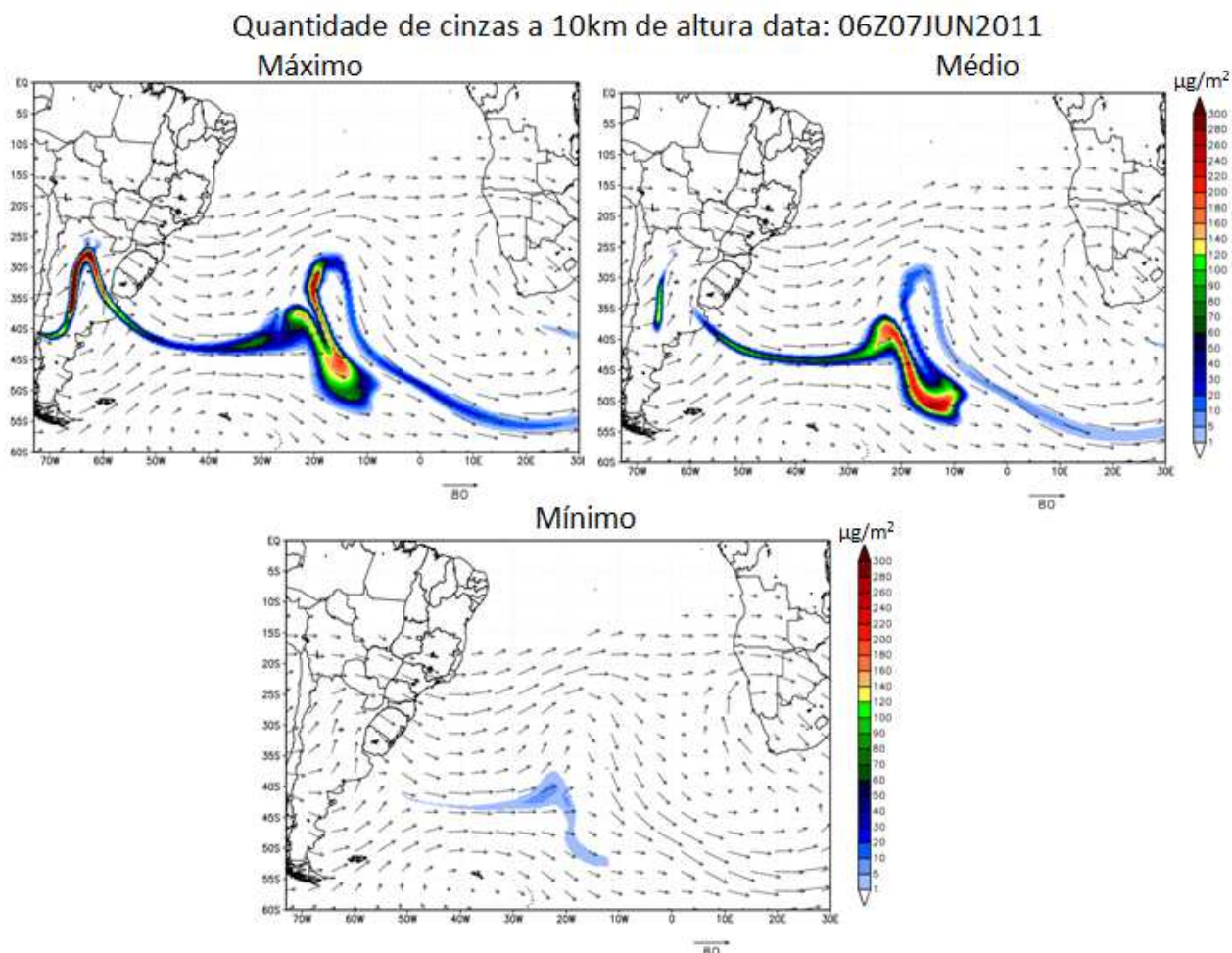


Figura 5.7: Ensemble da concentração de cinzas a 10 km de altura.

Ao olharmos somente as cinzas presentes a 10 km de altura, observamos que as cinzas de ensemble médio e máximo apresentaram um comportamento muito parecido com as cinzas detectadas pelo DSA, Figura 5.7. O valor máximo se comporta mais próximo ao observado, pois as cinzas passam mais rentes ao Uruguai e há maior presença de cinzas no interior da Argentina. Podemos concluir que para este caso o valor máximo se mostrou mais próximo ao observado, mostrando que o ensemble é de grande valia.

A Figura 5.8 se refere ao caso do caso do dia 08 de junho de 2011 às 06Z e apresenta a integral da concentração de cinzas vulcânicas na coluna atmosférica. Comparando-a com o observado pelo DSA, Figura 4.66, conclui-se que o valor mínimo não condiz com o observado, pois não há cinzas em

torno de 45° oeste com 32° sul. Pela Figura 5.8 não é possível avaliar entre a máxima e a média qual se aproxima mais com o observado, mesmo analisando a diferença e a diferença percentual, Figuras 5.9 e 5.10 respectivamente.

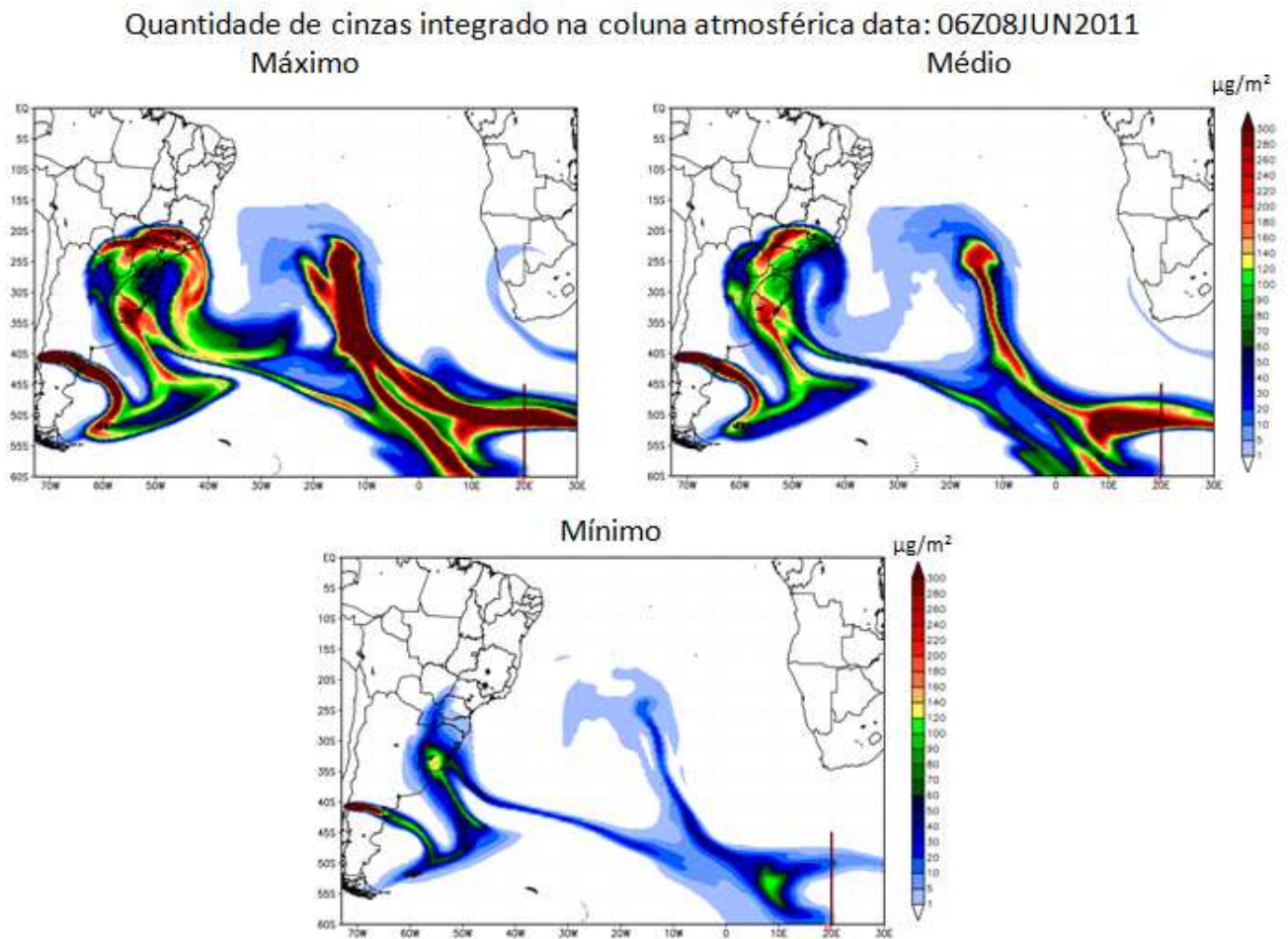


Figura 5.8: Ensemble da integral de cinzas vulcânicas na coluna atmosférica.

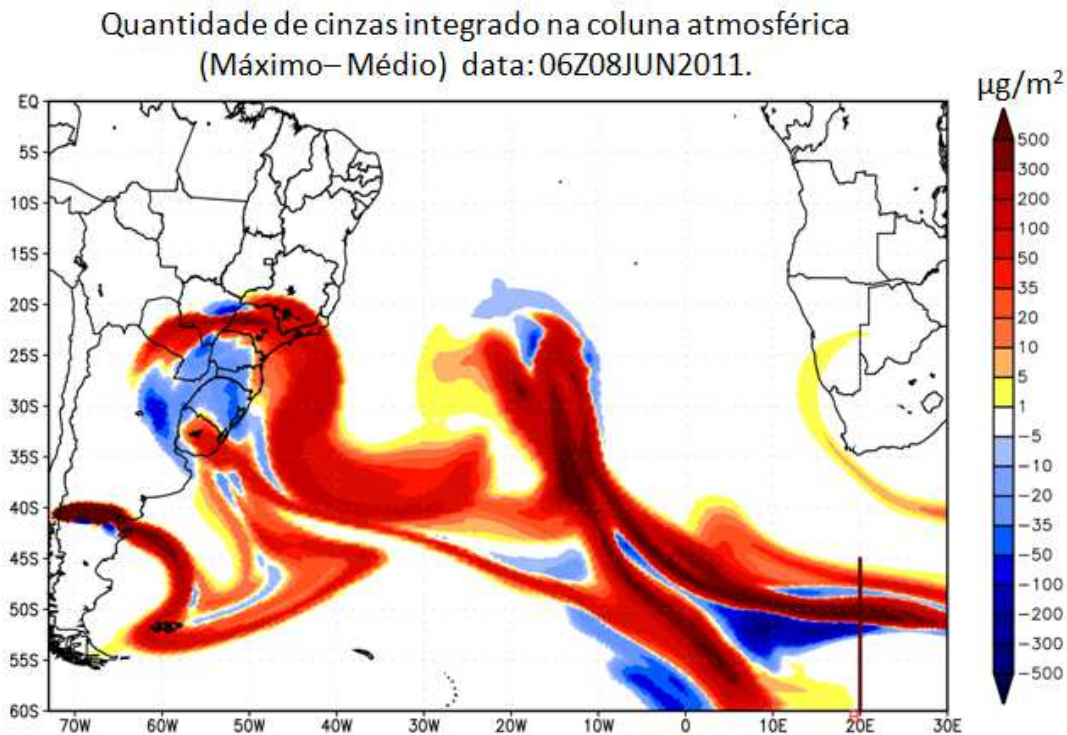


Figura 5.9: Diferença da concentração de cinzas vulcânicas integrado na coluna atmosférica, valor máximo – valor médio.

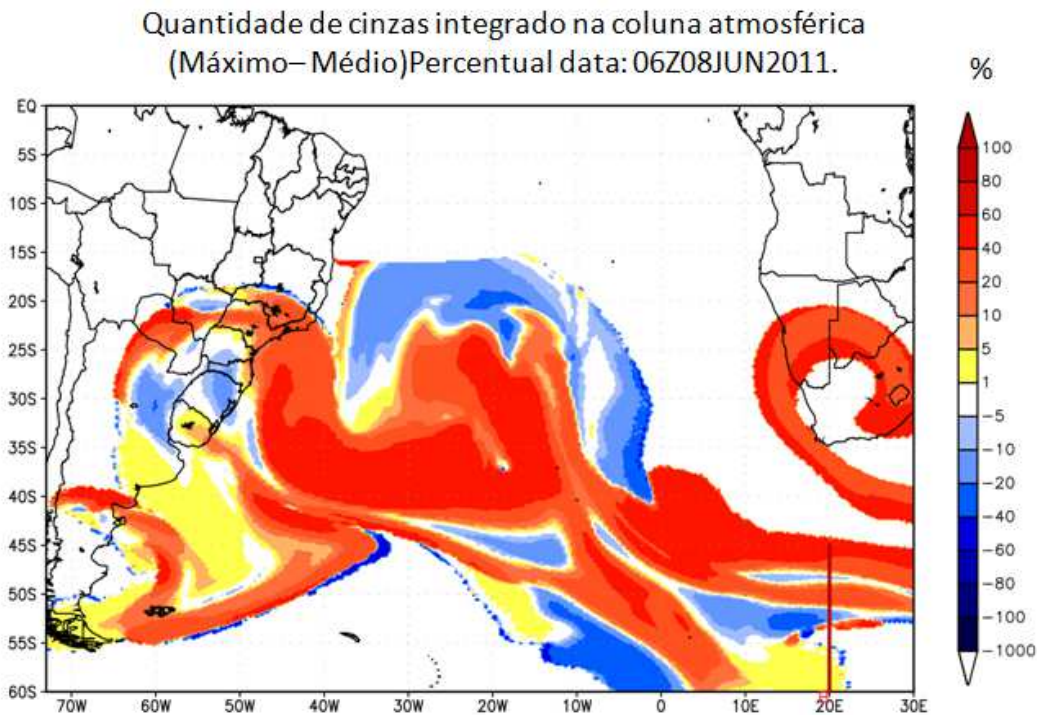


Figura 5.10: Diferença percentual da concentração de cinzas vulcânicas integrado na coluna atmosférica, valor máximo – valor médio.

Observando a diferença percentual, Figura 5.10, o contorno de valor negativo em torno da pluma indica que a diferença da posição da pluma é sutil, há

apenas diferença na quantidade de cinzas, logo não é possível ainda afirmar qual corresponde melhor com o observado.

As Figuras 5.11 a 5.13 se referem ao perfil vertical de cinzas sobre a trajetória “B” da Figura 5.10. Pela Figura 5.11 é possível observar que ao utilizar o ensemble com valor máximo, as cinzas altas se encontram em torno de 50 graus sul e também em uma concentração inferior em 47 graus sul. Já para o caso com valor médio as concentrações de cinzas mais elevadas se encontram entre 51 e 52 graus sul. Segundo o observado, Figura 4.66, há um forte sinal da presença de cinzas em altas altitudes em torno de 50 graus sul, e há um sinal menos intenso em torno de 47 graus sul. Sendo assim neste caso, o qual se encontra distante da fonte emissora, o valor máximo mostrou-se mais próximo do observado do que o valor médio; e o valor mínimo se mostrou muito inferior aos demais.



Cinzas vulcânicas, 18Z05JUN2011. Resolução horizontal de 30km

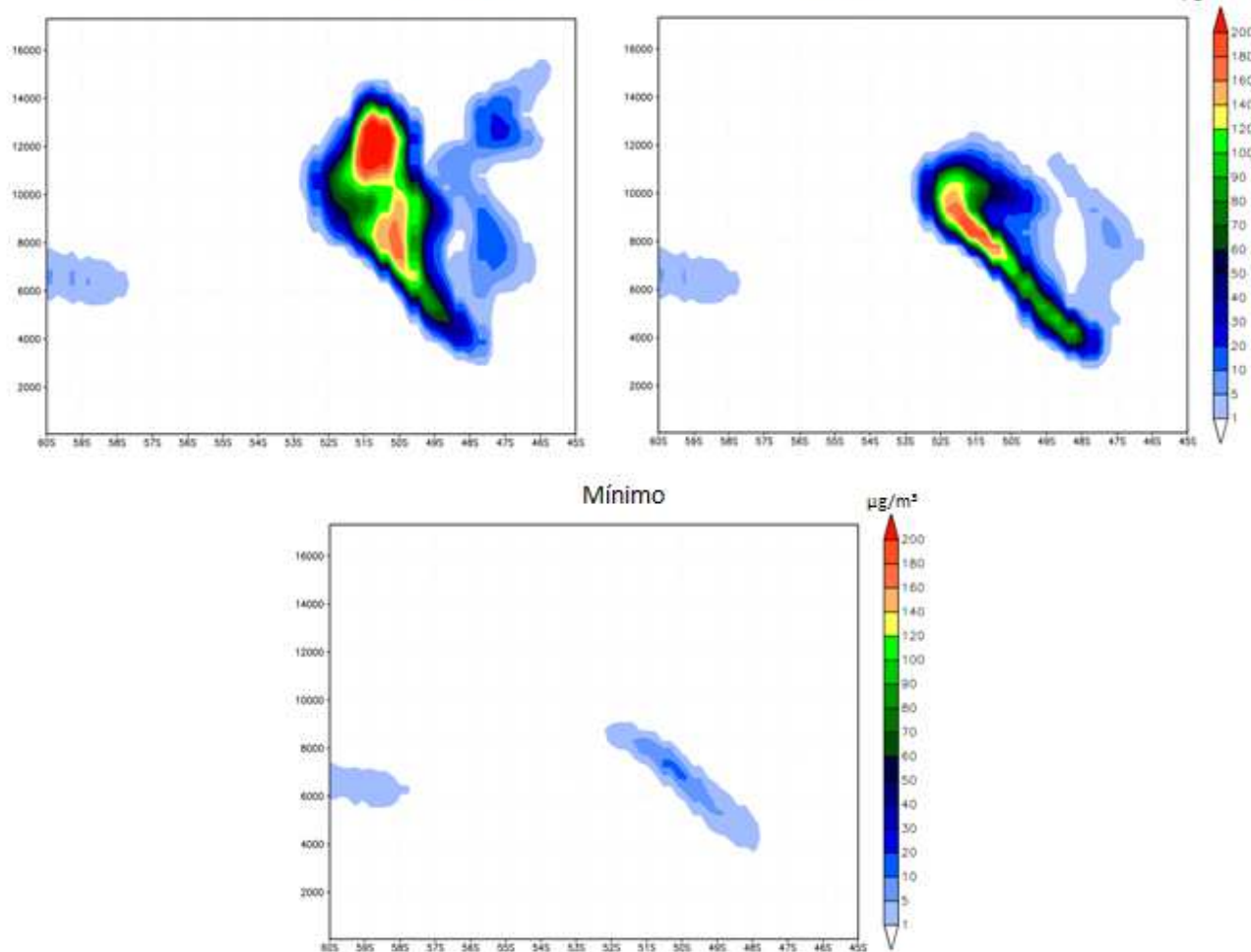


Figura 5.11: Perfil vertical da concentração de cinzas sobre o trajeto B da Figura 4.88.

Pelas Figuras 5.11 e 5.12 podemos ver que a simulação com valor máximo apresentou uma concentração elevada de cinzas em altas altitudes próximas de 50 graus sul, enquanto utilizando o valor médio estas cinzas se encontraram entre 51 e 52 graus sul, a posição utilizando valor máximo foi sutilmente mais próxima ao observado.

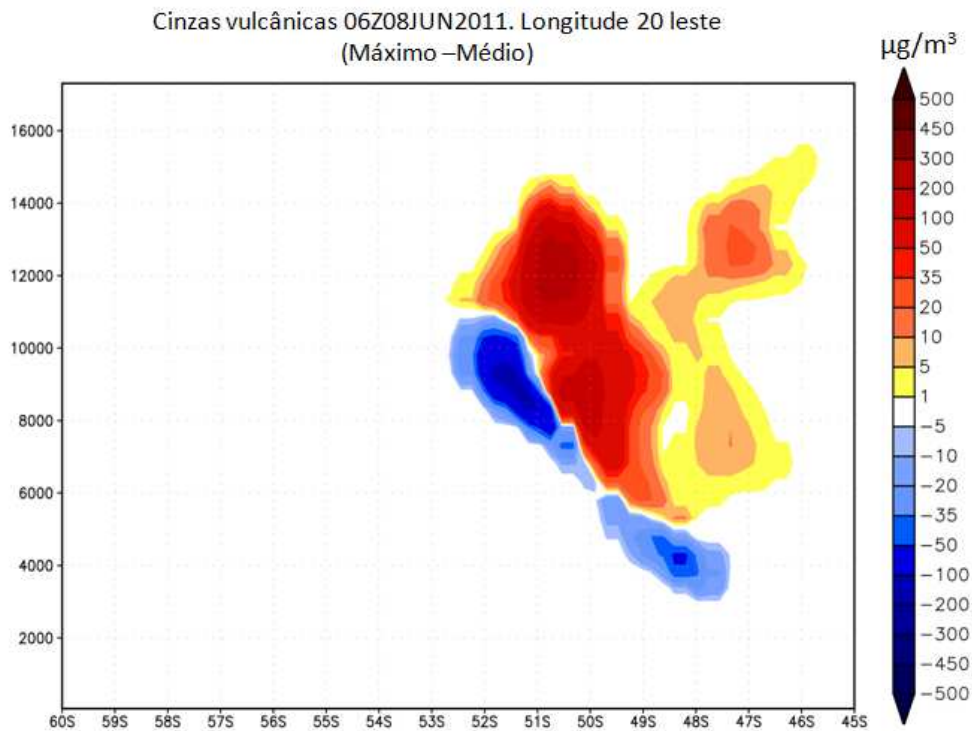


Figura 5.12: Diferença da concentração de cinzas vulcânicas, valor máximo – valor médio.

No dia 16/06/2011 entre às 17:37 e 17:44 o CALIPSO detectou cinzas vulcânicas, a Figura 5.14 mostra a passagem do satélite CALIPSO, enquanto a Figura 5.14 mostra a integral de cinzas na coluna atmosférica junto com a representação da passagem do satélite, onde o ponto “A” representa o início do percurso.

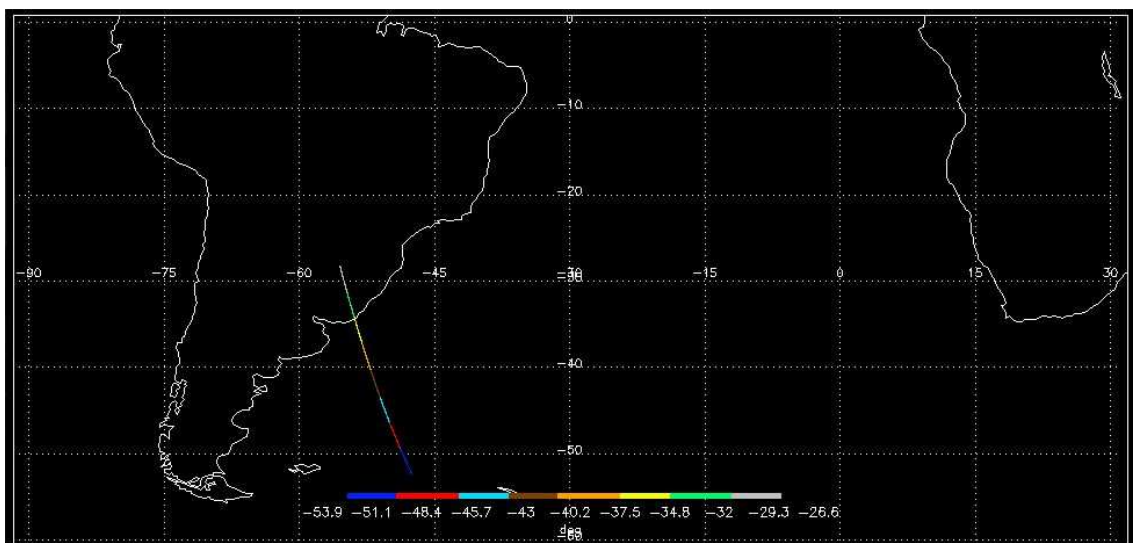


Figura 5.13: Trajetória do satélite CALIPSO para o dia 16/06/11 entre às 17:37 e 17:44Z

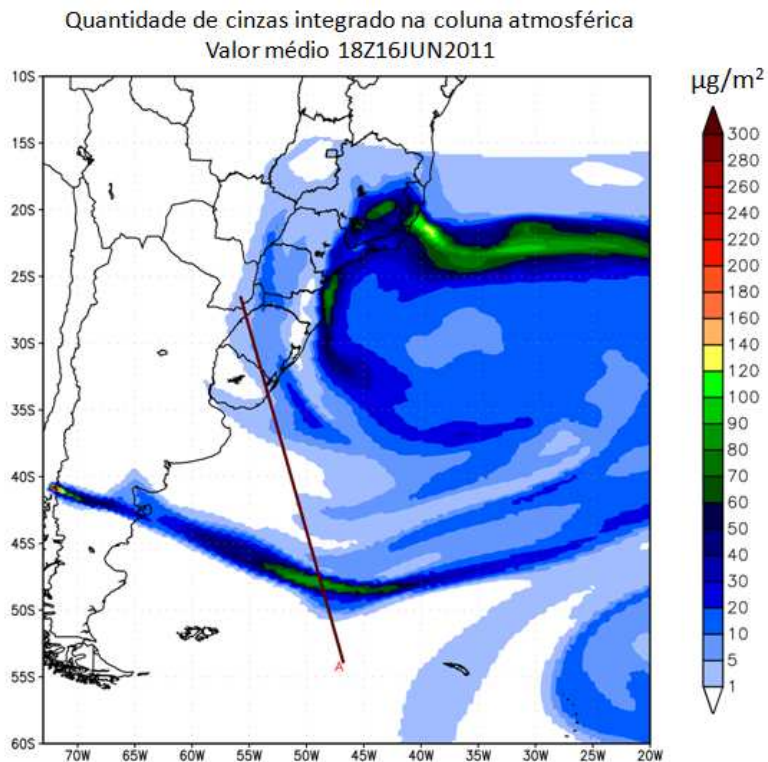


Figura 5.14: Concentração de cinzas vulcânicas integradas na coluna atmosférica, linha representa a trajetória do satélite CALIPSO, sendo o ponto “A” o início da trajetória.

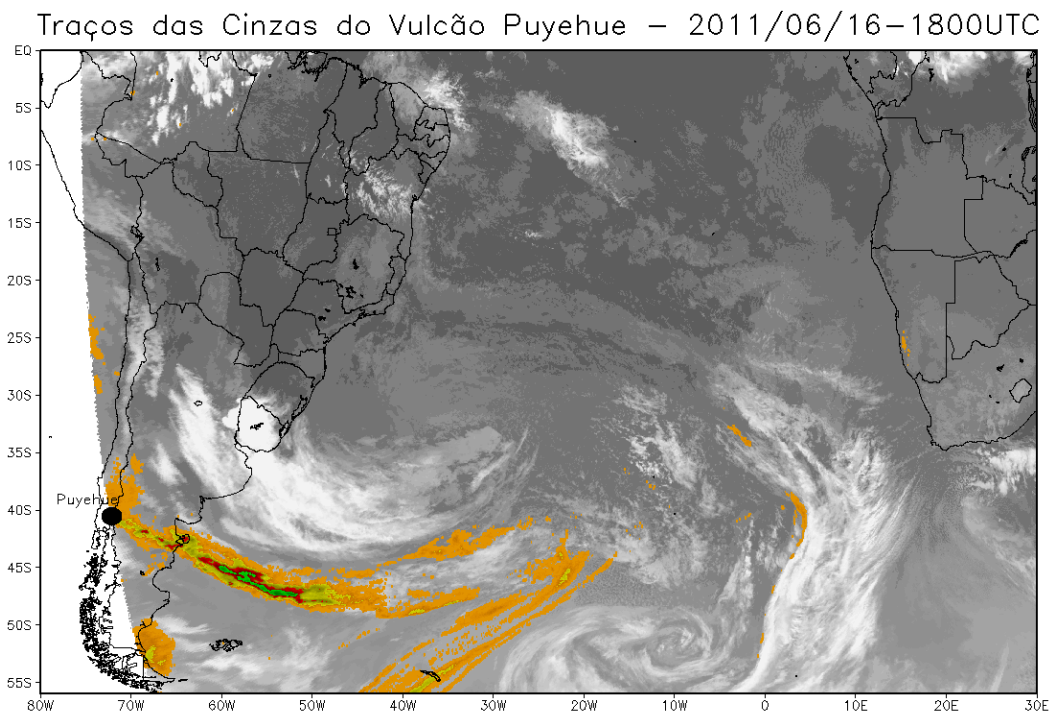


Figura 5.15: Imagem fornecida pelo DSA referente ao dia 16/06/11 às 18Z

O modelo colocou cinzas no litoral brasileiro, Figura 5.14, possivelmente pelo fato de ainda não ter sido considerado o processo de remoção úmida

A Figura 5.16 mostra o perfil vertical das cinzas vulcânicas sobre o percurso desenhado na Figura 5.14, utilizando os resultados das simulações com valores máximo, médio e mínimo. A figura 5.17 mostra o perfil de aerossóis detectado pelo sensor CALIOP a bordo do satélite CALIPSO.

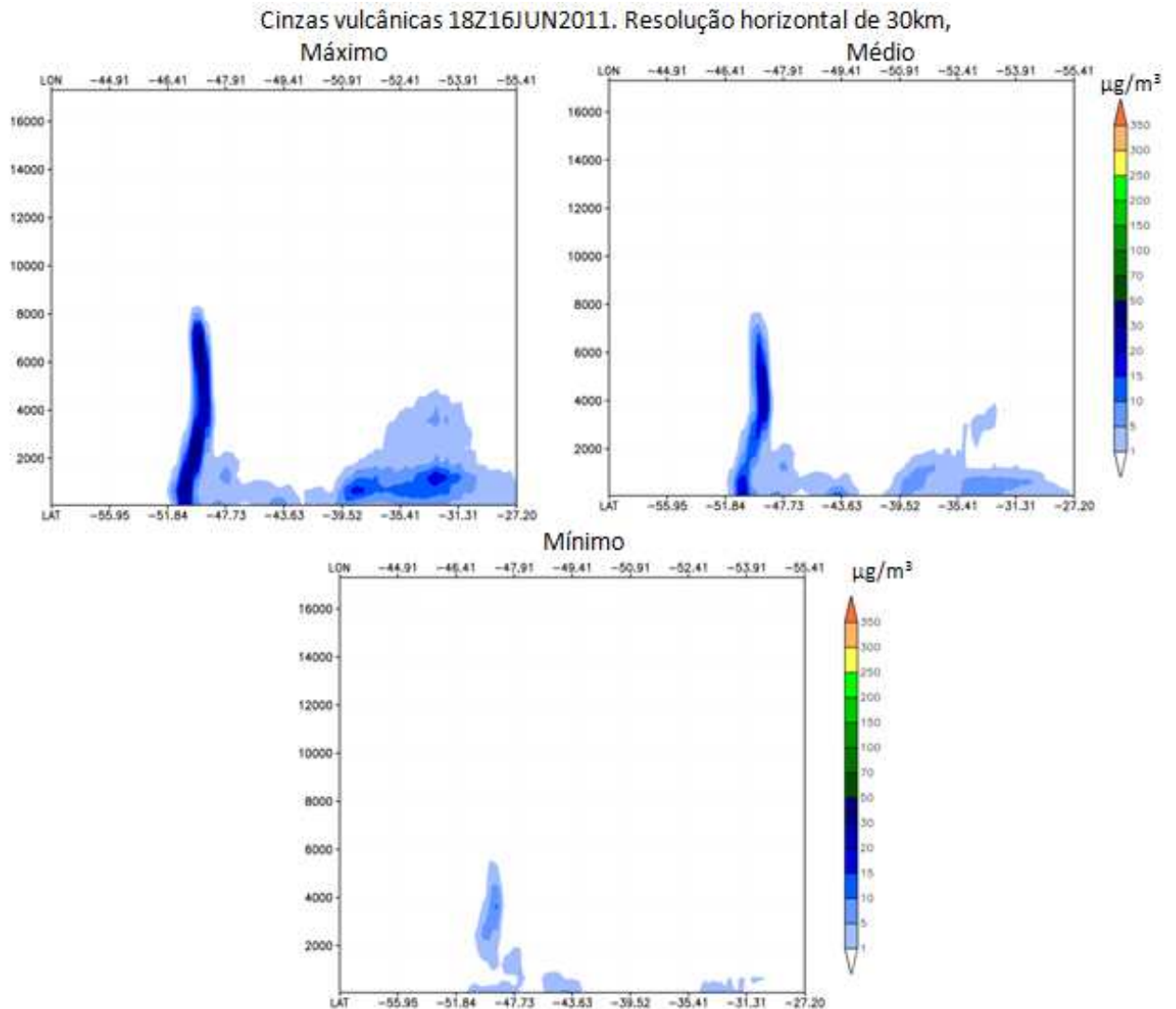


Figura 5.16: Ensemble do perfil vertical das cinzas vulcânicas sobre o trajeto desenhado na figura 5.15.

Observando a figura 5.16, obtemos que, utilizando o ensemble de valor mínimo as cinzas chegaram a quase 6 km de altitude sobre a latitude de aproximadamente -49, enquanto utilizando o valor médio as cinzas chegaram a quase 8 km de altitude, e utilizando o valor máximo chegaram a 8 km.

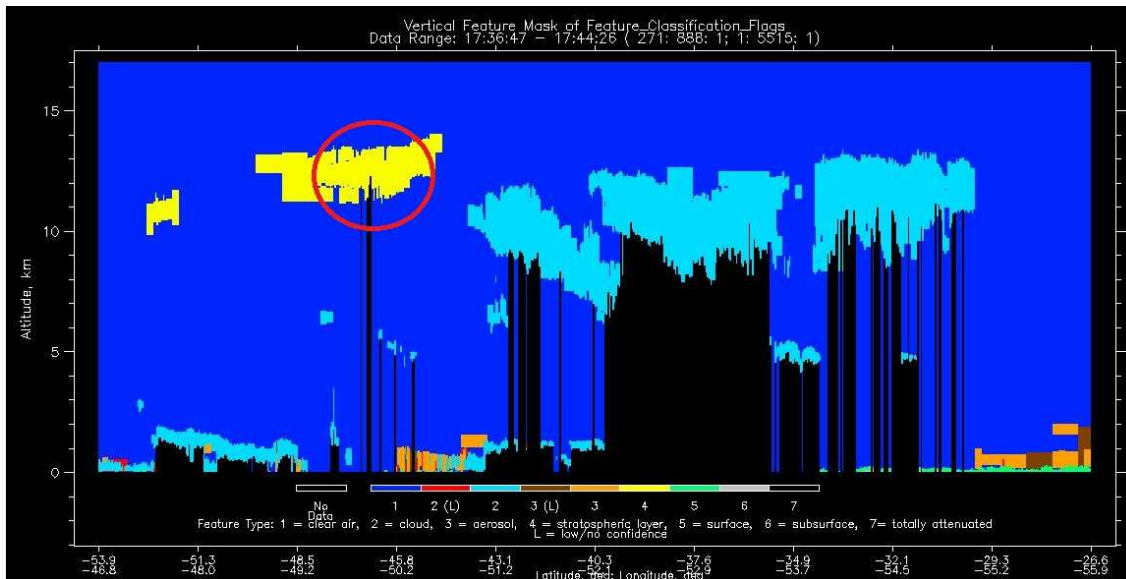


Figura 5.17: Perfil vertical dos aerossóis observados pelo satélite CALIPSO sobre a trajetória da figura 5.13. Em amarelo está “stratospheric layer”, que neste caso representa cinzas vulcânicas. O círculo em vermelho mostra a região de interesse.

O círculo na figura 5.17 mostra a região de interesse para a análise e indica que o CALIOP detectou cinzas entre 11 e 14 km de altitude sobre a região entre -49,5 a -50,5 graus de latitude.

Comparando o observado, Figura 5.17 com o resultado do modelo, Figura 5.16, temos que o modelo colocou as cinzas sobre a região correta, porem errou a altura. A explicação mais plausível é falha no dado de entrada relativo à altura de injeção; pois a altura de injeção fornecida pelo OVDAS é apenas um único valor diário, porem há uma variabilidade muito grande da altura de injeção ao longo do dia. Como por exemplo, para o dia 13 de Junho de 2011 o OVDAS forneceu altura de injeção igual a 9 km, porem o mesmo disse que durante a noite a pluma subiu de 1,5 a 2 km. Para o dia estudado, 16 de Junho, o OVIDAS forneceu altura de injeção igual a 3 km, porem este valor não condiz com este momento do dia, pois segundo o observado pelo DSA, Figura 5.15, as cinzas se encontram acima das nuvens altas, logo para este caso o erro não está no modelo, mas na altura de injeção fornecido pelos geólogos do OVDAS.

No dia 18 de junho de 2011 por volta das 12:26 às 12:33 UTC, o satélite CALIPSO passou sobre uma pluma de cinzas vulcânicas, a Figura 5.18 mostra a trajetória do satélite, a Figura 5.19 mostra a imagem fornecida pelo DSA, a Figura 5.20 a integral da quantidade de cinzas vulcânicas na coluna

atmosférica, a Figura 5.21 mostra o perfil vertical de aerossóis observados pelo satélite e a Figura 5.22 mostra o perfil vertical obtido pelo modelo. Este caso é interessante, pois se encontra em uma região afastada da fonte emissora.

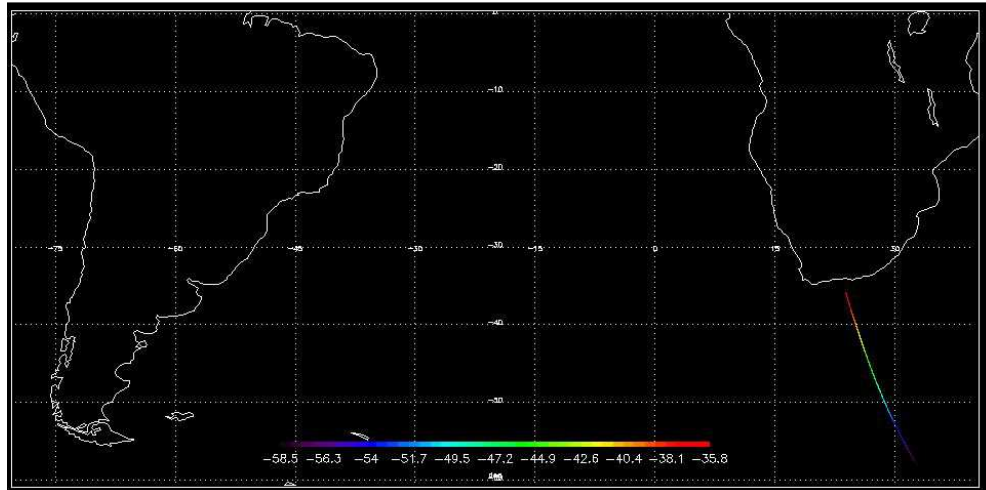


Figura 5.18: Trajetória do satélite CALIPSO para o dia 18 de junho de 2011 por volta das 12:26 às 12:33 UTC. As cores representam os valores de latitude.

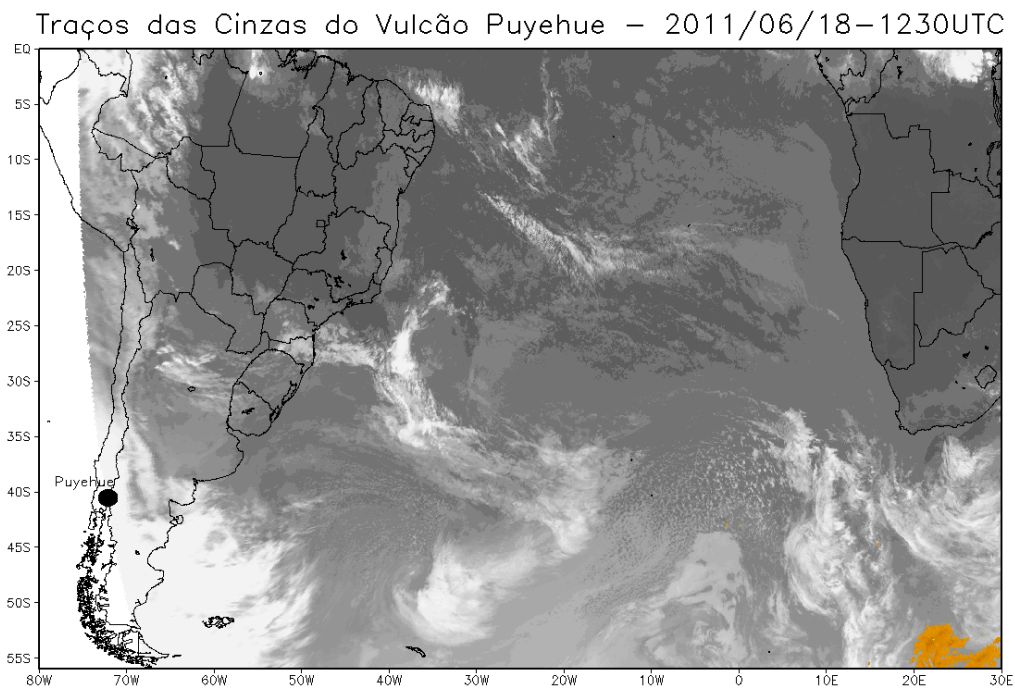


Figura 5.19: Imagem fornecida pelo DSA. Dia 18 de junho de 2011 às 12:30 UTC.

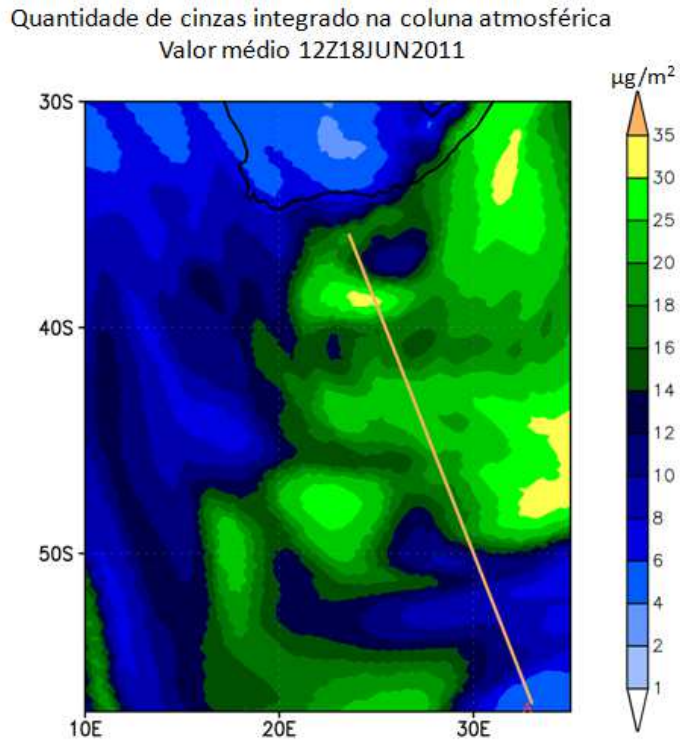


Figura 5.20: Integral das cinzas na coluna atmosférica usando o valor médio do ensemble. A reta representa a trajetória do satélite, onde “A” marca o início da trajetória.

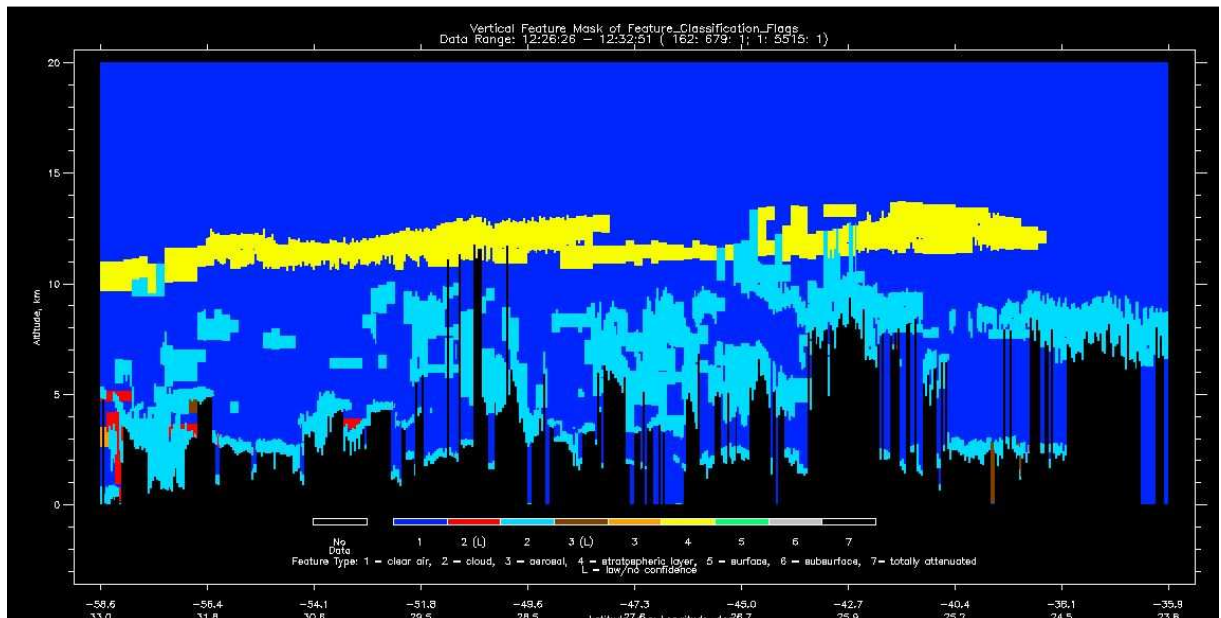


Figura 5.21: Perfil vertical dos aerossóis observados pelo satélite CALIPSO sobre a trajetória da Figura 5.18. Em amarelo está “stratospheric layer”, que neste caso representa cinzas vulcânicas.

Observando a Figura 5.21 vemos que em todo o trajeto houve grande quantidade de nuvens, cor azul claro, e aerossóis na camada estratosférica, cor amarelo. Estes aerossóis estratosféricos podem ser cinzas vulcânicas; sua posição se encontra entre 10 e 12km de altitude, e sua concentração é pequena, pois não há uma substancial atenuação do sinal de retroespalhamento e não foram detectadas pelo produto DSA, mesmo estas estando acima das nuvens.

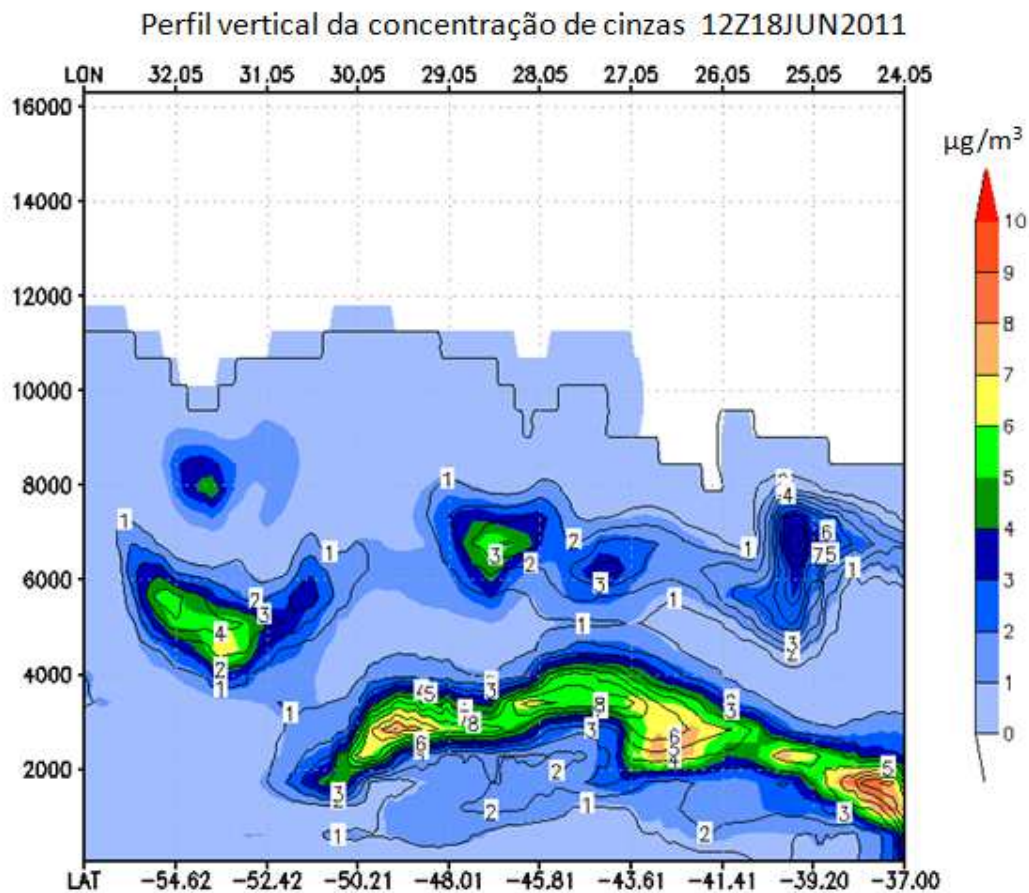


Figura 5.22: Perfil vertical da concentração de cinzas vulcânicas sobre o trajeto da Figura 5.20. Pintado representa ensemble de valor máximo, enquanto o contorno representa o de valor médio.

Podemos observar na Figura 5.20 que o modelo simulou cinzas até 12 km de altitude, apesar se serem valores baixos neste nível. O modelo colocou cinzas distribuídas verticalmente por toda a troposfera, estas cinzas não foram detectadas pelo CALIPSO, pois as regiões de maior concentração de cinzas vulcânicas coincidem com a localização das nuvens. Possível explicação para



a presença de cinzas simuladas é a falta do mecanismo de deposição úmida (deposição através da precipitação) no âmbito do modelo. Como, as cinzas percorreram uma região com muitos sistemas frontais, a deposição úmida possui um papel importante na remoção destas da atmosfera. Este processo será considerado em futuras versões do modelo.

### 5.3. Análise dos resultados do modelo utilizando dados coletados pelo FEPAM-RS

Comparação quantitativa dos resultados do modelo com dados observados localmente. Foram utilizados dados de concentração de material particulado  $MP_{10}$  e  $MP_{2.5}$  coletados pela FEPAM-RS na região metropolitana de Porto Alegre (Tabela 5.1). Os valores de concentração se referem a uma média diária.

Tabela 5.1: Resultados obtidos a partir da análise do material particulado, coletado nos filtros.

Data	Nº Filtro	Poluente	Massa (gramas)	Volume* (m <sup>3</sup> )	Concentração* (µg/ m <sup>3</sup> )
09/06/11	098/11	$MP_{10}$	0,0531	1636,77	32,44
	019/11	$MP_{2,5}$	0,0208	1610,24	12,92
14/06/11	111/11	$MP_{10}$	0,1157	1629,08	71,02
	022/11	$MP_{2,5}$	0,0300	1659,54	18,08

\* nas condições padrão de 25 °C e 760 mmHg.

Fonte: Lima et al. (2011)

A Figura 5.23 mostra o perfil vertical das cinzas vulcânicas sobre a cidade de Porto Alegre, e a Figura 5.24 a concentração de cinzas vulcânicas na cidade de Porto Alegre a 48 metros de altura, pois este é a altura do primeiro nível vertical do modelo.

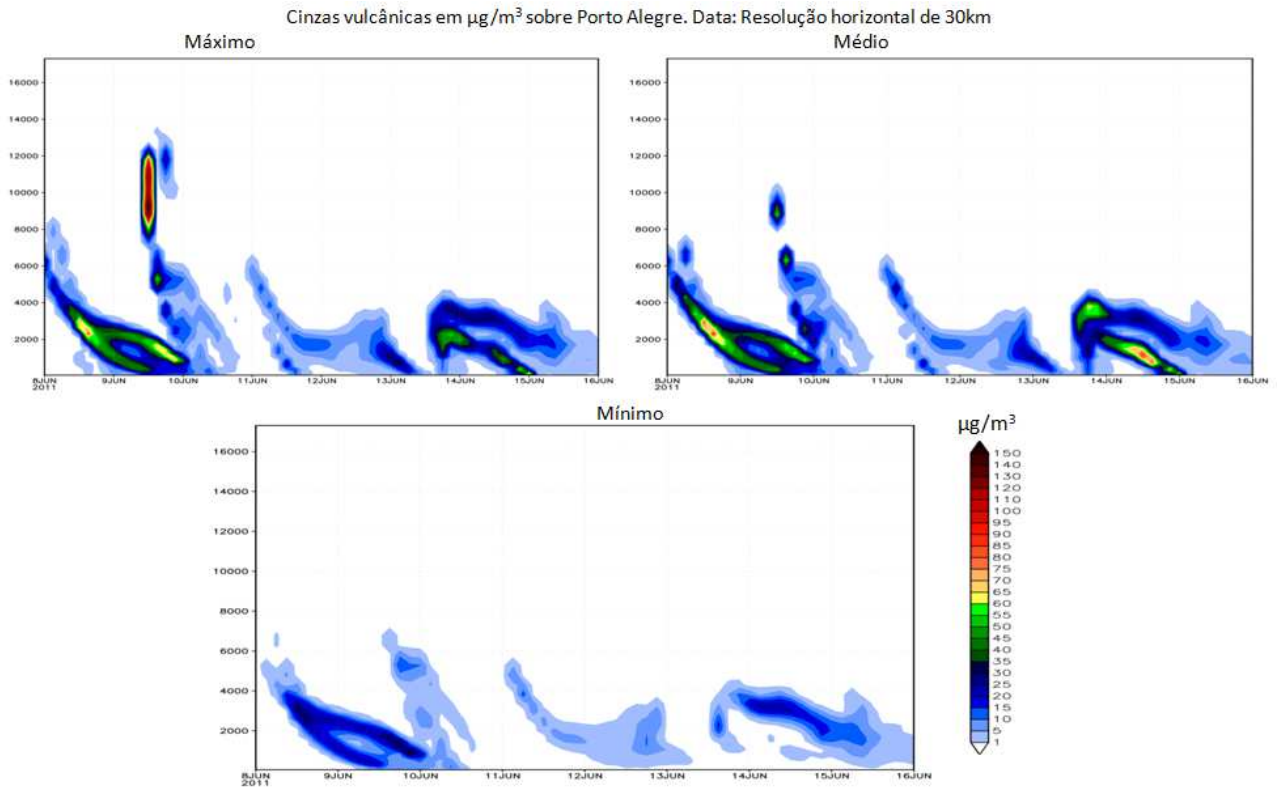


Figura 5.23: Ensemble do perfil vertical de cinzas vulcânicas sobre a cidade de Porto Alegre no período dos dias 8 de junho de 2011 ao dia 16 de junho de 2011.

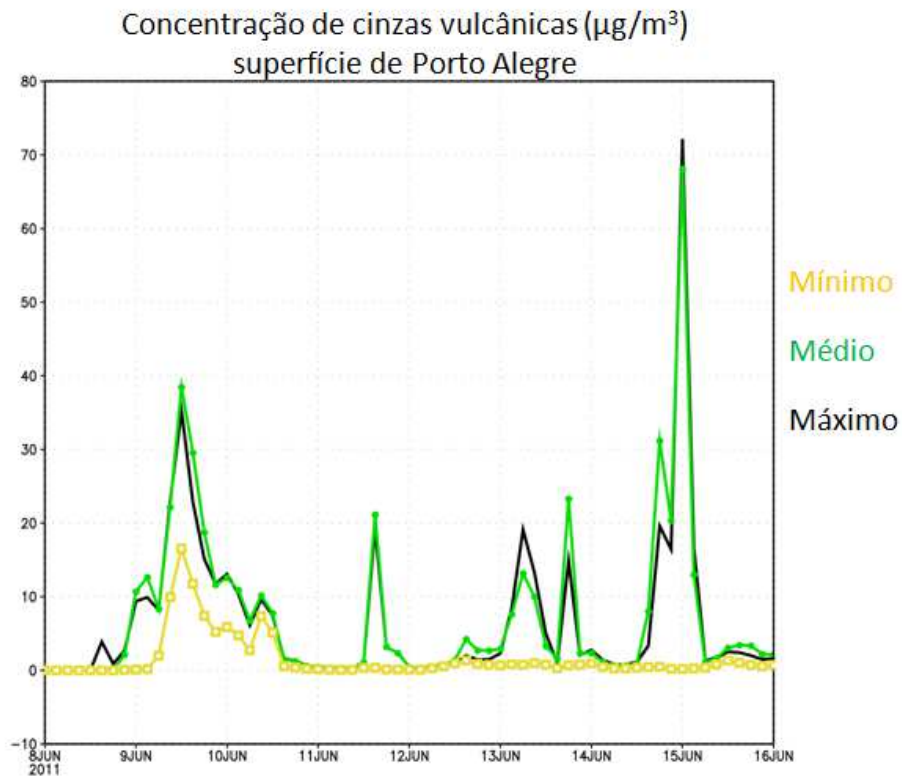


Figura 5.24: Ensemble da concentração de cinzas vulcânicas a 48 metros (primeiro nível no modelo) sobre a superfície da cidade de Porto Alegre, do dia 8 de junho ao dia 16.

Pelo fator de termos observações apenas para os dias 9 e 14, vide Tabela 5.1, serão analisados apenas estes dias.

No dia 9 o ensemble de valor mínimo resultou em uma concentração média ao longo deste dia de aproximadamente  $8\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; o ensemble de valor médio resultou em uma concentração de aproximadamente  $18\mu\text{g}/\text{m}^3$ , e o ensemble de valor máximo aproximadamente  $17\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Para o dia 14 de junho, o ensemble utilizando valor mínimo resultou em uma média diária de aproximadamente  $0,3\mu\text{g}/\text{m}^3$ , o ensemble de valor médio resultou em aproximadamente  $16\mu\text{g}/\text{m}^3$  e ensemble de valor máximo resultou em aproximadamente  $14\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Devido à distância em que se encontra a cidade de Proto Alegre, as cinzas com diâmetro superiores a  $2,5\mu\text{m}$  sedimentaram antes de chegarem à cidade, logo temos que comparar os valores médios de concentração ao longo do dia obtidos pelo modelo com os valores de concentração  $\text{MP}_{2,5}$  da Tabela 4.2. Para o dia 9, o valor observado é  $12,92\mu\text{m}/\text{m}^3$  ( $\text{MP}_{2,5}$ ), o dia que mais se aproximou deste valor foi o ensemble com valor máximo. Para o dia 14, o valor observado é  $18,08\mu\text{m}/\text{m}^3$  ( $\text{MP}_{2,5}$ ), o ensemble com valor médio foi o que mais se aproximou do observado, e o ensemble com valor máximo obteve um resultado satisfatório, com um erro percentual de aproximadamente 20%. Já o ensemble com valor mínimo foi o que mais se distanciou do observado.

#### **5.4. Análise dos resultados do modelo utilizando cartográficas de sedimentação.**

Dados de deposição de cinzas foram obtidos dos dois documentos a seguir. No segundo informe técnico do Bermúdez e Delpino (2011), foi feita uma cartografia da deposição de cinzas vulcânicas referente aos 23 primeiros dias após a erupção. No artigo do Lima et al. (2011) é traduzida a figura do Bermúdez e Delpino (2011) de espanhol para português, Figura 5.25.

Comparando as cartografias de deposição do Gaotán et al. (2011), Figura 5.28, com a do Bermúdez et al. (2011), observa-se que os valores obtidos pelo Bermúdez e Delpino (2011) são superiores, pois na cartografia do Goatán o

nível de 0,2 é mostrado por verde claro, e este valor se encontra em uma área muito inferior a área representada por Bermúdez. Como os eventos eruptivos mais intensos foram nos primeiros dias, a diferença de poucos dias da coleta de dados entre estes dois autores não justifica a grande diferença em seus resultados; esta diferença é devida as grandes incertezas nos processos de formação das cartografias de deposição.

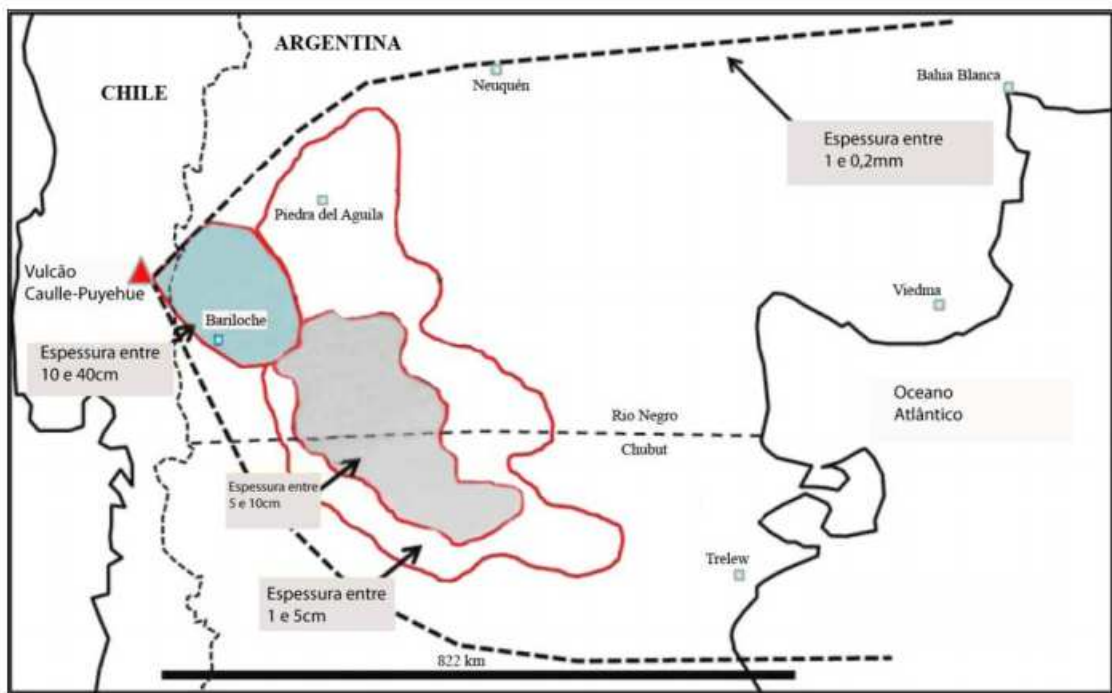


Figura 5.25: Deposição de cinzas no território argentino para os 23 primeiros dias após a erupção.

Fonte: Bermúdez e Delpino (2011) adaptado por Lima et al. (2011).

O modelo fornece a massa total depositada em termos de  $\text{kg}/\text{m}^2$  e para converter nas mesmas unidades apresentadas nos artigos acima (espessura em cm) deve-se dividir pela densidade da massa de cinza depositada, cujo valor utilizado é  $825 \text{ kg}/\text{m}^3$ , este valor de densidade é uma média do valor obtido pela Barbaro et al. (2012).

$$d(\text{cm}) = 100 \frac{\text{massa}(\frac{\text{kg}}{\text{m}^2})}{\rho(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3})} \quad (5.1)$$

Os dados simulados mostram uma distribuição espacial compatível com os dados de Bermúdez e Delpino (2011) com valores de até 1 mm sobre uma grande área, e a acima de 10 cm perto do cume do vulcão, Figuras 5.25 e 5.26.

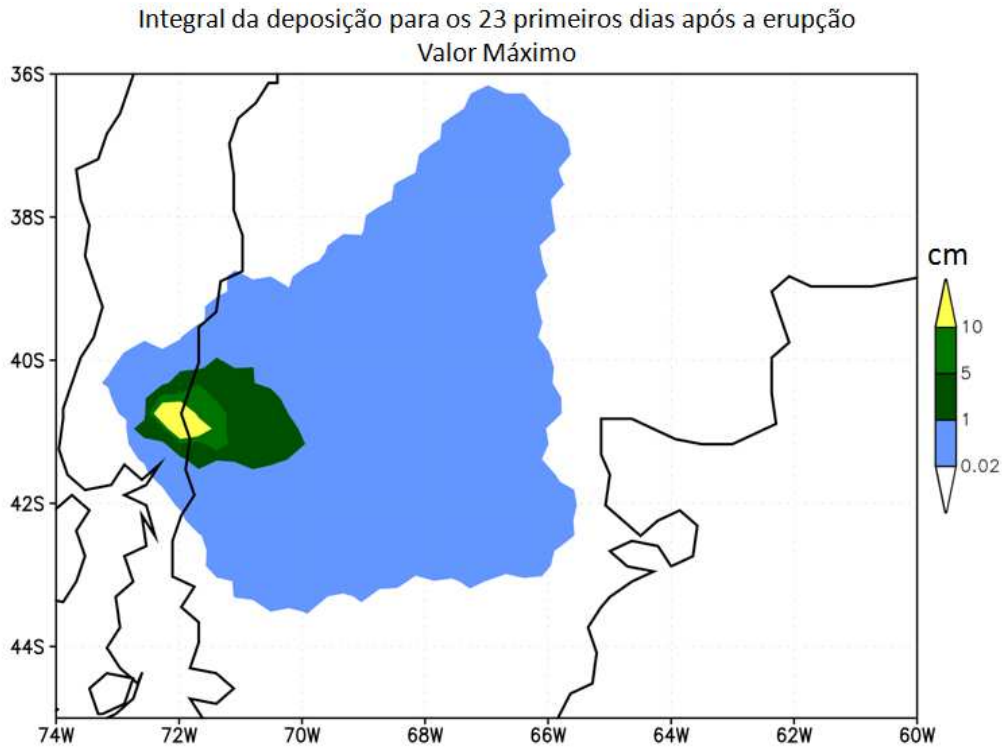


Figura 5.26: Integral da deposição de cinzas nos primeiros 23 dias após a erupção. Dados referentes à simulação de ensemble com valor máximo.

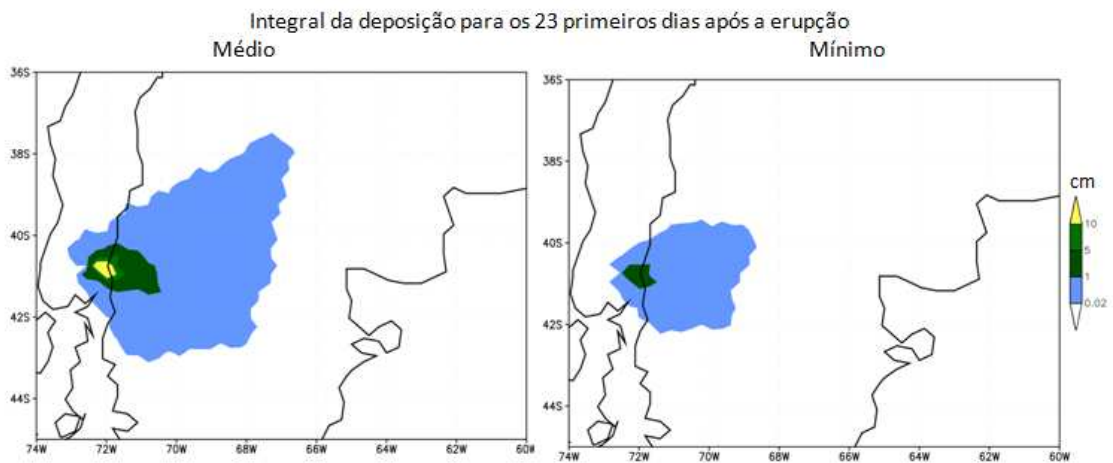


Figura 5.27: Integral da deposição de cinzas nos primeiros 23 dias após a erupção. Dados referentes à simulação utilizando valores médio e mínimo de ensemble.

No artigo de Gaitán et al. (2011), foram descritas medidas sobre a espessura de cinzas acumuladas entre 3 a 55 dias posteriores ao início da erupção. Com os dados observados, Gaotán et al. (2011) fez a seguinte cartografia, Figura 5.28.

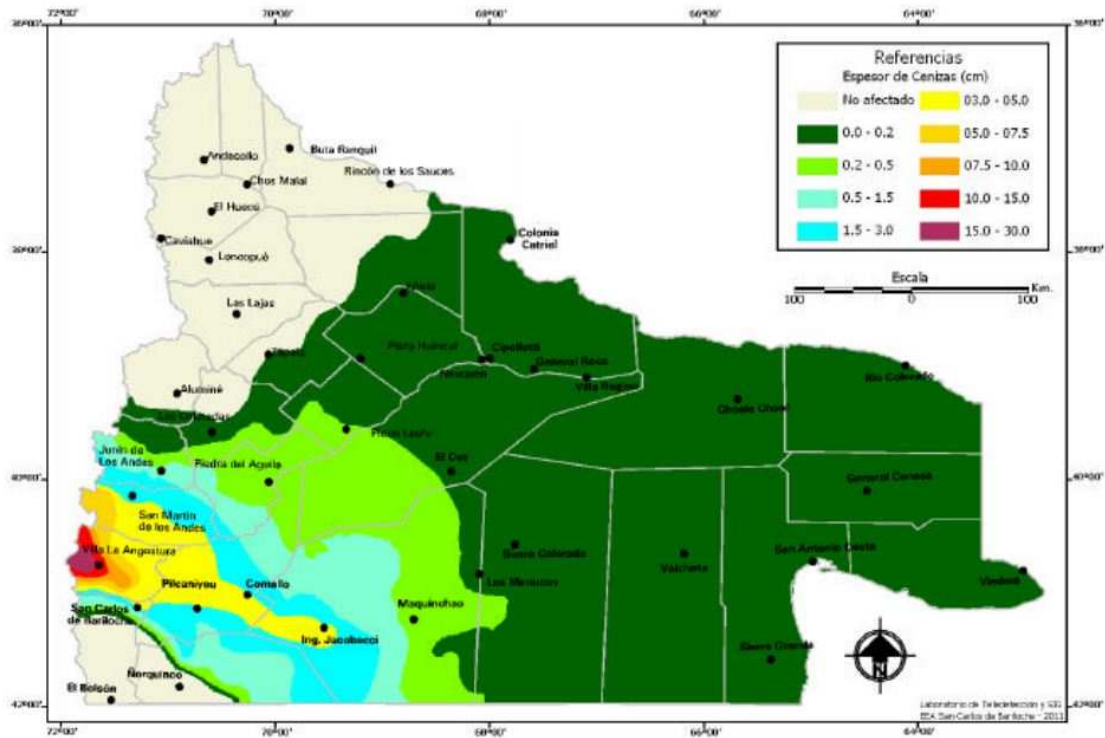


Figura 5.28: Deposição de cinzas sobre o território argentino medidas obtidas entre os 3 e 55 primeiros dias após a erupção.

Fonte: Gaotán et al. (2011).

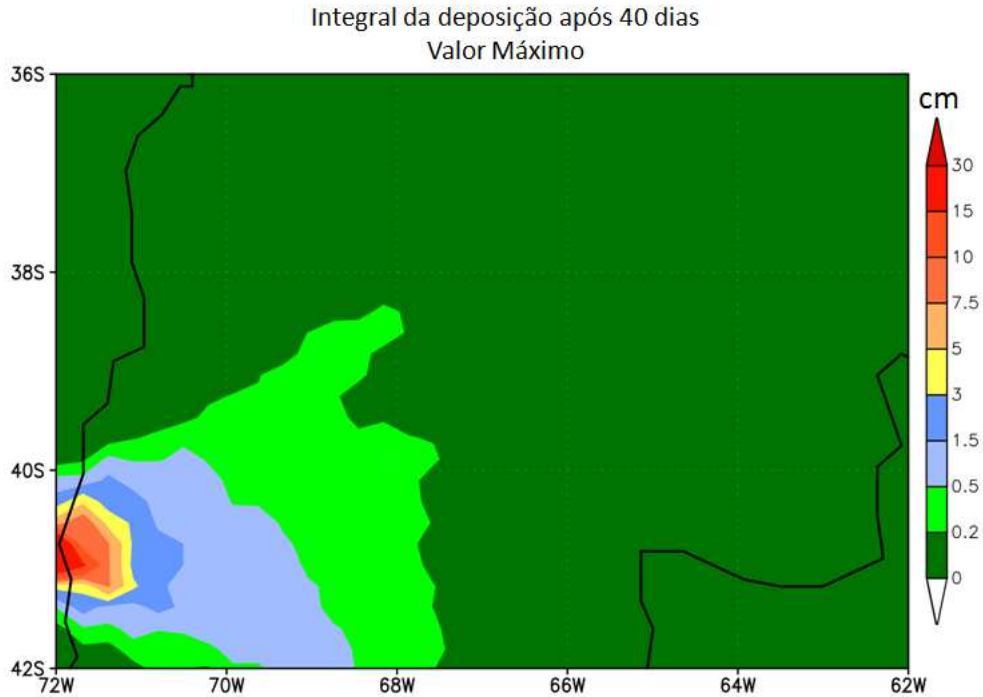


Figura 5.29: Integral da deposição de cinzas nos primeiros 40 dias após a erupção. Ensemble utilizando valor máximo.

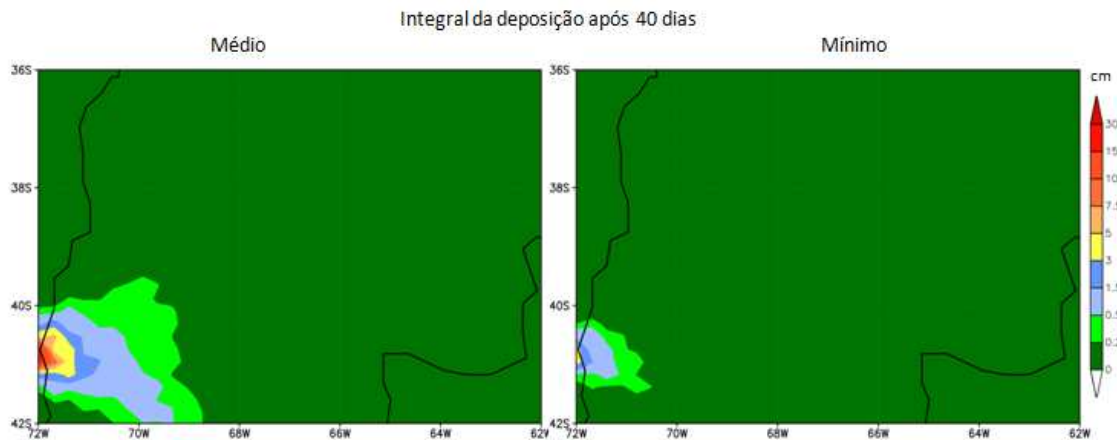


Figura 5.30: Integral da deposição de cinzas nos primeiros 40 dias após a erupção. Ensemble utilizando valor médio e mínimo.

Comparando as figuras de sedimentação obtidas pelo modelo após 40 dias, Figuras 5.29 e 5.30 com os dados de Gaotán, Figura 5.28, vemos um melhor resultado do modelo em relação aos dados do Bermúdez, não somente em termos dos valores, mas também na distribuição espacial. Deve-se notar que os dados aqui utilizados como 'observados' possuem um alto grau de incerteza associada a dificuldade de se a realizar um mapeamento envolvendo tal domínio de cobertura espacial.

## 5.5. Análise dos resultados do modelo utilizando dados fornecidos pela AERONET.

Nesta seção foram utilizados os dados da rede AERONET de duas cidades argentinas, Buenos Aires e Trelew. Analisando primeiramente a cidade mais próxima ao vulcão, Trelew, a Figura 5.31 mostra a profundidade óptica da atmosfera nesta cidade, podemos observar que há um aumento significativo na profundidade óptica no momento em que a pluma vulcânica passa pela cidade, este momento foi destacado por um círculo em vermelho.

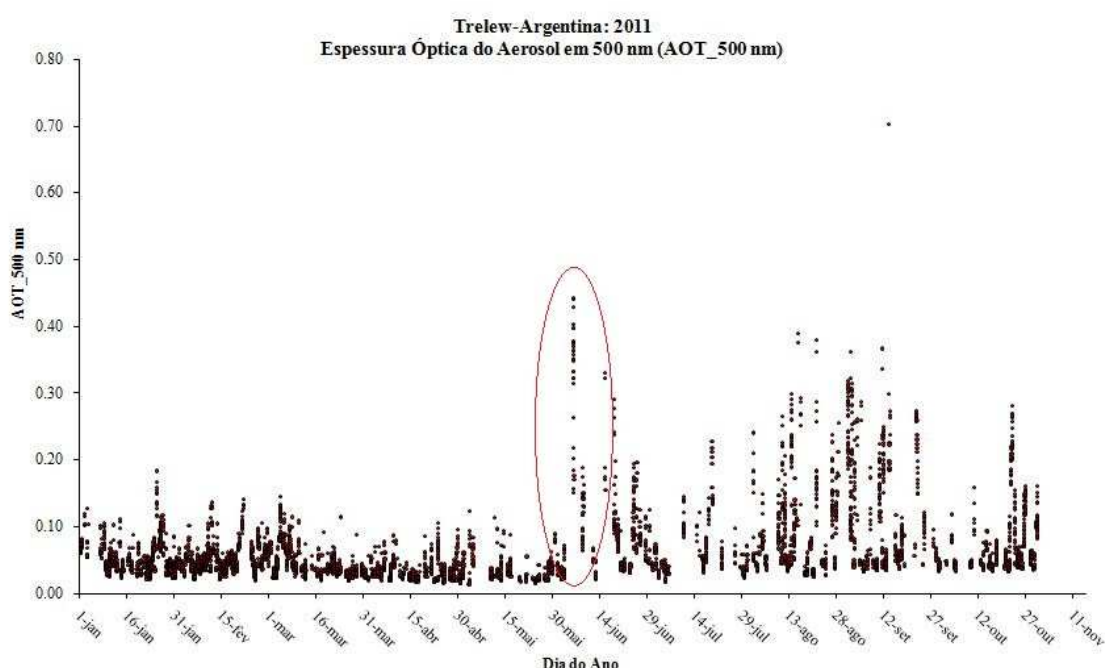


Figura 5.31: Profundidade óptica em Trelew, o círculo em vermelho mostra o momento da chegada das cinzas vulcânicas sobre a cidade.

A AERONET fornece a distribuição média de tamanho dos aerossóis, fazendo um gráfico comparando o tamanho médio dos aerossóis antes do vulcão e depois, podemos observar que há um aumento da quantidade de partículas grossas, vide Figura 5.32.



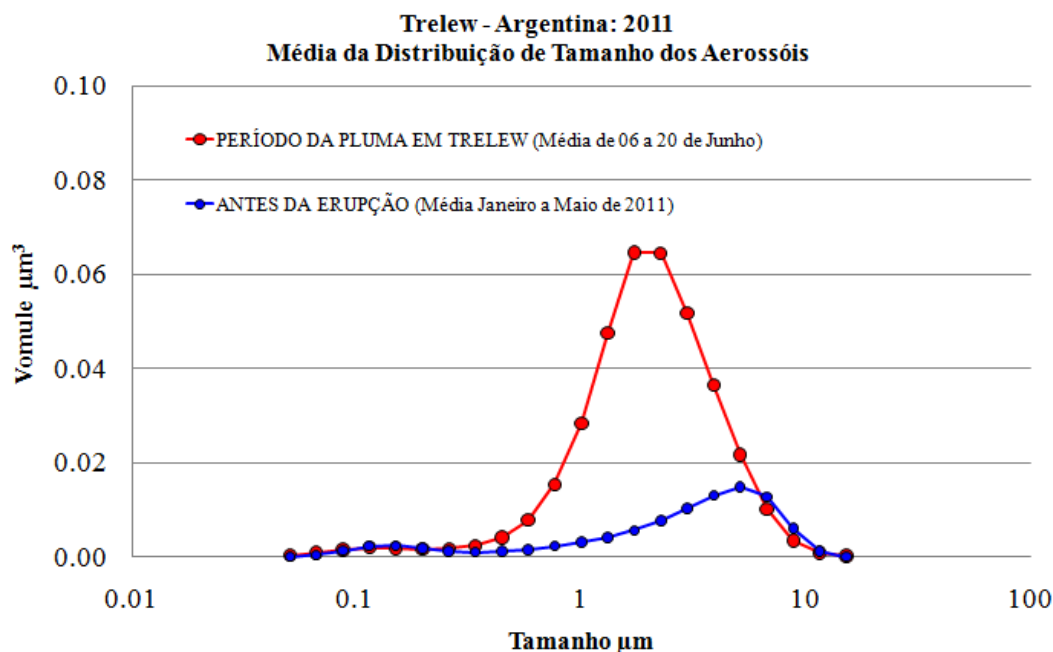


Figura 5.32: Distribuição volumétrica do tamanho da partícula  $dV(r)$  em  $\mu\text{m}^3$  por comprimento da partícula em  $\mu\text{m}$ .

As setas desenhadas na Figura 5.33 mostram regiões onde ocorreu queda no coeficiente de Angstrom, isto significa que houve aumento do tamanho médio da partícula, ou seja, as partículas ficaram em média mais grossas.

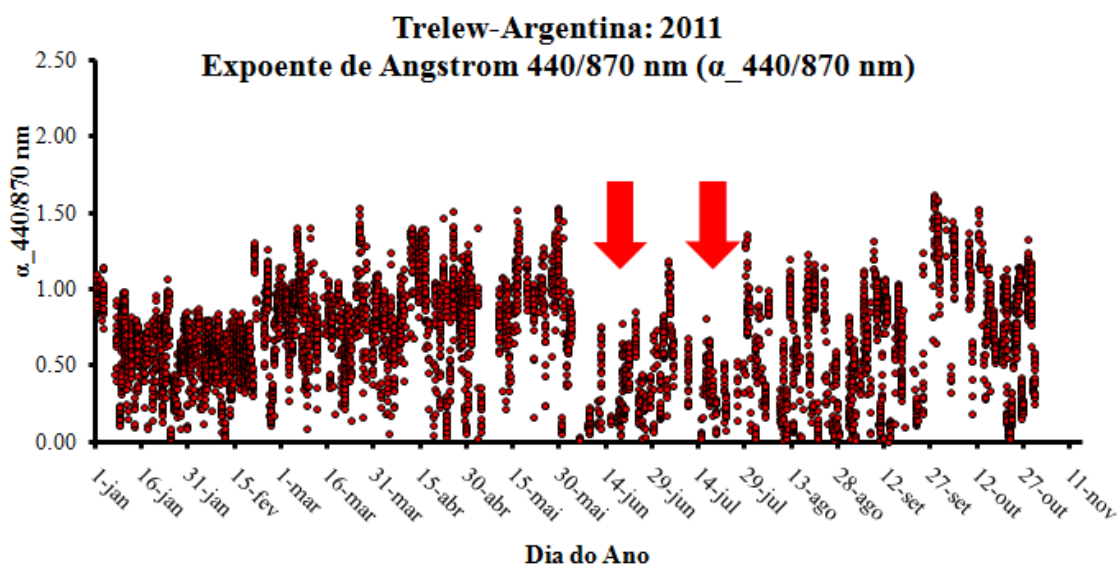


Figura 5.33: Expoente de Angstrom 440/370 nm, as flechas indicam regiões de queda no expoente de angstrom.

A Figura 5.34 mostra o valor da integral de cinzas na coluna atmosférica obtido pelo modelo sobre a localização geográfica do sensor que se encontra na cidade de Trelew, e na Figura 5.35 a posição vertical destas cinzas. Podemos

observar que há um pico no dia 06 de junho de 2011 e outro no dia 14; com picos menores nos dias 8, 15 e 16 de junho.

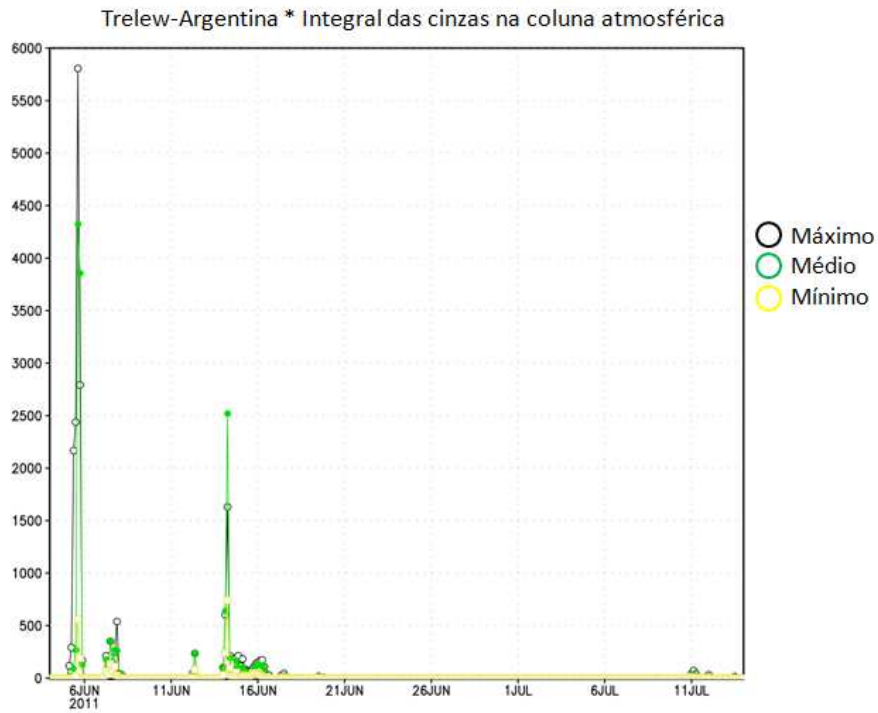


Figura 5.34: Integral da quantidade de cinzas sobre a cidade de Trelew em  $\mu\text{g}/\text{m}^2$

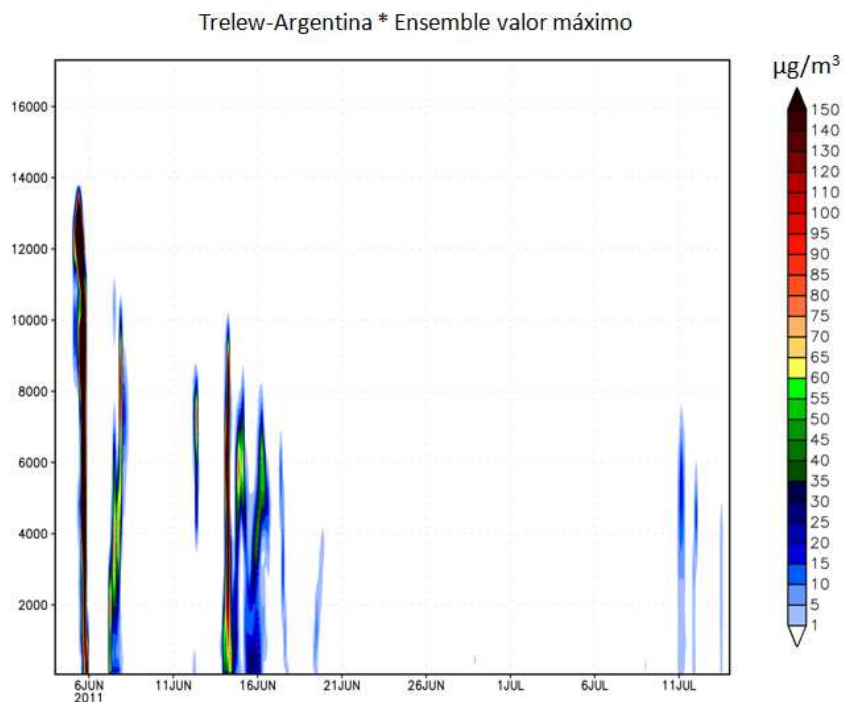


Figura 5.35: Perfil vertical das cinzas sobre a cidade de Trelew utilizando o ensemble de valor máximo.

Para poder comparar o simulado com observado, foi feito um zoom sobre a região que mais apresentou cinzas vulcânicas.

Podemos ver pela figura 5.36 que para os dias 5 e 15 houve altos valores de profundidade óptica, acima de 0,3, e baixos valores do expoente de Angstrom, inferiores a 0,2. Valores negativos no expoente de angstrom indicam partículas grandes como gotas precipitáveis; como houve cinzas neste dia sobre a cidade, as cinzas se misturaram com as gotículas presente na atmosfera, sendo assim detectado pela AERONET como uma partícula grande de aerossol.

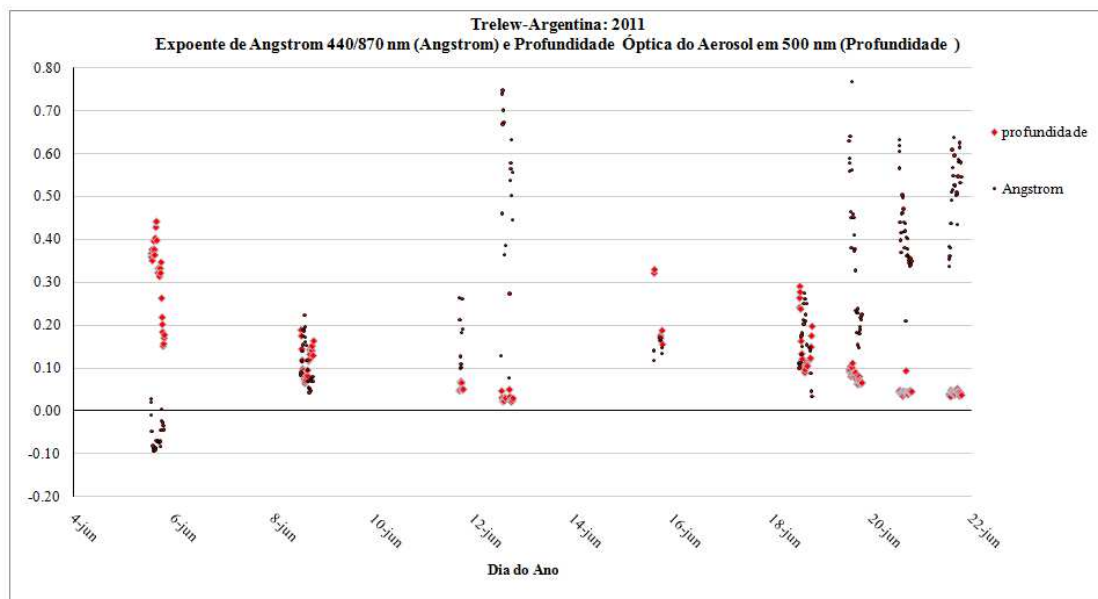


Figura 5.36: Profundidade óptica e Expoente de Angstrom para a cidade de Trelew.

Podemos observar pelas figuras 5.37 e 5.38 que o modelo colocou grandes quantidades de cinzas nos dias 5, 7, 14 e 15. Também ocorreu a presença de cinzas porem em menor quantidade nos dias 12, 16,17 e 19.

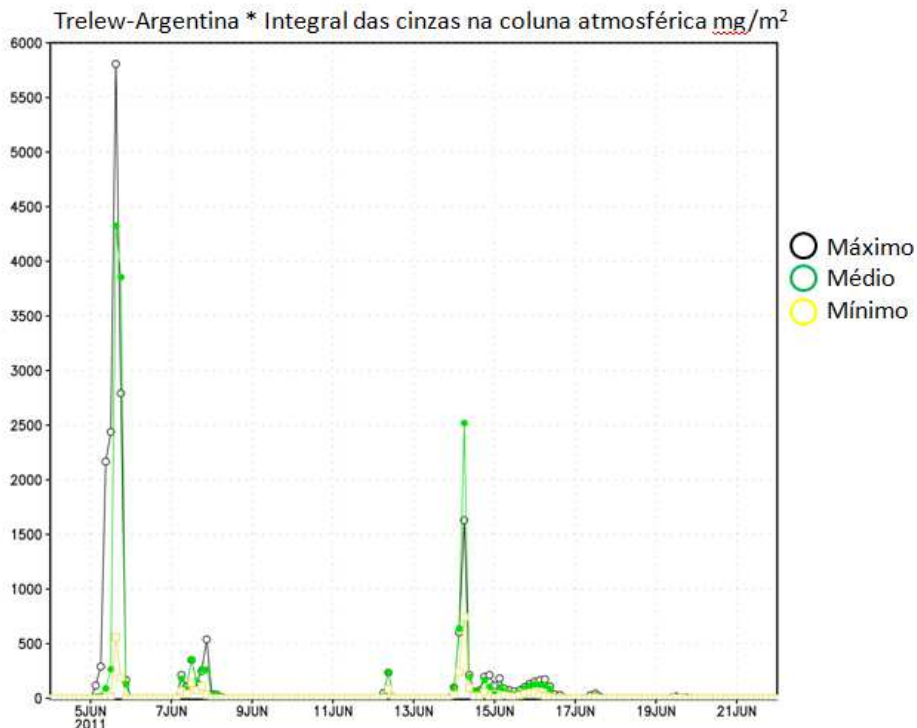


Figura 5.37: Integral da quantidade de cinzas sobre a cidade de Trelew, foco sobre o período que apresentou maior concentração.

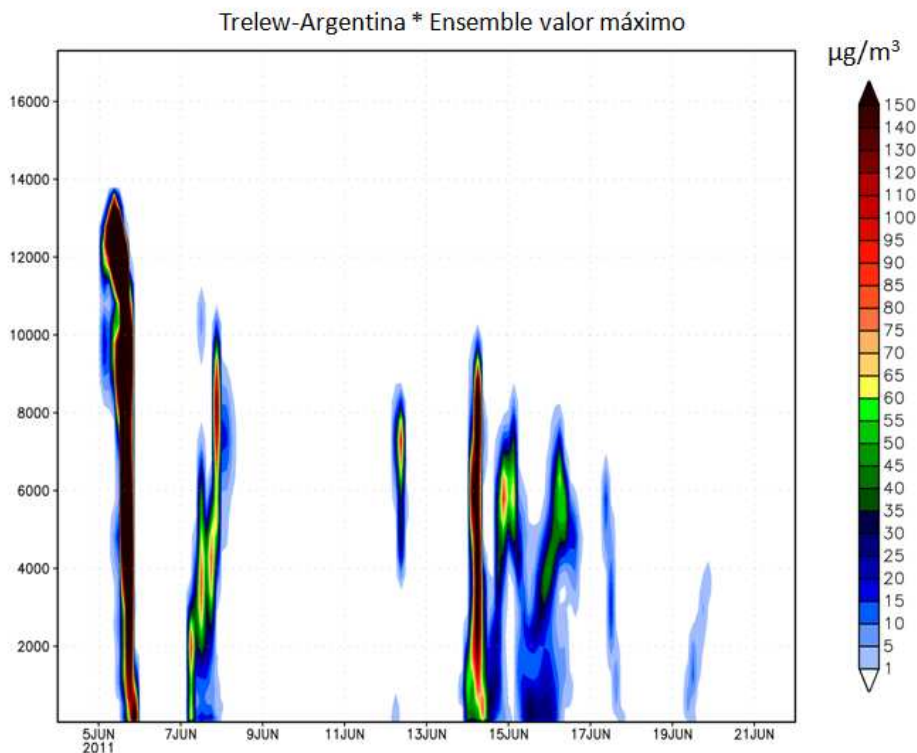


Figura 5.38: Perfil vertical das cinzas sobre a cidade de Trelew utilizando o ensemble de valor máximo.

Conclui-se que nos dias 5 e 15 a AERONET mostrou haver maior profundidade óptica e menor expoente de Angstrom, ou seja, mostrou haver indícios da

presença das cinzas vulcânicas, e para esses dias o modelo apresentou cinzas. No dia 14 o modelo apresentou uma quantidade elevada de cinzas na coluna atmosférica, porem neste dia a AERONET não validou seus dados.

A figura 5.39 mostra as cinzas vulcânicas sobre Trelew no dia 05 de junho de 2011, dia em que foi detectado maior valor de cinzas na coluna atmosférica para esta localização.

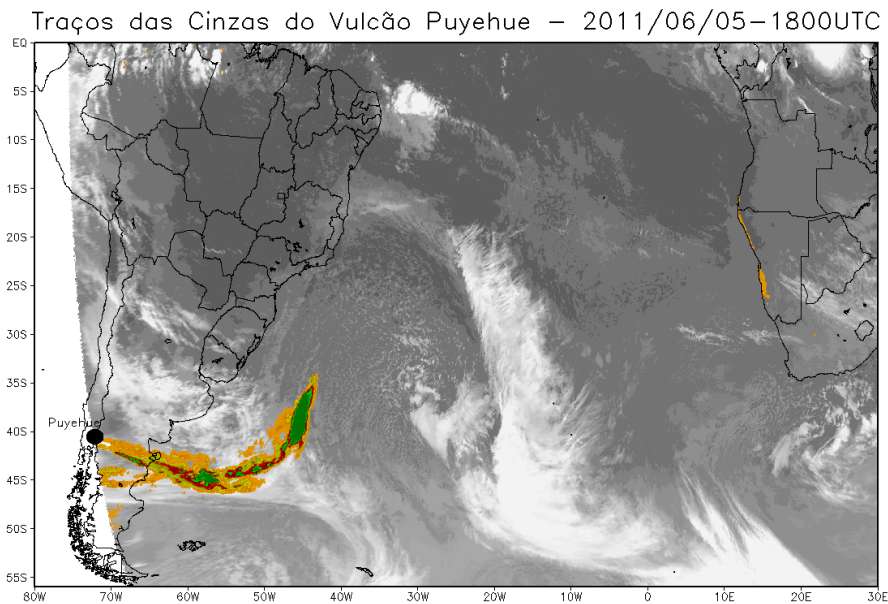


Figura 5.39: Imagem fornecida pelo DSA relativo ao dia em que o modelo mostrou maior concentração de cinzas sobre Trelew.

Sobre a cidade de Buenos Aires, temos a análise a seguir.

Podemos observar na Figura 5.40 que houve alta profundidade óptica, acima de 0,3, para os dias 06/06; 23/06; 30/06, 01/07, 09/07 e 11/07; e houve valores inferiores a 0,2 para o expoente de angstrom somente nos dias 23 e 30 de junho. Sendo assim, os dias que possivelmente houve cinzas foram os dias 23 e 30 de junho, pois houve alta profundidade óptica e baixo expoente de angstrom.

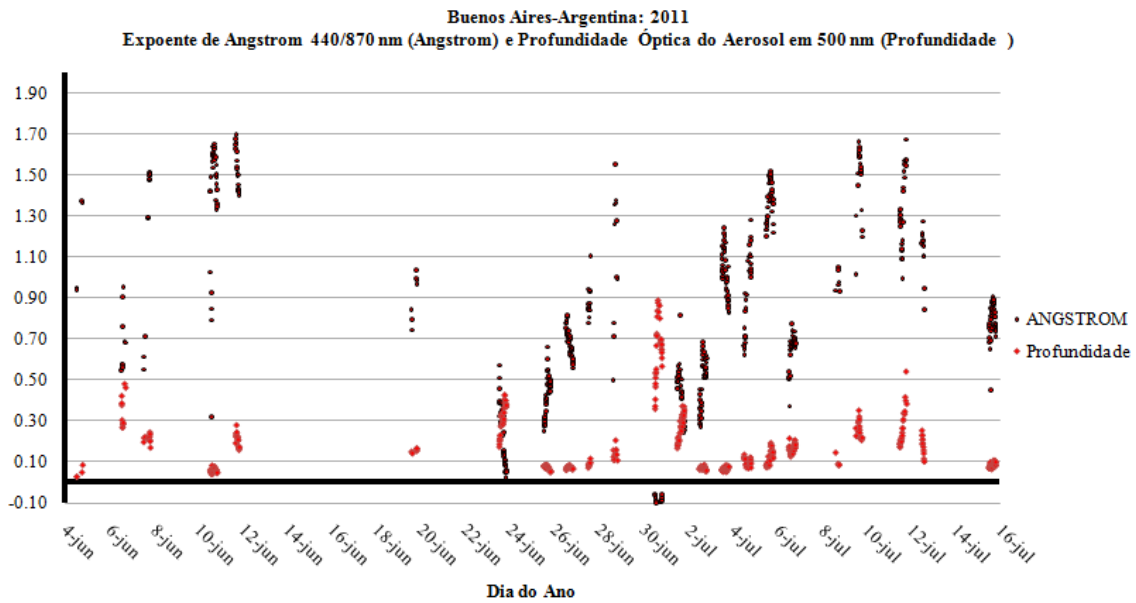


Figura 5.40: Profundidade óptica e Expoente de Angstrom para a cidade de Buenos Aires.

Podemos observar nas Figuras 5.41 e 5.42 que o modelo colocou mais cinzas sobre o céu de Buenos Aires entre os dias 07 e 15/06, sendo o dia 13/06 o dia em que o modelo colocou maior concentração de cinzas; o modelo também colocou cinzas em torno do dia 25/06 e 01/07. A Figura 5.43 focaliza o período em que o modelo colocou mais cinzas sobre a região.

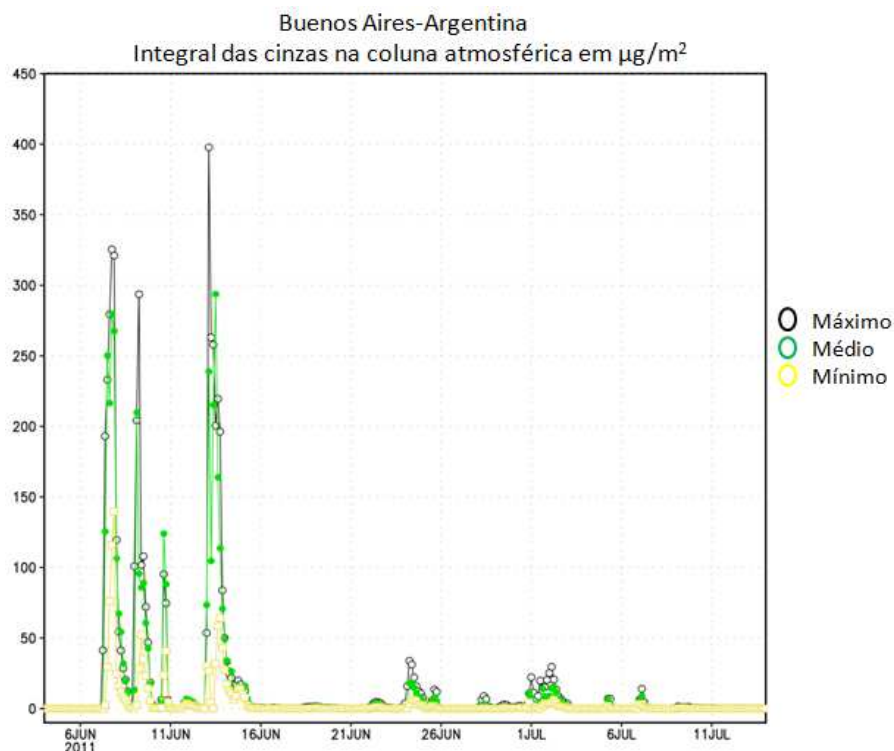


Figura 5.41: Integral da quantidade de cinzas sobre a cidade de Buenos Aires.

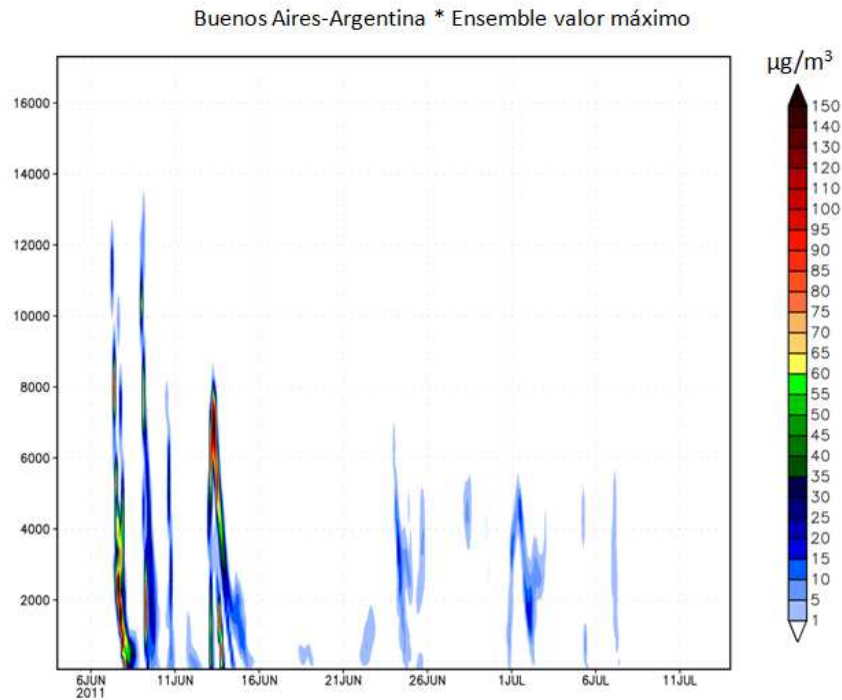


Figura 5.42: Perfil vertical das cinzas sobre a cidade de Buenos Aires utilizando o ensemble de valor máximo.

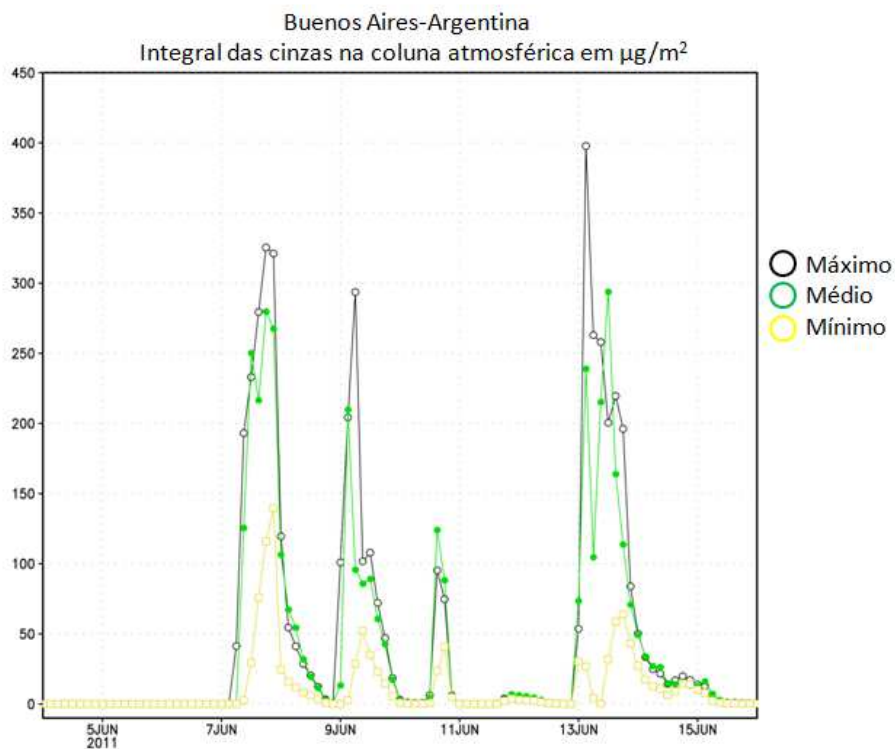


Figura 5.43: Integral da quantidade de cinzas sobre a cidade de Buenos Aires, foco sobre o período que apresentou maior concentração.

Observando o produto fornecido pelo DSA para o dia 30/06, Figura 5.42, pode-se observar que sobre a cidade de Buenos Aires estava passando uma frente

fria, e as cinzas vulcânicas se misturaram com as gotículas, fazendo com que a AERONET detectasse aerossóis grandes, gerando valor negativo no expoente de angstrom para este dia; porem o modelo colocou pouca quantidade de cinzas para este dia.

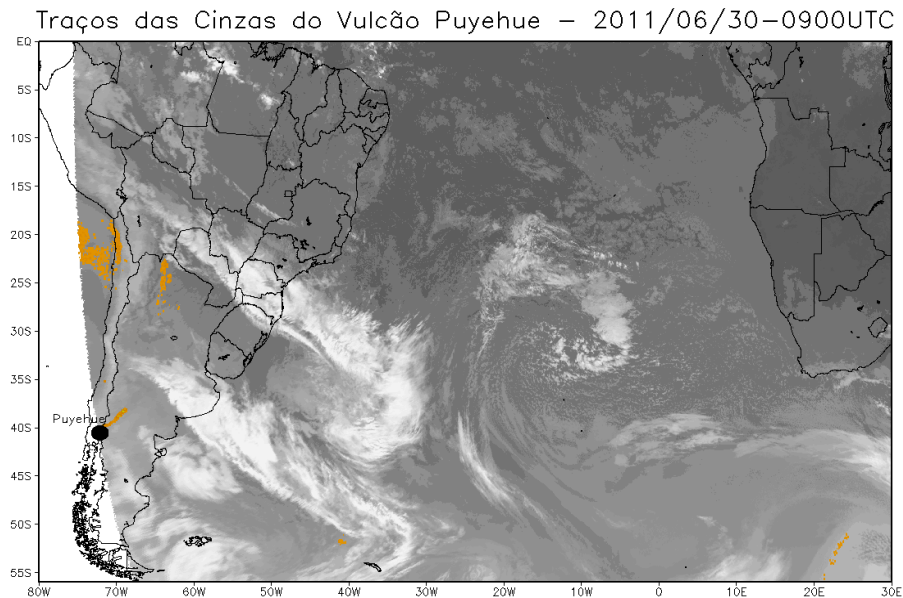


Figura 5.44 Imagem fornecida pelo DSA para o dia em que a AERONET colocou maior profundidade óptica sobre Buenos Aires.

A Figura 5.45 mostra a imagem fornecida pelo DSA para o dia 13/06, dia em que o modelo colocou maior quantidade de cinzas sobre Buenos Aires.

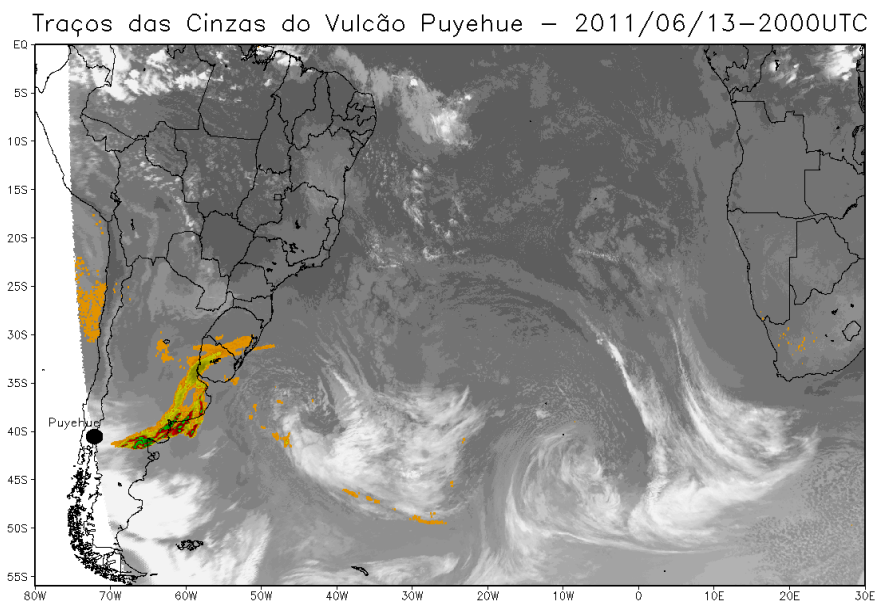


Figura 5.45: Imagem fornecida pelo DSA para o dia em que o modelo mostrou maior concentração de cinzas sobre Buenos Aires.



Comparando os dias com cinzas obtidos pelo modelo com os dados da AERONET, observamos que a metodologia utilizada para verificar a presença de cinzas vulcânicas utilizando os dados da AERONET não se aplicou para este caso; pois o pico de cinzas integrada na atmosfera de Buenos Aires é trinta vezes inferior ao pico ocorrido em Trelew, compare as Figuras 5.34 e 5.41.



## 6 CONCLUSÕES

De forma geral concluímos que o modelo meteorológico BRAMS foi capaz de simular as cinzas vulcânicas com bastante exatidão quando próximas ao vulcão, tanto utilizando 5 km como 30 km de resolução horizontal. Para regiões distantes, como o sul da África do Sul, as cinzas estão mais baixas do que o observado pelos satélites CALIPSO e Meteosat-8, isto indica que há cinzas que possuem velocidade de sedimentação inferior ao modelado.

Sobre o experimento de advecção conclui-se que ambos os esquemas do modelo possuem comportamento similar, não desenvolvendo oscilações espúrias, no que diz respeito ao transporte horizontal. O mesmo não ocorre no que se refere ao transporte vertical. Com o esquema monotônico não foram encontrados oscilações espúrias, Figuras 4.9 e 4.10, e houve uma melhora significativa na resposta do modelo em relação ao observado, Figura 4.20.

No experimento de análise de sensibilidade em relação à condição de contorno conclui-se que, utilizando a condição de contorno “análise CPTEC” o modelo se mostrou sutilmente mais preciso do que utilizando a condição de contorno “re-análise ERA”, vide comentários sobre as Figuras 4.34 e 4.38. Outra condição de contorno testada foi “previsão CPTEC”; o modelo foi capaz de prever satisfatoriamente a posição das cinzas vulcânicas para os casos próximos ao vulcão e com um a dois dias de previsão, porém após sete dias de previsão os dados de análise CPTEC se mostraram mais precisos para algumas regiões, vide comentário sobre a Figura 4.51. Este experimento nos permite concluir que é possível implementar um sistema emergencial capaz de monitorar e prever a posição das cinzas vulcânicas.

No experimento com assimilação no centro (nudging no centro) conclui-se que, aplicando assimilação no centro houve melhora da posição da pluma, vide Figuras 4.53 e 4.57. Ao aumentar a intensidade da assimilação no centro foi mostrado que não ocorrem melhoras significativas para casos próximos à fonte emissora, porém, observou-se melhora em regiões distantes da fonte emissora, vide comentário sobre as Figuras 4.73 e 4.78.

No experimento ensemble e validação do modelo, observamos que para os casos próximos ao vulcão o valor médio de altura de injeção e taxa de emissão se mostrou claramente melhor do que os valores mínimo e máximo, Figuras 5.1 e 5.2. Distante da fonte emissora o ensemble de valor máximo apresentou melhor resultado. Pelo fato do ensemble máximo se mostrar mais eficiente em longas distâncias isto pode indicar que as cinzas mais leves estão com a velocidade terminal superestimadas.

O motivo pelo valor mínimo do ensemble não representar melhora em nenhum dos casos deve-se ao fato de que os dados relativos à altura de injeção fornecidos pelo OVDAS são obtidos por câmeras digitais na superfície, logo estes fornecem a base da pluma; ao extrapolar o ensemble para valor mínimo, este valor ficou abaixo da base da pluma, abaixo do valor real. Se a altura de injeção fosse obtida por imagens de satélite seria fornecido o topo da pluma, e quem passaria a estar fora do valor real seria o ensemble de valor máximo. A Figura 6.1 simboliza um caso que ocorreu no dia 5 de junho de 2011 em que o satélite CALIPSO mediu 13 km, vide figura 3.2, e o OVIDAS 10 km, Figura 3.7, a imagem se refere à erupção do vulcão Redoubt em abril de 1990 esta foto é apenas para facilitar a compreensão do problema.

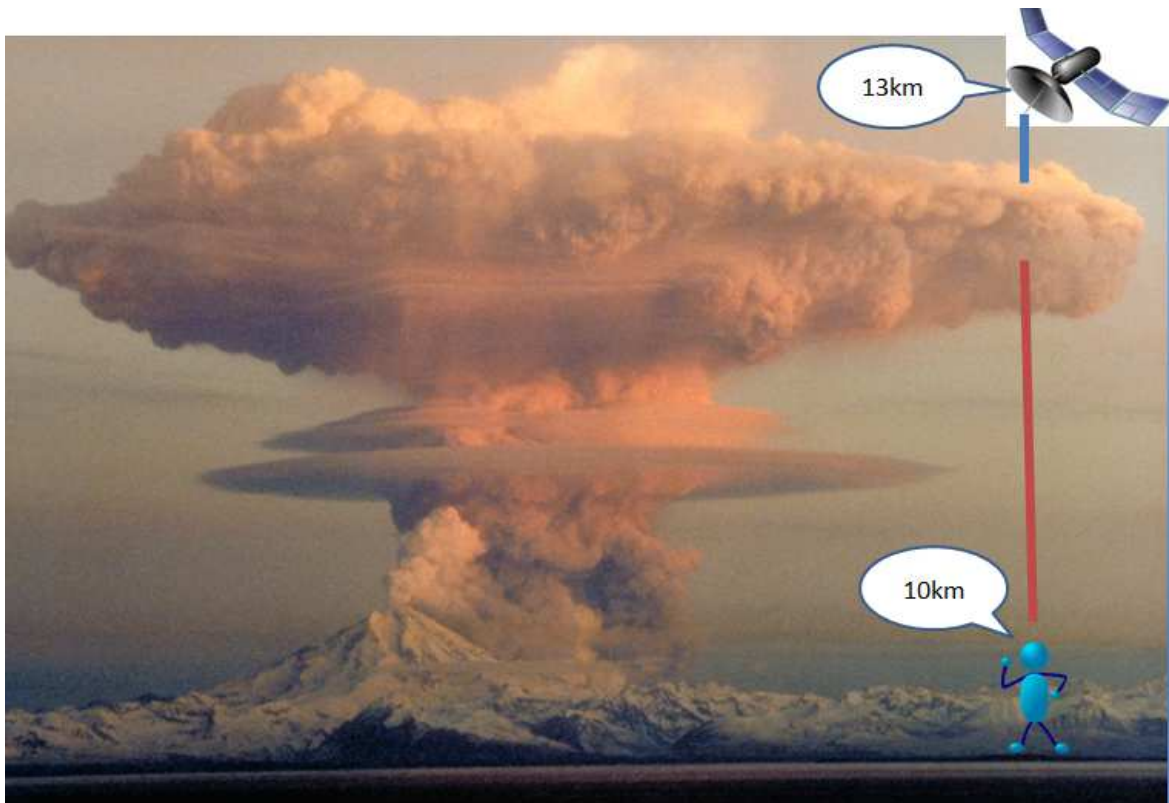


Figura 6.1: Ilustração da diferença entre a altura de injeção devido à posição do sensor.

Fonte da foto de fundo: U.S. Geological Survey Gallery (2014)

Concluimos ainda que, os sensores da AERONET conseguiram detectar a presença de cinzas vulcânicas somente quando há uma elevada concentração desta na coluna atmosférica.

Concluimos também que as imagens de satélite do CALIPSO e o produto gerado pelo DSA se mostraram muito úteis para avaliar o modelo.

Trabalhos futuros para o aprimoramento da modelagem aqui desenvolvida envolvem:

- Introdução do processo de deposição úmida acoplada com a parametrização de cumulus e microfísica,
- Introdução das propriedades ópticas de cinzas para comparação com a rede de observação e dados de sensores a bordo de satélites,

- Incluir o formato das partículas de cinzas no cálculo da velocidade da sedimentação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AEROSOL ROBOTIC NET WORK (AERONET). Disponível em:  
<<http://aeronet.gsfc.nasa.gov>> Acesso em 19 nov. 2013.

ANDRADE, K.; SOUZA, L. K. **Análise sinótica – 10/06/2011**. 2011.  
Disponível em:  
<[http://www7.cptec.inpe.br/~rupload/arquivo/analise\\_10062011.pdf](http://www7.cptec.inpe.br/~rupload/arquivo/analise_10062011.pdf)> Acesso em 18 jun. 2012.

Argentina sofre com prejuízos causados por vulcão. **Exame**. Disponível em:  
<<http://exame.abril.com.br/economia/mundo/noticias/argentina-sofre-com-prejuizos-causados-por-vulcao--2>> Acesso em: 02 jan. 2012

BARBARO, L; KARLANIAN, M.; MAZZONI, A.; MORISIGUE D.  
Caracterización de las cenizas volcánicas del volcán Puyehue para su uso como sustrato In: CONGRESO ARGENTINO DE HORTICULTURA, 35., 2012, Corrientes. **Proceedings...** Buenos Aires, AR. 2012. p. 248.

BERMUDEZ, A.; DELPINO, D. **La actividad del volcan Puyehue y su impacto sobre el territorio de la república Argentina** - primer informe. Neuquén: Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Buenos Aires, Argentina. 2011. 16 p.  
Disponível em:  
<[http://medicina.uncoma.edu.ar/download/academica/impacto\\_de\\_la\\_actividad\\_del\\_volcan\\_puyehue.pdf](http://medicina.uncoma.edu.ar/download/academica/impacto_de_la_actividad_del_volcan_puyehue.pdf)> Acesso em: 03 abr. 2014

BURSIK, M. I.; KOLBS, S. E.; BURNS, A.; BRAITSEVA, O. A.; BAZANOVA, L. I.; MELEKESTSEV, I. V.; KURBATOV, A.; PIERI, D.C. Volcanic plumes and wind: Jetstream interaction examples and implications for air traffic. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v.186, p. 60-67, 2009.

CASADEVAL, T. J.; MURRAY, T. M. Advances in volcanic ash avoidance and recovery. **Boeing Aero Magazine**, v. 9 p. 19-27, jan. 2000. Disponível em:  
<[http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/aero\\_09/volcanic.html](http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/aero_09/volcanic.html)>. Acesso em 25 out. 2011.

CATTRALL C.; REAGAN J.; THOME K.; DUBOVIK O. Variability of aerosol and spectral lidar and backscatter and extinction ratios of key aerosol types derived from selected Aerosol Robotic Network locations. **Journal of Geophysical Research**, v 110, maio 2005.

COSTA A.; MACEDONIO G.; FOLCH A. A three-dimensional Eulerian model for transport and deposition of volcanic ashes. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 241, p. 634–647, 2006.

COSTA, S. M. S.; LIMA, W. F. A.; FREITAS, S. R.; CEBALLOS, J. C.; RODRIGUES, J. V. Monitoramento dos Traços de Cinzas do Vulcão Chileno Puyehue -Cordón Caulle. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 17. (CBMET), 2012, Gramado. **Anais...** 2012. v. unico, p. 1-5. Papel. Disponível em: <<http://www.cbmet2012.com/trabalhos/>>. Acesso em: 04 abr. 2014.

DACRE, H. F.; A. L. M. GRANT; R. J. HOGAN; S. E. BELCHER; D. J. THOMSON; B. J. DEVENISH; F. MARENCO; M. C. HORT; J. M. HAYWOOD; A. ANSMANN; I. MATTIS; L. CLARISSE. Evaluating the structure and magnitude of the ash plume during the initial phase of the 2010 Eyjafjallajökull eruption using lidar observations and NAME simulations. **Jornal of geophysical research**, v. 116, 22 July. 2011. Disponível em: <<http://www.april-network.org/~sws05hd/2011JD015608.pdf>> Acesso em 03 abr. 2014.

DEVINISH, B. J.; FRANCIS, P. N.; JOHNSON B. T.; SPARKS, R. S. J.; THOMSON, D. J. Sensitivity analysis of dispersion modelling of volcanic ash from Eyjafjallajökull in May 2010. **Jornal of Geophysical Research**, v. 117, p. 21, 27 out. 2012.

ELUNIVERSAL. **Cenizas de volcán chileno completan vuelta al mundo**. Disponível em: <<http://www.eluniversal.com.co/cartagena/ambiente/cenizas-de-volcan-chileno-completan-vuelta-al-mundo-29842>> Acesso em 1 jun. 2012.

ESTACIÓN EXPERIMENTAL AGROPECUARIA CHUBUT Y EL SENASA. **Estado de situación derivado de las cenizas del complejo volcánico Puyehue–Cordón Caulle en la provincia del Chubut y recomendaciones al productor**. Argentina, 1 de jul. 2011. Disponível em: <[http://inta.gob.ar/documentos/estado-de-situacion-derivado-de-las-cenizas-del-complejo-volcanico-puyehue-2013-cordon-caulle-en-la-provincia-de-chubut-y-recomendaciones-al-productor-1/at\\_multi\\_download/file/Info\\_inta\\_senasa\\_cenizas%2001-07-2011.pdf](http://inta.gob.ar/documentos/estado-de-situacion-derivado-de-las-cenizas-del-complejo-volcanico-puyehue-2013-cordon-caulle-en-la-provincia-de-chubut-y-recomendaciones-al-productor-1/at_multi_download/file/Info_inta_senasa_cenizas%2001-07-2011.pdf)> Acesso em: 03 abr. 2014.

FOLCH, A.; JORBA, O.; VIRAMONTE, J. Volcanic ash forecast – application to the May 2008 Chaitén eruption. **Natural Hazards and Earth System**, v. 8 p. 927-940, 2008.

FREITAS, S. R.; LONGO, K. M.; RODRIGUES, L. F. Modelagem numérica da composição química da atmosfera e seus impactos no tempo, clima e qualidade do ar. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.24, n. 2,188-207, 2009.



FREITAS, S. R.; LONGO, K. M.; SILVA DIAS, M. A. F.; CHATFIELD, R.; SILVA DIAS, P.; ARTAXO, P.; ANDREAE, M. O. ; GRELL, G.; RODRIGUES, L. F.; FAZENDA, A.; PANETTA, J. The Coupled Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System (CATT-BRAMS) - Part 1: Model description and evaluation. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 9, p. 2843-2861, 2009.

FREITAS, S. R.; RODRIGUES, L. F.; LONGO, K. M. Impact of a monotonic advection scheme with low numerical diffusion on transport modeling of emissions from biomass burning. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 4, p. M01001, 2012.

FRIEDLINGSTEIN, P.; HOUGHTON, R. A., MARLAND, G.; HACKLER, J.; BODEN, T. A., CONWAY, T. J.; CANADELL, J. G.; RAUPACH, M. R.; CIAIS, P.; LE QUÉRÉ, C. Update on CO<sub>2</sub> emissions. **Nature Geoscience**, v. 3, n. 12, p. 811–812, 2010. doi:10.1038/ngeo1022.

GAITÁN, J. J.; AYESA, J. A.; RAFFO, F.; UMAÑA, F.; BRAN, D. B.; MORAGA, H. **Monitoreo de La distribución de cenizas volcánicas en Río Negro y Neuquén**: situación a los 6 meses de la erupción. Buenos Aires: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental S.C. de Bariloche, 22 dez. 2011. Disponível em: <[http://inta.gob.ar/documentos/emergencia-agropecuaria-cenizas/at\\_multi\\_download/file/Informe\\_Distribucion\\_cenizas\\_6meses.pdf](http://inta.gob.ar/documentos/emergencia-agropecuaria-cenizas/at_multi_download/file/Informe_Distribucion_cenizas_6meses.pdf)> Acesso em: 3 abr. 2014.

GAITÁN, J. J.; AYESA, J. A.; UMAÑA, F.; RAFFO, F.; BRAN, D. B. **Cartografía del área afectada por cenizas volcánicas en las provincias de Río Negro y Neuquén**. Buenos Aires: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental S.C. de Bariloche, 14 out. 2011.

GEOLOGY.COM. **Volcanic ash**. Disponível em: <<http://geology.com/articles/volcanic-ash.shtml>> Acesso em: 14 jun 2012.

GEOPHYSICAL INSTITUTE, UNIVERSITY OF ALASKA FAIRBANKS. **Puff images**. Disponível em: <<http://puff.images.alaska.edu/index.shtml>> Acesso em: 16 jun. 2012

HOW volcanoes work: climate effects of volcanic eruptions. San Diego: Department of Geological Science of San Diego State University. Available at: <[http://www.geology.sdsu.edu/how\\_volcanoes\\_work/climate\\_effects.html](http://www.geology.sdsu.edu/how_volcanoes_work/climate_effects.html) > Acesso em: 05 abr. 2012.

INTERNATIONAL VOLCANIC HEALTH HAZARD NETWORK. **Volcanic gases and aerosols guidelines**. Disponível em:<[http://www.ivhnn.org/images/pdf/gas\\_guidelines.pdf](http://www.ivhnn.org/images/pdf/gas_guidelines.pdf)> Acesso em: 02 jan. 2012.

ISLÂNDIA – **Eyjafjallajökull**. Disponível em: <<http://www.terra.com.br/noticias/mundo/infograficos/vulcoes-chile-x-islandia/eyjafja.htm>> Acesso em: 08 maio 2012.

JAMES, R. C.; **Earth coordinates**. 2006. Disponível em: <[http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/gps/clynch\\_pdfs/coorddef.pdf](http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/gps/clynch_pdfs/coorddef.pdf)> Acesso em: 03 abr. 2014.

KAMINSKI, E.; TAIT S.; FERRUCCI, F.; MARTET, M.; HIRN, B.; HUSSON, P. Estimation of ash injection in the atmosphere by basaltic volcanic plumes: The case of the Eyjafjallajökull 2010 eruption. **Journal of Geophysical Research**, vol. 116, 08 ago. 2011.

LANGLEY RESEARCH CENTER/NASA. **CALIPSO quality statements lidar level 2 cloud and aerosol layer products version releases: 3.01, 3.02**. Disponível em: <[https://eosweb.larc.nasa.gov/sites/default/files/project/calipso/quality\\_summaries/CALIOP\\_L2LayerProducts\\_3.01.pdf](https://eosweb.larc.nasa.gov/sites/default/files/project/calipso/quality_summaries/CALIOP_L2LayerProducts_3.01.pdf)> Acesso em: 23 ago. 2013.

\_\_\_\_\_. **CALIPSO quality statements: lidar level 2 vertical feature mask version releases: 1.10,1.20**. Disponível em: <[https://eosweb.larc.nasa.gov/sites/default/files/project/calipso/quality\\_summaries/CALIOP\\_L2VFMPProducts.pdf](https://eosweb.larc.nasa.gov/sites/default/files/project/calipso/quality_summaries/CALIOP_L2VFMPProducts.pdf)> Acesso em: 23 ago. 2013.

\_\_\_\_\_. **Cloud – aerosol LIDAR infrared pathfinder satellite observations data management system data products catalog document No: PC-SCI-503** December 2006. Disponível em: [http://www-calipso.larc.nasa.gov/products/CALIPSO\\_DPC\\_Rev2x3.pdf](http://www-calipso.larc.nasa.gov/products/CALIPSO_DPC_Rev2x3.pdf) Acesso em: 23 ago. 2013.

LIMA, E. F.; SOMMER, C. A.; SILVA, I M. C.; NETTO, M. L.; ALVES, C. M. Morfologia e química de cinzas do vulcão Puyehue depositadas na região metropolitana de porto alegre em junho de 2011. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 42, p. 265-280, 2011.

LIPMAN, P. W.; MULLINEAUX, D. R. **The 1980 eruptions of Mount St. Helens**. Washington: US Department of the Interior, US Geological Survey, 1982.

LONGO, K. M.; S. R. FREITAS; M. PIRRE; V. MARÉCAL; L. F. RODRIGUES; J. PANETTA; M. F. ALONSO; N. E. ROSÁRIO; D. S. MOREIRA; M. S. GÁCITA; J. ARTETA; R. FONSECA; R. STOCKLER; D. M. KATSURAYAMA; A. FAZENDA; M. BELA. The Chemistry CATT-BRAMS model (CCATT-BRAMS 4.5): a regional atmospheric model system for integrated air quality and weather forecasting and research. **Geoscientific Model Development Discussions**, v. 6, p. 11730-1222, abr. 2013.

MASTIN, L. G.; GUFFANTI, M.; SERVIRANCKX, R.; WEBLEY, P.; BARSOTTI, S.; DEAN, K.; DURANT, A.; EWERT, J. W.; NERI, A.; ROSE, W. I.; SCHNEIDER, D.; SIEBERT, L.; STUNDER, B.; SWANSON, G.; TUPPER, A.; VOLENTIK, A.; WAYTHOMAS, C. F. A multidisciplinary effort to assign realistic source parameters to models of volcanic ash-cloud transport and dispersion during eruptions. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 186, p.10-21, 2009.

MEMES. **Interrupção de vôos por atividade de vulcão custou U\$ 5 bi ao PIB global**. Disponível em: <<http://www.memes.com.br/jportal/portal.jsf?post=24945>> Acesso em: 08 maio 2012.

MENDONÇA, F. A. C. Cinzas vulcânicas e a segurança de voo. **Conexão SIPAER**, v. 3, p 77-90. 2011.

METEO FRANCE. **Toulouse VAAC**. Disponível em: <<http://www.meteo.fr/vaac/>> Acesso em: 03 abr. 2014.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **BROWSE**. Disponível em: <[http://www-calipso.larc.nasa.gov/data/BROWSE/production/V3-01/2011-06-05/2011-06-05\\_17-51-52\\_V3.01\\_map\\_1.png](http://www-calipso.larc.nasa.gov/data/BROWSE/production/V3-01/2011-06-05/2011-06-05_17-51-52_V3.01_map_1.png)> Acesso em: 20 abr. 2013.

\_\_\_\_\_. **Natural Hazards**. Disponível em: <<http://earthobservatory.nasa.gov/NaturalHazards> > Acesso em: 12 abr. 2012.

\_\_\_\_\_. **Products**. Disponível em: <[http://www-calipso.larc.nasa.gov/products/lidar/browse\\_images/](http://www-calipso.larc.nasa.gov/products/lidar/browse_images/)> Acessado em: 20 jun. 2013.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). **National weather service**: climate prediction center. Disponível em: <<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/climatology/>> Acesso em: 20 jan. 2013.

OBERHUBER, J. M.; HERZOG, M.; GRAF, H.F.; SCHWANKE, K. Volcanic plume simulation on large scales. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 87, p. 29-53, 1998.

OBSERVATÓRIO VOLCANOLÓGICO DE LOS ANDES DEL SUR (OVDAS). **Actividad volcánica 2010 y 2011 región de Los Lagos**. Disponível em: <[http://www2.sernageomin.cl/ovdas/ovdas7/informativos2/RAV\\_X\\_2010.htm](http://www2.sernageomin.cl/ovdas/ovdas7/informativos2/RAV_X_2010.htm) | > Acesso em: 16 abr. 2012.

\_\_\_\_\_. **Puyehue-Cordon Caulle**. Disponível em: <<http://www.sernageomin.cl/volcan.php?pagina=3&ild=38>> Acesso em: 19 fev. 2012.

OMAR, A. H.; WON, J. G.; WINKER, D. M.; YOON, S. C.; DUBOVIK, O.; MCCORMICK, M. P. Development of global aerosol models using cluster analysis of Aerosol Robotic Network (AERONET) measurements. **Journal of geophysical research**, v. 110, n. D10, 2005.

PRUPPACHER, H. R.; KLETT, J. d. **Microphysics of clouds and precipitation**. 2. ed. Kluwer academic Publishers, dordrecht, the netherlands, 954 pp, 1997.

ROSE, W.I.; DURANT, A. J. Fine ash content of explosive eruptions. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 186 p. 32-39, 2009.

ROSE, W. I.; SELF, S.; MURROW, P. J.; BONADONNA, C.; DURANT, A. J.; ERNST, G. G. J. Nature and significance of small volume fall deposits at composite volcanoes: insights from the October 14, 1974 Fuego eruption, Guatemala. **Bulletin of Volcanology**, v. 70 p. 1043-1067, 2008.

SMITHSONIAN INSTITUTION (SI). **Find regions**. Disponível em: <[http://www.volcano.si.edu/world/find\\_regions.cfm](http://www.volcano.si.edu/world/find_regions.cfm)> Acesso em: 20 jan. 2012.

\_\_\_\_\_. **Home**. Disponível em: <<http://www.volcano.si.edu>> Acesso em: 10 fev. 2012.

\_\_\_\_\_. **Puyehue-Cordón Caulle**. Disponível em: <<http://www.volcano.si.edu/world/volcano.cfm?vnum=1507-15=&volpage=weekly#Jul2011>> Acesso em: 16 mar. 2012.

SPARKS, R. S. J.; BURSİK, M. I.; S. N. CAREY; GILBERT, J. S.; GLAZE, L. S.; SIGURDSSON, H.; WOODS, A. W. **Volcanic plumes**. Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd., 1997.

STEENSE, T.; STUEER, M.; WEBLEY, P.; GRELL, G.; FREITAS, S. Qualitative comparison of Mount Redoubt 2009 volcanic clouds using the PUFF and WRF-Chem dispersion models and satellite remote sensing data. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 259 p. 235-247, 2013.

STUEFER, M.; FREITAS, S. R.; GRELL, G.; WEBLEY, P.; PECKHAM, S.; MCKEEN, S. A.; EGAN, S. D. Inclusion of ash and SO<sub>2</sub> emissions from volcanic eruptions in WRF-Chem: development and some applications. **Geoscientific Model Development**, v. 5, p. 2571-2597, 2012.

THE ATLANTIC. **Chile's Puyehue volcano erupts**. Disponível em: <<http://www.theatlantic.com/infocus/2011/06/chiles-puyehue-volcano-erupts/100081/>> Acesso em: 15 fev. 2012.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Ash properties & dispersal by wind**. Disponível em: <<http://volcanoes.usgs.gov/ash/properties.html>>. Acesso em: 04 jan. 2012.

\_\_\_\_\_. **Health**. Disponível em: <<http://volcanoes.usgs.gov/ash/health/index.html>> Acesso em: 08 maio 2012.

\_\_\_\_\_. **Gallery**. Disponível em: [http://gallery.usgs.gov/photos/03\\_29\\_2013\\_otk7Nay4LH\\_03\\_29\\_2013\\_5#.UrvS2vfTnrc](http://gallery.usgs.gov/photos/03_29_2013_otk7Nay4LH_03_29_2013_5#.UrvS2vfTnrc) Acesso em: 13 jan. 2014.

\_\_\_\_\_. **Volcanic gases and climate change overview**. Disponível em: <<http://volcanoes.usgs.gov/hazards/gas/climate.php>> Acesso em: 08 abr. 2012.

\_\_\_\_\_. **Volcanic gases and their effects**. Disponível em: <<http://volcanoes.usgs.gov/hazards/gas/index.php>> Acesso em: 02 jan. 2012.

\_\_\_\_\_. **Volcanic sulfur aerosols affect climate and the earth's ozone layer**. Disponível em: <<http://volcanoes.usgs.gov/hazards/gas/s02aerosols.php>> Acesso em: 08 maio 2012.

VAUGHAN, M.; YOUNG, S.; WINKER, D.; POWELL, K.; OMAR, A.; LIU, Z.; HU, Y.; HOSTLLER, C. Fully automated analysis of space-based lidar data: an overview of the CALIPSO retrieval algorithms and data products. **Proceedings of SPIE**, v. 5575, Laser Radar Techniques for Atmospheric Sensing, p. 16-30, 16 nov. 2004.

VUOLO, J. **Introdução à teoria de erros**. 3. ed. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1999.

WEBSTER, H. N.; THOMSON, D. J.; JOHNSON, B. T.; HEARD, I. P. C.; TURNBULL, K.; MARENCO, N. I.; et al. Operational prediction of ash concentrations in the distal volcanic cloud from the 2010 Eyjafjallajökull eruption. **Journal of Geophysical Research**, v. 117, 27 out. 2012. , doi:10.1029/2011JD016790.



## APÊNDICE A – Calculo da advecção horizontal através do GRADS

Digamos que você tenha que calcular a advecção horizontal da variável chamada “concentracao” utilizando o programa GRADS. Esta conta se faz da seguinte forma.

\*calcula a diferença horizontal na componente x

'dconcentracaox = cdiff(concentracao,x)'

\*calcula a diferença horizontal na componente y

'dconcentracaoy = cdiff(concentracao,y)'

\*transforma a longitude de graus para radianos

'dx = cdiff(lon,x)\*3.1416/180'

\*transforma a latitude de graus para radianos

'dy = cdiff(lat,y)\*3.1416/180'

\*calcula a adveccao da variável “concentração”

'advccao = -1\*( (ue\_avg\*dconcentracaox)/(cos(lat\*3.1416/180)\*dx) +  
ve\_avg\*dconcentracaoy/dy )/6.37e6'

Baseado em <http://www.iges.org/grads/gadoc/gradfunccdifff.html> acessado em 16 de dezembro de 2013.





## APÊNDICE B - Parametrização de difusão horizontal akmin

No BRAMS quando a grade horizontal é grande o parâmetro de difusão horizontal é dado pela formula B1.

$$K_{horiz} = (c_x \Delta x)^2 \sqrt{2 \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right)^2} \quad \text{B2}$$

Onde o  $c_x$  é constante, e  $\Delta x$  é o espaçamento horizontal da grade,  $u$  e  $v$  são os componentes do campo horizontal do vento.

O atual coeficiente horizontal de mistura é dado pela relação B2

$$K_{horiz}^{effec} = \max [K_{horiz}^{min}, K_{horiz}] \quad \text{B2}$$

Onde  $kmin$  é o valor mínimo possível dado por B3

$$K_{horiz}^{min} = 0.075 akmin (\Delta x)^{4/3} \quad \text{B3}$$

A Equação B2 serve para prevenir coeficientes de difusões horizontais muito pequenos em situações onde a taxa de deformação do fluido ocorre próximo de zero, resultando em uma fraca difusão e muitos ruídos de simulação. Akmin é a parametrização de difusão horizontal, quanto maior o valor do akmin maior a difusão horizontal, e menor o ruído do modelo. Mais informações olhe apêndice B de Freitas et al. (2012).



## APÊNDICE C- Sensor LIDAR-CALIPSO

O instrumento CALIOP, que se encontra no satélite CALIPSO, carrega um sensor ativo de detecção óptica chamado LIDAR, este envia pulsos laser através da atmosfera, estes pulsos estão no comprimento de onda de 532 nm e 1064 nm, a forma diferenciada de absorção e reflexão dos aerossóis para diferentes comprimentos de onda é conhecido na comunidade lidar como “lidar ratio” para informações mais detalhadas olhe os artigos Cattrall et al. (2005) e Vaughan et al. (2004), e os seguintes manuais: Langley Research Center/NASA. (2013a,b,c). A frequência do pulso laser é de 20,16 Hz, isto corresponde a aproximadamente um pulso a cada 0,05 segundos; com o intuito de diminuir a quantidade de dados, é feito um agrupamento de 15 pulsos, e escolhido o oitavo pulso laser, o pulso mediano, para representar o agrupamento, este conjunto de 15 pulsos corresponde a aproximadamente um dado a cada 0,7440 segundos, durante este tempo, 0,7440s, o satélite percorre aproximadamente 5 km ao longo do trajeto de leitura do laser, isto é, 5 km em relação a superfície da Terra. A Tabela C.1 mostra a resolução espacial do sensor CALIOP, e a Figura C.1 mostra a posição espacial dos dados.

Tabela C.1: Resolução espacial da variável Feature\_Classification\_Flag.

<b>Perfil de Resolução Espacial</b>					
<b>Região de Altitude</b>		<b>Resolução Vertical (meters)</b>	<b>Resolução Horizontal (meters)</b>	<b>Perfis por 5 km</b>	<b>Amostras por perfil</b>
<b>Base (km)</b>	<b>Top (km)</b>				
-0.5	8.2	30	333	15	290
8.2	20.2	60	1000	5	200
20.2	30.1	180	1667	3	55
<b>Total</b>					<b>545</b>

Fonte: Adaptado de Langley Research Center/NASA (2013b)

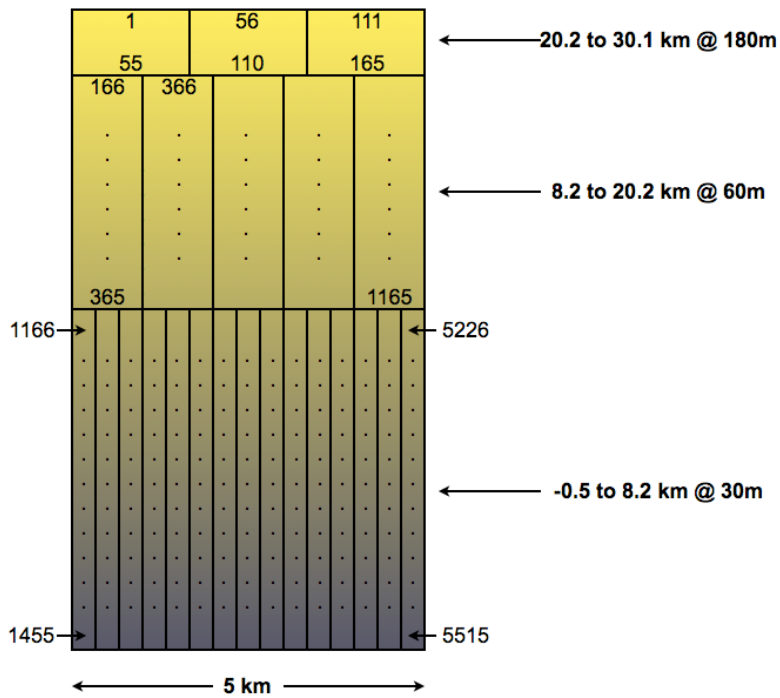


Figura C.1: Posição espacial dos dados da variável Feature\_Classification\_Flag.  
 Fonte: Langley Research Center/NASA (2013a).

O sensor CALIOP distingue os aerossóis devido a suas diferentes formas de absorver e refletir diferentes comprimentos de onda, vide Tabela 2.3. Para saber mais detalhes olhe Langley Research Center/NASA (2013a) ou leia os artigos do Omar et al. (2005), Cattrall et al. (2005) e Vaughan et al. 2004. O CALIPSO possui lasers nos comprimentos de onda de 532 nm e 1064 nm.

Tabela C.2: Tipos de aerossóis para diferentes comprimentos de onda do sensor CALIOP.

<b>Initial lidar ratios used in the version 3.01 extinction solver</b>			
<b>Type</b>	<b>Subtype</b>	<b>Initial 532 nm lidar ratio</b>	<b>Initial 1064 nm lidar ratio</b>
cloud	water	19 ± 10 sr	N/A
cloud	ice	25 ± 10 sr	N/A
cloud	unknown phase	22 ± 11 sr	N/A
aerosol	marine	20 ± 6 sr	45 ± 23 sr
aerosol	desert dust	40 ± 20 sr	55 ± 17 sr
aerosol	polluted continental	70 ± 25 sr	30 ± 14 sr
aerosol	clean continental	35 ± 16 sr	30 ± 17 sr
aerosol	polluted dust	55 ± 22 sr	48 ± 24 sr
aerosol	biomass burning	70 ± 28 sr	40 ± 24 sr
stratospheric	all	25 ± 10 sr	25 ± 10 sr

Fonte: Langley Research Center/NASA (2013).

Os dados colhidos pelo satélite CALIPSO encontram-se no formato HDF (Hierarchical Data Format). HDF é um conjunto de arquivos e bibliotecas criadas para organização e armazenamento de grandes quantidades de dados numéricos. Estes dados podem ser obtidos pelos sites:

-><https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/searchTool.cgi?Dataset=>

-><https://www-calipso.larc.nasa.gov/search/>

->[http://www-calipso.larc.nasa.gov/tools/data\\_avail/index.php?d=2011](http://www-calipso.larc.nasa.gov/tools/data_avail/index.php?d=2011)

->[https://eosweb.larc.nasa.gov/project/calipso/calipso\\_table](https://eosweb.larc.nasa.gov/project/calipso/calipso_table)

Um conjunto de dados importante a para comparar com a saída do modelo é o “CALIPSO Lidar Level 2 Vertical Feature Mask”, que possui a finalidade de descrever a distribuição horizontal e vertical de nuvens e aerossóis observados pelo CALIOP. Este conjunto de dados possui as seguintes variáveis: Latitude, Longitude, Profile\_Time, Profile\_UTC\_Time, Day\_Night\_Flag, Land\_Water\_Mask, Spacecraft\_Position e Feature\_Calssification\_Flags. Cada variável é descrita a seguir.

As variáveis Latitude e Longitude estão em graus, seus valores são correspondentes ao valor do oitavo laser de um conjunto de 15 pulsos. Devido a velocidade do satélite, isto significa que são fornecidos um valor de latitude e longitude para cada 5 km da trajetória do laser.

A variável Profile\_Time é expresso em International Atomic Time (TAI), isto significa que sua unidade é em segundos a começar em 1 de janeiro de 1993,

enquanto o Profile.UTC\_Time é expresso em Universal Time Coordinated (UTC) no formato 'AAMMDDFFFFFFF', onde 'AA' representam os dois últimos dígitos do ano, 'DD' representa o dia e 'FFFFFFF' representa a fração do dia; ambas variáveis são referentes ao valor do oitavo pulso laser.

A variável Day\_Night\_Flag indica a condição de luminosidade em uma altitude de aproximadamente 24 km acima no nível médio do mar. Quando esta variável indica 0 quer dizer dia e 1 quer dizer noite. Nos conjuntos de dados haverá apenas zero ou um, nunca ambos, pois os conjuntos de dados são separados por dia e noite. O valor desta variável também se refere ao oitavo pulso laser.

A variável Land\_Water\_Mask indica o tipo de superfície, seu valor corresponde ao valor obtido pelo oitavo laser.

A variável Spacecraft\_Position representa a posição do satélite em relação as coordenadas ECR (Earth Centered Rotational), também conhecido como coordenadas ECEF (Earth Centered, Earth Fixed). Seu valor corresponde ao valor obtido pelo oitavo laser. Para saber mais sobre coordenadas ECR leia James R. C. (2006).

A variável Feature\_Classification\_Flags está em código binário, isto é, cada conjunto de bits representa uma informação conforme a Tabela C.3, esta variável normalmente está em uma matriz de 'TTTT' por 5515; onde 5515 é a posição espacial dos aerossóis, conforme a Figura C.1 e 'TTTT' é o tempo, cujo valor está em torno de 4200 unidades, cada unidade de tempo corresponde a 15 pulsos lasers. O intervalo de tempo varia para cada conjunto de dados, pois os conjuntos de dados são divididos entre dia e noite, e dependendo da trajetória do satélite e período do ano estes intervalos de tempo variam; na média o período de tempo é em torno de 50 minutos.

Tabela C.3: Classificação segundo a variável Feature\_Classification\_Flag.

<b>Feature Classification Flag Definition</b>		
<b>Bits</b>	<b>Field Description</b>	<b>Bit Interpretation</b>
1-3	Feature Type	0 = invalid (bad or missing data) 1 = "clear air" 2 = cloud 3 = aerosol 4 = stratospheric feature 5 = surface 6 = subsurface 7 = no signal (totally attenuated)
4-5	Feature Type QA	0 = none 1 = low 2 = 157édium 3 = high
6-7	Ice/Water Phase	0 = unknown / not determined 1 = randomly oriented ice 2 = water 3 = horizontally oriented ice
8-9	Ice/Water Phase QA	0 = none 1 = low 2 = 157édium 3 = high
10-12	Feature Sub-type	
	If feature type = aerosol, bits 10-12 will specify the aerosol type	0 = not determined 1 = clean marine 2 = dust 3 = polluted continental 4 = clean continental 5 = polluted dust 6 = smoke 7 = other
	If feature type = cloud, bits 10-12 will specify the cloud type.	0 = low overcast, transparent 1 = low overcast, opaque 2 = transition stratocumulus 3 = low, broken cumulus 4 = altocumulus (transparent) 5 = altostratus (opaque) 6 = cirrus (transparent) 7 = deep convective (opaque)
	If feature type = Polar Stratospheric Cloud, bits 10-12 will specify PSC classification.	0 = not determined 1 = non-depolarizing PSC 2 = depolarizing PSC 3 = non-depolarizing aerosol 4 = depolarizing aerosol 5 = spare 6 = spare 7 = other
13	Cloud / Aerosol /PSC Type QA	0 = not confident 1 = confident
14-16	Horizontal averaging required for detection (provides a coarse measure of feature backscatter intensity)	0 = not applicable 1 = 1/3 km 2 = 1 km 3 = 5 km 4 = 20 km 5 = 80 km

Fonte: Tabela 44 do Langley Research Center/NASA (2013b).

É de suma importância compreender a variável `Feature_Calssification_Flags`, mais especificamente as informações que se encontram em seus três primeiros bits, que forma o conjunto 'Feature Type', Tabela 2.3, pois estas informações serão comparadas com as simulações do modelo, Figura 4.16 como exemplo. Segue abaixo a descrição sucinta do conjunto 'Feature Type', para maiores informações olhe Langley Research Center/NASA (2013b).

'invalid' significa que o dado foi perdido ou inválido. 'clear air' significa que o sensor não detectou aerossóis. 'cloud', o sensor detectou nuvens, cuja água pode estar ou no estado líquido ou sólido ou misto. 'aerosol', o sensor detectou aerossol não água. 'stratospheric feature' são aerossóis detectados acima da tropopausa, não faz distinção se são nuvens ou aerossóis. Na região polar existem bastantes nuvens estratosféricas, conhecidas pela sigla inglesa PSCs (Polar Stratospheric Clouds). 'surface' elevação da superfície acima do nível médio do mar. 'subsurface' devido a aberrações do sinal de retorno em 532 nm provocados por terrenos acidentados, foi implementado este artifício instrumental, não há significância geológica, 'no signal' este é o valor dado a toda a região abaixo de uma atenuação completa do sinal.

Compreender o conjunto de bits 14-16 também é importante, pois este serve para se ter uma ideia grosseira sobre a intensidade do sinal de retroespalhamento. A variável 'Horizontal averaging required for detection' representa a resolução horizontal média necessária para detectar a camada de aerossóis ou nuvens, quanto menor a resolução necessária para se detectar, maior a concentração de partículas. Ainda não foi descoberta uma correlação entre sinal de retroespalhamento e concentração de partículas, fonte Langley Research Center/NASA (2013).