



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/05.07.18.46-TDI

**VALIDAÇÃO DO MÉTODO TRACK PARA  
IDENTIFICAÇÃO OBJETIVA DOS VÓRTICES  
CICLÔNICOS DE ALTOS NÍVEIS EM REGIÕES  
SUBTROPICAIS**

Henri Rossi Pinheiro

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pelo Dr. Manoel Alonso Gan, aprovada em 04 de junho de 2010.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/37ESD38>>

INPE  
São José dos Campos  
2010

**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:**

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

**Membros:**

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

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

Dr<sup>a</sup> Regina Célia dos Santos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

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

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Horácio Hideki Yanasse - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

**BIBLIOTECA DIGITAL:**

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

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

Deicy Farabello - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

**REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTARIA:**

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

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

**EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Vivéca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/05.07.18.46-TDI

**VALIDAÇÃO DO MÉTODO TRACK PARA  
IDENTIFICAÇÃO OBJETIVA DOS VÓRTICES  
CICLÔNICOS DE ALTOS NÍVEIS EM REGIÕES  
SUBTROPICAIS**

Henri Rossi Pinheiro

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pelo Dr. Manoel Alonso Gan, aprovada em 04 de junho de 2010.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/37ESD38>>

INPE  
São José dos Campos  
2010

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Pinheiro, Henri Rossi.  
P655v Validação do método track para identificação objetiva dos vórtices ciclônicos de altos níveis em regiões subtropicais / Henri Rossi Pinheiro. – São José dos Campos : INPE, 2010.  
xxvi+130 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/05.07.18.46-TDI)

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010.  
Orientador : Dr. Manoel Alonso Gan.

1. Identificação objetiva. 2. Climatologia. 3. Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN). I.Título.

CDU 551.589(81)


---

Copyright © 2010 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2010 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

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

**Dr. Nelson Jesus Ferreira**



---

Presidente / INPE / SJCampos - SP

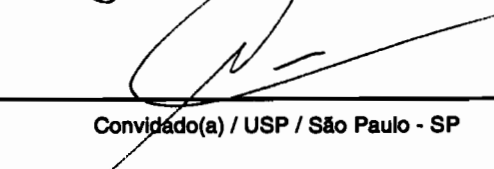
**Dr. Manoel Alonso Gan**



---

Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

**Dr. Adilson Wagner Gandu**



---

Convidado(a) / USP / São Paulo - SP

**Aluno (a): Henri Rossi Pinheiro**

**São José dos Campos, 04 de junho de 2010**



*"A coisa mais bela que podemos experimentar é o mistério. Essa é a fonte de toda a arte e ciências verdadeiras."*

*Albert Einstein*





*Dedico esta dissertação a meus pais,  
José Renes e Marta Helena,  
e a meus irmãos, Márcio e Renes.*



## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me conceder a vida e me tornar capaz de enfrentar os desafios que ela me proporciona.

A meus pais, José Renes Pinheiro e Marta Helena Rossi Pinheiro, pelo amor incondicional que recebi antes mesmo de nascer. Sou eternamente grato por vocês nunca me deixarem desistir dos meus sonhos, pela confiança na minha capacidade, por todo o carinho e cuidados que recebi, vocês são responsáveis pelo meu caráter.

Ao Dr. Manoel Alonso Gan, pelo apoio recebido, promovendo importantes sugestões e contribuindo para o enriquecimento deste estudo. Agradeço a sua disponibilidade oferecida e pelo seu comprometimento ao longo de todo este trabalho.

Ao Dr. Nelson Jesus Ferreira, pela oportunidade de trabalho, pela sua preocupação com o desenvolvimento da ciência e pelo seu espírito motivador. Fico grato pelos momentos de discussão que tivemos, que contribuíram para tornar-me uma pessoa mais crítica.

Ao Dr. Kevin Ivan Hodges, pesquisador da Universidade de *Reading*, na Inglaterra, por tornar possível a realização deste estudo, permitindo o conhecimento de uma valiosa ferramenta e contribuindo constantemente com a sua generosa atenção. Sou grato por sua paciência e apoio técnico oferecido ao longo de todo o estudo.

A todos os meus colegas e amigos que colaboraram nessa caminhada, compartilhando momentos importantes comigo através de diferentes formas, mas sendo sempre fundamentais para o meu crescimento e desenvolvimento da pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo auxílio financeiro concedido através da bolsa de mestrado.

E ao Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), que ofereceu a infraestrutura necessária para a realização de todas as atividades relacionadas a este trabalho.



## RESUMO

Motivado pela importância que os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN) exercem nas condições do tempo e pelo conhecimento de poucos estudos estatísticos a seu respeito, o presente trabalho apresenta uma climatologia objetiva dos VCAN, formados em latitudes subtropicais, a partir da aplicação do algoritmo *TRACK*. A detecção da trajetória dos VCAN foi baseada na identificação de mínimos de vorticidade relativa no nível de 300 hPa. Na etapa seguinte, um filtro no *TRACK* foi usado para eliminar os mínimos de vorticidade relativa ciclônica que não representam eventos de VCAN. Após esta etapa, limiares para o desvio de temperatura, vorticidade potencial e vento zonal foram aplicados para garantir a presença de um núcleo frio de circulação ciclônica em altos níveis. Os dados utilizados neste trabalho foram as reanálises dos ERA-Interim, obtidas através do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF). Durante o período de 20 anos (1989-2008), o *TRACK* identificou 987 casos e permitiu a determinação das estatísticas dos VCAN que atuaram na AS subtropical e oceanos adjacentes. As estatísticas do *TRACK* confirmaram alguns resultados encontrados em estudos anteriores, como a máxima frequência de VCAN próximo a costa oeste da AS (aproximadamente entre 30°S e 35°S) e um máximo secundário sobre a região sul do Brasil e Bacia do Prata. O maior número de VCAN foi verificado no período de verão, seguido do outono, inverno e primavera. A formação dos VCAN ocorreu predominantemente sobre o Oceano Pacífico Leste, enquanto que a sua dissipação foi mais frequente sobre a Cordilheira dos Andes (verão e outono) e sobre o Atlântico Subtropical (inverno e primavera). A topografia dos Andes mostrou ser um fator importante no comportamento dos VCAN, uma vez que estes apresentaram uma redução da sua velocidade ao se aproximarem da montanha. Os VCAN foram mais intensos no inverno, atingindo a sua máxima intensidade a oeste dos Andes. A variabilidade espacial e sazonal do ciclo de vida dos VCAN foi bastante significativa, sendo os VCAN mais persistentes observados no verão, preferencialmente entre 25°S e 35°S. A variabilidade sazonal e interanual da frequência, intensidade, deslocamento e tempo de vida foi analisada para cinco diferentes regiões geográficas, o que permitiu determinar diferenças no comportamento dos VCAN em cada setor. Os resultados do *TRACK* indicaram um significativo aumento do número de VCAN nos últimos dez anos, principalmente na região de máxima frequência, localizada a oeste da costa sul-americana. Entretanto, não foi observada nenhuma tendência em relação ao padrão de intensidade dos VCAN.



# OBJECTIVE IDENTIFICATION OF UPPER TROPOSPHERIC CUT-OFF LOWS IN SUBTROPICAL REGIONS

## ABSTRACT

Due to the importance of Upper Tropospheric Cut-off Lows (UTCOL) in the weather and because few statistical studies are known about them, this work presents an objective climatology of UTCOL formed in the subtropics, specifically they were formed in the subtropics, by using the *TRACK* algorithm. The detection of UTCOL trajectories were based on identification of relative vorticity minima at 300 hPa. In the next step, a filter in the *TRACK* was used to eliminate relative vorticity minima that they are not associated with a UTCOL. In the filter, temperature deviation, potential vorticity and zonal wind thresholds were used to ensure the presence of a cold core and a closed cyclonic circulation in upper levels. The data set used in this study were the ERA-Interim reanalysis, available from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). During 20 years (1989-2008), the *TRACK* identified 987 UTCOL and allowed to know the statistics of subtropical UTCOL from SA region and surrounding oceans. The *TRACK* statistics confirmed some results found in previous studies, as the maximum frequency of UTCOL near the west coast of AS (about 30°S-35°S) and a second maximum over southern Brazil and River Plate Basin. The largest number of UTCOL was observed in summer, followed by autumn, winter and spring. The UTCOL genesis occurred predominantly over the Eastern Pacific Ocean, while its dissipation was more frequent over the Andes (summer and autumn) and the Subtropical Atlantic (winter and spring). The Andes topography showed to be important for UTCOL behavior, because UTCOL showed a reduction of their speed when they approached the mountain. UTCOL were more intense in winter, reaching its maximum intensity in the east of the Andes. The UTCOL spatial variability and seasonal life cycle was significant because the most persistent UTCOL were observed in summer, preferably between 30°S-35°S. The seasonal and interannual variability of UTCOL frequency, intensity, movement and life cycle was analyzed over five different geographical regions, which it allowed to see differences among UTCOL behavior in each sector. The *TRACK* results indicated a significant increase in UTCOL number in the last ten years, mainly in the region of maximum frequency, located in the west of the SA coast. However, there has not been any trend about the UTCOL intensity pattern.





## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Campos meteorológicos referentes às 12:00 UTC do dia 30 de junho de 2004. a) Altura Geopotencial no nível de 250 hPa (intervalo de contorno de 90 metros), barbelas de vento e corrente de jatos em nós (sombreado); b) Anomalia de temperatura (em graus celsius) no nível de 500 hPa . . . . .	6
2.2 Formação esquemática de um VCAN (Fonte: Bjerknes, 1951 – citado por Lourenço, 1993) . . . . .	8
2.3 Secção vertical da Vorticidade Potencial média zonal em UVP (linhas tracejadas) e Temperatura Potencial em K (linhas sólidas), para os meses de (a) janeiro e (b) julho, utilizando as reanálises inicializadas do ECMWF (sete níveis verticais e em duas análises diárias), para o período de 1979-1989 . . . . .	12
2.4 Identificação de um VCAN sobre o Oceano Atlântico Norte, usando o campo de Vorticidade Potencial (em UVP) em 300 hPa. Os dados de VP são baseados no modelo HIRLAM e a imagem no vapor d'água pertence ao satélite METOSAT, ambos no horário das 12 UTC do dia 30 de março de 2003 . . . . .	13
2.5 Análise de Satélite: a) Imagem do GOES-8, no canal do vapor d'água às 11:45 UTC do dia 03 de julho de 2004; b) estimativa de precipitação acumulada (mm) pelo TRMM entre os dias 29 de junho e 8 de julho de 2004	20
2.6 Ilustração esquemática da identificação do contorno de 2 UVP. A área sombreada corresponde a massa de ar estratosférica desde que a distância “d” (entre dois pontos do contorno) e o comprimento do contorno “l” seja menor e maior, respectivamente, do que o limiar estabelecido . . . . .	24
3.1 Região da América do Sul e oceanos adjacentes, com a área de estudo destacada . . . . .	28
3.2 Número de VCAN Extratropicais e Subtropicais observados nas IS no domínio compreendido ente 110° - 20°W e 15° - 50°S, entre o período de janeiro de 2002 e dezembro de 2006 . . . . .	29
3.3 Imagem do Satélite GOES-12 no canal do infravermelho às 16:00 UTC do dia 04/01/2007 . . . . .	30
3.4 Imagem do Satélite GOES-12 no canal do vapor d'água às 16:00 UTC do dia 04/01/2007 . . . . .	30
3.5 Campo de Altura Geopotencial no nível isobárico de 300 hPa às 18:00 UTC do dia 04/01/2007 . . . . .	31
4.1 Número de VCAN identificados nas Análises de Campos (barra cinza escuro) e nas Imagens de Satélite (barra cinza claro). As análises forma realizadas para o período de janeiro à dezembro de 2003 . . . . .	41

4.2	Número de VCAN (a) subtropicais e (b) extratropicais identificados nas IS (barra cinza claro) e confirmados nas AC (barra cinza escuro). A análise compreende o período de janeiro à dezembro de 2003 . . . . .	41
4.3	Porcentagem de VCAN identificados em relação às características de temperatura entre o período de janeiro de 2002 a dezembro de 2006 para os casos (a) Subtropicais e (b) Extratropicais . . . . .	43
4.4	Campo de geopotencial e desvio de temperatura no nível de 300 hPa . . . . .	44
4.5	Porcentagem de VCAN com desvio negativo de temperatura (linha azul) e positiva (linha vermelha) para os casos (a) subtropicais e (b) extratropicais. A análise compreende o período de janeiro de 2002 à dezembro de 2006 . . . . .	45
4.6	Ilustração esquemática das posições sobre os eixos meridional e zonal da região do VCAN. A linha cheia representa o geopotencial em altos níveis, o símbolo estrela a posição do MVR, e $d_x$ e $d_y$ as distâncias (em graus geodésico) sobre os eixos zonal e meridional, respectivamente. A distância de separação entre duas posições é de 1 grau . . . . .	47
4.7	Número de sistemas associados com desvio negativo de temperatura, para o período de janeiro de 2003 à dezembro de 2006. A distribuição da temperatura em relação à posição do MVR varia de (a) 6° N à 10° S sobre o eixo meridional e de (b) 6° W à 6° E sobre o eixo zonal . . . . .	48
4.8	Número de sistemas associados com valores negativos de VP, para o período de janeiro de 2003 à dezembro de 2006. A distribuição da VP em relação à posição do MVR varia de (a) 6° N à 6° S sobre o eixo meridional e de (b) 6° W à 6° E sobre o eixo zonal . . . . .	49
4.9	Número de sistemas associados com valores negativos da CZV, para o período de janeiro de 2003 à dezembro de 2006. A distribuição meridional da CZV em relação à posição do MVR varia de 2° S à 7° S . . . . .	51
4.10	(a) Campo de geopotencial (linhas contínuas) e de vorticidade potencial (hachurado) em UVP para o nível de 300 hPa. O símbolo estrela representa o MVR e o círculo a posição que foi aplicado o limiar para a componente zonal do vento. (b) Linhas de corrente para o mesmo nível. Esta análise é referente às 06 UTC do dia 28 de agosto de 2003 . . . . .	54
4.11	Número de VCAN extratropicais (linha vermelha), subtropicais (linha azul) e total (linha preta) identificados nas IS. A linha laranja mostra o número médio de VCAN identificados pelo <i>TRACK</i> . Estas análises compreendem o período entre janeiro de 2002 e dezembro de 2006 . . . . .	55
4.12	Distribuição mensal do tempo médio de vida (em dias) - lado esquerdo - e distribuição de frequências (em porcentagem) - lado direito - dos VCAN (a-b) Subtropicais; (c-d) Extratropicais; (e-f) Subtropicais e Extratropicais identificados nas IS e dos VCAN identificados através do (g-h) <i>TRACK</i> . As análises compreendem o período de janeiro de 2002 à dezembro de 2006 . . . . .	59

4.13	Distribuição da distância da trajetória percorrida (km) pelos VCAN (a) subtropicais, (b) extratropicais, (c) subtropicais e extratropicais, identificados nas IS e dos VCAN identificados através do (d) <i>TRACK</i> . As análises compreendem o período de janeiro de 2002 à dezembro de 2006 . . .	62
4.14	Eixo da direita: Distribuição mensal dos desvios de temperatura sobre a região dos VCAN. A linha laranja representa o valor médio sobre uma área circular, a linha verde mostra o valor sobre a posição A e a linha roxa indica o valor mínimo encontrado sobre a referida área. Eixo da esquerda: As colunas azul e vermelha mostram o número de VCAN frio e quente, respectivamente, identificados nas AC. Ambas análises compreendem o período de janeiro de 2002 à dezembro de 2006 . . . . .	63
4.15	Média mensal do número de VCAN identificados através do <i>TRACK</i> para os seguintes períodos: 1989-2008 (barra azul claro), 1989-2003 (linha preta tracejada), 1994-1998 (linha vermelha), 1999-2003 (linha laranja), 2004-2008 (linha verde). (b) Média anual do número de VCAN identificados em cada período citado . . . . .	65
4.16	Densidade de <i>tracks</i> dos VCAN obtida para o período de março de 1989 à fevereiro de 2009: (a) Outono (MAM), (b) Inverno (JJA), (c) Primavera (SON) e (d) Verão (DJF) . . . . .	67
4.17	Densidade de características dos VCAN obtida para o período de março de 1989 à fevereiro de 2009: (a) Outono (MAM), (b) Inverno (JJA), (c) Primavera (SON) e (d) Verão (DJF) . . . . .	68
4.18	Densidade de gênese dos VCAN obtida para o período de março de 1989 à fevereiro de 2009: (a) Outono (MAM), (b) Inverno (JJA), (c) Primavera (SON) e (d) Verão (DJF) . . . . .	72
4.19	Densidade de dissipação dos VCAN obtida para o período de março de 1989 à fevereiro de 2009: (a) Outono (MAM), (b) Inverno (JJA), (c) Primavera (SON) e (d) Verão (DJF) . . . . .	73
4.20	Velocidade média da componente zonal dos VCAN obtida para o período de março de 1989 à fevereiro de 2009: (a) Outono (MAM), (b) Inverno (JJA), (c) Primavera (SON) e (d) Verão (DJF) . . . . .	74
4.21	Velocidade média da componente meridional dos VCAN obtida para o período de março de 1989 à fevereiro de 2009: (a) Outono (MAM), (b) Inverno (JJA), (c) Primavera (SON) e (d) Verão (DJF) . . . . .	74
4.22	Intensidade média dos VCAN obtido para o período de março de 1989 à fevereiro de 2009: (a) Outono (MAM), (b) Inverno (JJA), (c) Primavera (SON) e (d) Verão (DJF) . . . . .	77
4.23	Tempo médio de vida dos VCAN obtido para o período de março de 1989 à fevereiro de 2009: (a) Outono (MAM), (b) Inverno (JJA), (c) Primavera (SON) e (d) Verão (DJF) . . . . .	78
4.24	Taxa de crescimento (valores positivos) e decaimento (valores negativos) dos VCAN obtido para o período de março de 1989 à fevereiro de 2009: (a)	

	Outono (MAM), (b) Inverno (JJA), (c) Primavera (SON) e (d) Verão (DJF) .	79
4.25	Divisão da área de estudo em cinco regiões: região 1 (110° W - 90° W), região 2 (90° W - 70° W), região 3 (70° W - 55° W), região 4 (55° W - 35° W) e região 5 (35° W - 15° W) . . . . .	81
4.26	Distribuição mensal do número de VCAN (lado esquerdo) e intensidade média em $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ (lado direito) para (a,b) região 1, (c-d) região 2, (e-f) região 3, (g-h) região 4, (i-j) e região 5. As análises correspondem ao período de janeiro de 1989 à dezembro de 2008 . . . . .	87
4.27	Distribuição mensal da duração média dos VCAN (em dias) obtida pelo <i>TRACK</i> para (a) região 1, (b) região 2, (c) região 3, (d) região 4 e (e) região 5. As análises correspondem ao período de janeiro de 1989 à dezembro de 2008 . . . . .	89
4.28	Distribuição do deslocamento dos VCAN (em km) obtida pelo <i>TRACK</i> para (a) região 1, (b) região 2, (c) região 3, (d) região 4 e (e) região 5. As análises correspondem ao período de janeiro de 1989 à dezembro de 2008 . . . . .	90
4.29	Distribuição anual da quantidade (lado esquerdo) e intensidade média em $-1 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ (lado direito) dos VCAN identificados pelo <i>TRACK</i> entre janeiro de 1989 à dezembro de 2008. A linha vermelha representa uma média de três anos . . . . .	96
4.30	Densidade de <i>tracks</i> dos VCAN obtida para o período de março de 1989 à fevereiro de 1999 (lado esquerdo) e de março de 1999 à fevereiro de 2009 (lado direito): (a,b) Outono (MAM), (c,d) Inverno (JJA), (e,f) Primavera (SON) e (g,h) Verão (DJF) . . . . .	98
B.1	Exemplo de um mapa binário, constituído de pontos de objeto (1) e background (0) . . . . .	124

## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
3.1 Determinação dos critérios avaliados quanto aos valores de Temperatura (T), Vorticidade Potencial (VP) e Componente Zonal do Vento (CZV) . . . . .	37
4.1 Índices de acerto, erro e confiabilidade para diferentes critérios usando limiares para a temperatura (Temp), vorticidade potencial (VP) e componente zonal do vento (CZV). A análise foi realizada para o período de janeiro à dezembro de 2003 . . . . .	52
4.2 Porcentagem do número de VCAN identificados em cada período do ano (MAM, JJA, SON, DJF), observados nas IS (total e subtropical) e no método <i>TRACK</i> . As análises foram realizadas para o período de janeiro de 2002 à dezembro de 2006 . . . . .	56
4.3 Número e porcentagem de VCAN (entre parênteses) observados no presente estudo e em trabalhos anteriores. As estações do ano representam: março, abril e maio (MAM); junho, julho e agosto (JJA); setembro, outubro e novembro (SON); dezembro, janeiro e fevereiro (DJF) . . . . .	65
4.4 Porcentagem dos VCAN identificados nas regiões 2, 3 e 4 no presente estudo e em Campetella e Possia (2006) . . . . .	85



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AC	— Análise de Campos
ADEP-VCAN	— Projeto Análise da distribuição, evolução e previsibilidade dos Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis
AS	— América do Sul
CNPq	— Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CPTEC	— Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CZV	— Componente Zonal do Vento
DJF	— Dezembro – Janeiro - Fevereiro
ECMWF	— European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
ENOS	— El Niño Oscilação Sul
ESSC	— Environmental Systems Science Centre
FDP	— Função de Densidade Probabilística
gdl	— graus de latitude
GPT	— Grupo de Previsão de Tempo
HN	— Hemisfério Norte
HS	— Hemisfério Sul
INPE	— Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IS	— Imagens de Satélite
K	— Kelvin
JJA	— Junho – Julho - Agosto
MAM	— Março – Abril – Maio
mgp	— metro geopotencial
MVR	— Mínimo de Vorticidade Relativa
NAO	— North American Oscillation
NE	— Nordeste
NCEP	— National Centers for Environment Prediction
NMC	— National Meteorological Center
OAN	— Oscilação do Atlântico Norte
PFT	— Parâmetro de Frente Térmica
PNNM	— Pressão ao Nível Médio do Mar
TRMM	— Tropical Rainfall Measuring Mission
SON	— Setembro – Outubro - Novembro
T42	— Truncamento no número de onda 42
UTC	— Universal Time Coordinated
UVP	— Unidade de Vorticidade Potencial
VCAN	— Vórtice Ciclônico de Altos Níveis

VP — Vorticidade Potencial  
VR — Vorticidade Relativa



## LISTA DE SÍMBOLOS

$d_{máx}$	— deslocamento máximo
$D_i^k$	— desvio local
$f$	— força de Coriolis
$T$	— limiar da VR
$\alpha$	— subdivisão de mesoescala
$g$	— gravidade
$\phi_{máx}$	— limite máximo de suavização
$\phi_{MÍN}$	— mínimo de geopotencial
$N_x$	— nó de canto da coordenada x
$N_y$	— nó de canto da coordenada y
$m$	— ordem da matriz binária
$n$	— ordem da matriz binária
$C_n$	— parâmetro de suavização
$k$	— passo de tempo
$w_1$	— peso relacionado a medida de direção
$w_2$	— peso relacionado a medida de velocidade
$P_i^k$	— posição do MVR no instante $k$
$P$	— posição do ponto ao longo da trajetória
$p$	— pressão atmosférica
$\theta$	— temperatura potencial
$s^{-1}$	— unidade de vorticidade relativa
$b_{i,j}$	— valor do campo binário
$f_{i,j}$	— valor do campo real
$u$	— vento zonal
$v$	— vento meridional

$\zeta_p$

— vorticidade relativa em coordenada isobárica

## SUMÁRIO

Pág.

### LISTA DE FIGURAS

### LISTA DE TABELAS

### LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

<b>1 INTRODUÇÃO</b> . . . . .	1
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FORMULAÇÃO TEÓRICA</b> . . . . .	5
2.1 Características físicas e dinâmicas . . . . .	5
2.2 Mecanismos de desenvolvimento . . . . .	7
2.3 Tempo de vida . . . . .	10
2.4 Mecanismos de trocas de massas de ar entre a troposfera-estratosfera . . . . .	11
2.5 Trajetórias e distribuição espacial . . . . .	14
2.6 Variabilidade Temporal e Mecanismos de Circulação Atmosférica . . . . .	17
2.7 Padrões de Nebulosidade e Precipitação . . . . .	18
2.8 Estrutura Vertical . . . . .	20
2.9 Métodos de Identificação objetiva de VCAN . . . . .	22
<b>3 DADOS E METODOLOGIA</b> . . . . .	27
3.1 Dados . . . . .	27
3.2 Metodologia . . . . .	28
3.2.1 Estatísticas dos VCAN observados nas IS . . . . .	28
3.2.2 Análise de Campos . . . . .	31
3.2.3 Método <i>TRACK</i> . . . . .	32
3.2.3.1 Identificação e rastreamento de mínimos de Vorticidade Relativa . . . . .	32
3.2.3.2 Adição dos Campos de Temperatura e Vorticidade Potencial . . . . .	33
3.2.3.3 Componente Zonal do Vento (CZV) . . . . .	35
3.2.3.4 Validação . . . . .	36
<b>4 RESULTADOS</b> . . . . .	39
4.1 Comparação entre Análise de Campos e Imagens de Satélite . . . . .	39
4.1.1 Distribuição dos VCAN . . . . .	39
4.1.2 Classificação dos VCAN quanto ao padrão de temperatura . . . . .	41
4.2 Método . . . . .	45
4.2.1 Distribuição da Temperatura, VP e CZV . . . . .	45
4.2.2 Validação . . . . .	51
4.3 Comparações entre Imagens de Satélite e Método <i>TRACK</i> . . . . .	55
4.4 Climatologia . . . . .	64
4.4.1 Estatísticas dos VCAN . . . . .	80
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES</b> . . . . .	101

<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> . . . . .	113
<b>APÊNDICE A</b> . . . . .	123
<b>ANEXO A</b> . . . . .	129

## 1 INTRODUÇÃO

Ao longo do ano, a região subtropical da América do Sul (AS) é influenciada por distúrbios de escala sinótica, que alteram a circulação atmosférica e determinam as condições do tempo sobre uma região. Palmén (1949) observou que, eventualmente, a amplificação de ondas de Rossby em latitudes médias conduzem ao desprendimento de vórtices frios do escoamento básico, promovendo a formação de sistemas conhecidos como Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN). Após a sua formação, estes sistemas ficam totalmente segregados das correntes de jatos, tornando o seu movimento errático e dificultando bastante a sua previsibilidade.

Os VCAN são sistemas de baixa pressão, originados na troposfera alta e que casualmente podem se estender até níveis baixos (FRANK, 1970). A sua presença é bastante comum em latitudes tropicais, subtropicais e médias, onde exercem um relevante papel no regime de precipitação. Em geral, as consequências de sua atuação dependem muito da intensidade do sistema e das características termodinâmicas da atmosfera. Em razão do seu núcleo frio, os VCAN tornam-se potencialmente instáveis, quando deslocam-se sobre superfícies relativamente quentes ou sobre massas de ar suficientemente úmidas, contribuindo para o disparo da convecção (KNIPPERTZ e MARTIM, 2005).

As condições do tempo associadas a presença de um VCAN podem ter significativo impacto, pois eventualmente estes sistemas são acompanhados de chuvas intensas (QUISPE e AVALOS, 2006), com acumulados superiores a 400 mm (GARCIA ET AL., 1982; LLASAT ET AL., 2007) e forte atividade elétrica (<http://www.cptec.inpe.br/tempo>). Na região dos Andes, a presença dos VCAN é um dos principais fatores responsáveis pela ocorrência de tempestades de neve, correspondendo aproximadamente 80% da precipitação em regiões áridas no norte do Chile (VUILLE E AMMANN, 1997). Esse tipo de evento ocorre principalmente no período de maio à setembro e provoca inúmeros transtornos para as populações de regiões montanhosas,

afetando sobretudo o meio de transporte rodoviário.

Na região sudeste da AS, os VCAN estão associados com atividade convectiva de forte intensidade (MIKY FUNATSU ET AL. , 2004; SATYAMURTY e SELUCHI, 2007) e com ondas de frio no sul e sudeste do Brasil (FORTUNE e KOUSKY, 1983; REINKE, 2004). Nesta região, os VCAN têm sido também um dos mecanismos precursores ao processo de ciclogêneses em superfície, contribuindo através da advecção de vorticidade relativa (VR) nas camadas médias a altas da troposfera (SATYAMURTY ET AL., 1990; GAN e RAO, 1996; MIKY FUNATSU, 2000)

Estudos de casos têm permitido compreender aspectos relacionados à estrutura e aos mecanismos de formação, manutenção e dissipação dos VCAN. Na região subtropical da AS, as principais características associadas aos VCAN foram investigadas por Ramírez et al. (2000), Fedorova et al. (1999), Campetella e Possia (2006), Garreaud e Fuenzalida (2007), Quispe e Avalos (2006) e Satyamurty e Seluchi (2007). Apesar dos conhecimentos adquiridos nestes estudos, pouco têm sido feito para avaliar a habilidade de modelos numéricos nas simulações de eventos de VCAN. Garreaud e Fuenzalida (2007) realizaram alguns experimentos numéricos para a região subtropical da AS e verificaram que a presença da Cordilheira dos Andes afeta a evolução dos VCAN no Oceano Pacífico Leste, provocando um atraso no seu processo de dissipação.

À parte da capacidade de instabilizar uma região, os VCAN possuem um importante papel nos fluxos de massa entre a baixa estratosfera e a camada troposférica. O abaixamento da tropopausa, provocada ao longo da evolução do VCAN, contribui para o processo de mistura de elementos químicos na troposfera, determinando as características das propriedades radiativas de uma região (BARBOSA, 2006). A maior parte dos estudos que ressaltam os processo associados ao intercâmbio de massa entre extratosfera e troposfera foram realizados para o Hemisfério Norte (HN), embora algumas evidências possam ser encontrada para o Hemisfério Sul (HS), como no estudo de Rondanelli et al. (2002), que avaliaram as condições sinóticas envolvidas durante eventos de intrusão de ozônio na atmosfera sobre a Cordilheira dos Andes.

Embora vários aspectos observacionais dos VCAN tenham sido investigados, poucos estudos climatológicos foram realizados para os subtropicais da AS. Em meados da década de 1990, Lourenço (1996) revelou a primeira estatística dos VCAN, realizada para um período de 10 anos, através da análise da quantidade e trajetória dos VCAN que se formaram sobre o Oceano Pacífico Sudeste e propagaram-se até o Oceano Atlântico Sudoeste. Este estudo baseou-se em análises subjetivas de imagens de satélite e análises dos campos de circulação horizontal do vento em 300 hPa e 250 hPa, a partir dos dados do extinto *National Meteorological Center* (NMC), dos Estados Unidos da América.

Nos últimos anos, os avanços na tecnologia de processamento, aliado a melhoria nas bases de dados têm motivado o desenvolvimento de métodos automáticos para detecção de sistemas meteorológicos. Esse tipo de ferramenta tem permitido a identificação de ciclones e anticiclones de forma prática e eficiente, reduzindo tempo e esforços na elaboração de estudos climatológicos. A aplicação de métodos de identificação objetiva é baseada na determinação de critérios específicos, que representam as características típicas do sistema analisado.

Recentemente, Fuenzalida et al. (2005) e Campetella e Possia (2006) apresentaram estudos estatísticos dos VCAN no HS e AS, usando 31 e 10 anos de dados, respectivamente. Nestes trabalhos, os resultados foram avaliados por meio de métodos de identificação híbrida, ou seja, baseados em análises objetiva e subjetiva. Assim, foram reveladas algumas características dos VCAN, como por exemplo, a variabilidade temporal da distribuição, duração média, intensidade e velocidade de propagação.

A comparação dos resultados de Fuenzalida et al. (2005) e Campetella e Possia (2006) mostrou algumas diferenças quanto à variabilidade sazonal da distribuição dos VCAN. As discordâncias encontradas podem estar relacionadas ao critério aplicado e à habilidade de cada método na identificação da presença dos VCAN. É importante salientar que no estudo de Fuenzalida et al. (2005) foram selecionados apenas os ciclones formados no nível de 500 hPa, descartando desta climatologia os VCAN que

permaneceram confinados em altos níveis.

A motivação principal deste estudo surge da importância de se compreender melhor os aspectos climatológicos dos VCAN, procurando ressaltar as características que ainda não foram abordadas em trabalhos anteriores. Para isso, o algoritmo desenvolvido por Hodges (1994, 1995, 1996 e 1999) e denominado *TRACK* (detalhes no Apêndice A), foi empregado para a identificação automática dos VCAN. A seleção dos VCAN foi possível devido às alterações realizadas no código, que permitiram a inclusão de critérios adicionais, baseados em análises objetivas dos campos de temperatura, vorticidade potencial e componente zonal do vento.

Embora existam várias técnicas para identificação de ciclones, o *TRACK* foi usado nesse estudo devido a sua flexibilidade na determinação de critérios e por oferecer um conjunto de densidades estatísticas (ver apêndice A). Dessa forma, o objetivo principal deste estudo é aprimorar e validar o método *TRACK*, para a identificação objetiva dos VCAN que atuaram na AS e áreas oceânicas adjacentes (de 50°S à 15°S e de 110°W à 15°W). De forma específica, pretende-se:

- 1 - Classificar os VCAN, identificados através de imagens de satélite, de acordo com seu padrão de temperatura, utilizando dados de reanálises;
- 2 - Definir critérios para a identificação objetiva dos VCAN, a partir da análise da distribuição espacial da temperatura e da vorticidade potencial sobre a região dos VCAN. Estes critérios são necessários para a identificação apenas dos VCAN associados com núcleo frio e com significativa intrusão de ar de origem estratosférica;
- 3 - Comparar os resultados do método *TRACK* com os dados de reanálises e informações de imagens de satélite;
- 4 - Realizar uma climatologia dos VCAN que atuaram na região de estudo, utilizando o método *TRACK* para um período de 20 anos (1989 à 2008).



## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FORMULAÇÃO TEÓRICA**

Ao longo deste capítulo, serão apresentados aspectos discutidos em estudos anteriores, com o propósito de conduzir a um esclarecimento sobre as principais características dos VCAN. As descrições referem-se principalmente aos VCAN que atuam em latitudes subtropicais, embora em alguns casos sejam mencionados aspectos relacionados aos VCAN observados fora da região de interesse.

Na literatura, os estudos à respeito dos VCAN surgiram a partir do final da década de 1940, destacando algumas de suas características em regiões tropicais (HSIEH, 1949; PALMER, 1951; SIMPSON, 1952; FRANK, 1970) e subtropicais ou de latitudes médias (PALMÉN, 1949). Kousky e Gan (1981) foram os primeiros a explorar o comportamento dos VCAN que atuam no nordeste brasileiro e apresentaram as possíveis causas responsáveis pela sua formação.

### **2.1 Características físicas e dinâmicas**

Conceitualmente, os VCAN são definidos como sistemas de circulação ciclônica, formados na alta troposfera e originados a partir do seu desprendimento do escoamento básico (HSIEH, 1949; PALMÉN, 1949; SIMPSON, 1952, GAN, 1982; BELL e BOSART, 1993). Os VCAN são caracterizados por apresentarem o centro mais frio do que a periferia, devido às correntes de jatos que transportam massas de ar de latitudes mais altas em direção ao equador (PALMÉN, 1949; SIMPSON, 1952; CARLSON, 1967). Particularmente, os Jatos de Altos Níveis contribuem para o processo de intrusão de ar mais frio sobre regiões de latitudes baixas, promovendo a manutenção de uma “piscina” de ar frio (VUILLE e AMMANN, 1997; RONDANELLI ET AL., 2002; QUISPE e AVALOS, 2006; LLASAT ET AL., 2007; SATYAMURTY e SELUCHI, 2007; NIETO ET AL., 2008).

A Figura 2.1 mostra um caso de VCAN que atuou à oeste da AS entre os dias 29 de junho e 2 de julho de 2004, estudado por Quispe e Avalos (2006). Neste caso, pode-se

notar a presença de um núcleo frio em nível médio (Figura 2.1b) e do Jato Subtropical, contornando o lado leste do centro do VCAN (Figura 2.1a).

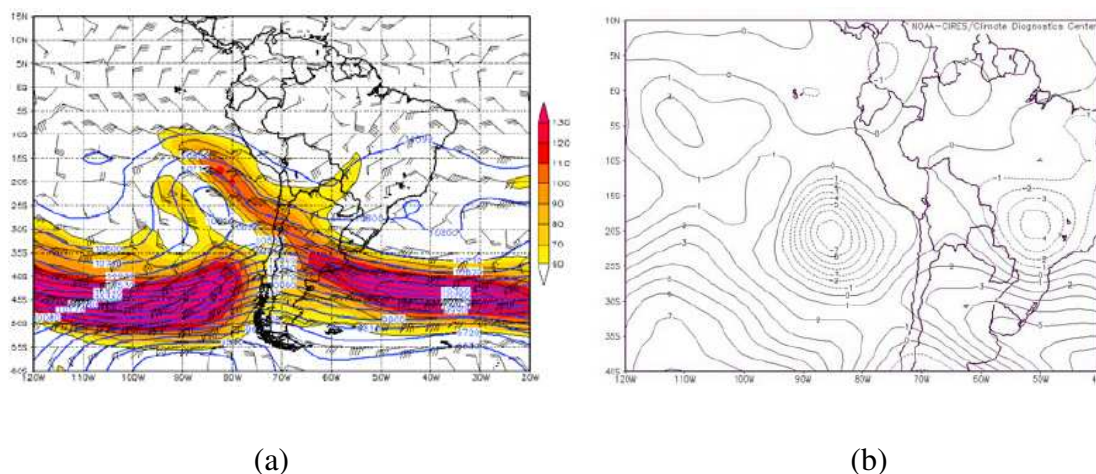


Figura 2.1 - Campos meteorológicos referentes às 12:00 UTC do dia 30 de junho de 2004. a) Altura Geopotencial no nível de 250 hPa (intervalo de contorno de 90 metros), barbelas de vento e corrente de jatos em nós (sombreado); b) Anomalia de temperatura (em graus Celsius) no nível de 500 hPa.

Fonte: Quispe e Avalos (2006).

Uma investigação da extensão horizontal dos VCAN foi realizada para o período de dezembro de 1989 à dezembro de 1994 por Kentarchos e Davies (1989), incluindo áreas desde a linha do equador até a latitude de 70°N. Esse estudo foi baseado na análise visual de campos de geopotencial em 200 hPa, mostrando uma grande variabilidade no tamanho dos VCAN (300-3000km). Particularmente, estes sistemas apresentaram máxima frequência para comprimentos de diâmetro entre 600 e 1200 km.

Price e Vaughan (1992) ressaltam que o tamanho dos VCAN varia de acordo com o setor de ocorrência e fazem uma análise paralela entre duas regiões que usualmente apresentam máxima frequência. Particularmente sobre um setor do continente europeu, os VCAN que atuaram em latitudes menores do que 40°N (tipo Subtropical)

apresentaram frequentemente diâmetros menores do que 1000 km, enquanto que os eventos que ocorreram aproximadamente sobre a região da Sibéria (entre 40-70°N) eram relativamente maiores (alguns com diâmetro superior a 2000 km). Realizando uma comparação com outro sistema meteorológico, é muito comum os VCAN Subtropicais apresentarem seu tamanho menor do que os ciclones extratropicais durante o estágio maduro (NIETO ET AL., 2005).

Satyamurty e Seluchi (2007) apresentaram algumas diferenças entre as características dos VCAN migratórios de regiões subtropicais e dos VCAN semi-estacionários de regiões tropicais. Estes autores observaram que os VCAN que atuam próximo ao Nordeste (NE) brasileiro, apresentam o comprimento de aproximadamente 1000 km na direção E-W, sendo um pouco mais alongados na direção N-S ou NW-SE. Em relação aos casos subtropicais, sua dimensão horizontal foi mais simétrica, apresentando seu diâmetro tipicamente na ordem de 800 km.

## **2.2 Mecanismos de desenvolvimento**

Há algum tempo compreende-se os principais mecanismos atmosféricos que levam ao desenvolvimento dos VCAN nas latitudes subtropicais. De acordo com Nieto et al. (2008), o processo de evolução deste sistema pode ser dividido em quatro etapas: cavado em altos níveis, rompimento do cavado, desprendimento do vórtice e estágio final.

Primeiramente, a condição essencial para o desenvolvimento do VCAN requer a amplificação de uma onda sinótica nas camadas mais altas da troposfera. Esse processo leva a uma diminuição do comprimento de onda zonal, deslocando isotermas e isoípsas (isolinhas de geopotencial) em direção ao equador (NIETO ET AL., 2008). O processo de incursões de correntes de jatos de forma meridional, injetando ar relativamente frio sobre regiões de latitudes mais baixas, leva ao desprendimento do vórtice ciclônico e seu isolamento em relação ao escoamento básico (PALMÉN, 1949). Esse processo permite a formação de um centro frio de baixa pressão, caracterizando, segundo Nieto et

al. (2008), como estágio intermediário do ciclo de evolução do VCAN. A Figura 2.2 representa o processo de formação de um VCAN a partir dos estágios de amplificação de um cavado em níveis altos da troposfera.



Figura 2.2 - Formação esquemática de um VCAN.

Fonte: Bjerknes (1951) citado por Lourenço (1993)

Bell e Bosart (1993) verificaram a existência de forçantes dinâmicas que contribuíram para o desenvolvimento de um VCAN na porção leste dos Estados Unidos. Segundo estes autores, o processo de formação deste evento foi favorecido pela propagação de ondas curtas na atmosfera, associadas aos Jatos de Altos Níveis, que transferiram energia para ondas de escala maior, contribuindo para a intensificação da crista corrente acima do vórtice (BELL e BOSART, 1993). Como consequência da conservação da vorticidade potencial, a circulação associada ao cavado (corrente abaixo da crista), também amplificou-se e provocou o desprendimento do vórtice frio do escoamento básico.

Bell e Bosart (1993) ainda observaram que a intensificação e manutenção da circulação do VCAN foi acompanhada pela intrusão de ar estratosférico nas camadas médias e altas da troposfera. Tal resultado concorda com os obtidos por Hirschberg e Fritsch (1991a), Bell e Keyser (1993) e Hallak e Dias (1998) no sentido de que a advecção de vorticidade potencial na troposfera alta é uma das importantes forçantes no processo de formação e manutenção dos VCAN, contribuindo concomitantemente para o aumento da concentração de ozônio nas camadas baixa e média da troposfera (DAVIES e SCHUEPBACH, 1994; ANCELLET AT AL., 1994).

Satyamurty e Seluchi (2007) sugerem que, durante o processo de formação do núcleo frio, a perda radiativa nas camadas médias contribui para o processo de desenvolvimento dos VCAN. Esse resultado é contraditório ao estudo de Kousky e Gan (1981), os quais sugeriram que o resfriamento nas camadas médias é compensado pelo aquecimento adiabático, provocado devido ao movimento descendente no centro do vórtice.

As características do escoamento associadas a presença de VCAN na AS subtropical também foram estudadas por Ramírez et al. (1997) e Hallak e Dias (1998). Ramírez et al. (1997) acompanharam a evolução de um evento que originou-se no Oceano Pacífico Leste após ocorrer uma bifurcação no fluxo em 300 hPa. Segundo este estudo, o processo de amplificação da crista na retaguarda do cavado favoreceu a ruptura do VCAN do escoamento principal. Este comportamento concorda com a Teoria da Conservação da Vorticidade Potencial (BELL e BOSART, 1993). Em Hallak e Dias (1998), o conceito de Vorticidade Potencial Isentrópica foi aplicado para explicar o processo que deu origem à formação de um VCAN na região da Bacia do Prata (sudeste da AS). O diagnóstico desse caso mostrou um afundamento de ar frio à sudoeste do centro do vórtice e um transporte ascendente de ar quente a leste dele. Este ramo ascendente teve o papel de fornecer calor e umidade para o flanco leste do VCAN, contribuindo para a formação de uma região de instabilidade.

Alguns trabalhos sugerem que processos diabáticos sejam relevantes para o desenvolvimento dos VCAN (HOSKINS ET AL., 1985; FUENZALIDA ET AL., 2005). Para avaliar a importância das características da atmosfera nas condições de formação deste sistema, Fuenzalida et al. (2005) analisaram os campos médios de umidade específica na baixa troposfera e o escoamento médio em altos níveis, e compararam com a taxa de formação e dissipação dos VCAN ao longo de todo o HS. Essa análise mostrou uma razoável relação entre a teor de umidade de uma região e a taxa de formação dos VCAN, indicando que a presença de uma massa úmida na troposfera baixa contribui para o estabelecimento de um padrão de circulação anticiclônica em

altos níveis, e dessa forma desfavorece o desenvolvimento de VCAN sobre a AS durante o período de verão.

Atualmente, não se tem conhecimento sobre resultados que confirmem a verdadeira contribuição de cada forçante na etapa de dissipação dos VCAN. Apesar disso, sugere-se que o processo citado ocorra a partir da absorção do vórtice pelo cavado em altos níveis (SIMPSON, 1952; RAMAGE, 1962; GAN, 1982) ou através de mecanismos resultantes do aquecimento diabático no centro do ciclone (HOSKINS ET AL., 1985; PRICE e VAUGHAN, 1993; SATYAMURTY e SELUCHI, 2007). De fato, a permanência de um VCAN sobre uma região depende de muitos fatores, sobretudo da estabilidade termodinâmica verticalmente abaixo da sua circulação (NIETO ET AL., 2008).

### **2.3 Tempo de vida**

Apesar das diferenças que existem entre os métodos de identificação de VCAN, a maioria dos estudos concordam no que diz respeito a sua duração média. Tipicamente, os VCAN Subtropicais apresentam um período de vida relativamente curto, permanecendo ativos em média de 2 à 3 dias no HS (LOURENÇO, 1996; FUENZALIDA ET AL., 2005; CAMPETELLA e POSSIA, 2006; SATYAMURTY e SELUCHI, 2007) e de 2 à 4 dias no HN (HOSKINS et al., 1985; PRICE e VAUGHAN, 1993; KENTACHOS e DAVIES, 1998; NIETO ET AL., 2005).

Em contrapartida, os VCAN que atuam em latitudes mais altas tendem a apresentar períodos de vida maiores (HOSKINS ET AL., 1985), persistindo em alguns casos durante 2-3 semanas (PRICE e VAUGHAN, 1992). Embora não existam evidências concretas, alguns trabalhos argumentam esse comportamento devido ao periódico processo de intrusão de ar estratosférico, que realimenta os sistemas favorecendo a manutenção de seus processos físicos e dinâmicos. Essa intensificação é acompanhada pela propagação de correntes de jatos que contribuem para o abaixamento da tropopausa, promovendo a transferência de massas de ar para dentro da troposfera

(HOSKINS ET AL., 1985; PRICE e VAUGHAN, 1992; KENTARCHOS e DAVIES, 1998).

Em regiões tropicais, uma das características marcantes é a persistência dos VCAN sobre uma região durante longos períodos, possivelmente devido a pequena dissipação da energia cinética na média e alta troposfera (PALMER, 1951). Particularmente na região NE do Brasil, os VCAN apresentam seu tempo médio de vida em torno de 6-7 dias (CHEN e CHON, 1994; RAMÍREZ, 1997), podendo alguns destes persistirem por mais de três semanas (COSTA, 2009).

#### **2.4 Mecanismos de trocas de massas de ar entre a troposfera-estratosfera**

Na atmosfera baroclínica, a conservação da VP ocorre por meio da propagação de ondas de Rossby sobre superfícies isentrópicas, desempenhando uma importante atribuição na circulação atmosférica de grande escala. A quebra desta onda planetária conduz a uma significativa intrusão de massas de ar, provenientes do “reservatório estratosférico” polar, para dentro da troposfera de latitudes médias (HOSKINS ET AL., 1985). Esse processo ocasionalmente leva a formação de sistemas meteorológicos, tais como os VCAN Subtropicais (BELL e BOSART, 1993)

Alguns estudos têm mostrado o uso da VP como método de identificação dos VCAN (CUEVAS e RODRÍGUEZ, 2001; GIMENO ET AL., 2007; WERNLI e SPRENGER, 2007). Essa aplicação torna-se possível devido ao processo de formação deste sistema que ocasiona um abaixamento da tropopausa e, simultaneamente, o deslocamento de massas de ar envolvendo altos valores de VP (Figura 2.4) da baixa estratosfera para a troposfera média e alta (HOSKINS ET AL., 1985; BELL e BOSART, 1993; DELDEN e NEGGERS, 2003; SPRENGER e WERNLI, 2003, 2007; LLASAT ET AL., 2007; NIETO ET AL., 2008). A maioria dos autores sugerem a isosuperfície de -1,5 a -2,0 UVP<sup>1</sup> como a representação média da tropopausa dinâmica no HS, caracterizando essa superfície como uma interface entre duas regiões com massas de ar de características

---

<sup>1</sup> 1 UVP=10<sup>-6</sup>s<sup>-1</sup>Kkg<sup>-1</sup>

distintas. As Figuras 2.3a,b mostram o perfil vertical e latitudinal médio da VP e superfícies isentrópicas nos Hemisférios Norte e Sul.

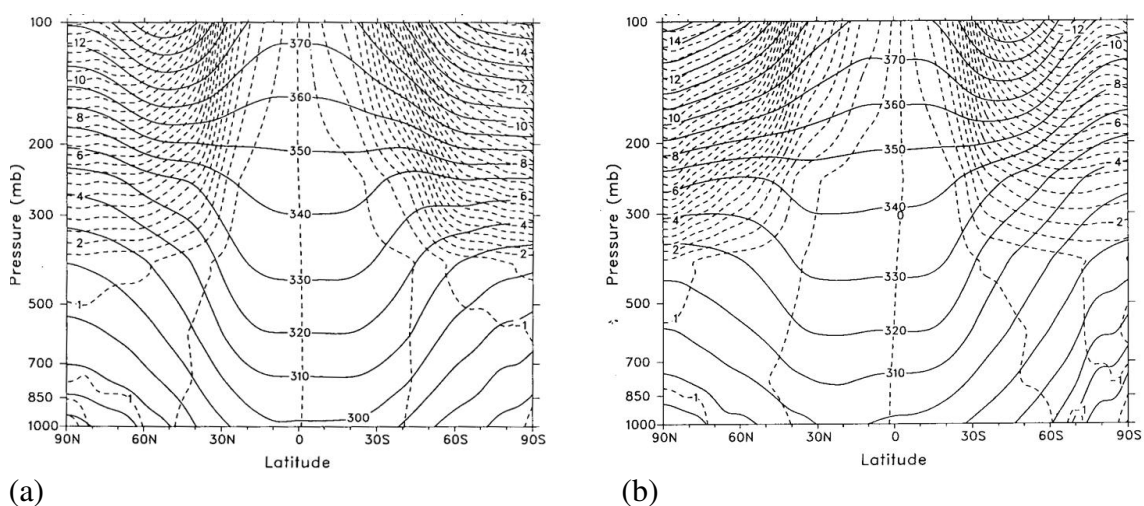


Figura 2.3 - Secção vertical da Vorticidade Potencial média zonal em UVP (linhas tracejadas) e Temperatura Potencial em K (linhas sólidas), para os meses de (a) janeiro e (b) julho, utilizando as reanálises do ECMWF (sete níveis verticais e em duas análises diárias), para o período de 1979-1989.

Fonte: Bluestein (1992)



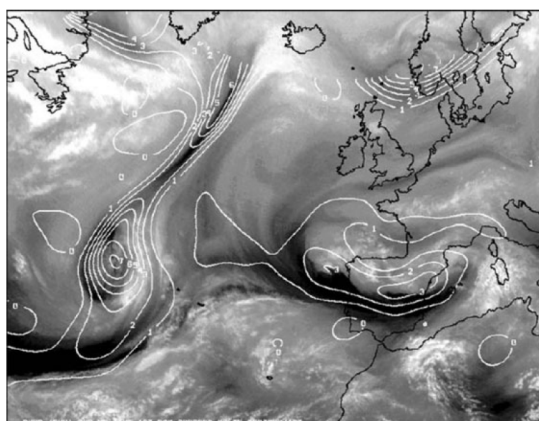


Figura 2.4 - Identificação de um VCAN sobre o Oceano Atlântico Norte, usando o campo de Vorticidade Potencial (em UVP) em 300 hPa. Os dados de VP são baseados no modelo HIRLAM e a imagem no vapor d'água pertence ao satélite METOSAT, ambos no horário das 12 UTC do dia 30 de março de 2003.

Fonte: Nieto et al. (2008)

Estudos realizados no HN mostram que uma imediata consequência dos mecanismos de trocas de elementos químicos entre estratosfera-troposfera é manifestada através do aumento nas concentrações de ozônio na troposfera sobre latitudes médias (OLTMANS ET AL., 1996; GIMENO ET AL., 1998) e regiões subtropicais (CUEVAS e RODRÍGUEZ, 2001; KENTARCHOS ET AL., 2000 – citado por NIETO ET AL., 2008). Price e Vaughan (1993) analisaram três possíveis mecanismos responsáveis pela transferência de massas de ar da estratosfera para a troposfera: processos convectivos, fluxos turbulentos próximo às correntes de jatos e curvatura da tropopausa. Como resultado foi verificado que este último aparentemente apresentou a maior contribuição, favorecendo a intensificação dos processos de trocas entre os estágios inicial e final do período de vida dos VCAN.

Rondanelli et al. (2002) avaliaram o padrão sinótico associado às situações que provocaram significativa intrusão de ozônio sobre a atmosfera de Cerro Tololo (30°10'S, 70°48'W, 2220 metros), na região andina do Chile. As análises de compostos permitiram

identificar duas situações distintas, associadas à eventos de VCAN e à cavados profundos, observando ainda que a maior atividade ocorre nos períodos de inverno e primavera. Além disso, esses resultados mostraram que a maior variação da quantidade de ozônio esteve associada a eventos de VCAN, compreendendo também as maiores concentrações de umidade.

## **2.5 Trajetórias e distribuição espacial**

Levando em conta a relação existente entre escoamentos em diferentes camadas da atmosfera, o deslocamento de muitos sistemas sinóticos tendem a acompanhar o desenvolvimento e a propagação natural do escoamento em altos níveis. Particularmente, os VCAN ao se desprenderem da corrente principal, deixam de ser intimamente governados pelos jatos de altos níveis, tornando sua trajetória irregular e dificultando bastante a sua previsibilidade (NIETO ET AL., 2008).

Em muitos casos a determinação da trajetória dos VCAN pode ser uma tarefa bastante complexa, pois estes algumas vezes podem mover-se lentamente (GIMENO ET AL., 2007) ou percorrerem grandes distâncias ao longo de poucos dias (PRICE e VAUGHAN, 1992; KENTARCHOS e DAVIES, 1998; QI ET AL., 1999). De forma geral, VCAN nas latitudes subtropicais deslocam-se preferencialmente no sentido leste (Lourenço, 1996), movendo-se em alguns casos para nordeste no HN (PRICE e VAUGHAN, 1992; KENTARCHOS e DAVIES, 1998) e sudeste no HS (QI ET AL., 1999). Essa imersão em direção aos círculos polares geralmente ocorre na fase de dissipação do sistema, envolvendo principalmente os VCAN que atuam em latitudes mais altas (PRICE e VAUGHAN, 1992)

As proporções dos VCAN que apresentaram deslocamentos significativos foram investigadas subjetivamente através de estudos realizados para o HN. Price e Vaughan (1992) e Kentarchos e Davies (1998) observaram que 51% e 48% dos casos analisados tiveram trajetórias com deslocamentos superiores à 700 e 600 km, respectivamente. Ambos estudos concordam no que diz respeito a maior mobilidade dos VCAN do tipo

Subtropical.

Recentemente, Fuenzalida et al. (2005) realizaram uma climatologia dos vórtices que atuaram em níveis médios da troposfera, revelando sua velocidade média de propagação no HS. Neste estudo, a velocidade de deslocamento foi estimada baseada na duração entre os estágios inicial e final de cada evento. Assim, a análise mostrou a sobressaliência de valores entre 4 e 6 m/s para a componente zonal e entre -2 e 2 m/s para a componente meridional. Levando em consideração que a velocidade média de propagação do escoamento na troposfera média, assim como a dos sistemas migratórios é tipicamente verificada na ordem de 10 m/s, pode-se inferir que os VCAN podem, a partir destes resultados, ser qualificados como sistemas de deslocamento relativamente lento.

Fuenzalida et al. (2005) também verificaram estatisticamente a relação da presença da Cordilheira dos Andes no deslocamento dos VCAN que atuaram entre 10°S e 60°S. Como resultado, foi observado que as trajetórias dos casos localizados a oeste da montanha apresentaram sentido preferencialmente para nordeste, enquanto que a sotavento dos Andes foi encontrada máxima frequência para os casos com movimento para leste. Em comparação com a velocidade de deslocamento, este estudo ainda mostrou que à barlavento da montanha, os VCAN são regidos por deslocamentos mais rápidos do que à sotavento dela.

Apesar do sentido de propagação dos VCAN ser aproximadamente semelhante ao do escoamento médio, observações têm permitido verificar que eventualmente os VCAN podem permanecer estacionários sobre uma região durante um certo período, podendo em alguns casos apresentar movimento retrógrado, isto é, oposto ao escoamento principal (NIETO ET AL., 2008). Esse fato permite alguns eventos afetar significativamente uma determinada região, podendo provocar a ocorrência de grandes volumes pluviométricos em um período relativamente curto (LLASAT ET AL., 2007; QUISPE e AVALOS, 2006).

Alguns estudos foram realizados com o propósito de compreender os mecanismos dominantes na propagação dos VCAN, como exemplo os trabalhos de Kuo (1950), Gan (1982), Sugi e Kanamitsu (1982) e Coutinho (2008). Embora estes tenham sido realizados em regiões distintas, é coexistente a concordância de que o deslocamento dos VCAN sofre significativa contribuição da advecção de vorticidade relativa nas latitudes subtropicais e da vorticidade absoluta em baixas latitudes.

A distribuição espacial dos VCAN basicamente é influenciada pelo regime de circulação atmosférica e pelas características orográficas de uma região (SMITH ET AL., 2002). Em ambos hemisférios, embora ocorra uma variabilidade sazonal ao longo do ano, a maior parte dos VCAN podem ser encontrados entre latitudes subtropicais e médias (PRICE e VAUGHAN, 1992; KENTARCHOS e DAVIES, 1998), atuando preferencialmente entre 30°S e 50°S no HS (LOURENÇO, 1996; FUENZALIDA ET AL., 2005). Fuenzalida et al. (2005) ainda mostrou que a frequência maior dos VCAN foi encontrada associada às regiões continentais, com máxima densidade em aproximadamente 38°S e ocorrendo um mínimo sobre os oceanos.

Sugere-se que na AS, a presença da Cordilheira dos Andes exerça um importante papel na distribuição espacial dos VCAN. Em um estudo recente realizado sobre a região subtropical deste continente, Campetella e Possia (2006) encontraram que a maior ocorrência de VCAN foi observada sobre a costa oeste sul-americana, aproximadamente entre 68°-80°W e 30°-45°W. Esta região já havia sido estudada anteriormente por Pizarro e Montecinos (2000), destacando essa área como uma região de intensa atividade ciclônica.

É interessante ressaltar que alguns estudos destacam a região sul do Brasil como um setor de significativa frequência de VCAN. Esse resultado pode ser visto em Campetella e Possia (2006), que indicam esta região como o setor continental sul-americano de máxima ocorrência. Um resultado semelhante também aparece no estudo de Fuenzalida et al. (2005), indicando um número significativo de VCAN na região sudeste da AS, principalmente durante os períodos de outono e inverno.

## **2.6 Variabilidade Temporal e Mecanismos de Circulação Atmosférica**

Estudos sobre os VCAN têm mostrado aspectos importantes de sua variabilidade temporal, revelando o comportamento de sua distribuição sazonal e interanual sobre determinadas regiões. Price e Vaughan (1992) sugerem que o comportamento dos Jatos em Altos Níveis exerce um importante papel na variabilidade sazonal deste sistema, associando as condições para sua formação com as variações no desvio térmico latitudinal e com o contraste de temperatura entre o continente e o oceano. Segundo estes autores, o aumento no número de VCAN no verão boreal está associado com o enfraquecimento da componente zonal do escoamento em altos níveis.

Na AS, estudos climatológicos mostraram a presença de uma importante variabilidade sazonal do número de VCAN. Particularmente na costa oeste sul-americana, região de alta frequência de VCAN (PIZARRO e MONTECINOS, 2000; RONDANELLI ET AL., 2002; FUENZALIDA ET AL., 2005; CAMPETELLA e POSSIA, 2006; QUISPE e AVALOS, 2006), Pizarro e Montecinos (2000) verificaram na primavera o período com maior número de ocorrências. Na região citada, Campetella e Possia (2006) também observaram o máximo do número de VCAN na primavera, enquanto que sobre a região continental, a maior frequência foi encontrada no outono. Resultados semelhantes também foram observados por Fuenzalida et al. (2005), indicando que, a oeste da costa chilena, os VCAN são mais comuns entre o inverno e a primavera.

Em síntese, pode-se inferir que de forma geral os estudos para o HS mostraram que os VCAN são mais frequentes nos períodos de outono, inverno e primavera, sendo menos comum durante o verão. Todavia, esse comportamento é contrário ao observado em estudos realizados sobre o HN, que indicam o verão como o período mais favorável para a ocorrência de VCAN.

A realização de estudos climatológicos, particularmente os que compreendem longos períodos, têm permitido também a identificação de oscilações na distribuição anual dos

VCAN. Embora não existam evidências que indiquem uma tendência periódica do seu comportamento ao longo dos anos, alguns trabalhos têm mostrado que eventualmente a ocorrência de VCAN sofrem significativas variabilidades interanuais em ambos hemisférios (KENTARCHOS e DAVIES, 1998; FUENZALIDA ET AL., 2005). FUENZALIDA ET AL. (2005) estudou a variabilidade interanual dos VCAN sobre três grandes áreas no HS e verificou que ocorreu um aumento do número de eventos sobre a região da AS a partir da década de 1990.

Apesar de muitos aspectos a respeito dos VCAN não serem bem compreendidos, alguns autores preocuparam-se em investigar os principais fatores que afetam a variabilidade deste sistema no HN. Nieto et al. (2007) verificaram que a presença de modos de variabilidade da circulação atmosférica (tais como eventos de bloqueio atmosférico, Oscilação do Atlântico Norte - OAN - e Oscilação Sul do El Niño) são fatores que afetam as características dos VCAN sobre o continente europeu. De fato, a análise deste estudo mostra uma dependência sazonal do modo de variabilidade com a ocorrência de VCAN, favorecendo seu desenvolvimento na fase positiva do OAN durante o período de outono e na presença de eventos de bloqueio durante o inverno.

## **2.7 Padrões de Nebulosidade e Precipitação**

Um evento de VCAN em regiões subtropicais frequentemente está associado com condições adversas do tempo, naturalmente provocando nebulosidade e afetando o regime de precipitação (distribuição e intensidade) sobre uma região (FEDOROVA ET AL., 1999; DELGADO ET AL., 2007; LLASAT ET AL., 2007). Há algum tempo o uso de imagens de satélite em diferentes canais espectrais têm sido empregado para a realização de análises das características de nebulosidade dos VCAN, permitindo uma boa identificação da distribuição de nuvens e da intensidade de precipitação ao longo da região desse sistema (LOURENÇO, 1996; GRIFFITHS, 1998; GARREAUD e FUENZALIDA, 2007; DELGADO ET AL, 2007).

Geralmente o padrão de nebulosidade associado aos VCAN é bastante complexo e suas

características basicamente são determinadas de acordo com sua profundidade, intensidade, estágio de vida e características de superfície (FRANK, 1970; GAN e KOUSKY, 1986). Delgado et al. (2007) avaliaram durante cinco anos as características típicas da cobertura de nuvens associadas aos VCAN sobre a região do Mediterrâneo, no HN. A metodologia deste estudo foi baseada na aplicação de um algoritmo que determina a distribuição e o tipo de nebulosidade, permitindo estimar seu potencial para produção de precipitações. Esses autores mostraram que a probabilidade maior para ocorrência de chuvas intensas acontece nos estágio inicial (amplificação do cavado em níveis altos) e intermediário (desprendimento do vórtice), sendo as nuvens altas (tipo cirrus) e de desenvolvimento vertical profundo as mais relevantes para a caracterização dos VCAN.

Um aspecto bastante comum encontrado sobre a região dos VCAN é a presença de nebulosidade com disposição assimétrica, frequentemente sendo observado nuvens com desenvolvimento vertical significativo na direção de seu movimento (GAN, 1982; LOURENÇO, 1996; HALLAK e DIAS, 1998, SATYAMURTY e SELUCHI, 2007). Para uma análise realizada sobre a região do Mediterrâneo, foi observado que a maior parte da precipitação foi encontrada dentro de uma raio de 600 km a partir do centro do vórtice, apresentando um máximo entre 300 e 500 km (PORCÙ ET AL., 2007).

O comportamento da distribuição de precipitação descrito por Porcù et al. (2007) é bastante comum durante o estágio de formação e período inicial do desprendimento do vórtice em relação ao escoamento principal. Entretanto, no estágio maduro é possível encontrar nuvens com desenvolvimento vertical profundo no centro do VCAN, sobretudo quando estes deslocam-se sobre superfícies continentais ou águas quentes (GAN e KOUSKY, 1981). As Figuras 2.5a,b ilustram uma imagem de satélite e uma estimativa de precipitação para um período em que houve a atuação de um evento de VCAN na costa oeste da AS. Pode-se notar que a maior estimativa do volume de chuvas ocorreu à leste do centro do VCAN.

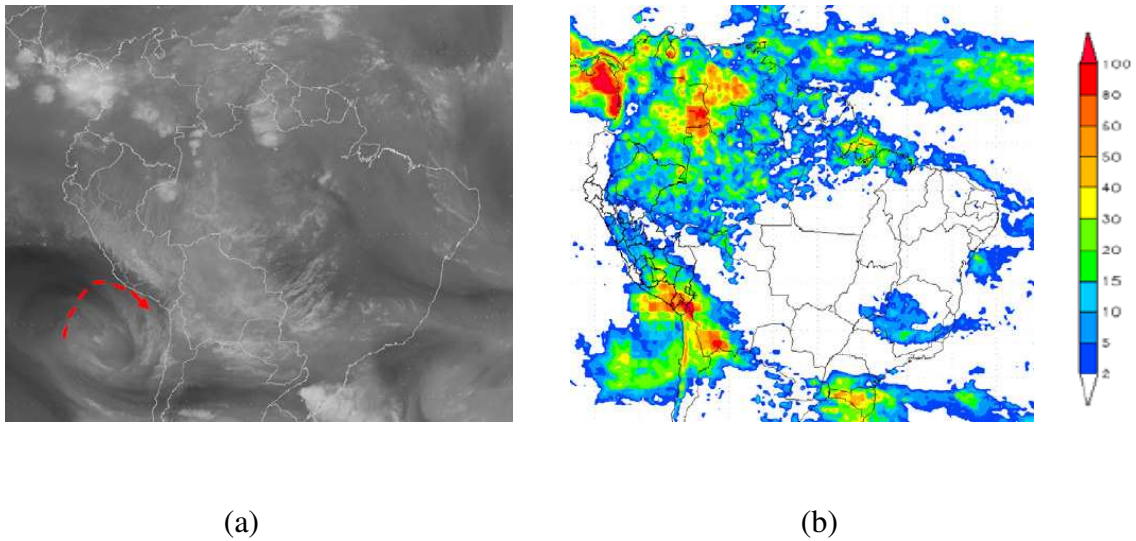


Figura 2.5 - a) Imagem do GOES-8, no canal do vapor d'água às 11:45 UTC do dia 03 de julho de 2004; b) estimativa de precipitação acumulada (mm) pelo TRMM entre os dias 29 de junho e 8 de julho de 2004.

Fonte: Quispe e Avalos (2006)

O desenvolvimento da nebulosidade associado aos VCAN é um fator que apresenta uma relevante relação com a profundidade do sistema, provocando ausência de nuvens de convecção profunda nas situações em que não ocorre um reflexo da estrutura do vórtice em níveis médios da troposfera (FRANK, 1970). Porcù et al. (2007) ainda analisaram a relação entre a profundidade vertical dos VCAN com a sua correspondente precipitação, verificando que a maioria dos casos confinados na troposfera alta não apresentaram precipitação ou esta ocorreu de forma fraca e abrangendo áreas relativamente pequenas. Por outro lado, os casos que apresentaram desenvolvimento vertical profundo desenvolveram precipitações moderada à intensa e atingiram áreas com dimensões horizontais maiores.

## 2.8 Estrutura Vertical

As condições meteorológicas associadas à um evento de VCAN muitas vezes dependem de diversos fatores, como por exemplo, a extensão vertical de sua estrutura dinâmica.



Durante um evento de VCAN, é comum encontrar próximo a superfície um padrão apresentando fraco gradiente de pressão (NIETO ET AL., 2008), sendo também verificado em alguns casos uma circulação anticiclônica (KUO, 1950). Entretanto, algumas vezes o aprofundamento do VCAN estabelece a formação de um sistema de baixa pressão em superfície, contribuindo favoravelmente para a ocorrência de precipitações de forma mais abundantes sobre uma região (MIKY FUNATSU ET AL., 2004; GAN, 1992).

Utilizando o método automático de identificação de VCAN proposto por Nieto et al (2005), Porcù et al. (2007) avaliaram a estrutura vertical dos eventos que atuaram sobre o Mediterrâneo nos períodos de verão e primavera, e sugeriram algumas classificações de acordo com o padrão de circulação em altitude (200 hPa) e em superfície (1000 hPa): (1) desenvolvimento de VCAN após a formação de um Ciclone em Superfície (CS); (2) desenvolvimento de VCAN precedente à formação de CS; (3) VCAN e CS presentes, mas sem associação na vertical; (4) VCAN que induzem o estabelecimento de uma circulação ciclônica fraca em superfície e (5) VCAN confinados em altos níveis.

Considerando apenas os eventos que tiveram sua duração superior ao período de um dia, Porcù et al. (2007) encontraram que 54% dos VCAN não apresentaram a presença de um CS, compreendendo as situações (4) e (5). Os casos de VCAN que ocorreram após o período de formação de um CS (1) corresponderam à 22% e aqueles cujo eixo vertical não esteve associado à presença de um CS (3) atingiram apenas 9%. Assim, a porcentagem dos VCAN que aprofundaram-se verticalmente ao longo de seu ciclo de vida, refletindo-se em superfície após algum tempo, compreenderam 15% de todos os casos observados.

O estudo de Campetella e Possia (2005) mostrou que 25% dos VCAN identificados pelo método objetivo apresentaram uma correspondência com uma circulação ciclônica na troposfera baixa, sendo que estes ocorreram com maior frequência sobre latitudes ao sul de 40° S. Frank (1970) analisou a estrutura vertical dos VCAN que atuaram sobre regiões tropicais e verificou uma proporção menor dos casos associados com ciclones

em superfície, determinando uma porcentagem de apenas 10% do total.

A metodologia de identificação objetiva de VCAN, utilizada no estudo de Fuenzalida et al. (2005), foi empregada para identificar os ciclones que atuaram em 500 hPa. Ao aplicar este método para níveis altos da troposfera, estes autores verificaram-se que 85% e 72% dos casos identificados em 500 hPa foram observados igualmente nos níveis de 300 e 200 hPa, respectivamente. Segundo este estudo, o tempo de vida dos eventos identificados nos três níveis foi bastante semelhante.

## **2.9 Métodos de Identificação objetiva de VCAN**

O desenvolvimento de técnicas para identificação objetiva dos VCAN têm auxiliado na reprodução das suas características, tornando possível a construção de estudos climatológicos envolvendo longas séries de dados. Além de permitir a compreensão do comportamento dos VCAN de maneira prática, o uso de métodos automáticos evitam a dependência sobre decisões de caráter subjetivo, tornando os resultados mais consistentes. A validação deste tipo de procedimento pode permitir a sua aplicação em centros operacionais ou ainda para avaliar as respostas de modelos numéricos em simulações de escala climática.

A determinação de um algoritmo baseia-se na escolha de critérios que garantam uma razoável confiabilidade na representação das características de um sistema meteorológico. Para identificar os ciclones que atuaram na troposfera média e alta, muitos estudos usaram como metodologia a identificação de mínimos de geopotencial no nível de 500 hPa, como por exemplo, Parker et al. (1989), Bell e Bosart (1989), Smith et al. (2002), Novak et al. (2002) e Fuenzalida et al. (2005) ou em 250 hPa, como no estudo de Campetella e Possia (2006). Em Pizarro e Montecinos (2000), a detecção dos VCAN foi feita baseada no cálculo do gradiente meridional do geopotencial (500 hPa), enquanto que Hernández (1999), Cuevas e Rodríguez (2001) e Wernli e Sprenger (2007) adotaram o contorno da VP como critério para a identificação deste sistema. Na metodologia de Nieto et al. (2005), a caracterização dos VCAN foi determinada a partir

do desenvolvimento de um método baseado em modelos conceituais, detalhado a seguir.

Para realizar uma climatologia dos VCAN que atuaram no HN de 20°N à 70°N, Nieto et al. (2005) desenvolveram um algoritmo de identificação objetiva baseado nos seguintes critérios: a primeira condição determina a presença de um mínimo de geopotencial em 200 hPa, inferior a pelo menos 10 metros geopotencial (m<sub>gp</sub>) em relação à oito pontos de grade vizinhos. Além disso, deve haver uma mudança na direção do vento zonal entre quaisquer pontos adjacentes, localizados ao norte (em direção ao pólo) do mínimo de geopotencial. A condição seguinte exige que a espessura da camada 300/200 hPa deve ser maior a leste do núcleo do VCAN do que sobre a posição central. E finalmente, um evento de VCAN foi determinado quando o ponto de grade a leste do centro do vórtice apresentou o valor do Parâmetro de Frente Térmica superior ao valor observado no centro do VCAN. Este trabalho permitiu identificar regiões preferenciais de ocorrência, variabilidade sazonal, período de vida e trajetórias preferenciais dos VCAN.

Alguns trabalhos usaram o conceito de VP para explicar o processo de identificação dos VCAN no HN. Os critérios utilizados nos estudos de Hernández (1999) e Cuevas e Rodríguez (2001) foram semelhantes, ou seja, um evento de VCAN foi determinado a partir da identificação de um contorno fechado de 2 UVP, apresentando um máximo de pelo menos 4 UVP no seu interior. Entretanto, no estudo de Hernández (1999) esse procedimento foi aplicado para uma superfície isobárica, enquanto que a aplicação deste método foi feita sobre superfícies isentrópicas em Cuevas e Rodríguez (2001). Recentemente, Wernli e Sprenger (2007) introduziram uma nova metodologia para detecção de VCAN, baseada no contorno de 2 UVP sobre superfícies isentrópicas. Neste estudo, o algoritmo proposto analisa o comprimento da isolinha de UVP e a distância entre duas posições sobre a mesma, classificando com um evento de VCAN quando o comprimento “l” e a distância “d” forem menor e maior do que 1500 km e 800 km, respectivamente. A Figura 2.6 mostra uma esquematização desse procedimento.

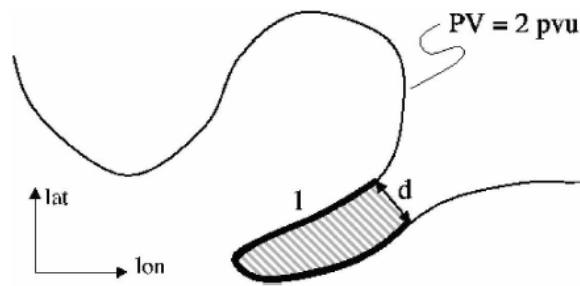


Figura 2.6 - Ilustração esquemática da identificação do contorno de 2 UVP. A área sombreada corresponde a massa de ar estratosférica desde que a distância “d” (entre dois pontos do contorno) e o comprimento do contorno “l” seja menor e maior, respectivamente, do que o limiar estabelecido.

Fuenzalida et al. (2005) realizaram a primeira climatologia dos VCAN para o HS, baseado no algoritmo proposto por Murray e Simmonds (1991a,b) e na realização de uma inspeção subjetiva. Na primeira etapa, o rastreamento dos VCAN ocorreu a partir da identificação de máximos do laplaciano do geopotencial, cujo valor em pelo menos um ponto ao longo da trajetória fosse superior a  $2,5 \text{ mgp}/(\text{gdl})^2$  (gdl = graus de latitude). Na etapa seguinte, análises subjetivas dos campos de geopotencial e temperatura do ar em 500 hPa foram realizadas a fim de selecionar somente os VCAN que propagaram-se em direção ao equador durante o seu desprendimento do escoamento médio, evitando a identificação dos VCAN extratropicais, ou seja, associados a oclusão de sistemas frontais em superfície. Neste estudo foram considerados somente os eventos que atuaram entre  $10^\circ\text{S}$  e  $60^\circ\text{S}$  e que apresentaram tempo de vida superior a 1,5 dias, permitindo identificar características da distribuição de frequência, intensidade, duração e velocidade dos VCAN.

Na climatologia de Campetella e Possia (2006), foram selecionados os VCAN que atuaram de  $100^\circ\text{W}$  à  $20^\circ\text{W}$  e de  $50^\circ\text{S}$  à  $15^\circ\text{S}$ , entre o período de 1979 à 1988. A identificação deste sistema foi feita a partir de um mínimo de geopotencial em 250 hPa, cujo valor fosse inferior a pelo menos 20 mgp em relação aos oito pontos vizinhos.

Neste estudo, foram descartados os eventos que apresentaram período de vida inferior à dois dias. Após o processo de detecção pelo método, as análises dos campos de vento em 250 hPa, temperatura da camada 1000/500 hPa e espessura em 500/250 hPa permitiram determinar um evento de VCAN sempre que a circulação mostrou um rompimento da corrente de jato e quando concomitantemente houve um núcleo frio nas camadas médias e baixas da troposfera. O estudo de Campetella e Possia (2006) apresentou o tempo de vida dos VCAN e a distribuição de frequência dos casos identificados em 250 hPa e em superfície.

Além destes trabalhos citados, recentemente duas metodologias bastante semelhantes foram desenvolvidas para estudar os VCAN que atuam próximo à região NE do Brasil. Coutinho (2008), adaptando o algoritmo desenvolvido por Silva (2005), baseou-se no mínimo de VR e na circulação horizontal do vento, ao redor do centro vórtice, para detectar e acompanhar as trajetórias dos VCAN. Dessa forma, uma climatologia de 27 anos foi realizada, apresentando características como distribuição de frequência, duração e intensidade média dos VCAN. No estudo de Costa (2009), o rastreamento dos VCAN foi feito de forma semelhante e, posteriormente, avaliações do balanço de energia e vorticidade permitiram identificar mecanismos associados aos processos de formação e dissipação deste sistema.



### 3. DADOS E METODOLOGIA

#### 3.1 Dados

Para auxiliar a análise dos VCAN nesse estudo foram utilizadas informações obtidas através do projeto de pesquisa **Análise da distribuição, evolução e previsibilidade dos Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (ADEP-VCAN)** que reuniu a participação de pesquisadores da Argentina, Brasil e Chile e teve como propósito estudar os VCAN Subtropicais e Extratropicais (GAN, 2010). Durante este projeto, foram selecionados os VCAN através das imagens do satélite GOES-12, no canal do vapor d'água e disponíveis no horário das 12:00 UTC (na ausência foi usado o horário das 14:45 UTC) para o período de janeiro de 2002 à dezembro de 2006. As informações utilizadas foram posição e data dos VCAN.

Além dessas informações, foram utilizadas reanálises do ERA-Interim, adquiridas no website oficial do ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) e disponibilizadas em quatro horários diários (00, 06, 12, 18 UTC). As variáveis utilizadas foram: componente zonal do vento (CZV), geopotencial, temperatura, vorticidade potencial (VP) e vorticidade relativa (VR), no nível de 300 hPa. Este nível foi escolhido pois usualmente os VCAN apresentam a máxima intensidade próximo ao nível da tropopausa (GAN, 1982). A resolução horizontal dos dados é de  $1,5^\circ \times 1,5^\circ$  de latitude/longitude (T255), os quais foram obtidos pelo sistema de assimilação 4D-Var. Os avanços nas suas técnicas de assimilação e o aumento da resolução horizontal tornam as reanálises do ERA-Interim mais confiáveis em relação às anteriores do próprio centro, ERA-40 e ERA-15 (<http://www.ecmwf.int>).

Os dados foram utilizados para a região de estudo que compreende os intervalos de  $110^\circ$  W à  $15^\circ$  W e de  $50^\circ$  S à  $15^\circ$  S (Figura 3.1). Esta área abrange uma porção do continente sul-americano e uma parte dos dois maiores oceanos do planeta (Oceanos Atlântico e Pacífico) no HS. No extremo oeste da AS, localiza-se a Cordilheira dos Andes, que possui montanhas com altitudes médias superiores à 3000 metros entre  $30^\circ$  S e  $15^\circ$  S e

com picos maiores do que 6000 metros em algumas localidades.

O propósito principal da determinação dos limites de latitude inferior e superior da área de estudo é selecionar especialmente os VCAN que atuaram em regiões subtropicais, procurando evitar parcialmente a identificação daqueles com características tropicais (FRANK, 1970; GAN, 1982), cujos processo de formação e deslocamento podem ser distintos.

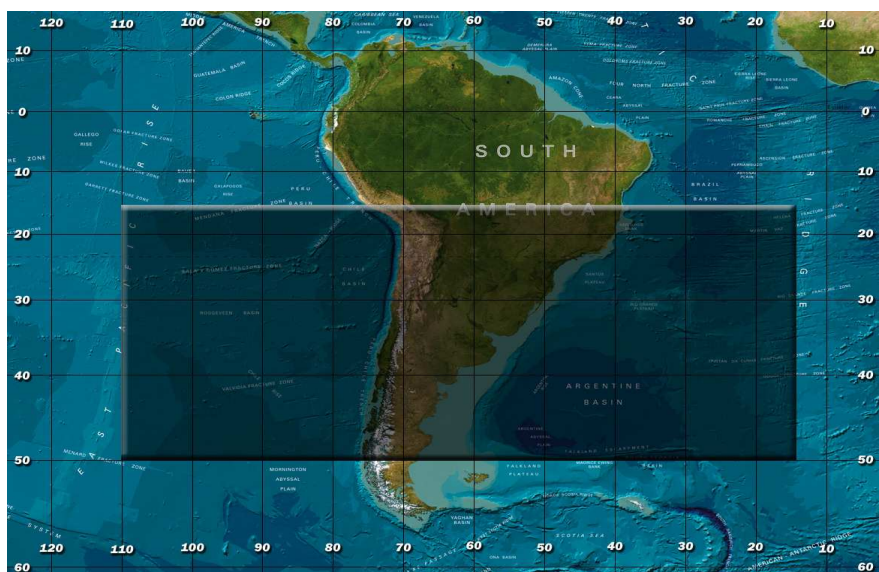


Fig. 3.1 - Região da América do Sul e oceanos adjacentes, com a área de estudo destacada.

## 3.2 METODOLOGIA

### 3.2.1 Estatísticas dos VCAN observados nas IS

Segundo as informações obtidas no Projeto ADEP-VCAN, a identificação dos VCAN Subtropicais e Extratropicais baseou-se nas diferenças de tonalidades observadas nas IS, no canal do vapor d'água. O processo de formação dos eventos Subtropicais esteve associado ao desprendimento da parte polar de um cavado do escoamento básico (PALMÉN e NEWTON, 1969). Por outro lado, o segundo tipo de VCAN foi



selecionado devido à ocorrência do desprendimento do vórtice em altitude, através do processo de oclusão do ciclone extratropical em superfície. Por conveniência, este último foi chamado de VCAN Extratropical. A Figura 3.2 mostra uma variabilidade ao longo dos meses do ano do número de VCAN Extratropicais e Subtropicais observados nas IS. O número de casos identificados durante esse período foi exatamente igual para ambos os tipos (206 VCAN).

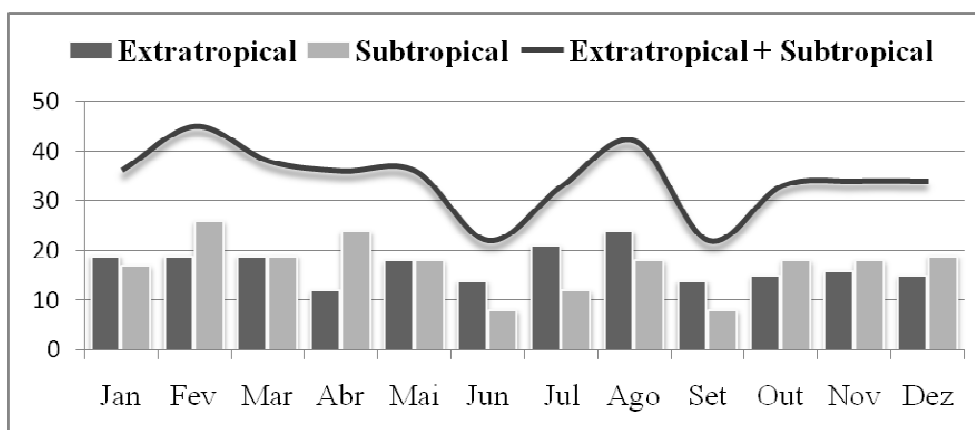


Figura 3.2 - Número de VCAN Extratropicais e Subtropicais observados nas IS no domínio compreendido ente 110° - 20°W e 15° - 50°S, entre o período de janeiro de 2002 e dezembro de 2006.

Estas informações são resultados de uma inspeção visual e subjetiva, cujo procedimento de identificação dos VCAN subtropicais foi baseado no estudo de Bengtsson (1982). O critério aplicado foi a localização de uma região de circulação ciclônica de ar seco (tonalidades escuras), envolvida por uma região periférica de ar relativamente úmido (tonalidades claras). A identificação dos VCAN foi determinada através da persistência do padrão descrito acima por duas análises consecutivas (24h) e considerando apenas aqueles que tiveram sua formação e dissipação dentro da área de estudo.

Eventualmente os VCAN podem permanecer confinados em altos níveis, não promovendo o desenvolvimento de nebulosidade (FRANK, 1970). Neste sentido, uma

importante vantagem que a utilização de imagens de satélite no canal do vapor d'água oferece é a possibilidade de identificar igualmente os VCAN secos, ou seja, aqueles que não estão associados com presença de nebulosidade (GAN, 1982). As Figuras 3.3 e 3.4 revelam dois casos observados nas IS e identificados sobre os Oceanos Atlântico e Pacífico. Nesta situação, pode-se notar que somente a imagem de satélite no vapor d'água permitiu a identificação do VCAN sobre o Oceano Pacífico, localizado próximo a costa oeste do Chile. Na Figura 3.5 pode-se comprovar a presença de dois contornos fechados (mínimos) no campo de geopotencial, no nível isobárico de 300 hPa.

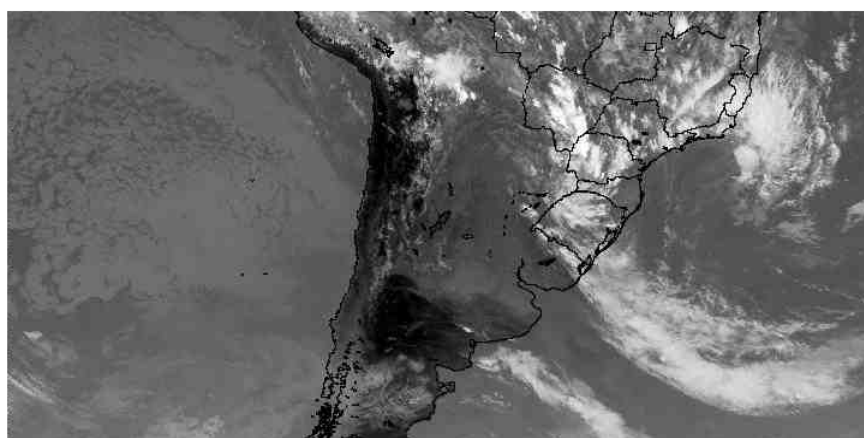


Figura 3.3 - Imagem do Satélite GOES-12 no canal do infravermelho às 16:00 UTC do dia 04/01/2007

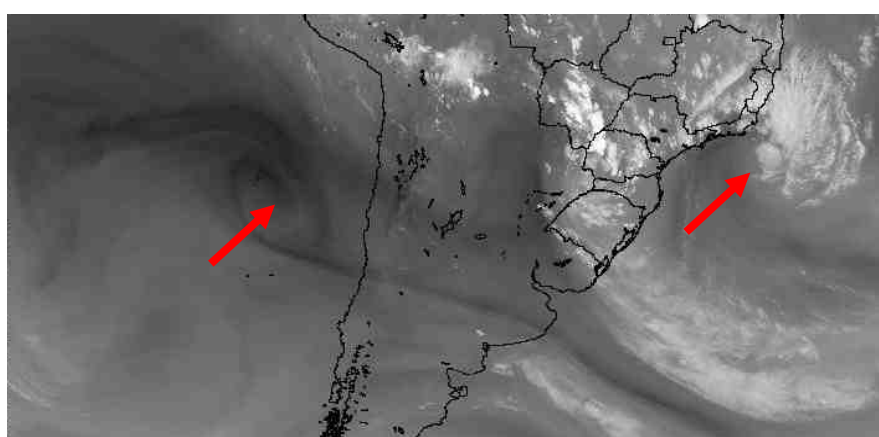


Figura 3.4 - Imagem do Satélite GOES-12 no canal do vapor d'água às 16:00 UTC do dia 04/01/2007

### 3.2.2 Análise de Campos

Para análise subjetiva e compreensão do comportamento dos VCAN, e avaliação do método *TRACK* foram utilizadas as reanálises dos campos de geopotencial e temperatura do ar. A identificação dos VCAN foi determinada visualmente a partir da localização de contornos fechados com mínimos de geopotencial, cujo padrão persistisse por no mínimo quatro análises sucessivas. O intervalo de contorno utilizado foi de 30 metros geopotencial e considerou-se apenas os VCAN que permaneceram a vida toda dentro da área de estudo, isto é, desde a formação até a dissipação. Considerou-se como um único caso as situações em que o geopotencial deixou de apresentar o contorno fechado por apenas um passo de tempo, mas readquiriu a sua forma anterior na análise seguinte.

Primeiramente as informações obtidas através de IS foram consideradas como verdade para avaliar a habilidade da Análise de Campos (AC) na identificação dos VCAN. Essa análise permitiu verificar diferenças no número de casos identificados entre as duas metodologias. Na etapa seguinte, a AC foi empregada para julgar a confiabilidade do *TRACK* em rastrear o sistema em estudo. Estas análises foram feitas para o período de janeiro à dezembro de 2003. Embora este período tenha sido relativamente curto, os resultados encontrados foram suficientes para demonstrar importantes diferenças entre os três tipos de análises.

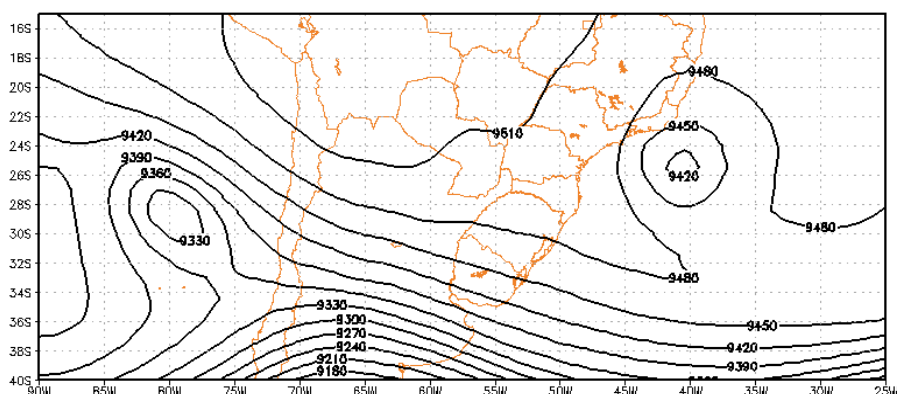


Figura 3.5 - Campo de Altura Geopotencial no nível isobárico de 300 hPa às 18:00 UTC do dia 04/01/2007

### **3.2.3 Método *TRACK***

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e avaliação de uma metodologia de identificação objetiva de VCAN, baseado na aplicação do algoritmo *TRACK* (HODGES, 1994, 1995, 1996, 1999). O *TRACK* é um método automático de identificação, o qual permite rastrear as trajetórias de sistemas transientes através da identificação de valores máximos ou mínimos em campos meteorológicos e/ou imagens de satélites. Tal metodologia tem permitido o acompanhamento de sistemas de interesse na meteorologia, como por exemplo ciclones extratropicais (HOSKINS e HODGES, 2002, 2005; HODGES ET AL., 2003), ondas de leste (HODGES ET AL., 2003), sistemas associados com a precipitação durante a monção de verão asiática (ANNAMALAI ET AL., 1999), entre outros.

No presente trabalho, o processo de seleção dos VCAN foi baseado em três etapas: (1) rastreamento de mínimos de VR; (2) filtro de temperatura e de vorticidade potencial; e (3) identificação do escoamento de leste ao sul do mínimo de VR.

#### **3.2.3.1 Identificação e rastreamento de mínimos de Vorticidade Relativa**

Aspectos relacionados com a variável utilizada para o rastreamento de um sistema meteorológico, através da aplicação do método *TRACK*, têm sido abordado em alguns estudos (HOSKINS e HODGES, 2002; FROUDE, 2006). Avaliando a trajetória de ciclones em superfície, Froude (2006) observou um número significativamente maior de sistemas com a VR em 850 hPa do que com a pressão ao nível médio do mar (PNMM). Hoskins e Hodges (2002) mencionam que a VR evidencia características de escala menor, enquanto que a PNMM e o geopotencial ressaltam os aspectos da circulação de larga escala. Neste estudo foi utilizada a VR, pois sugere-se que esta variável acompanhe melhor a trajetória dos VCAN, uma vez que o geopotencial não permitiria a identificação dos casos associados com fraca baroclinia, tal como ocorre nos trópicos.

A primeira etapa do processo de rastreamento dos VCAN foi realizada a partir da identificação de pontos associados com valores mínimos no campo de VR (por conveniência, esses pontos serão designados como MVR). A identificação e correspondência entre os MVR foi baseada na aplicação da técnica do vizinho mais próximo e da minimização da função custo (ver apêndice A para detalhes). A partir disso, os sistemas identificados foram selecionados de acordo com os seguintes critérios:

**(a) Intensidade:** No HS, os movimentos ciclônicos na atmosfera podem ser identificados através de regiões que apresentam valores negativos no campo de VR. Para rastrear a trajetória de um VCAN o algoritmo “varre” o campo de VR, buscando valores mínimos (sempre com sinal negativo) a partir do limiar de  $-1,0 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ . Isto implica que pelo menos um MVR ao longo da trajetória do sistema deve apresentar seu valor de intensidade inferior ao limiar estabelecido (o procedimento utilizado para identificação dos MVR está descrito em detalhes no Apêndice A). Avaliações foram feitas com o propósito de verificar a confiabilidade no rastreamento usando diferentes limiares para intensidade.

**(b) Deslocamento:** no processo de identificação, o algoritmo permite determinar restrições quanto ao deslocamento mínimo dos sistemas, selecionado somente aqueles cuja distância percorrida durante um período for maior do que o valor estabelecido. Levando em consideração que alguns VCAN podem propagar-se lentamente, determinou-se a identificação de todos os VCAN com deslocamento diário superior à 100 km.

**(c) Tempo de vida:** Muitos sistemas podem formar-se em um determinado instante e perder sua configuração no instante posterior. Para evitar a identificação de VCAN que apresentam períodos de vida muito curto, selecionou-se apenas aqueles cuja duração foi superior ou igual ao período de 24 horas (4 análises).

### 3.2.3.2 Adição dos Campos de Temperatura e Vorticidade Potencial

Muitos estudos (KOUSKY e GAN, 1981; VUILLE e AMMANN, 1997; RONDANELLI ET AL., 2002; QUISPE e AVALOS, 2006; LLASAT ET AL., 2007; SATYAMURTY e SELUCHI, 2007; NIETO ET AL., 2008) têm mostrado que a região central de um VCAN é caracterizada por apresentar temperaturas mais baixas do que a sua periferia, permitindo em muitos casos sua identificação através de regiões com anomalias negativas no campo horizontal de temperatura. Além desta característica, casualmente eventos de intrusão de ar de origem estratosférica para dentro da camada troposférica (HOSKINS ET AL., 1985; MIKY FUNATSU ET AL., 2004), estão associados com a presença de VCAN, permitindo o transporte de massas de ar que apresentam altos valores (em módulo) de vorticidade potencial.

Baseado nas características conceituais citadas acima, foi implementado à metodologia de rastreamento dos VCAN critérios quanto ao valor de temperatura e VP, limitando somente a identificação de sistemas que satisfizeram as condições estabelecidas. Estes parâmetros também foram aplicados para determinação da posição preferencial dos mínimos de temperatura e VP sobre a região do VCAN. Dessa forma, análises objetivas foram conduzidas para avaliar quantitativamente a relação do número de sistemas identificados, assim como a porcentagem de ocorrência de mínimos de temperatura e VP com diferentes coordenadas geográficas.

Os sistemas obtidos na etapa anterior foram filtrados posteriormente de acordo com os seguintes critérios:

### **Etapa 1: Desvio de Temperatura**

A fim de implementar características conceituais à identificação dos VCAN, alguns testes foram realizados com o objetivo de determinar limiares que garantam uma razoável correspondência entre eventos de VCAN e desvios negativos de temperatura. O desvio de temperatura é determinado pela diferença entre o valor de temperatura correspondente à posição do MVR e o valor obtido através da média zonal da temperatura (300 hPa) da faixa de latitude mais próxima ao MVR. A vantagem desta

técnica é garantir uma melhor caracterização entre os valores do desvio de temperatura associado aos VCAN e o comportamento médio de temperatura em cada faixa de latitude.

Para avaliar o resultado da inclusão deste parâmetro foram realizados alguns testes, aplicando limiares para a temperatura correspondente aos MVR e em posições relativas à estes. Finalmente, os VCAN foram identificados a partir de desvio(s) negativo(s) de temperatura(s) inferior(es) a 3 graus centígrados. A determinação do valor de temperatura associado a cada MVR foi baseada a partir da busca do menor valor dentro de uma área circular de raio igual a 5 graus geodésicos, cujo centro é a própria posição do MVR.

## **Etapa 2: Vorticidade Potencial**

Esse critério determina que ao longo da trajetória de um VCAN deve haver um mínimo de VP (300 hPa) associado à posição do MVR. Neste caso, a determinação de um evento foi baseada no valor absoluto associado a cada MVR, selecionando apenas os sistemas cujo valor de VP foi inferior a -2.0 UVP. De forma análoga ao que foi feito na **Etapa 1**, o mínimo de VP foi obtido sob uma área circular com raio máximo de 5 graus de comprimento.

### **3.2.3.3 Componente Zonal do Vento (CZV)**

Na última etapa, a determinação de um evento de VCAN foi baseada a partir da identificação de um escoamento de leste em uma posição ao sul do MVR. Essa etapa faz-se necessária para evitar a identificação de cavados em níveis altos da troposfera, induzindo a detecção de circulações fechadas. Primeiramente, alguns testes foram realizados para determinar em que posição relativa ao eixo meridional do MVR usualmente ocorre o menor valor da CZV. Essa análise também permitiu verificar a relação entre um determinado limiar para a CZV e um caso real de VCAN.

Após ter satisfeito todas as condições citadas anteriormente, um evento foi classificado como um VCAN a partir da identificação de um valor inferior a  $-8.0$  m/s, localizado 4 (quatro) graus ao sul da posição do MVR. Esse critério foi satisfeito uma vez que essa restrição ocorresse por pelo menos um passo de tempo ao longo da trajetória.

#### **3.2.3.4 Validação**

A combinação de diferentes limiares permitiu estabelecer um conjunto com 27 critérios distintos (Tabela 3.1). Para avaliar a destreza de cada critério na identificação dos VCAN nas AC foi proposto um critério de referência, usando os seguintes limiares:  $-2$  °C para o desvio de temperatura e  $-2$  UVP para a VP. Nesta configuração não foi incluído o parâmetro da CZV e todos os VCAN reais (48 no total), ou seja, confirmados nas AC, foram usados como verdade para avaliar o desempenho de outros critérios.

Assim, o índice de acerto/erro foi obtido pela razão entre o número de VCAN/cavados reais identificados através de um determinado critério (por exemplo,  $T = -2$  °C;  $VP = -2$  UVP;  $CZV = 3$  m/s, onde  $T$  é temperatura) e o número de VCAN reais identificados pelo critério de referência. O grau de confiabilidade foi determinado pela diferença entre os índices de acerto e erro. A seleção dos VCAN foi conduzida considerando apenas os casos que tiveram sua formação e dissipação dentro do domínio escolhido, ou seja, aqueles eventos que não alcançaram 100% do seu ciclo de vida na região de estudo foram descartados desta análise.



Tabela 3.1 - Determinação dos critérios avaliados quanto aos valores de Temperatura (T), Vorticidade Potencial (VP) e Componente Zonal do Vento (CZV).

(1.a) T=-2°C; VP=-2 UVP; CZV=-3m/s	(1.b) T=-2°C; VP=-2 UVP; CZV=-5m/s	(1.c) T=-2°C; VP=-2 UVP; CZV=-8m/s
(2.a) T=-2°C; VP=-3 UVP; CZV=-3m/s	(2.b) T=-2°C; VP=-3 UVP; CZV=-5m/s	(2.c) T=-2°C; VP=-3 UVP; CZV=-8m/s
(3.a) T=-2°C; VP=-4 UVP; CZV=-3m/s	(3.b) T=-2°C; VP=-4 UVP; CZV=-5m/s	(3.c) T=-2°C; VP=-4 UVP; CZV=-8m/s
(4.a) T=-3°C; VP=-2 UVP; CZV=-3m/s	(4.b) T=-3°C; VP=-2 UVP; CZV=-5m/s	(4.c) T=-3°C; VP=-2 UVP; CZV=-8m/s
(5.a) T=-3°C; VP=-3 UVP; CZV=-3m/s	(5.b) T=-3°C; VP=-3 UVP; CZV=-5m/s	(5.c) T=-3°C; VP=-3 UVP; CZV=-8m/s
(6.a) T=-3°C; VP=-4 UVP; CZV=-3m/s	(6.b) T=-3°C; VP=-4 UVP; CZV=-5m/s	(6.c) T=-3°C; VP=-4 UVP; CZV=-8m/s
(7.a) T=-4°C; VP=-2 UVP; CZV=-3m/s	(7.b) T=-4°C; VP=-2 UVP; CZV=-5m/s	(7.c) T=-4°C; VP=-2 UVP; CZV=-8m/s
(8.a) T=-4°C; VP=-3 UVP; CZV=-3m/s	(8.b) T=-4°C; VP=-3 UVP; CZV=-5m/s	(8.c) T=-4°C; VP=-3 UVP; CZV=-8m/s
(9.a) T=-4°C; VP=-4 UVP; CZV=-3m/s	(9.b) T=-4°C; VP=-4 UVP; CZV=-5m/s	(9.c) T=-4°C; VP=-4 UVP; CZV=-8m/s



## 4. RESULTADOS

### 4.1 Comparação entre Análise de Campos e Imagens de Satélite

#### 4.1.1 Distribuição dos VCAN

De acordo com o que foi discutido no capítulo anterior, as informações obtidas através das IS foram consideradas como verdade para avaliar a confiabilidade dos dados de reanálises na identificação dos VCAN. Esse procedimento é necessário, pois na etapa seguinte as reanálises serão empregadas para obter a destreza do *TRACK* na detecção do sistema em estudo. As avaliações comparativas entre AC e IS foram realizadas para o período de janeiro à dezembro de 2003.

Em alguns casos, observou-se diferenças na inspeção visual da posição e do tempo de vida dos VCAN, entre as AC e IS. Porém, esta avaliação não teve como mérito verificar a defasagem da posição e duração dos VCAN em cada método de detecção. A Figura 4.1 mostra a distribuição mensal do número de casos identificados nas IS (subtropicais e extratropicais) e AC para o ano de 2003. Com exceção do mês de abril, no restante do período a AC subestimou ou foi igual ao número de casos observados nas IS, apresentando no total do período aproximadamente 17,4% a menos do número de eventos de VCAN identificados nas IS.

Ao longo do período avaliado foram observados 71 e 86 VCAN nas AC e IS, respectivamente. A Figura 4.2 mostra o número de VCAN identificados nas IS (subtropicais e extratropicais) e confirmados nas AC, relevando que 55 casos foram observados em ambas análises. Note que a AC deixou de considerar 31 VCAN ( $=86-55$ ) e ainda identificou 16 casos ( $=71-55$ ) que não foram observados nas IS. O período do ano que a AC representou melhor os VCAN identificados nas IS foi no verão, confirmando 75% dos casos, seguido do outono (61,9%), primavera (59,1%) e inverno (57,9%). O mês que AC revelou a pior confiabilidade na identificação dos VCAN foi em abril, quando foram identificados apenas 2 de 6 casos observados nas IS.

A avaliação dos VCAN observados nas AC e IS mostrou significativas diferenças, que ocorreram principalmente sobre regiões oceânicas. A maior parte dos erros esteve associado aos VCAN que foram identificados nas IS, mas não foram observados nas AC (31 casos). Estas situações geralmente correspondem a cavados na troposfera alta, cujo geopotencial não mostrou a presença da circulação fechada. Por outro lado, houveram 16 casos verificados nas AC, mas sem identificação nas IS.

Uma possível causa relacionada com a primeira diferença apontada, pode estar associada ao fato de as IS no canal do vapor d'água representam uma estimativa dos movimentos atmosféricos em uma camada vertical e não em um único nível de pressão. Como segundo Venden et al. (1997), as informações obtidas da velocidade do vento através das IS (vapor d'água) estão contidas tipicamente entre 500 e 150 hPa, é possível que o vórtice ciclônico observado nas IS não esteja necessariamente em 300 hPa. Vale salientar que a reanálise do ERA-Interim utiliza técnicas mais sofisticadas para a assimilação de dados de satélite (UPPALA ET AL., 2008), o que pode justificar o possível erro na análise subjetiva das IS.

O primeiro, deve-se à possíveis falhas integradas ao processo de estimativa dos ventos em altitude, através dos dados de reanálises. Uma das causas deste problema está na indisponibilidade de uma rede homogênea de dados de radiossondagem, principalmente sobre os Oceanos Atlântico e Pacífico Sul. O segundo motivo pode estar relacionado ao fato de que as IS (canal do vapor d'água) representam uma estimativa dos movimentos atmosféricos em uma camada vertical e não de um único nível de pressão. Segundo Venden et al. (1997), as informações da velocidade do vento estão contidas tipicamente entre 500 e 150 hPa.

Embora tenham ocorrido diferenças entre as duas formas de identificação, as AC representaram satisfatoriamente os VCAN observados nas IS em alguns períodos do ano, como por exemplo no verão. Sugere-se que melhorias possam ser encontradas investigando outras variáveis em superfícies isobáricas (ou isentrópicas), a fim de

determinar a técnica mais adequada para identificação dos VCAN nas IS.

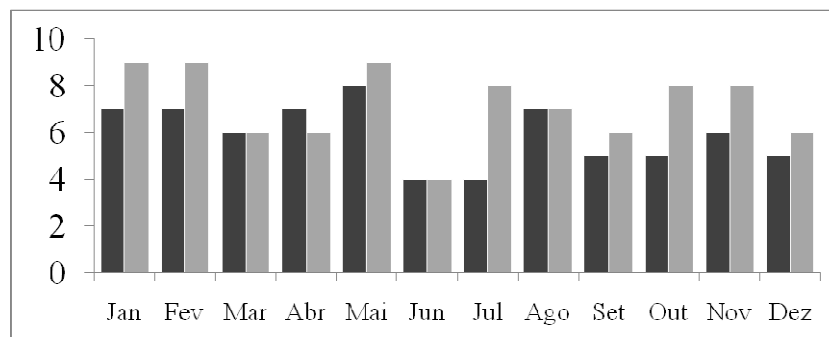


Figura 4.1 - Número de VCAN identificados nas Análises de Campos (barra cinza escuro) e nas Imagens de Satélite (barra cinza claro). As análises foram realizadas para o período de janeiro à dezembro de 2003.

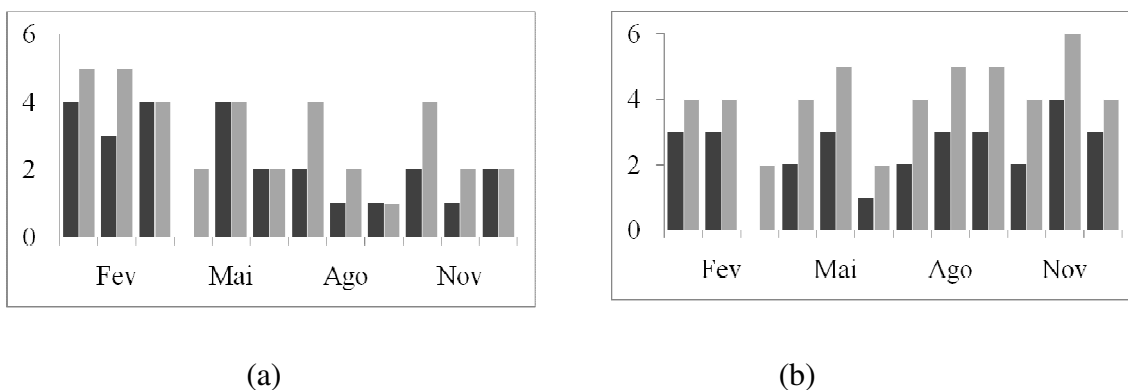


Figura 4.2 - Número de VCAN (a) subtropicais e (b) extratropicais identificados nas IS (barra cinza claro) e confirmados nas AC (barra cinza escuro). A análise compreende o período de janeiro à dezembro de 2003.

#### 4.1.2 Classificação dos VCAN quanto ao padrão de temperatura

A fim de explorar aspectos pouco investigados e justificar alguns parâmetros aplicados na metodologia deste estudo, utilizou-se as AC para avaliar o comportamento da

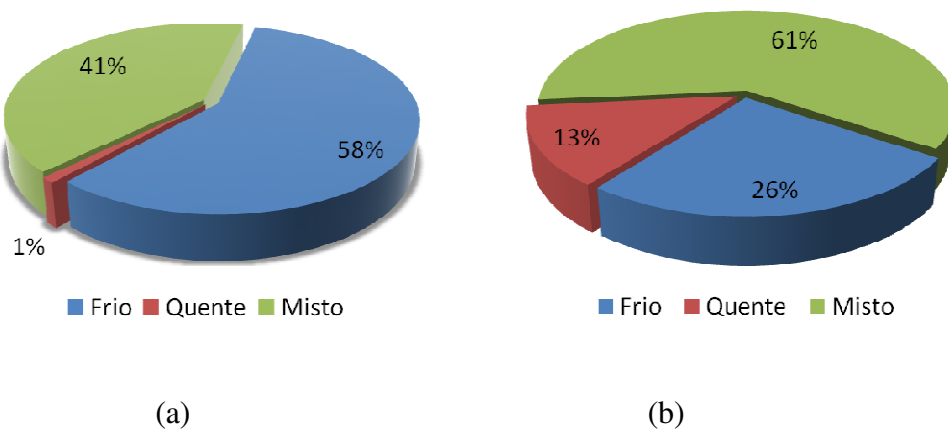
temperatura do ar correspondente aos VCAN identificados nas IS. Vale salientar que esta avaliação foi feita apenas para os VCAN observadas igualmente nas duas análises, para o período de janeiro de 2002 à dezembro de 2006. Assim, os VCAN foram classificados quanto ao seu padrão de temperatura em três tipos: frio, quente e misto.

A qualificação de cada tipo de VCAN foi determinada a partir da análise visual da distribuição espacial dos desvios de temperatura sobre a área de cada sistema. Dessa forma, os casos associados com massas de ar relativamente frias e quentes foram classificados como VCAN frio e quente, respectivamente. Nos casos em que não houve um padrão marcante ou houve presença concomitante de desvios negativo e positivo ao longo de seu ciclo de vida, classificaram-se como eventos mistos.

Baseado nos critérios descritos acima, verificou-se algumas diferenças entre os VCAN Subtropicais e Extratropicais. De forma geral, mais da metade (58,28%) dos casos subtropicais foram caracterizados por apresentarem massas de ar com características relativamente frias ao longo de todo seu ciclo de vida, enquanto que apenas 1,23% (2 casos) destes apresentaram desvios positivos de temperatura. Analisando os casos extratropicais, verificou-se que 26,09% estiveram associados com desvios negativos, sendo que os eventos caracterizados como puramente quentes totalizaram 13,04%. O restante dos casos foram rotulados como VCAN mistos, compreendendo 40,49% e 60,87% para os tipos subtropicais e extratropicais, respectivamente. As Figuras 4.3a e b mostram a porcentagem dos eventos frio, quente e misto para os VCAN Subtropicais e Extratropicais, respectivamente.

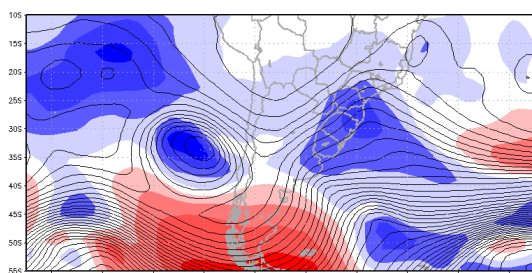
À respeito dos VCAN Subtropicais, considerando todos os 756 dias com eventos identificados nas IS e confirmados nas AC, em apenas 23 (3,03%) destes houve a presença de desvios positivos, enquanto que em 385 dias (50,72%) estes sistemas estiveram sob o domínio de massas de ar relativamente frias. Fazendo uma comparação com os eventos extratropicais, durante 85 dias (15,48%) houve a presença de desvios positivos, contra 168 dias (30,60%) com características opostas ao longo de um total de 549 dias identificados nas duas análises. No restante dos dias, houve a presença de

desvios positivos e negativos ao longo de um mesmo dia ou de desvios próximos de zero.

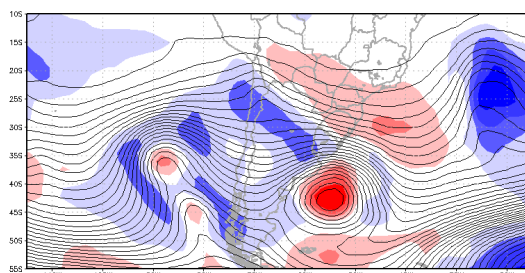


Figuras 4.3 - Porcentagem de VCAN identificados em relação às características de temperatura entre o período de janeiro de 2002 a dezembro de 2006 para os casos (a) Subtropicais e (b) Extratropicais.

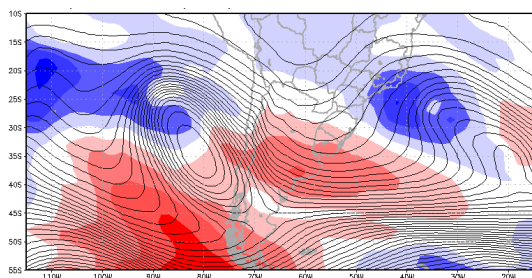
As Figuras 4.4 a-d ilustram o campo de geopotencial e desvios de temperatura para três distintos casos de VCAN subtropicais (Figuras 4.4a, c e d) e um extratropical (Figura 4.4b). Nota-se que nas Figuras 4.4a e b os desvios negativo e positivo apresentam-se bem definidas sobre a região dos VCAN situados nos Oceanos Pacífico e Atlântico, respectivamente. No entanto, eventualmente ocorrem situações onde os VCAN estão associados com massas de ar com características distintas (Figura 4.4c) ou com núcleos térmicos deslocados do centro do sistema (Figura 4.4d).



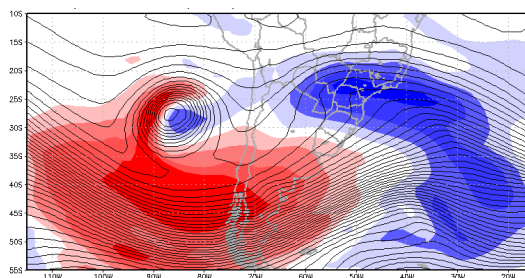
(a) 06:00 UTC do dia 27/02/2004



(b) 06:00 UTC do dia 01/10/2005



(c) 12:00 UTC do dia 26/07/2004



(d) 00:00 UTC do dia 26/08/2006

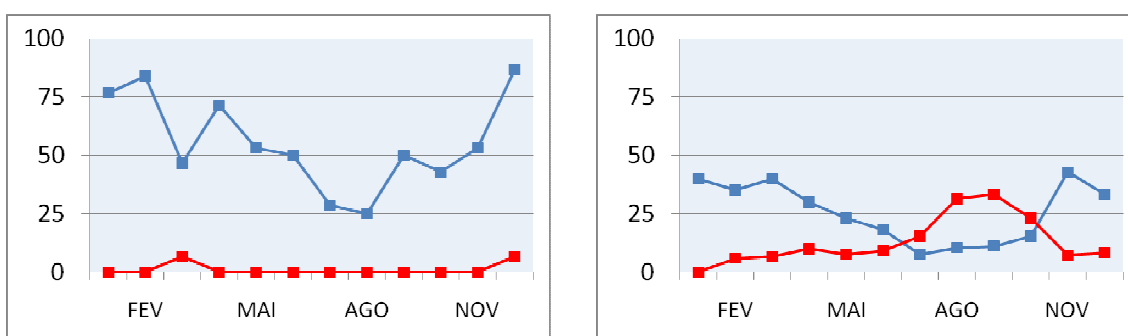
Figuras 4.4a-d - Campo de geopotencial e desvio de temperatura no nível de 300 hPa.

As Figuras 4.5a e b mostram a distribuição mensal da porcentagem de VCAN subtropicais e extratropicais, respectivamente, de acordo com suas características de temperatura. Os eventos classificados como mistos não aparecem na Figura 4.5, embora estes possam ser obtidos pela porcentagem de VCAN que não estão associados com desvios exclusivamente positivo e negativo.

Primeiramente, analisando apenas os VCAN subtropicais (Figura 4.5a), nota-se que as maiores proporções de eventos com desvio negativo de temperatura ocorreram em dezembro, janeiro e fevereiro, compreendendo 80%, 76,9% e 84% dos casos observados em cada mês, respectivamente. De forma contrária, no mês de agosto foi observada a menor porcentagem de VCAN frios, correspondendo a apenas 25% dos casos. Fazendo



uma comparação com os eventos extratropicais, permite-se observar uma variabilidade sazonal semelhante para os casos frios. Entre os meses de novembro e março, a frequência de eventos frios variou entre 33,3% e 42,9% dos casos, respectivamente, enquanto que em julho, o percentual foi de apenas 7,7%. Estes resultados indicam que um comportamento comum aos VCAN subtropicais e extratropicais foi a frequência maior de eventos frios nos meses de verão e menor durante o inverno. Embora a porcentagem de VCAN quentes foi relativamente pequena para os dois tipos, houve um máximo de VCAN extratropicais quentes em agosto e setembro, correspondendo aproximadamente 31,6% e 33,3% dos casos, respectivamente.



(a)

(b)

Figuras 4.5 - Porcentagem de VCAN com desvios de temperatura negativo (linha azul) e positivo (linha vermelha) para os casos (a) subtropicais e (b) extratropicais. A análise compreende o período de janeiro de 2002 à dezembro de 2006.

## 4.2 Método

### 4.2.1 Distribuição da Temperatura, VP e CZV

De acordo com o que foi discutido anteriormente, a escolha de um critério para identificação objetiva dos VCAN baseou-se na avaliação de parâmetros que garantam uma razoável correspondência com eventos de VCAN. Inicialmente, foram avaliadas as

distribuições espaciais dos campos de temperatura, VP e CZV, com o propósito de encontrar a posição preferencial do valor mínimo ao longo da região do VCAN. Estas análises foram realizadas para o período de janeiro de 2003 à dezembro de 2006 e a escolha dos valores para cada limiar foi feita para estabelecer condições distintas.

Neste procedimento, cada posição foi obtida a partir da determinação de uma distância (em graus geodésico) e de uma direção (norte, sul, leste e oeste) em relação à posição do MVR. Assumindo que o MVR ocorra ao norte do centro do vórtice, devido a contribuição da componente de cisalhamento do vento, atribuíram-se algumas analogias entre a distribuição da temperatura/VP e posições situadas sobre eixos meridional e zonal na região dos VCAN (Figura 4.6).

Analisando o comportamento da temperatura no nível de 300 hPa, foi observado uma tendência em ocorrer desvios negativos mais significativas próximas à posição do MVR. Na análise objetiva, alguns limiares de temperatura foram aplicados para 17 posições ao longo do eixo meridional, sendo 10 (6) posições ao sul (norte) do MVR, como mostrado na Figura 4.6. Os limiares aplicados foram de -5, -8 e -10 graus centígrados, ou seja, foram selecionados somente os sistemas que apresentaram um valor inferior ao estabelecido em pelo menos um passo de tempo ao longo da trajetória.

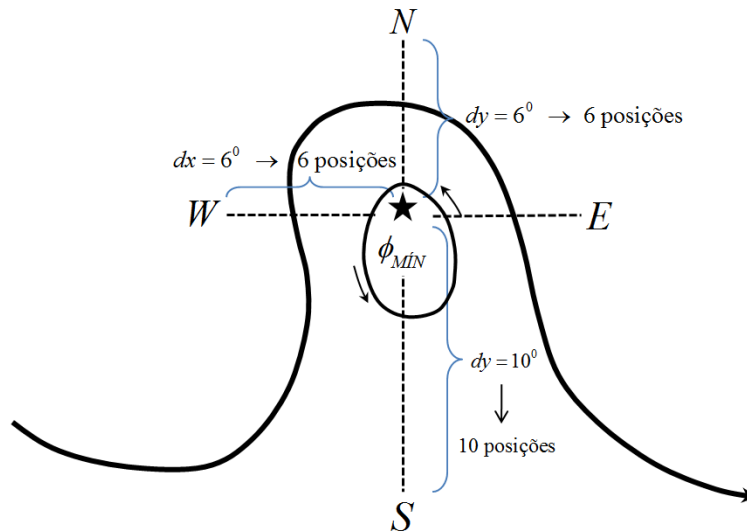
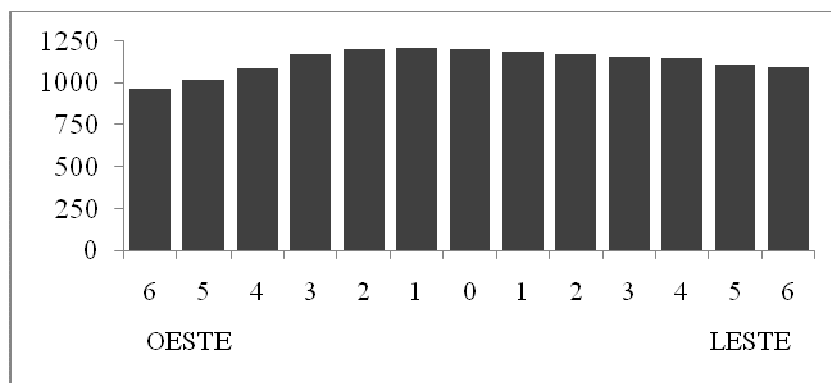


Figura 4.6 - Ilustração esquemática das posições sobre os eixos meridional e zonal da região do VCAN. A linha cheia representa uma isolinha de geopotencial em altos níveis, o símbolo estrela a posição do MVR,  $\phi_{MÍN}$  o mínimo de geopotencial, e  $d_x$  e  $d_y$  as distâncias (em graus geodésico) sobre os eixos zonal e meridional, respectivamente. A distância de separação entre duas posições é de 1 grau.

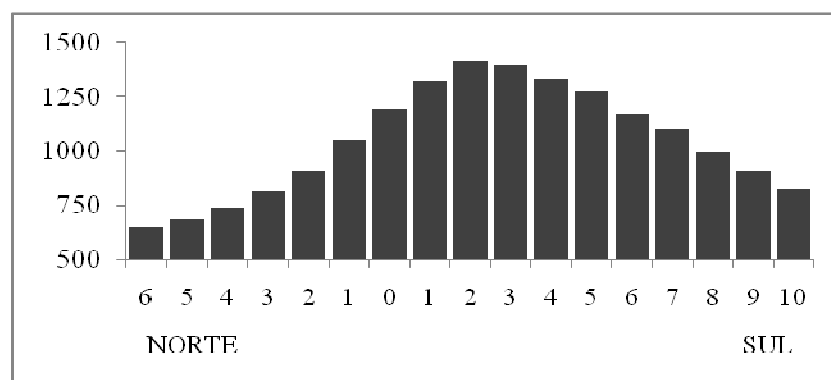
Essa análise sugere uma correspondência entre o número de casos identificados e a estimativa do mínimo de temperatura em cada posição. A Figura 4.7a mostra que a maior frequência de centros negativos de temperatura foi observada a uma distância de dois graus ao sul da posição do MVR, uma vez que nessa posição foram identificados o máximo de sistemas (1412). Este resultado ainda mostra que houve um máximo de eventos entre  $1^\circ$  S e  $4^\circ$  S, indicando a presença do núcleo frio ao longo destas posições.

Na análise seguinte, esse mesmo procedimento foi aplicado sobre um eixo zonal na região de cada VCAN, porém neste caso sobre a posição em que o mínimo de temperatura foi verificado anteriormente. Assim, uma análise objetiva foi realizada para determinar a distribuição zonal de temperatura sobre uma faixa distante dois graus (em direção ao pólo) da posição do MVR. De acordo com a Figura 4.7b, nota-se que houve uma ligeira tendência em ocorrer valores menores de temperatura na porção centro-

oeste da região dos VCAN, onde observa-se um máximo de sistemas entre as posições 0 e 2° W. Este resultado é semelhante com o que Gan e Kousky (1986) encontraram para os VCAN no NE do Brasil.



(a)



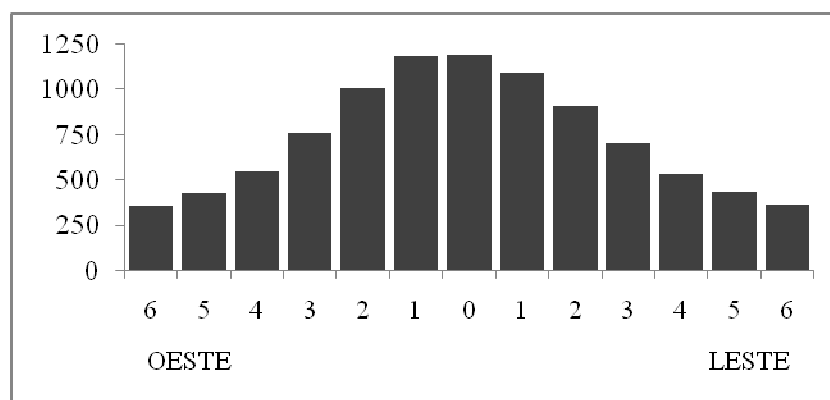
(b)

Figura 4.7 - Número de sistemas associados com desvios negativos de temperatura, para o período de janeiro de 2003 à dezembro de 2006. A distribuição da estimativa de temperatura em relação à posição do MVR varia de (a) 6° N à 10° S sobre o eixo meridional e de (b) 6° W à 6° E sobre o eixo zonal.

De forma análoga, alguns testes foram aplicados para determinar a distribuição de

mínimos de VP sobre o sistema em estudo. Neste caso, a identificação dos sistemas foi feita utilizando os seguintes valores como limiares: -2.0, -3.0 e -5.0 UVP. A quantidade de posições avaliadas sobre cada eixo meridional foi inferior à realizada com a variável temperatura, justamente para evitar em algumas situações a inconveniente identificação de valores típicos encontrados na estratosfera.

Analisando distribuição de mínimos de VP na direção norte-sul, observa-se a presença de um máximo de sistemas (1208) exatamente sobre a posição do MVR (Figura 4.8a). Relação à direção oeste-leste, foi verificado também um maior número de casos próximo a posição do MVR (Figura 4.8b). Estes resultados indicam que os maiores valores (em módulo) de VP distribuíram-se entre 2° N - 2° S e 2° W - 2° E ao longo dos eixos meridional e zonal, respectivamente.



(a)

Figura 4.8 - Número de sistemas associados com valores negativos de VP, para o período de janeiro de 2003 à dezembro de 2006. A distribuição da estimativa de VP em relação à posição do MVR varia de (a) 6° N à 6° S sobre o eixo meridional e de (b) 6° W à 6° E sobre o eixo zonal. (Continua)

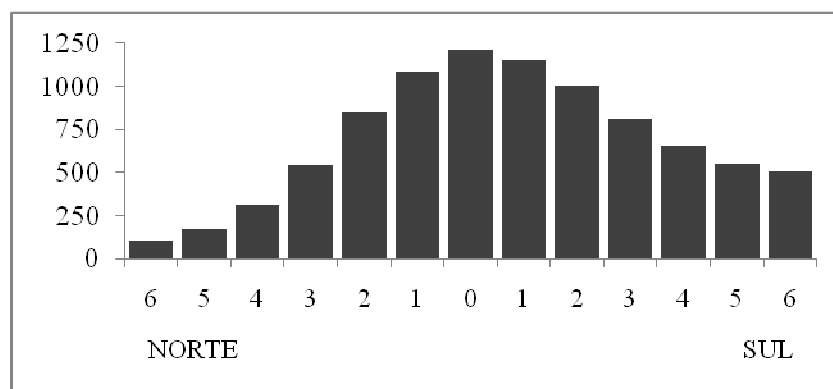


Figura 4.8 (b) - Conclusão

Discutindo o que foi apresentado na metodologia deste trabalho, a etapa final de seleção de um VCAN requer a determinação de um valor e de uma posição para o limiar da CZV. Esta análise se faz necessária para “garantir” que somente centros de circulação fechada sejam selecionados. Para estabelecer o melhor limiar foram realizados alguns testes, inicialmente visando encontrar em que posição geralmente ocorre o menor valor desta variável. Tal procedimento foi realizado aplicando três limiares (-3.0 m/s; -5.0 m/s e -8.0 m/s) em seis diferentes posições ao longo do eixo meridional dos MVR. Na Figura 4.9, pode-se observar que o número máximo de sistemas foi encontrado 4 graus ao sul do MVR, sugerindo que nessa posição ocorra o menor valor da CZV na região dos VCAN. Portanto, as avaliações para determinar o melhor critério (seção 4.2.2) foram conduzidas extraindo o valor da CZV nesta posição.

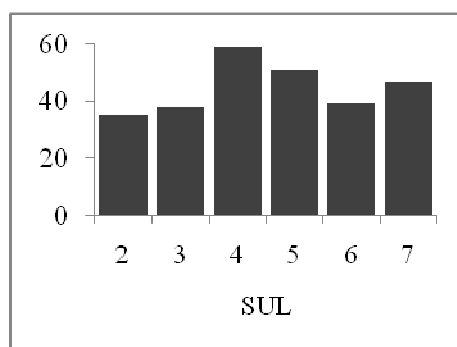


Figura 4.9 - Número de sistemas associados com valores negativos da CZV, para o período de janeiro de 2003 à dezembro de 2006. A distribuição meridional da CZV em relação à posição do MVR varia de 2° S à 7° S.

#### 4.2.2 Validação

A definição de um método para identificação objetiva dos VCAN foi obtida a partir de avaliações que estabeleceram o melhor critério para esta finalidade. Os resultados apresentados na seção anterior auxiliaram esta escolha, pois o limiar para a CZV foi aplicado sobre a posição do valor mínimo.

Utilizando três valores para cada parâmetro, diferentes configurações foram propostas a partir da combinação de limiares, permitindo o estabelecimento de 27 diferentes critérios (Tabela 4.1). Discutindo o que foi proposto anteriormente, a avaliação do *TRACK* foi realizada comparando seus resultados com a AC, possibilitando determinar índices de confiabilidade no rastreamento dos VCAN. A seleção dos VCAN foi obtida considerando apenas os casos que tiveram sua formação e dissipação dentro do domínio escolhido, ou seja, aqueles eventos que não alcançaram 100% do seu ciclo de vida na região de estudo foram descartados desta análise.

Tabela 4.1 - Índices de acerto, erro e confiabilidade para diferentes critérios usando limiares para a temperatura (T), vorticidade potencial (VP) e componente zonal do vento (CZV). A análise foi realizada para o período de janeiro à dezembro de 2003.

Critério	Índice Acerto/ Erro/ Confiabilidade (%)		
	(a) CZV = -3 m/s	(b) CZV = -5 m/s	(c) CZV = -8 m/s
(1) T = -2 °C / VP = -2 UVP	95,83 / 41,67 / 54,16	87,5 / 35,42 / 52,08	77,08 / 18,75 / 58,33
(2) T = -2 °C / VP = -3 UVP	64,58 / 27,08 / 37,50	62,5 / 27,08 / 35,42	56,25 / 27,08 / 47,92
(3) T = -2 °C / VP = -4 UVP	47,92 / 16,67 / 31,25	43,75 / 16,67 / 27,08	39,58 / 6,25 / 33,33
(4) T = -3 °C / VP = -2 UVP	89,58 / 41,67 / 47,91	85,42 / 39,58 / 45,84	79,17 / 14,58 / 64,59
(5) T = -3 °C / VP = -3 UVP	60,42 / 27,08 / 33,33	58,33 / 27,08 / 31,25	52,08 / 20,83 / 31,25
(6) T = -3 °C / VP = -4 UVP	45,83 / 16,67 / 29,16	43,75 / 16,67 / 27,08	39,58 / 6,25 / 33,33
(7) T = -4 °C / VP = -2 UVP	83,33 / 27,08 / 56,25	72,92 / 27,08 / 45,84	54,17 / 10,42 / 43,75
(8) T = -4 °C / VP = -3 UVP	56,25 / 18,75 / 37,50	54,17 / 18,75 / 35,42	47,92 / 6,25 / 41,67
(9) T = -4 °C / VP = -4 UVP	43,75 / 12,50 / 31,25	41,67 / 12,50 / 29,17	37,5 / 6,25 / 31,25

De acordo com os resultados apresentados no item 4.1, a presença de desvios positivos de temperatura sobre a região dos VCAN (extratropicais e subtropicais) foi observada durante todo o período de vida de 23 eventos. Estes casos correspondem aproximadamente 7,1% de todas as ocorrências observadas concomitantemente nas IS e AC, e evidentemente estes não foram identificados pelo *TRACK* devido às suas propriedades térmicas. Dessa forma, este estudo teve como finalidade identificar somente os VCAN associados com massas de ar frio e com significativa intrusão de ar estratosférico próximo do seu núcleo, descartando aqueles que não satisfizeram às condições impostas.

Durante o período de janeiro à dezembro de 2003, o critério de referência identificou 135 casos, sendo que destes apenas 48 foram selecionados como VCAN nas AC. Adicionando a variável CZV, foram determinados 27 critérios, permitindo de forma geral uma melhoria na confiabilidade do rastreamento do sistema em estudo. Avaliando



esses resultados, a configuração que apresentou o melhor desempenho foi o critério 4.c (Temp=-3,0 °C; PV=-2,0 UVP; u=-8,0 m/s), obtendo um índice de confiabilidade de 64,59%.

O melhor critério identificou 45 casos, sendo 38 VCAN e 7 cavados, estabelecendo um índice de acerto e erro de 79,17% e 14,58%, respectivamente. Considerando os 38 VCAN identificados pelo método, em 8 casos o rastreamento foi considerado perfeito e no restante as diferenças ocorreram devido à defasagens no posicionamento (2 casos) e à identificação anterior e/ou posterior ao período de vida observado nas AC (28 casos). Nesta última situação, 6 VCAN foram identificados antes, 7 foram identificados depois e 15 foram identificados antes e depois do seu ciclo de vida.

Embora o critério citado acima ter sido o mais confiável em um contexto geral, algumas configurações apresentaram individualmente melhores índices de acerto ou erro. Por exemplo, o critério 1.a deixou de identificar apenas dois VCAN, obtendo grau de acerto de 95,83%. Em contrapartida, neste mesmo critério 20 casos foram designados como cavados na AC, estabelecendo um confiabilidade final de 54,16%. De forma geral, os menores índices de erro ocorreram nos critérios que utilizaram limiares maiores, compreendendo igualmente os menores índices de acerto.

A análise da destreza do *TRACK* (a partir deste momento referindo-se a apenas o critério 4.c) revela uma melhor representação durante o período de verão, estabelecendo uma confiabilidade de 71,43%, seguido dos períodos de outono (66,67%), inverno (60%) e primavera (55,55%). O método representou perfeitamente todos os VCAN identificados nas AC (através do critério de referência) nos meses de janeiro, março e novembro, atingindo 100% de confiabilidade. De forma contrária, o método mostrou uma habilidade menor para identificar os VCAN que atuaram nos meses de setembro e outubro, obtendo apenas 33% para o índice de confiabilidade.

Apesar dessas avaliações terem sido feitas para um mesmo tipo de rastreamento, ou seja, o limiar da variável VR foi constante e igual a  $-1,0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , algumas simulações

foram realizadas para verificar se a alteração deste limiar induz a alguma melhoria na confiabilidade do rastreamento. Além disso, para auxiliar nesta análise foi avaliada a intensidade média da VR para os casos identificados pelo método proposto, obtendo assim o valor médio de  $-7,2832 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  para os eventos de VCAN e  $-6,2136 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  para os eventos de cavado. Os resultados obtidos sugerem que a intensidade dos sistemas não determina uma boa condição para selecionar os casos de VCAN.

Buscando investigar as principais causas das limitações apresentadas pelo método proposto, realizaram-se algumas análises detalhadas para apurar as circunstâncias que levaram a verificação de erros. A Figura 4.10 mostra um caso que foi identificado pelo método mas que na AC não houve a confirmação de um evento de VCAN. A análise sinótica deste evento mostra a presença de um cavado em 300 hPa bastante amplificado, associado com uma massa de ar contendo altos valores (em módulo) de VP. Nesta situação, um evento típico de VCAN configurou-se totalmente após 48 horas (8 análises de tempo), permitindo observar também o desprendimento de um núcleo de máxima VP do “reservatório estratosférico” (Figura não mostrada).

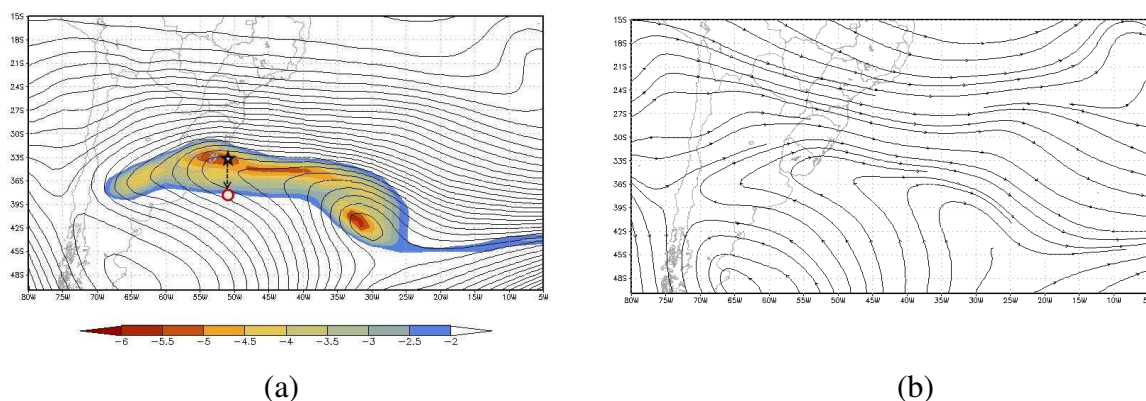


Figura 4.10 - (a) Campo de geopotencial (linhas contínuas) e de vorticidade potencial (hachurado) em UVP para o nível de 300 hPa. O símbolo estrela representa o MVR e o círculo a posição que foi aplicado o limiar para a componente zonal do vento. (b) Linhas de corrente para o mesmo nível. Esta análise é referente às 06 UTC do dia 28 de agosto de 2003.

### 4.3 Comparações entre Imagens de Satélite e Método *TRACK*

Analisando as situações em que o *TRACK* falhou, ou seja, quando não houve a identificação de um centro fechado nas AC, verificou-se que também que não havia a presença do VCAN nas IS. Esse tipo de erro está associado exclusivamente ao *TRACK*. Porém, houve situações em que havia um VCAN nas IS, mas na AC e no *TRACK* não havia esta confirmação, sendo que neste caso o erro deve ser atribuído aos dados de reanálises. Embora os resultados anteriores tenham mostrado diferenças nas avaliações comparativas entre AC x IS e AC x *TRACK*, procurou-se verificar se o método *TRACK* representou algumas das características observadas nas IS. As análises a seguir foram realizadas para o período de janeiro de 2002 à dezembro de 2006.

A curva da distribuição anual do número de VCAN observados nas IS e identificados no *TRACK* (Figura 4.11) mostra em ambas análises um máximo sobre o mês de fevereiro e um mínimo no mês de setembro. Nestes dois meses do ano, a determinação do máximo/mínimo provavelmente foi um reflexo do aumento/diminuição do número de eventos subtropicais durante os meses de fevereiro/setembro. Nota-se que o *TRACK* não representou a frequência mínima de VCAN no mês de junho, tal como foi observada através das IS.

Do ponto de vista sazonal (Tabela 4.2), nota-se que houve semelhanças entre a distribuição do número de VCAN nas IS e no *TRACK*. Nas IS, a maior frequência foi observada no período de verão (28%), seguido do outono (26,8%), inverno (23,6%) e primavera (21,6%). O *TRACK* reproduziu a mesma ordem de frequência, observada nas IS, correspondendo a 30,5%, 26,5%, 22,2% e 20,8%, nos períodos de verão, outono, inverno e primavera.

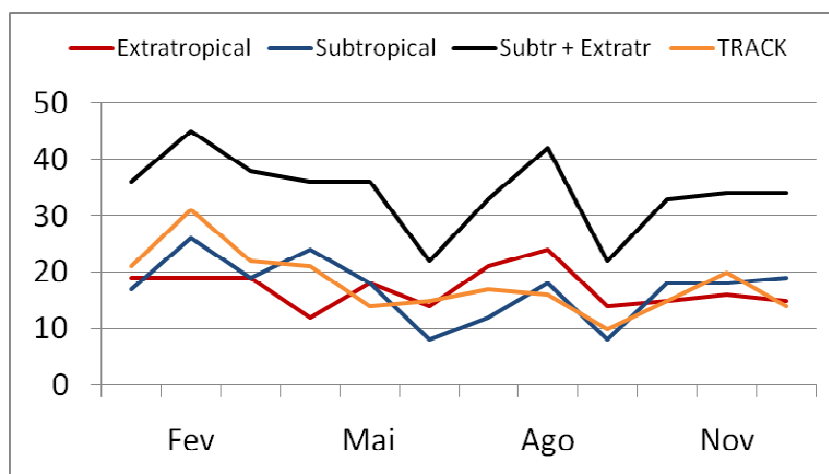


Figura 4.11 - Número de VCAN extratropicais (linha vermelha), subtropicais (linha azul) e total (linha preta) identificados nas IS. A linha laranja mostra o número médio de VCAN identificados pelo *TRACK*. Estas análises compreendem o período entre janeiro de 2002 e dezembro de 2006.

Tabela 4.2 - Porcentagem do número de VCAN identificados em cada período do ano (MAM, JJA, SON, DJF), observados nas IS (total e subtropical) e no método *TRACK*. As análises foram realizadas para o período de janeiro de 2002 à dezembro de 2006.

(%)	MAM	JJA	SON	DJF
IS (Subtr + Extr)	26,8	23,6	21,6	28
IS (Subtr)	29,7	18,6	21,5	30,2
TRACK	26,5	22,2	20,8	30,5

A análise dos VCAN identificados nas IS mostra que usualmente os casos subtropicais estão associados com período de vida maior (Figura 4.12a,b), alcançando em média 3,8 dias e podendo permanecer ativos por até dez dias. A maior parte dos VCAN subtropicais (aproximadamente 53%) apresentam uma duração média que varia de 1 à 3 dias, sendo pouco frequente (menor do que 10%) a ocorrência de eventos com tempo de

vida maior do que seis dias (Figura 4.12b). Os casos subtropicais são mais persistentes nos períodos de outono e verão, verificando-se em março a maior durabilidade (4,7 dias) e a menor nos meses de junho, julho e setembro (3,4 dias).

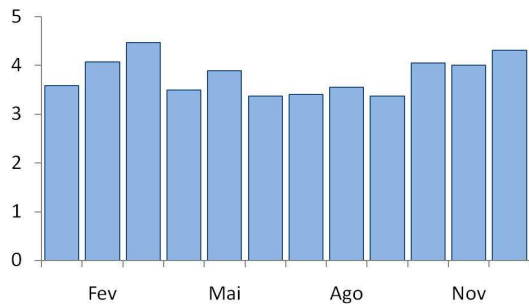
Em relação aos VCAN extratropicais, observa-se que estes apresentaram um período de vida menor em comparação ao tipo anterior, obtendo uma duração média de 1,9 dias e podendo persistir por no máximo sete dias. Analisando a distribuição de frequências para este período, observa-se que ocorreu um predomínio de eventos de curta duração, encontrando na maior parte (50,5%) eventos com duração entre 1 e 2 dias e em mais de 90% dos casos com duração entre 1 e 4 dias (Figura 4.12d). A análise da variabilidade sazonal dos VCAN extratropicais mostrou que o mês de maior duração ocorreu em fevereiro (2,4 dias), enquanto que a menor duração foi observada em julho (1,3 dia).

A análise do *TRACK* confirmou o intervalo de maior frequência para os VCAN com duração entre 1 e 2 dias, embora tenha apresentando uma proporção menor (19,4%) em relação ao índice obtido nas IS. A maior parte dos VCAN identificados pela análise objetiva apresentaram o tempo médio de vida entre 1 e 5 dias, correspondendo aproximadamente 63% de todos os casos (Figura 4.12h). Esta análise permitiu identificar limitações no método ao selecionar sistemas com período de vida muito longo. Em aproximadamente 6% dos casos, observou-se eventos com duração superior a 10 dias e ao longo de dois eventos (1%) o período de atuação foi maior do que 20 dias. As estações do ano que apresentaram VCAN com maior e menor duração foram o verão e inverno, com 5,4 e 3,4 dias, respectivamente (Figura 4.12g). Essa superestimativa está associada ao uso da VR, que identifica os sistemas em um tempo anterior ao início do seu ciclo de vida.

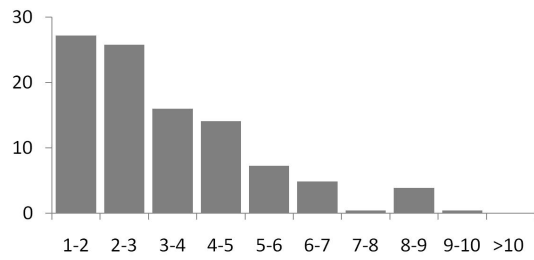
Comparando os resultados do *TRACK* com os casos subtropicais nas IS, observa-se que a análise objetiva superestimou a duração média dos VCAN em alguns períodos do ano, principalmente no mês de janeiro, onde foi observado a maior discrepância (aproximadamente 226%). No entanto, as diferenças encontradas no período de inverno, por exemplo, foram mínimas, representando satisfatoriamente a duração média dos

VCAN nas IS. Ao longo do período de análises, os VCAN identificados pelo *TRACK* obtiveram uma duração média de 4,6 dias, enquanto que os casos identificados nas IS (subtropicais) persistiram em média por 3,8 dias, determinando uma superestimativa 0,8 dia pelo método.

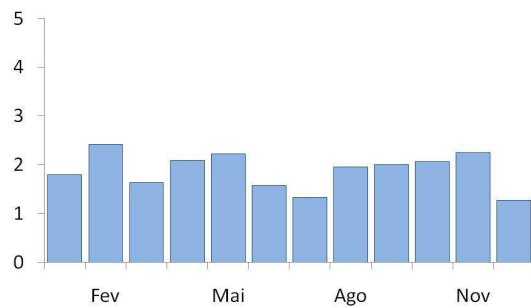
Comparando estes resultados com estudos anteriores, pode-se observar algumas diferenças à respeito da distribuição da duração dos VCAN. De acordo com estudos de Fuenzalida et al. (2005) e Campetella e Possia (2006), a frequência máxima foi observada para os VCAN com duração entre 2 e 3 dias. Considerando a região subtropical do HS, Fuenzalida et al. (2005) encontraram que aproximadamente 30% dos casos detectados pelo método apresentaram período de vida entre 2 e 3 dias, enquanto que apenas 10% do total persistiram por um tempo inferior a dois dias. A mesma comparação não permite ser realizada para o estudo de Campetella e Possia (2006), pois estes consideraram apenas os eventos com duração superior a dois dias. Apesar das diferenças, Campetella e Possia (2006) encontraram que cerca de 90% dos casos observados apresentaram ciclo de vida com duração média de 2 à 3 dias, sendo pouco frequente os VCAN com duração superior à seis dias.



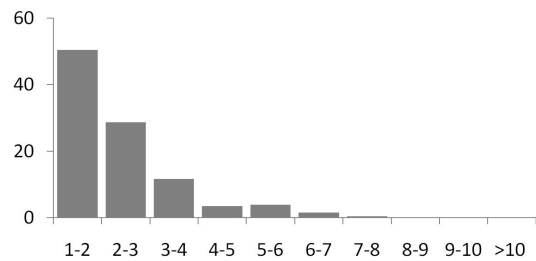
(a)



(b)

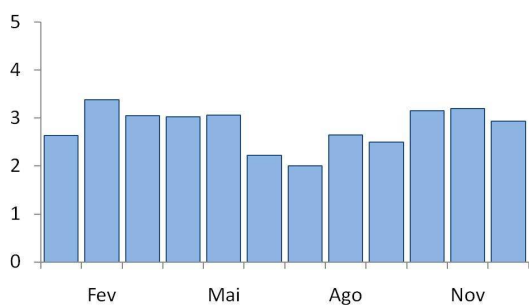


(c)

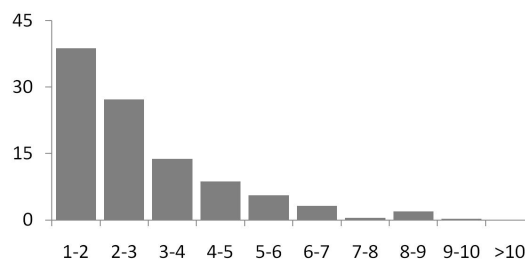


(d)

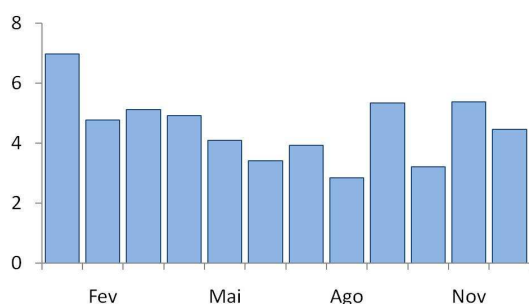
Figura 4.12 - Distribuição mensal do tempo médio de vida (em dias) - lado esquerdo - e distribuição de frequências (em porcentagem) - lado direito - dos VCAN (a-b) Subtropicais; (c-d) Extratropicais; (e-f) Subtropicais e Extratropicais identificados nas IS e dos VCAN identificados através do (g-h) *TRACK*. As análises compreendem o período de janeiro de 2002 à dezembro de 2006. (Continuação)



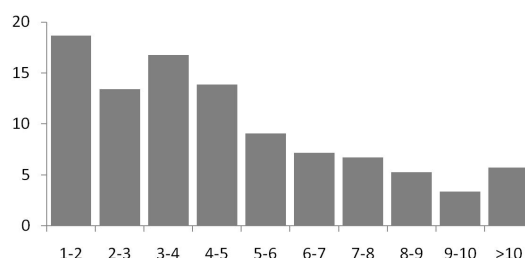
(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 4.12 – Conclusão

As Figuras 4.13 mostram a distribuição das distâncias do deslocamento dos VCAN identificados nas IS e no *TRACK*. Com relação aos casos subtropicais observados nas IS, nota-se que a frequência maior ocorreu para os VCAN com deslocamento máximo entre 1000 e 1500 km, correspondendo aproximadamente 24% de todos os casos (Figura 4.13a). Estes resultados revelam que cerca de 64% dos VCAN deslocaram-se no máximo até 2000 km, sendo que a frequência daqueles com deslocamento inferior a 100 km foi de apenas 2 eventos, correspondendo menos de 1% dos casos. Estes dois casos atuaram ao longo de todo o seu ciclo de vida sobre os Oceanos Atlântico e Pacífico, próximos a latitudes de 33°S-36°S e 37°S-43°S, respectivamente.

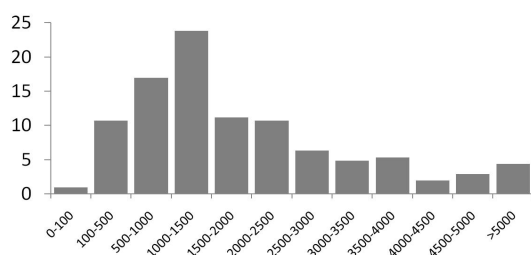
Os VCAN extratropicais apresentaram um comportamento semelhante aos subtropicais,



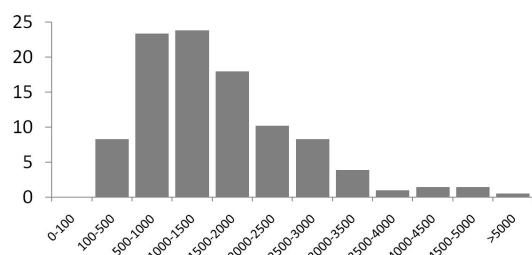
pois aproximadamente 73% destes deslocaram-se até 2000 km (Figura 4.13b). A maior frequência foi observada para trajetórias com distâncias entre 500 e 1500 km, correspondendo praticamente a metade dos casos. A contribuição dos VCAN extratropicais com deslocamento máximo superior a 2000 km foi de aproximadamente ¼ dos casos, sendo que não foi observado nenhum evento com deslocamento inferior a 100 km.

A distribuição do deslocamento máximo da soma dos casos subtropicais e extratropicais mostra a presença de uma curva mais suave, apresentando novamente a predominância de VCAN com deslocamento máximo entre 1000 e 1500 km (Figura 4.13c). A análise de ambos os casos mostra que cerca de 68% dos VCAN (extratropicais e subtropicais) que atuaram nesta região deslocaram-se no máximo até 2000 km de distância.

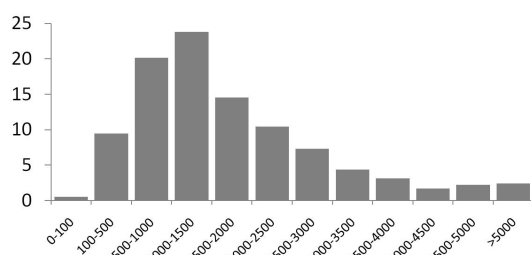
De acordo com o *TRACK*, observa-se que as maiores frequências foram encontradas para os eventos com intervalos de deslocamento entre 1500-2000 km e 2500-3000 km, correspondendo a aproximadamente 15% e 14% dos casos, respectivamente (Figura 4.13d). Fazendo uma analogia com os resultados obtidos através das IS, verificou-se que apenas 47% dos casos observados pelo *TRACK* apresentaram deslocamento máximo de até 2000 km, sendo que a maior parte foi verificado para o intervalo de 1000 à 3000 km. Estes resultados mostram que o *TRACK* superestimou o deslocamentos dos VCAN com relação aos casos identificados nas IS, indicando uma distribuição bastante distinta entre os dois métodos de identificação.



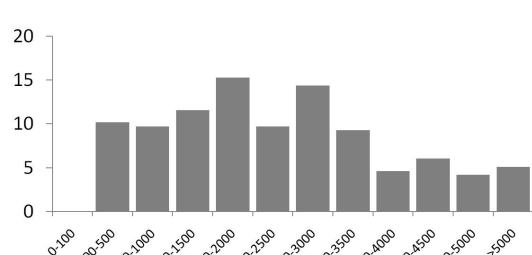
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.13 - Distribuição da distância da trajetória percorrida (km) pelos VCAN (a) subtropicais, (b) extratropicais, (c) subtropicais e extratropicais, identificados nas IS e dos VCAN identificados através do (d) *TRACK*. As análises compreendem o período de janeiro de 2002 à dezembro de 2006.

Os resultados apresentados no item 4.2.1 (Figura 4.7a) foram utilizados para avaliar a habilidade do *TRACK* na identificação do padrão de temperatura dos VCAN. O desvios de temperatura sobre o centro do VCAN foi obtida pelo *TRACK* a partir dos valores extraídos de todos os MVR (todos os pontos ao longo das trajetória do VCAN) e avaliada de três formas: valor sobre a Posição A<sup>2</sup> (2 graus ao sul do MVR), valor mínimo encontrado sobre uma área circular (raio igual a 5° geodésicos e centrado em A) e valor médio sobre a mesma área. A Figura 4.14 mostra o conjunto de desvios médio

<sup>2</sup> Essa posição foi escolhida baseado nos resultados obtidos no item 4.2.1

mensais obtidas através dos campos de temperatura e o número de eventos frios e quentes de acordo com as AC. A quantidade de VCAN nesta figura inclui os eventos subtropicais e extratropicais.

A análise do perfil anual de temperatura através do conjunto de desvios permite identificar a presença de dois máximos, observados durante os meses de fevereiro e julho (Figura 4.14). Comparando esses resultados com a AC, nota-se que o mês de fevereiro apresentou o maior número de eventos frios, porém em julho a presença de eventos com esta característica foi a menor. De acordo com o *TRACK*, os menores desvios foram verificados no mês de outubro, havendo um aumento significativo ao longo do período de verão. As diferenças encontradas para o período de inverno provavelmente devem-se à baixa destreza das AC na identificação dos VCAN nas IS (seção 4.1).

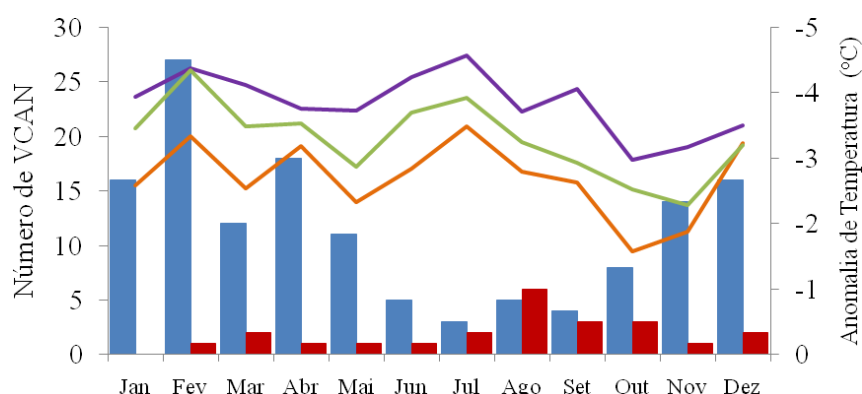


Figura 4.14 - Eixo da direita: Distribuição mensal dos desvios de temperatura sobre a região dos VCAN. A linha laranja representa o valor médio sobre uma área circular, a linha verde mostra o valor sobre a posição A e a linha roxa indica o valor mínimo encontrado sobre a referida área. Eixo da esquerda: As colunas azul e vermelha mostram o número de VCAN frio e quente, respectivamente, identificados nas AC. Ambas análises compreendem o período de janeiro de 2002 à dezembro de 2006.

#### 4.4 Climatologia

Nesta seção serão apresentadas as principais características dos VCAN obtidas pelo *TRACK*, revelando aspectos importantes através de análises temporais. Durante o período de janeiro de 1989 à dezembro de 2008, o método detectou 987 eventos dentro da região de estudo, estabelecendo uma média anual de 49,35 casos. A identificação dos VCAN foi determinada selecionando somente os eventos que tiveram a sua formação e dissipação dentro da região de estudo. Os resultados a seguir mostram as estatísticas de densidade de características, densidade de *tracks*, densidade de formação, densidade de dissipação, taxa média de crescimento/decaimento, tempo médio de vida e velocidade média da componente zonal e meridional dos VCAN.

A Figura 4.15 mostra o número de VCAN identificados pelo *TRACK* ao longo de toda a análise e durante quatro períodos com intervalos de cinco anos em cada um deles. Analisando o período integral, nota-se que as maiores frequências ocorrem durante os meses de fevereiro e março (110 e 102 eventos, respectivamente), enquanto que as menores foram verificadas nos meses de setembro e outubro (62 e 67 eventos, respectivamente). Segundo o resultado apresentado na Figura 4.15a, a distribuição mensal do número de VCAN foi semelhante em cada um dos quatro períodos com cinco anos. Em todos os intervalos, a máxima frequência foi observada nos meses de janeiro ou fevereiro e a mínima em agosto, setembro ou outubro. A Figura 4.15b revela um aumento da média anual de VCAN nos últimos cinco anos (2004-08).

Analisando a variabilidade sazonal para o período todo, nota-se que a maior frequência ocorreu nos meses de verão (287 eventos) e outono (270 eventos), enquanto que as mínimas foram encontradas na primavera e no inverno, apresentando 212 e 218 eventos, respectivamente. Estes resultados confirmam que a estação de outono é um dos períodos de maior ocorrência de VCAN sobre a região de estudo, como observado por Fuenzalida et al. (2005) e Campetella e Possia (2006), porém divergem ao revelar o verão como o período de maior frequência, pois Fuenzalida et al. (2005) observaram a máxima e mínima frequência nas estações de inverno e verão, respectivamente,

enquanto que Campetella e Possia (2006) observaram a maior e menor densidade ao longo do outono e da primavera (Tabela 4.3).

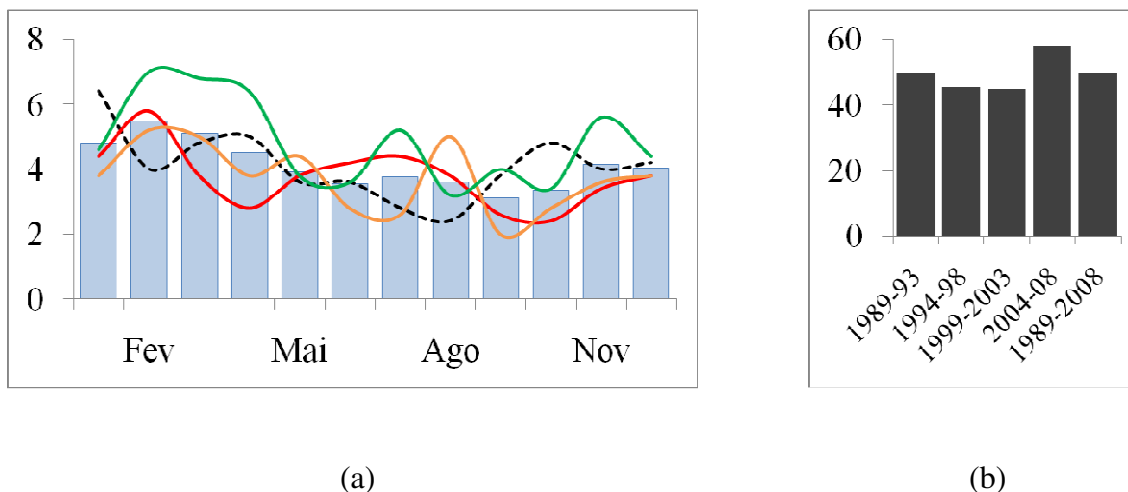


Figura 4.15 - (a) Média mensal do número de VCAN identificados através do TRACK para os seguintes períodos: 1989-2008 (barra azul claro), 1989-1993 (linha preta tracejada), 1994-1998 (linha vermelha), 1999-2003 (linha laranja), 2004-2008 (linha verde). (b) Média anual do número de VCAN identificados em cada período.

Tabela 4.3 - Número e porcentagem de VCAN (entre parênteses) observados no presente estudo e em trabalhos anteriores. As estações do ano representam: março, abril e maio (MAM); junho, julho e agosto (JJA); setembro, outubro e novembro (SON); dezembro, janeiro e fevereiro (DJF).

Trabalhos	Estações do ano				Período
	MAM	JJA	SON	DJF	
<b>Presente estudo</b> 50°S-15°S / 110°W-15°W	270 (27,4%)	218 (22,1%)	212 (21,5%)	287 (29%)	1989 - 2008
<b>Campetella e Possia (2006)</b> 50°S-15°S / 100°W-20°W	54 (31,2%)	42 (24,7%)	38 (22,3%)	37 (21,8%)	1979 - 1988
<b>Fuenzalida et al. (2005)</b> 50°S-10°S / 140°W-0	157 (30,1%)	168 (32,4%)	120 (23,1%)	75 (14,4%)	1969 - 1999

Os campos estatísticos de densidade de *tracks* revelam a presença de uma área com alta frequência de VCAN sobre a porção extremo leste do Oceano Pacífico, localizada próximo à costa oeste da AS. Como pode ser visto nas Figuras 4.16, este comportamento foi reproduzido ao longo do ano todo, ocorrendo com maior frequência nos períodos de verão e outono (Figuras 4.16 a,d), quando climatologicamente os VCAN podem atingir 4 casos em cada uma destas estações. Ao longo do inverno (Figura 4.16b), os VCAN são menos frequentes neste setor (1,5 à 2 casos), enquanto que na primavera a frequência média varia de 2 à 3 casos (Figura 4.16c).

A análise da densidade de *tracks* ainda permite destacar um segundo setor com número significativo de ocorrências, situado sobre a porção sul da região sul do Brasil e regiões vizinhas. Durante o período de outono, este comportamento aparece bastante evidente sobre o sudoeste gaúcho, nordeste da Argentina e noroeste do Uruguai, apresentando uma média de 2,5 à 3 casos (Figura 4.16a). A densidade de VCAN ao longo dos períodos de inverno e primavera é menor sobre este setor (de 1,5 à 2 casos), enquanto que durante o verão é possível notar uma área de máxima frequência (1,5 à 2 casos) sobre o Oceano Atlântico Sudoeste, próximo a costa litorânea do estado do Rio Grande do Sul.

Avaliando ainda os campos de densidade de *tracks*, percebe-se que sobre a região de estudo, os VCAN distribuem-se preferencialmente entre as latitudes de 25°S e 40°S, com maior densidade associada a região continental, tal como foi observado por Fuenzalida et al. (2005). É possível notar um pequeno deslocamento meridional (aproximadamente 5 graus) do núcleo de máxima frequência de VCAN à oeste da costa do Chile. Sugere-se que esta variabilidade esteja associada com a oscilação anual das correntes de Jatos em Altos Níveis, que deslocam-se no sentido do equador no período de inverno e recuam para latitudes mais altas durante o verão.

As estatísticas de densidade de características são mais sensíveis à presença de sistemas com deslocamento lento (HOSKINS e HODGES, 2002), ou seja, os VCAN que propagam-se com velocidade menor sobre uma região contribuem para o aumento desta

densidade. A análise deste campo revela um comportamento semelhante com os campos de densidade de *tracks*, sendo interessante analisá-las em conjunto para evidenciar alguns aspectos.

Durante o verão, observa-se a presença de áreas com significativa densidade de características sobre a porção centro-leste do Oceano Pacífico, apresentando dois máximos aproximadamente sobre as posições  $25^{\circ}$  S/ $103^{\circ}$  W e  $30^{\circ}$  S/ $93^{\circ}$  W (Figura 4.17d). Esse comportamento provavelmente está associado à presença de VCAN semi-estacionários, que eventualmente deslocam-se lentamente, favorecendo o estabelecimento de uma região de alta densidade. Nos meses de verão, os VCAN apresentam uma tendência maior em permanecerem confinados próximo à costa oeste da AS do que nos períodos de outono (Figura 4.17a), inverno (Figura 4.17b) e primavera (Figura 4.17c). Esse comportamento poderá ser justificado ao apresentar as estatísticas de intensidade média, densidade de formação e dissipação dos VCAN.

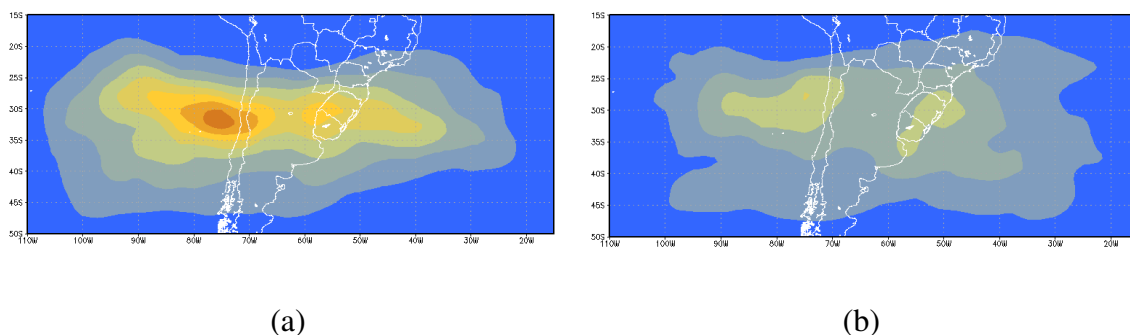


Figura 4.16 - Densidade de *tracks* dos VCAN obtida para o período de março de 1989 à fevereiro de 2009: (a) Outono (MAM), (b) Inverno (JJA), (c) Primavera (SON) e (d) Verão (DJF). (Continuação)

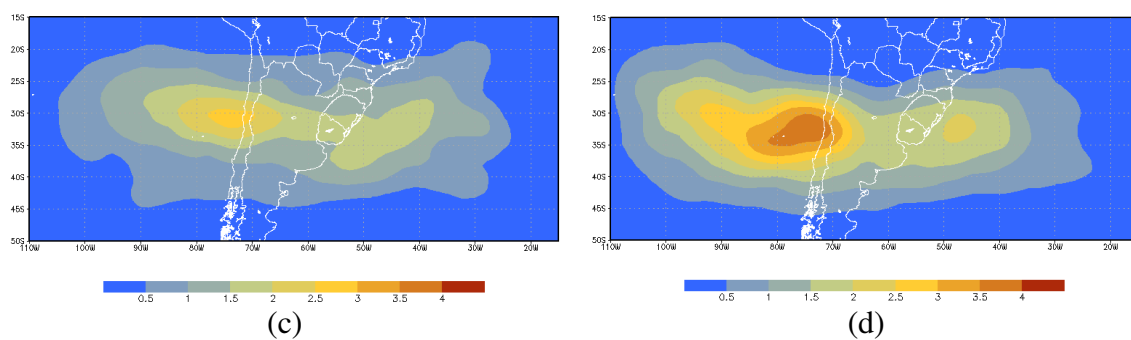


Figura 4.16 - Conclusão

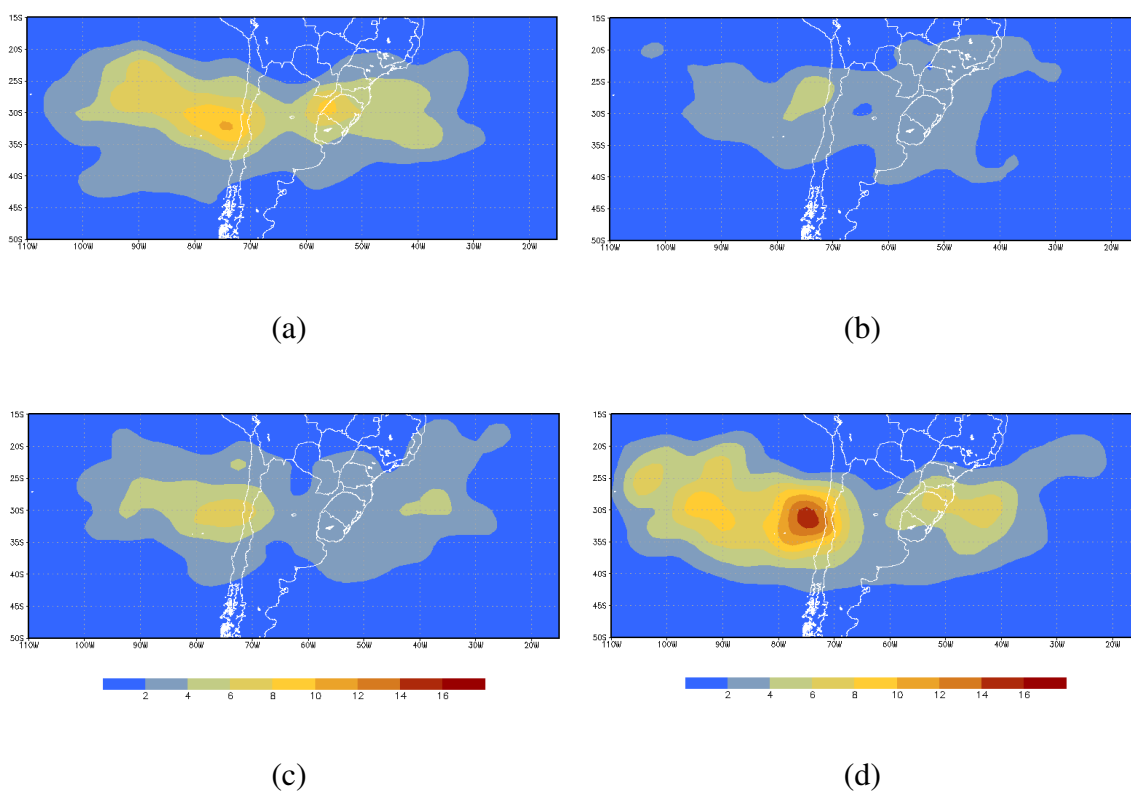


Figura 4.17 - Densidade de características dos VCAN obtida para o período de março de 1989 à fevereiro de 2009: (a) Outono (MAM), (b) Inverno (JJA), (c) Primavera (SON) e (d) Verão (DJF).

As estatísticas de densidade de formação dos VCAN (Figuras 4.18) mostram um



tendência maior da gênese ocorrer sobre o Oceano Pacífico e menor sobre o setor continental. Preferencialmente, a região de maior formação ocorre entre as latitudes de 30°S e 35°S, podendo observar um máximo a uma distância de aproximadamente 2000 km (3000 km), a oeste do continente nos períodos de inverno e verão (outono e primavera). Além disso, com exceção da estação de primavera, nos restante do ano é possível notar uma região de relevante taxa de formação próximo a costa sudoeste do continente sul-americano, situado aproximadamente entre 40°S e 45°S.

Os campos de densidade de dissipação complementam os resultados analisados anteriormente, possibilitando determinar as regiões onde os VCAN costumam se desfragmentar. De acordo com os resultados deste estudo, durante o verão e outono, os VCAN apresentaram uma forte tendência em dissiparem-se ao atingir a Cordilheira dos Andes, tal como pode ser observado nas Figuras 4.19a,d. Por outro lado, nas estações de inverno e primavera, a dissipação dos VCAN ocorreu predominantemente sobre o Oceano Atlântico, com um máximo a sudeste do litoral sul do Brasil. A região preferencial para dissipação dos VCAN provavelmente está associada com a intensidade dos VCAN, como será discutido mais adiante.

A análise deste campo ainda permite identificar uma ampla região favorável a dissipação de VCAN sobre parte do Oceano Atlântico Sul. De acordo com as Figuras 4.19, nota-se a conservação deste comportamento ao longo de todos os períodos do ano, apresentando uma notável variabilidade sazonal. Durante a primavera, observa-se a presença de uma região favorável à dissipação dos VCAN sobre a porção noroeste da região sul, sudoeste da região sudeste e sul da região centro-oeste do Brasil (Figura 4.19c). Num contexto geral, as estatísticas de densidade de formação e dissipação demonstram uma preferência para a gênese dos VCAN ocorrer sobre o Oceano Pacífico e dissipação destes sobre o Oceano Atlântico e porção oeste da AS. Estes resultados sugerem que a presença da Cordilheira dos Andes exerça um papel fundamental no processo de dissipação dos VCAN.

Os resultados deste trabalho concordam com Fuenzalida et al. (2005) que no período de

verão a taxa de formação dos VCAN é maior sobre o Oceano Pacífico e menor sobre a região continental e Oceano Atlântico. No entanto, este estudo apresentou um aumento da densidade de gênese no período de verão sobre o Oceano Pacífico, enquanto que Fuenzalida et al. (2005) encontraram uma redução desta densidade. Sugere-se que esta discordância esteja associada com as diferenças encontradas no número de VCAN nos períodos inverno e verão entre ambos estudos.

Em comparação com a taxa de dissipação, Fuenzalida et al. (2005) e o presente estudo confirmam a maior ocorrência associada à barreira orográfica e ao Oceano Atlântico. Entretanto, no período de verão este estudo indica a maior densidade entre as latitudes de 30°S e 35°S (Figura 4.19d), enquanto que Fuenzalida et al. (2005) observaram duas região favoráveis à dissipação sobre o extremo leste do Oceano Pacífico, uma aproximadamente entre 35°S e 45°S e outra um ligeiramente afastada do continente, entre 45°S e 50°S.

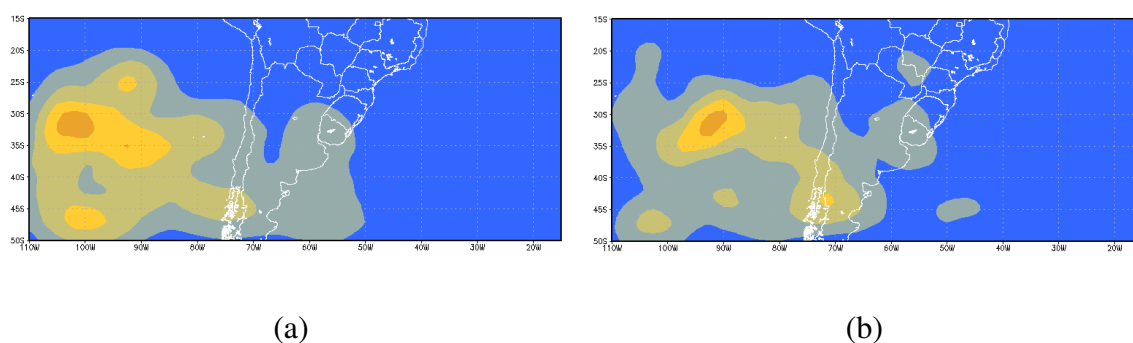


Figura 4.18 - Densidade de gênese dos VCAN obtida para o período de março de 1989 à fevereiro de 2009: (a) Outono (MAM), (b) Inverno (JJA), (c) Primavera (SON) e (d) Verão (DJF). (Continuação)

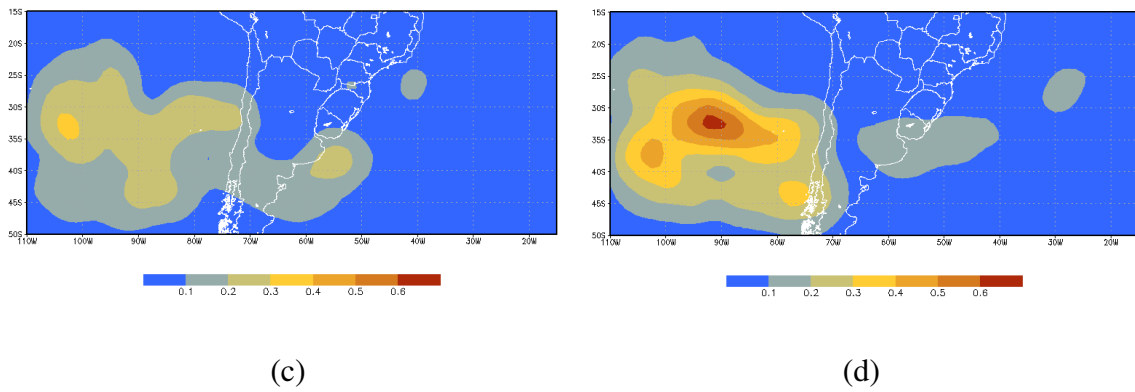


Figura 4.18 - Conclusão

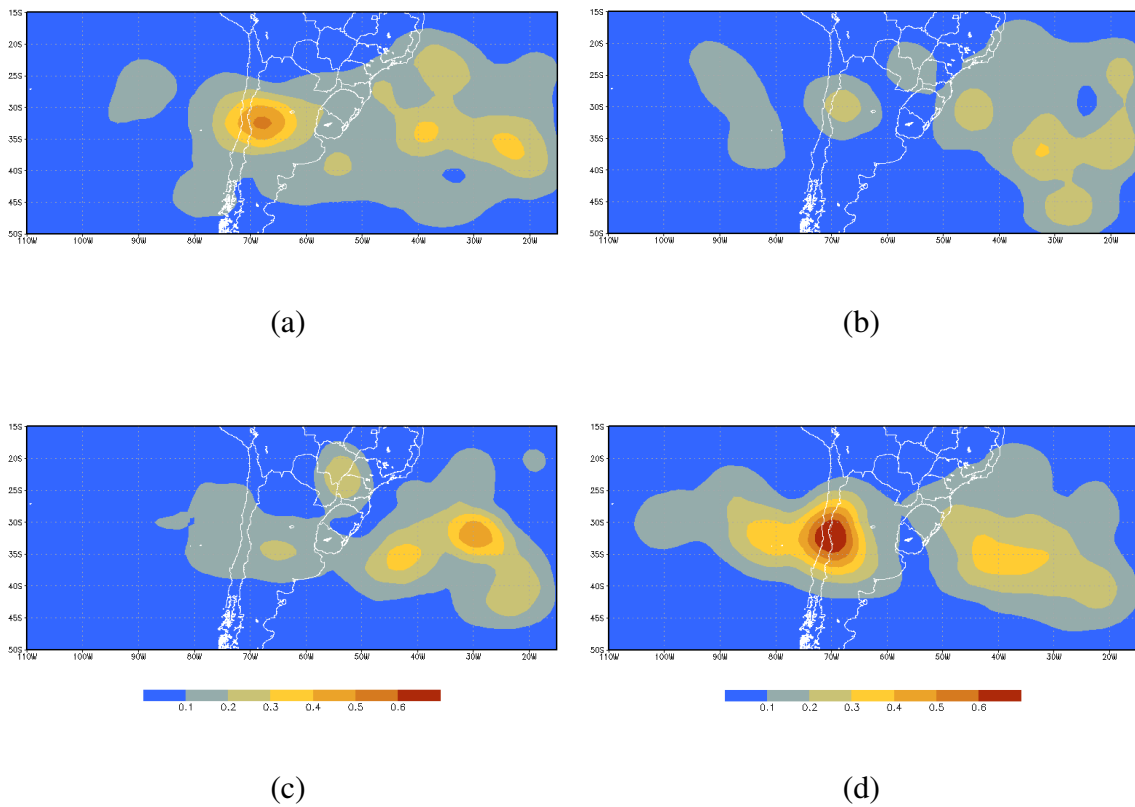


Figura 4.19 - Densidade de dissipação dos VCAN obtida para o período de março de 1989 à fevereiro de 2009: (a) Outono (MAM), (b) Inverno (JJA), (c) Primavera (SON) e (d) Verão (DJF).

A análise da componente zonal da velocidade de média de deslocamento dos VCAN (Figuras 4.20) permite estabelecer dois aspectos importantes que frequentemente afetam o seu deslocamento: latitude e continentalidade. Climatologicamente, os VCAN tendem a deslocar-se de forma mais rápida quando atuam sobre regiões de latitudes maiores, principalmente ao sul de  $40^{\circ}$  S. Nesta faixa de latitude, os VCAN atingem em média valores superiores a 60 km/h sobre parte do Oceano Atlântico e próximo a costa sudoeste da AS, nos períodos de outono e primavera, respectivamente (Figuras 4.20a,c).

Os resultados deste estudo mostram a presença de um contraste nítido entre as características do deslocamento zonal dos VCAN que atuaram sobre regiões continentais e oceânicas, principalmente nos períodos de outono e primavera (Figuras 4.20a,c). Na primavera, a velocidade média de deslocamento dos VCAN sobre o continente (aproximadamente entre  $25^{\circ}$  S e  $40^{\circ}$  S) variou entre 40 e 50 km/h, alcançando valores entre 10 e 30 km/h sobre o Oceano Pacífico e entre 10 e 50 km/h sobre o Oceano Atlântico.

Comparando apenas as duas regiões oceânicas que circundam a AS, observa-se diferenças significativas no deslocamento dos VCAN. Usualmente, os eventos que atuam sobre o Oceano Atlântico deslocam-se de forma mais rápida, sobretudo durante o inverno, quando estes atingem em média valores entre 40 e 60 km/h em latitudes subtropicais (aproximadamente entre  $25^{\circ}$  S e  $35^{\circ}$  S). Por outro lado, os VCAN identificados sobre o Oceano Pacífico apresentam um deslocamento médio relativamente lento, raramente excedendo a velocidade de 30 km/h quando atuam em latitudes entre  $25^{\circ}$  S e  $40^{\circ}$  S. Estes resultados sugerem que a presença da montanha afete a propagação natural dos VCAN, provocando um atraso no seu deslocamento. Esse comportamento fica evidente nos períodos de outono, inverno e primavera, quando observam-se reduções na velocidade de propagação dos VCAN sobre o Oceano Pacífico Leste (Figuras 4.20a-c).

A análise sobre a faixa de máxima frequência dos VCAN (aproximadamente entre  $30^{\circ}$  S e  $35^{\circ}$  S) mostra que a magnitude média do deslocamento destes sistemas variou entre 10

e 50 km/h ao longo de todos os períodos do ano. No estudo de Fuenzalida et al. (2005), foi verificado valores para a componente zonal do vento entre -14 e 50 km/h, prevalecendo os eventos com velocidade de deslocamento entre 14 e 22 km/h. Os valores negativos encontrados em Fuenzalida et al. (2005) provavelmente estão associados aos VCAN que atuaram próximos à Austrália e Nova Zelândia, onde estes eventualmente podem deslocar-se com orientação leste-oeste (MCCRONE, 2002).

As estatísticas da componente meridional do deslocamento dos VCAN mostram um predomínio de movimento com orientação sul-norte na porção sul do Oceano Pacífico Sul e com orientação norte-sul sobre a porção norte deste oceano. Esta característica pode ser observada nos períodos de outono, primavera e verão, com intensificação da componente negativa durante o verão (Figura 4.21d) e da componente positiva durante os períodos de inverno e primavera (Figuras 4.21b,c). Estes resultados induzem a afirmar, que a distribuição da componente meridional da velocidade de deslocamento dos VCAN contribui favoravelmente para o estabelecimento de uma região de máxima frequência de VCAN entre as latitudes de 30° S e 35° S, próximo a costa oeste da AS.

A análise da componente meridional da velocidade indica a ausência de um comportamento uniforme ao longo do ano sobre a região continental e Oceano Atlântico. Durante os meses de outono, inverno e primavera é possível notar a presença de sinais negativos desta componente sobre a região centro-norte da Argentina (Figuras 4.21a-c). Ao longo destes períodos, o comportamento observado através dos campos zonal e meridional da velocidade sugerem que os VCAN, formados no Oceano Pacífico, após ultrapassarem a montanha adquiram preferencialmente um deslocamento no sentido sudeste, deixando de continuar avançando sobre latitudes mais baixas. O comportamento reproduzido pelo *TRACK* concorda com Fuenzalida et al. (2005), que verificaram o predomínio de deslocamento com sentido nordeste à barlavento da montanha e sentido sudeste à sotavento dela. As estatísticas da velocidade de deslocamento zonal dos VCAN apresentaram um comportamento bastante similar à velocidade média dos VCAN, ou seja, a velocidade resultante da componente zonal e meridional (Figura não mostrada).

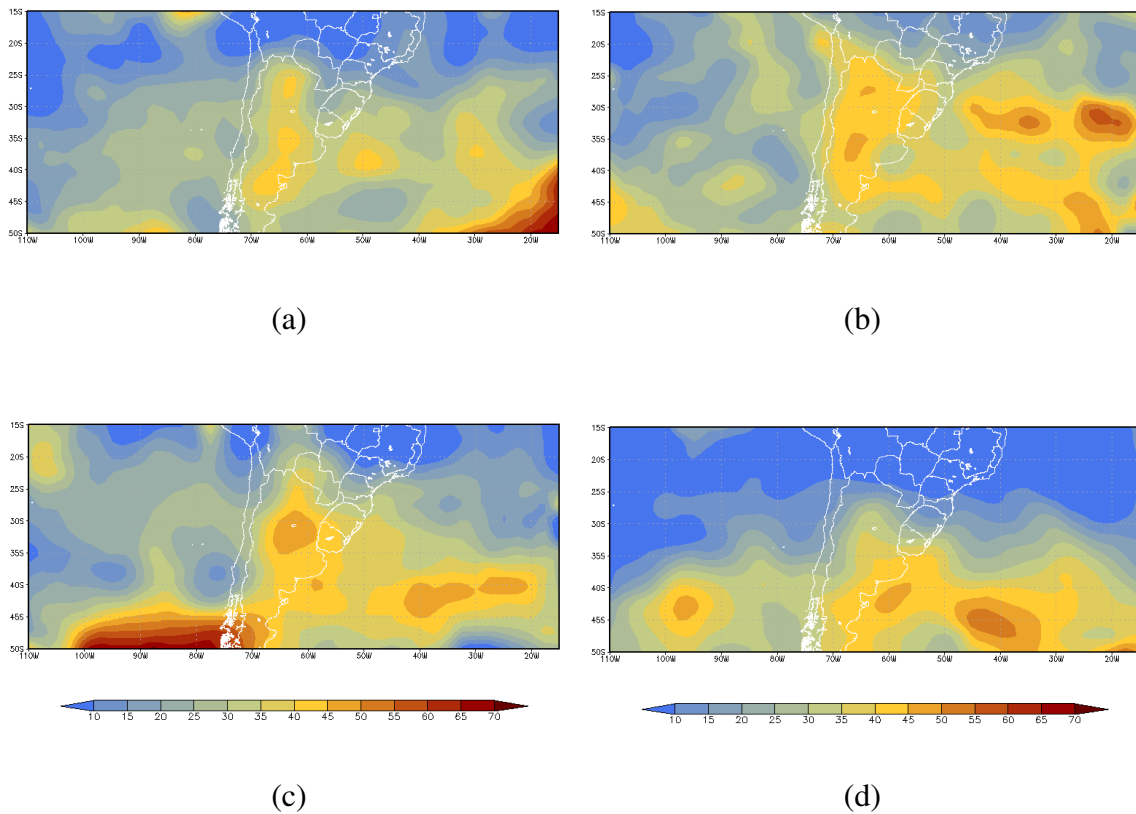


Figura 4.20 - Velocidade média da componente zonal dos VCAN obtida para o período de março de 1989 à fevereiro de 2009: (a) Outono (MAM), (b) Inverno (JJA), (c) Primavera (SON) e (d) Verão (DJF).

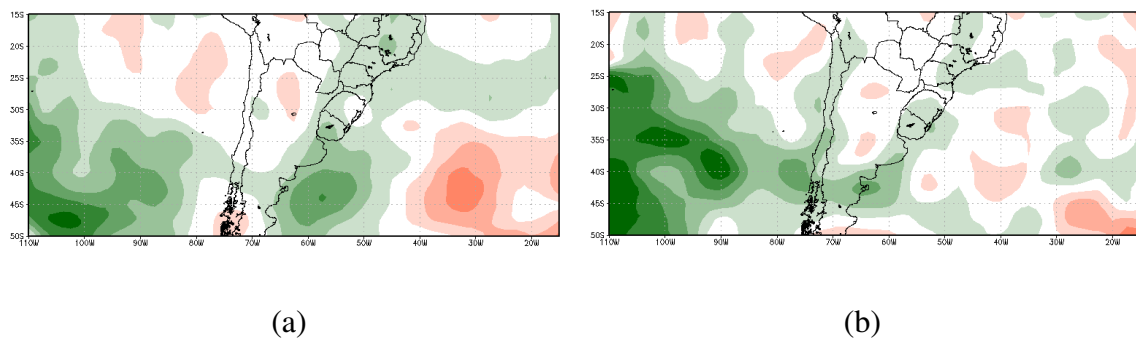


Figura 4.21 - Velocidade média da componente meridional dos VCAN obtida para o período de março de 1989 à fevereiro de 2009: (a) Outono (MAM), (b) Inverno (JJA), (c) Primavera (SON) e (d) Verão (DJF). (Continuação)

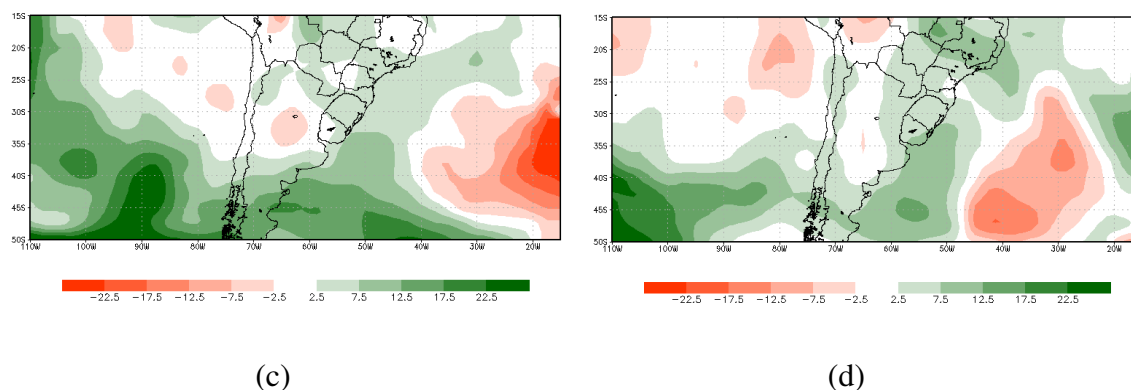


Figura 4.21 – Conclusão

A análise do comportamento da distribuição de intensidades associadas aos VCAN mostra uma significativa variabilidade sazonal entre latitudes subtropicais e médias, estabelecendo em cada estação do ano uma zona preferencial de máxima intensidade dos sistemas. Durante os períodos de inverno e primavera, nota-se a presença de um ampla região com sistemas bastante intensos (intensidade média inferior a  $-9 \cdot 10^{-5} \text{s}^{-1}$ ), entendendo-se desde áreas tropicais sobre o Oceano Pacífico até regiões subtropicais no Oceano Atlântico (Figuras 4.22b,c). Ao longo do inverno, apesar de menos numerosos, a intensidade média dos VCAN é maior em praticamente todos os setores da região de estudo, principalmente a oeste da costa norte do Chile, onde verifica-se um núcleo de máxima intensidade na posição  $22^\circ \text{S}/80^\circ \text{W}$  (MVR inferior a  $-13 \cdot 10^{-5} \text{s}^{-1}$ ).

Durante o verão, nota-se um enfraquecimento dos VCAN em latitudes subtropicais, atingindo no máximo valores entre  $-8$  e  $-9 \cdot 10^{-5} \text{s}^{-1}$  (Figura 4.22a). Nesse período, os VCAN alcançam a sua intensidade máxima ao sul de  $40^\circ \text{S}$  sobre os Oceanos Atlântico e Pacífico. É interessante notar que, em todas as estações do ano, a região a oeste da Cordilheira dos Andes (aproximadamente entre  $20^\circ \text{S}$  e  $35^\circ \text{S}$ ), está associada com um máximo da intensidade dos VCAN.

A avaliação em conjunto dos campos de densidade de característica, densidade de formação/dissipação e intensidade média dos VCAN permite destacar importantes

aspectos. Durante o verão e outono, os VCAN apresentaram uma disposição maior em permanecerem confinados próximos à costa oeste da AS, ocorrendo em muitos casos a dissipação destes sobre a região dos Andes (Figura 4.19d). Sugere-se que o comportamento citado esteja associado com a intensidade dos VCAN, pois ao longo do período entre o verão e o outono, estes sistemas são mais fracos (Figura 4.22d), o que pode dificultar o seu deslocamento entre o lado oeste e leste da montanha. Eventualmente, a intensificação da crista topográfica sobre os Andes, pode contribuir para o enfraquecimento da circulação ciclônica, levando à dissipação dos VCAN nesta região (MIKY FUNATSU ET AL., 2004).

Por outro lado, os VCAN que atuaram no inverno e na primavera, dissiparam-se preferencialmente no Oceano Atlântico, embora em alguns casos a dissipação tenha ocorrido próximo aos Andes. O comportamento dos VCAN nesse período provavelmente está associado com o aumento da sua intensidade média, o que pode contribuir para o deslocamento destes entre o Oceano Pacífico e o lado leste da montanha. Os resultados encontrados neste estudo permitem justificar algumas diferenças observadas entre a distribuição sazonal dos VCAN no presente estudo e em estudos anteriores. Sugere-se que a frequência máxima de VCAN no inverno, observada em Fuenzalida et al (2005), deve-se ao fato de que estes identificaram os sistemas mais intensos, já que a análise foi no nível de 500 hPa. Portanto, os VCAN mais fracos, que atuam com maior frequência no período de verão, provavelmente não foram selecionados na climatologia de Fuenzalida et al. (2005).



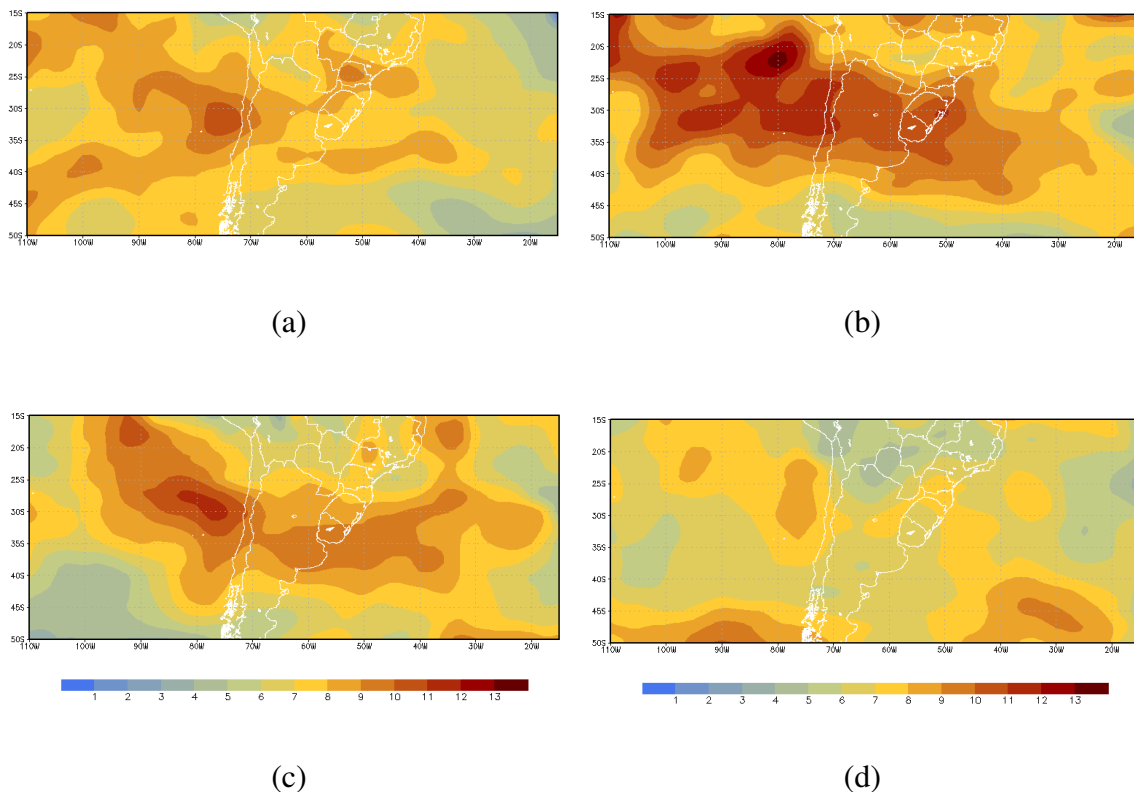


Figura 4.22 - Intensidade média dos VCAN obtido para o período de março de 1989 à fevereiro de 2009: (a) Outono (MAM), (b) Inverno (JJA), (c) Primavera (SON) e (d) Verão (DJF).

A avaliação do tempo médio de vida dos VCAN mostra que geralmente estes eventos são mais persistentes em latitudes subtropicais e baixas, apresentando um ciclo de vida menor quando atuam em latitudes mais altas. No período de inverno (Figura 4.23b), os VCAN apresentam em média um período de vida menor, permanecendo ativos em média entre 5-7 dias sobre latitudes subtropicais (entre 25° S e 35° S) e entre 2 e 5 dias sobre latitudes mais altas (entre 35° S e 50° S). Durante o verão (Figura 4.23d), observa-se um aumento da duração média dos VCAN em praticamente toda a área de estudo, sobretudo no setor sobre o Oceano Pacífico, onde verifica-se sobre algumas regiões um crescimento de 2 à 4 dias na duração destes eventos.

Embora os estudos anteriores não tenham apresentado a distribuição espacial da duração média dos VCAN, pode-se afirmar que as análises deste estudo superestimaram os resultados obtidos por Fuenzalida et al. (2005) e Campetella e Possia (2006). Segundo estes últimos autores, a maior frequência foi observada para VCAN com período de vida entre 2 e 3 dias. Essas diferenças ocorreram devido ao uso da VR, que antecipa o início do ciclo de vida dos sistemas (HOSKINS e HODGES, 2002).

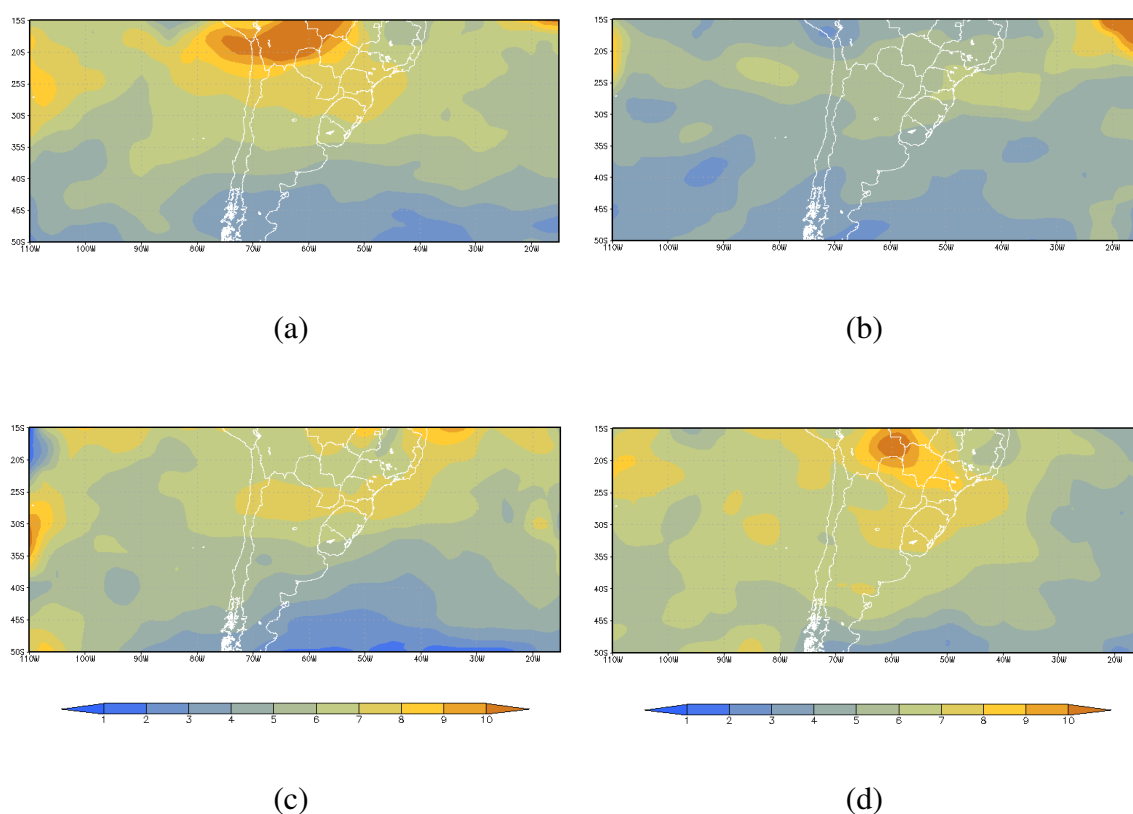


Figura 4.23 - Tempo médio de vida dos VCAN obtido para o período de março de 1989 à fevereiro de 2009: (a) Outono (MAM), (b) Inverno (JJA), (c) Primavera (SON) e (d) Verão (DJF).

As estatísticas da taxa de crescimento/decaimento dos VCAN (Figuras 4.24) auxiliam os resultados obtidos através dos campos de densidade de formação e dissipação, permitindo reafirmar alguns aspectos. Em geral, a distribuição do padrão associado ao desenvolvimento dos VCAN se manteve ao longo do ano, verificando pequenas

alterações no seu comportamento. Nota-se que ao longo de todo o período houve o predomínio de regiões com tendência ao desenvolvimento de VCAN sobre o Oceano Pacífico, particularmente ao sul de 30° S, e com tendência ao enfraquecimento sobre o Oceano Atlântico.

A análise da região continental mostra a presença de altas taxas de decaimento sobre a sua porção oeste, associada com a presença de regiões com superfícies elevadas. Este comportamento pode ser verificado ao longo das quatro estações do ano, apresentando máxima intensidade no período de verão sobre a posição 35° S/68° W (Figura 4.24d). Durante o inverno, o comportamento descrito aparece enfraquecido e uma região de significativa taxa de decaimento pode ser observada sobre a região sul do Brasil, Paraguai e extremo norte da Argentina (Figura 4.24b). Os resultados permitem ainda identificar um setor preferencial para o desenvolvimento dos VCAN próximo ao Golfo de San Matías (Argentina) e sobre a costa sudeste da AS nos períodos de inverno e primavera, respectivamente (Figuras 4.24b,c).

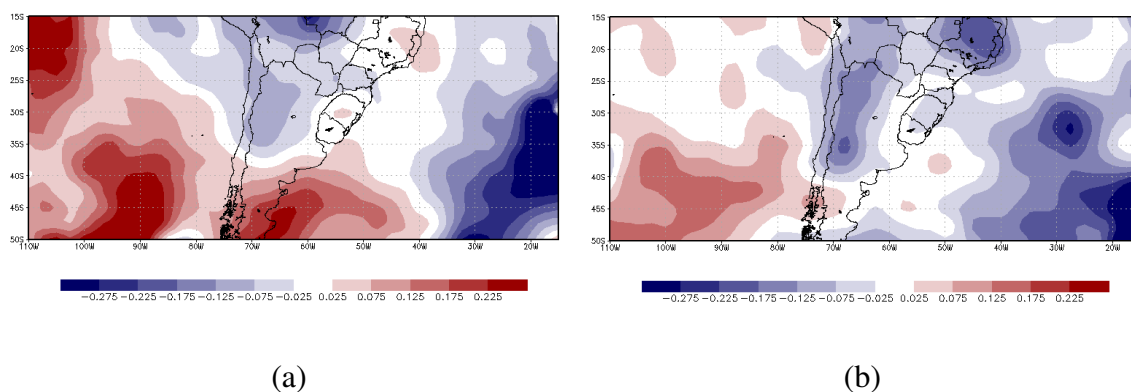


Figura 4.24 - Taxa de crescimento (valores positivos) e decaimento (valores negativos) dos VCAN obtido para o período de março de 1989 à fevereiro de 2009: (a) Outono (MAM), (b) Inverno (JJA), (c) Primavera (SON) e (d) Verão (DJF). (Continuação)

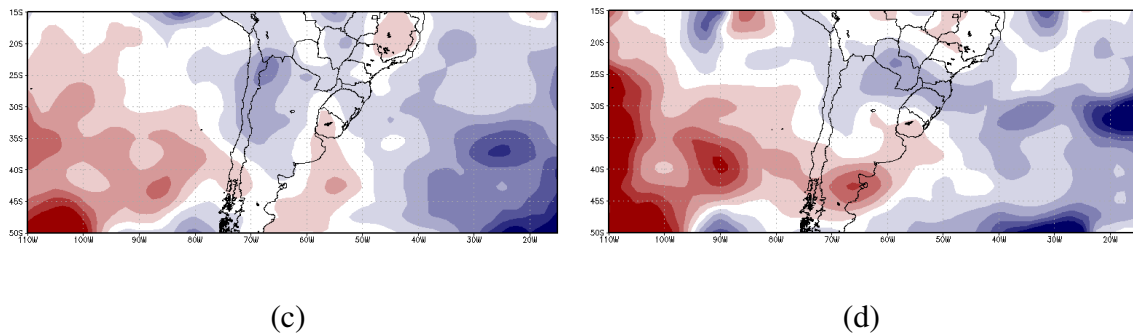


Figura 4.24 - Conclusão

#### 4.4.1 Estatísticas dos VCAN

No ítem anterior, alguns resultados foram apresentados com o propósito de avaliar o comportamento predominante dos VCAN ao longo de um período relativamente extenso, determinando alguns de seus aspectos climatológicos. Nesta seção, as análises tem como finalidade mostrar a variabilidade da distribuição temporal dos VCAN, permitindo determinar aspectos particulares em 5 diferentes regiões geográficas: região 1, região 2, região 3, região 4 e região 5 (Figura 4.25).

O critério utilizado para determinar a região correspondente à presença de cada VCAN foi a posição em que ocorreu a intensidade máxima. Dessa forma, a trajetória de alguns VCAN podem ter percorrido mais de uma região. As análises foram realizadas para o período de janeiro de 1989 à dezembro de 2008.

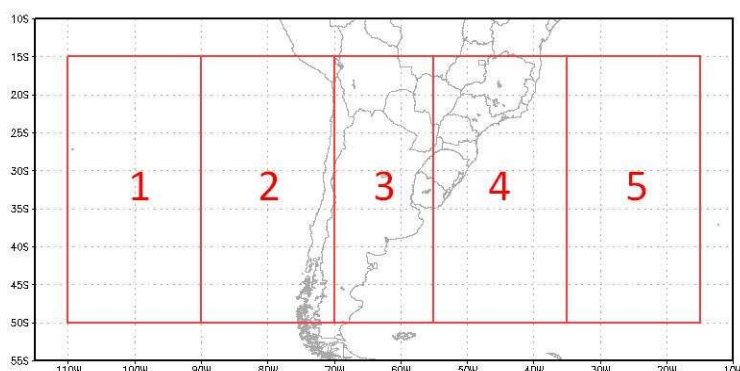


Figura 4.25 - Divisão da área de estudo em cinco regiões: região 1 (110° W - 90° W), região 2 (90° W - 70° W), região 3 (70° W - 55° W), região 4 (55° W - 35° W) e região 5 (35° W - 15° W).

**Região 1 (110° W - 90° W):** Nesta região, localizada totalmente sobre parte do Oceano Pacífico, identificaram-se ao longo do período de 20 anos um total de 209 VCAN, estabelecendo um média anual de aproximadamente 10 eventos. Este setor apresentou a segunda maior variabilidade ao longo do ano, permitindo destacar os meses de dezembro e janeiro como os período de maior densidade de VCAN (30 casos para cada um destes meses, ao longo do período todo). Durante o verão, foram identificados 80 VCAN (4 casos para cada verão), correspondendo a aproximadamente 38% de todos os casos observados neste setor. Entretanto, a frequência dos VCAN foi relativamente baixa durante os períodos de inverno e primavera, determinando outubro como o mês de menor frequência, com apenas 8 casos (0,4 caso/ano).

A análise da intensidade média dos VCAN nesta região mostra um perfil contrário em relação à distribuição destes eventos. Durante o período de inverno, os VCAN são mais intensos, sobretudo no mês de julho, onde estes atingiram uma intensidade média de  $-9,27 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ . Por outro lado, os VCAN são mais fracos ao longo do verão, quando este apresentam uma intensidade média igual a  $-6,40 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ .

Analisando a duração média dos VCAN que atuaram nesta região, percebe-se uma grande variabilidade ao longo do ano. No verão, o tempo de vida médio destes eventos é

de aproximadamente 5,1 dias, sendo janeiro o mês de maior durabilidade (6,1 dias). No período de inverno, os VCAN apresentam uma ciclo de vida relativamente curto, observando no mês de junho a menor duração (2,8 dias).

A análise da distribuição do deslocamento dos VCAN indica que grande parte dos VCAN nesta região deslocam-se entre 500 e 2000 km, o que corresponde aproximadamente 48% dos casos. A Figura 4.28a mostra que nesta região a frequência é máxima para os VCAN com deslocamento entre 500 e 1000 km, decrescendo à medida que a distância percorrida aumenta.

**Região 2 (90° W - 70° W):** Neste setor foi observado a maior frequência de VCAN em relação à região de estudo, apresentando 350 casos ao longo do período de análises e correspondendo a aproximadamente 35,5% de todos os casos identificados pelo método. Esta proporção confirma o resultado encontrado no estudo de Campetella e Possia (2006), verificando que 35% dos VCAN identificados atuaram neste setor. Os resultados obtidos por Fuenzalida et al. (2005) também mostraram um máximo de concentração dos VCAN sobre a mesma área. Com exceção do mês de dezembro, no restante do período esta foi a região que o método identificou a maior contribuição para a densidade dos VCAN, destacando fevereiro como o mês de maior ocorrência (48 casos). Durante o verão e outono, foram identificados aproximadamente 60% dos casos que atuaram nesta região, enquanto que no inverno observou-se a sua menor frequência (18,8% dos casos).

O perfil da intensidade dos VCAN nesta região foi bastante semelhante ao observado através do comportamento médio sobre a região toda (figura não mostrada), apresentando um máximo em julho ( $-10,5 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) e um mínimo em fevereiro ( $-6,6 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ). Este setor além de apresentar a maior densidade de VCAN, também verificou a maior intensidade média anual ( $-8,72 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ), compreendendo assim os sistemas mais intensos.

Os VCAN identificados nesta região também apresentaram o maior ciclo de vida, com

duração média de 4,8 dias. De acordo com a Figura 4.27b, percebe-se que não houve um perfil anual bem definido, podendo verificar os eventos com maior duração nos meses de janeiro, abril, outubro e dezembro (aproximadamente 5,6 dias). Do ponto de vista sazonal, o verão foi o período que apresentou os casos mais persistentes (5,5 dias), enquanto que no inverno observou-se a menor duração (4,2 dias).

Nesta região, os VCAN apresentaram a maior variação do seu deslocamento, pois a maior frequência foi observada para eventos que se deslocaram entre 1500 e 2000 km, enquanto que a menor frequência ocorreu para aqueles com deslocamento entre 4000 e 4500 km, correspondendo a aproximadamente 15% e 6%, respectivamente. Os VCAN identificados neste setor apresentaram também a maior frequência de eventos com deslocamento longo, verificando que aproximadamente 8% dos casos percorreram distâncias acima de 5000 km.

**Região 3 (70° W - 55° W):** Nesta região, localizada sobre a parte centro-oeste do continente sul-americano, observou-se uma baixa densidade dos VCAN, com média de apenas 5,3 casos por ano. A distribuição destes eventos revela um comportamento bastante semelhante ao que foi encontrado por Campetella e Possia (2006), verificando o outono e inverno como os períodos de maior frequência. Os resultados deste estudo confirmam os VCAN identificados ao longo do outono e inverno correspondem a aproximadamente 60% de todos os casos observados neste setor (CAMPETELLA e POSSIA, 2006). Por outro lado, durante o período de primavera e verão, a ocorrência de VCAN é bastante infrequente nesta região, apresentando uma média mensal de aproximadamente 0,3 caso.

A análise da intensidade média mostra que os VCAN nesta região são mais intensos no período de inverno ( $-9,61 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) e mais fracos no período de verão ( $-7,36 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ). No entanto, os eventos que atuaram em dezembro tiveram a segunda maior intensidade, apresentando valor médio de  $-9,85 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , enquanto que no mês junho (mês de maior intensidade) esta média foi igual a  $-9,94 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ .

Uma característica marcante dos VCAN que atuam nesta região é o seu curto ciclo de vida, sobretudo no mês de agosto, quando sua duração média é inferior a 3 dias. No restante do ano, o tempo médio de vida de cada evento oscilou entre 3,0 e 5,4 dias, estabelecendo uma média anual de 4,0 dias.

A análise do deslocamento mostra que a maior frequência foi observada para as trajetórias entre 1000 e 1500 km, correspondendo 18% dos casos. De acordo com a Figura 4.28c, nota-se que a proporção dos VCAN que deslocaram-se entre 100 e 1000 km foi baixa (15%), sendo que a maior parte dos eventos percorreram distâncias entre 1000 e 3000 km (56%).

**Região 4 (55° W - 35° W):** Os VCAN que atuaram sobre esta região apresentaram a menor variabilidade mensal entre todos os setores, verificando praticamente o mesmo número de incidências em todas as estações do ano. A maior frequência dos VCAN foi observada no mês de junho (21 eventos), enquanto que a menor frequência ocorreu em julho (16 eventos).

Analisando apenas a distribuição dos VCAN que atuaram nas regiões 2, 3 e 4, permite-se verificar uma certa concordância com o trabalho de Campetella e Possia (2006). Segundo estes autores, a porcentagem da distribuição dos VCAN identificados nas regiões 2, 3 e 4 foram de aproximadamente 44,1%, 21,3% e 34,6%, respectivamente. Esta proporção é semelhante à encontrada no presente trabalho, pois para os mesmos setores foi verificado 51,9%, 15,7% e 32,4% dos casos (Tabela 4.4).

Considerando ainda os setores 2, 3 e 4, Campetella e Possia (2006) encontraram que a maior frequência de VCAN ocorreu no outono, correspondendo a 31% dos casos. No verão e no inverno, a proporção do número de VCAN foi de 24% em cada uma destas estações, enquanto que a primavera foi o período de menor frequência, com apenas 21% dos casos. No presente estudo, foram verificados resultados semelhantes ao apresentado por Campetella e Possia (2006), indicando o outono como o período de maior frequência (29%), seguido do verão (26%), inverno (23%) e primavera (22%).



Os VCAN identificados na região 4 apresentaram a menor variabilidade da distribuição de intensidades. No mês de outubro foi observado a máxima intensidade ( $-9,37 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ), enquanto que em fevereiro ocorreu o menor valor ( $-6,60 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ).

O período de verão foi caracterizado pela ocorrência de eventos mais persistentes, especialmente em fevereiro, quando os VCAN alcançaram em média 6,2 dias. A partir deste mês, o tempo de vida diminuiu ao longo do ano, apresentando o menor ciclo de vida no inverno (média de 3,9 dias).

Nesta região foi verificada a maior concentração de VCAN com deslocamento entre 500 e 2000 km, correspondendo a mais da metade dos casos (53%). Observou-se também a menor frequência de eventos com deslocamento relativamente curto, ou seja, apenas 5% dos casos apresentaram trajetórias com distâncias entre 100 e 500 km.

Tabela 4.4: Porcentagem dos VCAN identificados nas regiões 2, 3 e 4 no presente estudo e em Campetella e Possia (2006).

Trabalhos	Região 2	Região 3	Região 4
Presente estudo	51,90%	15,70%	32,40%
Campetella e Possia (2006)	44,10%	21,30%	34,60%

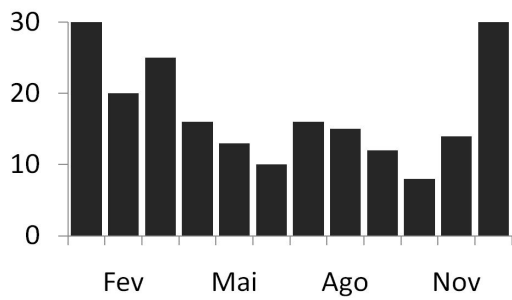
**Região 5 (35° W-15° W):** Neste área, situada sobre uma porção do Oceano Atlântico sudoeste, observou-se a menor ocorrência de VCAN, com um total de apenas 104 casos. Ao longo do ano, os meses de maior frequência foram observados em fevereiro e novembro, com 15 casos cada um, e em janeiro e julho, com 11 casos em cada um destes meses. No restante do período, a frequência média ficou inferior a 9 casos, o que estabelece uma média mensal de aproximadamente 0,4 caso.

Em relação a região toda, este setor apresentou a menor intensidade dos VCAN, com

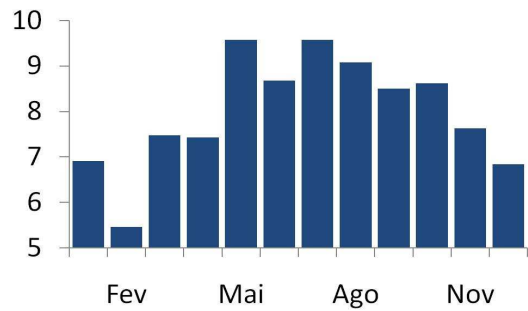
valor médio igual a  $-7,45 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ . De acordo com a Figura 4.25m, nota-se que a intensidade foi mínima no mês de abril ( $-5,31 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) e máxima no mês de maio ( $-9,30 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ). A distribuição dos valores de intensidade determinam o inverno como o período de maior intensidade, enquanto que outono apresenta os eventos de intensidades mais fracas.

Segundo os resultados da análise objetiva, o tempo médio de vida dos VCAN que atuam nesta região é de aproximadamente 4,2 dias, persistindo por mais tempo no período de primavera e apresentando duração menor durante o inverno.

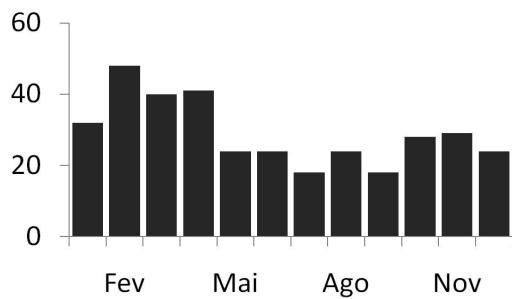
Nesta região, os VCAN deslocaram-se pouco, em comparação com outros setores. O intervalo de deslocamento que apresentou a maior ocorrência de VCAN foi de 500-1000 km, correspondendo a 26 casos (25% dos VCAN identificados na região 5). Uma característica importante observada nos resultados analisados foi a ocorrência de VCAN com deslocamentos menores sobre as regiões oceânicas, como pode-se notar através do perfil da distribuição das trajetórias nas regiões 1 e 5 (Figuras 4.28a,e). De forma contrária, a região que contém a maior proporção de áreas continentais (região 3) apresentou a maior frequência de eventos com deslocamentos relativamente longos, como pode ser visto na Figura 4.28c.



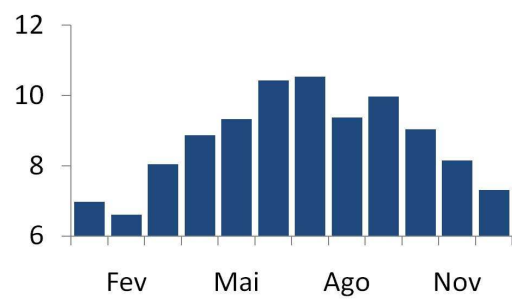
(a) Região 1



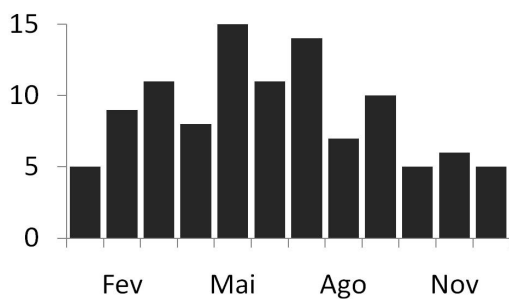
(b) Região 1



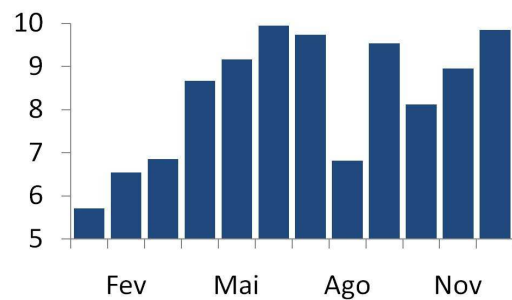
(a) Região 2



(b) Região 2

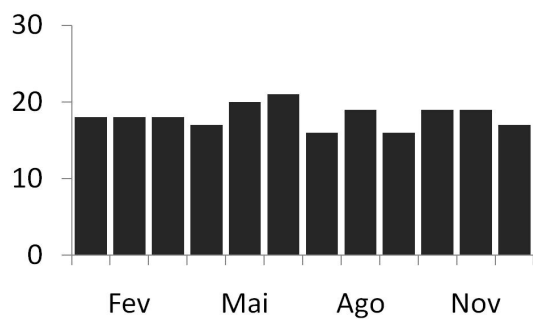


(a) Região 3

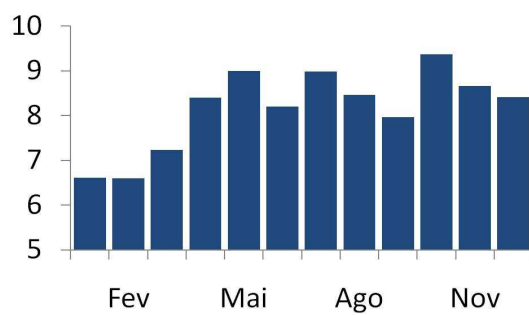


(b) Região 3

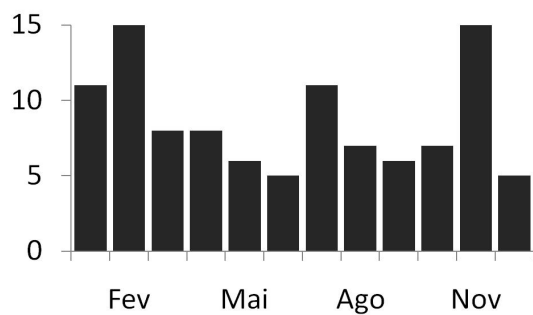
Figura 4.26 - Distribuição mensal do número de VCAN (lado esquerdo) e intensidade média em  $10^{-5} s^{-1}$  (lado direito) para (a,b) região 1, (c-d) região 2, (e-f) região 3, (g-h) região 4, (i-j) e região 5. As análises correspondem ao período de janeiro de 1989 à dezembro de 2008. (Continuação)



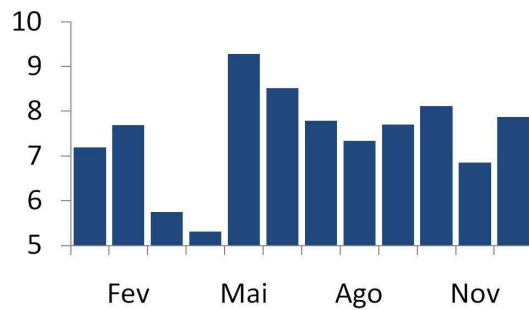
(a) Região 4



(b) Região 4

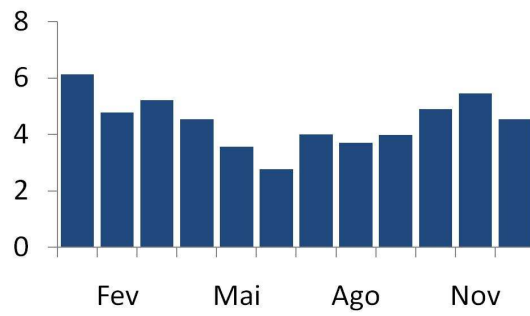


(a) Região 5

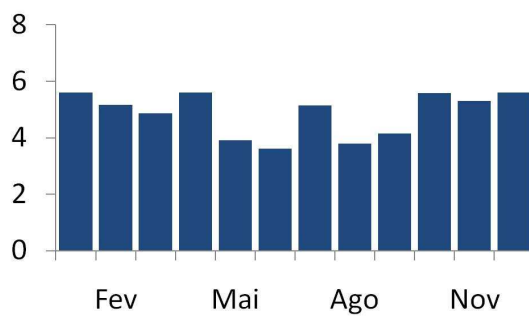


(b) Região 5

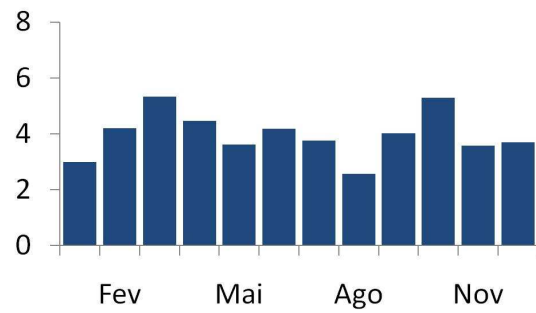
Figura 4.26 - Conclusão



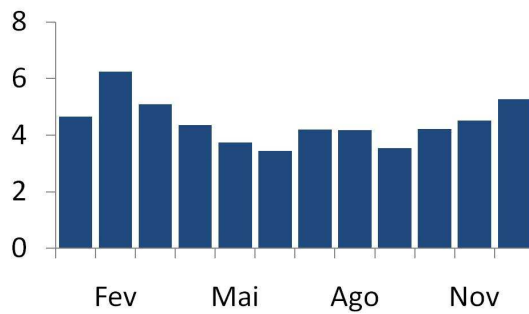
(a) Região 1



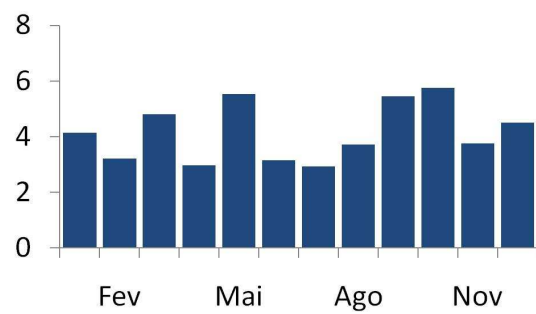
(a) Região 2



(b) Região 3

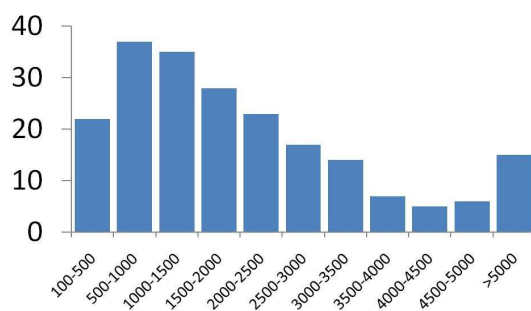


(a) Região 4

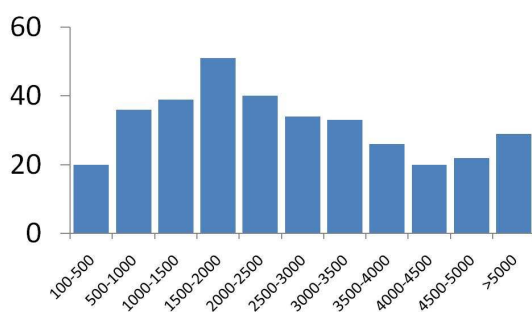


(b) Região 5

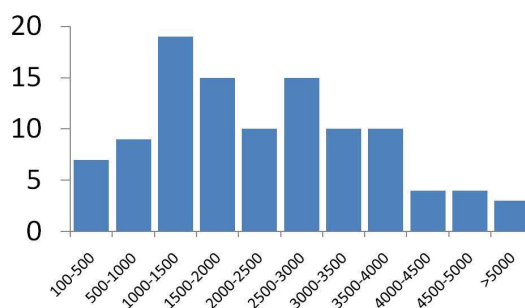
Figura 4.27: Distribuição mensal da duração média dos VCAN (em dias) obtida pelo *TRACK* para (a) região 1, (b) região 2, (c) região 3, (d) região 4 e (e) região 5. As análises correspondem ao período de janeiro de 1989 à dezembro de 2008.



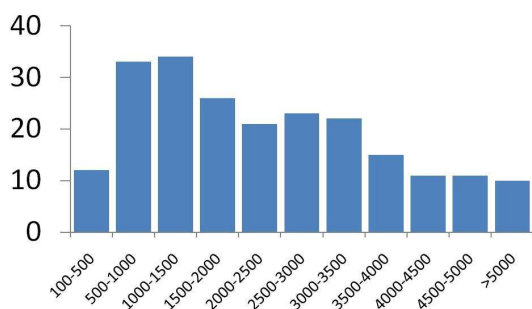
(a) Região 1



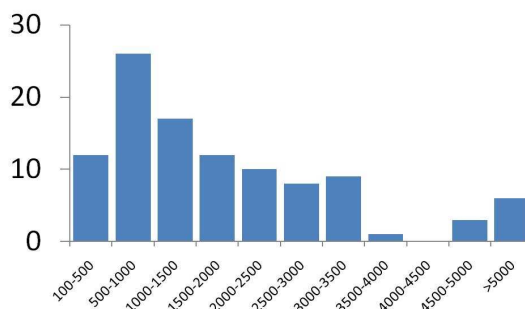
(a) Região 2



(b) Região 3



(a) Região 4



(b) Região 5

Figura 4.28 - Distribuição do deslocamento dos VCAN (em km) obtida pelo *TRACK* para (a) região 1, (b) região 2, (c) região 3, (d) região 4 e (e) região 5. As análises correspondem ao período de janeiro de 1989 à dezembro de 2008.

Os resultados abaixo mostram algumas características da variabilidade interanual dos VCAN, compreendendo o mesmo período (janeiro de 1989 à dezembro de 2008) e domínios (regiões 1, 2, 3, 4 e 5) definidos anteriormente. Nestas análises, algumas comparações foram realizadas entre a primeira década (de 1989 à 1998) e a segunda década (de 1999 à 2008), posteriormente rotulados como primeiro e segundo períodos.

**Região toda:** A análise da distribuição anual dos VCAN mostra uma diminuição de sua frequência a partir de 1990, verificando 60 casos em 1991 e 40 casos no período entre 1994 e 1996. Na segunda metade desta década, houve um aumento gradual da frequência destes eventos, obtendo 63 casos de VCAN no ano de 1999. No estudo de Fuenzalida et al. (2005) foi observado uma distribuição semelhante do número de VCAN na década de 1990, pois verificou-se uma redução significativa entre 1991 e 1995 (de 30 para 18 casos) e um aumento entre 1995 e 1997 (aproximadamente de 18 para 22 casos). É interessante notar que o número de casos observados neste estudo superestimou o resultado obtido por Fuenzalida et al. (2005). Esse fato provavelmente está associado ao nível utilizado por estes últimos autores (500 hPa), promovendo somente a identificação dos sistemas mais intensos, ou seja, cuja circulação ciclônica teve maior extensão vertical. É importante ressaltar também que, a fonte de dados utilizada para cada estudo foi distinta, o que pode determinar em diferenças na análise dos VCAN.

No segundo período houve um aumento da ocorrência de VCAN (8,7%) e da variabilidade interanual. Neste período, o *TRACK* identificou 514 eventos e obteve um desvio padrão de 14,09, enquanto que no primeiro período foram identificados 473 casos, apresentando um desvio padrão de 6,65. Nos últimos cinco anos, observou-se um aumento da frequência de VCAN, correspondendo a aproximadamente 30% de todos os casos identificados. O ano que apresentou a maior frequência foi em 2007, com 72 eventos, enquanto que em 2002 foi observada a mínima frequência, com apenas 18 eventos.

Avaliando os cinco anos que apresentaram forte sinal do fenômeno El Niño (1990,

1991, 1992, 1997 e 1998), observou-se que em três destes o número de VCAN ficou abaixo da média, enquanto que nos outros dois anos foi verificado um aumento da presença dos VCAN. Este resultado está de acordo com o estudo de Fuenzalida et al. (2005), sugerindo que não exista uma tendência entre a fase positiva da Oscilação Sul do Pacífico com a distribuição do número de VCAN na região de estudo.

É interessante notar que a frequência anual dos VCAN ficou acima da média ao longo dos três anos que apresentaram forte sinais do fenômeno La Niña (1989, 2007 e 2008). Durante o último episódio (2007/2008), verificou-se as duas maiores ocorrências de VCAN do período de análises, correspondendo a um aumento em relação à média de 46% e 32% em 2007 e 2008, respectivamente. Embora o presente trabalho não tenha tido o propósito de investigar a relação entre o sinal da Oscilação Sul do Pacífico e a frequência média dos VCAN, os resultados deste estudo mostraram que a presença da La Niña pode contribuir positivamente para o aumento da frequência de VCAN, principalmente na região 4, onde o aumento foi de 47%, 38% e 83% nos anos de 1989, 2007 e 2008 (Figura 4.29i).

Os resultados deste estudo mostram que os VCAN identificados pelo *TRACK* apresentaram uma pequena diminuição de 2,7% da sua intensidade média durante o segundo período. Nota-se que os anos com maiores intensidades ocorreram em 1991 e 1995, com valores médio iguais a  $-8,70 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  e  $-8,74 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , respectivamente, enquanto que as menores intensidades foram encontradas para os anos de 1996 e 2002, apresentando valores iguais a  $-6,91 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  e  $-6,42 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , respectivamente. Para a região toda, pode-se afirmar que não houve uma relação entre a quantidade e a intensidade dos VCAN, com exceção do ano de 2002, onde foi verificado a menor frequência e intensidade destes eventos.

**Região 1:** Este foi o único setor que apresentou uma redução do número de VCAN entre o primeiro e segundo período. Durante os primeiros dez anos foram identificados 121 casos, enquanto que no segundo período a quantidade de VCAN observada foi de 88, estabelecendo uma diminuição de 27,3%. A menor frequência foi observada para o



período entre 2000 e 2006, correspondendo a apenas 24% do total. O ano que ocorreu a mínima frequência foi em 2000 (4 eventos), enquanto que as maiores frequências foram encontradas em 1990 e 2007 (19 e 18 eventos, respectivamente).

Analisando a distribuição da intensidade média dos VCAN, observou-se que não houve diferenças significativas entre o primeiro e segundo período de análises, embora seja possível notar um acentuada queda no ano de 2001 (média de  $-6,18 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) e um progressivo aumento até o ano de 2007 (média de  $-8,16 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ). A maior intensidade média dos VCAN ocorreu em 1991 ( $-8,93 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) e a menor em 2001.

**Região 2:** De acordo com o que foi mencionado anteriormente, o *TRACK* identificou o maior número de VCAN sobre este setor, detectando 350 eventos ao longo do período de 20 anos. Os resultados atuais mostram que nesta área houve também a maior da variabilidade interanual dos VCAN, determinando um desvio padrão de 5,73, enquanto que nas regiões restantes a média desta estatística foi de 3,32. A análise da distribuição do número de VCAN revela um aumento de 34 casos no segundo período, o que determinou um acréscimo de 21,5% dos casos identificados na primeira década de análises.

Apesar do notável aumento no número de VCAN entre os dois períodos citados, aparentemente não houve uma preferência na determinação de um período de máxima e mínima frequência. De acordo com a Figura 4.29e, a distribuição do número de VCAN mostra que as menores ocorrências foram verificadas nos anos de 1989 e 2002 (8 eventos), enquanto que as maiores frequências ocorreram em 1999 e 2007 (27 eventos). Comparando a distribuição dos VCAN que atuaram nesta área com a distribuição daqueles que foram identificados na região toda, pode-se notar que houve uma semelhança entre a curva de cada perfil, como pode ser observado nas Figuras 4.29a,e.

A variabilidade interanual da intensidade nesta região também foi a maior entre todos os setores. A intensidade média praticamente não alterou em relação aos valores obtidos entre o primeiro e segundo período, porém ao longo do segundo período houve um

alternância maior da sua intensidade média anual. De acordo com a Figura 4.29f, percebe-se que as maiores intensidades ocorreram nos anos de 2001 e 2004 ( $-9,73 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  e  $-9,56 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , respectivamente) apresentando entre estes períodos dois anos com mínima intensidade ( $-6,74 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  e  $-6,81 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , respectivamente).

**Região 3:** Este setor apresentou uma baixa densidade de VCAN e a menor variabilidade interanual entre todas as regiões (Figura 4.29g). Tipicamente, observa-se em média a presença de apenas 5,3 casos por ano, sendo que a maior frequência foi de 10 eventos em 2001 e a menor ocorreu no ano seguinte, verificando apenas dois casos. Comparando os perfis da distribuição do número de VCAN nas regiões 2 e 3, nota-se uma certa semelhança, pois ambos setores apresentaram uma redução na metade da década de 1990 e uma aumento da oscilação da variabilidade anual a partir do segundo período de análises.

Do ponto de vista da intensidade (Figura 4.29h), foi verificado uma redução de aproximadamente 6% (a maior entre todos os setores) entre o primeiro e segundo período, principalmente devido a uma queda na intensidade média dos VCAN durante o ano de 2002. É interessante notar que os VCAN que atuaram nesta região apresentaram a segunda maior intensidade média anual, observada em 1995 ( $-10,45 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ). Entretanto, os eventos que ocorrem em 2002 tiveram a menor intensidade, atingindo apenas  $-3,10 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ .

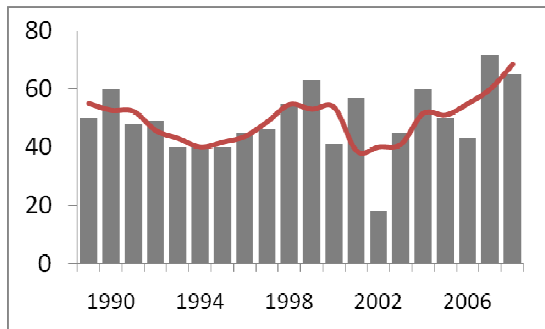
**Região 4:** A análise da distribuição do número de VCAN nesta região mostra que houve um aumento de 18% no segundo período, variando de 100 para 118 casos (Figura 4.29i). Este aumento pode ser facilmente observado a partir do ano de 2002, quando o número de VCAN subiu de 2 para 20 casos em 2008. Considerando apenas os últimos cinco anos, o *TRACK* identificou 79 eventos, o que corresponde a quase 30% de todos os casos.

De acordo com a Figura 4.29j, nota-se que os VCAN identificados no segundo período de análises apresentaram um redução da sua intensidade média de aproximadamente

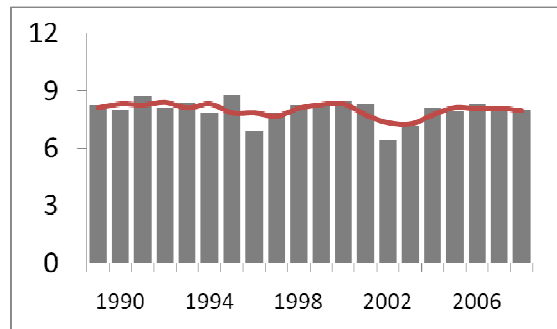
3,5%, sendo que em geral não houve uma tendência marcante em relação ao crescimento ou diminuição da intensidade ao longo dos anos. Os VCAN que atuaram nesta área apresentaram maiores intensidades em 1989 e 2006 ( $-9,51 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  e  $-9,40 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , respectivamente), enquanto que o mínimo valor ocorreu em 2007 ( $-7,10 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ).

**Região 5:** Nesta região foi observado o maior aumento do número de VCAN entre o primeiro e segundo período, variando de 42 para 62 eventos, o que determina um acréscimo de 47,6% (Figura 4.29l). Embora este setor tenha apresentado a menor frequência de VCAN, com uma média de apenas 5,2 casos por ano, houve períodos cuja frequência de ocorrência foi maior, como por exemplo em 2004, quando foram observados 14 eventos. Na maior parte do período, a frequência anual dos VCAN foi igual ou inferior a 5 casos e apenas durante um único ano esta frequência foi superior a 10 eventos.

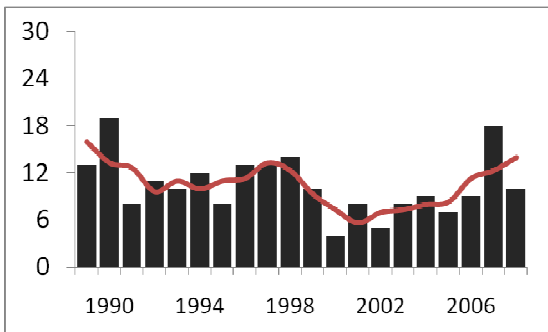
O resultado da distribuição de intensidades mostra que não houve uma tendência ao longo do período, sendo observada a maior intensidade em 2005, com um valor igual a  $-10,51 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  e a menor em 1999, com  $-6,26 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  (Figura 4.29m). É interessante notar que embora os eventos identificados nesta região tenham apresentado a menor intensidade média ao longo dos 20 anos, a maior intensidade anual foi verificada neste setor, durante o ano de 2005, com um valor igual a  $-10,51 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ .



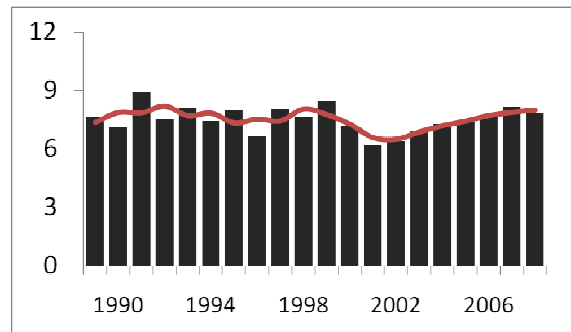
(a) Região toda



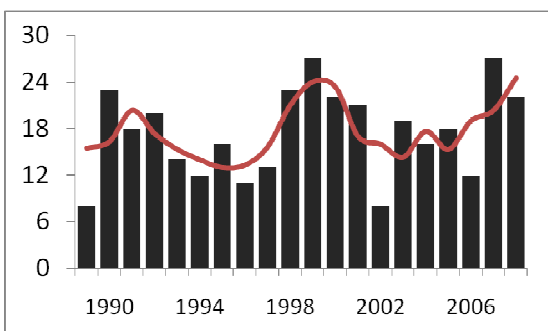
(b) Região toda



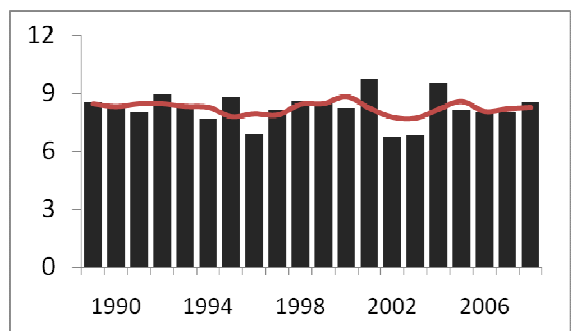
(c) Região 1



(d) Região 1

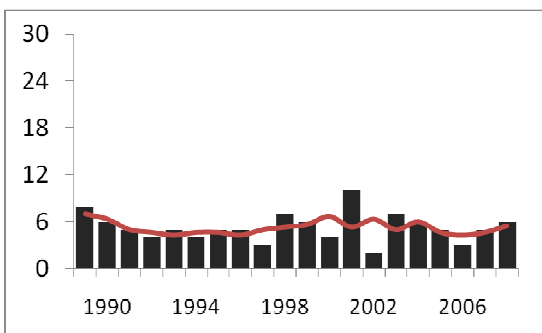


(e) Região 2

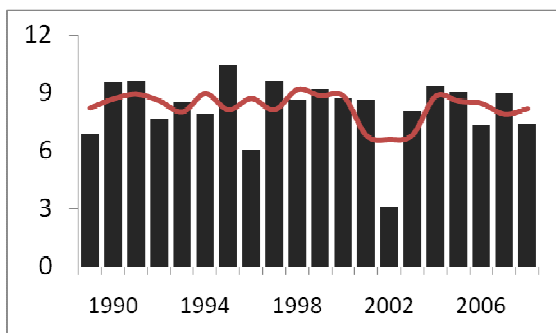


(f) Região 2

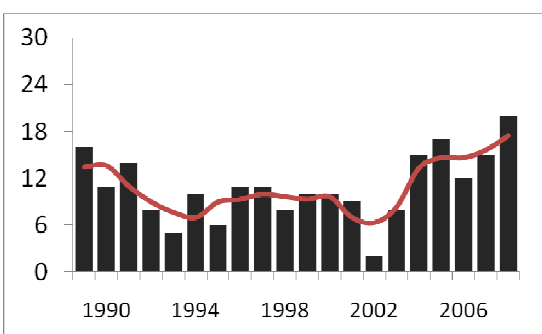
Figura 4.29 - Distribuição anual da quantidade (lado esquerdo) e intensidade média em  $-1 \cdot 10^{-5} \text{s}^{-1}$  (lado direito) dos VCAN identificados pelo *TRACK* entre janeiro de 1989 à dezembro de 2008. A linha vermelha representa uma média de três anos. (Continuação)



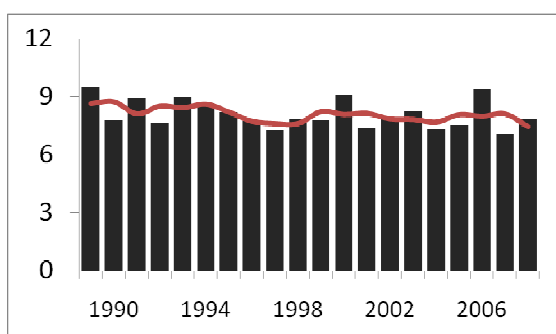
(g) Região 3



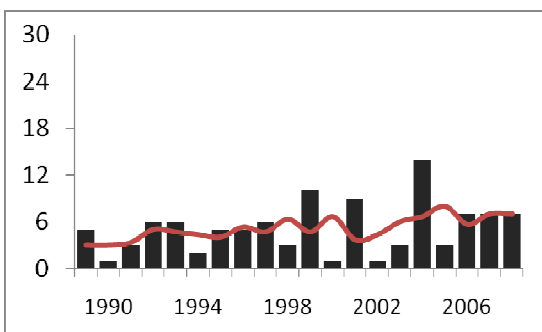
(h) Região 3



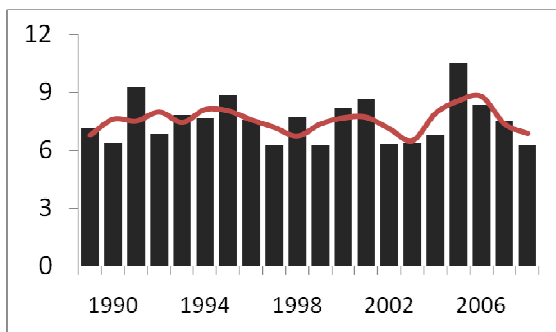
(i) Região 4



(j) Região 4



(l) Região 5



(m) Região 5

Figura 4.29 - Conclusão

Os resultados anteriores mostraram que entre a primeira e segunda década houve um aumento de 8,7% do número de VCAN na região de estudo. Apesar deste valor não ter

sido tão expressivo, particularmente sobre algumas áreas foi verificado um aumento bastante significativo, com destaque para região próxima a costa oeste do continente sul-americano (Figuras 4.30a-h). Neste setor, foi observado um aumento do número de VCAN ao longo de todos os períodos do ano, principalmente durante o outono, quando a sua frequência média oscilou de 3,0-3,5 para 5,0-5,5 casos por estação (Figuras 4.30a,b).

A porção leste da AS, aproximadamente entre a região sul do Brasil, Uruguai e nordeste da Argentina também apresentou um aumento no número de VCAN na segunda metade do período de análises. Este aumento foi mais relevante no período de outono (Figuras 4.30a,b) sobre a região continental e no restante do período sobre a faixa litorânea da região sul do Brasil e oceano adjacente (Figuras 4.30c-h). De forma geral, estes resultados permitem identificar um aumento em praticamente toda zona de máxima frequência de VCAN, que se estende desde a porção leste do Oceano Pacífico até a costa leste da AS, aproximadamente entre as latitudes de 25° S-35° S.

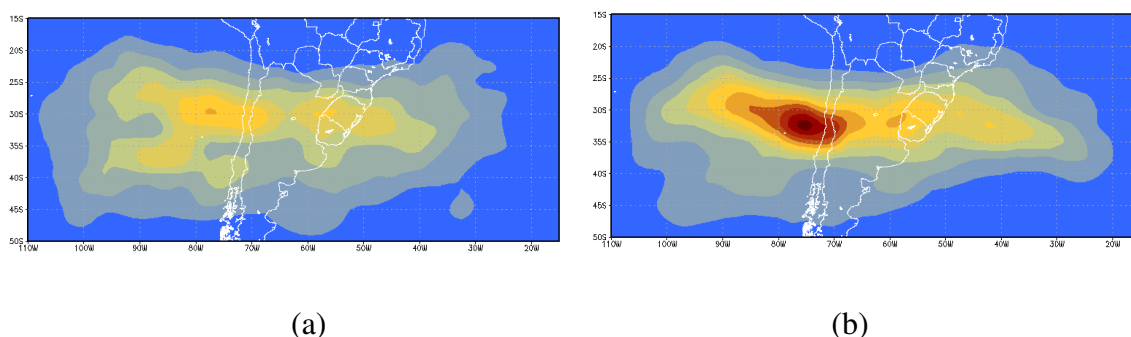
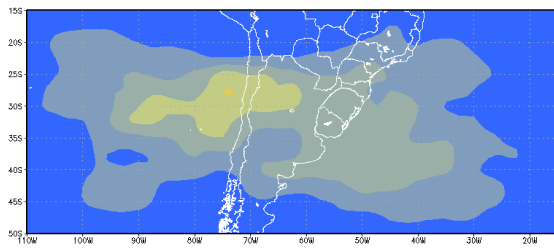
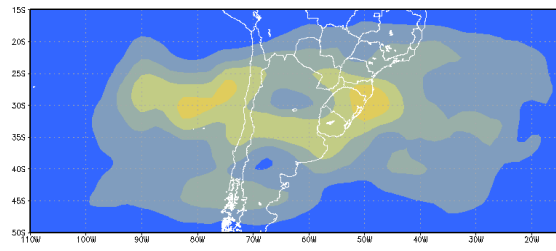


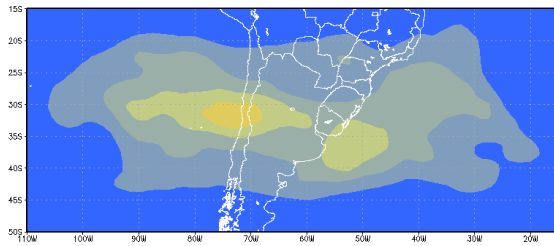
Figura 4.30 - Densidade de *tracks* dos VCAN obtida para o período de março de 1989 à fevereiro de 1999 (lado esquerdo) e de março de 1999 à fevereiro de 2009 (lado direito): (a,b) Outono (MAM), (c,d) Inverno (JJA), (e,f) Primavera (SON) e (g,h) Verão (DJF). (Continuação)



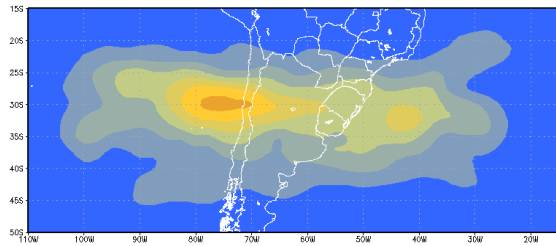
(c)



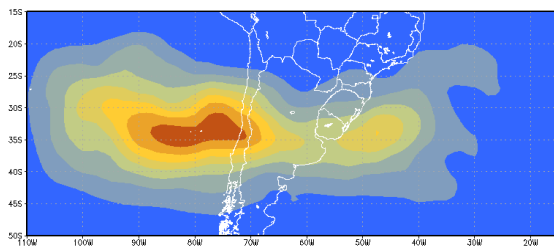
(d)



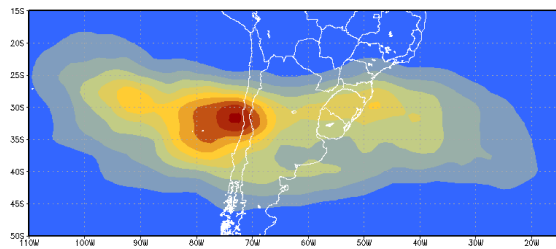
(e)



(f)



(g)



(h)

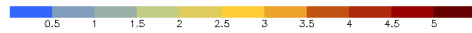


Figura 4.30 - Conclusão





## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

Este estudo apresentou a aplicação de uma nova metodologia para identificação automática dos VCAN, que atuaram sobre latitudes subtropicais na AS, a partir da utilização do método conhecido como *TRACK* (Hodges, 1994, 1995, 1996 e 1999). Os dados utilizados no método *TRACK* foram as reanálises do ERA-Interim (ECMWF), com resolução horizontal de  $1,5^\circ \times 1,5^\circ$ , idênticas às empregadas para a sua validação. A validação desta técnica foi feita para um período de um ano, através de análises visuais dos campos de geopotencial (e de linhas de correntes, quando necessário) no nível isobárico de 300 hPa.

Na etapa anterior à validação do *TRACK*, informações obtidas através de IS (data e posição) foram usadas como “verdade” para avaliar a destreza das reanálises na identificação dos VCAN. Essa comparação foi importante para mostrar as diferenças existentes entre os VCAN identificados nas IS e os VCAN observados nas AC. De acordo com esta última, ao longo do ano de 2003 confirmou-se 55 VCAN dos 86 observados nas IS, correspondendo a aproximadamente 64% dos casos. Em alguns períodos do ano, a AC reproduziu melhor os VCAN observados nas IS, como no verão, quando foi confirmado 75% dos casos. Por outro lado, o inverno foi o período que ocorreram as maiores diferenças, verificando apenas 58% dos VCAN identificados nas IS.

As diferenças mencionadas anteriormente foram consequências das limitações dos dados de reanálises (sobretudo sobre regiões oceânicas) e da estimativa do movimento associado aos VCAN, através dos dados de satélite. Eventualmente, os VCAN identificados nas IS não apresentaram a presença da circulação ciclônica nas AC, o que corresponde a 31 casos (36%). Esse tipo de resultado sugere que, em algumas situações, a AC através de uma superfície isobárica não represente fielmente a presença dos VCAN nas IS.

A análise da distribuição espacial dos desvios de temperatura dos VCAN mostrou que a

maioria dos casos subtropicais estiveram associados com massas de ar relativamente fria, correspondendo a aproximadamente 58% do total. Os VCAN subtropicais que apresentaram fraco desvio de temperatura ou a presença de desvio negativo e positivo ao longo do ciclo de vida foram classificados como mistos, e corresponderam 41% dos casos. Assim, apenas 1% dos eventos subtropicais apresentaram desvios positivos de temperatura sobre a região dos VCAN.

A maioria dos VCAN extratropicais foram classificados como mistos, correspondendo a aproximadamente 61% do total. Os eventos com desvio negativo de temperatura foram encontrados em 26% dos casos, enquanto que os VCAN extratropicais quentes compreenderam 13% do total.

A análise sazonal do padrão de temperatura para os dois tipos de VCAN mostrou que os casos com desvio negativo ocorreram com maior frequência no período de verão e menor frequência no inverno. Os VCAN frios foram mais comuns no mês de fevereiro para os casos subtropicais (84%) e em novembro para os casos extratropicais (43%), enquanto que os meses com menor frequência foram observados em agosto e julho, para os VCAN subtropicais (25%) e extratropicais (8%), respectivamente. Em relação aos eventos quentes, observou-se essa característica apenas em março nos VCAN subtropicais, enquanto que nos extratropicais esse padrão foi verificado em praticamente o ano inteiro, com maior proporção no mês de setembro (33%).

A análise da distribuição de temperatura revelou que o núcleo frio do VCAN encontra-se aproximadamente entre 1 e 3 graus geodésicos ao sul do MVR. Esse resultado foi obtido uma vez que em 55% dos casos, o mínimo de temperatura sobre a região dos VCAN ocorreu neste intervalo de distância. Além disso, essa análise mostrou que os VCAN são ligeiramente mais frios do lado oeste do centro do vórtice. De acordo com este resultado, o maior desvio de temperatura sobre a região dos VCAN ocorreu entre 0 e 1° W em relação ao MVR.

A avaliação da distribuição da VP ao longo da região dos VCAN mostrou que os

maiores valores (em módulo) foram encontrados muito próximos à posição do MVR. Segundo estes resultados, a probabilidade do mínimo de VP ocorrer entre os intervalos de 2° N-2° S e 2° W-2° E foi superior a 90%, o que confirma a presença de um núcleo de significativa intrusão de ar estratosférico sobre a região do MVR.

Uma avaliação semelhante foi empregada para a CZV, porém analisando apenas a sua distribuição sobre um eixo meridional. O resultado indicou que os menores valores ocorreram 4 graus ao sul do MVR. Essa etapa foi fundamental no processo de detecção dos VCAN, pois a adição da CZV contribuiu para “evitar” a identificação de cavados em 300 hPa, tal como ocorre quando o rastreamento é feito utilizando apenas a temperatura e VP.

Utilizando o critério de referência, ou seja, adicionando apenas os campos de temperatura e VP, o *TRACK* identificou 105 cavados e apenas 48 VCAN. No entanto, uma relevante melhoria foi observada após a adição do campo da CZV ao rastreamento. Assim, 27 critérios foram propostos a partir da combinação de diferentes limiares para cada uma das variáveis temperatura, VP e CZV. Estes critérios foram avaliados comparando-os com os VCAN verdadeiros (ou seja, confirmados nas AC), obtidos pelo critério de referência. O critério que apresentou a melhor destreza em detectar os VCAN verdadeiros foi o critério 4.c, que apresentou um índice de confiabilidade de aproximadamente 65%, através dos seguintes limiares: -3 °C para o desvio de temperatura, -2 UVP para a VP e -8 m/s para a CZV.

Uma dificuldade enfrentada neste estudo foi encontrar um critério que obtivesse um alto índice de acerto e um baixo índice de erro, ou seja, que identificasse um número satisfatório de VCAN e eliminasse a identificação de cavados. Porém, todos os critérios apresentaram limitações ao identificar alguns cavados e/ou deixar de selecionar alguns VCAN. Em alguns casos, a distinção entre VCAN e cavado torna-se uma tarefa bastante complexa, uma vez que podem existir cavados bastante amplificados, associados com uma massas de ar frio e com significativa intrusão de ar de origem estratosférica.

O *TRACK* representou melhor a presença dos VCAN no período de verão, seguido do outono, inverno e primavera. Apesar de ter sido observado a presença da variabilidade sazonal no padrão de temperatura, VP e CZV, não foi verificado nenhuma relação entre o comportamento destas variáveis e a confiabilidade do rastreamento dos VCAN. Sugere-se que, para os próximos estudos, a validação do *TRACK* seja realizada para um período maior. Dessa forma, uma avaliação mais representativa pode mostrar o impacto da alteração de cada parâmetro na confiabilidade da identificação dos VCAN pelo *TRACK*.

Embora tenham ocorrido algumas diferenças entre as técnicas de detecção apresentadas, o *TRACK* reproduziu satisfatoriamente a distribuição sazonal dos VCAN subtropicais identificados nas IS. Assim, verificou-se que o *TRACK* e as IS indicaram a menor frequência dos VCAN no mês de setembro e a maior frequência no mês de fevereiro. O *TRACK* também representou uma diminuição no número de VCAN entre os períodos de outono e inverno, e um aumento entre setembro e novembro, tal como foi observado nas IS.

Alguns aspectos dos VCAN, estimados pelo *TRACK*, foram comparados com resultados obtidos através das IS, como por exemplo, o tempo médio de vida e a distância média percorrida ao longo das trajetórias. As duas técnicas mostraram que o ciclo de vida mais frequente ocorreu para os VCAN com duração entre 1 e 2 dias, concordando com o estudo de Fuenzalida et al. (2005). No entanto, o *TRACK* identificou alguns sistemas com período de vida relativamente longo, os quais persistiram por mais de 10 dias em 7% dos casos e por mais de 20 dias em 1% do total. Durante o período de inverno, o ciclo de vida dos VCAN foi bastante semelhante para os casos identificados nas IS e no *TRACK*, enquanto que no período de verão, o *TRACK* superestimou o tempo médio de vida dos VCAN. Os casos subtropicais identificados nas IS obtiveram uma duração média de 3,8 dias, enquanto que no *TRACK* o ciclo médio de vida foi igual a 4,6 dias. Em alguns casos, o *TRACK* identificou o VCAN antes da sua formação e depois da sua dissipação (ver Apêndice B).

A análise da distância média percorrida pelos VCAN também mostrou uma superestimativa do *TRACK* em relação aos casos observados nas IS. A maioria dos VCAN identificados nas IS deslocaram-se entre 1500 e 2000 km, enquanto que as maiores frequências dos VCAN detectados pelo *TRACK* ocorreram para as faixas de deslocamento entre 1500 e 2000 km e 2500 e 3000 km. Esse resultado é coerente com as informações obtidas para a duração média dos VCAN, pois conforme Hoskins e Hodges (2002), o uso da VR induz a identificação dos sistemas em um período anterior ao início do seu ciclo de vida, e dessa forma, justifica a superestimativa do deslocamento dos VCAN pelo *TRACK*.

Neste estudo, realizou-se uma tentativa de reproduzir o padrão de temperatura correspondente aos VCAN identificados nas IS. Durante os período de verão e outono, o *TRACK* representou satisfatoriamente a variabilidade mensal da temperatura dos VCAN. No mês de fevereiro, o número máximo de VCAN subtropicais frios foi satisfatoriamente representado pelo *TRACK* através do máximo do desvio negativo de temperatura. No entanto, a estimativa da temperatura dos VCAN não foi bem representada nos períodos de inverno e primavera. Esse fato pode ser explicado devido às diferenças encontrados entre as IS e AC.

A validação desta metodologia permitiu a construção de uma climatologia dos VCAN, que atuaram na região subtropical da AS e áreas oceânicas vizinhas entre 1989 e 2008. Ao longo desse período, o *TRACK* identificou 987 casos, estabelecendo uma média anual de 49 VCAN. Assim, o método automático superestimou o número de eventos identificados nos estudos de Fuenzalida et al. (2005) e Campetella e Possia (2006), pois estes identificaram 171 e 420 casos, o que corresponde a aproximadamente 17 e 14 VCAN por ano, respectivamente.

As diferenças encontradas na frequência do número de VCAN entre o presente estudo e os trabalhos citados anteriormente são expressivas e podem ser justificadas por meio de causas distintas. Em relação aos resultados de Fuenzalida et al. (2005), as desigualdades provavelmente devem-se ao nível escolhido para o rastreamento dos VCAN, pois estes

utilizaram 500 hPa, o que elimina a identificação dos VCAN confinados na alta troposfera. No estudo de Campetella e Possia (2006), o rastreamento dos VCAN foi realizado para o nível de 250 hPa, porém considerou-se apenas os eventos que persistiram por tempo superior a 2 dias. Essa restrição elimina um considerável número de sistemas com curto ciclo de vida, ou seja, com duração inferior a 2 dias. Além disso, Campetella e Possia (2005) selecionaram somente os casos que apresentaram um núcleo frio nas camadas média e baixa da atmosfera.

A ferramenta utilizada neste estudo permitiu identificar a distribuição espacial de diversas características dos VCAN, através da interpretação de campos estatísticos. A análise dos campos de densidade de *tracks*, ou seja, da distribuição espacial do número de VCAN, relevou duas regiões de máxima frequência, uma próxima a costa oeste da AS e outra sobre o sul do Brasil e Bacia do Prata. A frequência máxima dos VCAN a oeste da costa chilena confirmou os resultados encontrados em Fuenzalida et al. (2005) e Campetella e Possia (2006), enquanto que o máximo secundário sobre a porção sul do território brasileiro concorda apenas com o que foi encontrado por Campetella e Possia (2006).

Os resultados deste estudo mostraram uma significativa variabilidade sazonal na frequência dos VCAN. De acordo com o *TRACK*, os VCAN foram mais comuns no período de verão, seguido do outono, inverno e primavera. Estes resultados estão em desacordo com os estudos anteriores, pois Fuenzalida et al. (2005) encontraram a maior frequência no inverno, enquanto que Campetella e Possia (2006) observaram este comportamento no outono. É interessante notar que estes últimos autores obtiveram a mínima frequência no período de verão, enquanto que o presente trabalho revelou nesta estação o número máximo de ocorrências.

Embora os propósitos dos três estudos tenham sido semelhantes, ou seja, identificar centros de circulação ciclônica na média ou alta troposfera, todos utilizaram critérios distintos de identificação. Os critérios utilizados no presente estudo foram aplicados apenas à um nível de pressão, enquanto que Fuenzalida et al. (2005) e Campetella e

Possia (2006) consideraram a estrutura térmica na média e média/baixa troposfera, respectivamente. Sugere-se, como critério para os próximos estudos, a adição da temperatura na camada média e alta, ao invés da temperatura em apenas uma única superfície de pressão. Além do fator citado, as diferenças encontradas neste trabalho podem também estar relacionadas com a fonte de dados, a qual foi diferente dos dados aplicados nos estudos anteriores.

A climatologia dos cavados em níveis médios no HS, realizado por Piva (2005), mostra alguns resultados semelhantes, em relação ao presente estudo. Embora existam algumas diferenças entre as características dinâmicas dos cavados e dos VCAN, ambos estudos indicaram a maior frequência nos períodos de verão e outono, e a menor frequência no inverno e na primavera. Além disso, no período de verão, os dois estudos mostram um máximo de eventos nos Oceanos Atlântico e Pacífico e um mínimo sobre a região central do continente sul-americano. No entanto, Piva (2005) encontrou a maior densidade de cavados sobre latitudes mais altas (ao sul de 40° S), enquanto que no presente estudo, o número máximo de VCAN foi observado aproximadamente entre 25° S e 35° S.

As estatísticas obtidas pelo *TRACK* mostraram uma nítida preferência para a formação dos VCAN sobre o Oceano Pacífico Leste e dissipação destes associada à Cordilheira dos Andes e ao Oceano Atlântico Sudoeste. Sugere-se que o processo de formação dos VCAN sobre o Oceano Pacífico esteja associado com a presença das ondas de Rossby estacionárias, originadas devido a presença da topografia. Distribuições espaciais semelhantes das regiões associadas aos processos de formação e dissipação dos VCAN, no período de inverno, também foram encontradas por Fuenzalida et al. (2005). Entretanto, os resultados deste último autor não exibem o comportamento citado de forma clara durante o verão, tal como foi visto no presente estudo. Os resultados obtidos através das taxas de crescimento e decaimento dos VCAN tiveram contribuição para auxiliar a interpretação das regiões favoráveis a ciclogênese e ciclólise, respectivamente.

De acordo com o resultados deste estudo, a presença da cadeia de montanhas sobre a porção oeste da AS parece afetar o deslocamento médio dos VCAN. Esse comportamento foi notado ao observar uma redução na velocidade de propagação dos VCAN que se aproximam da costa oeste do continente sul-americano. Por outro lado, a velocidade de deslocamento dos VCAN foi maior sobre o setor continental, Oceano Atlântico e sobre regiões de latitudes maiores, onde a altura da Cordilheira dos Andes é menor e sua presença praticamente não afeta o deslocamento dos VCAN. Além disso, o *TRACK* mostrou que os VCAN, formados sobre o Oceano Pacífico Sudeste, tendem a propagar-se com orientação nordeste e, ao ultrapassar os Andes, deslocam-se na direção sudeste. Este comportamento confirma o resultado encontrado anteriormente por Fuenzalida et al. (2005).

Segundo o presente estudo, a disposição para o deslocamento dos VCAN entre a costa oeste da AS e a porção leste do setor continental está intimamente relacionada com a intensidade da circulação do VCAN. Durante o verão austral, os VCAN que se formam sobre Oceano Pacífico Leste são mais fracos e muitos destes acabam permanecendo confinados a oeste da AS, até dissiparem-se completamente. Por outro lado, nos períodos de inverno e primavera os VCAN são mais intensos, quando muitos destes alcançam o lado leste da cadeia de montanhas, dissipando-se sobre a região continental ou sobre o Oceano Atlântico Sudeste.

A aplicação do *TRACK* também permitiu identificar a variabilidade temporal dos VCAN em cinco diferentes regiões. Essa análise foi importante para mostrar que os VCAN apresentam comportamentos peculiares quando atuam sobre cada setor. Assim, avaliações da variabilidade sazonal e interanual do sistema em estudo foram realizadas, através da interpretação da distribuição de frequência, intensidade média, tempo médio de vida e distância média percorrida.

Os VCAN que atuaram sobre áreas oceânicas (regiões 1 e 5) apresentaram uma distribuição anual bem definida, com máxima frequência no período de verão e mínima ao longo do inverno. Além disso, as análises deste estudo indicaram que os eventos



observados nestas regiões apresentaram a menor intensidade média. Por outro lado, os VCAN observados na região 3, onde a maior parte da área é coberta pela superfície terrestre, apresentaram uma distribuição sazonal praticamente oposta, ou seja, com maior presença de VCAN no período outono/inverno e menor frequência no período primavera/verão.

Os resultados deste estudo revelaram que a região 2 apresentou a maior ocorrência de VCAN, tal como já havia sido observado por Fuenzalida et al. (2005) e Campetella e Possia (2006). Neste contexto, este estudo mostrou que 35% de todos os VCAN foram observados na região 2, o que confirma a proporção encontrada no trabalho de Campetella e Possia (2006).

É interessante notar que, embora a fonte de dados e o período de análises tenham sido diferentes, o presente estudo mostrou uma distribuição espacial e sazonal bastante semelhante em relação ao estudo de Campetella e Possia (2006). Considerando apenas as regiões 2, 3 e 4, observou-se que ambos estudos indicaram a maior frequência no outono e a menor na primavera. Além disso, a distribuição do número de eventos entre as regiões citadas foi bastante parecida nos dois estudos, pois estes encontraram o maior número de VCAN na região 2, seguido da região 4 e 3, respectivamente.

A avaliação da variabilidade interanual na região de estudo mostrou um aumento do número de VCAN entre os primeiros e últimos dez anos de análises. Este comportamento foi mais evidente nas regiões 2 e 5, onde o aumento foi de 21,5% e 47,6%, respectivamente. Particularmente na região 2, as alterações foram mais expressivas no período de outono, quando a frequência média variou de 3 para 5 casos. De forma não tão significativa, houve também um aumento da frequência do número de VCAN na região sul do Brasil, que pôde ser notada ao longo das quarta estações do ano.

Uma característica marcante foi o aumento da variabilidade média dos VCAN no segundo período (1999-2008). Esse comportamento foi observado em praticamente todas as regiões, sobretudo no setor 4, onde observou-se um significativo aumento

entre 2002 e 2008. Embora os resultados tenham mostrado uma tendência positiva no crescimento do número de VCAN, não houve uma variabilidade significativa na intensidade média dos VCAN entre o primeiro e segundo períodos.

Acredita-se que a metodologia apresentada neste estudo possa contribuir futuramente para uma melhor compreensão do comportamento dos VCAN, por meio da realização de novos estudos. Primeiramente, sugere-se que algumas alterações sejam feitas no método, a fim de tornar o processo de identificação dos VCAN mais confiável, como por exemplo:

- utilizar outras variáveis para o rastreamento dos VCAN, como por exemplo, VP e/ou pressão numa superfície (ou camada) isentrópica;
- investigar as diferenças da estrutura térmica da camada atmosférica associada aos VCAN subtropicais e extratropicais;
- aplicar limiares para a temperatura em uma camada, de acordo com os resultados que serão obtidos no item anterior. Esse critério talvez possa eliminar a identificação dos VCAN extratropicais, cujo processos de formação e evolução são diferentes dos casos subtropicais .
- implementar uma rotina no código para selecionar somente os centros de mínima vortacidade (ou pressão), envolvidos por um contorno fechado de VP. Esse critério permitirá somente a identificação dos VCAN que apresentarem um desprendimento do núcleo de máximo valor (em módulo) de VP do “reservatório” de ar estratosférico;
- aplicar critérios para a circulação do vento ao redor do mínimo de vortacidade (ou pressão), de forma semelhante ao que foi feito nos estudos de Coutinho (2008) e Costa (2009);

- aplicar a validade dos limiares para passos de tempo consecutivos, ao invés de um único passo de tempo, tal como foi feito neste estudo. Neste momento, esse critério está disponível no código, pois foi implementado recentemente;
- eliminar a restrição de deslocamento mínimo do VCAN, para que os casos com deslocamento lento possam também ser incluídos na estatística.

A partir do aprimoramento da técnica de identificação dos VCAN, sugere-se a continuidade do estudo dos VCAN, sugerindo para trabalhos futuros os seguintes temas:

- investigar a estrutura vertical dos VCAN a fim de obter a porcentagem dos eventos que se estendem até níveis médios e baixos da troposfera;
- analisar o comportamento de algumas variáveis (por exemplo, VR, VP, pressão, temperatura, precipitação, etc) através de compostos do ciclo médio de vida dos VCAN, tal como foi feito por Bengtsson et al. (2009);
- construir compostos que relacionem a extensão vertical dos VCAN com a precipitação associada a região do sistema;
- estudar a relação da variabilidade temporal dos VCAN com padrões de oscilação de grande escala temporal, como por exemplo, a Oscilação Sul do Oceano Pacífico, Oscilação Antártica, etc;
- estender a climatologia para a HS.

Espera-se, com o aperfeiçoamento da técnica de detecção de VCAN, utilizar esta ferramenta para avaliar a destreza de modelos climáticos em identificar a presença dos VCAN. Além disso, o *TRACK* poderá também ser usado para avaliação de previsões por conjunto, em centros operacionais de tempo.

A validação do *TRACK* apresentado neste estudo foi realizada para os VCAN presentes em regiões de latitudes subtropicais na AS. Mesmo que os VCAN que atuam nas proximidades da costa NE do Brasil apresentem algumas características distintas, acredita-se que pequenas modificações no código possam tornar esse método aplicável para o rastreamento dos VCAN tropicais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANCELLET, G.; BEEKMANN, M.; PAPAYIANNIS, A. Impact of a cut-off development on downward transport of ozone in the stratosphere. **Journal of Geophysical Research**. v. 99, p. 3451-3463, 1994.
- ANNAMALAI, H.; HODGES, K. I.; SLINGO, J. M.; SPERBER, K. R. The mean evolution and variability of the Asian summer monsoon: comparison of ECMWF and NCEP–NCAR reanalyses. **Monthly Weather Review**. v. 127, p. 1157-1186, 1999.
- BARBOSA, T. F. **Intrusão de vortacidade potencial na alta troposfera sobre o Atlântico tropical sul e sua relação com a precipitação no NE do Brasil**. 2006. 118 p. (INPE-14170-TDI/1087). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2006. Disponível em: <<http://mtc-m17.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2006/04.13.17.42/doc/publicacao.pdf>>
- BELL, G. D., AND L. F. BOSART, 1989: A 15-year climatology of Northern Hemisphere 500 mb closed cyclone and anticyclone centers. **Monthly Weather Review**. v. 117, p. 2142-2163, 1989.
- BELL, G. D. E.; BOSART, L.F. A case study diagnosis of the formation of an upper-level cut off cyclonic circulation over the eastern United States. **Monthly Weather Review**. V.121, n.6, p.1635-1655, 1993.
- BELL, G. D.; KEYSER, D., Shear and curvature vorticity and potential vorticity interchanges: interpretation and application to a cut-off cyclone event. **Monthly Weather Review**. v. 121, n. 6, p. 76-102, 1993.
- BENGTSSON, L; KANAMITSU, M; KALLBERG, P; UPPALA, S. FGGE research activities at ECMWF. **Bulletin of the American Meteorological Society**. v. 63, n. 3, p. 277-303, 1982.
- BENGTSSON, L; HODGES, K. I.; KEENLYSIDE, N. Will extratropical storms intensify in a warmer climate? **Journal of Climate**. v. 22, 2276-2301, 2009.
- BJERKNES, J. Extratropical cyclones. **American Meteorological Society. Conpendium of Meteorological**. p. 577-598, 1951.
- BLUESTEIN, H. B. **Synoptic-dynamic meteorology in midlatitudes: Volume II: Observations and Theory of Weather Systems**, Oxford University Press, 1992.
- CAMPETELLA, C.; POSSIA, N. Upper-level cut-off lows in southern South America. **Meteorology and Atmospheric Physics**. v. 96, n. 1-2, p. 181-191, April 2006.
- CARLSON, T. B. Structure of a steady-state Cold Low. **Monthly Weather Review**. v.

95, n. 11, p. 763-777, 1967.

CHEN, G. T. J.; CHOU L. F. An investigation of Cold Vortices in the upper troposphere over the western north Pacific during the warm season. **Monthly Weather Review**. v. 122. p. 1436-1448, 1994.

COSTA, S. B. **Balço de vorticidade e energia aplicados aos Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis atuantes no oceano Atlântico tropical sul e adjacências**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Instituto Nacional de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG), Universidade de São Paulo, 2009.

COUTINHO, M. D. L. **Método objetivo de identificação dos Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis na região tropical sul: validação e climatologia**. (INPE-15460 - TDI/1422) Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2008. Disponível em: < <http://mtc-m18.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/11.17.12.16/doc/publicacao.pdf>>

CUEVAS, E.; RODRÍGUEZ, J. Estadística de depresiones aisladas em niveles altos. In: SIMPOSIO NACIONAL DE PREDICCIÓN, 5.2001, Madrid. **Anales...** Ministerio de Medio Ambiente/Instituto Nacional de Meteorologia/ Secretaria General Técnica/Centro de Publicaciones, 2001.

DAVIES, T. D.; SCHUEPBACH, E. Episodes of high ozone concentrations at the Earth's surface resulting from transport down from the upper troposphere/lower stratosphere: a review and case studies. **Atmospheric Environment**. v. 28, p. 53-68, 1994.

DELDEN, A. V.; NEGGERS, R. A case study of tropopause cyclogenesis. **Meteorological Applications**. v. 10, p. 197-209, 2003.

DELGADO, G.; REDAÑO, G.; LORENTE, J.; NIETO, R.; GIMENO, L.; RIBERA, P.; BARRIOPEDRO, D.; GARCÍA-HERRERAS, R.; SERRANO, A. Cloud cover analysis associated to Cut-off Low pressure systems over Europe using Meteosat imagery. **Meteorology and Atmospheric Physics**. v. 96, p. 141-157, 2007.

FEDOROVA, N.; CARVALHO, M. H.; FEDOROV, D. Formação de Vórtices observados no campo de nebulosidade sobre a América do Sul, **Revista Brasileira de Meteorologia**. v. 14, n. 2, p. 15-27, 1999.

FORTUNE, M. A.; KOUSKY, V. E. Two severe freezes in Brazil: precursors and synoptic evolution. **Monthly Weather Review**. v. 111, p. 181-196, 1983.

FRANK, N. L. On the energetics of cold lows. Proceedings of the Symposium on Tropical Meteorology. **American Meteorological Society**. EIV 1 – EIV 6, June 1970.

FROUDE, L. S. R. **The predictability of Storm Tracks**. Tese (Doutorado em

Meteorologia). Environmental Systems Science Centre (ESSC) – University of Reading, Inglaterra, Oct. 2006.

FUENZALIDA, H.; SÁNCHEZ, R.; GARREAUD, R. A climatology of Cutoff Lows in the Southern Hemisphere. **Journal of Geophysical Research**. v. 110, p. 1-10, Sept., 2005.

GARCÍA, F.; FONT, R.; RIVERA, A. **Situación atmosférica causante de las lluvias torrenciales durante los días 19 al 21 de octubre de 1982 en el levante español**. Madrid, Espanha: Instituto Nacional de Meteorologia, 1982.

GARREAUD, R. D.; FUENZALIDA, H. A. The influence of the Andes on Cutoff Lows: a modeling study. **Monthly Weather Review**. v. 135, p. 1596-1613, 2007

GAN, M. A. **Um estudo observacional sobre as baixas frias da alta troposfera, nas latitudes subtropicais do Atlântico sul e leste do Brasil**. 80p. (INPE-2685-TDL/126). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 1982. Disponível em: < <http://mtc-m17.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/jeferson/2005/06.21.17.31/doc/publicacao.pdf>>

GAN, M. A. **Ciclogêneses e ciclones sobre a América do Sul**. (INPE-5400-TDI/479). Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 1992. Disponível em: < <http://mtc-m17.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2005/08.19.11.11/doc/INPE-5400-TDI-479.pdf>>

GAN, M. A. Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis que atuam nas latitudes subtropicais da América do Sul. **Comunicação pessoal**, 2010.

GAN, M. A.; KOUSKY, V. E. Vórtices Ciclônicos da Alta Troposfera no Oceano Atlântico Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v. 1, n. 92.651, p. 19-28, Junho 1986.

GAN, M. A.; RAO, V. R. Case studies of cyclogenesis over South America, **Meteorological Applications**. v. 3, p. 359-368, 1996.

GIMENO, L.; HERNÁNDEZ, E.; RÚA, A.; GARCÍA. Surface ozone in Spain. **Chemosphere**. v. 38, p. 3061-3074, 1998.

GIMENO, L.; TRIGO, R. M.; RIBERA, P.; GARCIA, J. A. Special issue on Cut-off Low systems (COL) . **Meteorology and Atmospheric Physics**. v. 96, p. 1-2, 2007.

GRIFFITHS, M.; REEDER, M. J.; LOW, D. J.; VINCENT, R. A. Observation of a Cut-off Low over southern Australia, **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**. v. 124, p. 1109-1132, 1998.

- HALLAK, R.; SILVA DIAS, M. A. F. Estudo diagnóstico de um Vórtice de Ar Frio – Parte I: aspectos de grande escala. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11., 2000, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBMet, 2000.
- HERNÁNDEZ, A. Un estudio estadístico sobre Depresiones Aisladas en Niveles Altos (DANAS) en el sudoeste de Europa basado en mapas isentrópicos de vorticidad potencial. In: SIMPOSIO NACIONAL DE PREDICCIÓN, 4., 1999, Madrid/Espanha. **Anales...** Madrid: Instituto Nacional de Meteorología, 1999. p. 235-240.
- HIRSCHBERG, P.A. E FRITSCH, J.M. Tropopause undulations and the development of extratropical cyclones. Part I: overview and observations from a cyclone event. **Monthly Weather Review**. v. 119, n. 2, p. 496-517, 1991a.
- HODGES, K. I. A general Method for tracking analysis and its application to meteorological data. **American Meteorological Society**. v. 122, p. 2573-2585, Nov. 1994.
- HODGES, K. I. Feature tracking on the unit sphere. **Monthly Weather Review**. v.123, p. 3458–3465, 1995.
- HODGES, K. I. Spherical nonparametric estimators applied to the UGAMP model integration for AMIP, **Monthly Weather Review**. v. 124, p. 2914–2932, 1996.
- HODGES, K. I. Adaptive constraints for feature tracking. **Monthly Weather Review**. v. 127, p. 1362-1373, 1999a.
- HODGES, K. I.; BOYLE, J.; HOSKINS, B. J.; THORNCROFT C. A comparison of recent reanalysis datasets using objective feature tracking: Storm *Tracks* and tropical easterly waves. **Monthly Weather Review**. v. 131, p. 2012-2037. 2003.
- HOSKINS, J. B.; HODGES, K. I. New perspectives on the Northern Hemisphere winter Storm Tracks. **Journal of Atmospheric Science**. v. 59, p. 1041–1061, 2002.
- HOSKINS, J. B., McINTYRE, M. E., ROBERTSON, A. W. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**. v. 111, p. 877-946, 1985.
- HOSKINS, J. B.; HODGES, K. I. A new perspective on the Northern Hemisphere winter Storms Tracks. **Journal of Climate**. v. 18, p. 4108-4129, 2005.
- HSIEH, Y. P. An investigation of a selected cold vortex over North America. **Journal of Meteorology**. v. 6, p. 401–410, 1949.
- KENTARCHOS, A. S.; DAVIS, T., D. A climatology of Cut-off Lows at 200 hPa in the Northern Hemisphere, 1990–1994. **International Journal of Climatology**. v. 18, p. 379–390, 1998.



KENTARCHOS, A. S.; ROELOFS, G. J.; LELIEVELD, J.; CUEVAS, E., 2000. On the origin of elevated surface ozone concentrations at Izana Observatory during the last days of March 1996: a model study. **Geophysical Research Letters**. v. 27, p. 3699-3702.

KNIPPERTZ, P.; MARTIN, J.E. Tropical plumes and extreme precipitation in subtropical and tropical West Africa. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**. v. 131, p. 2337–2365, 2005.

KOUSKY, V. E.; GAN, M. A. Upper tropospheric cyclonic vortices in the subtropical South Atlantic. **Tellus**. v. 33, p. 538-551, Nov. 1981.

KNUTH, D. E. **Fundamental algorithms**. Pasadena, CA: California Institute of Technology, 1993. v.1. The art of computer programming.

KUO, H. L. Dynamic instability of two-dimensional non-divergent flow in a barotropic atmosphere. **Journal of Meteorology**. v. 6, p. 105-122, 1950.

LLASAT, M., C.; MARTÍN, F.; BARRERA, A. From the concept of “Kaltlufttropfen” (cold air pool) to the Cut-off Low. The case of September 1971 in Spain as an example of their role in heavy rainfalls. **Meteorology and Atmospheric Physics**. v. 96, p. 43-60, 2007.

LOURENÇO, M. C. M. **Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis que atuam no sul da América do Sul**. (INPE-10462-TDI/929). Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 1996.

McCRONE, P. J. Case study of an Australian subtropical cyclone from March 2001. 25<sup>th</sup> Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, San Diego, EUA, **American Meteorological Society**, p. 47-50, 2002.

MESQUITA, M. S. **Tracking summer extra-tropical storms: a climatological overview and variability in the Northern Hemisphere**. Dissertação (Mestrado em Ciências Geofísicas). Bergen, Noruega: Universidade de Bergen, 2006.

MIKY FUNATSU, B. **Estudo sinótico dinâmico de uma ciclogênese usando vorticidade potencial**. (INPE-7264-TDI/706). Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). São José dos Campos, 2000. Disponível em: < <http://mtc-m05.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/deise/2000/03.14.11.42/doc/homepage.pdf>>

MIKY FUNATSU, B.; GAN, M. A.; CAETANO, E. A case study of orographic cyclogenesis over South America. **Revista Atmosfera**. v. 17, n. 2, p. 91-113, 2004.

MURRAY, R. J.; SIMMONDS, I. A numerical scheme for tracking cyclone centres from

digital data. PART I: development and operation of the scheme. **Australian Meteorological Magazine**. v. 39, p. 155–166. 1991a.

MURRAY, R. J.; SIMMONDS, I. A numerical scheme for tracking cyclone centres from digital data. Part II: application to January and July general circulation model simulations. **Australian Meteorological Magazine**. v. 39, p. 167–180, 1991b.

NIETO, R.; GIMENO, L.; TORRE, L. D. L.; RIBERA, P.; GALLEGO, D.; GARCIA-HERRERA, R.; GARCIA, J. A.; NUNEG, M.; REDAUO, A.; LORENTE, J. Climatological features of Cutoff Low systems in the Northern Hemisphere. **Journal of Climate**. v.18, p. 3085–3103, 2005

NIETO, R.; GIMENO, L.; DE LA TORRE, L.; RIBERA, P.; BARRIOPEDRO, D.; HERRERA, R. G.; SERRANO, A.; GORDILHO, A.; REDANO, A.; LORENTE, J. Interannual variability of Cut-off Low systems over the European sector: The role of blocking and the Northern Hemisphere circulation modes. **Meteorology Atmospheric Physics**. v. 96, p. 85-101, 2007

NIETO, R.; SPRENGER, M.; WERNLI, H.; TRIGO, R. M.; GIMENO, L. Identification and climatology of Cut-off Low near the tropopause. **Annals of the New York Academy of Sciences**. v. 1146, n. 1, p. 256-290, 2008.

NOVAK, M. J.; AIYYER, A.; BOSART, L. F.; KEYSER, T.; WASULA, K. Warm season 500 hPa closed lows. In: AMS CONFERENCE ON WEATHER ANALYSIS AND FORECASTING, 19, 2002, San Antonio, EUA. **Proceedings...** San Antonio: AMS, 2002. p. 68-71.

OLTMANS, S. J.; LEVY II, H.; HARRIS, J. M.; MARRILL, J. T.; MOODY, J. L.; LATHROP, J. A.; CUEVAS, E.; TRAINER, M.; O'NEILL, M. S.; PROSPERO, J. M.; VÖMEL, H. JOHNSON, B. J. Summer and spring ozone profiles over the North Atlantic from ozonesonde measurements: North Atlantic Regional Experiments (NARE). **Journal of Geophysical Research**. v. 101, p. 29179-29200, 1996

PALMÉN, E. Origin and structure of high-level cyclones south of the maximum westerlies. **Tellus**. v. 1, p. 22-31, 1949.

PALMÉN, E.; NEWTON, C. W. **Atmospheric circulation systems, their structure and physical interpretation**. New York: Academic Press, 1969.

PALMER, C. E. On high-level cyclones originating in the tropics. **American Geophysical**. v. 32, n. 5, p. 683-695, Oct. 1951.

PARKER, S. S.; HAWES, J. T.; COLUCCI, S. J.; HAYDEN, B. P. Climatology of 500 mb cyclones and anticyclones 1950-85. **Monthly Weather Review**. v. 117, p. 558-570, 1989.

PIVA, E. D. **Cavados em níveis médios no hemisfério sul: climatologia, energética e ciclogêneses em superfície.** INPE-14087-TDI/1070. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2005. Disponível em: < <http://mtc-m17.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/iris@1913/2005/04.28.11.42/doc/paginadeacesso.html>>

PIZARRO, J. G.; MONTECINOS, A. Cutoff cyclones off the subtropical coast of Chile. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOUTHERN HEMISPHERE METEOROLOGY AND OCEANOGRAPHY, 6., 2000, Santiago, Chile. **Proceedings...** Santiago: American Meteorological Society, 2000, p. 278-279.

PORCÙ, E.; CARRASSI, A.; MEDAGLIA, C. M.; PRODI, F.; MUGNAI, A., **Meteorology and Atmospheric Physics.** v. 96, p. 121-140, 2007

PRICE, J. D.; VAUGHAN, Statistical studies of Cut-off Low systems. **Annales Geophysicae.** v. 10 p. 96-102, 1992.

PRICE, J. D.; VAUGHAN, G. The potential for stratosphere-troposphere exchange in Cut-off Low systems. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society.** v. 119, p. 343-365, 1993.

QI, L.; LESLIE, L. M.; ZHAO, S. X. Cut-off Low pressure systems over southern Australia: climatology and case study. **International Journal of Climatology.** v. 19, p. 1633-1649, 1999.

QUISPE, N.; AVALOS, G. Intense snowstorm in the southern mountains of Peru associated to the incursion of cut-off low-pressure systems at upper level. In: CONFERENCE ON SOUTHERN HEMISPHERE METEOROLOGY AND OCEANOGRAPHY (8 ICSHMO), 8., 2006, Foz do Iguaçu, Brazil. **Proceedings...** São José dos Campos: INPE, 2006. p. 1945-1958.

RAMAGE, C. S. The tropical cyclone. **Journal of Geophysical Research.** v. 4, p. 1401-1411, Apr. 1962.

RAMÍREZ, M. C. V. **Padrões climáticos dos Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis no Nordeste do Brasil.** 132p. (INPE-6408-TDI/618). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 1997. Disponível em: < <http://mtc-m17.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2005/09.15.19.39/doc/INPE-6408-TDI-618.pdf>>

RAMÍREZ, M. C. V.; FERREIRA, N. J.; GAN, M. A. Vórtices Ciclônicos Desprendidos em Altos Níveis que originam-se no leste do Pacífico Tropical Sul — Parte I: aspectos sinóticos relacionados a sua formação, In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11., 2000, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBMet, 2000.

REINKE, R. L.; GAN, M. A.; FERREIRA, N. J. Estudo preliminar de um caso de geada no Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 31., 2004, Fortaleza. **Anais...** Rio de Janeiro: SBMet, 2004.

ROCKWOOD, A. A.; MADDIX, R. A. Mesoscale and synoptic scale interactions leading to intense convection: The case of 7 June 1982. **Weather Forecasting**. v. 3, p. 51-68, 1988.

SALARI, V.; SETHI, I.K., Feature point correspondence in the presence of occlusion, **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**. v. 12, n. 1, p. 87-91, 1990.

SATYAMURTY, P.; FERREIRA, C. C.; GAN, M. A. Cyclonic vortices over South America, **Tellus**. v. 42A, p. 194-201, 1990.

SATYAMURTY, P; SELUCHI, M. E. Characteristics and structure of an Upper Air Cold Vortex in the subtropics of South America, **Meteorology and Atmospheric Physics**. v. 96, p. 203-220, 2007.

SETHI, I. K.; JAIN, R. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**. v. 9, n. 1, p. 56-73, 1987.

RONDANELLI, R.; GALLARDO, L., GARREAUD, R. D. Rapid changes in ozone mixing ratios at Cerro Tololo (30°10'\_S, 70°48'\_W, 2200 m) in connection with Cut-off Lows and deep troughs. **Journal of Geophysical**. v. 107, p. 420, 2002.

SILVA, L. **A influência do vórtice ciclônico de altos níveis (VCAN) sobre a precipitação do Nordeste do Brasil (NEB) e as características associadas.** Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2005. Disponível em: < <http://mtc-m18.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2005/10.26.11.21/doc/publicacao.pdf>>

SIMPSON, R. H. Evolution of the Kona Storm, a subtropical cyclone. **Journal of Meteorology**. v. 9, p. 24-35, Oct. 1952.

SMITH, B. A.; BOSART, L. F.; JEAN, D. St. A global 500 hPa cutoff cyclone climatology: 1953-1999. 19<sup>th</sup> Conference on Weather Analysis and Forecasting, **American Meteorological Society**. p. 1-14, 2002.

SPRENGER, M.; WERNLI, H. A northern hemispheric climatology of cross-tropopause exchange for the ERA15 time period (1979-1993). **Journal of Geophysical Research**, v. 108, 2003

SPRENGER, M.; WERNLI, H. Identification and ERA-15 climatology of potential vorticity streamers and cutoffs near the extratropical tropopause. **Journal of Atmospheric Science**. v. 64, p. 1569-1586, 2007.

SUGI, M.; KANAMITSU, M. A study of Subtropical Upper Level Cyclone using JMA operational forecast model. **Journal of the Meteorological Society of Japan**. v. 60, n. 4, p. 932-945, 1982.

UPPALA, S.; DEE D.; KOBAYASHI, S.; SIMMONS, A. Evolution of reanalysis at ECMWF. In: WCRP INTERNATIONAL CONFERENCE ON REANALYSIS, 3., 2008, Tokio. **Proceedings...** Tokio: Universidade de Tóquio, 2008.

VELDEN, C. S.; HAYDEN, C. M.; NIEMAN, S. J.; MENZEL, W. P.; WANZONG, S.; GOERSS, J. S. Upper-tropospheric winds derived from geostationary satellite water vapor observations. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 78, p. 173-195, 1997.

VUILLE, M.; AMMANN, C. Regional snowfall patterns in the high, arid Andes, **Journal Climatic Change**. v. 36, n. 3-4, p. 413-423, 2004.

WERNLI, H.; SPRENGER, M. Identification and ERA-15 climatology of potential vorticity streamers and cutoffs near the extratropical tropopause. **Journal of Atmospheric Science**. v.64, p. 1569-1586, 2007.



## APÊNDICE A

As informações contidas neste apêndice referem-se ao algoritmo *TRACK* e foram baseadas nos estudos de Hodges (1994, 1995, 1996 e 1999). Na etapa de pré-processamento, os dados foram submetidos ao truncamento com número de onda no globo igual a 42 (T42), que tem como propósito eliminar a identificação de ondas de grande escala (HOSKINS e HODGES, 2002). Primeiramente, o processo de detecção e acompanhamento dos VCAN foi realizado a partir da escolha de um limiar para o MVR (*Threshold T*). Baseado nesta condição, um conjunto de mapas binário foram produzidos carregando consigo informações referentes as característica do rastreamento dos VCAN (Figura 5.1).

Para identificação dos MVR associados às trajetórias dos VCAN, o algoritmo lê as informações contidas nos dados disponíveis e classifica-as como objeto ou *background* (segundo plano). Essa classificação é feita utilizando o parâmetro  $T$ , que rotula cada posição de acordo com a sua intensidade, armazenando para um futuro processamento das informações que não correspondem à condição estabelecida. A partir disso, as regiões associadas com valores maiores do que  $T$  são designadas como objetos, sendo representadas pelo algarismo 1 (um) no mapa binário, enquanto que as posições com valores inferiores à  $T$  são classificadas como *background* e representadas pelo valor zero. No presente estudo,  $T$  apresenta valor negativo ( $-1,0 \cdot 10^{-5} \text{s}^{-1}$ ), pois este sinal está associado com movimentos ciclônicos no HS. A representação das informações correspondentes a cada posição no mapa binário é matematicamente expressa da seguinte forma:

$$b_{i,j} = \begin{cases} 1, & f_{i,j} \geq T \quad i = N_x, \dots, N_x + 2^n - 1; \\ 0, & f_{i,j} < T \quad j = N_y, \dots, N_y + 2^m - 1, \end{cases} \quad (1)$$

onde  $b_{i,j}$  representa o valor do campo binário,  $f_{i,j}$  o valor do campo real,  $T$  o valor do

limiar,  $N_x$  e  $N_y$  os nós de cantos da região de interesse, e  $m$  e  $n$  a ordem da matriz binária.

0	0	1	1	1	0	0	0
0	0	1	1	0	1	1	1
1	1	0	0	0	0	0	0
0	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	1	1	1	1	0
1	0	0	0	0	1	0	1
1	1	0	0	0	0	1	1
0	0	0	0	0	0	1	1

Figura B.1 - Exemplo de um mapa binário, constituído de pontos de objeto (1) e background (0).

Fonte: Mesquita (2006)

Este é o primeiro passo para obtenção dos valores que serão usados no mapa binário e, logo em seguida, para a construção de uma “hierarquia de dados”. Esta distribuição possibilita a organização destes dados em diferentes níveis, de tal forma que todos eles estejam conectados a uma estrutura conhecida como *quad tree* (KNUTH, 1973). Este esquema além de organizar os dados de uma maneira hierárquica, permite a análise deles em diferentes resoluções.

Na etapa de identificação dos MVR, pode haver uma falha ao longo do acompanhamento da trajetória de um sistema, podendo ser encontradas séries incompletas. Esta situação pode estar associada ao aparecimento e desaparecimento dos MVR ao longo de uma seqüência de tempo ou à presença de trajetórias que não satisfaçam às restrições impostas pela suavização aplicada (detalhes mais adiante). Para solucionar este problema, aplica-se um artifício computacional a fim de preencher estes espaços por pontos conhecidos como *phantom* (SALARI e SETHI, 1990), os quais não necessitam de informações quanto à posição e intensidade. Esse procedimento permite corrigir falhas no processo de correspondência entre os MVR, permitindo também uma maior suavização das trajetórias dos sistemas.



Para determinar a correspondência entre os MVR ao longo da trajetória de um sistema utilizam-se duas técnicas: método do “vizinho mais próximo” e a minimização da função custo. O primeiro procedimento é usado como processo de inicialização, ligando um ponto ao seu vizinho mais próximo. Esse esquema ocorre obedecendo a restrição de que a separação entre dois MVR (para dois passos de tempo consecutivos) deve ser menor ou igual ao deslocamento máximo  $d_{máx}$ . A técnica do “vizinho mais próximo” é mais adequada para situações que apresentam poucos sistemas interagindo num mesmo instante, pois os dados são ordenadamente dependentes para cada passo de tempo.

Para garantir uma maior suavização das trajetórias dos VCAN, aplica-se a minimização da função custo, adaptada a partir do método de Sethi e Jain (1987) e Salari e Sethi (1990), mas com projeção estendida para o domínio esférico (HODGES, 1995). Esta é uma técnica iterativa, nos quais os pares de posições são trocados entre si, sendo processados para frente e para trás no tempo, de forma a garantir que não haja nenhuma dependência entre eles durante o processo de otimização. A minimização da função custo é calculada a partir do desvio local da direção e da velocidade dos MVR para três passos de tempo consecutivos, de modo que a variação do movimento ao longo do tempo não ocorra de forma descontínua. O processo é expresso da seguinte forma:

$$D_i^k(P_i^{k-1}, P_i^k, P_i^{k+1}) = \begin{cases} 0, & \text{se } P_i^k \text{ e } P_i^{k+1} \text{ são pontos reais ou phantom e } P_i^{k-1} \text{ é um phantom;} \\ \phi(P_i^{k-1}, P_i^k, P_i^{k+1}), & \text{se } P_i^{k-1}, P_i^k \text{ e } P_i^{k+1} \text{ são pontos reais;} \\ \phi_{máx}, & \text{outra situação.} \end{cases} \quad (2)$$

onde  $D_i^k$  é o desvio local;  $P_i^{k-1}$ ,  $P_i^k$ ,  $P_i^{k+1}$  as posições dos MVR;  $k$  o passo de tempo e  $i$  uma determinada trajetória. A situação  $\phi_{máx}$  representa o limite máximo da suavização, sendo aplicado na ausência de informações de posição e intensidade dos MVR. A função adimensional  $\phi$  pode ser definida da seguinte maneira:

$$\phi(P_i^{k-1}, P_i^k, P_i^{k+1}) = w_1 \left( 1 - \frac{P_i^{k-1} P_i^k \cdot P_i^k P_i^{k+1}}{\|P_i^{k-1} P_i^k\| \|P_i^k P_i^{k+1}\|} \right) + w_2 \left( 1 - \frac{2(P_i^{k-1} P_i^k \cdot P_i^k P_i^{k+1})^{1/2}}{\|P_i^{k-1} P_i^k\| + \|P_i^k P_i^{k+1}\|} \right) \quad (3)$$

onde  $P_i^k P_i^{k+1}$  é o vetor de deslocamento do ponto  $P_i^k$  ao ponto  $P_i^{k+1}$  e  $w_1$  e  $w_2$  são os pesos relacionados a medida da direção e da velocidade dos MVR, respectivamente. Neste estudo, estes parâmetros valem  $w_1 = 0,2$  e  $w_2 = 0,8$  e contribuem para a suavização das trajetórias. Note que o primeiro termo da equação (3) é zero se as três posições forem colineares (ou seja, posicionados sobre a mesma reta), enquanto que o segundo termo é zero se o deslocamento entre o primeiro e o segundo ponto for igual ao deslocamento entre o segundo e terceiro ponto. Finalmente, a minimização da função é expressa da seguinte forma:

$$\Xi = \sum_{i=1}^m \sum_{k=2}^{n-1} D_i^k(P_i^{k-1}, P_i^k, P_i^{k+1}) \quad (4)$$

onde  $m$  é o número total de trajetórias e  $n$  o número de total de passos de tempo, obtidas durante o processo de inicialização.

Para o processo de minimização da função custo são utilizados dois pesos:  $w_1$  (relacionado com a medida de direção) e  $w_2$  (relacionado com a medida de velocidade). Os valores designados a cada peso neste trabalho são  $w_1 = 0,2$  e  $w_2 = 0,8$ . A aplicação deste processo contribui para a suavização das trajetórias.

O algoritmo *TRACK* utiliza estimadores esféricos não-paramétricos para produção de campos diagnósticos estatísticos, que fazem parte de um conjunto de funções de densidade probabilísticas (FDP), conhecidas como funções de *Kernel*. De fato, uma das vantagens de se utilizar estes estimadores é a atribuição de pesos para cada ponto de dado, fazendo com que os parâmetros destas funções variem localmente para cada situação. A determinação destes pesos é feita de acordo com a distância de separação

entre os dados e os pontos estimados estatisticamente.

A aplicação das funções de *Kernel* é bastante útil no controle do formato e do índice de suavização das trajetórias dos sistemas. Agregado a estes estimadores está o parâmetro de suavização ( $C_n$ ), cujo valor é atribuído de forma objetiva, dependendo do tamanho da rede de dados disponível e da sua distribuição. A aplicação do ( $C_n$ ) na forma adaptativa contribui para detecção de características em um ambiente desorganizado, tornando os contornos das trajetórias dos MVR mais suaves. Assim, o uso desta técnica permite uma maior confiabilidade na distribuição dos dados, reduzindo consideravelmente a ocorrência de erros sistemáticos.

O conjunto de densidades estatísticas produzido pelo *TRACK* é apresentado abaixo, baseado no que foi descrito por Mesquita (2006):

**(a) Densidade de *Track*:** Esta é a única densidade que não é obtida através das FDP, correspondendo ao número de sistemas ou trajetórias encontrados sobre uma região. Cada sistema (VCAN) contribui com uma unidade e sua representação é estimada sobre a posição de máxima intensidade. A densidade de *track* é medida pelo número de sistemas por unidade de área ( $10^6 \text{ km}^2$ ) e por estação do ano.

**(b) Densidade de Característica (*Feature Density*):** É medida através da quantidade de todos os MVR ao longo da trajetória de um sistema, ou seja, cada passo de tempo contribui para uma unidade. Os sistemas que deslocam-se lentamente (ou permanecem estacionários quando a restrição de deslocamento permite) contribuem para o aumento da densidade de característica sobre uma região. A unidade é medida pelo número de MVR (ou posições de mínima VR) por unidade de área ( $10^6 \text{ km}^2$ ) e por estação do ano.

**(c) Densidade de Formação (*Genesis Density*):** Esse campo mostra as regiões preferenciais onde costumam-se ocorrer a formação dos sistemas, sendo determinada a partir da posição do MVR no primeiro passo de tempo de uma trajetória. A unidade é

expressa pelo número de casos por unidade de área ( $10^6 \text{ km}^2$ ) e por estação do ano.

**(d) Densidade de Dissipação (Lysis Density):** É oposto à densidade de formação, ou seja, corresponde às regiões onde os sistemas terminam (dissipam-se). Esse campo é calculado a partir da posição associada ao último instante da trajetória do sistema e sua unidade é idêntica à densidade de formação.

**(e) Intensidade:** Este parâmetro mede a intensidade dos sistemas através da posição de máxima intensidade sobre a trajetória do sistema. A unidade é medida em  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ .

**(f) Velocidade Média da Componente Zonal:** Esse campo apresenta a velocidade média de propagação dos sistemas em relação ao eixo x. A unidade é expressa em m/s.

**(g) Velocidade Média da Componente Meridional:** Esse campo apresenta a velocidade média de propagação dos sistemas em relação ao eixo y. A unidade é expressa em m/s.

**(h) Tempo Médio de Vida:** Esse parâmetro determina a duração média dos sistemas que atuaram sobre a região de interesse. A medida é feita em dias.

**(i) Taxa média de crescimento/decaimento:** Esse campo mostra a variação média do campos de vorticidade relativa ao longo de um período de 6 horas. A unidade dessa medida é expressa em  $\text{dia}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ .

## ANEXO A

Classificação do rastreamento dos VCAN quanto ao período de atuação (segunda coluna), habilidade (terceira coluna) e situação nas AC (quarta coluna). A classificação corresponde ao critério escolhido e as análises compreendem o período de janeiro à dezembro de 2003.

CRITÉRIO	PERÍODO DE ATUAÇÃO	HABILIDADE	SITUAÇÃO NAS AC
T=3 K; VP=2 UVP; CZV=8 m/s	<b>Janeiro</b>		
	Dia 2 18 UTC - Dia 10 18 UTC	acertou	VCAN (cavado antes e depois do tempo)
	Dia 10 18 UTC - Dia 19 00 UTC	acertou	VCAN (cavado antes e depois do tempo)
	Dia 17 18 UTC - Dia 26 00 UTC	acertou	VCAN (perfeito)
	Dia 18 06 UTC - Dia 20 18 UTC	acertou	VCAN (cavado depois do tempo)
	Dia 22 12 UTC - Dia 31 12 UTC	acertou	VCAN (cavado antes e depois do tempo)
	<b>Fevereiro</b>		
	Dia 1 00 UTC - Dia 4 18 UTC	acertou	VCAN (perfeito)
	Dia 7 18 UTC - Dia 8 00 UTC	falhou	cavado com grande amplitude
	Dia 8 06 UTC - Dia 13 18 UTC	acertou	VCAN (perfeito)
	Dia 13 18 UTC - Dia 16 12 UTC	acertou	VCAN (cavado antes e depois do tempo)
	Dia 21 06 UTC - Dia 25 18 UTC	acertou	VCAN (cavado antes e depois do tempo)
	Dia 19 12 UTC - Dia 20 12 UTC	falhou	cavado com grande amplitude
	<b>Março</b>		
	Dia 1 00 UTC - Dia 13 12 UTC	acertou	VCAN (perfeito)
	Dia 14 06 UTC - Dia 22 18 UTC	acertou	VCAN (perfeito)
	Dia 25 00 UTC - Dia 29 06 UTC	acertou	VCAN (cavado antes e depois do tempo)
Dia 30 18 UTC - Dia 31 18 UTC	acertou	VCAN (cavado antes do tempo)	
<b>Abril</b>			
Dia 1 00 UTC - Dia 4 00 UTC	acertou	VCAN (perfeito)	
Dia 14 06 UTC - Dia 17 12 UTC	acertou	VCAN (cavado antes e depois do tempo)	
Dia 26 18 UTC - Dia 30 18 UTC	acertou	VCAN (cavado antes do tempo)	
<b>Maiο</b>			
Dia 1 00 UTC - Dia 5 00 UTC	acertou	VCAN (cavado depois do tempo)	
Dia 4 00 UTC - Dia 6 00 UTC	acertou	VCAN (cavado antes do tempo)	

	Dia 18 06 UTC - Dia 19 00 UTC	falhou	cavado
	Dia 22 12 UTC - Dia 23 06 UTC	acertou	VCAN (perfeito)
	Dia 17 18 UTC - Dia 21 00 UTC	acertou	VCAN (perfeito)
	<b>Junho</b>		
	Dia 1 00 UTC - Dia 2 18 UTC	acertou	VCAN (cavado depois do tempo)
	Dia 2 12 UTC - Dia 8 00 UTC	acertou	VCAN (cavado antes e depois do tempo)
	Dia 20 18 UTC - Dia 22 00 UTC	falhou	cavado
	Dia 28 12 UTC - Dia 30 18 UTC	acertou	VCAN (cavado depois do tempo)
	<b>Julho</b>		
	Dia 1 00 UTC - Dia 6 00 UTC	acertou	VCAN (cavado depois do tempo)
	<b>Agosto</b>		
	Dia 17 18 UTC - Dia 19 06 UTC	falhou	cavado
	Dia 19 12 UTC - Dia 27 00 UTC	acertou	VCAN (cavado antes e depois do tempo)
	Dia 24 18 UTC - Dia 26 12 UTC	acertou	VCAN (cavado depois do tempo)
	Dia 27 00 UTC - Dia 29 00 UTC	acertou	VCAN (posição deslocada)
	Dia 29 06 UTC - Dia 31 18 UTC	acertou	VCAN (perfeito)
	Dia 26 06 UTC - Dia 27 18 UTC	acertou	VCAN (cavado antes e depois do tempo)
	Dia 25 18 UTC - Dia 29 00 UTC	falhou	cavado (VCAN depois do tempo)
	<b>Setembro</b>		
	Dia 9 06 UTC - Dia 14 12 UTC	acertou	VCAN (cavado antes e depois do tempo)
	<b>Outubro</b>		
	Dia 31 00 UTC - Dia 31 18 UTC	acertou	VCAN (cavado antes do tempo)
	<b>Novembro</b>		
	Dia 1 00 UTC - Dia 8 12 UTC	acertou	VCAN (cavado antes e depois do tempo)
	Dia 18 12 UTC - Dia 21 00 UTC	acertou	VCAN (cavado antes e depois do tempo)
	Dia 24 06 UTC - Dia 30 18 UTC	acertou	VCAN (cavado antes e depois do tempo)
	<b>Dezembro</b>		
	Dia 2 06 UTC - Dia 5 12 UTC	acertou	VCAN (cavado antes do tempo)
	Dia 4 06 UTC - Dia 8 12 UTC	acertou	VCAN (cavado antes do tempo)
	Dia 5 06 UTC - Dia 10 06 UTC	falhou	cavado
	Dia 13 00 UTC - Dia 21 12 UTC	acertou	VCAN (cavado antes e depois do tempo)
	Dia 28 00 UTC - Dia 31 18 UTC	acertou	VCAN (cavado antes do tempo)



## **PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE**

### **Teses e Dissertações (TDI)**

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

### **Notas Técnico-Científicas (NTC)**

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programas de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

### **Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)**

São propostas de projetos técnico científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

### **Publicações Seriadas**

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Constam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

### **Pré-publicações (PRE)**

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.

### **Manuais Técnicos (MAN)**

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

### **Relatórios de Pesquisa (RPQ)**

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

### **Publicações Didáticas (PUD)**

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

### **Programas de Computador (PDC)**

São a sequência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. Aceitam-se tanto programas fonte quanto os executáveis.