



AVALIAÇÃO DA CHUVA EM EPISÓDIOS DE ZCAS NA REGIÃO SUDESTE DO BRASIL - ESTUDO DE CASO: BACIA DO RIO GRANDE

André Felipe de Matos Lopes

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador(es): Otto Corrêa Rotunno Filho
Audálio Rebelo Torres Júnior

Rio de Janeiro
Janeiro de 2016

AValiação DA CHUVA EM EPISÓDIOS DE ZCAS NA REGIÃO SUDESTE DO
BRASIL - ESTUDO DE CASO: BACIA DO RIO GRANDE

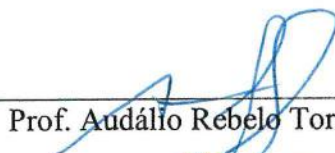
André Felipe de Matos Lopes

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

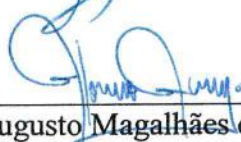
Examinada por:



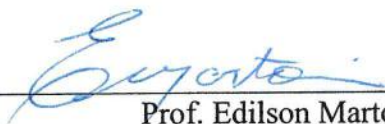
Prof. Otto Corrêa Rotunno Filho, Ph. D.



Prof. Audálio Rebele Torres Junior, D. Sc.



Prof. Afonso Augusto Magalhães de Araujo, D. Sc.



Prof. Edilson Marton, D. Sc.



Dr. Luciano Nóbrega Rodrigues Xavier, D. Sc.



Prof. Luiz Fernando Loureiro Legey, Ph. D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JANEIRO DE 2016

Lopes, André Felipe de Matos.

Avaliação da Chuva em Episódios de ZCAS na Região Sudeste do Brasil - Estudo de Caso: Bacia do Rio Grande/ André Felipe de Matos Lopes. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2016.

XV, 115 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Otto Corrêa Rotunno Filho

Audálio Rebelo Torres Junior

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 99-107.

1. ZCAS. 2. iZCAS. 3. TRMM. 4. GRACE. 5. Setor Elétrico. I. Rotunno Filho, Otto Corrêa *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

*“Nós todos temos, somente, uma vida,... e por ela devemos dar o melhor de
nós a cada instante ”*
(Mestre Ancião)

“Uma lâmpada brilha ao máximo antes de se apagar completamente.”
(Mestre Kame)

“Não é importante a rapidez com que se aprende, mas sim com que se aprenda.”
(Mestre dos Magos)

“ Do. Or do not. There is no try.”
(Mestre Yoda)

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, agradeço a Deus, que nos alimenta com saúde, sabedoria e força para concluir mais esta etapa, e a Nossa Senhora, que me deu segurança e iluminou o meu caminho.

À minha mãe, Ana Maria, pela criação exemplar e pelos momentos que passamos juntos, sempre estando ao meu lado e auxiliando-me sempre no que foi necessário.

À minha esposa, Evelyn, pela compreensão e carinho durante o período do mestrado.

Aos colegas da turma de mestrado, em especial aos amigos Jorge Lajo, Rafael Rangel e Gabriela Joly, sendo esses dois últimos um carinho especial pelo apoio, amizade e colaboração para o término do mestrado.

Ao amigo Ricardo Marcelo, pela amizade, conversas e apoio fundamental, estando disponível 24h por dia durante todo o período.

Ao amigo Eugenio Neiva, pela amizade e pela assistência sempre com um sorriso e uma palavra amiga.

À equipe do Alerta de Cheias do INEA, pelas conversas, idéias e carinho de todos.

Aos meus orientadores, Otto Corrêa Rotunno Filho e Audálio Rebelo Torres Júnior, pelo apoio dado ao desenvolvimento desta dissertação, sobretudo pela determinação, em todos os momentos, na busca pelo ideal da excelência na vida acadêmica e profissional.

À CAPES, pelo apoio financeiro concedido através da bolsa de mestrado.

À equipe do Laboratório de Recursos Hídricos e Meio Ambiente (LABH2O) do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, em especial à Lígia Maria Nascimento de Araújo e ao Luciano Nóbrega Rodrigues Xavier, pelo apoio fornecido para a elaboração do texto da dissertação.

À equipe do Laboratório de Métodos Computacionais em Engenharia - LAMCE, em especial ao Prof. Luiz Landau e à Hatsue Takanaka, pelo inestimável apoio oferecido para concluir, da melhor maneira possível, o mestrado.

Agradeço ao suporte da FAPERJ pelo apoio financeiro através dos projetos PEC/COPPE - FAPERJ 014/2010 (2010-2012), FAPERJ – Processo E-26/103.116/2011 (2012-2014), FAPERJ – Pensa Rio – Edital 19/2011 (2012-2014) – E26/110.753/2012, FAPERJ – Pensa Rio – Edital 34/2014 (2014-2017) –E-26/010.002980/2014 e ao CNPq Edital Universal No. 14/2013 – Processo 485136/2013-9 bem como à Secretaria de Educação Superior (SESu) – Ministério da

Educação (MEC) - FNDE – Programa de Educação Tutorial - PET CIVIL UFRJ, pelo contínuo apoio à pesquisa científica no Brasil.

Ao corpo docente e aos funcionários do Programa de Engenharia Civil, pelo convívio e atenção. A todos aqueles que, de uma forma direta ou indireta, ainda que não aqui mencionados, contribuíram para a finalização desta dissertação.

Obrigado a todos!

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

AVALIAÇÃO DA CHUVA EM EPISÓDIOS DE ZCAS NA REGIÃO SUDESTE DO
BRASIL – ESTUDO DE CASO: BACIA DO RIO GRANDE

André Felipe de Matos Lopes

Janeiro/2016

Orientador(es): Otto Corrêa Rotunno Filho
Audálio Rebelo Torres Júnior

Programa: Engenharia Civil

O presente trabalho objetiva apresentar uma análise da chuva em episódios de ZCAS na bacia do rio Grande, situada no sudeste do Brasil. Observa-se a relação da chuva oriunda de eventos de ZCAS com o balanço hídrico e a correspondente vazão natural da usina hidroelétrica de Furnas (UHE-Furnas), que representa uma das principais fontes de fornecimento de energia elétrica do Brasil, sendo responsável por cerca de 15% do abastecimento nacional de energia. A análise apoiar-se-á no uso de técnicas de sensoriamento remoto, com o suporte dos satélites Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) e Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE), conjuntamente com modelagem hidrológica chuva-vazão, enfatizando-se a sua relação com a proposição do índice IZCAS, que procura estabelecer uma melhor compreensão da conexão entre os fenômenos hidrometeorológicos que ocorrem na Amazônia com os impactos em termos de recursos hídricos na região sudeste do Brasil e, conseqüentemente, no armazenamento de água de reservatórios da setor elétrico aí localizados. A partir desse referencial metodológico, o trabalho contribui para a melhor compreensão entre as chuvas ocorridas nos episódios de ZCAS, na região do rio Grande, e suas relações com a resposta hidrológica nas vazões e operação de aproveitamentos hidroenergéticos nessa bacia hidrográfica.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

RAINFALL IMPACT OF EPISODES ZCAS IN THE SOUTHEAST REGION OF BRAZIL
– CASE STUDY: RIO GRANDE RIVER WATERSHED

André Felipe de Matos Lopes

January/2016

Advisors: Otto Corrêa Rotunno Filho

Audálio Rebelo Torres Júnior

Department: Civil Engineering

This work presents a rain analysis in SACZ episodes in the Rio Grande basin, situated in southeastern Brazil. It should be noted the relationship between the rain arising from SACZ events with the water balance and the corresponding natural flow of the hydroelectric plant of Furnas (HPP-Furnas), representing a major source of supply of electric energy in Brazil, accounting for about 15% of the national energy supply. The analysis will take into account the use of remote sensing techniques, with the support of satellites Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) and Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE), jointly with rainfall-runoff hydrological modeling, emphasizing its relationship with the proposition of IZCAS index, which seeks to establish a better understanding of the connection between the hydro-meteorological phenomena that occur in the Amazon with the impacts in terms of water resources in southeastern Brazil and consequently in the electricity sector reservoir water storage located there. From this methodological framework, the work contributes to the better understanding between the rains that occurred in SACZ in the region of the Rio Grande, and its relations with the hydrological response in flow rates and utilizations hydropower operation in this watershed.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	xv
1.1 Considerações iniciais	1
1.2 Objetivos	4
1.3 Escopo da dissertação	5
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1 - Sistema elétrico brasileiro e a operação de reservatórios	7
2.1.1 Volume Útil do Reservatório – ONS	12
2.2 Origens e características da ZCAS	15
2.2.1 Aspectos globais	15
2.2.2 Conexões entre a ZCAS e outros fenômenos	16
2.2.3 Formação da ZCAS	17
2.2.4 Características da ZCAS.....	17
2.3 ZCAS e Sensoriamento Remoto	21
2.3.1 Estimativa de precipitação pelo satélite TRMM	21
2.3.2 Estimativa de nível de água pelo sistema GRACE de satélites	25
2.4 ZCAS e Modelagem Hidrológica.....	28
2.5 Modelo SMAP (Soil Moisture Accounting Procedure).....	29
CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA.....	35
3.1 Referencial metodológico.....	35
3.1.1 Indicador simplificado iZCASref	36
3.1.2 Indicador aperfeiçoado iZCAS	41
3.2 Avaliação dos indicadores iZCASref e iZCAS	42
3.3 Aplicação da metodologia ao estudo de caso.....	44
3.3.1 Média de chuva diária na área de drenagem da UHE Furnas.....	45
3.3.2 Nível mensal do reservatório	46
3.3.3 Nível de água equivalente (<i>equivalent water level</i>)	46
3.3.4 Dias com ocorrência de ZCAS em dado dia.....	46
3.3.5 Procedimento de escolha do valor limiar do índice IZCASref	46
3.3.6 Procedimento de escolha do valor limiar do índice IZCAS	50
3.4 Seleção dos períodos de análise e uso do hidrograma.....	51
3.5 Dados utilizados.....	53
CAPITULO 4 - ESTUDO DE CASO: BACIA DO RIO GRANDE.....	56
4.1 Seleção do caso para estudo	56
4.1.2 Escolha dos períodos para estudo.....	62

CAPÍTULO 5 – RESULTADOS DO ÍNDICE IZCASREF	65
5.1 Estudo de Caso 1 - verão de 2009/2010.....	65
5.1.1 Primeiro episódio	66
5.1.2 Segundo episódio	67
5.1.3 Terceiro episódio.....	69
5.1.4 Quarto episódio	70
5.1.5 Quinto episódio.....	71
5.1.6 Sexto episódio.....	72
5.1.7 Sétimo episódio	73
5.1.8 Síntese do caso.....	74
5.2 Estudo de caso 2 – verão de 2010/2011.....	76
5.2.1 Primeiro episódio	77
5.2.2 Segundo episódio	78
5.2.3 Terceiro episódio.....	79
5.2.4 Quarto episódio	80
5.2.5 Quinto episódio.....	81
5.2.6 Sexto episódio.....	82
5.2.7 Sétimo episódio	83
5.2.8 Oitavo episódio	84
5.2.9 Síntese do caso.....	85
CAPÍTULO 6 – RESULTADOS DO ÍNDICE IZCAS	87
6.1 Estudo de Caso 1 - verão de 2009/2010.....	87
6.1.1 Episódio 02.....	89
6.1.2 Episódio 05.....	90
6.1.2 Episódio 07.....	92
6.1.3 Episódio adicional – 20 a 26 de fevereiro de 2010	93
6.2 Síntese da análise para o indicador iZCAS	94
CAPITULO 7 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	96
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	99
ANEXO A - Script Shell usado para obter os dados do TRMM.....	108
ANEXO B - Umidade específica e vento em 850hpa.....	109

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	<i>Diagrama esquemático do conceito do ciclo hidrológico. Fonte: www.mma.gov.br/agua/recursos-hidricos/aguas-subterraneas/ciclo-hidrologico, acesso em 25/06/ 2015.</i>	03
Figura 2.1	<i>Distribuição espacial da malha de transmissão de energia que interliga os quatro subsistemas e suas cargas (Fonte: ONS, 2014).</i>	11
Figura 2.2	<i>Diagrama esquemático do processo de decisão no regime de operação em que se prioriza o menor custo (Fonte: Guilhon, 2002).</i>	12
Figura 2.3	<i>Diagrama esquemático de um reservatório, descrito em função de seus níveis e volumes operacionais característicos (Fonte:ONS, ano 2014).</i>	13
Figura 2.4	<i>Ilustração do volume mínimo ou morto de um reservatório (Fonte: ONS, ano 2014)</i>	14
Figura 2.5	<i>Geometria de varredura do imageador em microondas TMI, radar de precipitação PR e sistema de sensores na região do infravermelho e visível (Visible and InfraRed System) a bordo do TRMM (Fonte:adaptado de Kummerow et al., 1988).</i>	23
Figura 2.6	<i>Esquema do transporte de água entre a atmosfera, a terra e o oceano.</i>	27
	<i>(Fonte: adaptado de SEO et al., 2008).</i>	
Figura 2.7	<i>Esquema do modelo SMAP original (3 reservatórios).</i>	30
Figura 2.8	<i>Esquema do modelo SMAP (4 reservatórios).</i>	31
Figura 2.9	<i>Figura 2.9 - Esquema do modelo SMAP aplicado à bacia do Rio Grande (4 reservatórios).</i>	31
Figura 3.1	<i>Área de interesse para o cálculo do iZCAS, usando o FNL/GFS, com a diagonal em vermelho, indicando a seção vertical com nove pontos de grade ao longo</i>	37
Figura 3.2	<i>Rosa dos ventos com a indicação dos ângulos de ataque</i>	41
Figura 3.3	<i>Representação gráfica do cálculo do parâmetro de umidade relativa do ar para 00Z do dia 1 de fevereiro de 2009 ao longo de 9 pontos da diagonal sobre a área de estudo - (a) direção do vento e correspondente indicação se há contribuição (valor 1) ou não (valor zero); (b) produto da multiplicação da velocidade pela umidade relativa do ar.</i>	
Figura 3.4	<i>Fluxo de tratamento dos dados: chuva média na área de drenagem associada a UHE Furnas, a ocorrência de ZCAS, e a vazão natural na UHE Furnas, além do volume útil e nível de água equivalente, referência do nível do reservatório.</i>	45
Figura 3.5	<i>Diagrama esquemático de um hidrograma segundo Lecastre e Franco (1984).</i>	52
Figura 4.1	<i>Delimitação da bacia do Rio Grande, suas sub-bacias e postos pluviométricos instalados, com o vermelho indicando cotas mais altas e o verde as mais baixas (Braga et al.,2014).</i>	57
Figura 4.2	<i>Delimitação da área de drenagem considerando a UHE Furnas como exutório</i>	58
Figura 4.3	<i>Mapa da bacia do rio Grande, delimitada pelo traçado amarelo, com os círculos representando os pontos aonde são obtidos dados de nível de água equivalente do GRACE, e os pontos vermelhos representando a posição dos AHES</i>	59
Figura 4.4	<i>Mapa da rede de postos pluviométricos da bacia rio Grande até a confluência com o rio Sapucaí</i>	60
Figura 4.5	<i>As três regiões distintas, que deveriam ser monitoradas para</i>	61

	<i>avaliar o mecanismo de estabelecimento da ZCAS na América do Sul (Seabra, 2002).</i>	
Figura 4.6	<i>Delimitação das bacias que integram o SIN na AC-ZCAS (vermelho), identificando as bacias associadas aos rios Grande (amarelo), Doce (rosa), Tietê (ciano) e Paranaíba (magenta).</i>	62
Figura 4.7	<i>Comparativo das ocorrências de ZCAS identificadas no Climanalise (em lilás) e a detecção pelo iZCAS (em verde). Verifica-se a boa coerência entre os indicadores no verão 2010/2011.</i>	63
Figura 4.8	<i>Dados de GRACE Mensal para o período de janeiro de 2003 a dezembro de 2012 e dados de volume útil do mesmo período.</i>	64
Figura 5.1	<i>(a) Chuva diária obtida com média da área usando o TRMM, ocorrência de ZCAS segundo CPTEC (vermelho) e de acordo com o iZCASref (verde); (b) hidrograma do verão de 2009/2010.</i>	65
Figura 5.2	<i>Distribuição espacial da chuva acumulada no período de 1 a 9 de dezembro de 2009, estimada a partir dos dados do TRMM. Em vermelho, a delineação da bacia do rio Grande; em ocre, a divisão estadual; o triângulo preto representa a localização da UHE-Furnas.</i>	67
Figura 5.3	<i>Distribuição espacial da chuva acumulada entre 25 Dez 2009 e 3 Jan 2010, estimada a partir dos dados do TRMM. Em vermelho, a delineação da bacia do rio Grande; em ocre, a divisão estadual. O triângulo preto representa a localização da UHE Furnas, e as linhas azuis, os rios de primeira ordem. Os padrões de cores estão associados aos valores da escala, em milímetros.</i>	69
Figura 5.4	<i>Distribuição espacial da chuva acumulada no período de 6 a 30 de janeiro de 2010, estimada a partir dos dados do TRMM. Em vermelho, a delineação da bacia do rio Grande; em ocre, a divisão estadual. O triângulo preto representa a localização da UHE Furnas, e as linhas azuis, os rios de primeira ordem. Os padrões de cores estão associados aos valores da escala, em milímetros.</i>	70
Figura 5.5	<i>Distribuição espacial da chuva acumulada no período de 9 de fevereiro a 12 de fevereiro de 2010, estimada a partir dos dados do TRMM. Em vermelho, a delineação da bacia do rio Grande; em ocre, a divisão estadual. O triângulo preto representa a localização da UHE Furnas, e as linhas azuis, os rios de primeira ordem. Os padrões de cores estão associados aos valores da escala, em milímetros.</i>	71
Figura 5.6	<i>Distribuição espacial da chuva acumulada no período de 28 de fevereiro a 4 de março de 2010, estimada a partir dos dados do TRMM. Em vermelho, a delineação da bacia do rio Grande; em ocre, a divisão estadual. O triângulo preto representa a localização da UHE Furnas, e as linhas azuis, os rios de primeira ordem. Os padrões de cores estão associados aos valores da escala, em milímetros.</i>	72
Figura 5.7	<i>Distribuição espacial da chuva acumulada no período de 28 de fevereiro a 4 de março de 2010 estimada a partir dos dados do TRMM. Em vermelho, a delineação da bacia do rio Grande; em ocre, a divisão estadual. O triângulo preto representa a localização da UHE Furnas, e as linhas azuis, os rios de primeira ordem. Os padrões de cores estão associados aos valores da escala, em milímetros.</i>	73
Figura 5.8	<i>Distribuição espacial da chuva acumulada no período de 25 a 30 de março de 2010 estimada a partir dos dados do TRMM. Em vermelho, a delineação da bacia do rio Grande; em ocre, a divisão estadual. O triângulo preto representa a localização da UHE Furnas, e as linhas azuis, os rios de primeira ordem. Os padrões de cores estão associados aos valores da escala, em milímetros.</i>	74
Figura 5.9	<i>Volume útil do reservatório da UHE Furnas versus altura equivalente da água estimada pelo GRACE no Caso 1.</i>	75

Figura 5.10	<i>Chuva diária obtida com média da área usando o TRMM, ocorrência de ZCAS segundo o CPTEC (vermelho) e segundo o iZCAS (verde) (a), e hidrograma (b), verão de 2010/2011.</i>	76
Figura 5.11	Distribuição espacial da chuva acumulada no período de 1 a 8 de dezembro de 2010 estimada a partir dos dados do TRMM. Em vermelho, a delimitação da bacia do rio Grande; em ocre, a divisão estadual. O triângulo preto representa a localização da UHE Furnas, e as linhas azuis, os rios de primeira ordem. Os padrões de cores estão associados aos valores da escala, em milímetros.	78
Figura 5.12	Distribuição espacial da chuva acumulada no período de 11 a 18 de dezembro de 2010 estimada a partir dos dados do TRMM. Em vermelho, a delimitação da bacia do rio Grande, em ocre, a divisão estadual. O triângulo preto representa a localização da UHE Furnas e as linhas azuis, os rios de primeira ordem. Os padrões de cores estão associados aos valores da escala, em milímetros.	79
Figura 5.13	Distribuição espacial da chuva acumulada no período de 23 de dezembro a 7 de janeiro de 2011 estimada a partir dos dados do TRMM. Em vermelho, a delimitação da bacia do rio Grande; em ocre, a divisão estadual. O triângulo preto representa a localização da UHE Furnas, e as linhas azuis, os rios de primeira ordem. Os padrões de cores estão associados aos valores da escala, em milímetros.	80
Figura 5.14	Distribuição especial da chuva acumulada no período de 9 a 16 de janeiro de 2011 estimada a partir dos dados do TRMM. Em vermelho, a delimitação da bacia do rio Grande; em ocre, a divisão estadual. O triângulo preto representa a localização da UHE Furnas, e as linhas azuis, os rios de primeira ordem. Os padrões de cores estão associados aos valores da escala, em milímetros.	81
Figura 5.15	Distribuição especial da chuva acumulada no período de 18 a 21 de janeiro de 2011 estimada a partir dos dados do TRMM. Em vermelho, a delimitação da bacia do rio Grande; em ocre, a divisão estadual. O triângulo preto representa a localização da UHE Furnas, e as linhas azuis, os rios de primeira ordem. Os padrões de cores estão associados aos valores da escala, em milímetros.	82
Figura 5.16	<i>Figura 5.16 - Distribuição espacial da chuva acumulada no período de 9 a 16 de fevereiro de 2011 estimada a partir dos dados do TRMM. Em vermelho, a delimitação da bacia do rio Grande; em ocre, a divisão estadual. O triângulo preto representa a localização da UHE Furnas, e as linhas azuis, os rios de primeira ordem. Os padrões de cores estão associados aos valores da escala, em milímetros.</i>	83
Figura 5.17	<i>Distribuição espacial da chuva acumulada no período de 28 de fevereiro a 9 de março estimada a partir dos dados do TRMM. Em vermelho, a delimitação da bacia do rio Grande; em ocre, a divisão estadual. O triângulo preto representa a localização da UHE Furnas, e as linhas azuis, os rios de primeira ordem. Os padrões de cores estão associados aos valores da escala, em milímetros.</i>	84
Figura 5.18	Distribuição espacial da chuva acumulada no período de 12 a 18 de março estimada a partir dos dados do TRMM. Em vermelho, a delimitação da bacia do rio Grande, em ocre, a divisão estadual. O triângulo preto representa a localização da UHE Furnas, e as linhas azuis, os rios de primeira ordem. Os padrões de cores estão associados aos valores da escala, em milímetros.	85
Figura 5.19	Volume útil do reservatório da UHE Furnas versus altura equivalente da água estimada pelo GRACE no Caso 2.	86
Figura 6.1	(a) Chuva diária obtida com média da área usando o TRMM, ocorrência de ZCAS segundo CPTEC (vermelho) e de acordo com	88

o iZCAS (verde); (b) hidrograma do verão de 2009/2010.

Figura 6.2	- Distribuição espacial da umidade específica do ar acumulada e vento no período de 25 de dezembro de 2009 a 3 de janeiro de 2010, estimada a partir dos dados do GFS.	90
Figura 6.3	Distribuição espacial da umidade específica acumulada e vento no período de 28 de fevereiro a 4 de março de 2010, estimada a partir dos dados do GFS.	91
Figura 6.4	<i>Distribuição espacial da umidade específica acumulada e vento no período de 25 de março a 31 de março de 2010, estimada a partir dos dados do GFS.</i>	93
Figura 6.5	<i>Distribuição espacial da umidade específica acumulada e vento no período de 20 de fevereiro a 26 de fevereiro de 2010, estimada a partir dos dados do GFS.</i>	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	<i>Tabela de contingência - iZCASref ou iZCAS versus ZCAS.</i>	42
Tabela 3.2	<i>Frequências de observação de classes definidas segundo as categorias detecção/não detecção e ocorrência/não ocorrência com base nos valores limites de iZCASref de 10 a 90, com detalhamento de 20 a 30 – período de controle.</i>	47
Tabela 3.3	<i>Índices estatísticos calculados com base nos valores limítrofes do índice iZCASref – período de controle.</i>	48
Tabela 3.4	<i>Tabela de contingência com valor limítrofe de 25 para o índice iZCASref – período de controle.</i>	48
Tabela 3.5	<i>Índices estatísticos de desempenho do indicador iZCASref para o valor limítrofe de 25 – período de controle.</i>	48
Tabela 3.6	<i>Frequências de observação de classes definidas segundo as categorias detecção/não detecção e ocorrência/não ocorrência com base nos valores limítrofes de iZCASref de 10 a 90, com detalhamento de 20 a 30 – período de 11 anos.</i>	49
Tabela 3.7	<i>Índices estatísticos calculados com base nos valores limítrofes do índice iZCASref – período de 11 anos.</i>	49
Tabela 3.8	<i>Frequências de observação de classes definidas segundo as categorias detecção/não detecção e ocorrência/não ocorrência com base nos valores limítrofes de iZCAS de 10 a 80, com detalhamento de 60 a 70 – período de 11 anos.</i>	50
Tabela 3.9	<i>Índices estatísticos calculados com base nos valores limítrofes do índice iZCASref – período de 11 anos.</i>	50
Tabela 3.10	<i>Índices estatísticos de desempenho do indicador iZCASref para o valor limite de 60 – período de 11 anos</i>	51
Tabela 3.12	<i>Base de dados do estudo</i>	54
Tabela 5.1	<i>Episódios de ZCAS do Caso 1 e chuva média diária acumulada estimada com o TRMM na área de drenagem da UHE-Furnas ao longo dos períodos dos episódios identificados</i>	66
Tabela 5.2	<i>Episódios de ZCAS do Caso 2 e chuva média diária acumulada estimada com o TRMM na área de drenagem da UHE-Furnas ao longo dos períodos dos episódios.</i>	77
Tabela 6.1	<i>Alguns episódios do Caso 1 e chuva média diária acumulada estimada com o TRMM na área de drenagem da UHE-Furnas ao longo dos períodos dos episódios identificados.</i>	52

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

O Brasil goza de condições muito favoráveis para a geração de energia, pois o elemento primário da produção, a água, é, em geral, abundante e está disponível na maior parte do país, além de ser uma fonte energética, em princípio, limpa, que não polui nem contribui, de forma direta, para a emissão de gases de efeito estufa. Por outro lado, estudos relacionados à produção de gases de efeito estufa por reservatórios de armazenamento do setor elétrico têm sido objeto de investigação (Rocha, 2009). Complementarmente, cabe ainda observar que, segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), 78,9% da energia do país são gerados por usinas hidrelétricas (ONS, 2013a).

Essa predominância de um único elemento, entretanto, faz com que oscilações na disponibilidade de água associadas a outros fatores – desequilíbrios entre oferta e demanda de energia, políticas de investimento e de preços, eventos de secas e enchentes – causem recorrentes crises de abastecimento de energia, os chamados “apagões”, de graves consequências para o país. Assim foi, por exemplo, no período de 1998 a 2001, quando houve perdas de R\$ 54,2 bilhões, conforme estimativa do Tribunal de Contas da União (Pinto, 2015).

A situação de pronunciada escassez hídrica com impacto no setor hidroelétrico repete-se desde pelo menos 2010. Nos anos recentes, as restrições hídricas têm atingido, de forma severa, o sudeste brasileiro, em especial a cidade de São Paulo, e se estendido para Minas Gerais, Rio de Janeiro e Espírito Santo, além de São Paulo. No Nordeste, já conhecido por limitações pluviométricas históricas em sua porção setentrional, a escassez abrange inclusive o abastecimento humano e a produção alimentar.

Todas essas questões remeteram a reflexões sobre o modelo de armazenamento, distribuição e uso de água no país e sobre as carências da infraestrutura hídrica de forma geral. Seguindo-se à crise 1998-2001 no setor hidroelétrico, os fatores ligados a políticas públicas de fornecimento de energia, de planejamento estratégico e de planejamento operacional foram equacionados por meio de uma extensa e complexa reorganização do setor energético por meio de legislação específica.

Inicialmente, o governo federal criou o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), pela Lei nº 9.648/1998, cujas atribuições são coordenar e controlar a operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado

Nacional (SIN), sob a fiscalização e regulação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

Em 2004, pelas Leis nº 10.847 e 10.848 e Decreto nº 5.163, o governo criou os seguintes entes: uma entidade responsável pelo planejamento de longo prazo do setor elétrico, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE); uma instituição com a função de avaliar a segurança do suprimento de energia elétrica, o Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE); e uma instituição para dar continuidade às atividades do Mercado Atacadista de Energia (MAE), relativas à comercialização de energia elétrica no Sistema Interligado, a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE). Instituiu, ainda, dois ambientes para celebrar contratos de compra e venda: o Ambiente de Contratação Regulada (ACR), do qual participam agentes de geração e de distribuição de energia; e o Ambiente de Contratação Livre (ACL), do qual participam agentes de geração, agentes de comercialização, importadores e exportadores de energia e consumidores livres (ONS, 2015).

Contudo, em que pese todo o acerto das medidas políticas, organizacionais e administrativas, o que permanece de fato no centro da questão energética é a oferta de água, que ocorre de acordo com um ciclo natural, o ciclo hidrológico.

O conceito de ciclo hidrológico (Figura 1.1) está ligado às mudanças de fase da água, nos seus diferentes estados físicos, entre os oceanos, as geleiras e calotas polares, as águas superficiais e subterrâneas, o solo e a cobertura vegetal e a atmosfera. A liberação de calor eleva a água da superfície terrestre para a atmosfera (evaporação), e a gravidade faz com que a água, de novo condensada, caia (precipitação), e que, uma vez na superfície, circule através de linhas de água que se reúnem em rios até atingir os oceanos (escoamento superficial) ou se infiltre nos solos e nas rochas, através dos seus poros, fissuras e fraturas (escoamento subterrâneo), anotando-se que nem toda a água precipitada alcança a superfície terrestre, já que uma parte, na sua queda, é interceptada pela vegetação e volta a se evaporar (evapotranspiração).

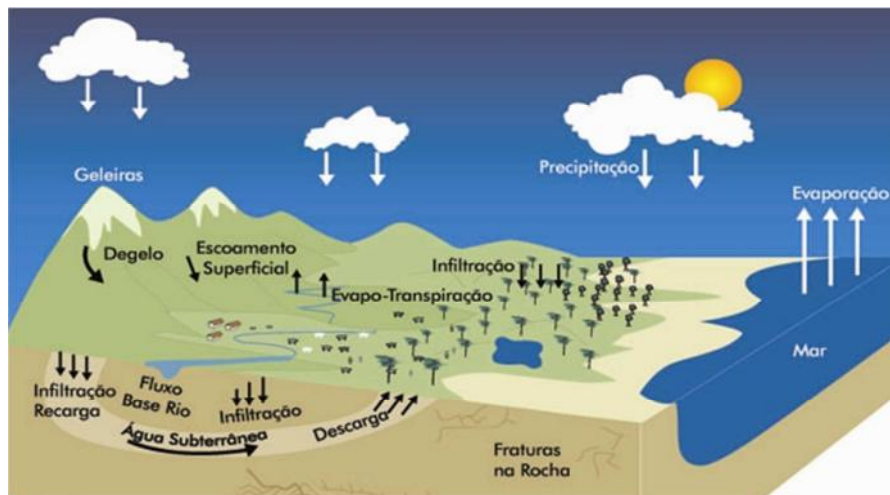


Figura 1.1- Diagrama esquemático do conceito do ciclo hidrológico. Fonte: www.mma.gov.br/agua/recursos-hidricos/aguas-subterraneas/ciclo-hidrologico, acesso em 25/06/2015.

Enquanto a quantidade de água e a velocidade com que ela circula nas etapas do ciclo hidrológico são influenciadas por fatores de diversas naturezas (como cobertura vegetal do solo, altitude, topografia, temperatura e tipo de solo), no seu ramo aéreo, o ciclo é condicionado por fenômenos meteorológicos, que se distribuem por várias escalas espaciais e temporais. As ondas longas nos ventos de oeste na alta atmosfera, os ciclones extratropicais e frentes frias e as tempestades tropicais são exemplos de fenômenos classicamente estudados.

Há outros, porém, que somente, em anos recentes, têm sido mais sistematicamente pesquisados. Entre esses, as zonas de convergência atmosférica, em particular a Zona de Convergência do Atlântico Sul – a ZCAS. A sua importância para o país decorre principalmente dos episódios de estiagem prolongada e enchentes que provoca no sul e no sudeste, conforme, por exemplo, mencionado em Rocha e Gandu (1996), com reflexos nas chuvas sobre as bacias hidrográficas que alimentam os reservatórios das principais usinas hidrelétricas e influenciam o regime hídrico de rios que têm usinas a fio d'água, ou seja, aquelas que operam sem acúmulo de água em reservatórios.

Nesse amplo contexto, situa-se o presente trabalho, cujo objetivo geral é estudar a relação entre os episódios de Zonas de Convergência do Atlântico Sul e a precipitação pluvial, para melhor compreensão dos mecanismos de abastecimento dos reservatórios das usinas hidrelétricas da região sudeste do Brasil.

Justifica-se o recorte geográfico por ser, nessa região, que ocorrem as ZCAS e em que são localizadas algumas das mais importantes usinas de geração hidroelétrica nacionais, que geram 43,6% de toda a produção hidrelétrica nacional (ONS, 2013b).

Com o estudo, espera-se contribuir para uma maior compreensão dos mecanismos que provocam as chuvas ocorridas nos episódios de ZCAS, que abastecem os reservatórios das usinas hidrelétricas da região sudeste do Brasil, de grande importância socioeconômica para o país. Desse estudo, poderá advir ainda alguma melhora na capacidade de previsão do tempo e das condições hidrológicas para melhor operação do sistema hidroelétrico brasileiro. Espera-se, adicionalmente, contribuir para a ampliação do uso das ferramentas de sensoriamento remoto na hidrometeorologia, em particular para os estudos das condições espaciais e temporais de armazenamento e do uso da água precipitada para as suas diversas aplicações.

1.2 Objetivos

O principal objetivo desta dissertação consiste em explorar o cálculo do indicador aqui denominado de *iZCAS*, contribuição propositiva original desta dissertação, para identificar complementaridade e previsibilidade para o armazenamento mensal de água nos reservatórios da região sudeste a partir do comportamento e evolução da paisagem Amazônica.

Diante dessa proposta, o presente trabalho apresenta uma análise da chuva em episódios de ZCAS, em especial, na bacia do rio Grande, afluente do rio Paraná. Examina-se a relação dessa chuva com a vazão natural da Usina Hidroelétrica de Furnas (UHE-Furnas), localizada na supracitada bacia, com foco no armazenamento de água. A análise apoiar-se-á no uso de técnicas de sensoriamento remoto, vislumbrando o potencial dos produtos oriundos dessa tecnologia na área de hidrometeorologia. Sendo assim, para estimativa da chuva na área, serão utilizados os acumulados de chuva em 24 horas obtidos através do satélite TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*). Adicionalmente, levando-se em conta o regime de vazões e nível dos reservatórios, será ainda utilizada a elevação da altura total de armazenamento de água obtida com o satélite GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*).

Espera-se, com essa diretriz, contribuir para a melhor compreensão entre as chuvas ocorridas nos episódios de ZCAS, na região do rio Grande, que se traduz em grande importância socioeconômica para o país, bem como para a ampliação do uso das ferramentas de sensoriamento remoto na hidrometeorologia, com aplicabilidade no estudo das condições espaço-temporais de armazenamento de água para melhor regular o uso social da água.

Para alcançar o objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

1. estabelecer a proposição de um indicador inicial simplificado de referência e de um indicador aperfeiçoado para identificar ZCAS, que aqui se convencionou denominar de iZCAS_{ref} e de iZCAS, respectivamente;
2. caracterizar a ZCAS – localização geográfica, épocas de ocorrência, fenômenos causadores e/ou condicionadores, características físicas associadas (regime de ventos, nebulosidade, precipitação associada), estatísticas de ocorrência – levando-se em conta, na análise, posteriormente, a capacidade preditiva de ambos os indicadores propostos iZCAS.
3. realizar, mediante o emprego de estudos de caso:
 - a. caracterização da precipitação associada à ZCAS, com vistas a quantificar os volumes de chuva;
 - b. caracterização da vazão natural afluente aos reservatórios.

1.3 Escopo da dissertação

Esta dissertação está, assim, estruturada. No Capítulo 1, baliza-se a questão em pauta, evidencia-se a sua relevância e estabelecem-se os objetivos para o estudo.

O Capítulo 2 versa sobre a fundamentação teórica e revisão bibliográfica subjacente às zonas de convergência atmosférica e ao estado atual dos conhecimentos sobre o tema.

No Capítulo 3, descreve-se a metodologia empregada: estimativa da chuva na área com dados do satélite TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission); vazão afluente e defluente e níveis dos reservatórios com dados de elevação da altura de água obtidos do experimento GRACE (Gravity Recovery and *Climate Experiment*), e modelo hidrológico chuva-vazão SMAP (*Soil Moisture Accounting Procedure*). Inclui, em especial, o cálculo dos indicadores iZCAS, especificamente desenvolvido para o estudo com vistas a estabelecer o contraste e complementaridade com respeito aos dados de satélite no que concerne a oferecer algum grau de previsibilidade às condições mensais de armazenamento de água nos reservatórios da região sudeste, mais estreitamente responsáveis pela geração de energia hidroelétrica, quando articulados por teleconexão com o comportamento dos fenômenos atmosféricos e apropriação da dinâmica da cobertura e uso do solo que afetam a Amazônia. A ocorrência e características dos episódios de ZCAS foram obtidas de levantamento

realizado na série dos periódicos “Climanálise”, do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE/MCTI).

O Capítulo 4, por sua vez, trata da caracterização das ZCAS na região de estudo, que, mais especificamente, abrange a região da bacia do rio Grande, afluente do rio Paraná. Os resultados pertinentes aos estudos de caracterização hidrológica conduzidos para a bacia do rio Grande (UHE – Furnas), de conhecida importância para o setor elétrico, são apresentados e discutidos ao final desse capítulo.

No Capítulo 5, para a região de estudo, examinou-se, com maior detalhe, a bacia contribuinte ao reservatório da usina de Furnas, avaliando-se o desempenho do índice simplificado iZCASref, proposto nesta dissertação, a partir do levantamento das séries temporais de chuva e altura equivalente de água mediante o emprego de dados TRMM e GRACE, respectivamente. Optou-se, nesta avaliação do índice iZCASref, pela escolha de dois períodos chuvosos, dezembro de 2009 a março de 2010 e dezembro de 2010 a março de 2011, mostrando a relevância da proposição.

No Capítulo 6, para a mesma região de estudo, examina-se a proposição de construção de um índice aperfeiçoado iZCAS, que é contrastado com o índice simplificado iZCASref, ambos concebidos para reconhecer, de forma preditiva, fenômenos de ZCAS. Estudam-se alguns episódios do primeiro período chuvoso de dezembro de 2009 a março de 2010 sobre a bacia do rio Grande, também avaliados no Capítulo 5 mediante o emprego do iZCASref, obtendo-se, então, o desempenho comparativo dos índices iZCAS propostos nesta dissertação.

No Capítulo 7, estão expostas as conclusões e recomendações, enquanto, ao final, estão discriminadas as referências bibliográficas e anexos.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo apresenta, inicialmente, um panorama do setor elétrico, com enfoque nos modelos empregados em hidrologia e em produção energética, que atuou como pano de fundo e estímulo ao desenvolvimento do estudo de caso motivador para a concepção estruturante desta dissertação, detalhadamente apresentado na Capítulo 4.

Em seguida, aborda-se, com mais especificidade, o fenômeno da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), temática principal prospectada no trabalho, provendo fundamentos teóricos e referências na literatura nacional e internacional, melhor detalhando a sua ocorrência na ligação entre a região amazônica e a região sudeste. Evidencia-se o impacto da geração do corredor de nebulosidade com potencial geração de chuva nos recursos hídricos disponibilizados no sudeste brasileiro.

Na sequência do texto, discute-se a relação da ZCAS com as informações de satélite, com especial destaque para alguns sensores que permitem identificar a ocorrência do fenômeno, notadamente dados de chuva TRMM e dados gravimétricos GRACE.

Por fim, relaciona-se o fenômeno ZCAS com aspectos da modelagem hidrológica, que permite melhor situar e caracterizar a variabilidade e consistência das variáveis hidrometeorológicas empregadas neste trabalho mediante a realização do balanço hídrico.

Nesse sentido, procura-se abranger, nesta revisão, os tópicos que fundamentam a avaliação da proposição e efetividade do índice IZCAS, que constitui, como previamente destacado no capítulo introdutório, uma contribuição inovadora desta pesquisa.

2.1 - Sistema elétrico brasileiro e a operação de reservatórios

O sistema elétrico brasileiro (SEB) é um sistema de grande porte constituído por usinas térmicas e hidrelétricas, sendo essas últimas predominantes. Em sua configuração atual, 83,5% da capacidade instalada é de origem hidráulica, 16% de origem térmica e menos de 1% de fontes alternativas (ONS, 2008). Essa predominância hidráulica confere ao Sistema Interligado Nacional (SIN) características singulares, como a dificuldade de prever os cenários de afluência e conseqüentemente os recursos hídricos que estarão disponíveis no futuro. Nesse sentido, aspectos como

o acoplamento temporal, onde uma decisão tomada num instante t terá impacto num instante $t+1$, e o acoplamento espacial, no qual a operação de uma usina influencia na operação das usinas a jusante, requerem procedimentos, tratamentos e estudos adequados. A partir das características apresentadas acima, percebe-se a dificuldade em operar um sistema desse porte, principalmente quando se trata de um planejamento de longo prazo, no qual se torna inviável a resolução do problema de despacho a cada instante para cada unidade geradora do SIN, sendo necessária, no planejamento da operação energética do Sistema Interligado Nacional (SIN), a utilização de uma cadeia de modelos de otimização, desenvolvida pelo CEPEL, que empregam técnicas estocásticas de modo a representar a aleatoriedade das vazões. Essa cadeia é constituída pelos modelos de médio, curto e curtíssimo prazo, respectivamente NEWAVE, DECOMP e DESSEM-PAT, cujos resultados são utilizados como diretrizes para a operação do SIN.

No âmbito do planejamento da operação de médio prazo, o modelo NEWAVE possui horizonte de planejamento de cinco anos e discretização mensal e seu parque hidráulico é representado de forma agregada em quatro reservatórios equivalentes atualmente. O objetivo desse modelo é garantir o atendimento da demanda, através do menor valor esperado do custo total de operação esperado ao longo de todo o período de planejamento de acordo com os cenários de energia afluente que lhe são fornecidos pelo modelo GEVAZP (CEPEL, 2006). Para resolução desse problema, o NEWAVE adota a metodologia da programação dinâmica dual estocástica (PDDE), que é baseada na aproximação do valor esperado das funções de custo futuro de uma programação dinâmica estocástica, para cada estágio, em pequenas frações de funções lineares. Essas funções aproximadas são obtidas através da solução dual de cada estágio (etapa) do problema de planejamento e podem ser interpretadas como os cortes de Benders de um algoritmo de decomposição estocástico multivariado (Pereira e Pinto, 1991).

O modelo de curto prazo DECOMP adota a mesma metodologia do modelo NEWAVE, porém, devido ao fato de seu horizonte de planejamento ser menor, horizonte máximo de um ano, o parque hidráulico pode ser representado individualmente, e outras restrições mais específicas, como as elétricas, também podem ser representadas (CEPEL, 2004a). O primeiro mês do horizonte de estudo do DECOMP é discretizado semanalmente, e, a partir do segundo mês, a discretização passa a ser mensal. Os estudos oficiais realizados, atualmente, no setor elétrico com esse modelo adotam um horizonte de apenas dois meses. Assim como o NEWAVE, o DECOMP também é um modelo estocástico, porém somente a partir do segundo mês do estudo. Portanto ele necessita de um modelo auxiliar para gerar as séries de

afluência que serão utilizadas no estudo. Este modelo de geração de vazões é denominado de GEVAZP. Além do GEVAZP, o DECOMP também utiliza resultados de outro modelo, o PREVIVAZ, que é um modelo que prevê as vazões semanais que são utilizadas no primeiro mês de estudo do DECOMP de forma determinística.

Todos esses modelos fazem parte da cadeia de modelos de previsão de vazão e de geração de cenários de vazões e energia afluente, que são insumos para os modelos de otimização.

O sistema de geração e transmissão de energia elétrica do Brasil é um sistema com características únicas no âmbito mundial. Como previamente observado, sua matriz energética, composta por aproveitamentos hidráulicos e por aproveitamentos térmicos, fornece uma configuração robusta para sua operação.

Além disso, outro fator que facilita a operação do sistema é o fato dele possuir mais de 9000 km de linhas de transmissão, com tensão superior a 230 kV, interligando quase a totalidade do território nacional, abrangendo todas as regiões do país (ONS, 2008).

O Sistema Interligado Nacional (SIN), como é denominado, conecta as regiões sul, sudeste, centro-oeste, nordeste e parte da região norte, sendo a outra parte da região norte isolada. Adicionalmente, existem conexões internacionais que possibilitam a transferência de energia e interação com outros países, tais como a Argentina e o Uruguai.

Conforme mencionado acima, o SIN é um sistema composto por usinas hidrelétricas e termelétricas. As hidrelétricas são usinas despachadas com maior frequência devido ao seu baixo custo de operação, enquanto as unidades térmicas funcionam como uma complementação da geração hidráulica devido aos elevados custos de operação. Portanto elas só devem ser despachadas para suprir a demanda caso a geração hidrelétrica não seja suficiente ou tenha que ser preservada para o futuro.

A forte predominância de usinas hidrelétricas, dependência hidrológica e imprevisibilidade devido ao grande potencial hidráulico do Brasil, levou o governo a optar por investir na geração hidrelétrica. Apesar das hidrelétricas se situarem longe dos centros de carga, demandando, assim, grandes investimentos em linhas de transmissão, elas proporcionam montantes de geração de energia bastante elevados a baixos custos de operação. Outro fator determinante para a escolha da geração base de origem hidráulica foi a possibilidade de guardar a água nos reservatórios em forma de energia armazenada, ou seja, bastando apenas ser turbinada para gerar energia. A criação dos grandes reservatórios possibilitou a regularização plurianual das vazões afluentes, de tal forma que a usina pode modelar sua geração não ficando dependente

apenas da ocorrência de uma vazão imediata para a geração da energia. A grande dificuldade da geração hidrelétrica é quanto à dependência hidrológica, que, caso as afluições não ocorram conforme o previsto pode haver a geração de problemas de abastecimento. A dificuldade de uma perfeita previsão das vazões afluentes, no instante em que são tomadas as decisões operativas, faz com que o problema da operação seja essencialmente estocástico.

De modo a aperfeiçoar o aproveitamento do potencial hidráulico de um rio, existem diversos aproveitamentos no mesmo rio. No entanto, eles podem pertencer a proprietários diferentes. A existência de mais de um aproveitamento hidráulico em um mesmo rio, faz com que essas intervenções fiquem dispostas em forma de cascata, ou seja, uma a jusante da outra, fazendo com que a operação da usina a montante influa na operação das usinas a jusante.

Devido à limitada capacidade de armazenamento da água, a decisão operativa tomada em um dado instante acarreta conseqüências no futuro, pois a energia armazenada ao final de um período será a energia inicial do período seguinte. Por exemplo, se, ao se optar por gerar toda a energia armazenada no instante “ t ”, e, porventura, não ocorrerem níveis significativos de vazão afluente suficientes para recompor o armazenamento no instante “ $t+1$ ”, não seria possível a geração de energia a partir desse reservatório.

A malha de transmissão de energia que interliga os quatro subsistemas (Figura 2.1) possibilita a transferência dos excedentes energéticos de uma região para a outra, fazendo, assim, com que haja uma complementaridade energética entre os subsistemas, ou seja, quando um subsistema se encontra em situação desfavorável, os demais podem socorrê-lo fornecendo energia através das interligações.

Além disso, as diferentes sazonalidades hidrológicas entre as regiões podem ser aproveitadas através das interligações. Quando os subsistemas do Sudeste/Centro-Oeste, do Nordeste e do Norte encontram-se no período úmido, período este de maiores vazões afluentes, o do Sul encontra-se no período seco. E quando o Sul se encontra no seu período úmido, os demais encontram-se no período seco, possibilitando, assim, aproveitar a complementaridade sazonal entre os subsistemas.

No entanto, com reservatórios limitados pelas questões ambientais e escassez de recursos hídricos que porventura ocorram, o sistema elétrico brasileiro torna-se, cada vez mais, dependente de usinas termelétricas. O agravamento do quadro de escassez hídrica sugere uma tendência de que as usinas termelétricas serão, cada vez mais, necessárias para assegurar o fornecimento de energia elétrica no país, já

que as usinas hidrelétricas não conseguem poupar água para os períodos de estiagem.

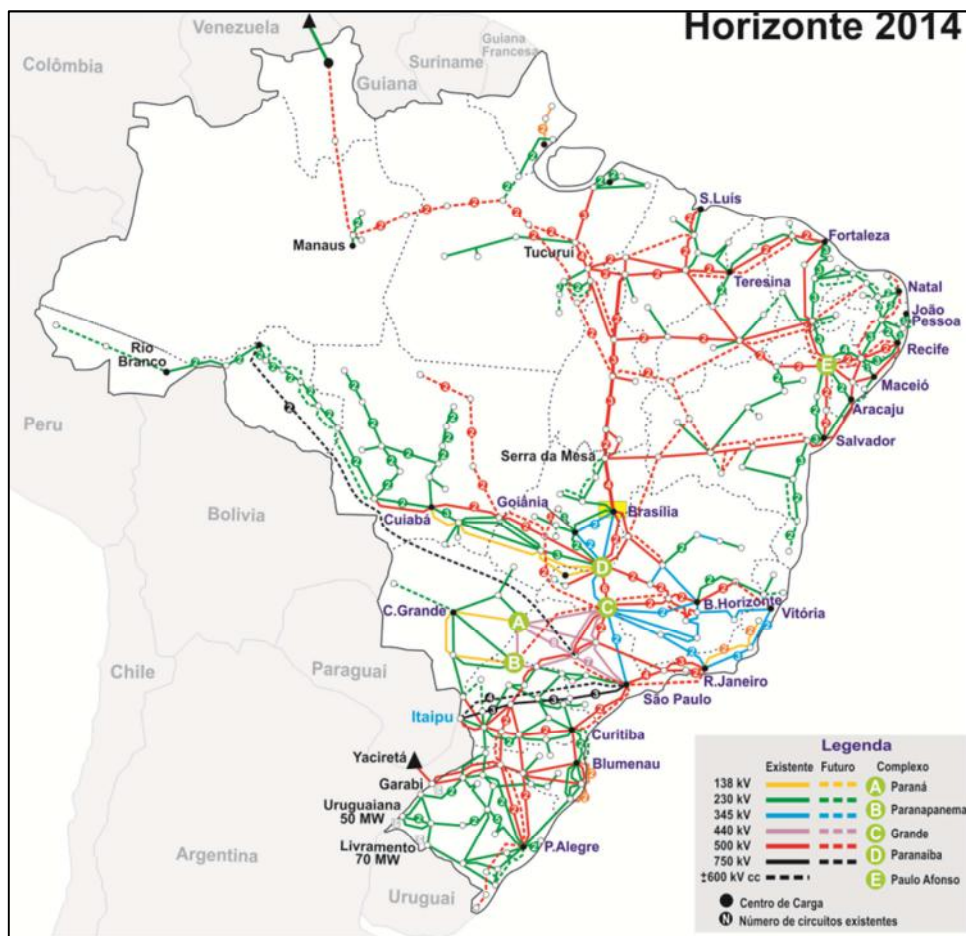


Figura 2.1 Distribuição espacial da malha de transmissão de energia que interliga os quatro subsistemas e suas cargas (Fonte: ONS, 2014).

A principal particularidade do setor elétrico brasileiro é a presença de reservatórios hidrelétricos de grande porte. No ano de 2013, o potencial de armazenamento de energia nos reservatórios do SIN era de 208 TWh, equivalente a 40% do consumo de eletricidade em 2012 (“In energia elétrica” em 12/08/2013 às 00:15, por Luciano Losekann), no entanto a razão potencial dos reservatórios e a demanda vêm caindo nos últimos anos em função da entrada em operação de centrais hidroelétricas que operam a fio d’ água.

Historicamente, os reservatórios brasileiros foram usados para a complementação entre bacias e para reduzir o custo de operação. Hoje, parte dos reservatórios brasileiros é reservada, também, para administrar a intermitência eólica, fonte que pode experimentar maior difusão no país (Joly, 2014). Hoje, a experiência internacional indica que a participação de 20% a 30% seria um limite de participação

para essas fontes sem implicar custos de reserva proibitivos e sem fragilizar, demasiadamente, a operação do sistema.

Naturalmente, dedicar reservatórios para esse fim tem implicações significativas operacionais e financeiras no funcionamento do sistema elétrico brasileiro. Primeiramente, por ter mais utilidade, a água represada nos reservatórios torna-se mais valiosa. Assim, o regime de operação deve implicar despacho menos freqüentes de centrais hidrelétricas e mais freqüentes de centrais eólicas. Os reservatórios tendem a operar com maior nível de acumulação, o que contribui para uma maior segurança do abastecimento.

Este regime de operação em que se prioriza o menor custo (Figura 2.2), e não o abastecimento, o que implicaria menores receitas para as centrais hidrelétricas, tendo impacto na definição de energia assegurada. Esse é um tema bastante sensível, pois a geração hídrica já perdeu parcela significativa de sua receita com a lei 12.783/2012.

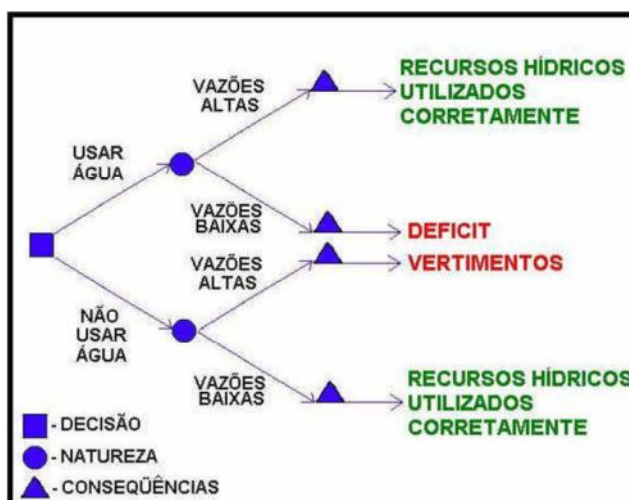


Figura 2.2 Diagrama esquemático do processo de decisão no regime de operação em que se prioriza o menor custo (Fonte: Guilhon, 2002).

As decisões são tomadas com base, principalmente, no volume útil dos reservatórios e no estágio hídrico das bacias (recursos), onde estão localizados os aproveitamentos energéticos, levando-se em conta, também, a questão futura que envolve a previsão da energia natural afluente, realizada com algoritmos matemáticos.

2.1.1 Volume Útil do Reservatório – ONS

Os reservatórios de regularização ou acumulação têm por finalidade acumular parte das águas disponíveis nos períodos chuvosos (TC) para compensar as

deficiências nos períodos de estiagem (TE), exercendo um efeito regularizador das vazões naturais.

Os reservatórios são formados a partir de barragens instaladas nos rios. Segundo Souza (1999), um reservatório pode ser descrito em função de seus níveis e volumes operacionais característicos segundo a nomenclatura a seguir:

nível mínimo operacional - o nível mínimo operacional corresponde à cota mínima necessária para a operação adequada do reservatório, e essa cota define o limite superior do volume morto e o limite inferior do volume útil do reservatório; normalmente, o nível mínimo operacional encontra-se acima do limite superior da estrutura da tomada d'água, de modo a evitar a criação de vórtices na entrada;

volume morto - o volume morto corresponde à parcela do volume total do reservatório inativa, ou indisponível para fins de captação de água; corresponde ao volume do reservatório compreendido abaixo do nível mínimo operacional, que funciona, dentre outros, como “alçapão sedimentológico” dos sedimentos escoados na massa hídrica afluyente ao reservatório; e

volume útil - o volume útil de um reservatório corresponde ao volume compreendido entre os níveis de água mínimo operacional e o máximo operacional (Figura 2.3); esse é o volume destinado à operação do reservatório, ou seja, ao atendimento das diversas demandas de água; para determinar esse volume, deve-se considerar as demandas naturais e as perdas por evaporação, por infiltração do solo e das comportas quando estas forem consideráveis.

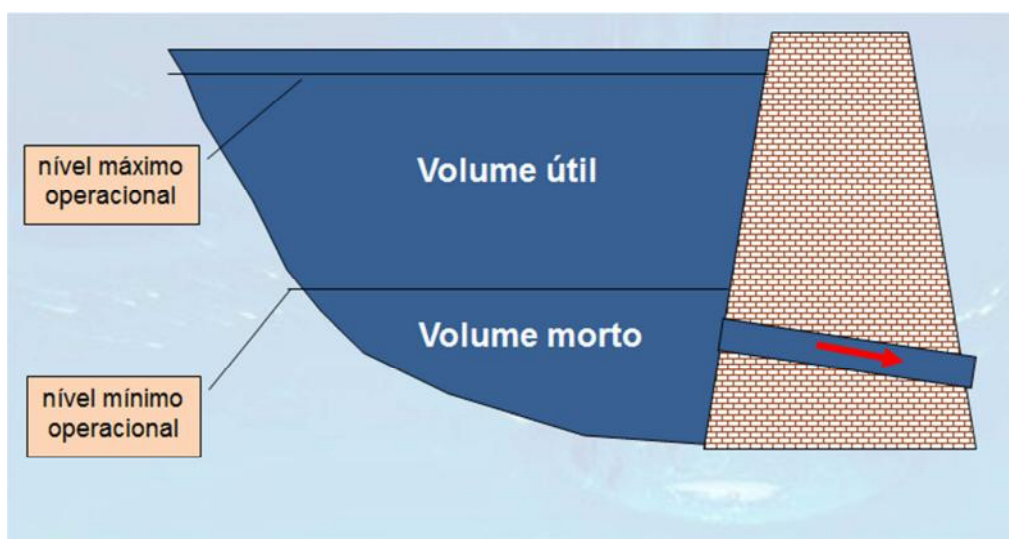


Figura 2.3 - Diagrama esquemático de um reservatório, descrito em função de seus níveis e volumes operacionais característicos (Fonte:ONS, 2014).

A capacidade de armazenamento ou volume útil de cada uma das usinas hidrelétricas pode ser calculada através dessas duas informações. O volume mínimo corresponde a menor quantidade de água que deve estar armazenada num determinado reservatório, e, ainda assim, a usina preserva sua capacidade de geração. Se o volume de água armazenado no reservatório for inferior ao mínimo, a usina não será capaz de gerar energia, ou porque não existe uma queda mínima entre a superfície do reservatório e as turbinas ou porque a cota da superfície de água do reservatório é inferior à cota de tomada d'água do reservatório.

O volume mínimo é também chamado de volume morto do reservatório, pois toda a quantidade de água abaixo da cota referente ao volume mínimo não pode ser efetivamente utilizada para a produção de energia nas turbinas hidráulicas. A Figura 2.4 ilustra o volume mínimo ou morto na região hachurada. A água é captada do reservatório para as turbinas através da tomada d'água e do conduto forçado, e, após o acionamento das turbinas, ela retorna ao leito. O volume máximo corresponde à quantidade total de água que pode ser armazenada no reservatório incluindo o volume mínimo. O volume útil do reservatório é calculado a partir da equação $V_{UTIL} = V_{MAX} - V_{MIN}$, onde V_{MAX} é o volume máximo do reservatório e V_{MIN} é o volume mínimo do reservatório.

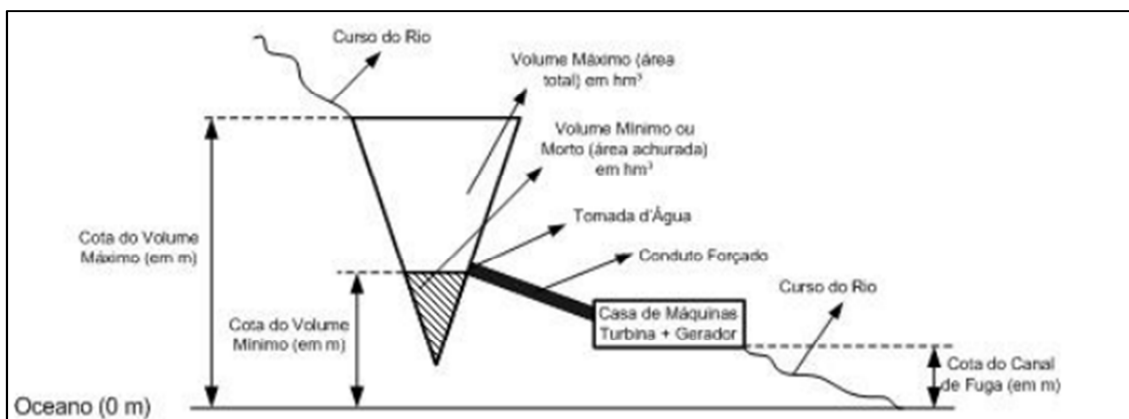


Figura 2.4 - Ilustração do volume mínimo ou morto de um reservatório (Fonte: ONS, 2014).

Tanto para o volume máximo, como para o volume mínimo, têm-se as cotas que são as diferenças verticais em metros entre a superfície do reservatório e a superfície do oceano. A diferença de altura entre a superfície do leito do rio imediatamente após a saída da turbina e a superfície do oceano é denominada cota do canal de fuga. Para se calcular a altura de queda de um aproveitamento hidráulico, basta computar-se a diferença entre a cota do canal de fuga e a cota da superfície do lago. Obviamente, a altura de queda é máxima quando o reservatório está com o seu

volume máximo e é mínima quando o reservatório está com seu volume mínimo. Quanto maior for a altura de queda, maior será a capacidade de geração do conjunto turbina gerador.

O Operador Nacional do Sistema Elétrico obtém junto aos operadores das usinas o valor mensal do volume útil dos reservatórios, em porcentagem, relativo ao máximo de capacidade de volume útil daquele reservatório, e disponibiliza em seu sítio na Internet, através de gráficos e planilhas mensais, para o período de janeiro de 2000 a dezembro de 2014.

Feita essa exposição inicial com alguns fundamentos motivadores da presente dissertação que definiu a escolha da área de estudo, ou seja, bacia do rio Grande, responsável por aproximadamente 25% da produção de energia hidroelétrica do país, aborda-se, no próximo item, o fenômeno atmosférico da ZCAS, que apresenta notável importância na regulação e armazenamento de água na região sudeste do Brasil. O melhor entendimento observacional da ZCAS é a base para a proposição de índice de previsibilidade para definir a ocorrência desse fenômeno, que representou avanço do presente trabalho de pesquisa ao propor e avaliar o índice iZCAS, diretriz detalhada no Capítulo 3, onde se descreve a abordagem metodológica da pesquisa conduzida nesta dissertação.

2.2 Origens e características da ZCAS

2.2.1 Aspectos globais

A Zona de Convergência do Atlântico Sul não é uma entidade singular. Entre outros autores, Kodama (1992, 1993) identificou a existência de zonas de precipitação subtropicais e, ao reconhecer a sua relevância, investigou o seu comportamento. Pelas suas características intrinsecamente diversas, tanto das clássicas zonas frontais polares quanto da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), ele as denominou genericamente de Zonas de Convergência Subtropicais (ZCS).

As ZCSs têm características em comum:

- a) são sistemas semiestacionários;
- b) estão associadas a forte atividade convectiva no lado oeste e aos centros subtropicais de alta pressão no lado leste;
- c) têm estrutura baroclínica e regiões convectivamente instáveis; e
- d) estão relacionadas com a corrente de jato subtropical dos altos níveis da troposfera.

Segundo Kodama (1992), as zonas de precipitação contidas no cinturão subtropical são responsáveis pela modulação de grande parte da quantidade de precipitação durante o verão, época em que estão ativas. O autor analisou especificamente as principais características das porções subtropicais das ZCSs e reconheceu apenas três sistemas típicos, com estruturas bem definidas e com amplos valores anuais de precipitação durante a fase ativa. Foram eles a Zona de Convergência do Atlântico Sul (a ZCAS), a Zona de Convergência do Pacífico Sul (a ZCPS) e a Zona Frontal de Baiu. A ZCAS manifesta-se na porção oeste do oceano Atlântico sul subtropical, enquanto a ZCPS ocorre na região centro-oeste do Pacífico sul (Streten, 1973), e a Zona Frontal de Baiu, por sua vez, tem o seu desenvolvimento na parte leste da Ásia e oeste do Pacífico norte (Kato e Kodama, 1992).

Além dessas, Satyamurti e Rao (1988) mencionam a existência de mais uma região de intensa atividade convectiva no hemisfério sul, a Zona de Convergência do Índico Sul (ZCIS). Esses autores apontam para a conexão das regiões de atividade convectiva com zonas de convergência em suas extremidades noroeste: uma nas proximidades da Indonésia (a ZCPS) e a outra associada à bacia do Congo (a ZCIS).

2.2.2 Conexões entre a ZCAS e outros fenômenos

De interesse direto para o Brasil, a Zona de Convergência de Atlântico Sul, uma das configurações meteorológicas que mais contribuem para a quantidade de precipitação nos meses de primavera, verão e início do outono no país (Kousky, 1988), está intimamente ligada a outras, de maior escala espacial, em particular à atividade convectiva da Amazônia.

Esses dois fenômenos, ZCAS e atividade convectiva da Amazônia, são mutuamente dependentes e compõem o denominado Sistema de Monção da América do Sul (SMAS) (Jonas e Carvalho, 2002; Carvalho *et al.*, 2004). Essa interação entre ZCAS e SMAS foi descrita também por Figueroa, Satyamurty e Silva Dias (1995) e por Lenters e Cook (1999), cujos trabalhos mostraram que a variabilidade da precipitação do sistema de monções está associada às circulações de grande escala atuantes na América do Sul durante o verão.

A circulação nos altos níveis da troposfera na região do sistema de monções no verão austral é caracterizada por um grande anticiclone centrado sobre a Bolívia, a Alta da Bolívia (AB), e por um cavado próximo à costa nordeste do Brasil, o Cavado do Nordeste (CN) (Ninomiya, 2007). Nos níveis baixos, a circulação é dominada pelo anticiclone semipermanente do oceano Atlântico subtropical, pela Alta Subtropical do

Atlântico Sul (ASAS) e por uma corrente de jato, o Jato de Baixos Níveis (JBN) da América do Sul, a leste da Cordilheira dos Andes.

A Alta da Bolívia forma-se na primavera e atinge atividade máxima no verão devido à intensificação da liberação de calor latente oriundo da convecção sobre a Amazônia e ao fortalecimento de um ciclone térmico à superfície (a Baixa do Chaco), provocado pelo intenso aquecimento superficial na região do altiplano boliviano. Registra-se, também, uma interdependência entre a Alta da Bolívia e o Cavado do Nordeste. A intensificação deste último está relacionada ao fortalecimento daquela, e os dois sistemas estão tipicamente presentes nos episódios de ocorrência da ZCAS.

2.2.3 Formação da ZCAS

A ZCAS forma-se quando ocorre o acoplamento dos sistemas frontais que penetram na América do Sul com a Alta da Bolívia já estabelecida (Andrade, 2007). Kodama (2002, 2003) confirma esse entendimento e acrescenta que a formação da ZCAS se dá normalmente ao longo da corrente de jato de altos níveis, do lado leste de um cavado semiestacionário. Carvalho *et al.* (2004) concordam e destacam que episódios intensos da ZCAS são precedidos pela penetração de frentes frias das latitudes médias.

A circulação do sistema de monções e o posicionamento da ZCAS desempenham um importante papel na distribuição de chuva sobre o Brasil (Drumond, 2005), pelo que trazem consequências hidrológicas marcantes, principalmente para as regiões sul (Liebmann *et al.*, 2004) e sudeste (Carvalho, Jones e Liebmann, 2002, 2004), devido à sua persistência temporal (Figueroa *et al.*, 1995).

A formação da ZCAS depende tanto de forçantes locais quanto remotas. Nogués-Paegle e Mo (1997), por exemplo, investigaram e confirmaram a correlação entre a convecção na ZCAS e a precipitação na parte central do Oceano Pacífico. Localmente, a formação da ZCAS está associada com: (a) convecção na região Amazônica e Brasil Central; (b) disponibilidade de umidade; e (c) baroclinicidade (Kodama, 1992; Figueroa *et al.*, 1995).

2.2.4 Características da ZCAS

A ZCAS apresenta-se como uma faixa de nebulosidade que permanece quase estacionária por períodos que vão de quatro a dez dias, em geral, mas que pode se estender até mesmo a vinte dias nos episódios em que uma convecção acentuada contribui para a manutenção do fenômeno (Kodama, 1992). Orienta-se na direção

noroeste-sudeste e estende-se desde a Amazônia até o Oceano Atlântico Sul (Climanálise,1996; Marton, 2000). É uma prolongada atividade convectiva, que eleva, de forma considerável, os valores de precipitação nas regiões de ocorrência. A ZCAS posiciona-se predominantemente sobre a região sudeste, Brasil Central, norte do Paraná e sul do estado da Bahia. Entretanto, dentro de uma mesma estação, pode variar de posição, estacionando em regiões mais ao norte do continente durante o mês de dezembro e mais ao sul no final do verão (Quadro,1994).

Quadro (2004) descreve, ainda, como características mais marcantes observadas nos campos analisados:

- convergência de umidade em baixos e médios níveis na região da ZCAS;
- no escoamento no nível de 500 hPa, a presença de um cavado sobre a costa leste da América do Sul orientado na mesma direção da ZCAS; esse cavado, por sua vez, encontra-se associado a uma faixa de movimento vertical ascendente também com orientação NW/SE, localizada na média troposfera;
- campo de temperatura potencial equivalente (Θ_e) em 500 hPa caracterizado pela presença de uma crista na região da ZCAS e por um intenso gradiente de Θ_e ao sul da faixa de nebulosidade convectiva; esse gradiente define a separação entre a massa de ar quente e úmida oriunda dos trópicos e a massa fria e seca procedente das latitudes média e altas; e
- faixa de movimento anticiclônico em altos níveis, característica das regiões típicas para a manifestação do fenômeno.

Outros estudos sugerem uma associação entre os eventos de ZCAS e a temperatura da superfície do mar (TSM) no Atlântico Sul (Kalnay *et al.*, 1986). Apesar de a TSM não ser determinante para a formação da ZCAS, ela modularia a intensidade e o posicionamento da precipitação associada ao sistema (Figuerola *et al.*, 1995; Robertson e Mechoso, 2000; Teixeira *et al.*, 2002). Mais recentemente, têm sido discutida uma “Zona de Convergência de Umidade” (ZCOU), definida em Neto *et al.* (2010), mais adiante abordada.

Quanto às frentes frias poderem ser confundidas com as zonas de convergência, embora por vezes elas estabeleçam um fluxo de umidade da região amazônica para a região sudeste, pode-se afirmar que esses fenômenos não o mantêm por muito tempo, usualmente por apenas um ou dois dias, isto é, a ocorrência tem um caráter transitório. Algo semelhante tipifica a ZCOU. Embora as suas

características sejam bem semelhantes às da ZCAS, incluindo o padrão esperado de posicionamento da Alta da Bolívia, a presença do Cavado do Nordeste e de convecção na região amazônica, essa configuração não se sustenta por períodos maiores, o que motiva sua denominação diferenciada de ZCOU.

Neste trabalho, consideram-se apenas os casos de ZCAS, e não os de ZCOU, embora, como ver-se-á adiante, o índice desenvolvido, o iZCAS, não faça distinção entre uma e outra. Para tornar mais claras as diferenças, apresentam-se, abaixo, os critérios para determinação da ZCAS segundo Neto *et al.* (2010). Diferentemente de Quadros (1994), Neto e colaboradores incluem um nono critério para distinguir ZCAS e ZCOU.

Os critérios são:

- a banda de nebulosidade associada à ZCAS nem sempre aparece bem definida e homogênea; esse comportamento é similar à ZCIT (Zona de Convergência Intertropical) e às frentes, isto é, os sistemas podem estar presentes, porém com pouca atividade; por exemplo, a ZCIT pode estar presente apesar de não ser detectada pelo campo de nebulosidade;
- a presença do jato subtropical, que, geralmente, contorna um cavado e dá suporte dinâmico ao sistema que atua na superfície (cavado ou frente);
- o ramo norte do jato polar pode aparecer, em algumas ocasiões, acoplado ao jato subtropical nos casos em que há uma frente fria no oceano;
- o gradiente de temperatura potencial equivalente em 850 hPa (GTPE_850) é significativo, estendendo-se desde o oceano até o interior do continente; esse gradiente acontece, principalmente, nos eventos de ZCAS associados à persistência de nebulosidade e abundante precipitação; em algumas ocasiões, o GTPE_850 apenas aparece no oceano e não sobre o continente; nesses casos, nota-se também um apreciável gradiente de água precipitável (valores acima de 40 mm); também existe um gradiente significativo de temperatura de ponto de orvalho em superfície, praticamente em fase com o GTPE_850;
- o fluxo de umidade em 850 hPa aparece bem determinado, desde a região amazônica até o oceano, passando pelo centro-oeste e sudeste do Brasil;

- o campo de velocidade vertical (ω) ascendente (negativo) em 500 hPa aparece praticamente em fase com o fluxo convergente em 850 hPa;
- a Alta da Bolívia e o Cavado do Nordeste aparecem bem definidos apenas nos casos de ZCAS clássicos; porém, nem sempre esses sistemas aparecem bem caracterizados durante um evento de ZCAS; geralmente, a Alta da Bolívia aparece, mesmo que eventualmente desconfigurada; o cavado do Nordeste pode não aparecer em casos de ZCAS;
- a zona de convergência de umidade em baixos níveis, provocada pela presença das características mencionadas anteriormente, deve persistir por pelo menos quatro dias para poder ser caracterizada como ZCAS; será contabilizado, como primeiro dia de ZCAS, o momento em que se configurará o fenômeno; e
- se o processo durar menos de quatro dias, o evento será caracterizado apenas como Zona de Convergência de Umidade (ZCOU).

Associado ao posicionamento da ZCAS, Nogués-Paegle e Mo (1997) observaram que há uma “gangorra” de condições seca e chuvosa sobre as regiões tropicais e subtropicais da América do Sul durante o verão, mostrando que a intensificação da ZCAS está associada com divergência (Herdies *et al.*, 2002) e déficit de precipitação sobre as planícies subtropicais a sudoeste dessa região. Com esses autores, concordam Gandu e Silva Dias (1998) e Liebmann *et al.* (2004), bem como Carvalho, Jones e Liebmann (2004) e Gan, Kousky e Ropelewski (2004), que se referem à convergência no centro-oeste brasileiro do escoamento de baixos níveis de noroeste e oeste a leste dos Andes.

A intensificação da precipitação na região da ZCAS, quando do enfraquecimento do escoamento de baixos níveis, também foi apontada por Liebmann *et al.* (2004). Por outro lado, uma ZCAS enfraquecida mostra condições de convergência (Herdies *et al.*, 2002) e muita precipitação no sul do Brasil, norte da Argentina e Uruguai, e associa-se com escoamento de baixos níveis de noroeste intensificado sobre o Paraguai e norte da Argentina (Drumond, 2005) e anomalias de leste sobre o centro-oeste brasileiro (Herdies *et al.*, 2002; Carvalho, Jones e Liebmann, 2004; Gan, Kousky e Ropelewski, 2004; Liebmann *et al.*, 2004).

Os regimes de precipitação da América do Sul possuem variabilidade em muitas escalas de tempo e espaço. Enquanto a convecção na bacia amazônica exibe variação diurna intensa e sazonal, as variações intrasazonais são mais pronunciadas

no leste da América do Sul tropical e subtropical (Carvalho, Jones e Liebmann, 2004). Em particular, a precipitação associada à ZCAS exibe uma variedade rica de variações intrasazonais (Carvalho, Jones e Liebmann, 2002; Almeida *et al.*, 2007) e diversos trabalhos mostraram a influência de fenômenos atmosféricos de tal escala de tempo na variabilidade da ZCAS, como Cunningham e Cavalcanti (2006) e Souza e Ambrizzi (2006).

2.3 ZCAS e Sensoriamento Remoto

No sentido de melhor fundamentar o monitoramento da ocorrência da ZCAS, optou-se pelo enfoque em informações de sensoriamento remoto. Assim, empregaram-se dados TRMM e dados GRACE para medição de chuva e de altura equivalente de água, respectivamente, conforme exposto adiante. Esse monitoramento e identificação são importantes para melhor fundamentar a caracterização do fenômeno em tela bem como a correspondente proposição do índice iZCAS para sua previsão, articulação estabelecida no capítulo seguinte a partir do fluxograma metodológico do trabalho.

2.3.1 Estimativa de precipitação pelo satélite TRMM

As imagens de satélite são valiosas ferramentas para a estimativa das mais diversas componentes de chuva. Mesmo antes do primeiro satélite meteorológico, o TIROS 1 (*Television and InfraRed Observation Satellite*), fornecer as primeiras imagens de topos de nuvens em abril de 1960, já se achava que a ocorrência e mesmo a intensidade de eventos chuvosos poderia ser inferida a partir da resposta espectral de conjuntos de nuvens (Petty, 1995).

O princípio da estimativa de precipitação por meio de sensoriamento na faixa visível do espectro eletromagnético é o fato de o brilho da luz do sol refletida por nuvens ser uma indicação da espessura da nuvem e conseqüentemente do volume de água em seu interior (Petty, 1995). Da mesma forma, baixas temperaturas de topo de nuvem estão associadas a um maior desenvolvimento vertical da nuvem e, naturalmente, a uma taxa de precipitação maior.

A temperatura do topo de nuvem é obtida a partir de medições de reflectância na faixa espectral do infravermelho (IR), não por acaso denominada de banda termal. Porém, rapidamente tornou-se evidente que nem toda a nuvem brilhante e nem toda

nuvem com topo frio, ou seja, com reflectância baixa no IR, está efetivamente produzindo precipitação. De fato, estimativas no infravermelho e no visível podem ser feitas apenas localmente, fornecendo limitados resultados quando transpostas para outras regiões (Wilheit, 1986; Petty, 1995), sendo essa a sua principal restrição.

Um divisor de águas na estimativa de precipitação por satélite foi o emprego de sensores de micro-ondas, que respondem à presença de água e cristais de gelo nas nuvens. De forma geral, as estimativas baseadas nas medições feitas por sensores de micro-ondas são melhores do que as obtidas com base em imagens no infravermelho (Ramage *et al.*, 2003).

A necessidade de se obter informações mais detalhadas da precipitação e da liberação de calor latente (energia) durante a formação da chuva entre as regiões tropicais e subtropicais da Terra levou as agências espaciais japonesa (NASDA) e americana (NASA) a lançarem o programa *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM). Os satélites da missão, em órbita desde novembro de 1997, percorreram uma órbita circular a 350 km de altitude, com um ângulo de inclinação de 35° em relação ao eixo da Terra, até agosto de 2001, quando a altitude foi modificada para 403 km, aumentando seu tempo em operação. A órbita do TRMM engloba as regiões entre as latitudes de 38°N e 38°S em torno de todo o globo, com duração aproximada de 1 hora e 30 minutos.

A bordo do TRMM, estão três instrumentos utilizados exclusivamente para o estudo da precipitação: um imageador em microondas (TMI), um radar de precipitação (PR) e um sistema de sensores nas faixas espectrais do infravermelho e do visível (*Visible and InfraRed System* - VIRS). A Figura .5 representa a geometria de varredura desses três sensores. As medidas coincidentes do TMI e PR são complementares. A combinação de informações obtidas pelos sensores ativo (PR) e passivo (TMI) a bordo do TRMM fornece uma visão tridimensional da distribuição da precipitação e do calor latente liberado nos trópicos.

Adicionalmente, o TRMM tem, a bordo, um radiômetro multiespectral (*Cloud and Earth's Radiant Energy System* - CERES) e um sensor de relâmpagos (*Lightning Imaging System* - LIS). Os radiômetros passivos na faixa de microondas medem a energia emitida e refletida, levando em conta os efeitos integrados da absorção e emissão e do espalhamento eletromagnético pelo sistema Terra-Atmosfera. Essa energia observada é proporcional aos constituintes atmosféricos presentes entre a superfície e o satélite. A dependência das propriedades eletromagnéticas de nuvens com relação à frequência estimula a utilização de radiômetros multicanais, os quais podem inferir o conteúdo integrado dos hidrometeoros, porém a discriminação dessas propriedades em alturas específicas não pode ser inferida.

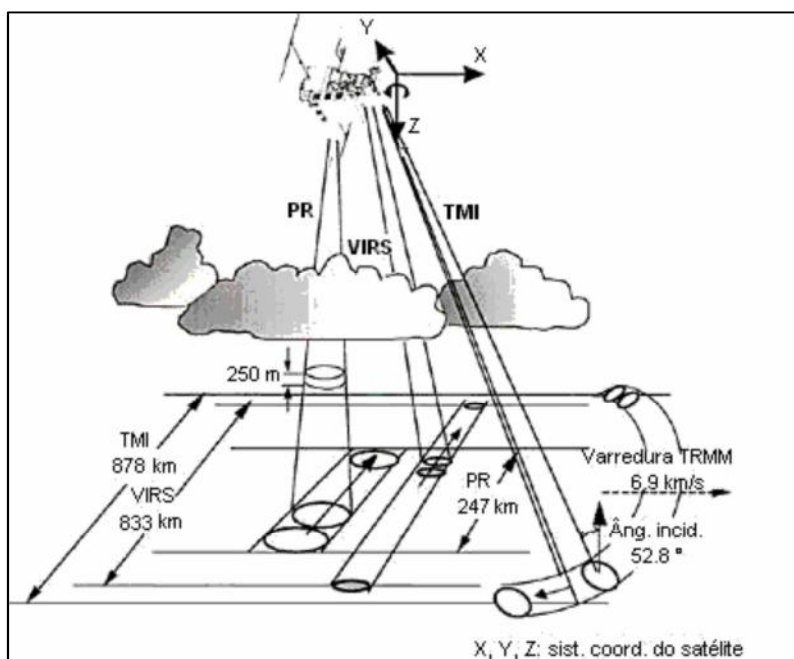


Figura 2.5 - Geometria de varredura do imageador em microondas TMI, radar de precipitação PR e sistema de sensores na região do infravermelho e visível (Visible and InfraRed System) a bordo do TRMM (Fonte: adaptado de Kummerow et al., 1988).

A estimativa de chuva a partir de medições de satélite ganha especial relevância em regiões que não contam com densas redes de coleta de dados na superfície ou com radares meteorológicos, os quais fornecem melhores representações da distribuição espacial das chuvas. Em particular, os países em desenvolvimento, em geral, possuem redes de pluviômetros insuficientes e sofrem dificuldades de toda ordem para acesso aos dados. Não é por acaso, portanto, o alto número de trabalhos encontrados que estimam precipitação via satélite, por exemplo, sobre países da África e da América do Sul.

Em função de ser o satélite mais bem instrumentado para estimativa de precipitação, o TRMM fornece estimativas mais precisas do que as técnicas indiretas, baseadas em imagens de outros satélites (Barrera, 2005), sendo usado inclusive para validação dessas técnicas. Também Nicholson (2005) afirma que o projeto TRMM resultou em medidas consideravelmente mais confiáveis do que as estimativas feitas até então.

No caso do Brasil, há crescente número de trabalhos publicados que incluem a estimativa de precipitação por satélite. Um dos pioneiros é o trabalho de Conti (2002), bastante completo e abrangente, que realizou ainda um estudo de caso para o estado do Rio Grande do Sul, obtendo resultados satisfatórios.

Collischonn et al. (2006) mostraram que a estimativa de precipitação do satélite TRMM é bastante precisa quando comparada com dados de solo na bacia do alto rio

São Francisco. Em aplicação semelhante para a bacia do rio Tapajós, Collischonn (2006) mostrou que, além de dar bons resultados, a estimativa de satélite pode ajudar a identificar pluviômetros com problemas na leitura ou mal localizados, constituindo-se, assim, em ferramenta para consistência de dados.

Paca (2008) avaliou o balanço hídrico da bacia delimitada pela estação fluviométrica de Bom Jardim, situada no estado do Pará, mais precisamente no rio Guamá. Em particular, foi dado destaque, no cálculo do balanço, aos dados pluviométricos, procurando contrastar a rede convencional de pluviômetros com dados de sensoriamento remoto a partir do satélite TRMM/NASA. Essa análise comparativa entre dados de natureza pontual e diária com dados de natureza espacial disponíveis a cada três horas permitiu efetuar uma avaliação da sensibilidade dessas informações com respeito aos efeitos no balanço hídrico da bacia estudada. Os resultados indicaram a confiabilidade dessa nova base de dados de chuva por satélite, e, em especial, mostraram a possibilidade do emprego desse tipo de informação em áreas extensas e de difícil acesso, como é o caso da Amazônia brasileira.

Xavier (2012), em estudo conduzido para a bacia Amazônica, discutiu a adequação do uso das séries de armazenamento total de água derivadas da missão GRACE na modelagem hidrológica de grandes bacias, informação de satélite que será mais bem discutida no item subsequente. Em especial, avaliou o comportamento da relação chuva obtida via dados TRMM versus armazenamento nas principais sub-bacias da bacia amazônica definido mediante dados GRACE, tanto por meio de séries médias como via análise de componentes principais, notadamente nas bacias do Solimões, Madeira, Negro, Tapajós e Xingu, identificando e caracterizando o comportamento hidrológico dessas bacias.

Souza (2013) propõe-se uma metodologia de identificação dos mecanismos físicos remotos e avaliação da estrutura atmosférica responsável por modular um dos sistemas meteorológicos atuantes, anticiclone de bloqueio, na costa leste catarinense, durante o evento chuvoso ocorrido entre os dias 21 e 24 de novembro de 2008. Foram utilizados dados diários de radiação de onda longa emergente (ROLE) e das componentes zonal e meridional do vento, nos níveis de 850 hPa e 200 hPa, e altura geopotencial em 200 hPa, provenientes do banco de dados de reanálises do NCEP-NCAR, para a caracterização da estrutura dinâmica de padrões ondulatórios atmosféricos desde o oceano Pacífico até a América do Sul. No estudo, o autor caracteriza o evento chuvoso extremo por meio de dados de chuva TRMM, observando que se consegue distinguir, de forma relativamente precisa, regiões com diferentes regimes pluviométricos tanto para o acumulado em 24 horas para cada dia analisado quanto para o acumulado em 24 horas, entre os 21 a 24 de novembro de

2008, ou seja, a chuva por satélite ofereceu uma contribuição importante na representação da distribuição temporal do evento chuvoso analisado.

Oliveira (2014), por sua vez, buscou correlacionar precipitação e deslizamentos com o objetivo de obter limiares de precipitação acumulada em 24, 48, 72 e 96 horas, a partir dos quais ocorram movimentos de massa no município de Nova Friburgo. Foram utilizados dados pluviométricos de duas estações do INEA (Ypu e Pico Caledônia) e dados do satélite TRMM além dos dados de deslizamentos cedidos pela Defesa Civil de Nova Friburgo, entre novembro de 2008 e dezembro de 2011. Adicionalmente, foi realizado um levantamento dos principais fenômenos meteorológicos associados a esses deslizamentos, e, por fim, foi feita uma comparação entre os dados dos pluviômetros e o dado espacial de chuva estimado pelo satélite TRMM.

Feitas essas observações e breve revisão de alguns trabalhos anteriores que empregaram dados TRMM, optou-se, para o presente trabalho, pelos dados dos satélites da missão TRMM como melhor método para a estimativa de precipitação.

2.3.2 Estimativa de nível de água pelo sistema GRACE de satélites

Com vistas a atender o objetivo desta dissertação de identificar o fenômeno ZCAS e correspondente impacto na região sudeste do Brasil, em particular na bacia do rio Grande, pois se sabe que é importante conhecer a vazão afluente aos reservatórios bem como os volumes armazenados conjuntamente com o balanço hídrico das bacias hidrográficas correspondentes. Assim como na estimativa da precipitação, aqui se encara a dificuldade para obter dados provenientes de medições diretas confiáveis e representativas da realidade. Mais uma vez, então, optou-se por metodologias alternativas oferecidas pelo sensoriamento remoto, mais especificamente dados do satélite GRACE, como uma tentativa de utilizar, para toda a bacia do rio Grande, uma fonte de dados que traz informação sobre o armazenamento total na bacia, que também é função da vazão natural (em determinado ponto).

O GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*), uma iniciativa conjunta das agências espaciais norte-americana (NASA) e alemã (DLR), começou em março de 2002, com uma vida útil inicial dos satélites que o compõem prevista para 5 anos, posteriormente estendida para mais alguns anos. Hoje, há uma previsão de continuidade do projeto, chamado de GRACE-FO (*The Gravity Recovery and Climate Experiment Follow-on*) com lançamento previsto para 2017, que continuará o trabalho de rastreamento de movimento da água da Terra para monitorar as alterações no armazenamento de água subterrânea, na quantidade de água em grandes lagos e

rios, na umidade do solo, em camadas de gelo e geleiras e no nível do mar. Essas descobertas proporcionam uma percepção única sobre o clima da Terra. Nesse sentido, a missão GRACE-FO deve continuar o trabalho extremamente bem sucedido do seu antecessor ao testar uma nova tecnologia projetada para melhorar significativamente a precisão de correspondente sistema de medida. Nesta dissertação, será empregado o primeiro projeto GRACE (<http://grace.jpl.nasa.gov/>).

O objetivo do projeto GRACE é medir o campo gravitacional terrestre, em alta resolução, na escala de poucas centenas de quilômetros. O experimento utiliza satélites idênticos, situados em órbita polar (89°), aproximadamente a 500 km de altitude, separados por uma distância de cerca de 220 km (<http://grace.jpl.nasa.gov/>).

A distância entre os dois satélites é continuamente monitorada por microondas, com uma precisão equivalente a um micrômetro (WAHR *et al.*, 1998). Sempre que os satélites são diferentemente atraídos pelo campo de gravidade da Terra, a distância entre eles varia. Por meio de medidas constantes dessas variações, combinadas com medições da sua posição (usando o *Global Positioning System* - GPS), é possível determinar as mudanças do campo de gravidade da Terra. Assim, a partir das variações na distância e da taxa de variação da distância, e após a remoção de efeitos não gravitacionais, como os causados pelas marés e correntes marítimas, são estimadas as variações no campo de gravidade.

Os receptores GPS podem receber informações de até 10 satélites de posicionamento e prover dados de navegação e medidas de distância e de variação de distância no modo alto-baixo (*high-low*). Um acelerômetro é utilizado para a separação dos efeitos não gravitacionais; refletores laser (LRR) são utilizados para determinação precisa das órbitas dos satélites e câmeras STAR para o alinhamento dos dois satélites (Balbino, 2003). Cada satélite transmite sinais para o outro em duas frequências (24 GHz e 32 GHz), permitindo a correção ionosférica. São obtidas, assim, duas medidas de distância entre eles, pela diferença de fase entre os sinais emitidos e recebidos por cada um. As distâncias são obtidas a uma taxa de amostragem de 10 Hz, sendo, em seguida, filtradas para produzir as taxas de variação de distância e as acelerações derivadas da taxa de variação da distância. A acurácia da estimativa da taxa de variação de distância é da ordem de 10 m/s - 6 m/s (Jekeli, 2000).

Em essência, os satélites “gêmeos” da missão GRACE constituem um único instrumento (Balbino, 2003), no qual:

- as variações no campo de gravidade causam alterações na distância entre os dois satélites, pois áreas de maior gravidade atraem o satélite líder, acelerando-o e aumentando sua distância em relação ao segundo satélite;

- as variações na distância são medidas por um sistema de microondas de alta precisão, em que a relação com respeito ao sistema de referência global é dada por GPS; e
- as variações de distância observadas são corrigidas de efeitos não-gravitacionais por um acelerômetro preciso.

Para melhor compreensão do papel dos dados GRACE, representa-se, de maneira simplificada, o transporte de água entre a atmosfera, a terra e o oceano, como mostrado na Figura 2.6.

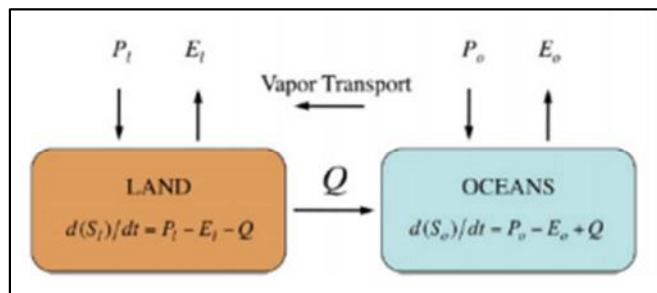


Figura 2.6 - Esquema do transporte de água entre a atmosfera, a terra e o oceano.

(Fonte: adaptado de SEO et al., 2008).

As principais trocas de massa de água ocorrem por transporte de vapor na atmosfera e em função da descarga continental nos oceanos. Considerando a Terra como um sistema fechado, pode-se escrever a equação de conservação de massa nos continentes relacionando as alterações de armazenamento S_t ao longo do tempo com a variação líquida de água no sistema (ganho por precipitação, P_t , e perdas por evaporação, E_t , e escoamento, Q). Da mesma forma, pode-se pensar esse equilíbrio considerando-se apenas os oceanos. O armazenamento de água total sobre os continentes pode ser calculado levando-se em conta os volumes nos reservatórios equivalentes ao solo, aos aquíferos e à neve, desconsiderando-se a biomassa.

Reconhecendo que a estimativa média do armazenamento total, em uma grande área, apenas a partir de medições *in situ* é uma tarefa muito difícil, senão praticamente impossível, a estimativa da variação do volume total de água proporcionada pelos dados do GRACE representa um recurso único para estudos de balanço hídricos em grandes regiões. Ainda que as soluções GRACE estejam sujeitas a várias fontes de incerteza (Xavier, 2012), suas estimativas do armazenamento total constituem uma inestimável conquista na aplicação do sensoriamento remoto a grandes áreas continentais, o que foi demonstrado assim que seus dados tornaram-se disponíveis para a comunidade científica internacional. Revisões extensivas desses

estudos podem ser encontrados em Ramillien *et al.* (2008), em Schmidt *et al.* (2008b), Almeida Filho(2009) e em Xavier (2012).

Contudo, a estimativa de cada uma dessas contribuições não pode ser efetuada sem o uso de fontes independentes de dados (Güntner, 2008), e as diferenças de altura do geóide (h^{geoid}) são calculadas como soluções temporais, menos as estáticas; essas quantidades são, então, convertidas em alturas equivalentes de água (h^{water}) usando a seguinte equação:

$$h^{\text{water}} = \frac{g}{4\pi G R \rho_w} \sum_{l=2}^{50} \frac{2l+1}{1+k'_l} \Delta h_l^{\text{geoid}} \quad (2.1)$$

A base de dados do GRACE utilizada neste trabalho possui resolução temporal mensal e abrange o período de janeiro de 2003 a dezembro de 2012. Esses dados foram usados para avaliar o nível dos reservatórios

2.4 ZCAS e Modelagem Hidrológica

Inicialmente, como previamente destacado, o fenômeno de ZCAS é bastante atuante em especial na época de verão na região sudeste do Brasil, com impactos diversos sobre o balanço hídrico de bacias hidrográficas e na operação dos reservatórios do setor elétrico da região.

A modelagem hidrológica, por sua vez, procura representar os fenômenos físicos em uma bacia hidrográfica com o objetivo de melhor entender o ciclo hidrológico e simular efeitos como os causados pelas inundações, mudança na cobertura do solo, desmatamento, poluição, erosão do meio natural, entre outros.

Modelos de simulação hidrológica têm se tornado uma parte fundamental de quase todos os aspectos de hidrologia. Por exemplo, condições do tempo existentes e previsíveis são fornecidas aos modelos para estimar futuras vazões de enchente para operações de emergência, combate a inundações e regularização de reservatórios. Modelos são utilizados em estudos de planejamento para avaliar os benefícios e impactos de planos alternativos de uso da terra ou medidas de controle de enchentes. Em estudos de projetos, modelos são utilizados para ajudar no desenvolvimento de especificações para as estruturas de engenharia de forma a resolver problemas de controle de enchentes, navegação e abastecimento de água. O progresso nessa área

tem sido atingido através do desenvolvimento e uso de duas grandes classes de modelos: concentrados e distribuídos. Contudo, muitos tópicos permanecem em aberto para discussão tais como a melhora nas fontes de dados, calibração, validação, parametrização e escalas de alimentação e operação desses modelos.

Nesta seção, em particular, enfoca-se a interrelação entre ZCAS e modelagem hidrológica com vistas a melhor identificar a fundamentação e consistência dos dados GRACE obtidos por sensoriamento remoto mediante o balanço hídrico de uma bacia hidrográfica via modelo chuva-vazão SMAP (*Soil Moisture Accounting Procedure*), de natureza concentrada e sistêmica, mostrando o potencial dos dados GRACE para monitoramento ou acompanhamento da variação do volume de água armazenado em reservatórios de uma região e potencial suporte para avaliar e aperfeiçoar oportunamente a performance do índice iZCAS em conjunto com a modelagem hidrológica.

2.5 Modelo SMAP (Soil Moisture Accounting Procedure)

Como enfatizado, tendo em vista o objetivo do trabalho, busca-se integrar a precipitação associada à ZCAS e as vazões naturais afluentes e defluentes aos reservatórios, com enfoque especial na avaliação dos dados GRACE, que permitem, em princípio, evidenciar a variação do volume armazenado de água em uma dada região. Como abordagem para explicitar essa evidência, adotamos a perspectiva da modelagem hidrológica do sistema por meio do emprego do modelo SMAP em sua versão diária, com potencial para geração posterior de dados na escala mensal, de forma que o leitor possa perceber as conexões do presente estudo de construção de indicadores iZCAS com os procedimentos de calibração e validação bem como de assimilação de dados e de previsão em estudos de modelagem hidrológica.

O SMAP (*Soil Moisture Accounting Procedure*) é um modelo determinístico de simulação hidrológica, do tipo transformação chuva-vazão. Foi desenvolvido, em 1981, por Lopes, J.E.G., Braga, B.P.F. e Conejo, J.G.L., apresentado no International Symposium on Rainfall-Runoff Modelling realizado no Mississipi, EUA, e publicado pela *Water Resources Publications* (Lopes *et al.*, 1982).

O modelo foi aplicado com sucesso em diversas bacias brasileiras e vem sendo utilizado pelo ONS desde janeiro de 2008, em combinação com o modelo estocástico multivariado “MEL”, para a previsão de vazões da bacia incremental da UHE Itaipu, no rio Paraná (ONS/FCTH, 2005). Além do bom desempenho nessa bacia, tanto na fase de testes como na de operacionalização, a escolha desse modelo para aplicação ao estudo de caso da presente dissertação deve-se também às facilidades

oferecidas. Primeiro, quanto ao entendimento do funcionamento do modelo e de seus parâmetros, o que permite a realização de alguns ajustes e aprimoramentos, se necessário. Segundo, quanto à obtenção dos dados de entrada necessários e na aplicação para a grande maioria das bacias do Sistema Interligado Nacional (SIN).

O modelo SMAP, em sua versão original (Figura 2.7), é constituído por três reservatórios lineares hipotéticos, que representam:

- a) o reservatório do solo (R_{solo});
- b) o reservatório da superfície (R_{sup}), correspondente ao escoamento superficial da bacia; e
- c) o reservatório subterrâneo (R_{sub}), correspondente ao escoamento subterrâneo da bacia (escoamento de base).

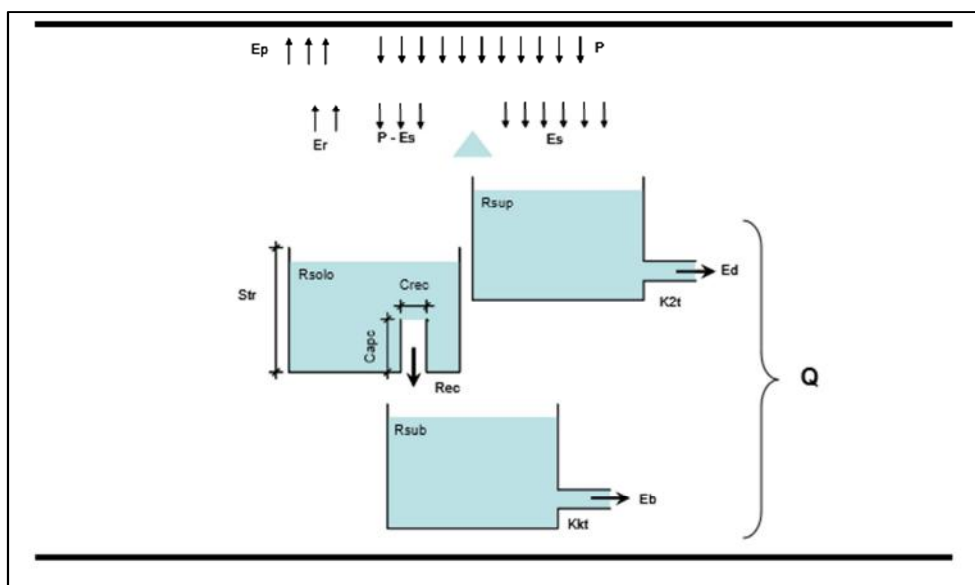


Figura 2.7 - Esquema do modelo SMAP original (3 reservatórios).

Para bacias com significativas planícies de inundação, onde, em eventos de fortes chuvas, são verificados importantes extravasamentos pelas margens, amortecimentos e atrasos nos picos das cheias, torna-se conveniente a inclusão de um quarto reservatório linear para representar o armazenamento e o escoamento de água nessas planícies. Nesses casos, é necessária a consideração de um quarto reservatório, conforme ilustrado na Figura 2.8.

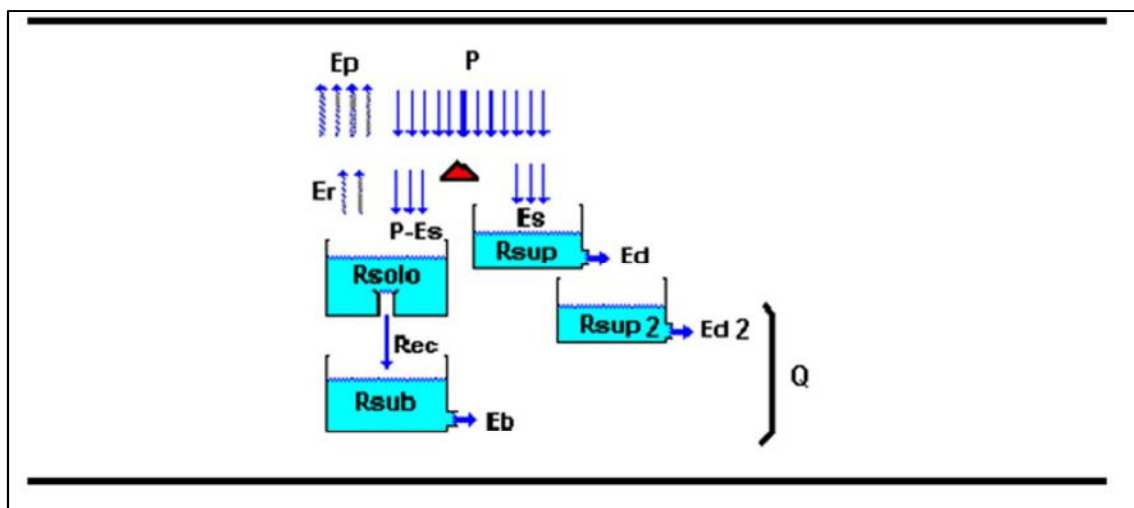


Figura 2.8 - Esquema do modelo SMAP (4 reservatórios).

Para a aplicação do modelo SMAP à bacia do alto/médio rio Grande, área de estudo desta dissertação, estudos anteriores da ONS (2008) apontaram a necessidade de inclusão do quarto reservatório nas sub-bacias dos rios Verde, em Porto dos Buenos, e Sapucaí, em Paraguaçu, afluentes da margem esquerda, a montante da UHE Furnas.

Assim, para este estudo, adotou-se a configuração do modelo para operação com quatro reservatórios, incluindo os correspondentes parâmetros, conforme pode ser visto na Figura 2.9.

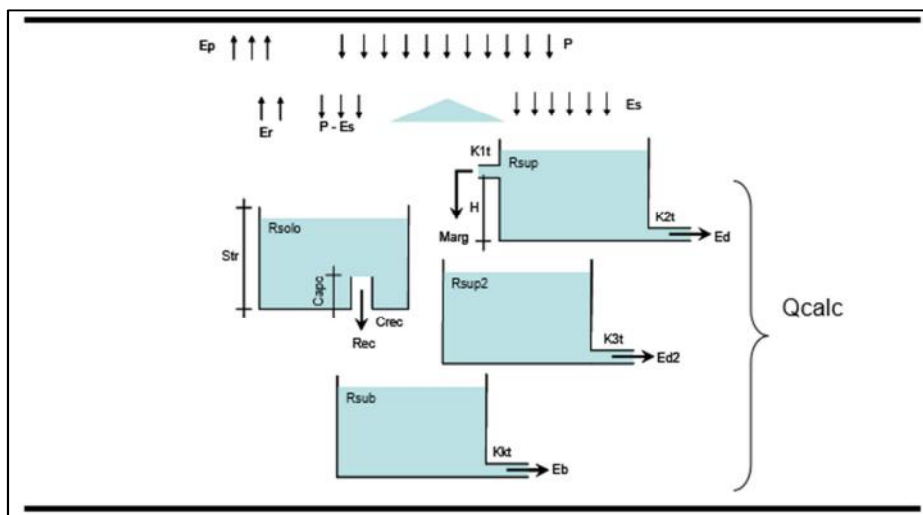


Figura 2.9 - Esquema do modelo SMAP aplicado à bacia do Rio Grande (4 reservatórios).

A opção por esse ajuste justifica-se pelo fato que, para vazões relativamente baixas, não há extravasamentos pelas margens e escoamento pelas planícies. Outra

vantagem da utilização do esquema de quatro reservatórios é que, caso queira-se inibir o funcionamento do quarto reservatório, basta fixar um valor relativamente elevado para o parâmetro H. Dessa forma, pode-se utilizar o esquema do modelo SMAP apresentado na Figura 2.9 para qualquer sub-bacia.

As variáveis de estado de cada um dos quatro reservatórios são atualizadas a cada dia, de acordo com o seguinte procedimento:

$$R_{\text{solo}}(t) = R_{\text{solo}}(t-1) + P(t) - E_s(t) - E_r(t) - \text{Rec}(t) \quad (2.2)$$

$$R_{\text{sub}}(t) = R_{\text{sub}}(t-1) + \text{Rec}(t) - E_b(t) \quad (2.3)$$

$$R_{\text{sup}}(t) = R_{\text{sup}}(t-1) + E_s(t) - \text{Marg}(t) - E_d(t) \quad (2.4)$$

$$R_{\text{sup2}}(t) = R_{\text{sup2}}(t-1) + \text{Marg}(t) - E_{d2}(t) \quad (2.5)$$

em que:

$R_{\text{solo}}(t)$: reservatório do solo no instante de tempo t (mm).

$R_{\text{sub}}(t)$: reservatório subterrâneo no instante de tempo t (mm).

$R_{\text{sup}}(t)$: reservatório da superfície no instante de tempo t (mm).

$R_{\text{sup2}}(t)$: reservatório da superfície/planície no instante de tempo t (mm).

$P(t)$: precipitação média na bacia, a ser considerada pelo modelo no instante de tempo t (mm).

$E_s(t)$: escoamento para o reservatório de superfície no instante de tempo t (mm).

$E_r(t)$: evapotranspiração real no instante de tempo t (mm).

$\text{Rec}(t)$: recarga subterrânea no instante de tempo t (mm).

$E_b(t)$: escoamento básico, proveniente do reservatório subterrâneo, no instante de tempo t (mm).

$\text{Marg}(t)$: extravasamento pelas margens no instante de tempo t (mm).

$E_d(t)$: escoamento superficial, proveniente do reservatório da superfície, no instante de tempo t (mm).

$E_{d2}(t)$: escoamento superficial, proveniente do reservatório da superfície/planície, no instante de tempo t (mm).

t : instante de tempo (no atual estudo: 1 dia).

O modelo SMAP com quatro reservatórios é composto por sete funções de transferência, sendo que a separação do escoamento superficial é baseada no método do SCS (*Soil Conservation Service*, do *United States Department of Agriculture*) (SOIL CONSERVATION SERVICE, 1972). Essas funções são as seguintes:

$$1. \text{ Se } P_{(t)} > Ai \Rightarrow S = Str - Rsolo_{(t-1)}$$

$$Es_{(t)} = \frac{(P_{(t)} - Ai)^2}{P_{(t)} - Ai + S} \quad (2.7)$$

$$\text{Se } P_{(t)} \leq Ai \Rightarrow Es_{(t)} = 0$$

$$2. \text{ Se } (P_{(t)} - Es_{(t)}) > Ep_{(t)} \Rightarrow Er_{(t)} = Ep_{(t)} \quad (2.8)$$

$$\text{Se } (P_{(t)} - Es_{(t)}) \leq Ep_{(t)} \Rightarrow Er_{(t)} = (P_{(t)} - Es_{(t)}) + (Ep_{(t)} - (P_{(t)} - Es_{(t)})) \times Tu_{(t)}$$

$$3. \text{ Se } Rsolo_{(t-1)} > \frac{Capc}{100} \times Str \Rightarrow Rec_{(t)} = \frac{Crec}{100} \times Tu_{(t)} \times \left[Rsolo_{(t-1)} - \frac{Capc}{100} \times Str \right] \quad (2.9)$$

$$\text{Se } Rsolo_{(t-1)} \leq \frac{Capc}{100} \times Str \Rightarrow Rec_{(t)} = 0$$

$$4. \text{ Se } Rsup_{(t-1)} > H \Rightarrow Marg_{(t)} = (Rsup_{(t-1)} - H) \times (1 - 0.5^{1/KM}) \quad (2.10)$$

$$\text{Se } Rsup_{(t-1)} \leq H \Rightarrow Marg_{(t)} = 0$$

$$5. Ed_{(t)} = Rsup_{(t-1)} \times (1 - 0.5^{1/KM}) \quad (2.11)$$

$$6. Ed2_{(t)} = Rsup2_{(t-1)} \times (1 - 0.5^{1/KM}) \quad (2.12)$$

$$7. Eb_{(t)} = Rsub_{(t-1)} \times (1 - 0.5^{1/KM}) \quad (2.13)$$

onde:

$$Tu_{(t)} = \frac{Rsolo_{(t-1)}}{Str} \quad (2.14)$$

A_i : abstração inicial (mm).
 Str : capacidade de saturação do solo (mm).
 $Ep(t)$: evapotranspiração potencial (mm).
 $Tu(t)$: teor de umidade do solo (adimensional).
 $Capc$: capacidade de campo (%).
 $Crec$: parâmetro de recarga subterrânea (%).
 H : altura representativa para início de escoamento em planícies (mm).
 $K1t$: constante de recessão do escoamento para planícies (dia).
 $K2t$: constante de recessão do escoamento superficial (dia).
 $K3t$: constante de recessão do escoamento da superfície/planícies (dia).
 $K(k)t$: constante de recessão do escoamento básico (dia).

O cálculo da vazão é dado pela equação:

$$Q_{calc(t)} = \frac{(Ed_{(t)} + Ed2_{(t)} + Eb_{(t)}) \times Ad}{86.4} \quad (2.15)$$

Em que :

$Q_{calc(t)}$: vazão total calculada pelo modelo no instante de tempo t (m^3/s).

Ad : área de drenagem da bacia considerada (km^2).

As constantes de recessão, $K1t$, $K2t$, $K3t$ e $K(k)t$, são associadas à duração do intervalo, medido em dias, no qual a vazão do correspondente reservatório cai à metade de seu valor (não considerando nova recarga nesse período). O eventual transbordo do reservatório do solo é transformado em escoamento superficial.

Os dados de entrada do modelo são:

- os totais médios diários de chuva - $P(t)$,
- os totais médios diários de evapotranspiração potencial - $Ep(t)$, e
- as vazões médias diárias observadas na considerada no estudo - $Q_{obs(t)}$.

Diante das motivações, fundamentações e conexões expostas na revisão bibliográfica do trabalho, pode-se, agora, apresentar a abordagem metodológica proposta para a presente dissertação.

CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA

3.1 Referencial metodológico

Inicialmente, resgata-se o objetivo geral do trabalho, que se refere à caracterização da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e seu impacto na região sudeste do Brasil, notadamente no armazenamento dos reservatórios do setor elétrico na bacia do rio Grande, com especial enfoque de propor e adequadamente avaliar o potencial de um índice preditor de ZCAS, aqui denominado de iZCAS.

Note-se que a presente diretriz metodológica apóia-se em trabalho precursor de Lopes (2012), apresentado em monografia de final de curso junto ao Curso de Meteorologia da UFRJ, não publicado, de conceber um índice que pudesse prever com algum grau de confiabilidade o fenômeno de ZCAS. Adicionalmente, a presente dissertação recebeu o suporte inicial do trabalho de Seabra (2004), dissertação de mestrado publicada na COPPE/UFRJ, quando atenção especial foi, de forma inovadora, dedicada a esse tipo de fenômeno em bacias que sofriam influências das ZCAS, incluindo, também, a bacia do rio Grande.

Feitas essas observações, na direção do objetivo proposto, ou seja, de estudar a relação entre os episódios de ZCAS e a precipitação pluvial, com proposição de formulação e avaliação de indicador de previsibilidade de ocorrência do correspondente fenômeno, seriam examinados, preliminarmente, os dados observados relativos aos indicadores da presença das ZCAS, da precipitação registrada no solo e da vazão afluente aos reservatórios na bacia de estudo. Contudo, os dados observados na região de estudo, detalhada no Capítulo 4, que abrange a bacia do rio Grande, são, em geral, limitados, por serem esparsos quanto à distribuição física dos sensores e quanto à frequência das medições. Essa realidade, que é extensiva ao território brasileiro, requer que se busquem métodos alternativos de avaliação quantitativa das informações desejadas. Nesse contexto, optou-se por avaliar dados obtidos por meio de sensoriamento remoto e por outras fontes de informação, como, a seguir, descrito.

Para a identificação da ocorrência de episódios de ZCAS, foi feito, inicialmente, um levantamento bibliográfico na publicação Boletim de Análise Climática – Climanálise, disponibilizado mensalmente pelo Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (CPTEC/INPE/MCTI). Nesse boletim, são descritos os fenômenos ocorridos no Brasil e na América do Sul, que se refletiram nas condições climáticas do mês, dentre os quais se incluem os episódios de ZCAS. A base de

conhecimento gerada pelo boletim serve de subsídio para análises históricas e tem elevado valor técnico científico, pois congrega pareceres de especialistas sobre o comportamento da atmosfera, tanto no contexto do tempo quanto do clima.

Em paralelo, para corroborar as informações do boletim Climanálise, estabeleceu-se outra vertente para determinar a ocorrência de episódios de ZCAS, configurando-se, então, no índice simplificado proposto denominado mais especificamente de iZCASref (item 3.1.1). Em seguida, explora-se o aperfeiçoamento da formulação inicial proposta, resultando, então, na proposição do indicador denominado, nesta dissertação, de iZCAS (item 3.1.2).

3.1.1 Indicador simplificado iZCASref

O iZCASref é calculado multiplicando-se a intensidade da velocidade do vento (m/s) pela umidade relativa do ar (%v/v), ambos definidos no nível de 850 hPa, para os horários das análises principais dos modelos numéricos meteorológicos (00h, 06h, 12h e 18h TMG). O cálculo do índice é feito para as 00h e repetido para os horários seguintes, gerando quatro valores por dia.

Na validação preliminar do iZCASref realizada em Lopes (2012), constatou-se que valores maiores do que 25 garantem índice de acerto na ocorrência de ZCAS acima de 60%, com probabilidade de falsa detecção na casa de 33%. Para determinar ZCAS no dia, é utilizado o valor máximo dentre os quatro calculados. O processo é repetido para o período dos dados disponíveis, obtendo-se, assim, uma série temporal diária para o parâmetro, que indica se ocorreu ZCAS no dia ou não.

Neste trabalho, o iZCASref foi calculado com base nos dados do modelo Global Forecast System - GFS, que, para a região da ZCAS continental, possui nove pontos, definidos ao longo da diagonal, linha em vermelho mostrada na Figura 3.1. Desses nove pontos ao longo da diagonal sobre a área de interesse, são extraídos os dados de intensidade do vento e de umidade relativa no nível de 850 hPa.

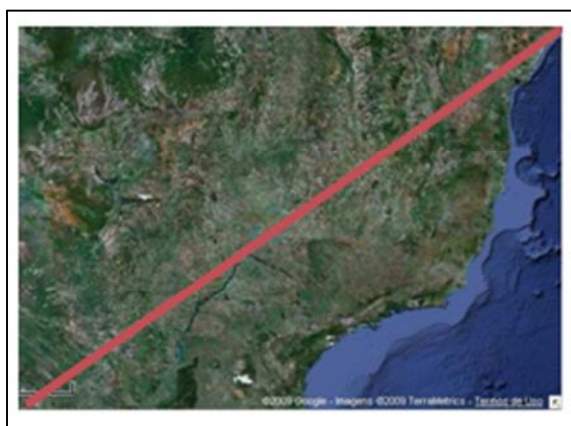


Figura 3.1- Área de interesse para o cálculo do iZCAS, usando o FNL/GFS, com a diagonal em vermelho, indicando a seção vertical com nove pontos de grade ao longo.

Em fase posterior, fez-se uma seleção das direções do vento que mais contribuiriam para o transporte de umidade da Amazônia para a região Sudeste, eliminando do cálculo as intensidades ocorridas nas demais direções.

Os ângulos escolhidos para seleção das direções do vento que mais contribuiriam, de agora em diante, chamados ângulos de ataque, compreendem os ângulos maiores que 235° e menores que 35° , passando pelo zero, como é mostrado na Figura 3.1. Com essa seleção, pretendeu-se manter apenas as direções do vento que contribuiriam para a alimentação da área continental da ZCAS com umidade da região Amazônica, conforme expresso na condição (1), determinada por Quadro (1994), para o estabelecimento de um evento de ZCAS, citado anteriormente (item 2.2.4).



Figura 3.1- Rosa dos ventos com a indicação dos ângulos de ataque.

Caso os ângulos não satisfaçam à condição de ângulo de ataque mostrada na Figura 3.2, ou seja, não contribuem com o transporte de umidade, o indicador iZCASref é considerado automaticamente como zero.

O iZCASref foi calculado, então, para o período de 11 anos, compreendido de janeiro de 2000 até dezembro de 2011, de acordo com a disponibilidade das análises do GFS.

Para o cálculo do iZCASref, elegeu-se a base histórica de análises do Sistema Global de Assimilação de Dados (GDAS) do *National Meteorological Center* (NMC), atual *National Center for Environmental Prediction* (NCEP), descrita por Kanamitsu (1989), por se tratar de um modelo amplamente utilizado, e que apresenta bons resultados para a região do Brasil, respeitando detalhamento feito na seqüência do texto.

O modelo (sistema) é baseado em equações primitivas da física. Por conveniência, é utilizado o método espectral para representação das variáveis no plano horizontal e o método de diferenças finitas na vertical. Uma das vantagens do método espectral é que ele não requer tratamento especial para as variáveis espaciais nem para pontos individuais, além da eficiência computacional. O sistema de diferenças finitas na vertical é a melhor escolha para a atmosfera. O esquema de Arakawa (1972), aplicado nesse caso, conserva massa, momento, temperatura potencial, vapor de água, momento angular e energia total. A temperatura da superfície do mar (TSM) utilizada é a média das análises produzidas pelo NCEP.

Kanamitsu *et al.* (1991) descrevem mudanças implementadas no modelo com truncamento 80 (T80), que era utilizado operacionalmente até março de 1991 pelo antigo NMC como seu modelo global de previsão do tempo. O modelo sofreu algumas modificações, dentre elas o aumento da resolução espacial horizontal, passando de T80 para T126, o que equivale a reduzir o espaçamento de grade de 160 km para 105 km, além de uma melhora considerável na física do modelo.

A resolução espacial vertical permaneceu com 18 níveis após essa atualização do modelo. A melhora na representação da orografia do modelo permitiu incluir detalhes da linha de costa, lagos, contorno de gelo marinho e de diferentes formas sobre a superfície terrestre, o que resultou, também, numa melhor caracterização das frentes e precipitação associada.

A temperatura da superfície do mar (TSM) utilizada pelo modelo é obtida de uma nova análise (REYNOLDS, 1991), em que a resolução espacial é de 2° de latitude e longitude, e a resolução temporal é de uma semana.

O conjunto de atualizações inseridas no modelo global do NCEP deu origem ao modelo hoje conhecido como *Global Forecast System* (GFS), antes referido. Esse modelo, executado rotineiramente, gera previsões para até 16 dias, em intervalos de 3 horas, com dezenas de variáveis, dentre as quais temperatura, vento, chuva e umidade do solo. Por ser um modelo global, o GFS não possui limites horizontais.

Com uma resolução horizontal de 28 km, o GFS é acoplado com modelos do oceano, de solo-terra e de gelo, que, juntos fornecem uma visão mais acurada das condições meteorológicas.

O *Global Data-Assimilation System* (GDAS) tem como coordenada vertical a pressão normalizada (coordenada sigma - pressão no nível dividida pela pressão à superfície no ponto considerado) e funções esféricas como coordenadas horizontais. São executados cinco passos até a disponibilização do produto final:

- 1) no primeiro passo, é obtido um campo de aproximação inicial (*first-guess*) do modelo proveniente de 6 horas de previsão de uma análise anterior;
- 2) no segundo passo, é feito um pré-processamento, em que os coeficientes espectrais dos modelos de nível sigma são transformados em valores de pontos de grade; nesse passo, é feita interpolação das variáveis dos pontos de grade com dados observacionais (provenientes de radiossondas, temperaturas por satélite, movimento de nuvens provenientes de satélites, bóias, observações de navios e dados produzidos de observações manuais); o principal objetivo do segundo passo é obter incrementos na análise de grade de dados observados; para tanto, é utilizado o método de interpolação ótima descrita detalhadamente por Dey (1989);
- 3) no terceiro passo, os incrementos são interpolados após a transformação para coeficientes esféricos;
- 4) no quarto passo, chamado de inicialização, são controlados desequilíbrios resultantes dos ajustes campos de massa e movimento, que geram ondas de gravidades espúrias; e
- 5) no quinto passo, tem-se os campos de previsão; os campos resultantes do modelo são vento, temperatura, pressão à superfície e umidade.

Considerando as modificações descritas e os passos para obtenção de previsões do GFS, que visam substancialmente a melhora do desempenho e acurácia da previsão, optou-se, no cálculo do iZCAS, por usar apenas as análises, e não as previsões. Esses dados são disponibilizados pelo *Research Data Archive* (RDA), que é gerenciado pela *Data Support Section of the Computational and Information Systems Laboratory*, no *National Center for Atmospheric Research*, localizado em Boulder, Colorado, EUA, e financiado pela *National Science Foundation*.

A base de dados eleita no RDA foi a NCEP-FNL (Final) *Operational Global Analysis*, de resolução horizontal de 1°, disponibilizadas rotineiramente a cada seis horas. Essa base é gerada a partir do *Global Data-Assimilation System* (GDAS), que

coleta continuamente os dados observacionais do GTS (*Global Telecommunications System*), dentre outras fontes. O FNL é feito com a mesma base do GFS, mas é preparado uma hora depois que o GFS é inicializado. O FNL é atrasado propositalmente para que mais dados observacionais possam ser usados, enquanto o GFS é iniciado antes, pois suas previsões fornecem suporte crítico a diversas decisões, e usa o FNL de seis horas antes como parte do seu ciclo de inicialização.

As análises do FNL incluem a umidade do ar e o vento, em 26 níveis verticais, desde a camada limite até a tropopausa, permitindo, assim, o seu uso para o cálculo do transporte de umidade da Amazônia para a região sudeste. Os resultados da base FNL são disponibilizados em pontos de grade, com resolução de 1° de latitude por 1° de longitude, disponíveis para o período de 1999 a 2011.

Para melhor ilustrar esse procedimento, deve-se ainda observar os gráficos das Figuras 3.3a e 3.3b. Essas figuras representam, a título de exemplo, o cálculo do parâmetro de umidade relativa do ar para 00Z do dia 1 de fevereiro de 2009. No gráfico da Figura 3.1a, o eixo das abscissas (eixo x) contém os nove pontos da diagonal vermelha mostrada na Figura 3.1, e o eixo das ordenadas (eixo y) indica se a direção do vento satisfaz (valor 1) ou não (valor 0) a condição de ângulo de ataque. Nota-se que apenas os pontos 1, 2, 3 e 5 satisfazem a condição e assim serão usados no produto intensidade da velocidade versus umidade relativa do ar.

No gráfico da Figura 3.3b, apenas os pontos que satisfizeram a condição do ângulo de ataque foram computados no cálculo do produto, sendo que o eixo x apresenta os nove pontos da diagonal vermelha, e o eixo y oferece o resultado do produto intensidade da velocidade pela umidade, isto é, produz o parâmetro indicativo do fluxo de umidade para o horário de 00Z. O mesmo procedimento deve ser repetido para os horários de 06Z, 12Z, e 18Z, gerando quatro valores por dia. A soma desses quatro valores produz o valor diário. Repetindo todo o processo para o período de controle, obtém-se uma série temporal para o parâmetro indicativo do fluxo de umidade do ar.

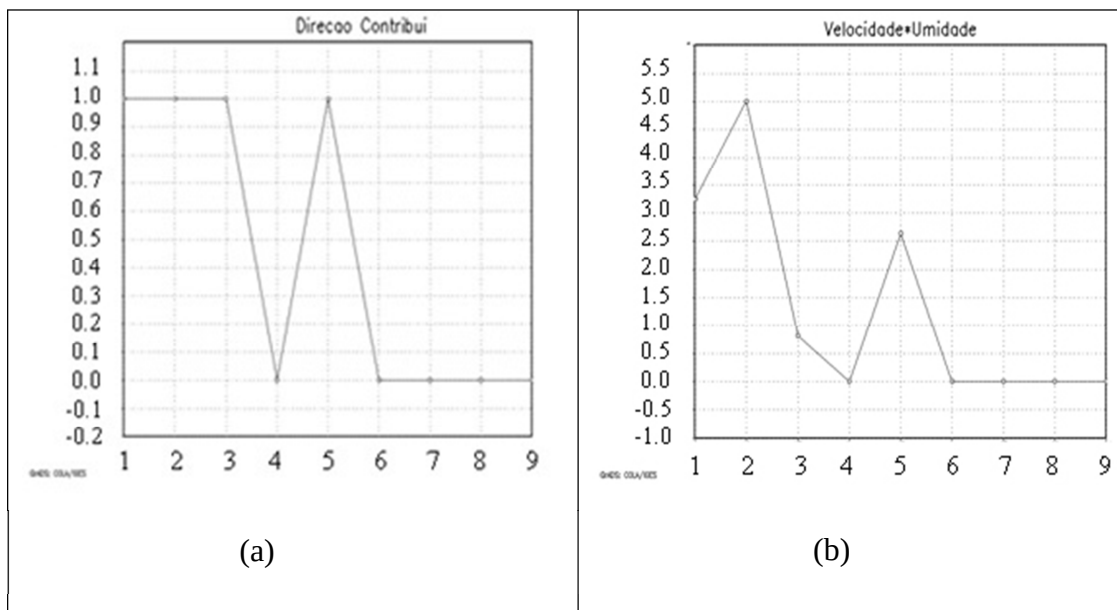


Figura 3.3 - Representação gráfica do cálculo do parâmetro de umidade relativa do ar para 00Z do dia 1 de fevereiro de 2009 ao longo de 9 pontos da diagonal sobre a área de estudo - (a) direção do vento e correspondente indicação se há contribuição (valor 1) ou não (valor zero); (b) produto da multiplicação da velocidade pela umidade relativa do ar.

Após análise do período de controle e buscando avaliar a representatividade do procedimento para outros períodos, foi estendida a análise para o período de janeiro de 2000 até dezembro de 2011.

3.1.2 Indicador aperfeiçoado iZCAS

Estabelecida a formulação do indicador simplificado de referência iZCASref, propõe-se, como melhoria do índice, a substituição da umidade relativa do ar pela umidade específica (g/g) do ar, justificando-se essa alteração com base no fato de se reduzir o efeito da temperatura associada ao cálculo da umidade relativa do ar. Adicionalmente, foi aplicado um procedimento de filtragem no cálculo do índice, de tal forma que, caso não haja persistência por 3 dias consecutivos na indicação de ocorrência de fluxo de umidade do ar, faz-se o descarte do correspondente valor. Vale destacar que a proposição melhora o desempenho computacional para estimativa do índice que se convencionou chamar, nesta pesquisa, de iZCAS. Nesse sentido, o índice iZCAS representa uma alternativa de avanço em relação ao iZCASref, evidenciando uma proposição com potencial de aplicação operacional, realçando simplicidade e rapidez no processamento.

3.2 Avaliação dos indicadores iZCASref e iZCAS

Após essa etapa de construção do iZCASref e do iZCAS, foi necessário identificar procedimento para avaliá-los. Nesse sentido, utilizou-se a tabela de contingência, que permite estudar a relação entre duas ou mais variáveis, descrevendo, assim, as frequências de ocorrência nas categorias de uma das variáveis em contraste com as frequências associadas às categorias de outras variáveis.

Pode-se defini-la, também, como uma tabela de frequências classificadas de acordo com os valores das variáveis em questão, sendo uma tabela de dois valores de entrada, em que as linhas correspondem a uma variável e as colunas a outra variável. A Tabela 3.1 exemplifica uma tabela de contingência em que as linhas correspondem aos dados que apontaram que o indicador de ZCAS (iZCASref ou iZCAS) evidencia a ocorrência do fenômeno, enquanto as colunas dizem respeito aos dados de ZCAS observados e obtidos a partir de análises do boletim de Climanálise.

Tabela 3.1- Tabela de contingência - iZCASref ou iZCAS versus ZCAS.

		ZCAS - Observação		
		Evento	Não Evento	
iZCASref ou iZCAS – Previsão	Evento	a	b	a+b
	Não evento	c	d	c+d
		a+c	b+d	N= a+b+c+d

Na Tabela 3.1, seguem as convenções adotadas:

- a é o número de acertos do evento;
- b é o número de eventos previstos, mas que não foram observados;
- c é o número de eventos que foram observados e não foram previstos;
- d é o número de acertos do não-evento;
- (a+c) é o total de eventos observados;
- (b+d) é o total de não-eventos observados;
- (a+b) é o total de eventos previstos;
- (c+d) é o total de não-eventos previstos;
- n é o tamanho do conjunto ou amostra.

A partir da tabela de contingência, podem ser identificados os tipos de erros presentes na análise. Sabe-se que uma previsão perfeita deveria produzir apenas acertos e não falsos alarmes e erros. Para verificar o desempenho das previsões,

conforme Wilks (2006), serão calculados a probabilidade de detecção (POD), a probabilidade de falsa detecção (POFD), o índice crítico de sucesso (ICS) e o viés ou bias (B).

Dessa forma, os fundamentos para estimativas de POD, POFD, ICS e B, mediante o emprego de tabela de contingência, que permitirão assim melhor avaliar o desempenho dos indicadores propostos iZCASref e iZCAS, estão mais detalhadamente expostos a seguir.

- POD – probabilidade de detecção (ou verdadeiro-positivo) - fornece a taxa de previsão correta do evento desejado ou, em outras palavras, fornece a fração total em que ocorreu ZCAS e que foi corretamente previsto pelo indicador iZCASref ou iZCAS, conforme a expressão

$$POD = \frac{a}{(a + c)} \quad (3.1)$$

- POFD – probabilidade de falsa detecção (ou falso-positivo) - é a razão do número de alarme falso dividido pela soma de não eventos observados:

$$POFD = \frac{b}{(b + d)} \quad (3.2)$$

- ICS – índice crítico de sucesso é o número correto de previsão do evento dividido pelo número total de ocasiões nas quais o evento foi previsto e/ou observado; pode ser visto como a proporção correta da quantidade que está sendo prevista, após remover as previsões corretas do não-evento:

$$ICS = \frac{a}{(a + b + c)} \quad (3.3)$$

- B – bias ou viés é a comparação da previsão com a observação; é a razão entre o número de previsões do evento pelo número total de eventos observados; uma previsão imparcial exibe $B = 1$; um valor maior do que 1 indica uma previsão superestimada e menor do que 1, uma previsão subestimada.

$$B = \frac{(a + b)}{(a + c)} \quad (3.4)$$

Assim, pretende-se identificar os valores do iZCASref e do iZCAS que melhor corresponderiam, respectivamente, a um indicador com baixa taxa de falsa ocorrência e razoável probabilidade de detecção, com suporte da abordagem de avaliação de desempenho por meio dos índices apresentados nas Equações 3.1 a 3.4.

3.3 Aplicação da metodologia ao estudo de caso

Selecionada a região para o estudo de caso, como já referenciada no capítulo introdutório e mais bem detalhada no próximo capítulo, foram definidas algumas bases de dados para inferir a chuva e as respostas hidrológicas em episódios de ZCAS. Os parâmetros definidos foram a chuva estimada com o TRMM, a vazão natural afluente na UHE-Furnas, o nível de água equivalente estimada pelo GRACE e a ocorrência de ZCAS, aferida tanto com base nos boletins de Climanálise quanto estimada mediante o emprego de iZCASref ou iZCAS, ambos calculados com dados do modelo global GFS.

O período de análise foi definido em função da disponibilidade de dados das bases apresentadas, tendo como limitador inferior a base de dados do GRACE – o ano de 2003 – e como limitador superior a base de dados do iZCASref ou iZCAS, 2011, ficando, então, o período definido de 2003 a 2011. O fluxo de tratamento dos dados está ilustrado na Figura 3.4.

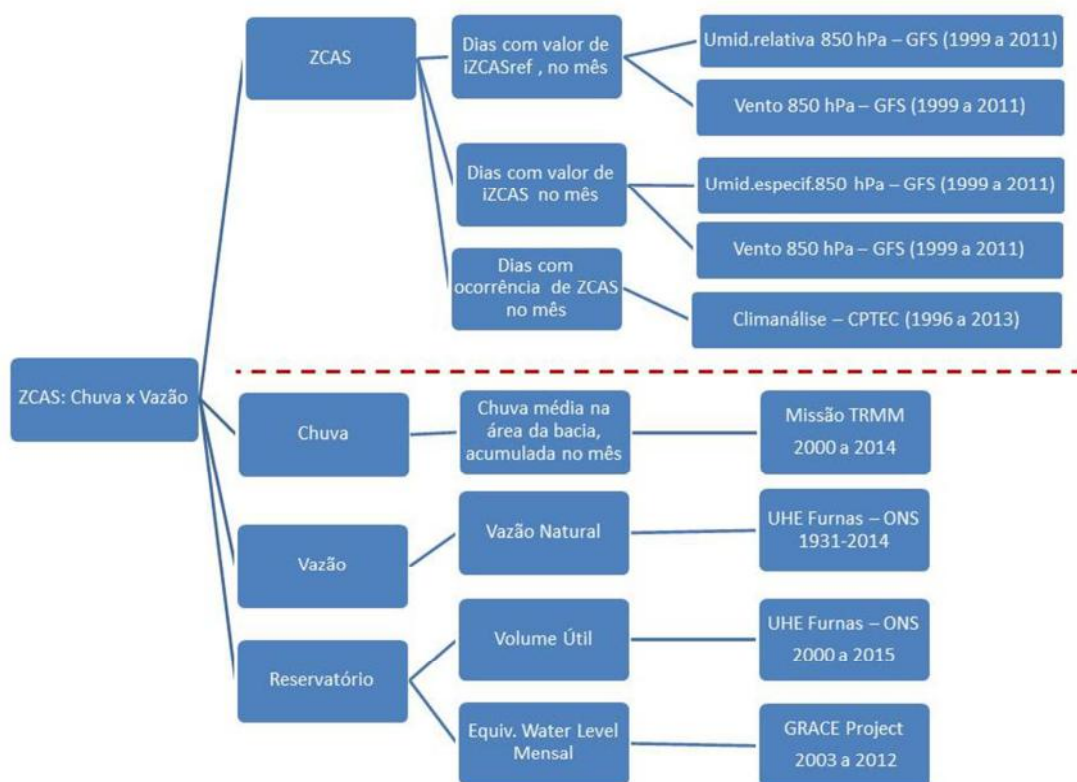


Figura 3.4 - Fluxo de tratamento dos dados: chuva média na área de drenagem associada a UHE Furnas, a ocorrência de ZCAS, e a vazão natural na UHE Furnas, além do volume útil e nível de água equivalente, referência do nível do reservatório.

3.3.1 Média de chuva diária na área de drenagem da UHE Furnas

A base de dados do TRMM utilizada foi obtida a partir do endereço eletrônico da NASA¹, transferida por meio do protocolo FTP (*file transfer protocol*).

O nível de tratamento utilizado do TRMM versão 7 foi o L3, que aloca os dados em uma malha com resolução espacial de 0,25°, código 3B42, disponibilizando os acumulados diários de chuva.

Para transferência da base de dados, do período 2000 a 2014, foi elaborado um *script shell* (ANEXO A). O detalhe para a transferência dos arquivos é a referência do calendário juliano.

As demais bases de dados possuíam resolução temporal diária, justificando a escolha dessa resolução, também, para essa base. Foi, primeiramente, definido retângulo que abrange a área de drenagem com exutório definido na UHE-Furnas, e, então, foi obtido o valor médio da chuva para a área, criando, assim, uma série temporal de chuva diária na área ao longo do período.

3.3.2 Nível mensal do reservatório

A base de dados dos níveis de água do reservatório utilizada, neste trabalho, foi obtida, por FTP, do endereço eletrônico da empresa FURNAS Centrais Elétricas. Os dados são disponibilizados mensalmente, separados por ano, selecionando-se, para o presente estudo, o período de 2003 a 2011.

3.3.3 Nível de água equivalente (*equivalent water level*)

Foram utilizados dados mensais de altimetria e resolução espacial de um grau, coletados no endereço eletrônico do projeto GRACE. Com essas informações, pode-se fazer a comparação com os dados relativos ao volume útil (nível do reservatório).

3.3.4 Dias com ocorrência de ZCAS em dado dia

Os boletins Climanálise do CPTEC foram utilizados para determinar os eventos de ZCAS ocorridos no Brasil, no período de 01 de janeiro 2003 a 31 de dezembro de 2011. Construiu-se uma base de dados, na qual foi atribuído o valor 0 (zero) para os dias sem ocorrência de ZCAS (não ZCAS) e o valor 1 (um) para os dias com ocorrência do fenômeno. Em função da menor resolução temporal das outras bases de dados, o conjunto de dados foi reduzido para períodos mensais, a partir dos quais foram determinados os dias com atividades de ZCAS.

3.3.5 Procedimento de escolha do valor limiar do índice *IZCASref*

Para criação da série temporal do *IZCASref*, foi executada uma rotina de computador desenvolvida em linguagem Fortran, em conjunto com um *shell script*.

O *IZCASref* avalia o fluxo de umidade do ar oriundo da região amazônica em direção à região sudeste. Utiliza dados de vento e de umidade relativa do ar no nível de 850 hPa das análises do modelo GFS, com resolução temporal de 6 horas (4 vezes por dia) e resolução horizontal de 1º grau de latitude por 1º grau de longitude. Para o cálculo, foi empregado o código computacional GrADS (*Grid Analysis and Display System* - DOTY, 1995), importante para a automação das rotinas de visualização dos resultados.

Com os valores calculados do *IZCASref* e com os eventos de ZCAS analisados, foi efetuada a análise. Para se obter o valor limiar do índice, operou-se, inicialmente, a divisão em 4 classes: ocorrência e detecção, que sinaliza quando ocorreu a ZCAS e quando o *IZCASref* obteve um valor acima do limiar estabelecido; não ocorrência e detecção, quando não houve o fenômeno ZCAS, mas o *IZCASref* indicou valor acima do limiar; ocorrência e não detecção, quando houve o fenômeno ZCAS, mas o *IZCASref* apresentou valores inferiores ao limiar; e não ocorrência e não

detecção, quando não ocorre o fenômeno e o índice apresenta valores abaixo do limiar. Com posse das informações, foram, então, estabelecidos 11 valores limítrofes para avaliar qual deles melhor se ajusta à ocorrência do fenômeno. O estudo foi conduzido, inicialmente, para um período de controle (dezembro/2009 a março/2010) e, posteriormente, estendido para um período de 11 anos (dezembro/2000 a março/2011).

A Tabela 3.2 apresenta os resultados obtidos para os 11 valores limítrofes ao longo do período de controle. Para simplificação da visualização, a Tabela 3.3 foi confeccionada indicando os valores de cada valor limítrofe adotado, iniciando-se de 10 até o valor de 90, com intervalo de 10, e maior detalhamento entre os valores de 20 e 30.

Tabela 3.2 - Frequências de observação de classes definidas segundo as categorias detecção/não detecção e ocorrência/não ocorrência com base nos valores limites de iZCASref de 10 a 90, com detalhamento de 20 a 30 – período de controle.

Valor Limite	10	20	22	25	30	40	50	60	70	80	90
Ocorrência e Detecção	47	39	37	33	26	20	13	8	5	3	1
Não Ocorrência e Detecção	56	35	33	23	17	8	3	0	0	0	0
Ocorrência e Não Detecção	5	13	15	19	26	32	39	44	47	49	51
Não Ocorrência e Não Detecção	13	34	36	46	52	61	66	69	69	69	69

Com base nas informações da Tabela 3.2, pode-se extrair alguns índices estatísticos, como, por exemplo, a taxa de probabilidade de detecção (POD), a probabilidade de falsa detecção (POFD), o índice crítico de sucesso (ICS) e, finalmente, o bias (B). Em especial, a Tabela 3.3 ilustra e detalha os resultados para esses índices estatísticos de desempenho do indicador iZCASref.

Tabela 3.3- Índices estatísticos calculados com base nos valores limítrofes do índice iZCASref – período de controle.

Valor Limite	10	20	22	25	30	40	50	60	70	80	90
POD	90%	75%	71%	63%	50%	38%	25%	15%	10%	6%	2%
POFD	81%	51%	48%	33%	25%	12%	4%	0%	0%	0%	0%
ICS	41%	36%	35%	32%	27%	22%	16%	10%	7%	4%	1%
BIAS	1,98	1,42	1,35	1,08	0,83	0,54	0,31	0,15	0,10	0,06	0,02

Observa-se, na Tabela 3.3, por exemplo, que valores menores que do que 25 garantem índice de acerto acima de 60%, com probabilidade de falsa detecção na faixa entre 30% e 40%, o que fornece subsídios e estímulo para expansão do período de análise da série de dados em busca de melhor representatividade e confiabilidade para avaliar o desempenho do indicador predictor de ZCAS.

Adicionalmente, nota-se que valor limite de 25 apresenta um bom desempenho como valor limiar. Assim, destacam-se os resultados da tabela de contingência para esse limiar na Tabela 3.4, enquanto os correspondentes índices estatísticos encontram-se expostos na Tabela 3.5.

Tabela 3.4- Tabela de contingência com valor limítrofe de 25 para o índice iZCASref – período de controle.

		ZCAS - Ocorrência	
		Evento	Não Evento
iZCASref – Detecção	Evento	33	23
	Não evento	19	46

Tabela 3.5- Índices estatísticos de desempenho do indicador iZCASref para o valor limítrofe de 25 – período de controle.

Índices estatísticos	Valor
POD	63%
POFD	33%
ICS	32%
BIAS	1,08

Uma vez estabelecido esse referencial de análise para cálculo do valor limiar para iZCASref, expandiu-se a avaliação para 11 anos, compreendido de janeiro de

2000 até dezembro de 2011, abrangendo 10 períodos de verão, obtendo-se os valores apresentados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6- Frequências de observação de classes definidas segundo as categorias detecção/não detecção e ocorrência/não ocorrência com base nos valores limítrofes de iZCASref de 10 a 90, com detalhamento de 20 a 30 – período de 11 anos.

Valor Limite	10	20	22	25	30	40	50	60	70	80	90
Ocorrência e Detecção	518	417	390	361	291	211	140	72	30	13	4
Não Ocorrência e Detecção	2706	1772	1629	1373	1042	581	303	150	58	25	8
Ocorrência e Não Detecção	79	180	207	236	306	386	457	525	567	584	593
Não Ocorrência e Não Detecção	1080	2014	2157	2413	2744	3205	3483	3636	3728	3761	3778

Com o suporte da Tabela 3.6, podem ser calculados os índices estatísticos POD, POFD, ICS e B, de forma análoga ao procedimento adotado para o período de controle, assinalados na Tabela 3.7.

Tabela 3.7- Índices estatísticos calculados com base nos valores limítrofes do índice iZCASref – período de 11 anos.

Valor Limit e	10	20	22	25	30	40	50	60	70	80	90
POD	87%	70%	65%	60%	49%	35%	23%	12%	5%	2%	1%
POFD	71%	47%	43%	36%	28%	15%	8%	4%	2%	1%	0%
ICS	12%	10%	9%	9%	7%	5%	4%	2%	1%	0%	0%
BIAS	5,40	3,66	3,38	2,90	2,23	1,32	0,74	0,37	0,14	0,06	0,02

Os resultados obtidos permitem confirmar que o valor limite de 25 para iZCASref no período de controle e ao longo do período estendido de 11 anos apresenta valores satisfatórios para os quatro índices estatísticos empregados, fundamentando a sua escolha para os resultados produzidos nesta dissertação e apresentados no Capítulo 5.

3.3.6 Procedimento de escolha do valor limiar do índice IZCAS

De forma similar ao procedimento executado para identificar o limiar para iZCASref, realizou-se nova simulação com a base de dados disponíveis para o novo índice aperfeiçoado iZCAS, calculando-se novo valor limiar para melhor representar a identificação de episódios de ZCAS de forma preditiva. Dessa forma, foi construída a Tabela 3.8 com base no período de dezembro de 2009 a março de 2010, abrangendo 11 anos.

Tabela 3.8- Frequências de observação de classes definidas segundo as categorias detecção/não detecção e ocorrência/não ocorrência com base nos valores limítrofes de iZCAS de 10 a 80, com detalhamento de 60 a 70 – período de 11 anos.

Valor Limite	10	20	30	40	50	60	65	70	80
Ocorrência e Detecção	22	22	19	17	15	12	10	8	6
Não Ocorrência e Detecção	96	89	84	63	50	29	24	20	14
Ocorrência e Não Detecção	0	0	3	5	7	10	12	14	16
Não Ocorrência e Não Detecção	3	10	15	36	49	70	75	79	85

Com base na tabela de contingência (Tabela 3.8), realizaram-se o cálculos dos índices estatísticos POD (probabilidade de detecção), POFD (probabilidade de falsa detecção), ICS (índice crítico de sucesso) e B (bias), obtendo-se os valores mostrados na Tabela 3.9.

Tabela 3.9- Índices estatísticos calculados com base nos valores limítrofes do índice iZCASref – período de 11 anos.

Valor Limite	10	20	30	40	50	60	65	70	80
POD	100%	100%	86%	77%	68%	55%	45%	36%	27%
POFD	97%	90%	85%	64%	51%	29%	24%	20%	14%
ICS	19%	20%	18%	20%	21%	24%	22%	19%	17%
BIAS	5,3	5,0	4,6	3,6	2,9	1,8	1,5	1,2	0,9

Diante da Tabela 3.9, avaliou-se que o valor limite de 60 seria o mais apropriado a ser adotado no presente estudo. Para esse valor limite, a Tabela 3.10 ilustra com detalhes os valores obtidos para POD (probabilidade de detecção), para POFD (probabilidade de falsa detecção), para ICS (índice crítico de sucesso) e para B (bias).

Tabela 3.10- Índices estatísticos de desempenho do indicador iZCAS para o valor limite de 60.

Índices estatísticos	Valor
POD	55%
POFD	29%
ICS	24%
BIAS	1,8

Os resultados obtidos para a identificação de ZCAS a partir do índice iZCAS, com base nesse procedimento, estão expostos no Capítulo 6.

3.4 Seleção dos períodos de análise e uso do hidrograma

Após a obtenção de todas as bases de dados, foram destacados os meses de dezembro a março, característicos da ocorrência de ZCAS.

Metodologicamente, optou-se pelo hidrograma como um dos elementos gráficos úteis para as análises. Ele pode ser compreendido como a resposta da bacia hidrográfica em função das características fisiográficas que regem as relações entre uma determinada precipitação e a contribuição de um aquífero, conforme descrito por Lecastre e Franco (1984), que sintetizam o conceito no gráfico (Figura 3.5).

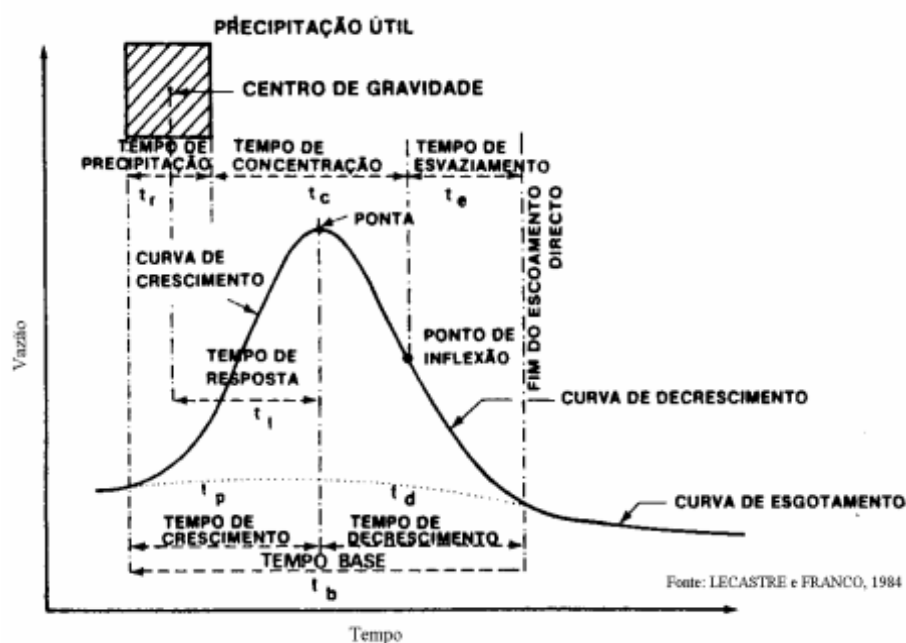


Figura 3.5 - Diagrama esquemático de um hidrograma segundo Lecastre e Franco (1984).

A partir da análise do hidrograma padrão, foi construída uma tabela resumo (Tabela 3.11), com o objetivo de apresentar os parâmetros considerados aqui como pertinentes para avaliar a resposta da vazão natural na bacia do rio Grande (selecionada para o estudo de caso) à chuva proveniente de eventos de ZCAS.

Tabela 3.11 – Informações básicas de um hidrograma padrão.

Parâmetros extraídos de um hidrograma	Unidade
Cota do pico	M
Hora correspondente à cota do pico	H
Total precipitado até o momento do pico de vazão	Mm
Precipitação correspondente ao centroide da chuva	mm
Hora correspondente ao centroide da chuva	h
Tempo de pico (baseado em dados hidrometeorológicos)	h
Tempo de concentração (método direto)	h

Considerou-se, ainda, para a análise, algumas observações registradas em Tucci (1993). O autor, ao considerar que os tempos do hidrograma estão diretamente relacionados com as características físicas da bacia, passa a elencar, como os principais fatores que podem ser refletidos no hidrograma, os seguintes:

- as bacias mais íngremes têm, relativamente, tempo de concentração (t_c) e tempo de base (t_b) menores e picos do escoamento maiores;
- as bacias mais vegetadas têm, relativamente, tempo de retardamento (t_r) maiores, maior infiltração e menores picos; e

- c) as bacias com solos mais profundos (arenosos) apresentam tempo de ascensão (t_m) e de concentração (t_c) maiores, relativamente, e baixo volume do escoamento superficial direto.

3.5 Dados utilizados

A Tabela 3.12 sintetiza a base de dados efetivamente utilizada. Essa síntese contribui para dar uma visão geral do conjunto e para a escolha dos períodos do estudo. Está assim organizada:

- Coluna 1 – mês considerado;
- Coluna 2 – volume útil da UHE- Furnas em %;
- Coluna 3 – altura do reservatório, em cm, tanto positiva como negativa, estimada pelo GRACE;
- Coluna 4 – chuva média acumulada na bacia do rio Grande, em mm;
- Coluna 5 – chuva diária máxima mensal, em mm;
- Coluna 6 – ocorrência ou não de ZCAS, do ponto de vista do CPTEC;
- Coluna 7 – ocorrência ou não de ZCAS, do ponto de vista do IZCAS;
- Coluna 8 – indicativo de ausência (NZ) de ocorrência de ZCAS.

Tabela 3.12 – Base de dados do estudo

Data	Volume útil da UHE- Furnas em %	Altura do Reservatório - GRACE (cm)	Chuva Média Acumulada (Mês) (mm)	Chuva Diária Máxima Mensal (mm)	ZCAS-CPTEC	ZCAS-IZCAS	ZCAS
janeiro-00	26.74		449.46	9.82	12	11	
fevereiro-00	43.03		202.89	4.20	08	12	
março-00	54.13		455.40	12.37	00	06	
abril-00	51.20		143.10	1.68	00	02	
maio-00	43.26		194.37	1.07	00	05	NZ
junho-00	37.99		144.81	1.35	00	04	NZ
julho-00	31.44		174.30	2.14	00	05	NZ
agosto-00	22.66		588.24	27.59	00	02	NZ
setembro-00	19.82		1543.11	51.35	00	06	NZ
outubro-00	11.02		843.18	11.51	00	00	NZ
novembro-00	12.00		869.76	10.79	00	09	
dezembro-00	19.06		386.04	15.43	14	21	
janeiro-01	23.55		167.52	1.40	04	06	
fevereiro-01	22.26		205.14	2.31	00	04	
março-01	21.02		154.59	1.16	00	09	
abril-01	17.73		154.38	1.31	00	01	
maio-01	16.63		170.70	1.44	00	10	NZ
junho-01	16.25		222.96	6.34	00	05	NZ
julho-01	15.28		298.95	2.00	00	07	NZ
agosto-01	13.72		147.84	1.03	00	00	NZ
setembro-01	12.98		1522.56	33.59	00	05	NZ
outubro-01	15.45		912.63	12.27	00	10	NZ
novembro-01	17.68		2065.32	24.57	12	07	
dezembro-01	28.03		383.34	5.37	10	18	
janeiro-02	43.77		230.91	1.99	00	10	
fevereiro-02	69.28		226.17	2.48	13	11	
março-02	81.16		375.72	15.16	00	04	
abril-02	85.60		571.14	10.06	00	00	
maio-02	85.11		222.42	3.00	00	02	NZ
junho-02	83.33		225.00	3.41	00	01	NZ
julho-02	76.78		106.68	1.01	00	05	NZ
agosto-02	68.73		226.59	2.12	00	02	NZ
setembro-02	65.97		1418.34	17.86	00	07	NZ
outubro-02	59.62		749.97	7.08	00	03	NZ
novembro-02	56.24		502.86	9.22	00	11	
dezembro-02	63.03		295.14	12.83	12	13	
janeiro-03	83.18	-2.30	249.39	3.09	21	24	
fevereiro-03	94.54	12.96	165.57	4.04	00	06	
março-03	96.76	14.21	339.54	5.10	00	06	
abril-03	97.54	10.24	185.49	1.01	00	05	
maio-03	95.29	7.62	247.38	2.95	00	05	NZ
junho-03	92.32		251.73	5.97	00	02	NZ
julho-03	85.82	-13.08	227.31	2.70	00	00	NZ
agosto-03	75.61	-18.46	734.46	7.65	00	05	NZ
setembro-03	66.06	-23.15	1440.54	30.31	00	02	NZ
outubro-03	59.20	-25.24	1730.13	27.32	00	04	NZ
novembro-03	54.72	-31.28	1305.06	25.01	00	12	
dezembro-03	57.74	-17.57	1240.26	36.03	00	14	
janeiro-04	67.70	-6.56	483.57	3.34	21	14	
fevereiro-04	83.10	-2.92	194.49	4.66	10	08	
março-04	93.55	11.69	472.83	7.51	00	05	
abril-04	98.45	10.28	1314.24	39.75	00	04	
maio-04	98.46	9.19	440.07	4.37	00	08	NZ
junho-04	98.36	5.09	104.07	0.86	00	05	NZ
julho-04	98.03	-1.70	180.96	1.36	00	04	NZ
agosto-04	92.55	-4.75	324.51	6.46	00	01	NZ
setembro-04	86.24	-18.86	2517.63	51.87	00	00	NZ
outubro-04	85.32	-20.72	1400.55	21.12	00	05	NZ
novembro-04	81.73	-17.31	908.76	14.87	06	11	
dezembro-04	93.55	-5.48	1462.71	22.50	11	12	
janeiro-05	96.40	14.11	1078.14	16.38	05	16	
fevereiro-05	96.81	17.97	1446.78	25.73	10	07	
março-05	97.92	26.85	147.48	1.42	13	05	
abril-05	97.54	11.10	174.27	7.03	00	01	
maio-05	98.94	6.53	1147.11	41.89	00	05	NZ
junho-05	98.12	7.55	711.36	26.11	00	05	NZ
julho-05	94.92	-1.73	732.21	26.12	00	04	NZ
agosto-05	86.84	-13.02	1623.93	39.08	00	03	NZ
setembro-05	83.70	-14.63	1550.70	21.92	00	08	NZ
outubro-05	76.83	-17.45	705.66	30.68	00	06	NZ
novembro-05	76.05	-14.06	1623.69	17.46	16	12	
dezembro-05	86.29	-11.00	360.06	2.31	12	14	
janeiro-06	89.43	2.70	603.45	16.44	13	06	
fevereiro-06	94.07	9.67	102.60	1.10	07	10	
março-06	96.56	16.18	264.81	3.10	10	11	
abril-06	96.07	6.08	585.99	14.21	00	03	
maio-06	92.06	0.08	446.49	4.35	00	01	NZ
junho-06	84.71	-1.46	376.74	10.16	00	05	NZ
julho-06	78.39	-14.10	257.91	4.09	00	00	NZ
agosto-06	67.57	-22.19	289.26	2.85	00	02	NZ
setembro-06	55.75	-25.53	2642.04	44.88	00	03	NZ
outubro-06	45.19	-26.95	758.16	11.07	04	07	NZ
novembro-06	38.94	-21.49	1232.67	39.68	10	10	
dezembro-06	46.91	-12.49	552.48	12.61	17	15	

Tabela 3.12 – Base de dados do estudo (continuação) .

janeiro-07	91.02	21.57	1365.93	24.37	18	21	
fevereiro-07	96.72	25.34	172.95	1.15	15	07	
março-07	97.79	23.22	317.25	5.70	05	05	
abril-07	98.02	17.14	264.96	0.90	00	04	
maio-07	98.61	10.31	348.81	2.90	00	10	NZ
junho-07	96.07	-3.32	173.64	1.67	00	07	NZ
julho-07	89.92	-10.40	125.91	0.57	00	09	NZ
agosto-07	81.22	-19.89	323.43	7.17	00	01	NZ
setembro-07	72.16	-19.46	602.16	10.40	00	01	NZ
outubro-07	63.20	-17.37	1776.90	22.62	05	02	NZ
novembro-07	61.76	-22.22	1140.81	20.10	08	12	
dezembro-07	58.44	-19.32	1372.11	20.03	08	09	
janeiro-08	64.36	-4.68	751.17	25.78	11	16	
fevereiro-08	81.52	10.83	168.66	1.04	16	12	
março-08	97.87	20.76	168.00	1.16	12	09	
abril-08	99.26	16.35	250.68	0.88	00	10	
maio-08	98.44	10.46	244.77	1.70	00	06	NZ
junho-08	96.40	4.26	183.57	2.45	00	08	NZ
julho-08	91.02	-4.04	662.79	20.86	00	00	NZ
agosto-08	84.40	-6.89	1521.03	26.05	00	03	NZ
setembro-08	77.31	-11.30	879.21	16.94	00	05	NZ
outubro-08	71.15	-21.13	2232.84	47.31	00	05	NZ
novembro-08	72.52	-12.48	1234.98	22.59	21	10	
dezembro-08	84.72	-6.85	1427.19	20.06	19	13	
janeiro-09	64.36	11.20	317.22	3.47	10	14	
fevereiro-09	81.52	27.32	119.43	1.58	05	07	
março-09	97.87	29.69	583.77	12.27	14	04	
abril-09	99.26	27.93	330.78	10.61	07	02	
maio-09	98.44	14.47	758.79	4.47	00	06	NZ
junho-09	96.40	0.29	283.08	2.42	00	10	NZ
julho-09	91.02	0.21	166.05	1.44	00	11	NZ
agosto-09	84.40	-2.04	236.79	3.27	00	08	NZ
setembro-09	77.31	-3.03	1472.34	19.80	00	12	NZ
outubro-09	71.15	-8.71	1013.40	26.50	13	07	NZ
novembro-09	72.52	-6.35	1377.87	29.43	03	17	
dezembro-09	84.72	11.72	733.17	8.37	06	18	
janeiro-10	96.40	15.77	188.91	3.22	04	22	
fevereiro-10	97.46	23.72	438.21	10.62	01	06	
março-10	99.26	24.22	837.21	23.07	11	11	
abril-10	98.85	17.38	845.13	22.79	06	04	
maio-10	98.28	12.70	510.36	2.49	00	11	NZ
junho-10	95.50	-2.57	526.65	3.44	00	04	NZ
julho-10	91.10	-0.63	215.85	1.21	00	05	NZ
agosto-10	86.37	-16.80	781.17	16.22	00	01	NZ
setembro-10	84.87	-20.96	743.91	13.50	00	05	NZ
outubro-10	84.95	-18.64	1339.11	21.28	01	07	NZ
novembro-10	81.97	-12.85	1758.15	33.41	14	13	
dezembro-10	91.10	-7.30	768.96	7.78	16	17	
janeiro-11	91.34		329.55	10.60	10	13	
fevereiro-11	95.50	15.31	504.39	5.26	09	02	
março-11	98.12	24.76	743.85	16.55	09	04	
abril-11	99.02	24.13	387.39	5.22	05	03	
maio-11	99.10	13.55	1904.49	42.79	00	01	NZ
junho-11	94.02	14.71	667.11	16.86	00	08	NZ
julho-11	89.45	-4.64	285.06	3.16	00	05	NZ
agosto-11	81.45	-7.12	608.07	4.66	00	06	NZ
setembro-11	72.30	-15.03	733.26	11.70	00	00	NZ
outubro-11	66.34	-12.37	830.52	11.60	06	10	NZ
novembro-11	59.03	-18.49	1999.65	24.90	12	07	
dezembro-11	71.44	-2.24	2712.12	64.31	19	14	
janeiro-12	94.10	8.43	418.89	9.06			
fevereiro-12	94.84	31.21	399.45	16.38			
março-12	89.68	16.81	418.98	4.87			
abril-12	84.24	22.33	405.81	3.35			
maio-12	78.66	25.51	524.85	19.25			NZ
junho-12	77.08	12.19	76.05	0.26			NZ
julho-12	71.08	10.72	221.55	8.84			NZ
agosto-12	60.94	-7.05	475.35	18.96			NZ
setembro-12	48.45	-10.69	912.27	26.92			NZ
outubro-12	28.10		1668.12	46.94			NZ
novembro-12	15.96	-17.65	720.33	13.19			
dezembro-12	12.35	-16.61	1289.19	40.58			

CAPITULO 4 - ESTUDO DE CASO: BACIA DO RIO GRANDE

4.1 Seleção do caso para estudo

A bacia do rio Grande foi selecionada como estudo de caso pela sua representatividade – segundo o ONS (2013), a bacia, sozinha, foi responsável por 46,5% da energia hidrelétrica gerada no Brasil no ano de 2010, o que a situa como o segundo subsistema do Sistema Interligado Nacional de Energia Elétrica] (SIN), logo abaixo da UHE-Itaipu, localizada no rio Paraná. Além disso, fica na região em que a ZCAS se faz presente.

A bacia, que possui uma área total de 143 mil km², dos quais 86.500 km² em Minas Gerais – 17,8% do território estadual –, é responsável por cerca de 70% de toda a energia gerada no estado.

No curso do alto rio Grande, destacam-se as usinas hidrelétricas de Camargos e Itutinga, localizadas no município de Itutinga, e a Usina Hidrelétrica do Funil, entre os municípios de Lavras e Perdões. No curso médio do rio Grande, encontra-se a usina hidrelétrica de Furnas, no trecho denominado "Corredeiras das Furnas", entre os municípios de São José da Barra e São João Batista do Glória, em Minas Gerais.

Na divisa do Triângulo Mineiro com São Paulo, situam-se as seguintes usinas hidrelétricas: Mascarenhas de Moraes (Usina de Peixoto), no local da antiga Cachoeira do Inferno (Ibiraci - MG), Estreito, Jaguará, Igarapava, Volta Grande, Porto Colômbia, Marimondo e Água Vermelha. Mascarenhas de Moraes, Marimondo, Água Vermelha e Furnas possuem maior histórico disponível de dados vazão e chuva da região (Figura 4.1). A região é um dos maiores reservatórios de regulação do subsistema sudeste do sistema interligado nacional (SIN).

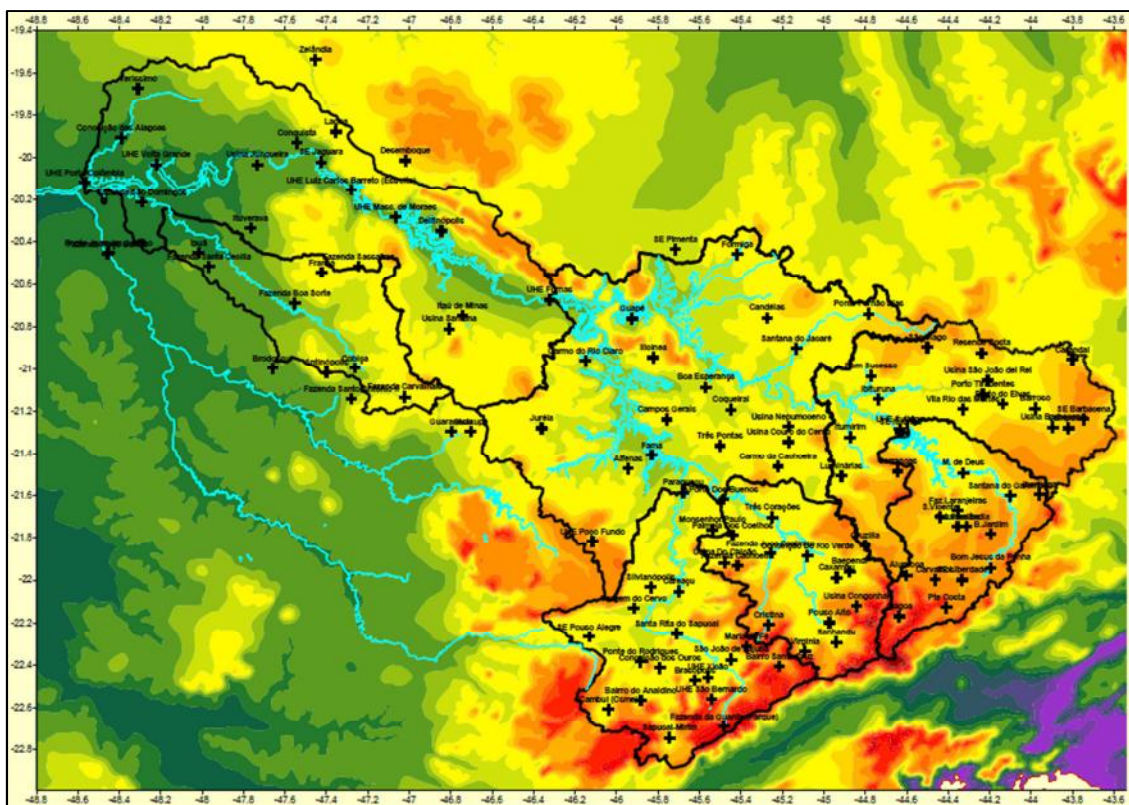


Figura 4.1 - Delimitação da bacia do Rio Grande, suas sub-bacias e postos pluviométricos instalados, com o vermelho indicando cotas mais altas e o verde as mais baixas (Braga et al., 2014).

Outro motivo para adotar a bacia do rio Grande como área de estudo, além da sua importância intrínseca, foi a da possibilidade vantajosa de aplicar o método de estimativa de altura de água equivalente do GRACE. Essa constatação fundamenta-se em função da bacia de drenagem definida, tendo como ponto de exutório a UHE-Furnas (Figura 4.2), compreende a maioria dos trechos mais largos dos rios, o que permite uma maior área de visada pelo método de estimativa de altura de água equivalente do GRACE.

Considerou-se, assim, que a UHE-Furnas é um reservatório representativo e interessante para os estudos, pois, além da avaliação espacial da chuva em episódios de ZCAS via satélite e a relação desta com a vazão natural, também permite a incorporação da avaliação da variação da água equivalente (GRACE) nesses episódios.

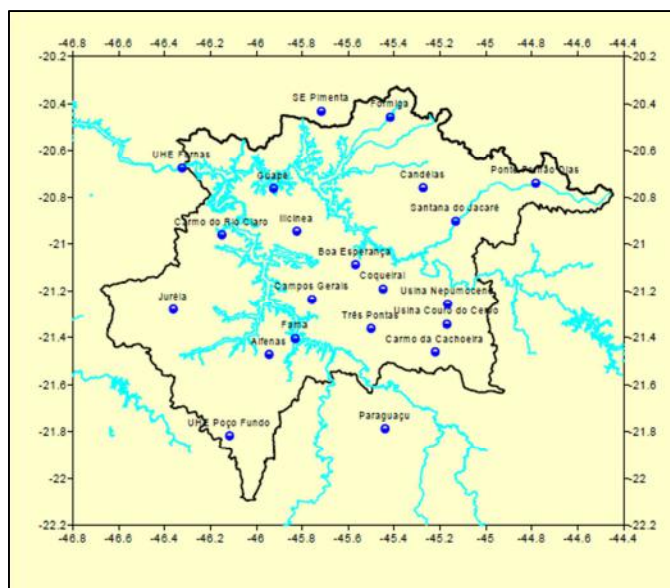


Figura 4.2 - Delimitação da área de drenagem considerando a UHE Furnas como exutório.

Outro fator que contribuiu para a escolha da UHE-Furnas como referência foi que, dentre os reservatórios monitorados pelo ONS, verificou-se que todos os que estão na bacia do rio Grande ficam em regiões geográficas distantes entre si o suficiente para que estejam situados em quadrantes diferentes na base de dados do GRACE. Essa circunstância possibilita avaliar a representatividade dos diferentes reservatórios de maneira independente, utilizando-se pontos específicos do projeto, o que está evidenciado na Figura 4.3. Nela, os círculos representam pontos para os quais podem ser obtidos dados de nível de água equivalente do GRACE, enquanto o traço amarelo representa o contorno da bacia do rio Grande e os pontos vermelhos representam a posição dos aproveitamentos hidro-energéticos (AHES).

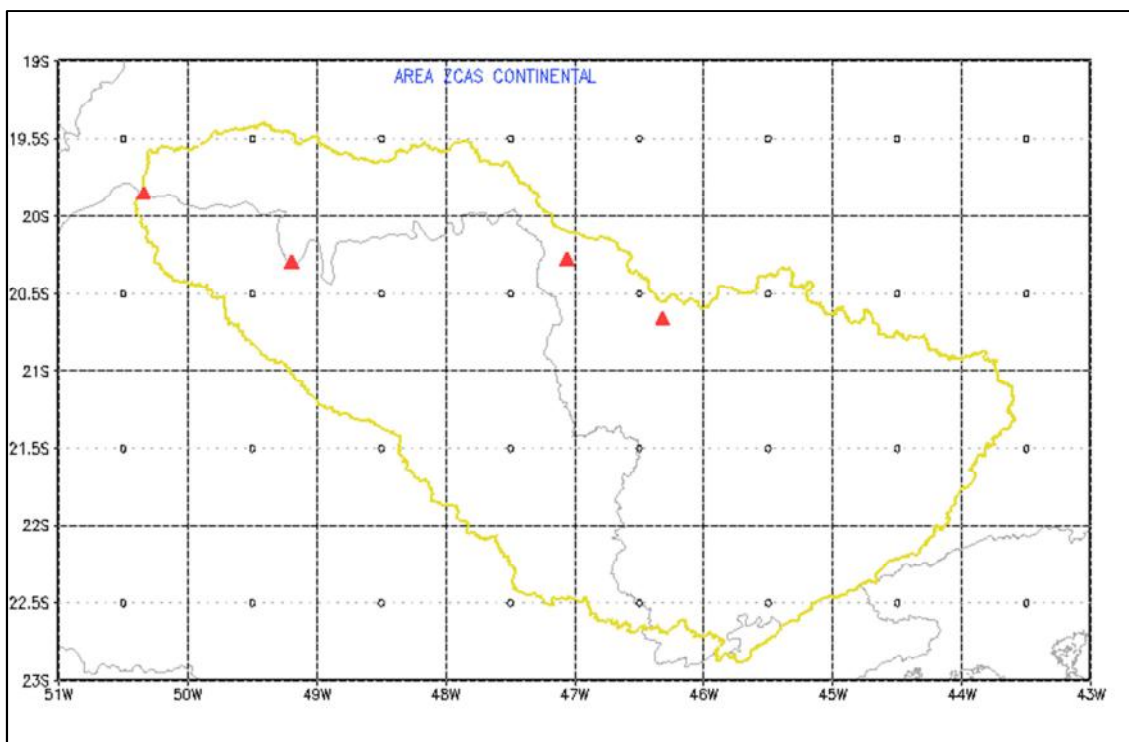


Figura 4.3- Mapa da bacia do rio Grande, delimitada pelo traçado amarelo, com os círculos representando os pontos onde são obtidos dados de nível de água equivalente do GRACE, e os pontos vermelhos representando a posição dos aproveitamentos hidro-energéticos (AHes).

Complementarmente, o estudo faz uso da análise de dados de chuva. A Figura 4.4, por exemplo, mostra a rede pluviométrica da bacia atualizada em 2015 com base no banco de dados hidroweb - Sistema de informações Hidrológicas da Agência Nacional de Águas.

Nesta dissertação, embora a Figura 4.4 ilustre que a bacia conte com uma rede significativa de pluviômetros, optou-se pelo emprego de dados do satélite TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*), com vistas a estimar os volumes de água associados aos eventos de ZCAS. Os valores de chuva foram obtidos no nível diário com cobertura espacial uniforme para toda a área de estudo, o que consiste em uma das vantagens de dados oriundos dessa fonte de informação satelital, face a sua regularidade no domínio do espaço e do tempo.

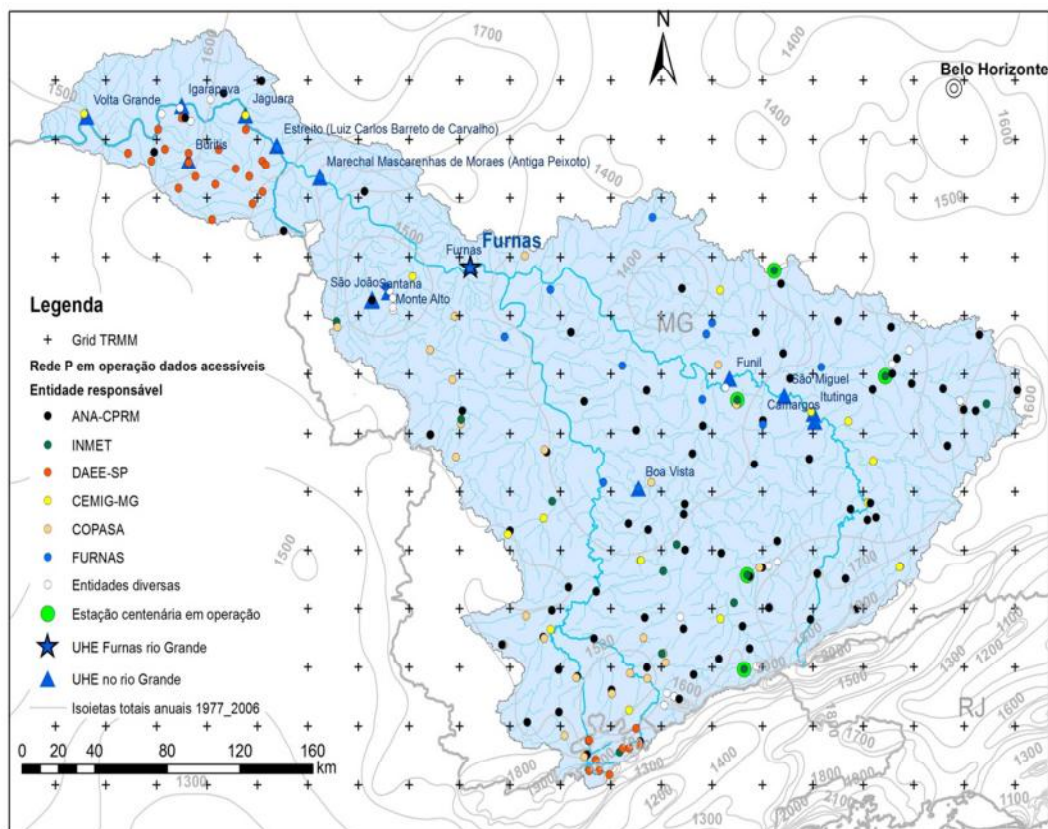


Figura 4.4 - Mapa da rede de postos pluviométricos da bacia rio Grande até a confluência com o rio Sapucaí

Quanto à contextualização da área em relação aos episódios de ZCAS, Seabra (2002), baseada em trabalhos anteriores de Kodama (1992) e Figueroa *et al.* (1995), definem-se três regiões distintas (Figura 4.5). Sob a ótica da autora, essas regiões deveriam ser monitoradas para avaliar o mecanismo de estabelecimento da ZCAS, para definir os seus períodos de atividade, bem como as suas relações e impactos nas atividades sociais e econômicas.

A primeira área cobre a porção oceânica, no Atlântico; uma segunda área cobre o continente, mais sobre a região Amazônica; e a terceira, uma região que cobre boa parte da região sudeste do Brasil e parte do nordeste do Paraná, na região sul. Essa última, chamada de região da ZCAS continental, é o alvo deste estudo, por concentrar os grandes reservatórios de aproveitamentos energéticos, como a UHE Furnas, que são diretamente impactados pelas ZCAS, principalmente nos períodos em que ocorre o efeito de monção da América do Sul (Liebmann e Mechoso, 2011).

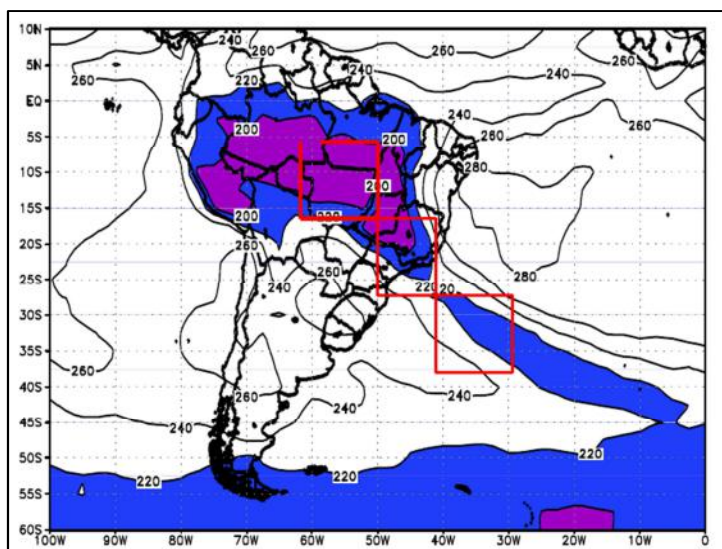


Figura 4.5 - As três regiões distintas, que deveriam ser monitoradas para avaliar o mecanismo de estabelecimento da ZCAS na América do Sul (Fonte: Seabra, 2002).

Considerando a área continental da ZCAS (AC-ZCAS), apresentada na Figura 4.5, identificam-se os reservatórios, além da UHE Furnas, que estão associados aos aproveitamentos hidro-energéticos (AHE) mais importantes para o SIN, quanto à geração. Ao se delinearem as bacias que integram o SIN na AC-ZCAS, identifica-se, claramente, que se enquadram as bacias associadas aos rios Grande, Doce, Tietê e Paranaíba (Figura 4.6). Elas contêm os reservatórios associados aos AHEs Marimbondo, Água Vermelha, Mascarenhas de Moraes e Furnas. Com o intuito de concentrar as informações da ZCAS e dos reservatórios da região sudeste do Brasil, em particular a UHE-Furnas, a AC-ZCAS será utilizada também para os cálculos dos ventos e umidade relativa no nível de 850 hPa para o iZCAS.

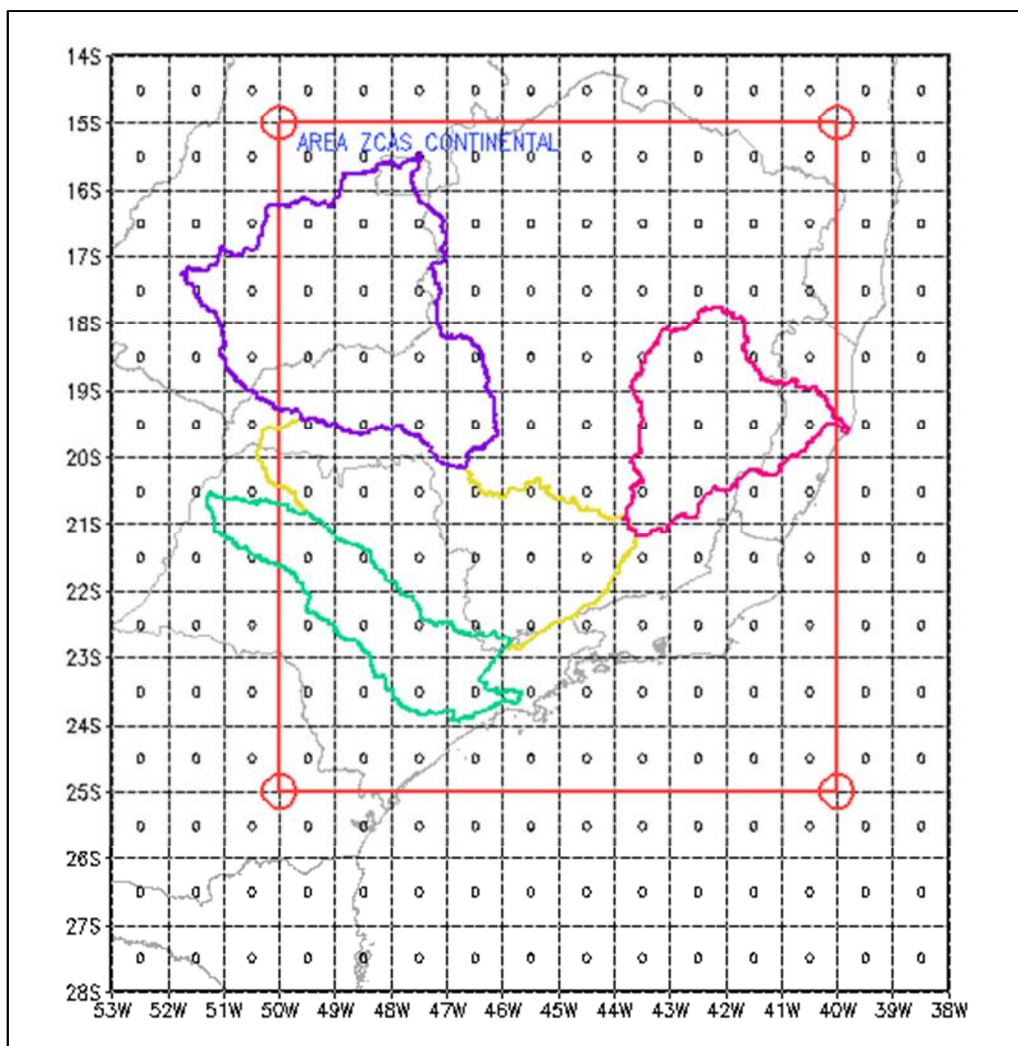


Figura 4.6 - Delimitação das bacias que integram o SIN na AC-ZCAS (vermelho), identificando as bacias associadas aos rios Grande (amarelo), Doce (rosa), Tietê (ciano) e Paranaíba (magenta).

4.1.2 Escolha dos períodos para estudo

Os períodos para estudo foram selecionados a partir da comparação entre a identificação dos episódios feita pelo CPTEC, no Boletim Climanálise, e a detecção pelo índice iZCAS. A Figura 4.77 ilustra bem a coerência entre os indicadores no verão de 2011.

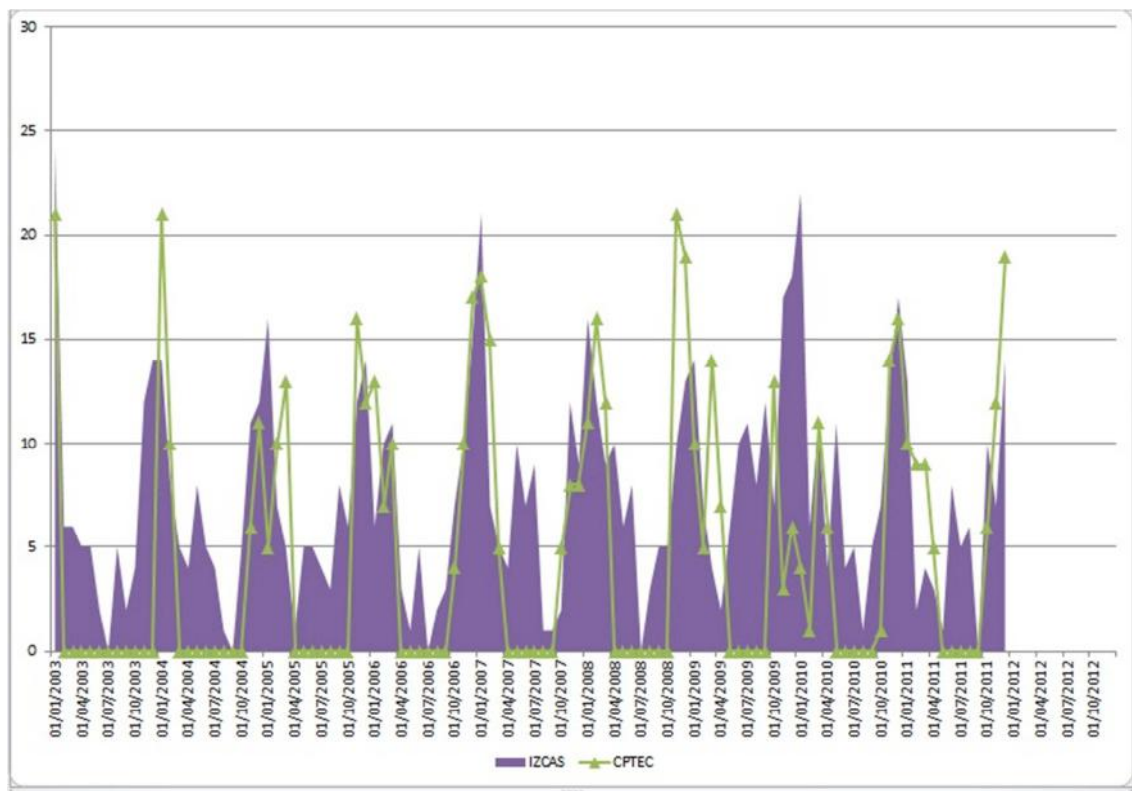


Figura 4.7 - Comparativo das ocorrências de ZCAS identificadas no Climanálise (em lilás) e a detecção pelo iZCASref (em verde); verifica-se a boa coerência entre os indicadores no verão 2010/2011.

Um segundo fator a orientar a escolha foi a constatação da representatividade e da completude dos dados do GRACE. Como se pode ver na Figura 4., esses dados estão bem completos no período, e as variações do nível do reservatório estão bem definidas.

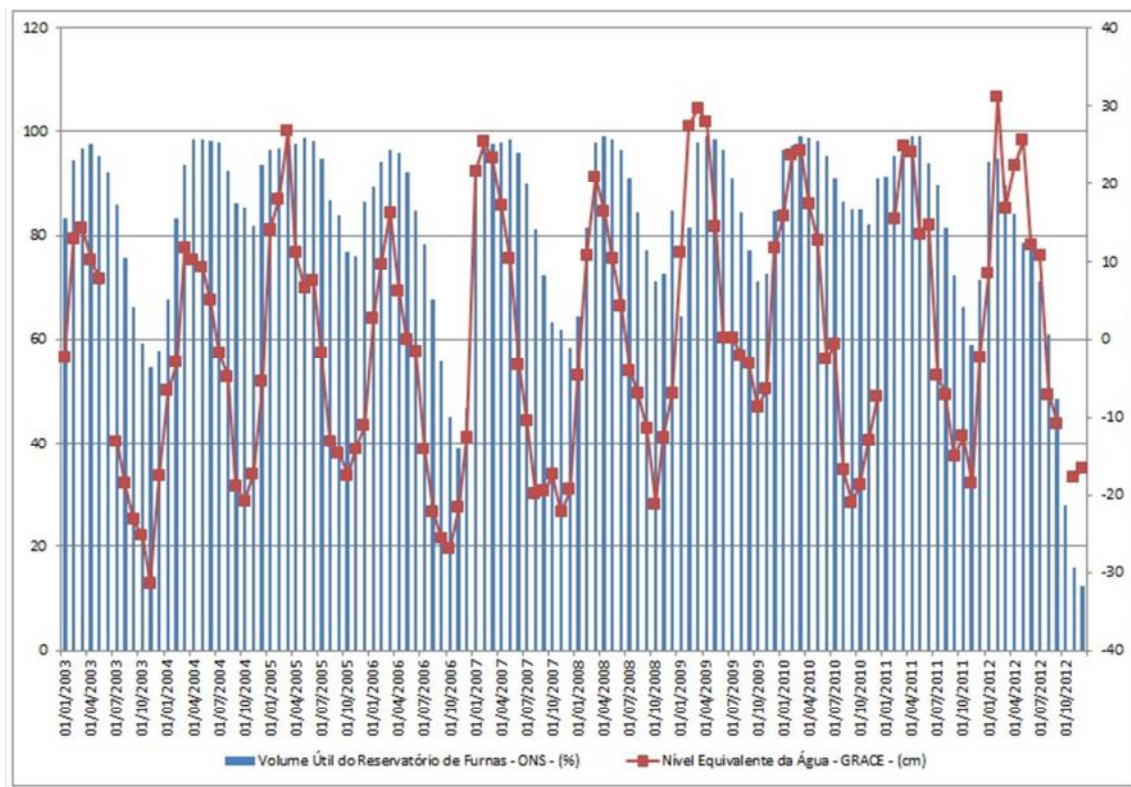


Figura 4.8 - Dados de GRACE mensal para o período de janeiro de 2003 a dezembro de 2012 e dados de volume útil do mesmo período.

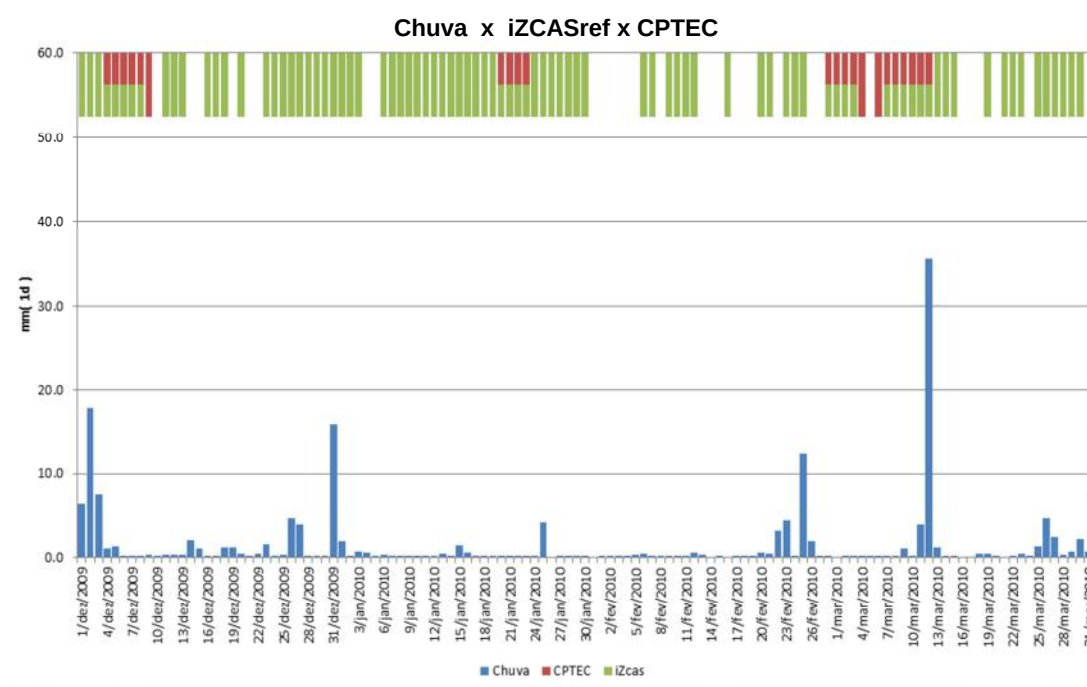
CAPÍTULO 5 – RESULTADOS DO ÍNDICE IZCASREF

O presente capítulo conduz uma avaliação da proposição do índice iZCASref para dois estudos de caso, mais especificamente para os verões 2009/2010 e 2010/2011, procurando delimitar o seu desempenho preditivo de eventos de ZCAS. Conforme foi identificado na abordagem metodológica (3.3.5), as análises para iZCASref foram feitas com base no valor limiar estabelecido de 25.

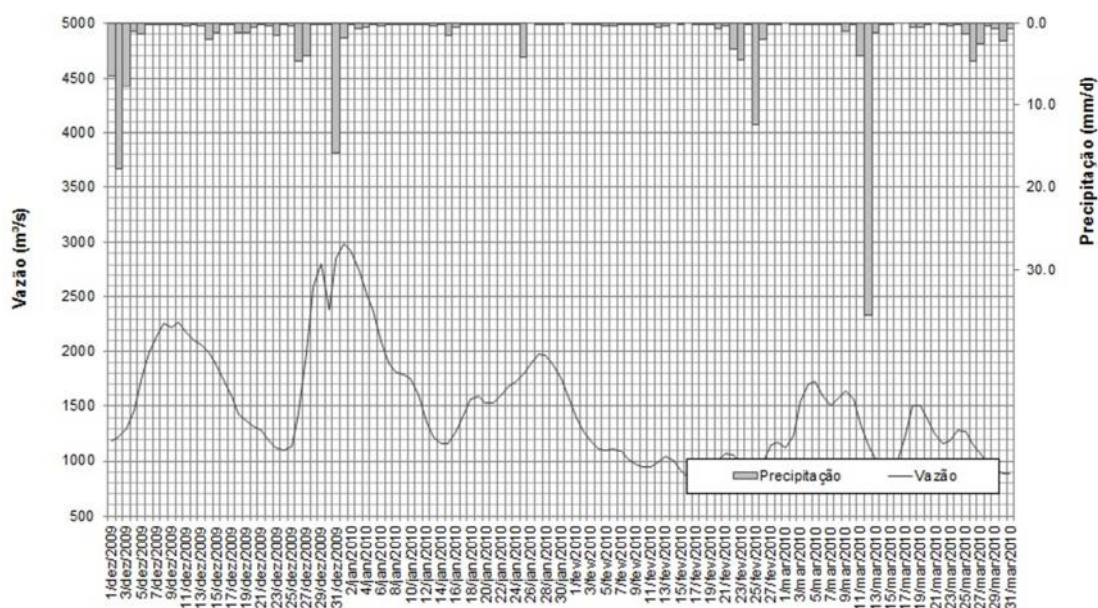
5.1 Estudo de Caso 1 - verão de 2009/2010

O primeiro caso sob análise ocorreu de dezembro de 2009 a março de 2010 (Figura 5.1), em que foram identificados sete episódios diferentes, com detecção de um fluxo de umidade estabelecido da região Amazônica para a região Sudeste. O fluxo de umidade, conforme apresentado anteriormente, é um dos elos de definição da ZCAS, e, para sua detecção objetiva, utilizou-se o iZCASref. Relembre-se que a ocorrência de chuva não é determinante para a definição de um episódio de ZCAS. Esse fator é mais relacionado com a natureza estocástica do sistema.

Essa conotação pode ser identificada pelos valores expressos na Tabela 5.1, em que são apresentados os valores de chuva diária estimada com o TRMM, média na área de drenagem da UHE-Furnas e acumulada no período dos episódios identificados.



(a)



(b)

Figura 5.1 – (a) Chuva diária obtida com média da área usando o TRMM, ocorrência de ZCAS segundo CPTEC (vermelho) e de acordo com o iZCASref (verde); (b) hidrograma do verão de 2009/2010.

TABELA 5.1 – Episódios de ZCAS do Caso 1 e chuva média diária acumulada estimada com o TRMM na área de drenagem da UHE-Furnas ao longo dos períodos dos episódios identificados.

Caso 01 - 2009/2010		
Episódio	Período	Chuva acumulada (mm)
01	01 Dez a 09 Dez	34,8
02	25 Dez a 03 Jan	27,9
03	06 Jan a 30 Jan	8,4
04	09 Fev a 12 Fev	0,7
05	28 Fev a 04 Mar	0,1
06	06 Mar a 15 Mar	42,4
07	25 Mar a 30 Mar	11,4

5.1.1 Primeiro episódio

No **primeiro episódio**, no início de dezembro, o iZCASref detecta um fluxo de umidade equivalente ao padrão da ZCAS logo nos primeiros dias, enquanto o CPTEC somente o caracteriza após o terceiro dia. Esse primeiro episódio de ZCAS de dezembro de 2009 estendeu-se do dia 04 ao dia 09, sendo que, no último dia, o iZCASref não detecta mais sinais significativos, segundo os critérios estabelecidos.

Na análise da chuva acumulada no período (Figura 5.2), nota-se que, para a parte mais a leste da usina (triângulo preto), associada à área de drenagem (área de cálculo da chuva média), foram estimados núcleos com picos de 110 mm, no entanto

bem isolados em setores mais ao norte e ao sul da bacia do rio Grande. Essa distribuição não uniforme causa valores médios bem abaixo dos picos estimados. Entretanto, analisando o hidrograma (Figura), percebe-se que, no trecho correspondente ao período desse episódio, há uma elevação da vazão no período subsequente à ocorrência de chuvas. A chuva útil foi estimada em 34,8 mm no período, com um tempo de crescimento em torno de 8 dias e vazão de pico de 2.262 m³/s, por volta do dia 8 de dezembro de 2009, quando tem início a curva de decrescimento.

Nesse episódio, confirmado como ZCAS, a banda de nebulosidade esteve bem configurada sobre as regiões sudeste e centro-oeste, onde se observou a região de maior convergência de umidade em 850 hPa. O episódio de ZCAS foi reforçado pela atuação da frente fria que avançou no início de dezembro, de acordo com o Climanálise (CPTEC, 2015).

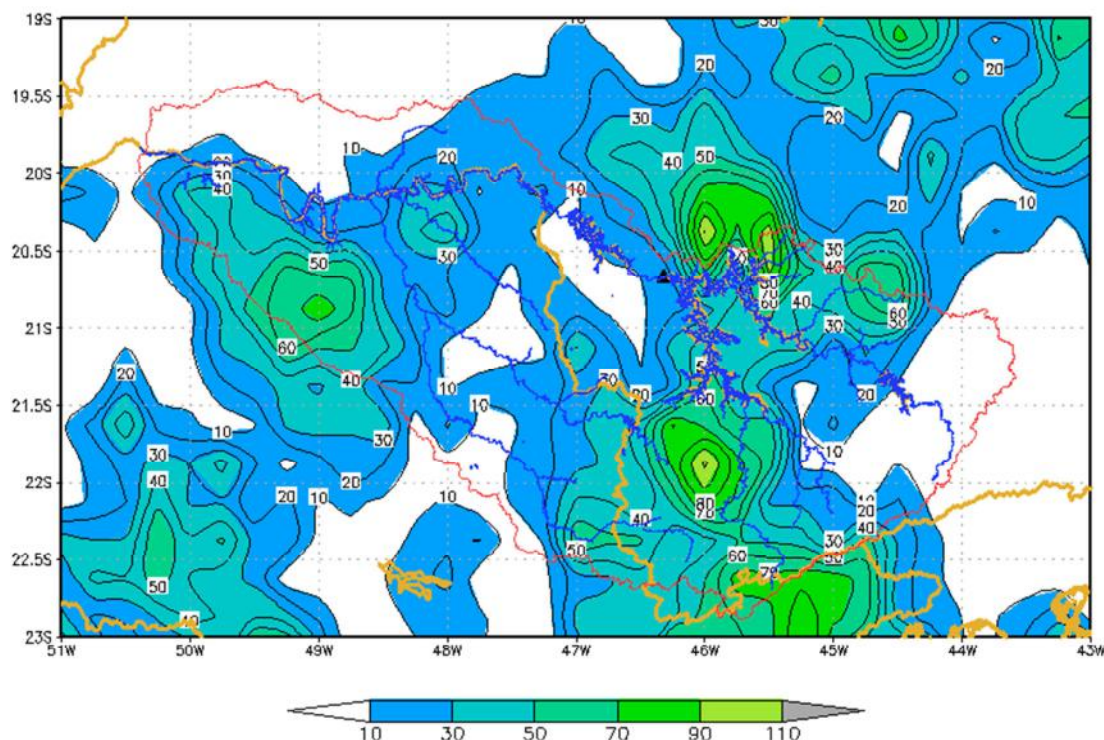


Figura 5.2 - Distribuição espacial da chuva acumulada no período de 1 a 9 de dezembro de 2009, estimada a partir dos dados do TRMM. Em vermelho, a delimitação da bacia do rio Grande; em ocre, a divisão estadual; o triângulo preto representa a localização da UHE-Furnas.

5.1.2 Segundo episódio

O **segundo episódio** estendeu-se de 25 de dezembro de 2009 a 3 de janeiro de 2010. Esse episódio foi captado exclusivamente pelo iZCASref, não tendo sido confirmado como caso de ZCAS pelo CPTEC. Como antes comentado, não foram

incluídas, neste trabalho, análises sobre a configuração de Zonas de Convergência Úmidas (ZCOU). O valor total de chuva acumulada no período foi de 27,9 mm, com vazão de pico registrada de 2.992 m³/s no dia 1º de janeiro.

No período que antecedeu o episódio, pode-se observar, na Figura 5.3, que foram detectados fluxos de umidade significativos pelo iZCASref, por três vezes consecutivas. Uma primeira vez por três dias, uma segunda por mais três dias, e, por último, apenas por um dia. Nessas três situações, foram estimados valores de chuva, mas nenhum que possa ser considerado significativo, comparado aos picos registrados no Caso 1. O período em que se caracterizou uma possível ZCAS, ou seja, um iZCASref com mais de três dias consecutivos, iniciou-se no dia 25 e persistiu por 10 dias. No dia 31 de dezembro, foi registrado o valor de 15,8 mm de chuva, o máximo desse período, e que antecede, em um dia, a ocorrência da vazão de pico, que foi de 2.992 m³/s, conforme comentado. Uma vazão significativa foi registrada no dia 29, com valor de 2.812 m³/s. O tempo de decrescimento foi de 14 dias, tempo considerado elevado, comparando-se ao tempo de crescimento de 7 dias, antes da vazão de pico.

Ao analisar a distribuição espacial da chuva acumulada, nota-se a existência de dois núcleos com valores entre 70 mm e 110 mm, significativos se comparados ao valor máximo no período e ao valor médio acumulado. No entanto, o período desse episódio estendeu-se por 10 dias, com distribuição irregular da chuva ao longo do período. Entretanto, a chuva média é calculada apenas para a área de drenagem, e o núcleo de maior intensidade, a sudeste da bacia, não abrange inteiramente tal área.

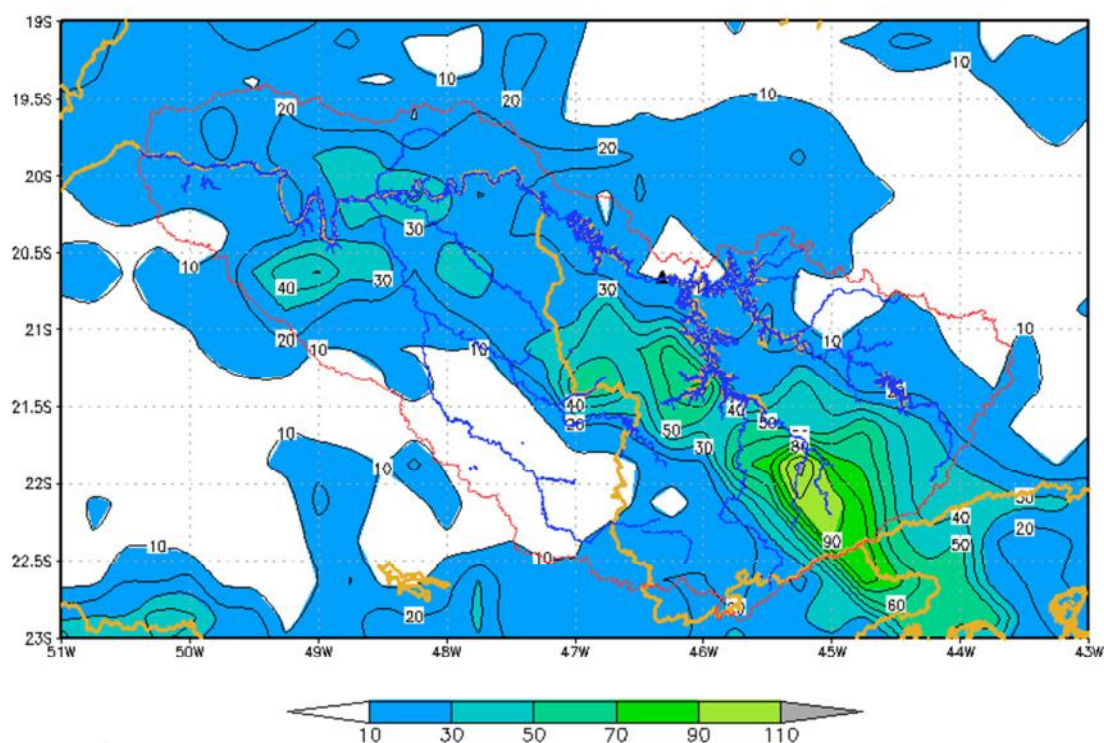


Figura 5.3 - Distribuição espacial da chuva acumulada entre 25 Dez 2009 e 3 Jan 2010, estimada a partir dos dados do TRMM. Em vermelho, a delimitação da bacia do rio Grande; em ocre, a divisão estadual. O triângulo preto representa a localização da UHE Furnas, e as linhas azuis, os rios de primeira ordem. Os padrões de cores estão associados aos valores da escala, em milímetros.

5.1.3 Terceiro episódio

No **terceiro episódio**, observado entre 6 e 30 de janeiro de 2010, nota-se um declínio da vazão natural durante boa parte do período, com mudança do sinal ocorrendo do dia 15 para o dia 16 de janeiro. Nota-se, no entanto, uma elevação relativamente gradual na curva de vazão, com ponta de 1978,0 m³/s ocorrendo dois dias após a chuva máxima de 4,1 mm.

O episódio é marcado pela sua duração, que chega a 25 dias consecutivos, com iZCASref significativo, e com apenas 4 (quatro) dias de ZCAS, com chuvas médias de valores baixos. As chuvas diárias estimadas superaram o valor de uma unidade apenas uma vez, além do máximo registrado, denotando uma média na área topograficamente baixa, para gerar uma resposta equivalente na vazão.

Segundo o Climanálise (CPTEC, 2015), nesse período, foi registrada a formação de regiões de convergência de umidade sobre o setor central do Brasil. As bandas de nebulosidade que se formaram entre as regiões centro-oeste, sudeste e o Atlântico adjacente estiveram associados aos sistemas frontais que conseguiram avançar sobre o território brasileiro.

A distribuição espacial da chuva no período (Figura 5.4) corrobora a estimativa de valores baixos de chuva, indicando núcleos de 10 mm a montante da área de drenagem. Os valores maiores foram estimados na porção sudoeste da bacia. O valor acumulado da chuva no período inteiro, com base na média da área de drenagem, foi de 8,4 mm. Supõe-se que o incremento da vazão natural possa ter ocorrido por fenômenos não identificados pelo TRMM.

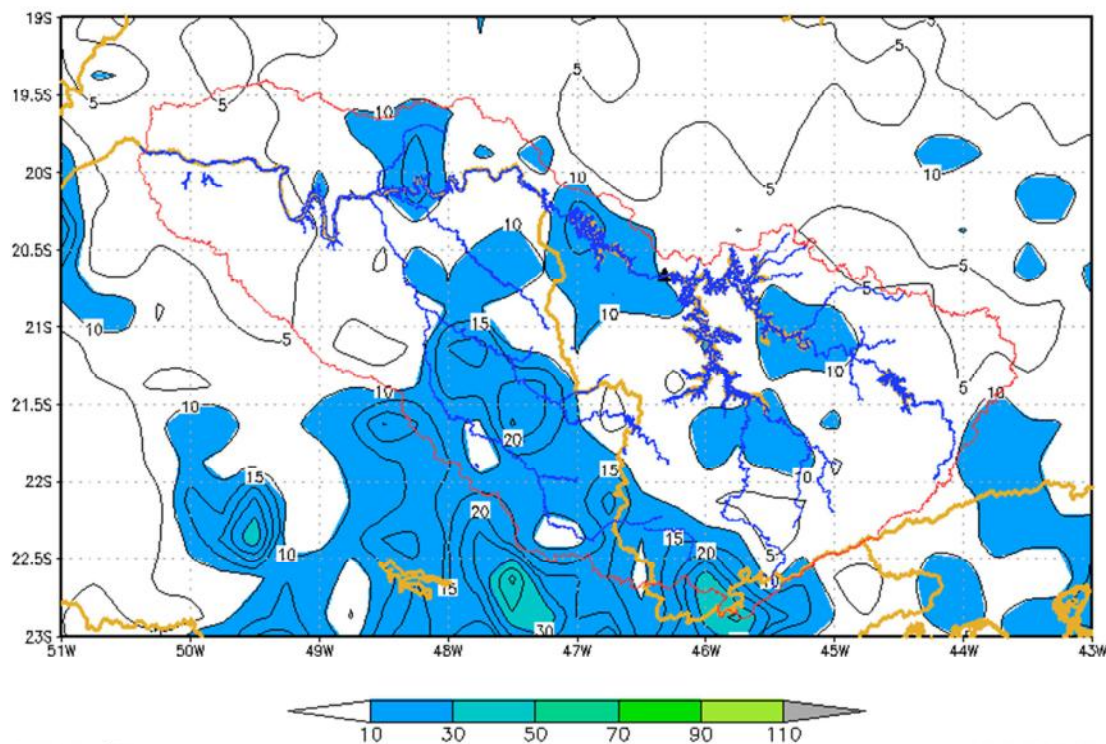


Figura 5.4 - Distribuição espacial da chuva acumulada no período de 6 a 30 de janeiro de 2010, estimada a partir dos dados do TRMM. Em vermelho, a delimitação da bacia do rio Grande; em ocre, a divisão estadual. O triângulo preto representa a localização da UHE Furnas, e as linhas azuis, os rios de primeira ordem. Os padrões de cores estão associados aos valores da escala, em milímetros.

5.1.4 Quarto episódio

O **quarto episódio** ocorreu no período de 9 a 12 fevereiro de 2010. O iZCASref detectou um fluxo de umidade significativo, mas não foi estimada chuva no período nem houve resposta da vazão natural. A distribuição espacial da chuva (Figura 5.5), embora com estimativas de baixa intensidade, denota um alinhamento tal qual aquele observado em episódios de ZCAS transversal.

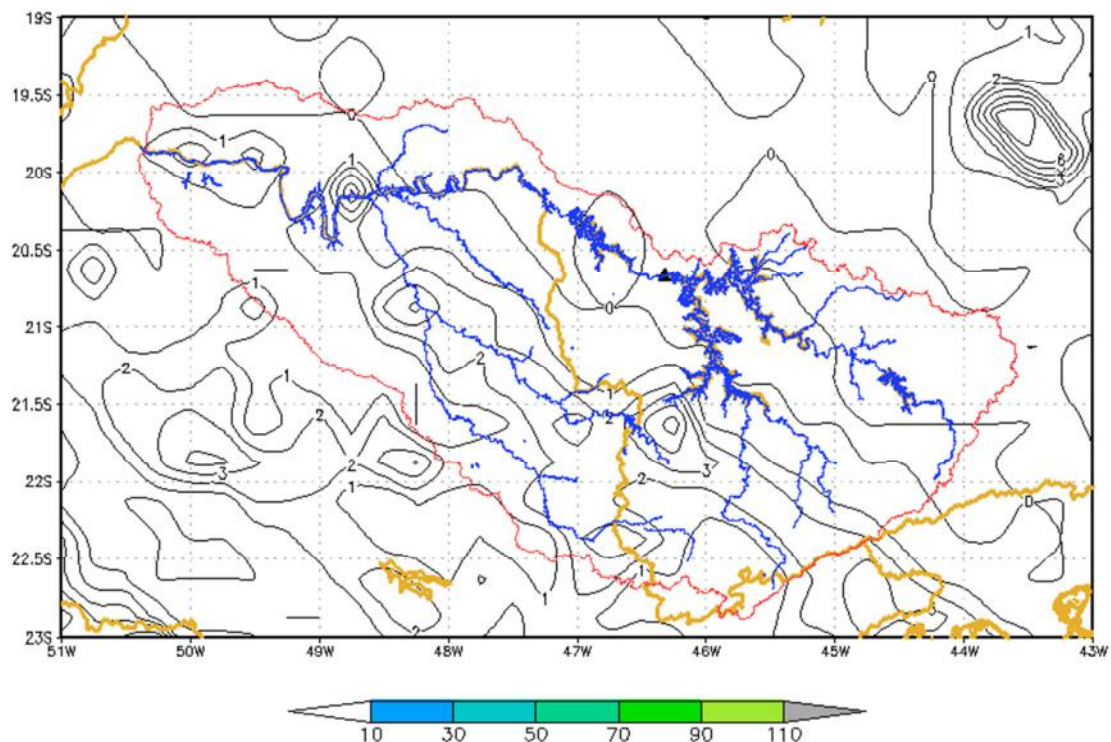


Figura 5.5 - Distribuição espacial da chuva acumulada no período de 9 de fevereiro a 12 de fevereiro de 2010, estimada a partir dos dados do TRMM. Em vermelho, a delimitação da bacia do rio Grande; em ocre, a divisão estadual. O triângulo preto representa a localização da UHE Furnas, e as linhas azuis, os rios de primeira ordem. Os padrões de cores estão associados aos valores da escala, em milímetros.

5.1.5 Quinto episódio

O **quinto episódio** vai de 28 de fevereiro a 04 de março de 2010. A banda de nebulosidade estendeu-se desde o sul da Amazônia e o norte das regiões centro-oeste e sudeste até o Atlântico. Segundo o Climanálise, as chuvas associadas concentraram-se, principalmente, nos estados da região sudeste e no sul de Goiás (CPTEC, 2015).

Esse episódio foi marcado por um período inteiro de ocorrência de ZCAS. O iZCASref mostrou-se significativo para a quase totalidade dos cinco dias; a exceção ficou para o último dia, sem iZCASref significativo. Outro fator marcante desse episódio foi a estimativa de baixos valores de chuva para todo o período, sempre abaixo de 0,1 mm/dia.

Neste momento, vale retroceder a análise para o período que antecede o episódio, quando são registrados valores significativos de iZCASref em diversas situações. No período imediatamente anterior, foram registrados três dias consecutivos com valores significativos, e o anterior a esse, dois dias. Nesses dois períodos antecedentes, foi estimado um valor acumulado de 23 mm, total dos períodos, com final no dia 26 de fevereiro. O acumulado pode explicar o incremento de

vazão observado no gráfico, que tem como vazão de pico 1.726 m³/s no dia 5 de março, não tendo ocorrido qualquer chuva nesses dias. Esse tempo de resposta, de sete dias, é compatível com o observado na bacia em outros episódios aqui analisados.

A análise da chuva acumulada no período, em sua distribuição espacial (Figura), corrobora a baixa ocorrência de chuva, com valores próximos de zero na área, reforçando a hipótese de que os sistemas anteriores tenham sido a causa da resposta observada na vazão. Esse episódio, ademais, consolida o conceito de que a chuva não necessariamente está associada à ZCAS, em seu aspecto dinâmico.

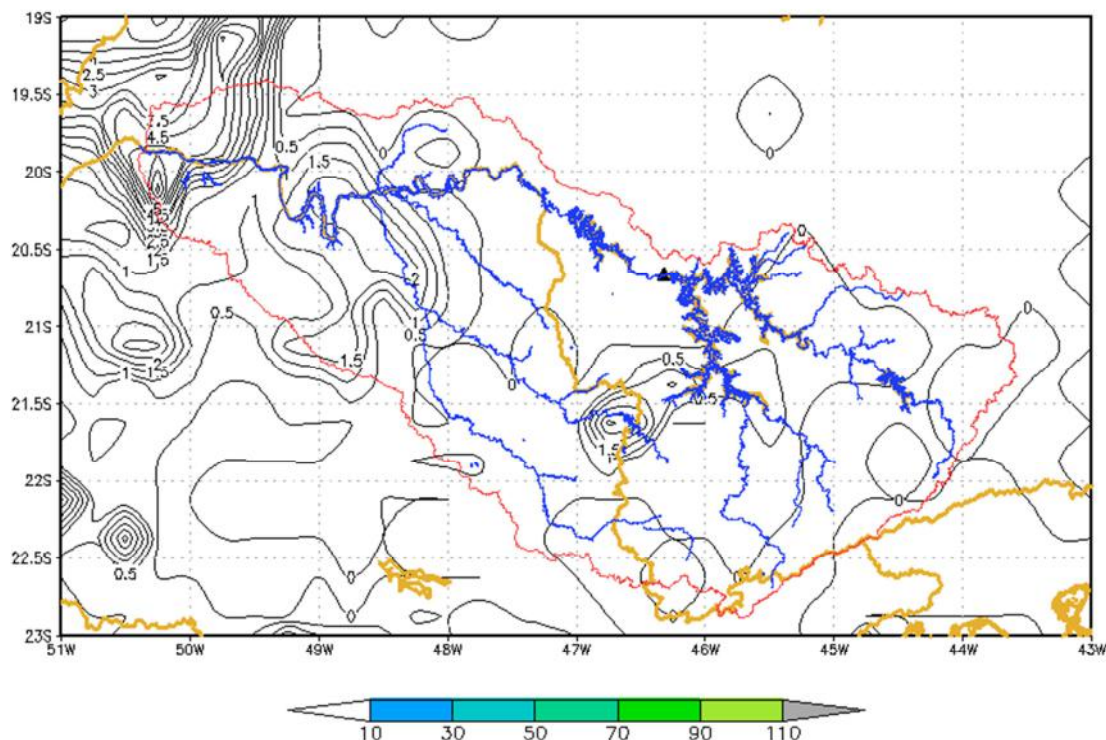


Figura 5.6 - Distribuição espacial da chuva acumulada no período de 28 de fevereiro a 4 de março de 2010, estimada a partir dos dados do TRMM. Em vermelho, a delimitação da bacia do rio Grande; em ocre, a divisão estadual. O triângulo preto representa a localização da UHE Furnas, e as linhas azuis, os rios de primeira ordem. Os padrões de cores estão associados aos valores da escala, em milímetros.

5.1.6 Sexto episódio

O **sexto episódio** tem um início diferente dos demais. Seu período vai de 6 a 15 de março de 2010, e o CPTEC definiu ZCAS logo no seu primeiro dia, enquanto, apenas no dia seguinte, o iZCASref registrou um valor significativo no fluxo de umidade. Os demais dias são igualmente seguidos pelo iZCASref e Climanálise, com estimativa de chuva no meio do período, com pico de 35,6 mm/d. Após a ocorrência desse pico, apenas o iZCASref permaneceu indicando fluxo de umidade significativo. A chuva acumulada no período foi de 42,4 mm, valor significativo diante daqueles dos

demais episódios. A vazão apresenta resposta com ponta de 1.508 m³/s no dia 19 de março, sete dias após o pico registrado, compatível com os demais apresentados.

A distribuição da chuva se deu de maneira uniforme na bacia, como um todo (Figura 5.7). Os acumulados superaram a escala, com núcleos acima de 110 mm.

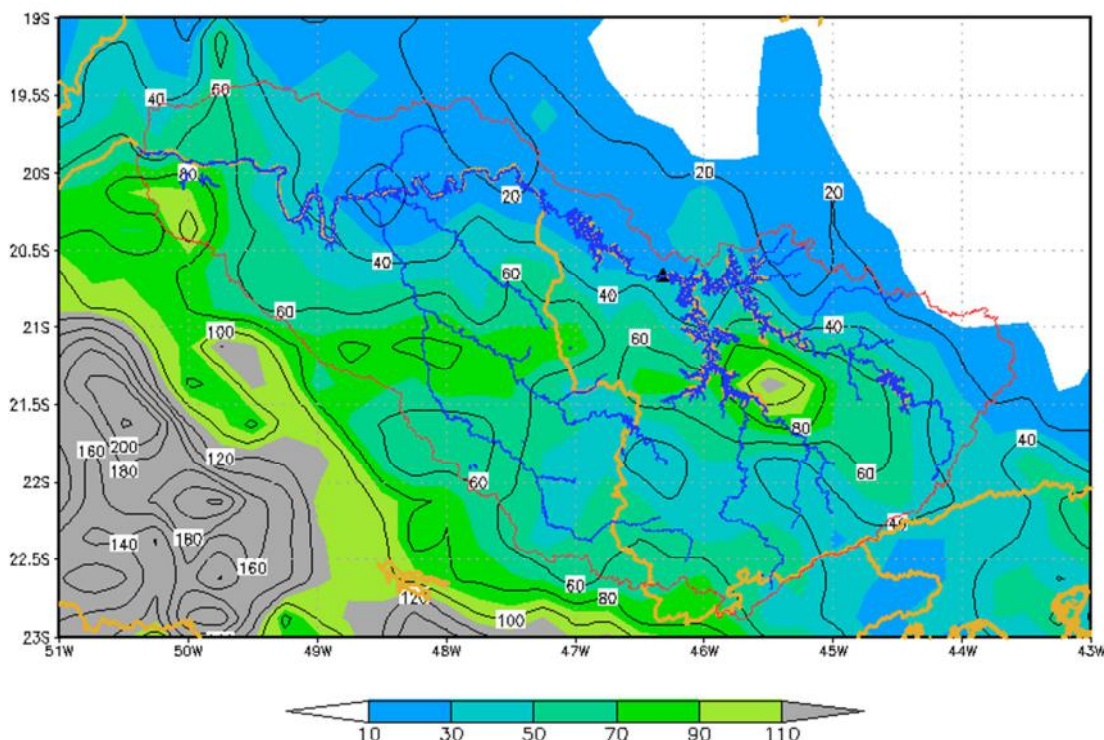


Figura 5.7 - Distribuição espacial da chuva acumulada no período de 28 de fevereiro a 4 de março de 2010 estimada a partir dos dados do TRMM. Em vermelho, a delimitação da bacia do rio Grande; em ocre, a divisão estadual. O triângulo preto representa a localização da UHE Furnas, e as linhas azuis, os rios de primeira ordem. Os padrões de cores estão associados aos valores da escala, em milímetros.

Observa-se, ainda, na Figura 5.7, a presença de um núcleo de valor elevado, acima de 110 mm, próximo à localização da UHE, mais a sudeste. Esse valor pode estar relacionado ao pico de chuva estimado no hidrograma, notando-se que o TRMM estimou os valores maiores a oeste e sudoeste da bacia.

5.1.7 Sétimo episódio

O sétimo episódio foi determinado tão somente pela indicação do iZCASref para fluxos de umidade. O CPTEC não identificou a ocorrência de ZCAS. Foram estimados valores de chuva ao longo do período, mas nenhum acima de 5 mm/d.

O acumulado para o período, que vai de 25 a 30 de março, chegou a 11,4 mm, chuva que ocorreu logo após o declínio da vazão, tendo sido registrado aumento da

vazão nos dias posteriores (não apresentado), com ponta de 1.152 m³/s no dia 9 de abril.

Nesse último episódio, estabeleceu-se uma região de convergência de umidade sobre parte das regiões sudeste, centro-oeste e norte do Brasil, com chuvas mais acentuadas no leste de São Paulo e sul de Minas Gerais.

Na distribuição espacial do acumulado no período, na Figura 5.8, nota-se um núcleo maior na divisa dos estados do Rio de Janeiro e São Paulo, bem como o alinhamento diagonal dos valores menores ao longo da bacia.

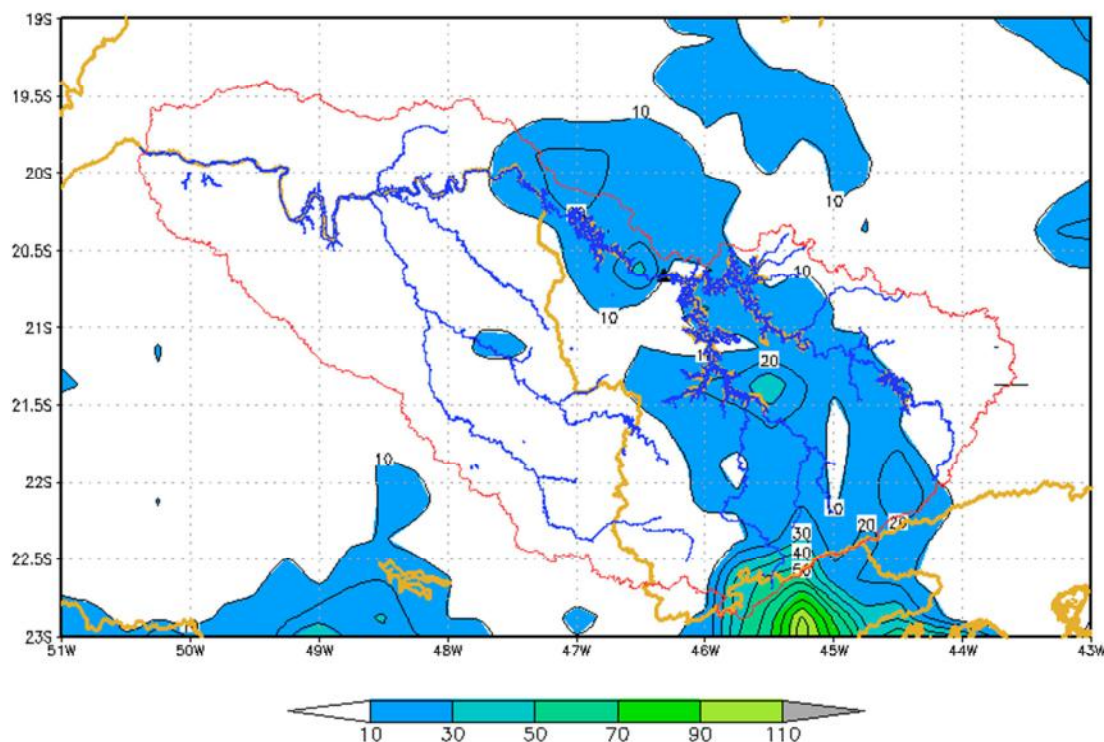


Figura 5.8 - Distribuição espacial da chuva acumulada no período de 25 a 30 de março de 2010 estimada a partir dos dados do TRMM. Em vermelho, a delimitação da bacia do rio Grande; em ocre, a divisão estadual. O triângulo preto representa a localização da UHE Furnas, e as linhas azuis, os rios de primeira ordem. Os padrões de cores estão associados aos valores da escala, em milímetros.

5.1.8 Síntese do caso

Ao articular as análises para o caso, conclui-se que ocorreram quatro episódios de chuva, detectados pelo TRMM, com cinco eventos de resposta na vazão do rio Grande. O mais significativo, em termo de estimativa de chuva, foi o do período de 6 a 15 de março de 2010. A ocorrência desses episódios conduziu a um incremento constante no volume útil do reservatório da UHE-Furnas (Figura 5.9), com seu ápice coincidindo com o mês de março, com a chuva mais significativa. Os dados de altura equivalente, obtidos a partir do GRACE, demonstraram coerência com a operação do reservatório, indicando uma elevação acentuada do mês de dezembro de 2009 para

janeiro de 2010, e depois de janeiro para fevereiro de 2010, com fechamento no mês de março praticamente estável.

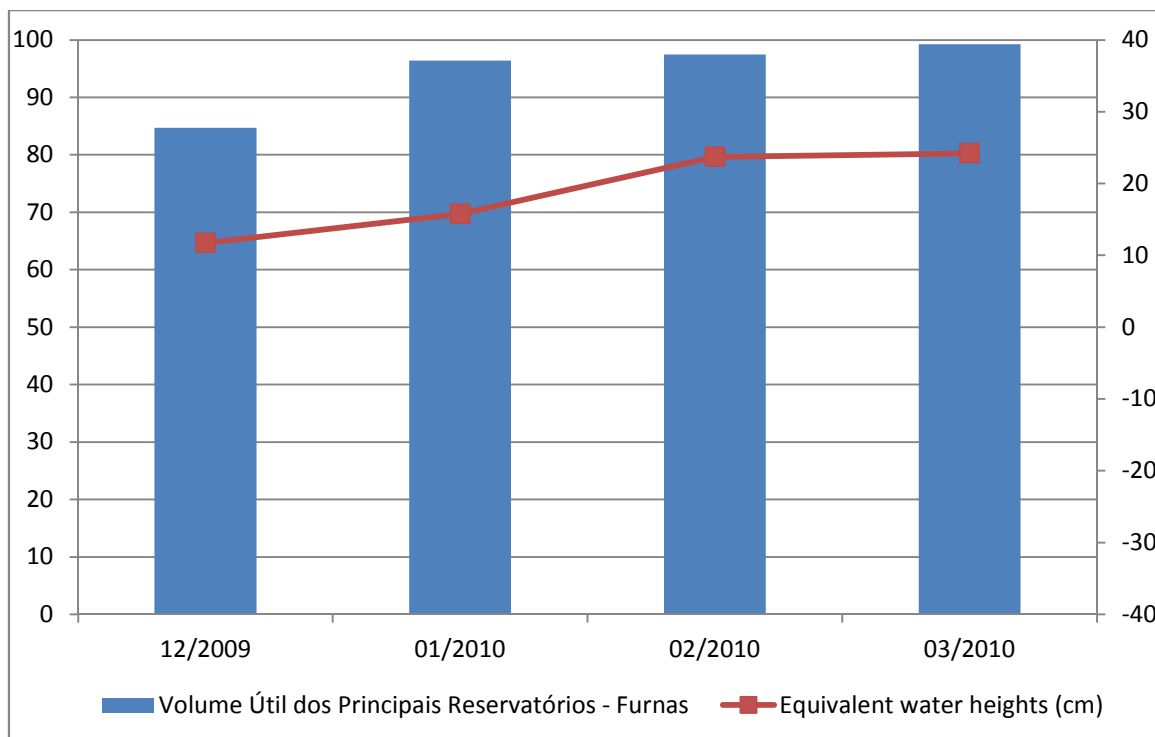
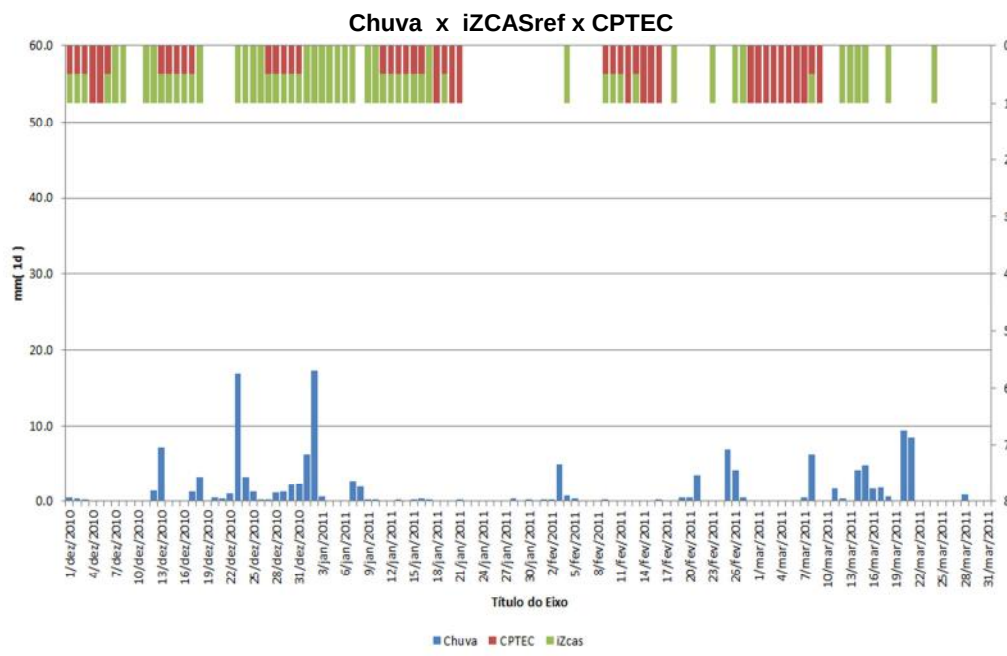


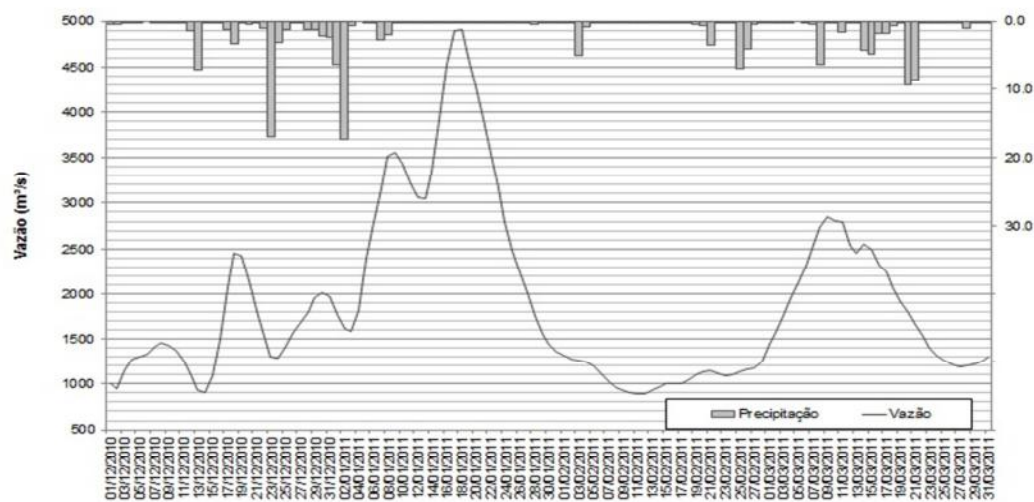
Figura 5.9 - Volume útil do reservatório da UHE Furnas versus altura equivalente da água estimada pelo GRACE no Caso 1.

5.2 Estudo de caso 2 – verão de 2010/2011

O segundo caso abrangeu o período de 01 dezembro de 2010 a março de 2011 (Figura 5.10). Nele, foram identificados oito episódios diferentes, com detecção de um fluxo de umidade estabelecido da região amazônica para a região sudeste.



(a)



(b)

Figura 5.10 - (a) Chuva diária obtida com média da área usando o TRMM, ocorrência de ZCAS segundo o CPTEC (vermelho) e segundo o iZCASref (verde); (b) hidrograma do verão de 2010/2011.

A Tabela 5.2 mostra os valores de chuva diária estimada com o TRMM, a média na área de drenagem da UHE-Furnas e o acumulado no período dos episódios identificados. Observa-se, nessa tabela, a variabilidade nos valores de chuva acumulada; os episódios 2, 3 e 8 são aqueles com maiores acumulados de chuva.

Tabela 5.2 - Episódios de ZCAS do Caso 2 e chuva média diária acumulada estimada com o TRMM na área de drenagem da UHE-Furnas ao longo dos períodos dos episódios.

Caso 02 - 2010/2011		
Episódio	Período	Chuva acumulada (mm)
01	01 Dez a 08 Dez	1,3
02	11 Dez a 18 Dez	13,3
03	23 Dez a 07 Jan	56,0
04	09 Jan a 16 Jan	1,9
05	18 Jan a 21 Jan	0,4
06	09 Fev a 16 Fev	1,3
07	28 Fev a 09 Mar	7,3
08	12 Mar a 18 Mar	13,5

5.2.1 Primeiro episódio

O **primeiro episódio** identificado pelo iZCASref teve início em 1 de dezembro e se estendeu até 8 de dezembro. O CPTEC classificou o período como sendo ZCAS, à exceção dos dois últimos dias. O valor de chuva acumulada obtido com o TRMM foi baixo, indicando uma característica mais dinâmica para esse episódio.

A Figura 5.10 mostra uma elevação pontual nos valores de vazão, logo após o início do episódio, com valor de ponta de $1.500 \text{ m}^3/\text{s}$, que se acredita ser uma resposta ocasionada por valores de chuva que não foram capturados pelo TRMM. Em função da baixa resposta, tais valores não devem ter sido significativos.

Na Figura 5., o TRMM não detecta chuva na área de drenagem da UHE-Furnas. Segundo o Climanálise, a banda de nebulosidade associada à ZCAS, com provável ocorrência de chuvas, foi notada mais ao sul dessa região, confirmando os baixos valores de chuva apresentados na figura.

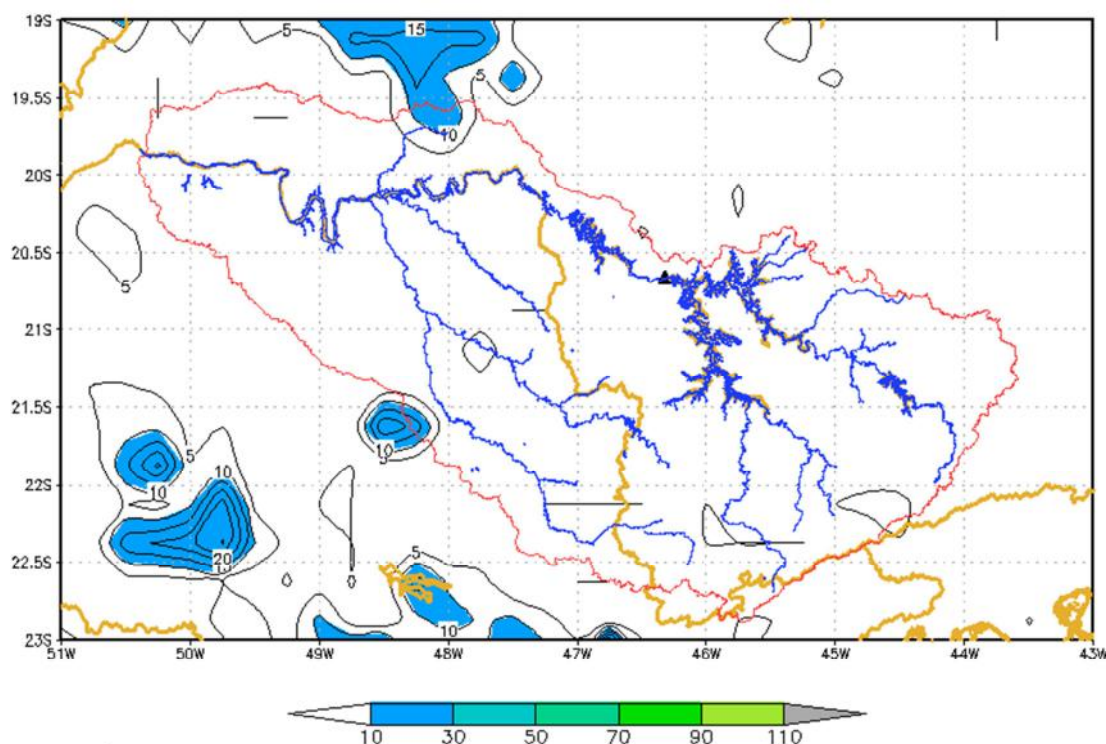
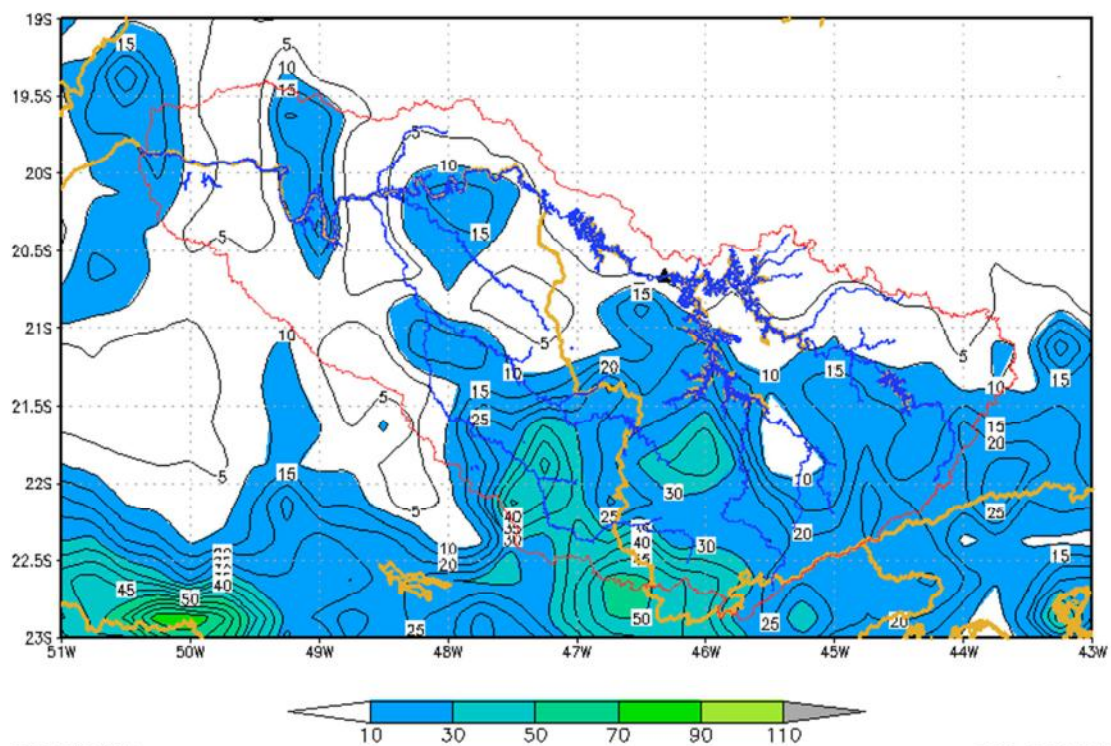


Figura 5.11 – Distribuição espacial da chuva acumulada no período de 1 a 8 de dezembro de 2010 estimada a partir dos dados do TRMM. Em vermelho, a delineação da bacia do rio Grande; em ocre, a divisão estadual. O triângulo preto representa a localização da UHE Furnas, e as linhas azuis, os rios de primeira ordem. Os padrões de cores estão associados aos valores da escala, em milímetros.

5.2.2 Segundo episódio

No **segundo episódio**, no período de 11 a 18 de dezembro, foram registrados dois eventos de chuva, com acumulado de 13,3 mm (Tabela 5.2), com um evento logo após o fim do período, de maior intensidade. Nos dois primeiros dias (Figura 5.12), em que o iZCASref já indicava um fluxo de umidade intenso, ocorreu o primeiro evento de chuva, mas a validação do evento como sendo ZCAS, pelo CPTEC, só ocorreu a partir do terceiro dia do episódio, com ocorrência de novo evento de chuva, menos intenso.



GrADS: COLA/IGES

2015-06-07-08:12

Figura 5.12 - Distribuição espacial da chuva acumulada no período de 11 a 18 de dezembro de 2010 estimada a partir dos dados do TRMM. Em vermelho, a delimitação da bacia do rio Grande, em ocre, a divisão estadual. O triângulo preto representa a localização da UHE Furnas e as linhas azuis, os rios de primeira ordem. Os padrões de cores estão associados aos valores da escala, em milímetros.

5.2.3 Terceiro episódio

No **terceiro episódio**, de 23 de dezembro a 07 de janeiro, foram registrados dois eventos de chuva análogos ao anterior, com acumulado de 56,0 mm (Tabela 5.2). No norte e nordeste da bacia, foram registrados acúmulos de chuva que beiram os 120 mm (Figura 5.13). Foi o episódio com maior acúmulo de chuva e o de mais longa duração.

Esse terceiro episódio foi o que melhor caracterizou o padrão clássico de uma ZCAS (Climanálise, dezembro de 2010), com acumulados de chuvas mais acentuados, que acarretaram picos extremos na vazão natural, com valores máximos na casa dos 3.500 m³/s. O episódio foi bem caracterizado pela circulação anticiclônica nos médios e altos níveis da troposfera e pela presença do vórtice ciclônico sobre o Atlântico. O iZCASref capturou bem todo o fluxo de umidade proveniente da Amazônia e apresentou fluxo em todo o período. Entretanto, o CPTEC limitou esse período a apenas 5 dias.

Neste episódio, as chuvas foram mais acentuadas no leste de Minas Gerais, no Espírito Santo e no norte do Rio de Janeiro.

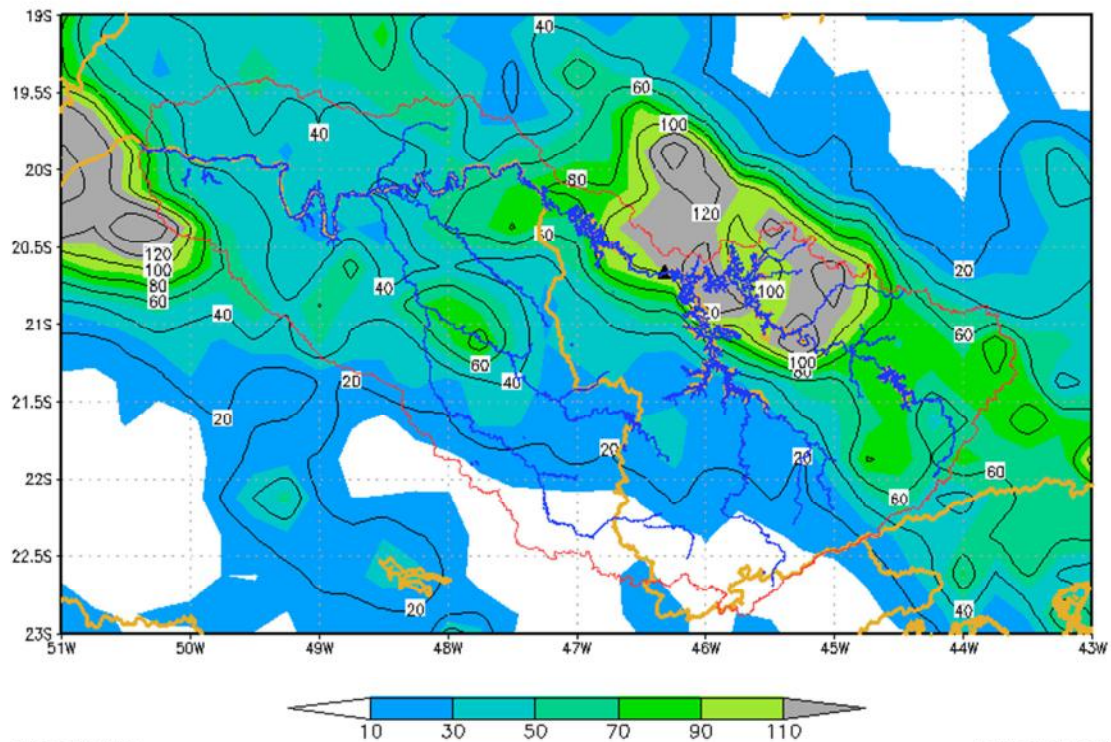


Figura 5.13 - Distribuição espacial da chuva acumulada no período de 23 de dezembro a 7 de janeiro de 2011 estimada a partir dos dados do TRMM. Em vermelho, a delimitação da bacia do rio Grande; em ocre, a divisão estadual. O triângulo preto representa a localização da UHE Furnas, e as linhas azuis, os rios de primeira ordem. Os padrões de cores estão associados aos valores da escala, em milímetros.

5.2.4 Quarto episódio

No **quarto episódio**, no período de 09 a 16 de janeiro, foi registrado um acumulado de 1,9 mm. Esse episódio, muito parecido com o episódio 5, teve apenas 1 dias entre eles. De acordo com o Climanálise, a ZCAS teve banda de nebulosidade bem definida durante os dois eventos distintos. Os picos de vazão foram os maiores, passando dos 3.600 m³/s. Atribuímos esses valores aos acumulados de chuva dos episódios anteriores e também ao aumento da vazão para maior geração de energia, pois este foi o episódio de menor duração (Figura 5.14).

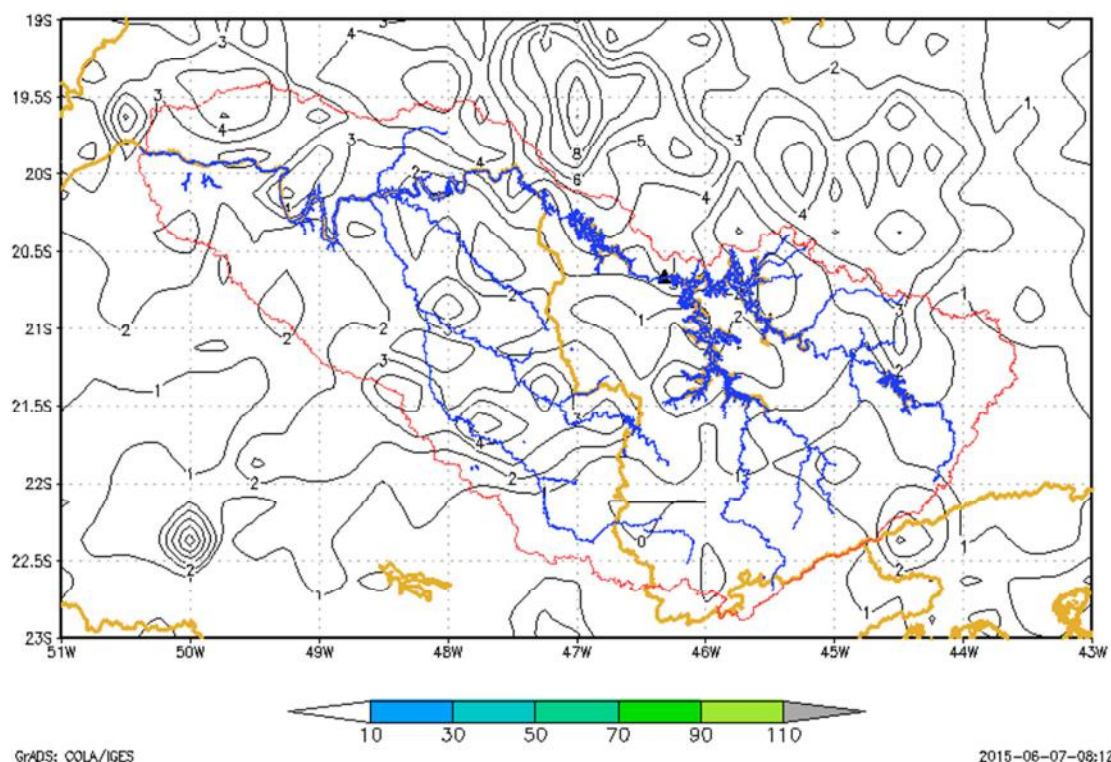
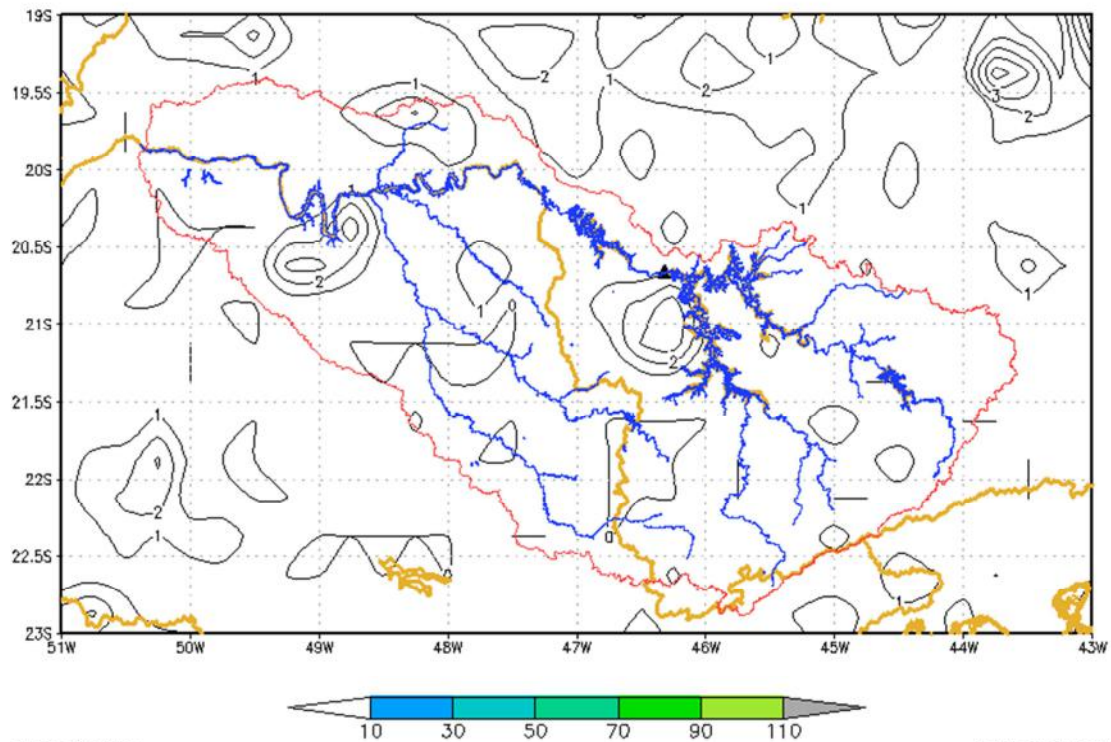


Figura 5.14 - Distribuição especial da chuva acumulada no período de 9 a 16 de janeiro de 2011, estimada a partir dos dados do TRMM. Em vermelho, a delimitação da bacia do rio Grande; em ocre, a divisão estadual. O triângulo preto representa a localização da UHE Furnas, e as linhas azuis, os rios de primeira ordem. Os padrões de cores estão associados aos valores da escala, em milímetros.

5.2.5 Quinto episódio

No **quinto episódio**, no período de 18 a 21 de janeiro, foi registrada chuva pouco intensa e espaçada, como no episódio anterior, com acumulado de 0,4 mm (Tabela 5.2). Foi o episódio com menor acumulado de chuva. A Figura 5.15 mostra ausência da chuva, pois a escala não apresenta índices menores que 10 mm.

De acordo com o Climanálise de janeiro de 2011, o início da formação deste episódio resultou em chuvas persistentes no leste da região sudeste, com impactos principalmente nas áreas serranas do Rio de Janeiro, onde ocorreram as maiores chuvas. Pelo TRMM, na Figura 5.15, não houve grandes acumulados de chuva na bacia do Rio Grande. A chuva ocorreu fora da área de estudo. Foi, nesse período, entretanto, que a vazão natural apresentou seu pico máximo de 4.500 m³/s, muito devido às chuvas do episódio 3. O hidrograma, na Figura 5.10b, bem registra esta vazão.



GrADS: COLA/IGES

2015-06-07-08:12

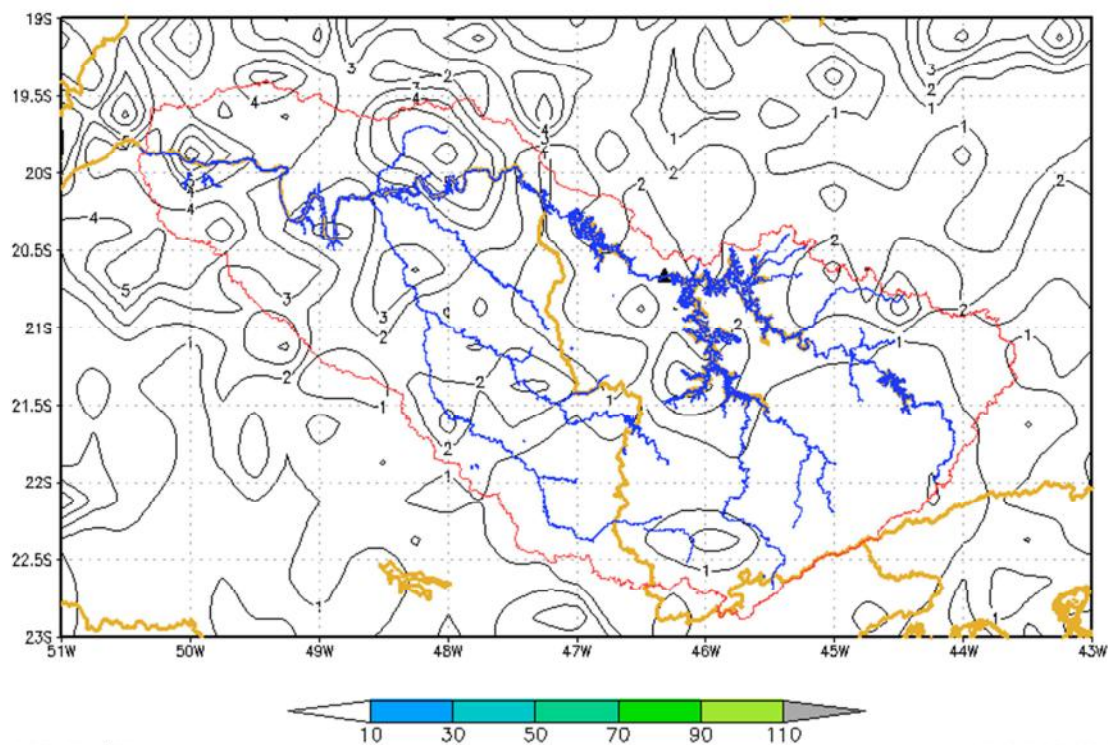
Figura 5.15 - Distribuição especial da chuva acumulada no período de 18 a 21 de janeiro de 2011, estimada a partir dos dados do TRMM. Em vermelho, a delimitação da bacia do rio Grande; em ocre, a divisão estadual. O triângulo preto representa a localização da UHE Furnas, e as linhas azuis, os rios de primeira ordem. Os padrões de cores estão associados aos valores da escala, em milímetros.

5.2.6 Sexto episódio

No **sexto episódio**, no período de 09 a 16 de fevereiro, o acumulado foi de 1,3 mm (Tabela 5.2), um dos mais fracos, com mínima chuva. Foi bem capturado pelo iZCASref e pelo Climanálise.

Este episódio seguiu a tendência dos anteriores de janeiro (episodes 4 e 5). Posicionou-se entre a região centro-oeste, sul da região sudeste e norte da região sul (Climanálise de janeiro de 2011), ficando um pouco fora de sua localização clássica.

Atribuímos o não crescimento da vazão natural, na faixa de 1.000 m³/s a 1.500 m³/s, ao fato de a chuva não ter sido significativa (Figura 5.10b).



GrADS: COLA/IGES

2015-06-07-08:12

Figura 5.16 - Distribuição espacial da chuva acumulada no período de 9 a 16 de fevereiro de 2011 estimada a partir dos dados do TRMM. Em vermelho, a delimitação da bacia do rio Grande; em ocre, a divisão estadual. O triângulo preto representa a localização da UHE Furnas, e as linhas azuis, os rios de primeira ordem. Os padrões de cores estão associados aos valores da escala, em milímetros.

5.2.7 Sétimo episódio

No **sétimo episódio**, no período de 28 de fevereiro a 9 de março, foram registrados acumulados de 7,3 mm de chuva (Tabela 5.2).

A ZCAS apresentou-se bem configurada no evento e ocasionou um acumulado de chuva maior do que os dos episódios anteriores, mas com a característica bem marcada de não apresentar picos elevados de chuva (Figura 5.10b), e sim valores de chuva pequenos, mas contínuos, como pode ser observado na Figura 5.17.

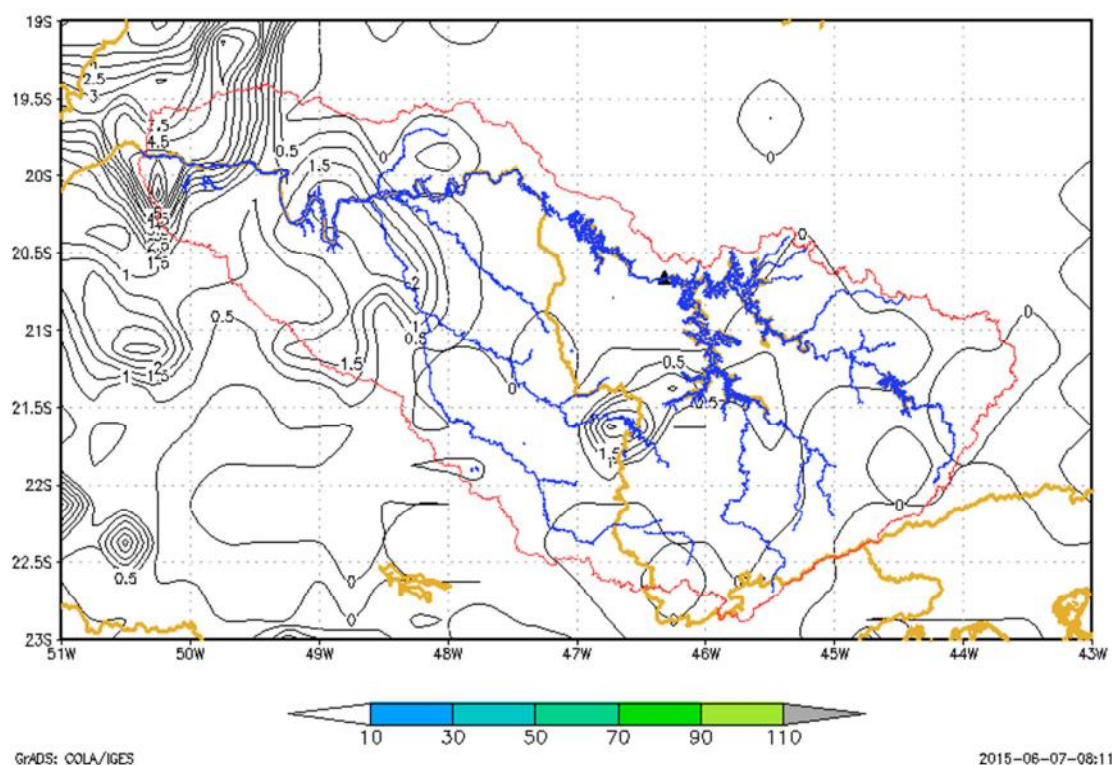


Figura 5.17 - Distribuição espacial da chuva acumulada no período de 28 de fevereiro a 9 de março estimada a partir dos dados do TRMM. Em vermelho, a delimitação da bacia do rio Grande; em ocre, a divisão estadual. O triângulo preto representa a localização da UHE Furnas, e as linhas azuis, os rios de primeira ordem. Os padrões de cores estão associados aos valores da escala, em milímetros.

5.2.8 Oitavo episódio

No **oitavo episódio**, no período de 12 a 18 de março, foram registrados acumulados de chuva de 13,5 mm (Tabela 5.2), com distribuição espacial do bem mais homogênea (Figura 5.18).

O Climanálise de março de 2011 classificou o evento como uma zona de convergência de umidade (ZCOU), posicionada ligeiramente ao norte, que influenciou o centro-norte de Minas Gerais, o Espírito Santo e o sul da Bahia.

Nesse período, o canal de umidade alinhou-se com o sistema frontal, que se posicionou sobre áreas oceânicas adjacentes à costa da região sudeste, provocando aumento da nebulosidade e ocorrência de chuva de pequena magnitude.

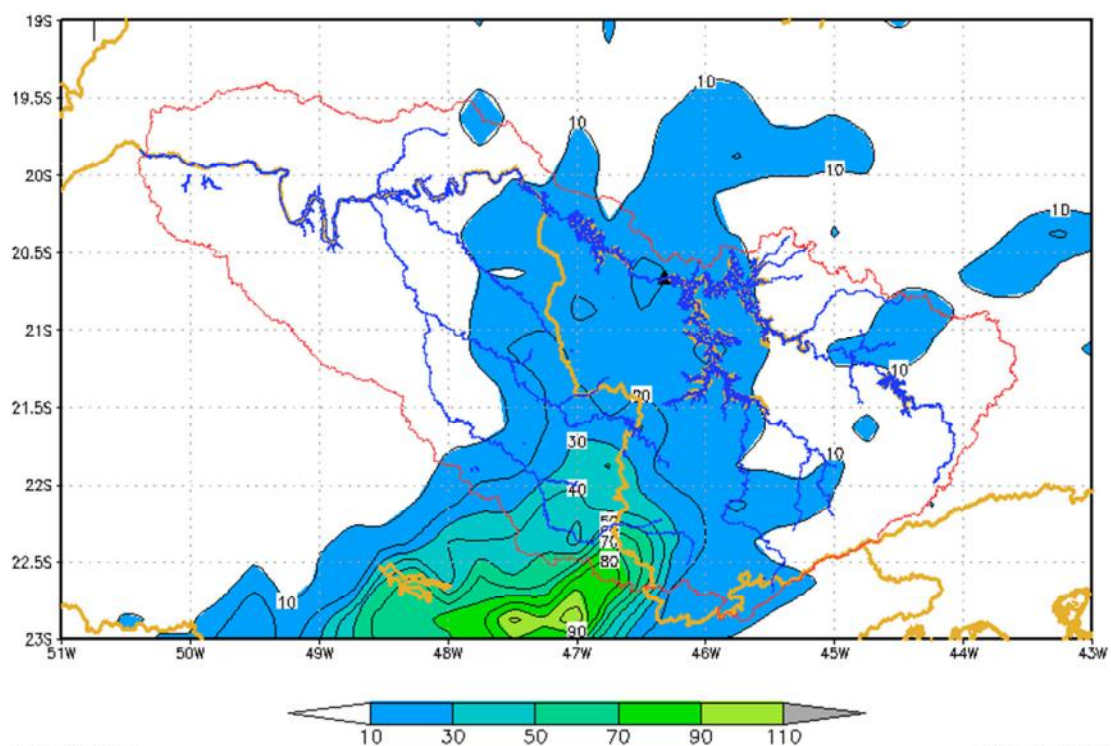


Figura 5.18 – Distribuição espacial da chuva acumulada no período de 12 a 18 de março estimada a partir dos dados do TRMM. Em vermelho, a delimitação da bacia do rio Grande, em ocre, a divisão estadual. O triângulo preto representa a localização da UHE Furnas, e as linhas azuis, os rios de primeira ordem. Os padrões de cores estão associados aos valores da escala, em milímetros.

5.2.9 Síntese do caso

Observa-se que o GRACE tem uma boa resposta quanto ao crescimento do nível dos reservatórios, que, quanto mais positiva, melhor a percepção. De abril a fevereiro, o volume útil subiu 10%, valor também apontado pelo GRACE.

Ao concatenar as análises para o caso, conclui-se que ocorreu chuva em todos os episódios. Todavia, quatro deles foram mais significativos, com três eventos de resposta positiva na vazão do rio Grande. O mais significativo foi o segundo, de 11 a 18 de dezembro de 2010. A ocorrência desses episódios conduziu a um incremento constante no volume útil do reservatório da UHE-Furnas (Figura5.19), com seu ápice em março, mesmo com menor acumulado de chuva. Isso pode significar que houve retenção de água no reservatório, devido às poucas chuvas. Os dados de altura equivalente, obtidos a partir do GRACE, demonstraram coerência com a operação do reservatório, indicando uma vazão mais elevada devido à chuva acumulada nos 2 primeiros meses, um bom parâmetro para maior geração de energia. Nos dois meses finais, fevereiro e início de março, observa-se uma acentuada diminuição de vazão, o

que implica maior crescimento do volume útil e elevação do reservatório, fato que também foi capturado pelo GRACE, mesmo com a menor quantidade de chuva.

Em fevereiro e março de 2011, com o aumento da chuva na região, observa-se um aumento da vazão, mas, em contrapartida, um menor percentual de subida do volume útil, o que é explicado pelo possível aumento de geração de energia. Por fim, anota-se, também, uma elevação maior do volume útil dos meses de dezembro e janeiro para fevereiro e março.

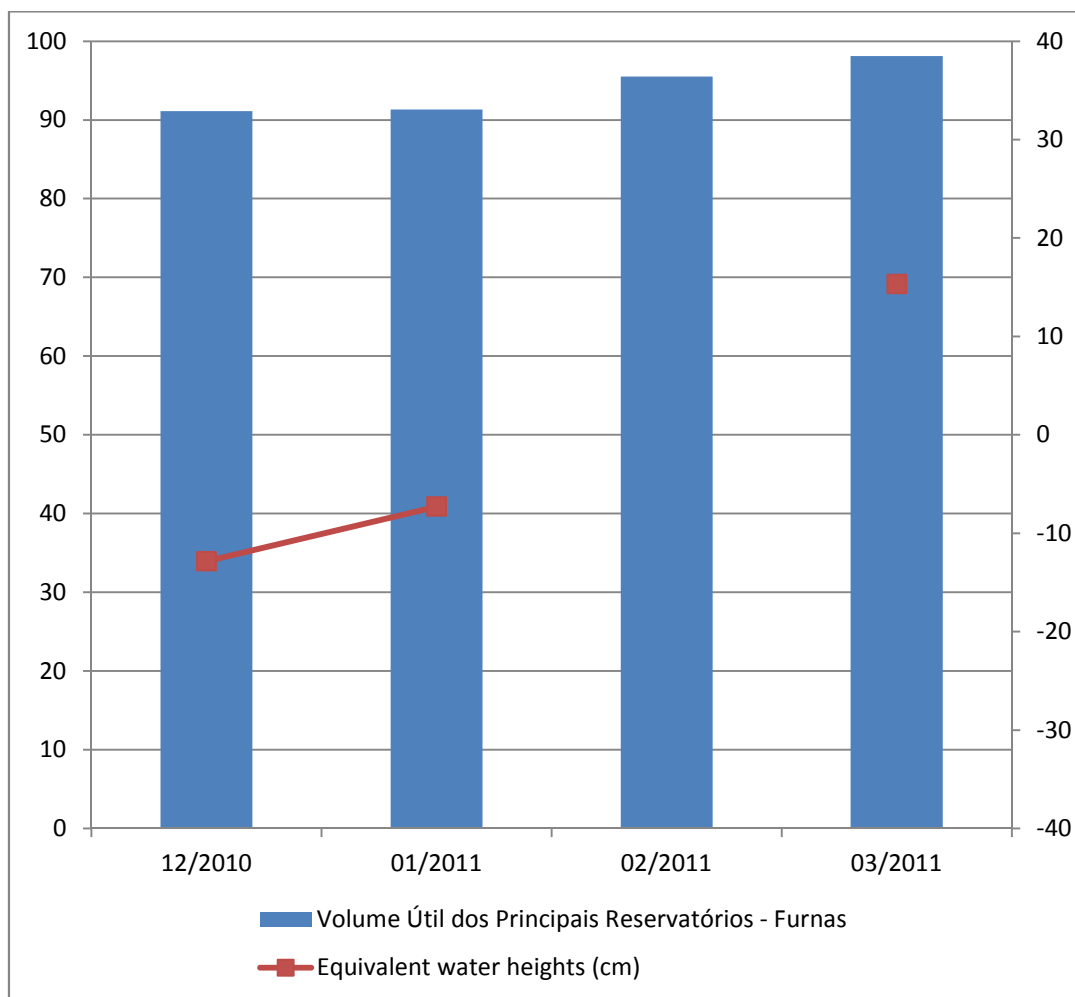


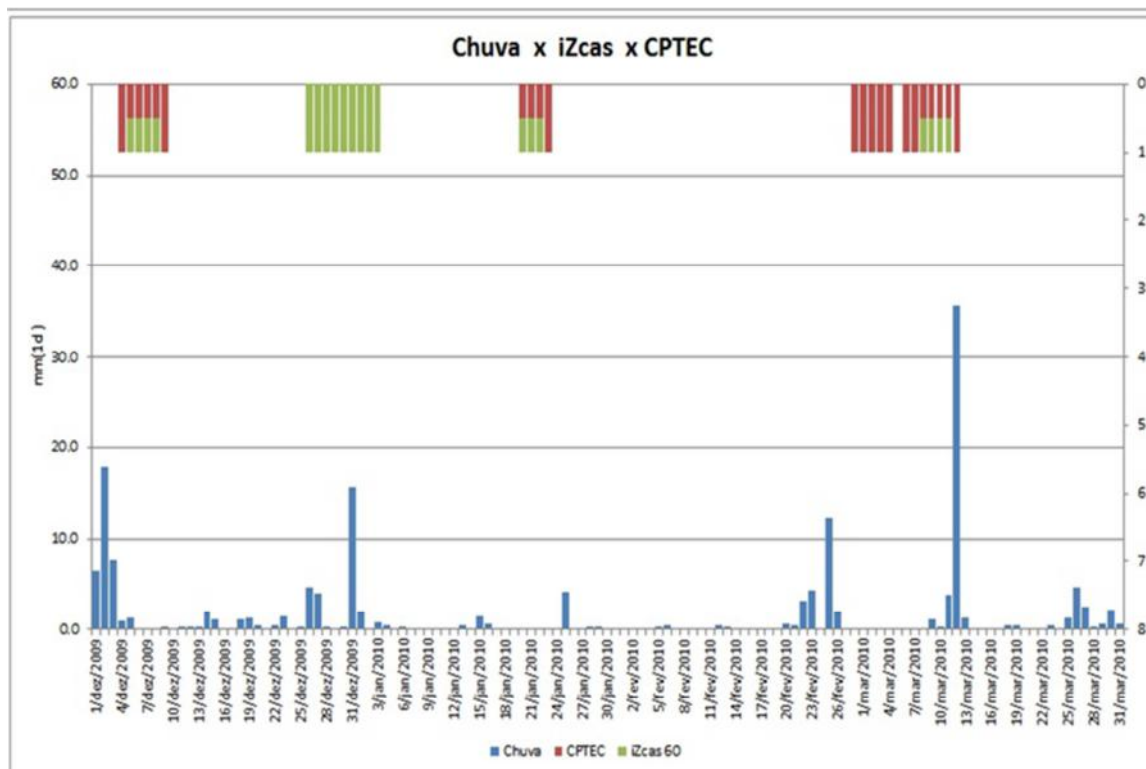
Figura 5.19 - Volume útil do reservatório da UHE Furnas versus altura equivalente da água estimada pelo GRACE no Caso 2.

CAPÍTULO 6 – RESULTADOS DO ÍNDICE IZCAS

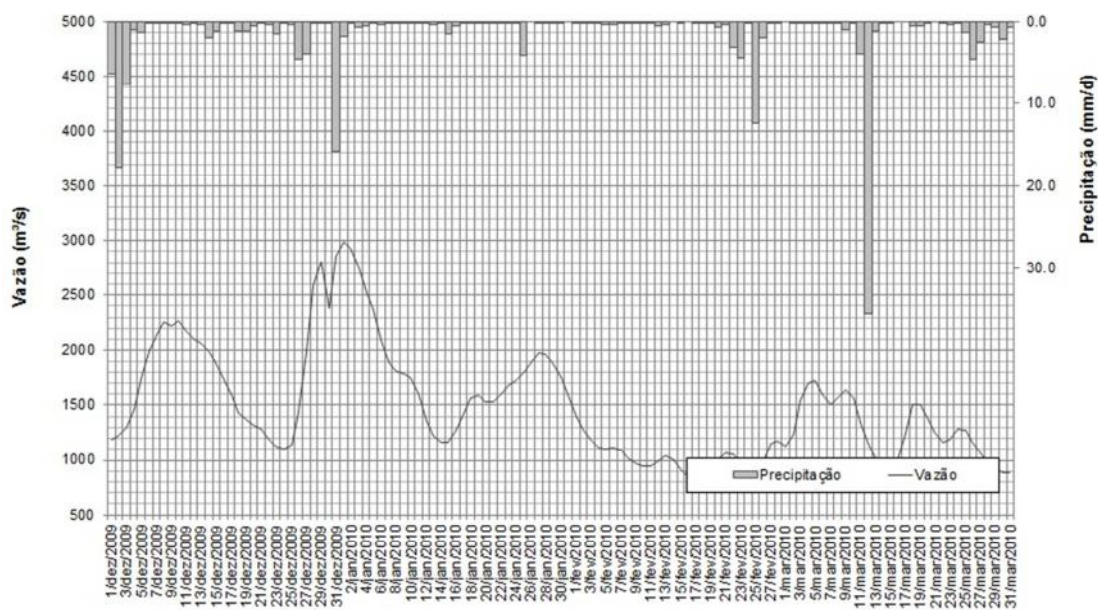
De forma semelhante ao procedimento de análise efetuado para o índice simplificado iZCASref no Capítulo 5, explorou-se o desempenho do índice aperfeiçoado iZCAS. Neste capítulo, o enfoque será essencialmente com respeito ao primeiro estudo de caso do Capítulo 5 (item 5.1), que será suficiente para mostrar o desempenho superior de iZCAS quando comparado a iZCASref, com resultados bastante satisfatórios. Ao final, explora-se ainda o desempenho do índice iZCAS para outro episódio inserido no período do caso 1, confirmando a sua operacionalidade e robustez. Cabe lembrar que, segundo foi exposto no item 3.3.6, o valor limiar adotado para iZCAS foi 60 em contraste com o valor limiar de 25 estabelecido para iZCASref (item 3.3.5).

6.1 Estudo de Caso 1 - verão de 2009/2010

O primeiro caso analisado abrangeu o período de dezembro de 2009 a março de 2010 (Figura 6.1), em que foram identificados sete episódios diferentes, com detecção de um fluxo de umidade estabelecido da região Amazônica para a região Sudeste, conforme visto anteriormente no Capítulo 5. Em especial, escolheram-se 3 episódios, mais especificamente os episódios 02, 05 e 07 adicionados a mais um episódio dentro do mesmo período de análise, conforme identificados na Tabela 6.1.



(a)



(b)

Figura 6.1 – (a) Chuva diária obtida com média da área usando o TRMM, ocorrência de ZCAS segundo CPTEC (vermelho) e de acordo com o iZCAS (verde); (b) hidrograma do verão de 2009/2010.

TABELA 6.1 – Alguns episódios do Caso 1 e chuva média diária acumulada estimada com o TRMM na área de drenagem da UHE-Furnas ao longo dos períodos dos episódios identificados.

Caso 01 - 2009/2010		
Episódio	Período	Chuva acumulada (mm)
02	25 Dez a 03 Jan	27,9
05	28 Fev a 04 Mar	0,1
07	25 Mar a 30 Mar	11,4
Adicional	20 Fev a 26 Fev	Não disponível

6.1.1 Episódio 02

No **episódio 02**, que se estendeu de 25 de dezembro de 2009 a 3 de janeiro de 2010, relembra-se que, como informado no item 5.1.2, esse evento foi captado exclusivamente pelo iZCASref, não tendo sido confirmado como caso de ZCAS pelo CPTEC. Como antes comentado, não foram incluídas, neste trabalho, análises sobre a configuração de Zonas de Convergência Úmidas (ZCOU). O valor total de chuva acumulada no período foi de 27,9 mm.

No período que antecedeu o episódio, pode-se observar, na Figura 6.2, que foram detectados fluxos de umidade significativos pelo iZCAS, por quase todo o período (9 dias) . Foi calculada uma média da umidade específica do ar versus direção e intensidade de vento em todo o episódio, que apresentou valores configurados na Figura 6.2.

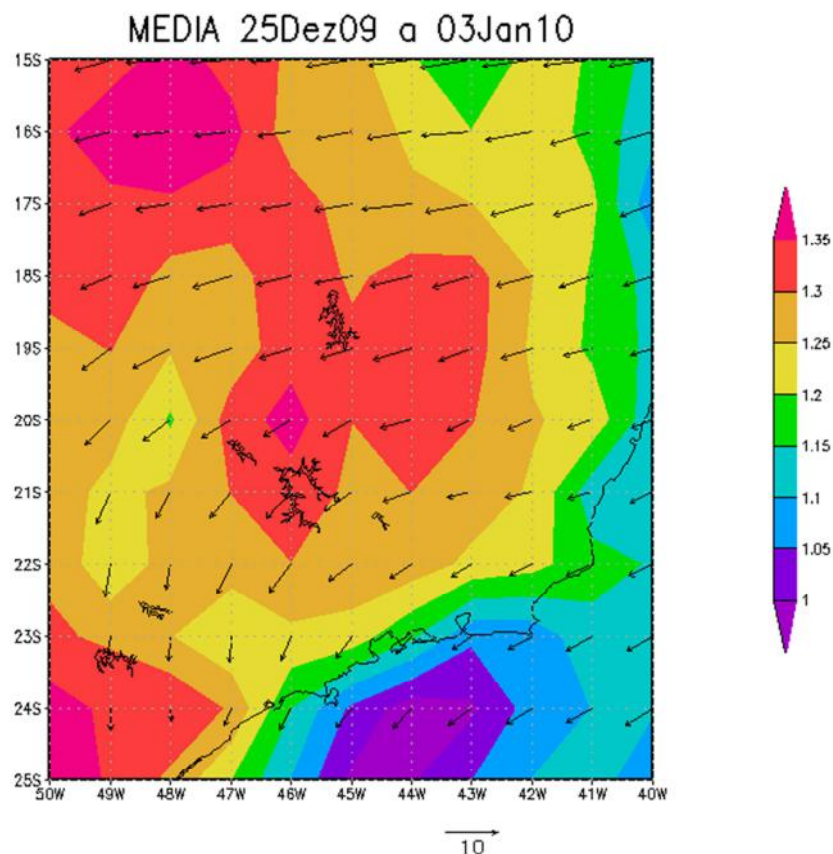


Figura 6.2 - Distribuição espacial da umidade específica do ar acumulada e vento no período de 25 de dezembro de 2009 a 3 de janeiro de 2010, estimada a partir dos dados do GFS.

Observa-se que os valores mais intensos da diagonal onde é calculado o índice estão próximos da bacia do rio Grande e menos intensos nas extremidades da Figura 6.2, indicando valores baixos ou até descartáveis devido à direção do vento não estar satisfazendo ao preconizado para o ângulo de ataque (Figura 3.2).

Segundo o boletim Climanálise de dezembro de 2009, entre os dias 25 e 31 de dezembro, uma massa de ar úmida e instável atuou em parte das regiões centro-oeste e sudeste do Brasil, associada a um intenso fluxo de noroeste. Simultaneamente, configurou-se uma área de baixa pressão nas proximidades dos estados de São Paulo e Rio de Janeiro, intensificando a convergência de massa adjacente à costa e que resultou no excesso de chuva na região sudeste do país.

6.1.2 Episódio 05

O **quinto episódio** vai de 28 de fevereiro a 04 de março de 2010. A banda de nebulosidade estendeu-se desde o sul da Amazônia e o norte das regiões centro-oeste e sudeste até o Atlântico. Segundo o Climanálise, as chuvas associadas concentraram-se, principalmente, nos estados da região sudeste e no sul de Goiás

(CPTEC, 2015). Assim, fica distante da bacia do rio Grande, justificando o baixo índice pluviométrico e sendo compreensível por que o índice não capturou bem o evento, tendo em vista a sua localização não estar na posição clássica de uma ZCAS, localizando-se mais a norte. Nota-se, na Figura 6.3, a média do período com os valores de umidade específica do ar e vento, podendo-se concluir que os valores de umidade específica maiores encontram-se mais ao norte, mais precisamente no sudeste do estado de Goiás e noroeste de Minas Gerais. Observa-se, também, que os valores da diagonal do quadrado que fazem parte do cálculo do índice, em muitos desses pontos, estiveram fora do ângulo de ataque, sendo assim descartados esses valores para o cálculo do índice.

Esse episódio foi marcado por um período inteiro de ocorrência de ZCAS. O iZCAS não se mostrou significativo para os cinco dias; a exceção ficou para um único dia captado com o iZCAS. Todavia, com o filtro de persistência dos 3 dias, explicado no capítulo de metodologia, ele foi removido, finalizando-se sem qualquer ocorrência do iZCAS.

A análise da chuva acumulada no período indicou valor próximo do 0,1 mm, com sua distribuição espacial mostrada na Figura 5.6. Esse episódio reforça e consolida o conceito de que a chuva não necessariamente está associada à ZCAS, em seu aspecto dinâmico.

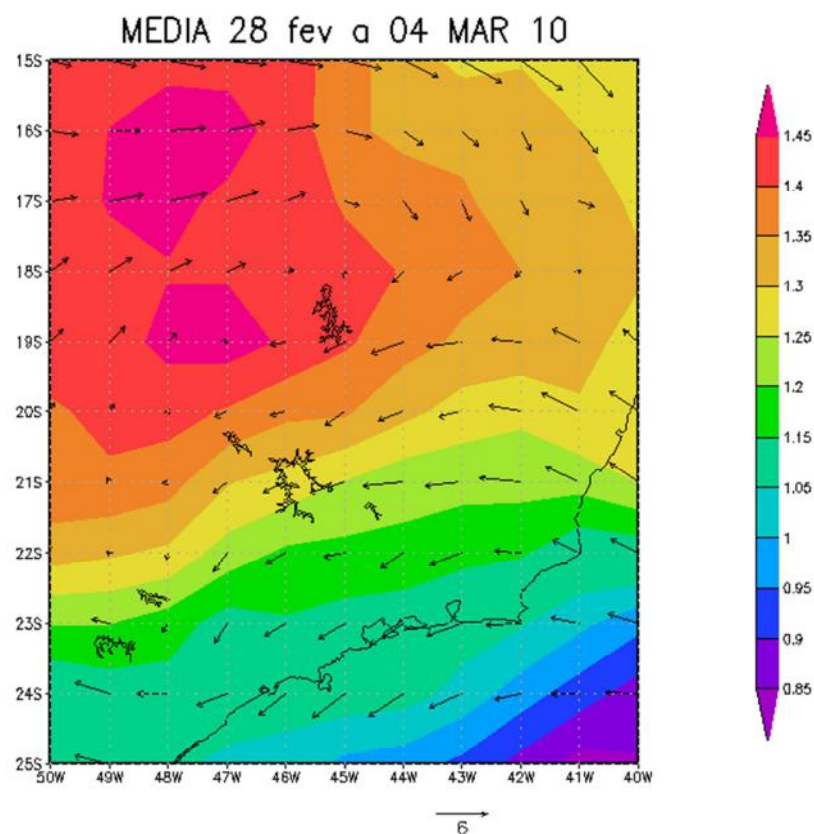


Figura 6.3 - Distribuição espacial da umidade específica acumulada e vento no período de 28 de fevereiro a 4 de março de 2010, estimada a partir dos dados do GFS.

6.1.2 Episódio 07

O **sétimo episódio** vai de 25 de março a 31 de março de 2010. O sétimo episódio não foi detectado pelo índice do iZCAS. O CPTEC também não identificou a ocorrência de ZCAS. Foram estimados valores de chuva ao longo do período, mas nenhum acima de 5 mm/dia.

Como registrado no Capítulo 5, enfatiza-se que o acumulado para o período, que se estende de 25 a 30 de março de 2015, chegou a 11,4 mm. Entre os dias 25 e 29 de março de 2010, houve uma massa de ar frio que atuou na região sul do país, e o centro do anticiclone associado posicionou-se próximo ao litoral, deslocando-se lentamente para leste.

Em paralelo, nos dias 29 a 31 de março de 2010, houve uma zona convergência de umidade que se estabeleceu sobre parte das regiões sudeste, centro-oeste e norte do Brasil, com chuvas mais acentuadas no leste de São Paulo e sul de Minas Gerais.

O índice iZCAS apresentou no dias 29 e 31 de março de 2010 alerta positivo, todavia, por ter sido um estabelecido um filtro de 3 dias consecutivos, foi retirado por não atender as exigências. Os dois (2) fenômenos explicam a ocorrência de chuva na região da bacia.

Na Figura 6.4, observam-se os valores elevados de umidade específica em cima da bacia do rio Grande durante todo o período.

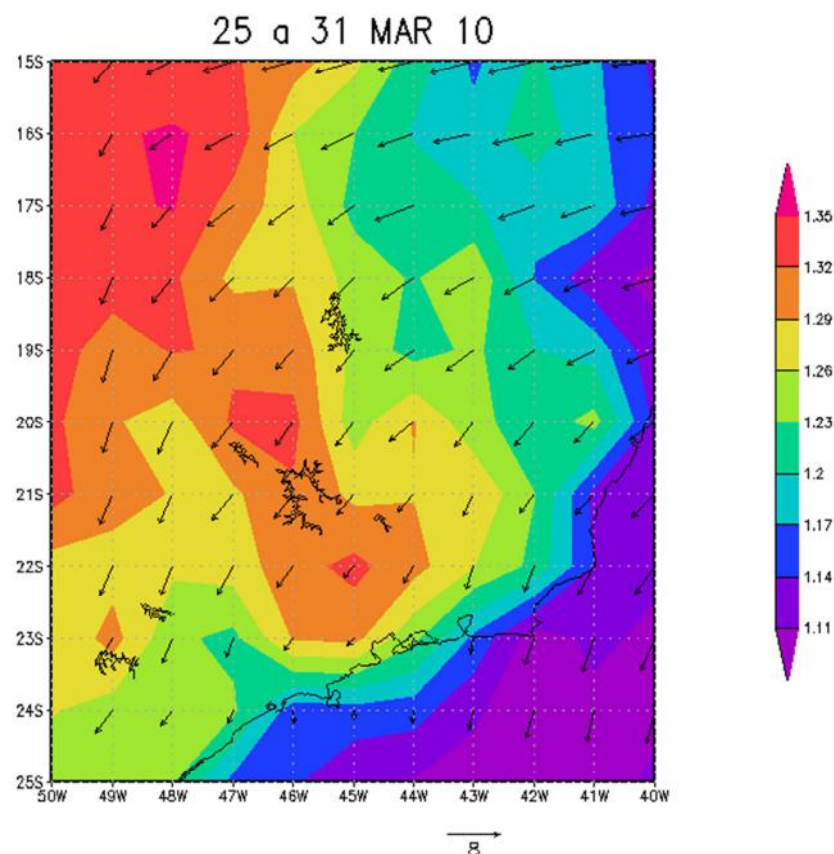


Figura 6.4 – Distribuição espacial da umidade específica acumulada e vento no período de 25 de março a 31 de março de 2010, estimada a partir dos dados do GFS.

6.1.3 Episódio adicional – 20 a 26 de fevereiro de 2010

O **episódio adicional** vai de 20 de fevereiro a 26 de fevereiro de 2010. Segundo o boletim Climanálise (fevereiro/2010), houve a formação de uma região de convergência de umidade sobre o setor central do Brasil. Esta banda de nebulosidade teve duração de apenas três dias, sendo eles os dias 24, 25 e 26 de fevereiro, sem estabelecer, portanto, um episódio clássico de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Observe-se, nos campos de umidade específica e vento, apresentados no Anexo B, que, nos dias 24 e 25 de fevereiro de 2010, há uma convergência se formando, porém ela começa a se descaracterizar no dia 26 de fevereiro de 2010. O IZCAS não detectou qualquer valor acima do valor limiar estabelecido de 60 durante todo o período.

Observa-se, na Figura 6.5, que os valores maiores de umidade específica encontram-se próximos à bacia, na porção à noroeste.

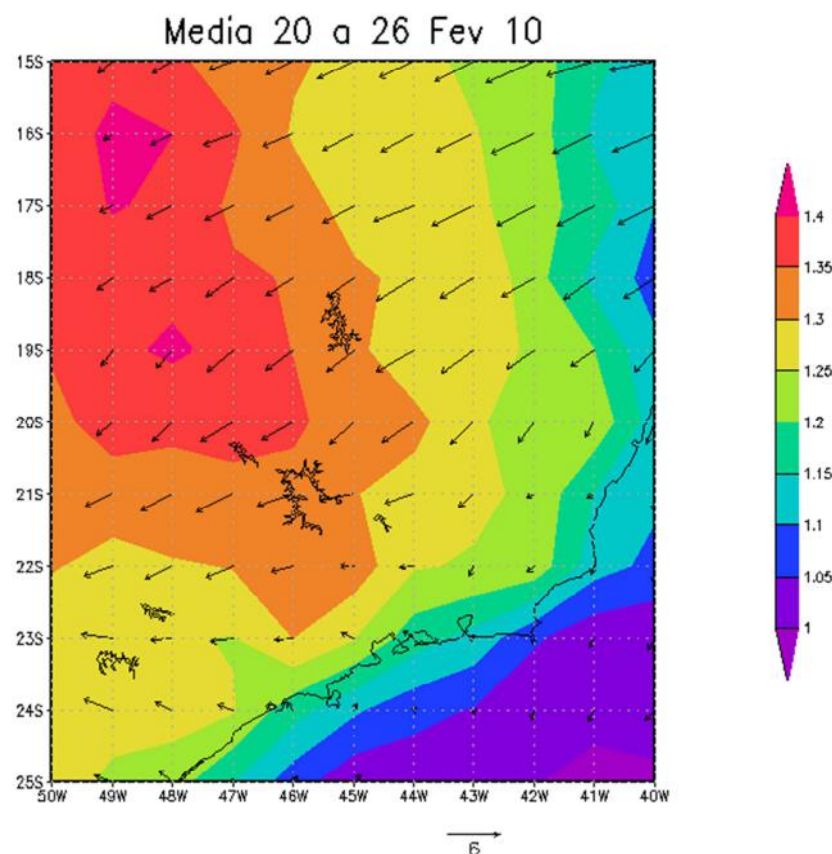


Figura 6.5 – Distribuição espacial da umidade específica acumulada e vento no período de 20 de fevereiro a 26 de fevereiro de 2010, estimada a partir dos dados do GFS.

Destaca-se que, no Anexo B, seguem os dados diários dos dias de cada episódio. Na seção final deste capítulo, faz uma abordagem de síntese da proposição do índice iZCAS, contrastando sua performance com a do índice iZCASref apresentado no Capítulo 5, em particular para o Caso 1, que foi comum à aplicação dos dois procedimentos, conforme metodologia proposta nesta dissertação.

6.2 Síntese da análise para o indicador iZCAS

A identificação de fenômenos de ZCAS, particularmente, é de reconhecida importância face ao impacto que pode gerar na operação do setor elétrico brasileiro na medida em que impacta nos volumes de água armazenado nos reservatórios. Adicionalmente, diversos outros impactos na escala de uma bacia hidrográfica podem ser antecipados com a construção de indicadores de previsão de fenômenos dessa natureza.

Após a análise dos novos indicadores, chamados aqui de iZCASref, com resultados expostos no Capítulo 5, e de iZCAS, que corresponde a um

aperfeiçoamento de iZCASref, com resultados mostrados neste capítulo, emprega-se esta seção para sintetizar a avaliação do desempenho do indicador iZCAS.

De fato, registra-se que o iZCAS apresentou ótimo desempenho técnico para avaliação de chuva na bacia do rio Grande, em especial para identificar ZCAS ou ainda de outros fenômenos que possam contribuir na geração de chuva na região de estudo.

Destaca-se que a seu desempenho foi superior ao índice iZCASref. A título de exemplo, pode-se observar, no episódio 3 do caso 1 (item 5.2.3), configurado na Figura 5.1a, um número significativamente menor de falsos alertas no período com base na nova formulação do iZCAS em relação ao iZCASref. Adicionalmente, essa constatação foi identificada na análise dos demais episódios.

CAPITULO 7 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Esta dissertação estabeleceu como objetivo propor indicadores de previsão do fenômeno atmosférico Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) de forma a antecipar as condições potenciais de armazenamento mensal de água nos reservatórios da região sudeste com desdobramentos no planejamento e operação do setor elétrico brasileiro. Diversos estudos de modelagem hidrológica e hidroenergética podem ser beneficiados com a proposição desenvolvida e avaliada nesta pesquisa.

Em especial, são propostos dois indicadores denominados de iZCASref e iZCAS. O primeiro indicador trata-se de um indicado simplificado que é construído com base na umidade relativa do ar e na velocidade do vento em 850 hPa. O segundo indicador representa um aperfeiçoamento na medida em que propõe a substituição da umidade relativa do ar pela umidade específica do ar. Ambos os indicadores denotam características de simplicidade, robustez e de potencial implementação operacional.

A ZCAS é um fenômeno que tem origem na dinâmica da atmosfera. Iniciada pela convecção da região amazônica associada ao anticiclone da Bolívia e ao vórtice ciclônico de altos níveis do nordeste, produz um significativo aporte de umidade da Amazônia para o sudeste brasileiro. Caracterizada por grande variabilidade espacial, pode ter regiões de convecção profunda e precipitação intensa, em função da umidade oriunda da Amazônia, mas também chuva leve e contínua e até ausência de chuva, mesmo com nebulosidade extensa.

No presente trabalho, examinou-se, primeiramente, a caracterização da ZCAS divulgada no Boletim Climanálise, do CPTEC. Embora o Climanálise descreva um modelo, concebido como uma forma “canônica” da ZCAS, verifica-se que o comportamento e o posicionamento do fenômeno não são tão regulares como indicado. Há uma forma canônica sim, mas, dos vários casos de estudo, constataram-se diferenças marcantes, atribuídas às variações das componentes dinâmicas, que não necessariamente se comportam tão classicamente em todos os casos.

Numa segunda etapa, utilizaram-se dados de sensoriamento remoto, notadamente de chuva via TRMM e de gravimetria via GRACE, para conduzir uma avaliação dos indicadores de ZCAS propostos na bacia do rio Grande, afluente do rio Paraná, escolhida por sua relevância para a produção de energia.

Em particular, foram estudados, inicialmente, dois estudos de caso, verão 2009/2010 e verão 2010/2011, para avaliar o índice iZCASref. Esses dados confirmam que, nos dois casos estudados, não houve registro de pancadas de chuva e nem altos valores de precipitação acumulada no reservatório da bacia do rio Grande. Houve,

sim, uma chuva contínua, mas com eventos de altos valores acumulados, como nos episódios 1, 2, 6 e 7 do Caso 1 e nos episódios 2, 3 e 8 do Caso 2, mas também valores de chuva pouco significativos. Os períodos de ZCAS mais chuvosos ocorreram nas extremidades do período, novembro/ dezembro e março/abril, em que chuvas finas e constantes foram mais atuantes.

É natural que se observe, com um aumento de acumulados de chuva na área de drenagem de uma bacia, uma resposta da vazão, em geral, com aumento gradativo. No entanto, o nível dos reservatórios das usinas hidrelétricas não depende apenas da chuva e de vazão naturais. Eles são operados sob controle humano, em função de demandas, tanto para adequar a geração de energia à demanda, quanto para garantir um escoamento mínimo, determinado pelos demais usos da água. Além disso, o acúmulo de água no reservatório é sempre desejado, visando a um uso futuro. Nos casos aqui analisados, as chuvas associadas à ZCAS contribuíram para o aumento do nível do reservatório da UH-Furnas em todos os episódios.

A análise conjunta dos boletins Climanalise e do iZCASref foi de grande valia para identificação e classificação dos eventos. No Caso 2, mais especificamente nos episódios 1, 2, 3, 4, e 6, essa análise validou a ocorrência da ZCAS. O iZCASref proporcionou resultados ainda mais interessantes – além de se mostrar um indicador de ZCAS com boa confiabilidade, identificando também fenômenos como a Zona de Convergência de Umidade e indicando períodos de maior disponibilidade de umidade na região sudeste, um elemento vital para a ocorrência de precipitação. O iZCASref, portanto, pode ser uma ferramenta de grande utilidade na previsão do tempo para as bacias hidrográficas influenciadas tanto pelas ZCAS como pelas ZCOU, principalmente quando as formações apresentam sua forma canônica.

Em uma segunda etapa do trabalho, propôs-se um aperfeiçoamento para o indicador iZCASref configurando o índice denominado de iZCAS, em que a substituição da umidade relativa do ar pela umidade específica do ar, atenuando o efeito da temperatura, representou um avanço em termos computacionais e operacionais em relação à proposição inicial. Nesse sentido, conduziu-se o estudo do desempenho do novo indicador iZCAS face a alguns episódios do Caso 1, confirmando a sua superioridade na melhor identificação de ZCAS comparativamente ao indicador iZCASref.

Uma das contribuições consideradas até como motivadoras do presente estudo foi a aplicação de dados oriundos de sensoriamento remoto. Esses dados, embora por vezes possam não ser representativos em termos quantitativos, são excelentes indicadores qualitativos e da ordem de grandeza dos fenômenos em análise. Num quadro de insuficiência de dados observados *in situ*, o TRMM pode fornecer

estimativas capazes de preencher lacunas na distribuição espacial de dados pluviométricos. O GRACE, apesar de ter sido um programa encerrado em 2014 e da sua complexidade quanto à estimativa dos dados, fornece resultados de níveis dos reservatórios bastante coerentes, mesmo que muito em função da grande área ocupada pelo reservatório – quanto maior a área, melhor o GRACE percebe as variações. Se não há disponibilidade de dados de volume útil, portanto, os dados do GRACE podem servir para estimativas indiretas, salvo quando as variações do volume útil, muito pequenas, não são captadas pelo instrumento.

Em síntese, a ocorrência de episódios da Zona de Convergência do Atlântico Sul efetivamente contribui para a alimentação dos reservatórios das usinas hidrelétricas localizadas nas áreas de influência do fenômeno, mesmo que nem sempre pela intensidade das chuvas, que, por vezes, são fracas, mas contínuas e persistentes. Logo, a previsão da ocorrência e das características físicas de cada episódio são informações de grande utilidade para a operação dos reservatórios e, conseqüentemente, para a geração de energia e para o manejo do uso e gestão da água para as finalidades concorrentes. Nesse aspecto, a aplicação de técnicas de sensoriamento remoto pode contribuir muito para o aumento do conhecimento sobre a estrutura do fenômeno – e contribuir para a sua previsibilidade.

Por fim, espera-se que as proposições de indicadores de ocorrência de ZCAS com certa antecedência, conforme aqui proposto mediante o iZCASref e iZCAS, possam gerar um referencial de trabalho para contribuir com melhores previsões, razão pela qual devem ser aprimoradas e disseminadas para um uso mais amplo, em especial na área de impactos hidrológicos de disponibilidade de água em bacias hidrográficas brasileiras que são susceptíveis ao comportamento da ocorrência de ZCAS, notadamente repercussões quanto à geração e impactos de eventos extremos, seja de enchentes seja de secas

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, R.A.F. P. Nobre, R. J. Haarsma, and E. J. D. Campos. Negative ocean–atmosphere feedback in the South Atlantic Convergence Zone. **J. Geophys. Res.**, 34, doi:10.1029/2007GL030401. 2007

ALMEIDA FILHO, F.G.V., **Variação temporal do campo gravitacional detectada pelo satélite GRACE : Aplicação na Bacia Amazônica**, São Paulo. Tese de D.Sc., EP/USP, São Paulo, SP, Brasil. 2009

ANA, 2015: **Hidroweb - Sistema de informações Hidrológicas**. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Acessado em: 05 de janeiro de 2015.

ANEEL, 2015: SIGEL - **Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico**. Disponível em: <<http://sigel.aneel.gov.br/sigel.html>>. Acessado em: 05 de novembro de 2015.

ANDRADE, K. M. **Climatologia e Comportamento dos Sistemas Frontais sobre a América do Sul**. Dissertação de Mestrado em Meteorologia, INPE -14056-DI/1067, 2007

ARAKAWA, A., Design of the UCLA general circulation model. **Numerical Simulation Of Weather and Climate Technical Report No 7**, Dept. of MET., UCLA , 1972

BALMINO, G., “Gravity field recovery from GRACE: Unique aspects of the high precision inter-satellite data and analysis methods”, **Space Science Reviews**, v.108, n.1-2, pp. 47-54, 2003.

BARRERA, D.F. Precipitation estimation with the hydro-estimator technique: its validation against rain gauge observations. **Congresso da IAHS**, 7. , Foz do Iguaçu, 2005.

CARVALHO, L.M.V., C. JONES, B. LIEBMANN. Extreme precipitation events in southeastern South America and large-scale convective patterns in the South Atlantic convergence zone. **J. Climate**, 15, 2377-2394. 2002

CARVALHO, L. M. V., C. JONES, e B. LIEBMANN,: Extreme precipitation events in southeastern South America and large-scale convective patterns in the South Atlantic convergence zone. **J. Climate**, 15, 2377–2394. 2004

CENTRO DE PESQUISA DE ENERGIA ELÉTRICA – CEPEL, **Manual de Referência do Modelo DECOMP V 12.0**, Rio de Janeiro, out. 2004 a.

CENTRO DE PESQUISA DE ENERGIA ELÉTRICA – CEPEL, **Manual de Referência do Modelo NEWAVE**, Rio de Janeiro, 2006.

Climanálise - **Boletim de Monitoramento e Análise Climática- INPE/CPTEC, Janeiro de 2000 a 2012**. v.23 Nº 12. São José dos Campos - SP, Brasil

Collishchonn, B. **Uso de precipitação estimada pelo satélite TRMM em modelo hidrológico distribuído**. Dissertação de mestrado, IPH-UFRGS, Porto Alegre, 2006.

COLLISHONN, B.; COLLISHONN, W; TUCCI, C. Análise do campo de precipitação gerado pelo satélite TRMM sobre a bacia do São Francisco at é Três Marias. In: **Simpósio de Recursos Hídricos do Sul**, Curitiba, 2006.

CONTI, G. N. **Estimativa da precipitação através de técnicas de sensoriamento remoto: Estudo de caso para o estado do Rio Grande do Sul**. Dissertação de mestrado, IPH-UFRGS, 2002.

CPRM, 2011: **Projeto Atlas Pluviométrico do Brasil: SIG Altas**. Disponível em: <www.cpmr.gov.br>. Acessado em: 04/02/2015.

CUNNINGHAM, C. C.; CAVALCANTI, I. F. A.: Intraseasonal modes of variability affecting the South Atlantic Convergence Zone. **International Journal of Climatology**. v. 26, p. 1165-1180, 2006.

DEY, C.H., Evolution of objective analysis methodology at National Meteorological Center. **Wea. Forecasting**, 4,297-312, 1989

DOTY, BRIAN; 1995 **The Grid Analysys and Display System**; via Internet em 10/07/2012 as 14:52h

DRUMOND, A. **Anomalias de TSM no Hemisfério Sul e seu Impacto na Monção Sul Americana**. Tese de Doutorado em ciências Atmosféricas pela Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2005.

FIGUEROA, S. N.; SATYAMURTY, P.; SILVA DIAS, P. L. Simulations of the summer circulation over the South American region with an Eta coordinate model. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 52, p.1573-1584, 1995.

GAN, M. A.; V. E. KOUSKY; C. F. ROPELEWSKI. The South America Monsoon Circulation and Its Relationship to Rainfall over West-Central Brazil. **J. Climate**, v. 17, p. 47 – 66, 2004.

GANDU, A. W. ; DIAS, Pedro Leite da Silva . Impact of heat sources on the South American tropospheric upper circulation and subsidence. **Journal of Geophysical Research**, USA, v. 103-D6, p. 6001-6015, 1998.

Güntner, A., Improvement of global hydrological models using GRACE data. **Surv. Geophys.**, 29 ,375–397, doi:10.1007/s10712-008-9038-y. 2008.

GRIMM; A. M.; SILVA DIAS, P. L. Analysis of tropicalextratropical interactions with influence functions of a barotropic model. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 52, p. 3538-3555, 1995.

HERDIES, D. L.; DA SILVA, A.; SILVA DIAS, M. A. F.; FERREIRA, N. R. Moisture budget of the bimodal pattern of the summer circulation over South America. **J. Geophys. Res.**, v.107, 8075, doi:10.1029/2001JD000997, 2002.

<https://www.abrh.org.br/sqcv3/UserFiles/Sumarios/51b628c0f984da85b0201d42c0cdd10f2ff3473dd68d07c62117d3505fadc85a.pdf>

<http://grads.iges.org/grads/head.html>

<http://grace.jpl.nasa.gov/>

JEKELI, Ch., Calibration/validation methods for GRACE, **International Association of Geodesy Symposia**, Vol. 121, Berlin Heidelberg, 2000

JOLY, G., **Influência de fenômenos meteorológicos na geração de energia eólica nos Estados do Rio Grande do Norte**, Minas Gerais e Rio Grande do Sul. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil na COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2014.

JONES, C., L.M.V. CARVALHO. Active and break phases in the South American Monsoon System. **J. Climate**, 15, 905-914, 2002.

KALNAY, E.; MO, K. C.; PAEGLE, J. Large -amplitude, short-scale stationary Rossby waves in the Southern Hemisphere: observations and mechanistic experiments to determine their origin. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 43, n. 3, p. 252-275, Feb. 1986.

Kanamitsu, M., 1989: Description of the NMC global data assimilation and forecast system. **Wea Forecasting** , 4, 334-342.

KANAMITSU, M., ALPERT, J. C., CAMPANA, K. A., CAPLAN, P. M., DEAVEN, D.G., IREDELL, M., KATZ, B., PAN, H.-L., SELA, J., WHITE, G. H., 1991. Recent Changes Implemented into the Global Forecast System at NMC. **Weather and Forecasting**, v.6, pp. 425-435

KODAMA, Y. Large-scale common features of subtropical precipitation zones, (the Baiu frontal zone, the SPCZ, and SACZ) Part I: Characteristics of subtropical frontal zones. **Journal Meteorological of the Society Japan**, v. 70, n. 4, p. 813-836, 1992.

KODAMA, Y. Large-scale common features of subtropical precipitation zones, (the Baiu frontal zone, the SPCZ, and SACZ) Part II: Conditions of the circulations for generating the STCZs. **Journal Meteorological of the Society Japan**, v. 71, n. 5, p. 581-610, 1993.

KOUSKY, V. E. Pentad outgoing longwave radiation climatology for the South American sector. **Rev. Bras. Meteo.**, 3, 217-231, 1988.

KUMMEROW, C., W.S.Olson, and L. Gglio: A simplifield scheme for obtaining precipitation and vertical hydrometer profiles from passive microwave sensors, 1996

LENTERS, J. D., and K. H. COOK. Summertime precipitation variability over South America: Role of the large-scale circulation. **Mon. Wea. Rev.**, 127, 409-431, 1999.

LIEBMANN, B., G.N. KILADIS, C.S. VERA, A.C. SAULO e L.M.V. CARVALHO. Subseasonal variations of rainfall in South America in the vicinity of the low-level jet east of the Andes and comparison to those in the South Atlantic Convergence Zone. **J. Climate**, 17, 1829-3842, 2004

LOPES, A. F. M., **Proposta de indicador de ocorrência da Zona de Convergência do Atlântico Sul**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Meteorologia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. (2012)

LOSEKAN, Luciano "In energia elétrica", 2013. Disponível em: <<https://infopetro.wordpress.com/2013/08/12/desafio-do-setor-eletrico-brasileiro-novo-papel-dos-reservatorios/>>. Acessado em: 12 de agosto de 2013.

MARTON, E. "**Oscilações Intrasazonais Associadas a Zona de Convergência do Atlântico Sul no Sudeste Brasileiro**", Tese de Doutorado, IAG/USP, SP, 2000.

Ministério do Meio Ambiente (MMA), Disponível em: <www.mma.gov.br/agua/recursos-hidricos/aguas-subterraneas/ciclo-hidrologico>. Acesso em 25 de junho de 2015.

SACRAMENTO NETO, O. B.; ESCOBAR, G. C. J.; SILVA, P. E. D. Método objetivo para identificar episódios de Zonas de Convergência de Umidade (ZCOU) no ambiente operacional do Centro de Previsão de Tempo e Estados Climáticos - CPTEC. **XVI Congresso de Meteorologia**, 2010.

NOGUÉS-PAEGLE, J.; MO, K. C. Alternating wet and dry conditions over South America during summer. **Monthly Weather Review**, v. 125, n. 2, p. 279-291, 1997.

NICHOLSON, S. On the question of the "recovery" of the rains in the west African Sahel. **Journal of Arid Environments**, 63, p.615-641, 2005.

NINOMIYA, K. Similarity and difference between the South Atlantic Convergence Zone and the Baiu Frontal Zone simulated by an AGCM. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v.85, n. 3, p. 277-299, jun. 2007.

OLIVEIRA, N. S. "**Relação entre chuva e deslizamento em Nova Friburgo/RJ**", Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, 2014.

Operador Nacional do Sistema Elétrico – NOS. **Relatório de Dados Relevantes ONS 2008**, 2008. Disponível em:

<http://www.ons.org.br/download/biblioteca_virtual/publicacoes/dados_relevantes_2008/index.swf>. Acessado em: 09/07/2014

Operador Nacional de Sistema - ONS. **Dados relevantes**, 2013. Disponível em:

<http://www.ons.org.br/download/biblioteca_virtual/publicacoes/dados_relevantes_2013/html/02-07-Producao-e-Exportacao-verificada-em-2012.html?expanddiv=02>.

Acessado em: novembro de 2015.

Operador Nacional de Sistema - ONS. **Produção do sudeste 43,6**, 2013. Disponível em:

http://www.ons.org.br/download/biblioteca_virtual/publicacoes/dados_relevantes_2013/html/06-02-Producao-por-Subsistema.html?expanddiv=06. Acessado em: 27/09/2014

Operador Nacional de Sistema - ONS. **Informações institucionais**. Disponível em:

<http://www.ons.org.br/institucional_linguas/modelo_setorial.aspx>. Acessado em: 16 novembro de 2015.

Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Disponível em: <www.ons.org.br/. Acesso em 2014>. Acessado em: 06/05/2015

PACA, V. H. M. “**Análise de informações satelitais e dados convencionais da rede pluvio-fluviométrica como contribuição a modelagem hidrológica na região amazônica – Estudo de caso: bacia do rio Guamá – Pará**”, Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, 2008.

PEREIRA, M.V.F., PINTO, L.M.V.G., *Multi-stage Stochastic Optimization Applied to Energy Planning*, **Mathematical Programming** 52 p. 359-375, North Holland, 1991

PETTY, G. W. The Status of Satellite-Based Rainfall Estimation over Land. **Remote Sensing of Environment** 51, p. 125-137, 1995.

PINTO, Tales Dos Santos. "O apagão energético de 2001"; *Brasil Escola*, 2015. Disponível em: <<http://www.brasilecola.com/historiab/apagao.htm>>. Acessado em: 16 novembro de 2015.

QUADRO, M. F. L. **Estudo de episódios de zonas de convergência do Atlântico Sul (ZCAS) sobre a América do Sul**. 124 p. (INPE-6341-TDI/593). Dissertação de Mestrado em Meteorologia pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 1994.

RAMAGE, K.; JOBARD, I.; LEBEL, T.; DESBOIS, M. Satellite estimation of 1-day to 10-day cumulated precipitation: comparison and validation over tropical Africa of TRMM, METEOSAT and GPCP products. **The 2003 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference**, Weimar, Alemanha, 2003.

RAMILLIEN, G., J. S. FAMIGLIETTI, and J. WAHR, Detection of continental hydrology and glaciology signals from GRACE: a review, **Surv. Geophys.**, 29, 361–374, 2008. doi:10.1007/s10712-008-9048-9.

ROBERTSON, A. W., C. R. MECHOSO, 2000. Interannual and interdecadal variability of the South Atlantic convergence zone. **Mon. Wea. Rev.**, 128, 2947–2957.

ROCHA, C. E. D. "**Monitoramento *in situ* do fluxo de dióxido de carbono em reservatórios hidrelétricos no Brasil: o caso da APM Manso**", Tese de Doutorado, Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, 2009.

ROCHA, A. M. G. C.; GANDU A. W. A Zona de Convergência do Atlântico Sul. **Climanálise Especial** Nº 16 – 1996

SATYAMURTY, P., V.B. RAO. Zona de Convergência do Atlântico Sul. **Climanálise**, 3 (3), 31-35, 1988.

SCHMIDT, R., S. PETROVIC, A. GUENTNER, F. BARTHELMES, J. WUENSCH, and J. KUSCHE, Periodic components of water storage changes from GRACE and global hydrology models, **J. Geophys. Res.**, 113, B08419, 2008. doi:10.1029/2007JB005363.

SEABRA, M. S. **Estudo sobre a Influência da Zona de Convergência do Atlântico Sul em Bacias Hidrográficas nas Regiões Sudeste e Centro-Oeste do Brasil**, Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, 2004.

SEO, K.-W., D. E. WALISER, B. J. TIAN, J. FAMILGIETTI, and T. SYED. Evaluation of global land-to-ocean fresh water discharge and evapotranspiration using space-based observations. **J. Hydrol.**, 373, 508-515, 2009.

SOUSA, T. C. **Análise intrassazonal de influências atmosféricas remotas associada ao evento de precipitação intensa no estado de Santa Catarina em novembro de 2008**, Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, 2013.

STRETEN, N. A., Some Characteristics of Satellite-Observed Bands Of Persistent Cloudiness Over the Southern Hemisphere. **Mon. Wea. Rev.**, 101, 486–495. 1973.
doi: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(1973\)101<0486:SCOSBO>2.3.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1973)101<0486:SCOSBO>2.3.CO;2).

Souza EB, Ambrizzi T. Modulation of intraseasonal rainfall over tropical Brazil by the Madden–Julian Oscillation. **International Journal of Climatology** 26: 1759–1776. 2006.

TEIXEIRA, F. V. B., Tanajura, C. A. S.; Toledo, E. M. An investigation of the SACZ with extended simulations of the atmospheric model RAMS. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 17, n. 1, p. 2002, Jun. 2002.

TUCCI, C.E.M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. EDUSP, Editora da UFRGS, ABRH, 952p. Plano Diretor de Drenagem Urbana da Região Metropolitana de Curitiba - 1993

TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission). Disponível em: http://trmm.gsfc.nasa.gov/data_dir/data.html>. Acessado em: 02/01/2013

WILHEIT, T. T. Some Comments on Passive Microwave Measurement of Rain . **Bulletin of the American Meteorological Society**, vol. 67, nº 10, 1986.

XAVIER, L. N. R. **“Modelagem hidrológica com o aporte de dados da missão espacial GRACE: aplicação a bacias brasileiras**, Tese de Doutorado, Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, 2012.

WILKS, D.S., **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**. New York: Elsevier, 630p. 2006

ANEXO A - Script Shell usado para obter os dados do TRMM

```
#!/bin/sh

# Script para baixar os dados do TRMM binario

#ftp://disc2.nascom.nasa.gov/ftp/data/s4pa//TRMM_L3/TRMM_3B42_daily/2000/001/
3B42_daily.2000.01.02.7.bin

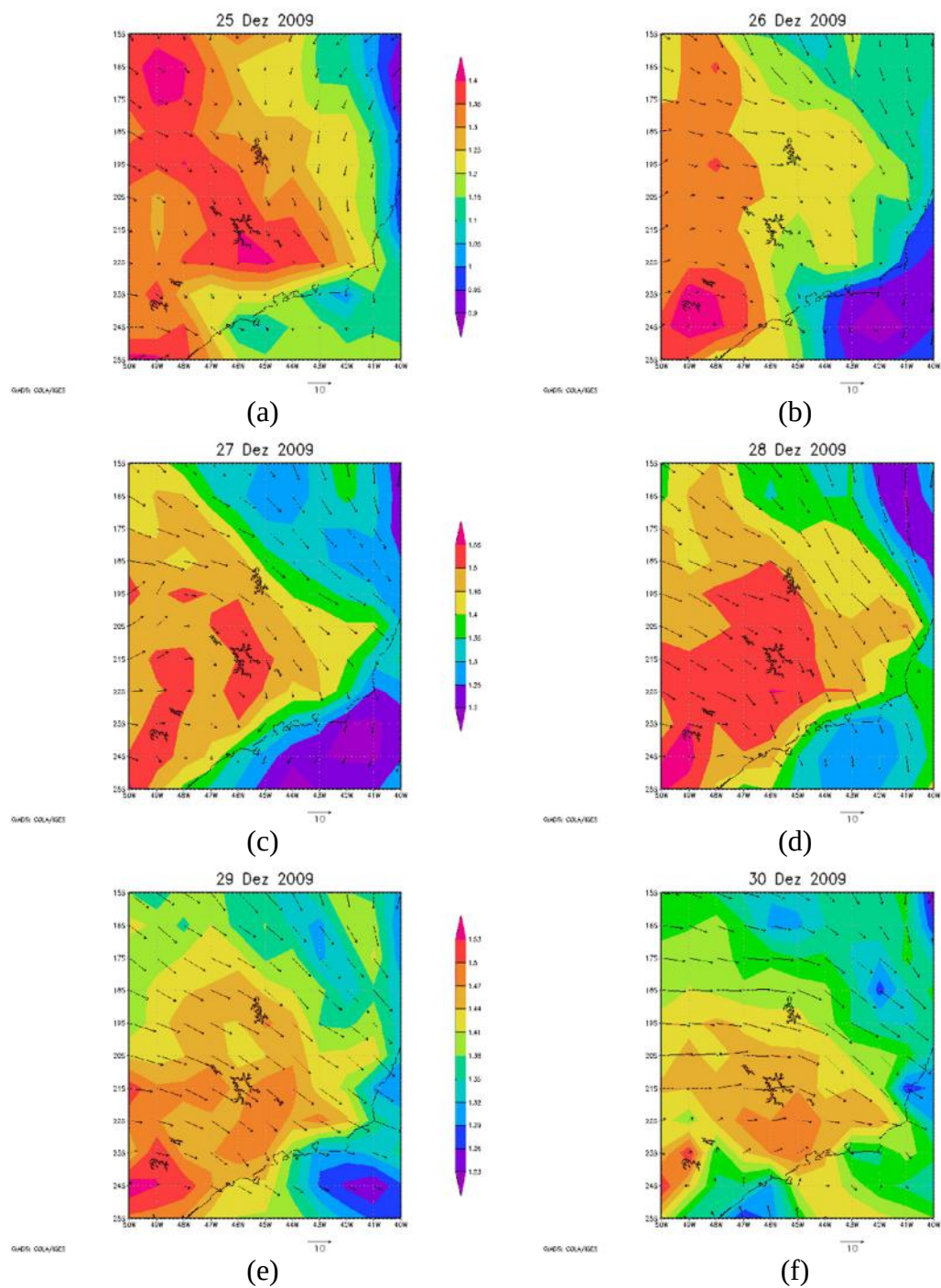
WORK="/home/andre/mestrado/TRMM"
cd $WORK

url_base="disc2.nascom.nasa.gov/ftp/data/s4pa//TRMM_L3/TRMM_3B42_daily/"
#max_i=6200`
for i in `seq -f "%03g" 1 6200`
do
    ii=`expr ${i} \- 1`
    j=`seq -f "%03g" $ii $ii`
    echo "-----"
    datac=`date -d "2005-11-28 00:00:00 UTC +${i} day" +"%Y%m%d"`
    dataj=`date -d "2005-11-28 00:00:00 UTC +${ii} day" +"%j"`
    aa=`echo $datac | cut -c1-4`
    mm=`echo $datac | cut -c5-6`
    dd=`echo $datac | cut -c7-8`
    echo "Downloading data... "$datac" "$dd" "$mm" "$aa
    echo "Downloading data... "$dataj" "$dd" "$mm" "$aa
    echo
    file_name="3B42_daily."${aa}}.${mm}.${dd}.7.bin"
    url_name=${aa}/${dataj}/${file_name}
    wget ftp://${url_base}${url_name}
    echo -n "Storing... "
    /bin/mv -fv ${file_name} data_binario/TRMM_3B42_"$aa$mm$dd".bin
    echo "OK"
    echo "-----"
    echo
    echo
    sleep 2
done
```

ANEXO B - Umidade específica e vento em 850 hPa

Neste anexo, são mostrados, a título ilustrativo, dados diários de vento (direção e intensidade) e umidade específica para o episódio 02 do Caso 01, que se estendeu de 25 de dezembro de 2009 a 3 de janeiro de 2010.

Caso 1 – Episódio 02



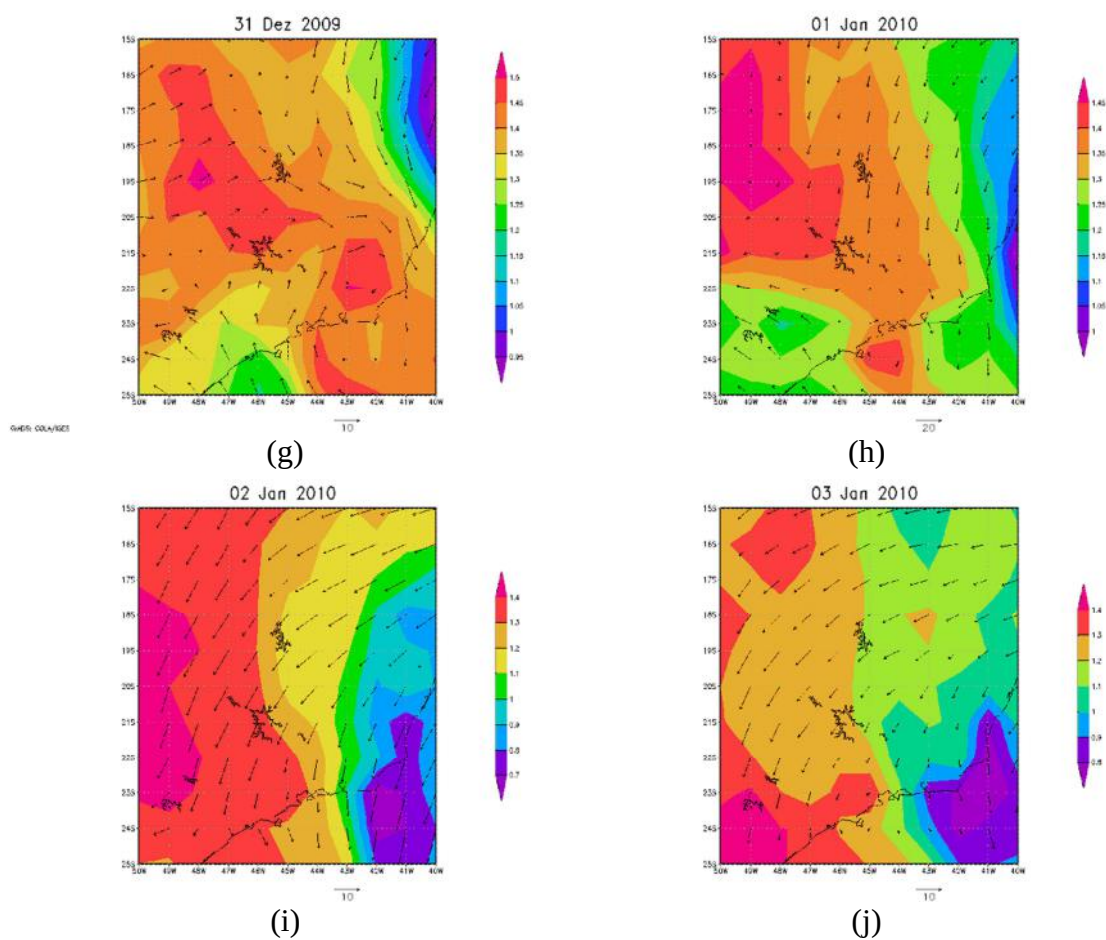


Figura B.1 - Dados diários de umidade específica do ar versus vento durante os dias de 25 de dezembro de 2009 a 3 de janeiro de 2010.

Caso 1 – Episódio 05

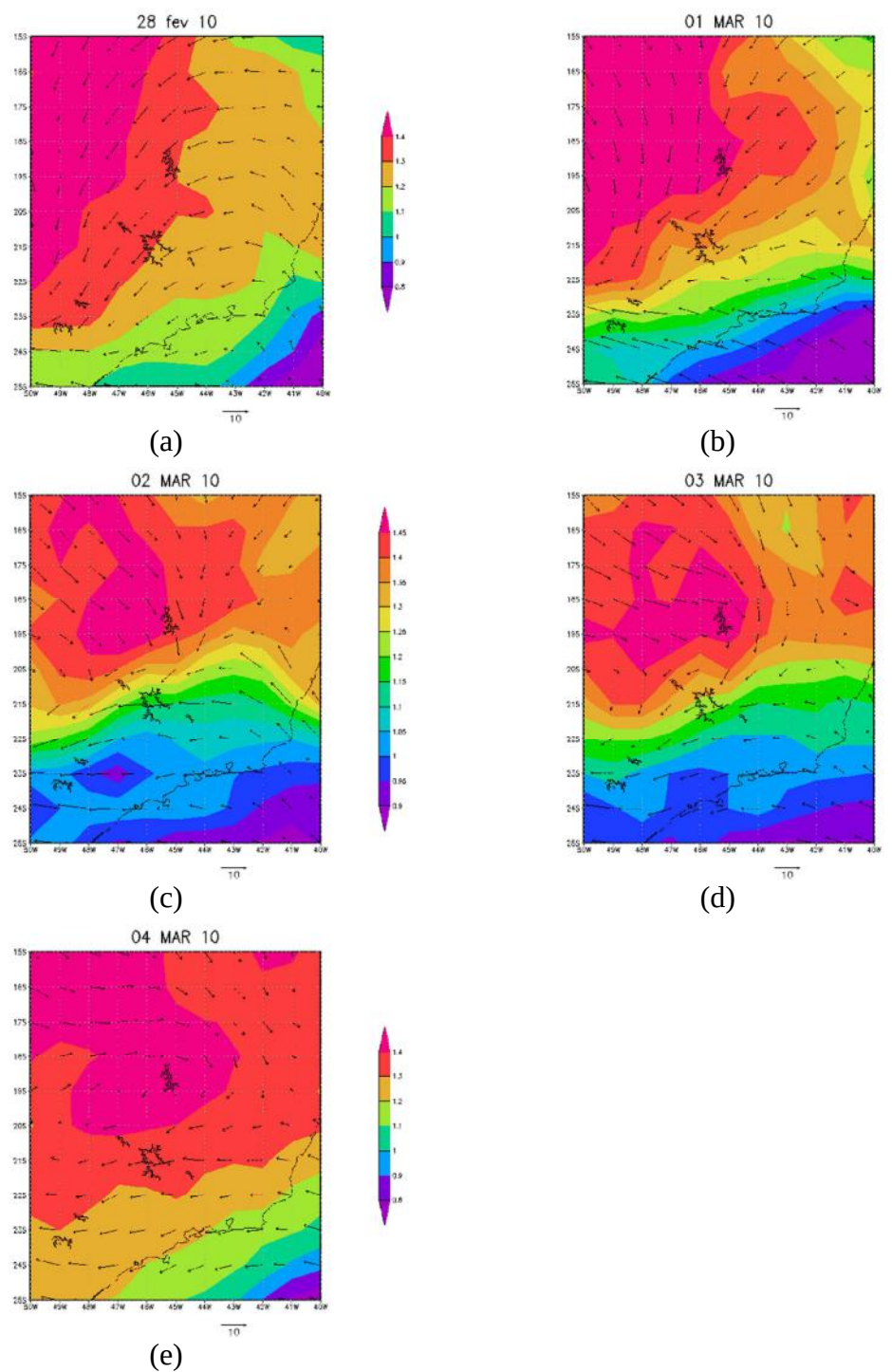
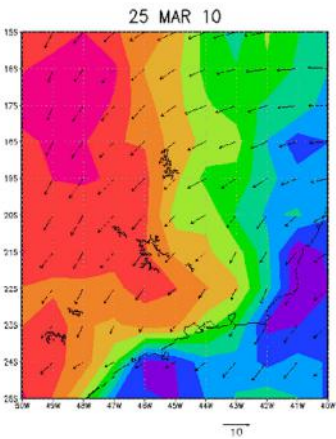
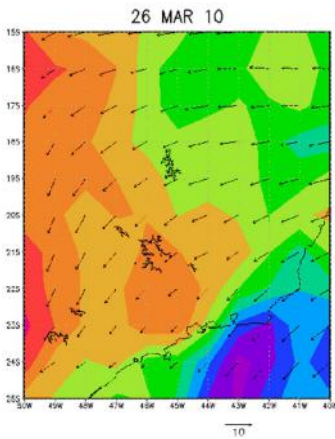


Figura B.2 - Dados diários de umidade específica do ar versus vento durante os dias de 28 de fevereiro de 2010 a 04 de março de 2010.

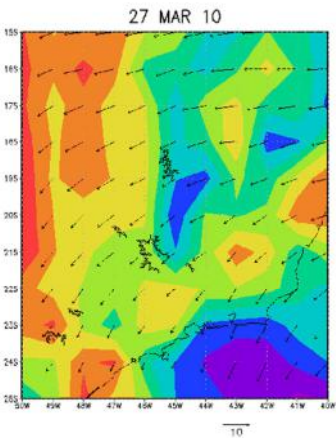
Caso 1 – Episódio 07



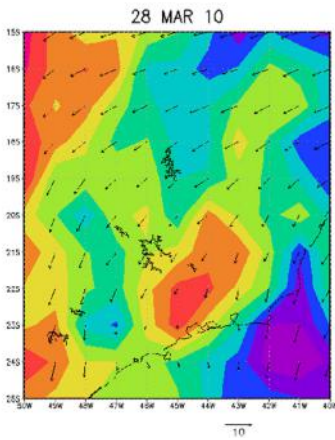
(a)



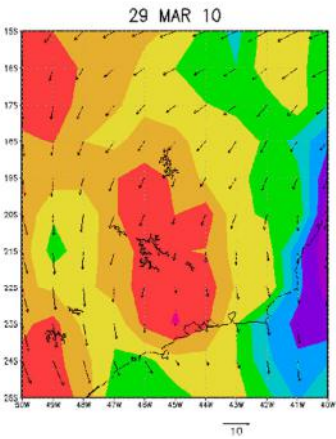
(b)



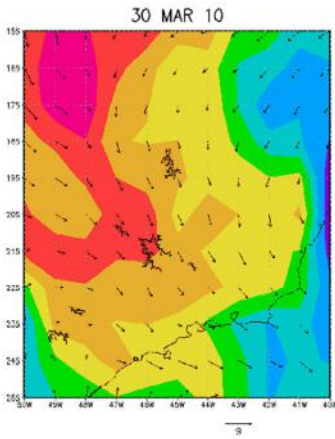
(c)



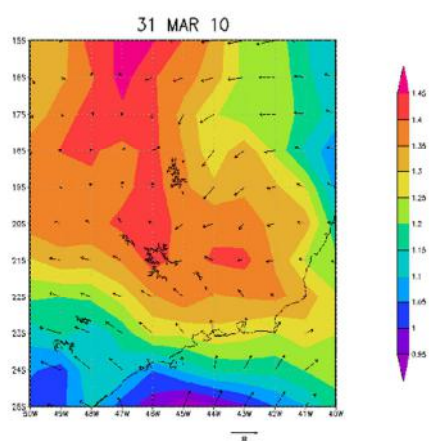
(d)



(e)



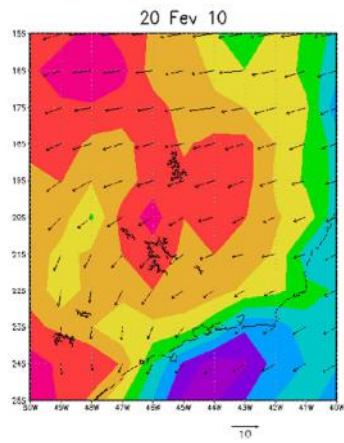
(f)



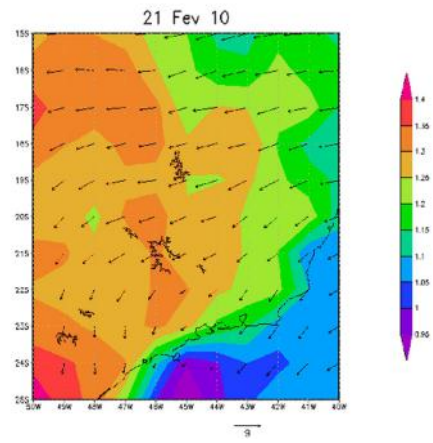
(g)

Figura B.3 - Dados diários de umidade específica do ar versus vento durante os dias de 25 de março de 2010 a 30 de março de 2010.

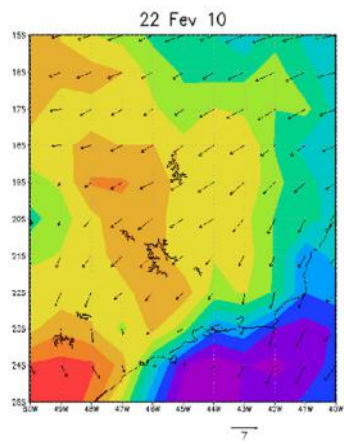
Caso 1 – Episodio Adicional



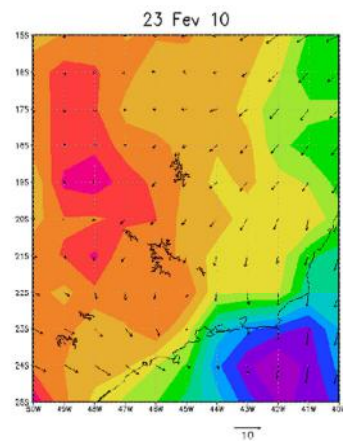
(a)



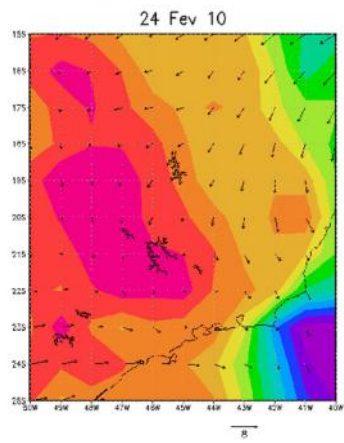
(b)



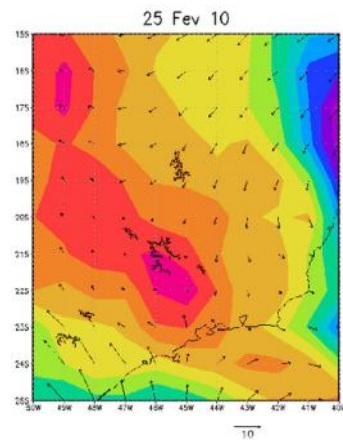
(c)



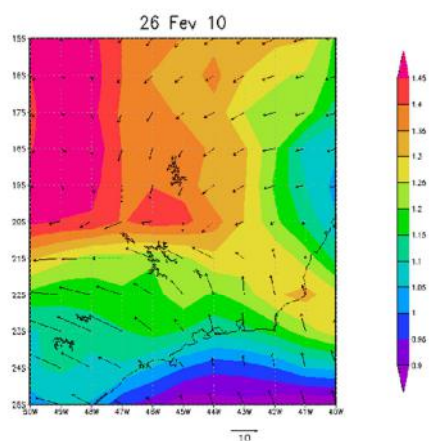
(d)



(e)



(f)



(g)

Figura B.4 - Dados diários de umidade específica do ar versus vento durante os dias de 20 de fevereiro de 2010 a 26 de fevereiro de 2010.