

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/05.27.03.41-TDI

# ESTIMATIVA DE REFLETIVIDADE PARA PREENCHIMENTO DE BLOQUEIO DE VISADA DE RADAR METEOROLÓGICO UTILIZANDO DADOS DE DESCARGAS ELÉTRICAS ATMOSFÉRICAS

Marcos Lima Rodrigues

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Computação Aplicada, orientada pelos Drs. Stephan Stephany, e Carlos Frederico de Angelis, aprovada em 05 de junho de 2018.

URL do documento original: <http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3R74P35>

> INPE São José dos Campos 2018

#### **PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE Gabinete do Diretor (GBDIR) Serviço de Informação e Documentação (SESID) CEP 12.227-010 São José dos Campos - SP - Brasil Tel.:(012) 3208-6923/7348 E-mail: pubtc@inpe.br

## COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):

#### Presidente:

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CGCPT)

#### Membros:

Dra. Carina Barros Mello - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Alisson Dal Lago - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA)

Dr. Evandro Albiach Branco - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial (CGETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra (CGOBT)

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação - (CPG)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

### **BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

### **REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SESID) EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SESID) Murilo Luiz Silva Gino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/05.27.03.41-TDI

# ESTIMATIVA DE REFLETIVIDADE PARA PREENCHIMENTO DE BLOQUEIO DE VISADA DE RADAR METEOROLÓGICO UTILIZANDO DADOS DE DESCARGAS ELÉTRICAS ATMOSFÉRICAS

Marcos Lima Rodrigues

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Computação Aplicada, orientada pelos Drs. Stephan Stephany, e Carlos Frederico de Angelis, aprovada em 05 de junho de 2018.

URL do documento original: <http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3R74P35>

> INPE São José dos Campos 2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Rodrigues, Marcos Lima.

R618e Estimativa de refletividade para preenchimento de bloqueio de visada de radar meteorológico utilizando dados de descargas elétricas atmosféricas / Marcos Lima Rodrigues. – São José dos Campos : INPE, 2018.

xxxii + 175 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/05.27.03.41-TDI)

Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2018.

Orientadores : Drs. Stephan Stephany, e Carlos Frederico de Angelis.

1. Estimativa de refletividade. 2. Descargas elétricas atmosféricas. 3. Bloqueio em radar meteorológico. 4. Mineração de dados. I.Título.

 ${\rm CDU}\ 004.62{:}551.594.22$ 



Esta obra foi licenciada sob uma Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License.

Aluno (a): Marcos Lima Rodrigues

Título: "ESTIMATIVA DE REFLETIVIDADE PARA PREENCHIMENTO DE BLOQUEIO DE VISADA DE RADAR METEOROLÓGICO UTILIZANDO DADOS DE DESCARGAS ELÉTRICAS ATMOSFÉRICAS".

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

Computação Aplicada

Dr. **Alan James Peixoto Calheiros** 

Presidente (INPE / São José dos Campos - SP

( ) Participação por Video - Conferência

Dr. Stephan Stephany

K Aprovado () Reprovado

Orlentador(a) / INPE / SJCampos - SP

( ) Participação por Video - Conferência

(K) Aprovado () Reprovado

Dr. Carlos Frederico de Angelis

Orientador(a) / CEMADEN / Cachoeira Paulista - SP

( ) Participação por Video - Conferência

() Aprovado () Reprovado

Dra. Sandra Aparecida Sandri

Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP ( ) Participação por Video - Conferência

(x) Aprovado () Reprovado

Dr. Wagner Flauber Araújo Lima

Convidado(a) / CEMADEN / Cachoeira Paulista - SP

( ) Participação por Video - Conferência

() Aprovado () Reprovado

Este trabalho foi aprovado por:

() maloria simples

() unanimidade

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

Computação Aplicada

Convidado(a) / CEMADEN / Cachoeira Paulista - SP

( ) Participação por Video - Conferência

() Aprovado () Reprovado

Dr. Jojhy Sakuragi

Este trabalho foi aprovado por:

- () maioria simples
- () unanimidade

A meus pais **Nelson** e **Fátima** (in memoriam), à minha esposa **Cidinha** e toda minha **Família**.

#### AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me auxiliar em todos os momentos da minha vida e permitir experimentar as ações benéficas de teu amor pela intercessão de nossa Senhora Maria.

Aos meus orientadores, Dr. Stephan Stephany e Dr. Carlos Frederico de Angelis, pela dedicação, paciência e apoio ao longo deste trabalho.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE e ao Laboratório de Matemática e Computação Aplicada - LABAC, pela oportunidade de estudos, utilização de dados e instalações.

Ao Dr. João Victor Cal Garcia do Cemaden, que não mediu esforços em apoiar este trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro recebido durante dois anos de mestrado.

Ao Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais - Cemaden e ao Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC/INPE, pelo fornecimento dos dados de radares e descargas atmosféricas.

À secretaria da Pós-Graduação em Computação Aplicada, pela eficiência e dedicação.

Ao meu grande amigo Gerson e a sua esposa Talita por toda ajuda e apoio.

À minha família, pelo apoio e incentivo em todos os momentos.

Aos meus colegas e amigos do Curso de Computação Aplicada - CAP, em especial aos meus amigos de sala: Amita, Barbara, Gabriel, Juliana, Rhuan e Vander, por toda ajuda e companheirismo.

Ao meu grande amigo Luiz Ricardo, por toda ajuda e incentivo nos desafios enfrentados durante essa jornada.

Agradecimento especial a Cidinha, que é uma benção de Deus na minha vida, pelo apoio, amor, paciência e carinho.

#### RESUMO

A estimativa da taxa de precipitação (R) por radar meteorológico é uma ferramenta essencial no monitoramento do tempo e na previsão meteorológica de curtíssimo prazo. Sua obtenção é realizada a partir da refletividade Z medida pelo radar, que corresponde à energia refletida pelos hidrometeoros, e adotando-se uma relação Z-R conveniente. Particularmente, a refletividade medida pode apresentar inconsistências devido ao bloqueio do feixe de micro-ondas do radar por obstáculos naturais ou artificiais. Existem atualmente técnicas para identificação e correção da refletividade nas zonas cegas devido a bloqueios, as quais são baseadas na interpolação de medidas de refletividade em diversas elevações e azimutes do mesmo radar ou utilizam a sobreposição da varredura de outros radares. Entretanto, nem sempre há alguma sobreposição ou o bloqueio é de grau elevado, impossibilitando a interpolação. Este trabalho propõe métodos alternativos para identificação e correção de problemas devidos a bloqueios da visada de radares. A identificação visa explorar a assinatura que os bloqueios deixam nas imagens de refletividade acumulada, utilizando analise estatística para identificação de azimutes com valores mínimos de acumulados. Já o tratamento das áreas identificadas com subestimativa de refletividade é realizado com o preenchimento dessas falhas com estimativas obtidas a partir de dados de descargas elétricas atmosféricas, através de um fator que correlaciona o registro de densidade de descarga a refletividade medida pelo radar em áreas não afetadas. Foram utilizados nesse estudo dados dos radares de Almenara(MG). Jaraguari (MT) e Santa Teresa (ES). Bem como registros de descargas atmosféricas feitos pelas redes BrasilDAT e RINDAT referentes aos anos de 2014 a 2016. A identificação de bloqueios foi avaliada através da comparação com um método que identifica bloqueios baseado em Modelo Digital de Elevação (MDE), já as estimativas de refletividade com o fator IZLR foram comparadas às medidas realizadas pelo radar em áreas não afetadas. O método proposto para identificação de bloqueios apresentou desempenho superior se comparado ao método com MDE, pois permitiu identificar todos os azimutes com obstrução por relevo acima de 20% além de identificar outras áreas nos radares de Jaraguari e Santa Teresa não decorrentes da interação com o relevo. Em relação à estimativa de refletividade/precipitação, o IZLR apresentou melhor desempenho utilizando dados de descarga da rede BrasilDAT, obtendo correlação média dada pelo Matthews Correlation Coefficient (MCC) no intervalo (0,28 - 0,62), viés de (0.83 - 0.97), RMSE (3.69 - 18.09) e coeficiente de correlação de Pearson (0.50)-0.71) enquanto que a RINDAT apresentou MCC no intervalo (0.02 - 0.62), viés de (0,24 - 1,18), RMSE (4,20 - 14,25) e coeficiente de correlação de Pearson (0,01)- 0,62). Os campos obtidos com IZLR apresentaram boa capacidade para o preenchimento de falhas graves como a que ocorre na região Noroeste do radar de Santa Teresa, embora sua acurácia e sua distribuição espacial sejam diretamente influenciadas pela disponibilidade de registro de ocorrência de descargas nas áreas afetadas e não afetadas do radar.

Palavras-chave: Estimativa de Refletividade. Descargas Elétricas Atmosféricas. Bloqueio em Radar Meteorológico. Mineração de Dados.

#### REFLECTIVITY ESTIMATION FOR GAP-FILLING OF WEATHER RADAR BEAM BLOCKAGE USING LIGHTNING DATA

#### ABSTRACT

The estimation of rainfall rate (R) by weather radar is an essential tool for weather monitoring and nowcasting. It is obtained from the reflectivity (Z) measured by the radar, which corresponds to the energy that is backscattered by hydrometeors, and adopting a suitable Z-R relationship. Particularly, reflectivity values may present inconsistencies due to weather radar beam blockage by natural or artificial obstacles. A number of techniques for identification and correction of reflectivity in such blind zones subjected to blockage have been proposed, which are based in the interpolation of reflectivity measures for different elevations and azimuths of the same radar or employ the superposition of scans of different radars. However, there is not such superposition or interpolation may not be possible for a larger blockage. This work proposed an alternative methodology for the identification and correction of radar beam blockage. The identification aims to explore the signature that such blockages leave in the images of accumulated reflectivity, using statistical analysis to identify azimuths with minimum accumulated values. On the other hand, the treatment of the identified areas with reflectivity underestimation is accomplished by filling these faults with estimates obtained from data of atmospheric electric discharges, through a factor that correlates the flash density with reflectivity of weather radar in unaffected areas. This study used data from the Almenara (MG), Jaraguari (MT) and Santa Teresa (ES) weather radars. As well as lightning data made by the networks BrasilDAT and RINDAT for the years 2014 to 2016. The identification of beam blockages was evaluated by comparison with a method that identifies beam blockages based on Digital Elevation Model (DEM), already the estimates of reflectivity with the IZLR factor were compared to radar measurements in non-affected areas. The proposed method for beam blockage identification presented superior performance when compared to the MDE method, since it allowed to identify all azimuths with beam blockage fraction above 20% and to identify other areas in the Jaraguari and Santa Teresa radars that did not result from the interaction with the topography. In relation to the reflectivity/precipitation estimation, the IZLR presented better performance using BrasilDAT network lightning data, obtaining a mean correlation given by Matthews Correlation Coefficient (MCC) in the range (0.28 - 0.62), bias (0.83 - 0.97), RMSE (3.69 - 18.09) and Pearson correlation coefficient (0.50 - 0.71) whereas RINDAT showed MCC in the range (0.02 - 0.62), bias of (0.24 - 1.18), RMSE (4.20 - 14.25) and Pearson correlation coefficient (0.01 - 0.62). The fields obtained with IZLR showed good capacity to fill big blind areas such as that occurring in the Northwest region of the Santa Teresa weather radar, although its accuracy and spatial distribution are directly influenced by the availability of record of occurrence of discharges in the affected and not affected areas of radar.

Keywords: Reflectivity estimation. Atmospheric Electric Discharge. Weather Radar Beam Blockage. Data Mining.

### LISTA DE FIGURAS

2.1	Mapas da distribuição espacial de precipitação acumulada (mm de chuva)	
	para um período de 12 horas sobre parte da Itália na data de $02/07/2009$ .	12
2.2	Erro médio quadrático na estimativa pelo AMSU, em relação à presença	
	de descargas no campo de visada ( <i>Field Of View</i> (FOV))	13
2.3	Evolução temporal dos acumulados de 30 minutos de precipitação para	
	o mês de janeiro de 2010 para a área sob cobertura dos radares meteoro-	
	lógicos de Bauru e Presidente Prudente considerando-se os acumulados	
	dados pela função WRLR, pela razão RLR e por dados desses radares.	15
2.4	Distribuição espacial da precipitação considerando-se um acumulado de	
	$30\ {\rm minutos}\ {\rm durante}\ {\rm uma}\ {\rm tempestade}\ {\rm em}\ 20\ {\rm de}\ {\rm janeiro}\ {\rm de}\ 2010,\ {\rm dada}\ {\rm pelo}$	
	radar de Bauru (esquerda), pelo software EDDA-Chuva (EDDA/WRLR,	
	centro) e pela razão RLR e pelo modelo de Tapia (direita). $\ldots$ .	15
3.1	Recepção pelo radar de ecos de resposta de alvos próximos e distantes	
	no tempo	18
3.2	Resolução angular do radar.	19
3.3	Gráfico do espectro eletromagnético desde ondas de rádio até raios gama,	
	onde as áreas brancas definem as janelas atmosféricas	19
3.4	Esquema que ilustra a propagação simultânea do feixe de micro-ondas	
	de dupla polarização (H-V)	21
3.5	Rede de radares instalados ou em instalação no Brasil	22
3.6	Ilustração de um $bin$ específico na direção radial do feixe do radar para	
	ângulos de elevação e azimute determinados	23
3.7	Ilustração da varredura realizada com ângulo de elevação fixo (PPI), sua	
	projeção no plano horizontal e o dado volumétrico bruto correspondente	
	a varreduras em várias elevações. Considerando-se um plano horizontal	
	fixo com determinada altitude, pode-se ter uma imagem CAPPI, que	
	corresponde aos valores de refletividade dos <i>bins</i> interceptados pelo plano.	24
3.8	Ecos de terreno causados por lóbulos secundários do feixe do radar	25
3.9	Imagens PPI da primeira elevação $(0, 3^{\circ})$ e CAPPI 3 km do radar de	
0.10	Jaraguari, correspondentes à varredura das 14h UTC de 7 set. 2014	26
3.10	nustração da estrutura de uma nuvem de tempestade eletrica tripolo	0.0
0 1 1	baseada em medidas no local por Simpson et al. (apud WILLIAMS, 1989).	28
3.11	Ulassificação dos tipos de descargas no solo.	29

3.12	Classificação dos tipos de descarga na nuvem.	30
3.13	Ilustração do método de tempo de chegada.	30
3.14	Processo de Interferometria	31
3.15	Distribuição geográfica dos sensores da RINDAT	32
3.16	Distribuição geográfica dos sensores da BrasilDAT	33
3.17	Eficiência de detecção para rede BrasilDAT com referência aos dados de	
	2013 do sensor LIS	34
3.18	Eficiência de detecção estimada para rede BrasilDAT através do modelo	
	relativo (RMED4) proposto por Naccarato et al. (2014)	35
3.19	Distribuição mensal de descargas atmosféricas nas áreas dos radares do	
	Cemaden do conjunto de dados disponíveis para as redes RINDAT (a) e	
	BrasilDAT (b).	36
3.20	Localização dos radares utilizados na pesquisa, o círculo delimita o al-	
	cance de 250 km.	37
3.21	Caracterização de bloqueios (elipses em preto) no radar de Jaraguari	
	utilizando imagens PPI de Refletividade $(Z)$ , Refletividade diferencial	
	$(ZDR)$ , Diferencial de fase $(\phi_{DP})$ e Diferencial de fase específica $(K_{DP})$	
	correspondentes à varredura das 19h UTC de 7 set. 2014	39
3.22	Caracterização de bloqueios (elipses em preto) no radar de Santa Teresa	
	utilizando imagens PPI de Refletividade $(Z)$ , Refletividade diferencial	
	$(ZDR)$ , Diferencial de fase $(\phi_{DP})$ e Diferencial de fase específica $(K_{DP})$	
	correspondentes à varredura das 01h UTC de 7 fev. 2015	40
3.23	Caracterização de bloqueios (elipses em preto) no radar de Almenara	
	utilizando imagens PPI de Refletividade $(Z)$ , Refletividade diferencial	
	$(ZDR)$ , Diferencial de fase $(\phi_{DP})$ e Diferencial de fase específica $(K_{DP})$	
	correspondentes à varredura das 00h UTC de 7 fev. 2015	41
3.24	Campo de precipitação acumulada nos radares de Santa Teresa e Alme-	
	nara (1 a 6 fev. 2015) e delimitação das áreas afetadas por bloqueios. $\dots$	42
3.25	Distribuição mensal do número de varreduras completas durante o pe-	
	ríodo de estudo para os radares AN1, JG1 e ST1 do Cemaden	43
11	Tabela de contingância para sumarização dos eventos categorizados	46
4 2	Exemplo da classificação dos campos de acumulados de precipitação ob-	40
1.2	tidos para o período das 16h de 26 nov. 2015 às 0h de 27 nov. 2015, a	
	partir das medidas de refletividade do radar de Almenara e estimadas	
	com IZLB	50
		50

4.3	Refletividade acumulada PPIs da primeira elevação $(0,3 \text{ graus})$ do radar
	de Jaraguari (a) somados para o período de abril/2014 a setembro/2015 a
	cada 10 minutos. Os bloque ios correspondem às linhas horizontais carac
	terizadas por valores baixos de acumulado em relação às linhas vizinhas.
	Detalhe da região possivelmente afetada por eco de terreno (b), devido
	alta refletividade apresentada (> 80 dBZ) e geometria uniforme

53

55

56

- 4.5 Gráfico da refletividade acumulada em função do azimute com resolução azimutal de 1 grau para o radar de Jaraguari no período de abril/2014 a setembro/2015. O valor de refletividade acumulada para cada azimute (pontos azuis) considera apenas *bins* com distância radial de 20 a 200 km de forma a remover *outliers*. Pode-se observar que aparecem 5 faixas de obstrução e suas vizinhanças azimutais que foram agregadas (pontos vermelhos) correspondentes aos bloqueios.

4.9	Gráfico da refletividade acumulada em função do azimute com resolução	
	azimutal de 1 grau para o radar de Almenara no período de novem-	
	bro/2014 a janeiro/2016. O valor de refletividade acumulada para cada	
	azimute (pontos azuis) considera apenas <i>bins</i> com distância radial de 20	
	a 200 km de forma a remover <i>outliers</i> . Pode-se observar que aparecem	
	5 faixas de obstrução e suas vizinhanças azimutais que foram agregadas	
	(pontos vermelhos) correspondentes aos bloqueios	60
4 10	Etapas da identificação de bloqueios pelo método estatístico	61
4.11	Esquema utilizado para definir a função de interceptação proposta por	01
1.11	Bech et al. (2003)	62
4 12	Informação de elevação do SBTM 30 m para área do radar de Almenara	02
1.12	com <i>voids</i> identificados em vermelho (a) e resultado do preenchimento	
	dos voids a partir da amostragem do SBTM 90 m. utilizando SAGA-GIS	
	(b)	63
4 13	Informação de elevação do SRTM 30 m para área do radar de Santa	00
1.10	Teresa-ES com <i>voids</i> identificados em vermelho (a) e resultado do preen-	
	chimento dos <i>voids</i> a partir da amostragem do SBTM 90 m. utilizando	
	SAGA-GIS (b)	64
<i>A</i> 1 <i>A</i>	Fração de bloqueio do feixe para o radar de Almenara utilizando a abor-	04
1.11	dagom de Boch et al. (2003): (a) Distribuição angular sobrenesta ao mana	
	topográfico da área sob alcance do radar: (b) histograma sobreposta ao inapa	
	ilustração do propagação do feivo no agimuto 200° no qual o fração do	
	indstração da propagação do feixe no azimute 200 no quai a fração de blaqueia fai máxima $(00.08\%)$	66
1 15	Fração do bloqueio do feivo para o radar do Santa Taresa utilizando a	00
4.10	chardeger de Bech et el (2002); (a) Distribuição engular sobreposta es	
	abordagem de Bech et al. (2003). (a) Distribuição angular sobreposta ao $\frac{1}{2}$	
	mapa topogranco da area sob alcance do radar; (b) histograma sobreposto	
	pela ilustração da propagação do feixe no azimute 337° no qual a fração	00
4.10	de bloqueio foi maxima $(88,34\%)$ .	68
4.10	Fração de bloqueio do feixe para o radar de Jaraguari utilizando a abor-	
	dagem de Bech et al. (2003): (a) Distribuição angular sobreposta ao mapa	
	topográfico da área sob alcance do radar; (b) Histograma sobreposto pela	
	ilustração da propagação do feixe no azimute 342° no qual a fração de	
	bloqueio foi máxima $(0,78\%)$ .	69
4.17	Distribuição típica de cargas dentro de nuvens de tempestades, evidenci-	
	ando o processo de eletrificação por convecção devido a correntes ascen-	
	dentes (updraft) e descendentes (out updraft).	71

4.18	Gráfico da refletividade medida pelo radar de Jaraguari e o registros	
	de descargas atmosféricas pela rede BrasilDAT na área de alcance do	
	radar para o período selecionado para análise e teste da abordagem dia	
	7 set. 2014 das 14h às 21h UTC (a). Cálculo da correlação cruzada para	
	determinação do atraso entre o pico de refletividade medida pelo radar e	
	as descargas intranuvem (b) e descargas nuvem-solo (c).	73
4.19	Campos utilizados para o cálculo das métricas de correlação entre a re-	
	fletividade medida pelo radar e as descargas registradas pela rede Bra-	
	silDAT, evento de 7 set. 2014 varredura das 14h00min UTC	77
4.20	Comparação entre os resultados das métricas utilizando como critério de	
	parada o melhor valor de acurácia alcançada em relação à classificação	
	dos campos de refletividade e densidade de descarga para janelas tempo-	
	rais variáveis considerando dados do radar de Jaraguari e de descargas	
	registradas pela rede BrasilDAT, evento de 7 set. 2014	79
4.21	Gráfico com a distribuição temporal dos acumulados de refletividade (Ja-	
	raguari) e descargas atmosféricas (BrasilDAT), para área de alcance do	
	radar, assim como as janelas temporais para integração das descargas	
	determinadas através do processo de otimização para o evento de 7 set.	
	2014	82
4.22	Comparação entre os campos de refletividade medida pelo radar de Ja-	
	raguari (à esquerda) e o estimado utilizando IZLR baseado no campo de	
	densidade de descargas (BrasilDAT) suavizado com filtro Gaussiano (à	
	direita). Para pior caso (a), caso médio (b) e melhor caso (c) do evento	
	de 7 set. 2014. Os bloqueios identificados nesse radar estão desenhados $\hfill$	
	como setores angulares em vermelho	84
4.23	Classificação dos pixels do CAPPI do radar e do campo estimado com	
	IZLR com rótulos ausência $(0)$ ou presença $(1)$ de informação para toda	
	área de alcance do radar (a), para área de bloqueios simulados (b) da	
	imagem das 17h30min UTC de 7 set. 2014	86
4.24	Gráfico com as métricas calculadas para avaliação das estimativas rea-	
	lizadas utilizando IZLR e filtro Gaussiano com descargas atmosféricas	
	(BrasilDAT), para o radar de Jaraguari no evento de 7 set. 2014	87
51	Blaquoios identificados para o radar de Jaraguari, utilizando método de	
0.1	andias estatística (a) modela rem de propagação de feire de miero endes	
	a MDE proposto por Boch et al. (2002) (b)	01

5.2	Bloqueios identificados para o radar de Santa Teresa (a e b) e Almenara	
	(c e d), utilizando método de análise estatística (esquerda), modelagem	
	de propagação do feixe de micro-ondas e MDE proposto por Bech et al.	
	(2003) (direita).	93
5.3	Refletividade medida pelo radar de Jaraguari numa varredura específica	
	e a correspondente densidade de ocorrência de descargas elétricas a partir	
	de dados da rede BrasilDAT utilizados para o cálculo de correlação entre	
	refletividade e densidade de descargas.	95
5.4	Correção das áreas com bloqueios parciais identificados para o radar de	
	Jaraguari (setores angulares em preto), na varredura de 01h10min UTC	
	de 27 jan. 2015: (a) refletividade medida pelo radar (esquerda), refleti-	
	vidade estimada pelo fator IZLR a partir de dados de descargas da rede	
	BrasilDAT (direita) e (b) preenchimento das faixas de azimutes afetadas,	
	com a combinação da refletividade medida e estimada.	96
5.5	Evolução temporal da precipitação calculada a partir da conversão da	
	refletividade medida na área de cobertura do radar de Jaraguari no pe-	
	ríodo de 15/02/2015 15 h $\rm UTC$ até 15/02/2015 20 h $\rm UTC$ e do número de	
	descargas elétricas atmosféricas nessa área dados por ambas as redes de	
	detecção: (a) descargas NS, IN e totais (NS + IN) registradas pela rede	
	BrasilDAT e (b) descargas NS registradas pela rede RINDAT.	98
5.6	Evolução temporal da precipitação calculada a partir da conversão da	
	refletividade medida na área de cobertura do radar de Jaraguari no pe-	
	ríodo de 14/01/2015 5 h UTC até 14/01/2015 13 h UTC e do número de	
	descargas elétricas atmosféricas nessa área dados por ambas as redes de	
	detecção: (a) descargas NS, IN e totais (NS + IN) registradas pela rede	
	BrasilDAT e (b) descargas NS registradas pela rede RINDAT	99
5.7	Valores das métricas MCC, F-Score e variável (c) Support, calculadas	
	entre a refletividade medida pelo radar de Jaraguari e a estimada pelo	
	IZLR nas áreas de bloqueios simulados para o período de $15/02/2015$	
	15 h $\mathrm{UTC}$ até 15/02/2015 20 h $\mathrm{UTC},$ utilizando dados de descargas das	
	redes: (a) BrasilDAT e (b) RINDAT	101
5.8	Comparação do campo de refletividade medido pelo radar de Jaraguari	
	e estimado com IZLR para var redura das 15h50min UTC de 15 fev. 2015	
	utilizando dados da Brasil DAT (a) e 16h UTC de 15 fev. 2015 com dados	
	da RINDAT (b).	103

- Precipitação acumulada sobreposta pelos bloqueios identificados (setores 5.9angulares em preto) e simulados (setores angulares em cinza), obtida a partir da refletividade medida pelo radar de Jaraguari (a), estimada com IZLR (esquerda) e a diferença entre estimada e a medida (direita) para período de 15/02/2015 15h UTC até 15/02/2015 20h UTC, utilizando 5.10 Precipitação acumulada com detalhe em áreas sobrepostas pelos bloqueios identificados (setores angulares em preto) e simulados (setores angulares em cinza), obtida a partir da refletividade medida pelo radar de Jaraguari (a), estimada com IZLR (esquerda) e a diferença entre estimada e a medida (direita) para período de 15/02/2015 15h UTC até 15/02/2015 20h UTC, utilizando dados da BrasilDAT (b) e RINDAT (c). 106 5.11 Valores das métricas MCC, F-Score e variável (c) Support, calculadas entre a refletividade medida pelo radar de Jaraguari e a estimada pelo IZLR nas áreas de bloqueios simulados para o período de 14/01/201505h UTC até 14/01/2015 13h UTC, utilizando dados de descargas das 5.12 Precipitação acumulada sobreposta pelos bloqueios identificados (setores angulares em preto) e simulados (setores angulares em cinza), obtida a partir da refletividade medida pelo radar de Jaraguari (a), estimada com IZLR (esquerda) e a diferença entre estimada e a medida (direita) para período de 14/01/2015 05h UTC até 14/01/2015 13h UTC, utilizando 5.13 Precipitação acumulada com detalhe em áreas sobrepostas pelos bloqueios identificados (setores angulares em preto) e simulados (setores angulares em cinza), obtida a partir da refletividade medida pelo radar de Jaraguari (a), estimada com IZLR (esquerda) e a diferença entre estimada e a medida (direita) para período de 14/01/2015 05h UTC até 14/01/2015 13h UTC, utilizando dados da BrasilDAT (b) e RINDAT (c). 111 5.14 Distribuição do acumulado de precipitação para primeira quinzena de maio de 2015 (a), com detalhe para área sem cobertura dos radares ST1 ao Sul e AN1 ao Norte da bacia hidrográfica do rio São Mateus (MG) (b).112 5.15 Distribuição espacial dos registros de descargas tipo nuvem-solo obtida

- 5.16 Evolução temporal da precipitação calculada a partir da conversão da refletividade medida na área de cobertura do radar de Santa Teresa no período de 22/03/2015 16h UTC até 23/03/2015 01h UTC e do número de descargas elétricas atmosféricas nessa área dados por ambas as redes de detecção: (a) descargas NS, IN e totais (NS + IN) registradas pela rede BrasilDAT e (b) descargas NS registradas pela rede RINDAT. . . . 116
- 5.17 Evolução temporal da precipitação calculada a partir da conversão da refletividade medida na área de cobertura do radar de Santa Teresa no período de 07/12/2015 15h UTC até 08/12/2015 09h UTC e do número de descargas elétricas atmosféricas nessa área dados por ambas as redes de detecção: (a) descargas NS, IN e totais (NS + IN) registradas pela rede BrasilDAT e (b) descargas NS registradas pela rede RINDAT. . . . 117
- 5.19 Refletividade sobreposta pelos bloqueios identificados (setores angulares em preto) e simulados (setores angulares em cinza), medida pelo radar de Santa Teresa (esquerda) e estimada com IZLR (direita) correspondente a varredura das 19h UTC de 22 mar. 2015, utilizando dados da RINDAT. 119

5.22	Precipitação acumulada com detalhe para correção da área com bloqueio	
	identificado (setor angular em preto), obtida a partir da refletividade me-	
	dida pelo radar de Santa Teresa (a), estimada com IZLR (esquerda) e a di-	
	ferença entre estimada e a medida (direita) para o período de $22/03/2015$	
	16 h $\rm UTC$ até 23/03/2015 01 h $\rm UTC,$ utilizando dados da Brasil DAT (b)	
	e RINDAT (c).	. 124
5.23	Valores das métricas MCC, F-Score e variável (c) Support, calculadas	
	entre a refletividade medida pelo radar de Santa Teresa e a estimada pelo	
	IZLR nas áreas de bloqueios simulados para o período de $07/12/2015$ 15h	
	UTC até $08/12/2015$ 09h UTC, utilizando dados de descargas das redes:	
	(a) BrasilDAT e (b) RINDAT	. 126
5.24	Refletividade sobreposta pelos bloqueios simulados (setores angulares em	
	cinza), medida pelo radar de Santa Teresa (esquerda) e estimada com	
	IZLR (direita) para 22h10min UTC de 07 dez. 2015 utilizando dados da	
	BrasilDAT (a) e RINDAT (b)	. 127
5.25	Precipitação acumulada sobreposta pelos bloqueios identificados (setores	
	angulares em preto) e simulados (setores angulares em cinza), obtida a	
	partir da refletividade medida pelo radar de Santa Teresa (a), estimada	
	com IZLR (esquerda) e a diferença entre estimada e a medida (direita)	
	para o período de $07/12/2015$ 15 h UTC até $08/12/2015$ 09 h UTC, utili-	
	zando dados da Brasil DAT (b) e RINDAT (c)	. 129
5.26	Precipitação acumulada com detalhe da área sobreposta pelo bloqueio	
	identificado (setor angular em preto), obtida a partir da refletividade me-	
	dida pelo radar de Santa Teresa (a), estimada com IZLR (esquerda) e a di-	
	ferença entre estimada e a medida (direita) para o período de $07/12/2015$	
	15 h $\rm UTC$ até $08/12/2015$ 09 h $\rm UTC,$ utilizando dados da Brasil DAT (b)	
	e RINDAT (c)	. 131
5.27	Evolução temporal da precipitação calculada a partir da conversão da	
	refletividade medida na área de cobertura do radar de Almenara no pe-	
	ríodo de 21/11/2015 17 h UTC até 22/11/2015 05 h UTC e do número de	
	descargas elétricas atmosféricas nessa área dados por ambas as redes de	
	detecção: (a) descargas NS, IN e totais (NS $+$ IN) registradas pela rede	
	BrasilDAT e (b) descargas NS registradas pela rede RINDAT	. 135

5.28	Evolução temporal da precipitação calculada a partir da conversão da	
	refletividade medida na área de cobertura do radar de Almenara no pe-	
	ríodo de 26/11/2015 16 h UTC até 27/11/2015 00 h UTC e do número de	
	descargas elétricas atmosféricas nessa área dados por ambas as redes de	
	detecção: (a) descargas NS, IN e totais (NS $+$ IN) registradas pela rede	
	BrasilDAT e (b) descargas NS registradas pela rede RINDAT.	. 136
5.29	Valores das métricas MCC, F-Score e variável (c) Support, calculadas	
	entre a refletividade medida pelo radar de Almenara e a estimada pelo	
	IZLR nas áreas de bloqueios simulados para o período de $21/11/2015$	
	17h UTC até $22/11/2015$ 05h UTC, utilizando dados de descargas das	
	redes: (a) BrasilDAT e (b) RINDAT.	. 137
5.30	Refletividade sobreposta pelos bloqueios simulados (setores angulares em	
	cinza), medida pelo radar de Almenara (esquerda) e estimada com IZLR	
	(direita) para o horário das 23h40min UTC de 21 nov. 2015 utilizando	
	dados da BrasilDAT (a) e horário 21h10min UTC de 21 nov. 2015 com	
	dados da RINDAT (b)	. 139
5.31	Precipitação acumulada sobreposta pelos bloqueios identificados (setores	
	angulares em preto) e simulados (setores angulares em cinza), obtida a	
	partir da refletividade medida pelo radar de Almenara (a), estimada com	
	IZLR (esquerda) e a diferença entre estimada e a medida (direita) para	
	o período de 21/11/2015 17 h $\mathrm{UTC}$ até 22/11/2015 05 h $\mathrm{UTC},$ utilizando	
	dados da BrasilDAT (b) e RINDAT (c).	. 141
5.32	Precipitação acumulada com detalhe para correção da área com bloqueio	
	identificado (setor angular em preto), obtida a partir da refletividade me-	
	dida pelo radar de Almenara (a), estimada com IZLR (esquerda) e a dife-	
	rença entre estimada e a medida (direita) para o período de $21/11/2015$	
	17 h $\rm UTC$ até 22/11/2015 05 h $\rm UTC,$ utilizando dados da Brasil DAT (b)	
	e RINDAT (c).	. 143
5.33	Valores das métricas MCC, F-Score e variável (c) Support, calculadas	
	entre a refletividade medida pelo radar de Almenara e a estimada pelo	
	IZLR nas áreas de bloqueios simulados para o período de $26/11/2015$	
	16 h $\rm UTC$ até $27/11/2015$ 00 h $\rm UTC,$ utilizando dados de descargas das	
	redes: (a) BrasilDAT e (b) RINDAT	. 146
5.34	Refletividade sobreposta pelos bloqueios simulados (setores angulares em	
	cinza), medida pelo radar de Almenara (esquerda) e estimada com IZLR	
	(direita) para o horário das 17 h20min UTC de 26 nov. 2015 utilizando	
	dados da Brasil DAT (a) e horário 17 h00min UTC de 26 nov. 2015 com	
	dados da RINDAT (b)	. 148

- 5.35 Precipitação acumulada sobreposta pelos bloqueios identificados (setores angulares em preto) e simulados (setores angulares em cinza), obtida a partir da refletividade medida pelo radar de Almenara (a), estimada com IZLR (esquerda) e a diferença entre estimada e a medida (direita) para o período de 26/11/2015 16h UTC até 27/11/2015 00h UTC, utilizando dados da BrasilDAT (b) e RINDAT (c).
- 5.36 Precipitação acumulada com detalhe em áreas sobrepostas pelos bloqueios identificados (setores angulares em preto) e simulados (setores angulares em cinza), obtida a partir da refletividade medida pelo radar de Almenara (a), estimada com IZLR (esquerda) e a diferença entre estimada e a medida (direita) para o período de 26/11/2015 16h UTC até 27/11/2015 00h UTC, utilizando dados da BrasilDAT (b) e RINDAT (c). 152

### LISTA DE TABELAS

$3.1 \\ 3.2$	Bandas utilizadas por sistemas de radar	20 37
4.1	Descrição do período de dados utilizado para análise e detecção de blo-	
4.2	queios	54 78
5.1	Identificação de bloqueios pelo método estatístico e abordagem de Bech et al. (2003) considerando valores de fração de bloqueio do feixe (BBF)	
5.2	acima de 20% Correlação média calculada com a métrica MCC entre a refletividade medida pelo radar e a estimada com IZLR para os períodos de testes	90
	selecionados para os setores angulares correspondentes à simulação de bloqueios no radar de Jaraguari, considerando-se dados de descargas das	
5.3	redes BrasilDAT e RINDAT	97
	medida pelo radar e a estimada com IZLR para os períodos de testes selecionados para os setores angulares correspondentes à simulação de bloqueios no radar de Santa Teresa, considerando-se dados de descargas	
5.4	das redes BrasilDAT e RINDAT	114
5.5	que possui descargas registradas pela rede BrasilDAT	115
	medida pelo radar e a estimada com IZLR para os períodos de testes selecionados para os setores angulares correspondentes à simulação de bloqueios no radar de Almenara, considerando-se dados de descargas das	
5.6	redes BrasilDAT e RINDAT	133
	evento iniciado no dia 21 nov. 2015, mas que possui descargas registradas pela rede BrasilDAT.	134

5.7	Horários sem registros de descargas atmosféricas pela rede RINDAT para	
	evento do dia 26 nov. 2015, mas que possui descargas registradas pela	
	rede BrasilDAT.	145

### LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AEAR	_	Área Efetiva de Abrangência do Radar Meteorológico
AN1	_	Radar Meteorológico de Almenara (MG)
BBF	_	Beam Blockage Fraction
BrasilDAT	_	Brazilian Total Lightning Network
CAPPI	_	Constant Altitude Plan Position Indicator
Cemaden	_	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
GOES	_	Geostationary Operational Environmental Satellite
IN	_	Descargas atmosféricas intranuvem
INPE	_	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IZLR	_	Instantaneous Reflectivity-Lightning Ratio
JG1	_	Radar Meteorológico de Jaraguari (MS)
MCC	_	Matthews Correlation Coefficient
MDE	_	Modelo Digital de Elevação
MDF	_	Magnetic Direction Finding
NEXRAD	_	Next Generation Weather Radar
NN	_	Descargas atmosféricas nuvem-nuvem
NOAA	_	National Oceanic and Atmospheric Administration
NS	_	Descargas atmosféricas nuvem-solo
PCD	_	Plataforma Automática de Coleta de Dados
PPI	_	Plan Position Indicator
QPE	_	Quantitative Precipitation Estimation
RADAR	_	Radio Detection And Ranging
RINDAT	_	Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas
RLR	_	Rainfall Lightning Ratio
SRTM	—	Shuttle Radar Topographic Mission
ST1	_	Radar Meteorológico de Santa Teresa (ES)
TOA	—	Time Of Arrival
TRMM	_	Tropical Rainfall Measuring Mission
UALF	_	Universal ASCII Lightning Format
UTC	_	Universal Time Coordinated
VHF	_	Very High Frequency
VLF	—	Very Low Frequency
VRG	—	Vertical Refractivity Gradient
WRLR	_	Windowed Rainfall to Lightning function

## LISTA DE SÍMBOLOS

a	_	Coeficiente empírico
A	_	Atenuação específica
$A_h$	-	Atenuação do canal horizontal
b	-	Coeficiente empírico
C	—	Constante do radar
c	_	Velocidade da luz
dB	—	Decibel
dBZ	-	Refletividade do radar na escala logarítmica
G	—	Campo de densidade de ocorrência de descarga atmosférica com filtro Gaussiano
$K_{DP}$	_	Diferencial de fase específica
n	_	Índice de refração
R	-	Taxa de precipitação
Z	-	Refletividade radar
$Z_B$	_	Refletividade atenuada devido a bloqueio do feixe
$Z_h$	-	Refletividade em áreas livres de bloqueio
ZDR	—	Refletividade diferencial
$\Phi$	-	ângulo de elevação
$\phi_{DP}$	-	Diferencial de fase
$\mu_a$	_	Média azimutal das refletividades acumuladas
$\sigma_a$	—	Desvio padrão das refletividades acumuladas

## SUMÁRIO

# Pág.

1 INTRODUÇÃO	. 1
1.1 Objetivo	2
1.2 Justificativa	. 3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE CORREÇÃO DE BLO-	-
QUEIOS	. 7
<ul> <li>2.1 Métodos convencionais</li></ul>	- 7
féricas	. 10
3 SENSORES E DADOS UTILIZADOS	. 17
3.1 Radares meteorológicos	. 17
3.2 Descargas atmosféricas	. 27
3.3 Descrição do conjunto de dados	. 34
4 METODOLOGIA	. 45
4.1 Métricas utilizadas	. 45
4.2 Identificação de bloqueios	. 52
$4.2.1  {\rm Detecção} \ {\rm de} \ {\rm bloqueios} \ {\rm por} \ {\rm acumulados} \ {\rm da} \ {\rm refletividade} \ {\rm por} \ {\rm azimute}$	e
discreto	. 52
4.2.2 Estimativa da fração de bloqueio do feixe (BBF) utilizando modelo	)
digital de elevação.	. 59
4.3 Correção de bloqueios	. 70
4.3.1 Cálculo do fator IZLR	. 73
4.3.2 Cálculo da correlação entre refletividade e a densidade de ocorrências	3
de descargas atmosféricas	. 76
4.3.3 Janelas temporais dinâmicas para integração das descargas atmosféric	as. 80
5 RESULTADOS	. 89
5.1 Bloqueios identificados	. 89
5.2 Correção de bloqueios utilizando IZLR	. 93
5.2.1 Estimativa de refletividade com IZLR e métricas para análise dos re-	-
sultados	94

5.2.2	Resultados para o radar de Jaraguari	
5.2.2.1	Análise do pior caso	
5.2.2.2	Análise do melhor caso	
5.2.3	Resultados para o radar de Santa Teresa	
5.2.3.1	Análise do pior caso	
5.2.3.2	Análise do melhor caso	
5.2.4	Resultados para o radar de Almenara	
5.2.4.1	Análise do pior caso	
5.2.4.2	Análise do melhor caso	
6 CO	MENTÁRIOS FINAIS	
REFE	RÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	
APÊNDICE A - IDENTIFICAÇÃO DE BLOQUEIOS (Transfor-		
mada	de Hough)	
APÊN	NDICE B - FUNÇÃO OBJETIVO (find Window)	

#### 1 INTRODUÇÃO

Os radares meteorológicos são uma importante ferramenta para estimar a precipitação em tempo real na área abrangida pelo seu alcance efetivo em intervalos de tempo correspondentes à periodicidade de sua varredura. Esses radares possibilitam também o estudo dos sistemas precipitantes. Assim, é possível se fazer o monitoramento da precipitação e, consequentemente, emissão de alertas relativos a deslizamentos de terra e inundações, dentre outros (XU et al., 2013).

Atualmente, a precipitação pode ser medida por sensores em solo, tais como Plataformas automáticas de Coleta de Dados (PCD), por radares meteorológicos, ou então sensores embarcados em satélites, através de imageamento em diversos canais, que variam do espectro visível ao de micro-ondas (VICENTE; FERREIRA, 1998). O uso conjunto desses meios permite obter a estimação quantitativa da precipitação (*Quantitative Precipitation Estimation* - QPE), que fornece a distribuição espacial da precipitação para uma dada área e período de tempo. As PCDs normalmente são insuficientes para cobrir grandes áreas devido a seu pequeno número, resultando numa baixa densidade espacial relativamente à área a ser monitorada, especialmente em regiões remotas, embora elas sejam efetivamente importantes para comparação e validação de outros métodos utilizados para estimativa de precipitação como radares meteorológicos e ou satélites (XU et al., 2013).

Os radares meteorológicos são os equipamentos preferencialmente utilizados para o monitoramento de sistemas precipitantes, medindo a refletividade de hidrometeoros com varredura tridimensional e possibilitando diversos estudos científicos sobre a quantificação de precipitação (BECH et al., 2007; NIELSEN et al., 2014), classificação de hidrometeoros (KUMJIAN, 2013), microfísica de nuvens (PASQUALUCCI et al., 1983; STRAKA et al., 2000), entre outros. Entretanto, esses radares sofrem limitações causadas por falta de calibração, interferência do sinal por ecos de terreno (*ground clutter*), propagação anômala do feixe de micro-ondas emitido devido à variabilidade da refração atmosférica, ou bloqueio da visada do radar.

Segundo Villarini e Krajewski (2010), problemas de calibração são devidos ao desgaste dos componentes do radar, causando a modificação da constante do radar (C) e implicando em subestimativas da precipitação, sendo necessária a comparação com dados de outro radar e/ou PCDs. O radar mede a energia refletida pelos alvos hidrometeorológicos, sendo diversos os fatores que alteram a relação entre a energia emitida e a recebida de volta, tais como tipo, tamanho e distribuição das gotas de chuva além da distância em relação ao sensor. Além disso, existem perdas internas relacionadas a alguns elementos que compõem o sistema radar como guia de onda, transmissor, receptor e radôme. Há outras perdas invariantes que podem ser calculadas previamente, as quais são consideradas na constante do radar (C) (ICE et al., 2011). No caso de radares do tipo Doppler, pode-se utilizar a velocidade radial dos alvos para identificar e corrigir ecos de terrenos, embora essa técnica possa levar a uma diminuição na estimativa de precipitação no caso de fenômenos meteorológicos estacionários do tipo estratiforme (HUBBERT et al., 2009). Entretanto, o efeito Doppler só permite avaliar a velocidade de aproximação e afastamento dos sistemas precipitantes em relação ao radar na direção do feixe de micro-ondas emitido. Consequentemente, sistemas que se movem tangencialmente em relação ao o feixe serão incorretamente avaliados como apresentando velocidade nula (GEÇER, 2005). A propagação anômala do feixe do radar devido à variação do índice de refração da atmosfera pode levar a uma intensificação de ecos de terreno, os quais aumentam os bloqueios de visada (FORNASIERO et al., 2006; VILLARINI; KRAJEWSKI, 2010), um exemplo disso é o efeito de super-refração, que desvia o feixe do radar em direção ao solo (FARIAS et al., 2006). Abordagens como as propostas por Fornasiero et al. (2006) e Bech et al. (2007) visam mitigar esse problema através da definição climatológica do gradiente vertical de refratividade (Vertical Refractivity Gradient - VRG) utilizando dados de radiossondas. Uma descrição detalhada sobre os fatores que afetam a qualidade dos dados de radares podem ser obtidas na revisão apresentada por Villarini e Krajewski (2010).

#### 1.1 Objetivo

Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de métodos para identificação e preenchimento de falhas devido a bloqueios da visada em radares meteorológicos em geral, embora utilizando os radares operados pelo Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden). O método de preenchimento tem por base a correlação entre a densidade de ocorrência de descargas atmosféricas registradas pelas redes *Brazilian Total Lightning Network* (BrasilDAT) e Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas (RINDAT) e a refletividade medida pelos radares.

No escopo desses objetivos gerais, os seguintes objetivos específicos foram buscados:

• Apresentar um método para identificação automática de bloqueios da visada de radares baseado na análise estatística dos acumulados de refletividade. Esse método permite identificar tanto os bloqueios decorrentes da
iteração do feixe de micro-ondas com o relevo quanto àqueles devidos a obstáculos artificiais como construções e torres entre outros;

• Apresentar um método que possibilite obter a melhor correlação espaçotemporal entre densidade de ocorrência de descargas e a refletividade radar nas áreas não afetadas por bloqueios para o cálculo de um fator que permita a estimativa de refletividade para a correção e/ou preenchimento das falhas ocasionadas nas imagens dos radares devido a bloqueios da visada.

No caso da identificação de bloqueios, utilizou-se um método existente que modela a propagação do feixe de micro-ondas dos radares e calcula sua iteração com o relevo por meio de modelo digital de elevação (MDE) para avaliar o desempenho do método proposto. No caso da correção de bloqueios, foram simulados bloqueios nas imagens de radar para avaliar as estimativas realizadas com o outro método proposto neste trabalho para preenchimento de falhas causadas por bloqueios.

# 1.2 Justificativa

Os bloqueios em radares afetam consideravelmente as estimativas de precipitação realizadas com esses sensores, além de inviabilizar o monitoramento em tempo real de eventos meteorológicos extremos. Os métodos comumente utilizados para mitigação desse problema em radares de polarização simples são limitados, uma vez que se baseiam unicamente na iteração entre o feixe do radar e o relevo. Por outro lado, métodos mais avançados exigem o uso de radares de dupla polarização, que são ainda em menor número no Brasil em relação aos de polarização simples.

De maneira geral, a busca por uma alternativa para correção de bloqueios em radares meteorológicos motivou a realização deste estudo a fim de responder o seguinte questionamento: É possível obter uma relação que permita estimar a energia refletida pelos alvos hidrometeorológicos, ou seja, a refletividade radar, utilizando a densidade de ocorrência de descargas atmosféricas nas áreas afetadas por bloqueios?

Assim, apresentou-se uma nova abordagem para correção de bloqueios de visada nas imagens de radar baseada num fator denominado Taxa Instantânea de Refletividade-Descarga Atmosférica (*Instantaneous Reflectivity-Lightning Ratio* - IZLR), que correlaciona a refletividade medida pelo radar e a ocorrência de descargas atmosféricas fornecidas pelas redes RINDAT ou BrasilDAT. Os dados de descarga foram amostrados em uma janela de tempo equivalente a varredura do radar, projetados sobre uma grade cartesiana e suavizados com uso do filtro Gaussiano a fim de se obter uma distribuição espacial semelhante a do radar. Essa abordagem pode ser aplicada a radares de polarização simples, caso da maioria dos radares meteorológicos no Brasil<sup>1</sup>, ou de polarização dupla. Os radares de polarização dupla possibilitam o tratamento de bloqueios pelo uso de variáveis polarimétricas tais como a diferencial de fase ( $\phi_{DP}$ ), a qual não é afetada por bloqueios parciais (ZHANG et al., 2010). A abordagem proposta permite a estimativa de refletividade para correção de bloqueios ocasionados por vários fatores como: interação do feixe de micro-ondas com o relevo em regiões de montanha, construções, árvores, torres entre outras. Os bloqueios não relacionados ao relevo, muitas vezes ocorrem devido à proximidade a centros urbanos, e são de difícil tratamento por métodos convencionais, os quais utilizam MDE (ZHANG et al., 2010).

Os capítulos restantes desta dissertação estão organizados da seguinte maneira:

- Capítulo 2: Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre os métodos convencionais para identificação, quantificação e correção de bloqueios em radares meteorológicos. E Inclui também uma revisão dos métodos que estimam precipitação a partir de dados de descargas elétricas atmosféricas, enfoque que inspirou uma abordagem semelhante para este trabalho, visando à correção de bloqueios.
- Capítulo 3: Neste capítulo é feita uma descrição detalhada dos sensores e dados utilizados. Trata basicamente de radares meteorológicos não embarcados e de redes de detecção de descargas elétricas atmosféricas. Descreve o conjunto de dados utilizado nesta dissertação, obtido das redes de detecção de descargas BrasilDAT e RINDAT, e de 3 radares meteorológicos operados pelo Cemaden.
- Capítulo 4: Neste capítulo são apresentadas as metodologias propostas para identificação de bloqueios e estimativa de refletividade para o preenchimento das falhas nas imagens de radar, bem como as métricas utilizadas para avaliar os resultados obtidos. O processo de identificação de bloqueios proposto é baseado na análise estatística da refletividade acumulada por azimute discreto, para determinação de um limiar que permitiu identificar os azimutes afetados. Já a abordagem de correção de bloqueios proposta, utiliza dados de descargas elétricas atmosféricas para estimar a refletividade em áreas sujeitas a bloqueios. Esta abordagem propõe o cálculo do

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>WMO Radar Database disponível no endereço http://wrd.mgm.gov.tr/default.aspx?l=en, acesso em 25/04/2017.

fator IZLR, que relaciona a refletividade ao número de descargas elétricas em áreas livres de bloqueio, o qual é continuamente atualizado ao longo do tempo. Esse capítulo apresenta também o método para estimativa da fração de bloqueio do feixe de micro-ondas do radar (*Beam Blockage Fraction* - BBF) utilizando modelo digital de elevação, proposto por Bech et al. (2003), o qual foi usado como referência na identificação de bloqueios.

- Capítulo 5: Apresentam-se aqui os resultados dos testes de identificação e correção de bloqueios para os 3 radares escolhidos do Cemaden, Jaraguari (MS), Santa Teresa (ES) e Almenara (MG).
- Capítulo 6: Este capítulo engloba as discussões sobre as metodologias propostas e os resultados obtidos, bem como apresenta pontos relevantes para a continuidade deste estudo.

# 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE CORREÇÃO DE BLOQUEIOS

Este capítulo descreve os métodos convencionais para identificação, quantificação e correção de bloqueios em radares meteorológicos devidos à orografia, vegetação ou construções. Inclui também os métodos que utilizam dados de descargas elétricas atmosféricas para estimar precipitação, sendo tal estimação proposta neste trabalho para correção de bloqueios.

### 2.1 Métodos convencionais

Bloqueios afetam medidas de radares meteorológicos, especialmente nas varreduras próximas à superfície, que são normalmente utilizadas na estimação quantitativa de precipitação, resultando em erros maiores nas estimativas realizadas para estruturas precipitantes próximas à superfície (LANG et al., 2009; ZHANG et al., 2010; ZHANG et al., 2011).

No caso de radares de polarização simples, uma das abordagens típicas para correção de bloqueios baseia-se na modelagem e simulação da propagação do feixe de micro-ondas considerando o índice de refração da atmosfera padrão, para identificar e quantificar a interrupção parcial ou total do feixe devido à topografia. Bech et al. (2003) propõem uma função simples para avaliar a interceptação do relevo pelo feixe do radar a fim de estimar a fração de bloqueio. Essa função utiliza uma abordagem óptico-geométrica para o cálculo da área afetada. Além disso, foram empregados também dados de sondagens para caracterizar o perfil vertical de refratividade e um modelo digital de elevação para definir o relevo. A correção aplicada leva em consideração frações de bloqueio entre 10% e 60%, sendo adicionados de 1 a 4 dBao fator de refletividade obtido para os pixels relativos ao bloqueio, conforme proposto por Fulton et al. (apud BECH et al., 2003). A função proposta por Bech et al. (2003) foi utilizada para estimar a BBF para os radares do Cemaden (Seção 4.2.2) a fim de comparar e avaliar os resultados do método de identificação de bloqueios proposto nessa dissertação (ver Subseção 4.2.1). Nessa mesma linha Fornasiero et al. (2006) apresentam um método para correção da refletividade e estimativa de precipitação baseado em três passos: (i) Determinação de um mapa dinâmico dos pixels correspondentes a elevações próximas à superfície não afetadas por ecos de terreno climatológicos, propagação anômala e bloqueio do feixe superior a 50%; (ii) Identificação e correção dos pixels afetados por propagação anômala através da verificação do perfil vertical de refletividade comparada ao mapa dinâmico, pois alvos meteorológicos apresentam coerência vertical ao contrário dos ecos de terreno; (iii) Correção de bloqueios parciais baseado na função de interceptação do feixe pelo relevo proposta por Bech et al. (2003) e num modelo multicamadas para determinação do padrão de propagação do feixe baseada nas informações de refratividade atmosférica medidas por radiossondas, alcançando assim melhores resultados se comparados aos obtidos utilizando um valor único de refratividade para toda a atmosfera no entorno do radar. Bech et al. (2007) apresentam uma abordagem para simulação do feixe de micro-ondas que leva em conta as condições atmosféricas, baseada no perfil vertical de temperatura, pressão e umidade. O cálculo da fração de bloqueio do feixe foi baseado na abordagem óptico-geométrica proposta por Bech et al. (2003) e no modelo digital de elevação GTOPO30. Foram utilizados perfis obtidos através de radiossondagens e do modelo de previsão numérica de tempo *High-Resolution Limited-Area Model* (HIRLAM). O estudo apresentou bons resultados para correção da precipitação estimada com o radar diminuindo assim o viés entre os valores medidos à superfície, sendo que melhores resultados foram observados especialmente para áreas próximas ao radar, devidos ao menor efeito do gradiente de refratividade nessas áreas.

Kucera et al. (2004) utilizaram Sistema de Informações Geográficas (SIG) e MDE para mensurar a BBF devido à topografia, atestando que quanto melhor a resolução do modelo digital de elevação melhor é a sua estimação. Valores típicos do gradiente vertical de refratividade da atmosfera variam no intervalo entre 0 e  $-78, 7 km^{-1}$  (BECH et al., 2003), mas são afetados por variáveis atmosféricas, principalmente pela temperatura e umidade (GJERTSEN; HAASE, 2005). Essa variabilidade do índice de refração na atmosfera leva a desvios incomuns do feixe de micro-ondas do radar, afetando a QPE, levando a diferenças de estimativas entre radar e PCD de até 1 dB para bloqueios moderados e de até 3 dB para bloqueios severos (BECH et al., 2007). Essa diferença pode ser minimizada pela definição climatológica do VRG, obtida a partir de dados de radiossondagens, como sugerido por Bech et al. (2003) e Bech et al. (2007). O gradiente vertical de refratividade da camada atmosférica mais próxima à superfície é determinante para caracterização da propagação do feixe de micro-ondas do radar, pois usualmente considera-se que o gradiente horizontal de refratividade seja nulo (BECH et al., 2003).

No caso de radares de dupla polarização, há abordagens recentes para correção de bloqueios que utilizam variáveis polarimétricas com bons resultados. Lang et al. (2009) apresentaram duas metodologias, a primeira baseada na autoconsistência dos valores de refletividade diferencial (ZDR), variável que expressa à diferença entre a refletividade horizontal e vertical medida pelo radar. A correção é feita com base na diferença entre as medianas do ZDR nas regiões isentas de bloqueio e nas regiões com bloqueio. A segunda metodologia, denominada autoconsistência plena, emprega também o diferencial de fase específica entre os pulsos horizontal e vertical do radar  $(K_{DP})$ , a qual não é muito afetada por bloqueios parciais do feixe. Isso ocorre porque o  $K_{DP}$  consiste de uma relação de potência menos sensível ao valor absoluto de retroespalhamento da energia pelos alvos hidrometeorológicos (VIVEKANANDAN et al., 1999).

Zhang et al. (2010) propõem o cálculo da BBF utilizado diretamente o diferencial de fase entre os pulsos horizontal e vertical do radar  $\phi_{DP}$ , variável que possui comportamento estável em áreas com pouca precipitação, diferentemente do diferencial de fase específica  $K_{DP}$ , utilizada em outra metodologia, e que leva a interpretar taxas de precipitação de até 10 mm  $h^{-1}$  como sendo ruído (ZHANG et al., 2013). Essa metodologia utiliza atenuação  $(A_h)$  do canal horizontal, a qual afeta a diferença de fase  $\phi_{DP}$ , para estimar a BBF e calcular a refletividade diminuída devido ao bloqueio  $(Z_B)$  a partir da refletividade em áreas livres de bloqueio  $(Z_h)$ :

$$Z_B = BBF \times Z_h \tag{2.1}$$

Ryzhkov et al. (2014) apresentam uma técnica para estimativa da taxa de precipitação R em áreas afetadas por bloqueios que constitui uma alternativa às técnicas usuais para radares de polarização dupla, as quais são baseadas na autoconsistência de variáveis polarimétricas como  $K_{DP}$ , ZDR e  $\phi_{DP}$ . Estas técnicas podem apresentar erros sistemáticos na medida da refletividade devido à falta de calibração, atenuação do sinal, bloqueio parcial ou radome molhado. A vantagem d técnica alternativa é que R é obtida em função da atenuação específica (A, em dB/km) da refletividade (em dB), obtida do perfil radial de refletividade. A qual é menos sensível à variabilidade da distribuição de gotas de chuva nas estruturas precipitantes do que as estimativas que utilizam a refletividade Z ou a refletividade diferencial ZDRou o diferencial de fase específico  $K_{DP}$  (ATLAS; ULBRICH, 1977;MATROSOV, 2005 apud RYZHKOV et al., 2014).A atenuação específica está diretamente relacionada à taxa de precipitação e ao conteúdo de água líquida, e sua estimativa geralmente não é afetada por problemas de calibração e bloqueio do feixe do radar (RYZHKOV et al., 2014).

# 2.2 Estimativa de precipitação utilizando dados de descargas elétricas atmosféricas

No fim da década de 1970, quando os primeiros sistemas confiáveis de detecção automática de descargas atmosféricas foram implementados comercialmente, começaram a surgir diversas aplicações científicas desses dados especialmente ligadas a caracterização, monitoramento e previsão de eventos severos (CUMMINS; MURPHY, 2009). Goodman et al. (1988) apresentou uma abordagem utilizando dados de descargas elétricas atmosféricas associadas a imagens de infravermelho de satélites da série Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES) com o objetivo de determinar e prever áreas de precipitação convectiva. O sistema combina a definição de limiares de temperatura para separar nuvens de topo "frio", e núcleos de alta densidade de descargas a fim de estimar tendências que indicam se o sistema precipitante está crescendo ou decaindo. Variações da densidade de descargas permitiram identificar comportamentos que antecipam a ocorrência de alguns eventos extremos como queda de granizo ou microexplosão<sup>1</sup>

Diversos autores buscaram inferir a precipitação acumulada a partir da quantidade de descargas elétricas atmosféricas registradas em áreas com presença de sistemas precipitantes. Petersen e Rutledge (1998) propuseram a razão (*rain yield*, em kg/flash) que relacionava a quantidade de precipitação acumulada em kg (massa precipitada) ao número de descargas elétricas *flash* do tipo nuvem-solo (NS) para uma dada área e intervalo de tempo. Foi observado que o desvio padrão da *rain yield* era minimizado para uma resolução espacial de  $10^5 km^2$  e resolução temporal de 30 dias. A título de exemplo, constataram que os valores médios do *rain yield* apresentam alta variabilidade, com valores de  $6 \times 10^7 kg/flash$  na região Sudeste mais seca dos EUA a  $4 \times 10^{10} kg/flash$  em regiões tropicais do Oceano Pacífico.

Seguindo uma linha semelhante, Tapia et al. (1998) propuseram a relação Rainfall-Lightning Ratio (RLR) entre a massa precipitada e o número de descargas NS. Essa razão foi calculada assumindo-se uma distribuição uniforme de precipitação que é computada, para cada descarga, num círculo de 5 km de raio centrado na sua posição e num intervalo de tempo de 5 minutos centrado no seu instante de ocorrência. O valor final de RLR foi tomado como sendo a mediana dos valores de RLR calculados para 22 tempestades numa área do estado da Florida (EUA). Os valores de RLR para cada tempestade apresentaram uma grande variabilidade, de  $40 \times 10^6 kg/flash$ 

 $<sup>^{1}</sup>$ Micro<br/>explosão ou do inglês *microburst*, são rajadas de vento causadas por correntes descendentes fortes concentradas em uma pequena área.

a  $360 \times 10^6 \ kg/flash$ , sendo adotada a mediana,  $43 \times 10^6 \ kg/flash$ . Concluiu-se que o ideal seria determinar um valor ótimo de RLR para cada tipo de regime convectivo predominante.

Leonibus et al. (2008) e Sist et al. (2010) utilizaram o modelo proposto por Tapia et al. (1998), para atestar o potencial de estimativa de precipitação a partir de dados de descarga detectados pela rede LAMPINET que cobre toda a Itália e apresenta acurácia de detecção de 90% e erro médio de 500 m da posição detectada das descargas. Adicionalmente, essa rede visa prover dados de descargas para comparação com aqueles medidos pelo Lightning Imager (LI) no satélite Meteosat de  $3^a$  geração (MTG). Embora os eventos analisados em ambos os trabalhos fossem distintos e resultassem também em razões RLR diferentes, as estimativas de massa precipitada por meio da razão RLR foram razoáveis, tomando-se por referências estimativas de radares meteorológicos e de PCDs. Da mesma forma, considerando-se a ocorrência ou não de chuva em volumes centrados nos pontos de uma grade regular, as estimativas de precipitação tiveram um grau de acerto razoável, determinados por métricas como o Probability Of Detection (POD) e o False Alarm Ratio (FAR), sendo que o primeiro deve ser desejavelmente alto, e o segundo, baixo. A Figura 2.1 ilustra o resultado da estimativa de precipitação utilizando RLR realizada por Sist et al. (2010), sendo possível observar que a distribuição espacial da estimativa foi semelhante àquela obtida por radares meteorológicos, referente à parte do território italiano.

Os trabalhos acima citados Leonibus et al. (2008) e Sist et al. (2010) serviram de base para o desenvolvimento e avaliação de uma metodologia para estimativa de precipitação por satélites, que aparecem em Sist et al. (2011) e Biron et al. (2012), baseada em dados e imagens de radiômetros embarcados nos satélites europeus *Meteosat* de segunda geração. O primeiro radiômetro captura imagens nas faixas visível e infravermelha, *Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager* (SEVIRI), enquanto que os outros dois radiômetros, *Advanced Microwave Sounding Unit* (AMSU) A e B, na faixa de micro-ondas, sendo que os três detectam perfis verticais da atmosfera nessas diferentes faixas de frequência. Os dados desses radiômetros permitem obter estimativas de precipitação, as quais foram então comparadas com aquelas resultantes de radares meteorológicos no solo. Foi então atestada à ineficiência do instrumento SEVIRI para identificar sistemas precipitantes convectivos, devido à sua baixa resolução espacial, o que foi agravado por sua resolução temporal diferente daquela dos radiômetros AMSU-A e AMSU-B. Além disso, estes apresentam erros maiores de estimativa de precipitação quando o sistema precipitante possui atividade elétrica,

Figura 2.1 - Mapas da distribuição espacial de precipitação acumulada (mm de chuva) para um período de 12 horas sobre parte da Itália na data de 02/07/2009.



descargas elétricas.

Fonte: Adaptada de Sist et al. (2010).

conforme ilustrado na Figura 2.2. Em Sist et al. (2011) e Biron et al. (2012), foi então proposto o uso complementar da estimativa de precipitação por dados de descargas atmosféricas para melhorar as estimativas de precipitação derivadas dos dados de radiômetros embarcados. Assim, derivou-se o algoritmo *Rainfall Estimation from Lightning And SEviri data* (RELASE), que utiliza a regressão bivariada definida na Equação 2.2, sendo os coeficientes  $b_0$ ,  $b_1$  e  $b_2$  determinados utilizando uma regressão por mínimos quadrados. Os dados de descargas da rede LAMPINET são agrupados a cada 15 minutos em *cluster*, sendo cada intervalo centrado num instante de captura do instrumento SEVIRI. Para cada *cluster* identificado, a taxa de precipitação por unidade de área (*RR*) é obtida a partir de radares meteorológicos e relacionada aos dados do SEVIRI por:

$$RR = \left(b_0 + b_1 \times \frac{S}{N_p} + b_2 \times T\right) N_p \tag{2.2}$$

Acima, para cada *cluster* considerado, S é o número de descargas detectadas, T (em K) é a mínima temperatura de brilho no *cluster*, medida pelo canal 10,8  $\mu m$  do SEVIRI e  $N_p$  é o número de pixels do *cluster* na imagem do SEVIRI. Essa equação

possibilitou o ajuste dos coeficientes  $b_0$ ,  $b_1$  e  $b_2$  com dados de 27 dias do primeiro semestre do ano de 2011, nos quais foram identificados 4703 *clusters*, resultando em  $b_0 = 0,5131, b_1 = 0,2373$  e  $b_2 = -0,0014$ . A validação foi realizada com dados do dia 01/07/2011 analisando-se 873 *clusters*. O desempenho de classificação de ocorrência ou não de chuva considerando-se a grade do instrumento SEVIRI foi apenas razoável: POD = 0,48 e FAR = 0,34. Entretanto, o algoritmo proposto demonstrou que dados de descargas podem aprimorar as estimativas da precipitação convectiva.

Figura 2.2 - Erro médio quadrático na estimativa pelo AMSU, em relação à presença de descargas no campo de visada (*Field Of View* (FOV)).



Fonte: Adaptado de Sist et al. (2011).

Seguindo a proposta de estimar a precipitação em áreas sem cobertura de radares meteorológicos utilizando dados de descargas atmosféricas, Garcia et al. (2013) apresentaram uma abordagem que visava suprir as deficiências da abordagem de Tapia et al. (1998), em especial, a grande variabilidade das razões RLR encontradas para eventos convectivos diferentes, impedindo a adoção de um valor único de RLR. Essa abordagem utilizou a técnica de janela temporal deslizante para obter um conjunto de pares de valores de precipitação acumulada e descargas NS a partir de quadrados com 50 km de aresta, dentro do alcance efetivo de um ou mais radares meteorológicos e intervalos de 30 minutos. Pode-se então ajustar uma função de potência a partir da regressão polinomial utilizando esses pares de valores. Foram utilizados dados de precipitação acumulada obtidos dos radares de Bauru e Presidente Prudente, ambos operados pelo Instituto de Pesquisas Meteorológicas (IPMet), e dados de descargas elétricas atmosféricas da rede RINDAT referentes a 2009 para ajuste da função, e dados do mês de janeiro de 2010 para sua validação.

Essa função foi denominada Windowed-RLR (WRLR). Cada quadrado é varrido por uma janela temporal deslizante de 30 minutos que avança a cada 7,5 minutos, ou seja, com sobreposição. A precipitação acumulada foi obtida a partir da conversão de refletividade medida pelos radares para taxa de precipitação utilizando uma relação Z-R, enquanto que o número de descargas, a partir da estimativa do campo de densidade de ocorrência de descargas elétricas nuvem-solo obtida pelo software Estimador de Densidade de Descargas Elétricas Atmosféricas (EDDA) Strauss et al. (2010). O ajuste foi realizado por trimestre, obtendo-se funções WRLR sazonais. Adicionalmente, o trabalho também mapeou funções WRLR, que tinham sido derivadas em áreas com cobertura de radares meteorológicos, para áreas sem cobertura radar por meio de uma matriz de mapeamento. Essa matriz é composta por coeficientes que mapeiam a função WRLR do trimestre em questão para quadrados de 0,5 graus de aresta fora da cobertura do radar, assumindo-se que esse mapeamento seja linear. Os coeficientes foram derivados a partir dos dados de precipitação disponíveis, considerando-se médias trimestrais. O resultado dessa pesquisa foi incorporado a um software denominado EDDA-Chuva, que estima a precipitação acumulada com base na distribuição espacial do número de ocorrências das descargas nuvem-solo. A título de exemplo, considerando-se uma área sob a cobertura dos radares de Bauru e Presidente Prudente, composta por 32 quadrados de 50 km de aresta, foram coletados dados correspondentes a todo o ano de 2009 para ajuste da função, sem a divisão em trimestres, e dados de teste correspondentes ao mês de janeiro de 2010, sendo ajustada a seguinte função WRLR $(N_d)$ , onde  $N_d$  denota o número de descargas nuvem-solo:

$$WRLR(N_d) = 941.3 \times N_d^{0,3878} - 182,1$$
(2.3)

A Figura 2.3 compara as estimativas obtidas pela função WRLR com a estimativa obtida usando-se a abordagem de RLR constante de Tapia e com aquela obtida dos dados dos radares meteorológicos para acumulados de 30 minutos ao longo do mês. Considerando-se a precipitação obtida pelos radares como referência, observase que a função WRLR obteve estimativas mais precisas que aquelas obtidas pela abordagem de Tapia, que ora superestimavam ou ora subestimavam a precipitação acumulada. Figura 2.3 - Evolução temporal dos acumulados de 30 minutos de precipitação para o mês de janeiro de 2010 para a área sob cobertura dos radares meteorológicos de Bauru e Presidente Prudente considerando-se os acumulados dados pela função WRLR, pela razão RLR e por dados desses radares.



Fonte: Adaptada de Garcia et al. (2013).

A seguir, a Figura 2.4 compara a distribuição observada por esses radares com aquelas derivadas do software EDDA-Chuva (EDDA/WRLR) e da abordagem de Tapia. Pode-se ver que a abordagem de Tapia também teve pior desempenho ao estimar a distribuição espacial da precipitação.

Figura 2.4 - Distribuição espacial da precipitação considerando-se um acumulado de 30 minutos durante uma tempestade em 20 de janeiro de 2010, dada pelo radar de Bauru (esquerda), pelo software EDDA-Chuva (EDDA/WRLR, centro) e pela razão RLR e pelo modelo de Tapia (direita).



Fonte: Adaptada de Garcia et al. (2013).

Xu et al. (2013) compilaram 13 anos de dados (período de 1998 a 2010) de sensores embarcados nos satélites da série Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), que incluem um radar de micro-ondas ativa da banda Ku para detecção de precipitação (Precipitation Radar, PR), um imageador de micro-ondas passiva (Microwave Imager, TMI), um sensor ótico para detecção de descargas elétricas (Lightning Image Sensor, LIS) e um conjunto de radiômetros nos canais visível e infravermelho (Visible and IR Scanner, VIRS) abrangendo a faixa continental dos EUA, a América do Sul e diversas áreas tropicais oceânicas e continentais. O objetivo do estudo foi verificar correlações entre atividade elétrica, precipitação convectiva e propriedades de nuvens relacionadas na escala dos sistemas convectivos e também na escala dos pixels da resolução espacial dos instrumentos, de aproximadamente 5 km. Esse estudo demonstrou que a frequência de ocorrência de descargas pode complementar vantajosamente outros dados meteorológicos para diferenciar tempestades quanto à sua intensidade, identificar núcleos convectivos ou falsos núcleos que ocorrem quando nuvens *cirrus* extremamente frias são incorretamente caracterizadas como apresentando precipitação convectiva devido à sua assinatura no canal infravermelho. Para resolver esse problema, os autores fizeram a identificação dos núcleos convectivos utilizando as medidas do PR e a frequência de ocorrências de descargas. O foco do estudo abrangeu o Sul dos EUA, constatando correlações significativas entre atividade elétrica e chuva convectiva. Na escala de tempestades, coeficientes de correlação r = 0,75 - 0,85 foram encontrados entre chuva convectiva ou intensa e a área abrangida pelas descargas elétricas. Valores menores foram encontrados entre chuva convectiva ou intensa e a taxa de descargas (r = 0, 55 - 0, 75). Entretanto, tais correlações não se verificaram na escala de pixels. Uma análise mostrou que a probabilidade de precipitação intensa aumenta com a taxa de descargas e o estudo concluiu que dados de descargas podem ser melhor explorados para o monitoramento de chuvas intensas.

## **3 SENSORES E DADOS UTILIZADOS**

Este capítulo apresenta uma descrição geral dos sensores que proveem os dados utilizados nesse trabalho, bem como a região do estudo.

#### 3.1 Radares meteorológicos

Os radares que hoje são comumente utilizados em aplicações meteorológicas, tiveram seu grande desenvolvimento ainda na Segunda Guerra Mundial. A princípio para uso militar na detecção de aviões e submarinos inimigos (na superfície), porém os cientistas logo perceberam seu potencial para a identificação de padrões atmosféricos. Somente após o fim da guerra é que os primeiros resultados puderam ser publicados, tornando-o assim uma das principais ferramentas para o estudo de ciclo de vida de tempestades e microfísica de nuvens (FABRY, 2015). A origem do termo RADAR vem do inglês *RAdio Detection And Ranging* e corresponde "the art of detecting by means of radio echoes the presence of objects, determining their direction and range, recogninzing their character and employing the data thus obtained."<sup>1</sup> (MASSACHU-SETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, 1946).

A detecção de alvos pelo radar é determinada pela quantidade de energia retroespalhada, isto é, refletida de volta para a antena, a qual a direciona para o receptor do radar. O sinal de um alvo qualquer é recebido varia num tempo proporcional à distância do alvo ao radar, conforme ilustrado na Figura 3.1. Uma vez que a velocidade de propagação do feixe de micro-ondas do radar é conhecida, pode-se calcular a distância do alvo a partir da medição do atraso entre a transmissão do pulso e a recepção do eco de resposta. Por outro lado, a posição do alvo pode ser obtida a partir dos ângulos de elevação e azimute da antena (LEITÃO, 2007).

Dessa forma o cálculo da distância (*slant range*) entre o alvo detectado e a antena do radar é realizado considerando o tempo (t) de emissão e retorno, e a velocidade da luz (c) para à propagação da radiação eletromagnética (MEISCHNER, 2003), onde  $c = 3 \times 10^8 m/s$ , pode ser dado pela seguinte equação:

$$d = \frac{t * c}{2} \tag{3.1}$$

Um fato importante no processo de detecção do sinal pelo radar é que a sua ca-

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>tradução - "A arte de detectar por meio de ondas de rádio ecos da presença de objetos, determinando a sua direção e distância, reconhecendo suas características e empregando os dados assim obtidos"

Figura 3.1 - Recepção pelo radar de ecos de resposta de alvos próximos e distantes no tempo.



Fonte: Adaptada de Meischner (2003).

pacidade de distinguir entre as respostas de alvos distintos é determinada pela sua máxima resolução espacial (*range resolution*) (MEISCHNER, 2003), onde ( $\tau$ ) é a largura do pulso, conforme equação:

$$S_r \ge \frac{\tau * c}{2} \tag{3.2}$$

A Figura 3.1 ilustra a resolução de distância para dois alvos no mesmo apontamento do radar, por estarem separados a uma distância menor que  $(S_r)$ , são indistinguíveis para o radar (MEISCHNER, 2003). Por outro lado a resolução angular  $(S_A)$  indica qual é a menor separação angular possível para distinção pelo radar entre alvos iguais a mesma distância do sensor, para apontamento distinto como demonstra a Figura 3.2. Sua determinação é baseada na largura do feixe ( $\Theta$ ) referente à região de meia potência onde a energia é  $\geq 3 \ dBZ$  e também à distância (d) do alvo em relação ao radar (WOLFF, 2009). A resolução angular pode ser obtida através da seguinte fórmula:

$$S_A \leqslant 2d \cdot \sin \frac{\Theta}{2} \ [m]$$
 (3.3)

Os radares meteorológicos possuem efetividade devido à faixa do espectro eletromagnético em que operam (micro-ondas), nessa faixa existem janelas atmosféricas que permitem a transmissividade do feixe até mesmo na presença de nuvens de tempestades (Figura 3.3), possibilitando assim a aquisição de informação através dessas áreas com densa cobertura de nuvens. A presença dessas janelas atmosféricas, deFigura 3.2 - Resolução angular do radar.



Fonte: Adaptada de Wolff (2009).

monstra a vantagem do uso de sistemas baseados em micro-ondas ativas em relação aos sistemas ópticos que operam na faixa do visível (FABRY, 2015).

Figura 3.3 - Gráfico do espectro eletromagnético desde ondas de rádio até raios gama, onde as áreas brancas definem as janelas atmosféricas.



Fonte: Adaptado de Fabry (2015).

Existem várias bandas que são utilizadas para os sistemas de radar (Tabela 3.1), as de menor frequência apresentam menos problemas de propagação, absorção pelos gases atmosféricos e atenuação pela chuva. Em contrapartida exigem antenas maiores para a obtenção da largura específica do feixe (LEITÃO, 2007).

O radar não mede precipitação, mas sim a refletividade resultante da potência recebida de volta, que é devida ao retroespalhamento dos alvos meteorológicos. Existem equações que modelam esse retroespalhamento conforme o espectro de distribuição das gotas ou de outros hidrometeoros (COSTA, 2007), expressando a refletividade em

Banda	Frequência (GHz)
UHF	0,3 - 1
$\mathbf{L}$	1 - 2
$\mathbf{S}$	2 - 4
$\mathbf{C}$	4 - 8
Х	8 - 12
Ku	12 - 18
Κ	18 - 27
Ka	27 - 40

Tabela 3.1 - Bandas utilizadas por sistemas de radar.

Fonte: Adaptada de Leitão (2007).

função do número de gotas de diversos tamanhos e do seu diâmetro, ou fornecendo a taxa de precipitação em função do número de gotas de diversos tamanhos, do seu diâmetro e de sua velocidade terminal. Entretanto, para fins práticos, o radar meteorológico mede a refletividade  $(Z mm^6/m^3)$  para cada ângulo discreto de azimute e de elevação e a taxa de precipitação (R mm/h) é então estimada por meio da chamada relação Z-R, a qual é derivada empiricamente utilizando constantes a e bconforme a Equação 3.4:

$$Z = aR^b \tag{3.4}$$

As constantes empíricas a e b estão relacionadas ao tamanho e ao espectro de distribuição de gotas, sendo determinadas por métodos estatísticos (COSTA, 2007). Várias relações Z-R foram propostas na literatura, sendo que a mais conhecida e utilizada para chuvas estratiformes<sup>2</sup> deve-se a Marshall e Palmer (1948), definida como:

$$Z = 200R^{1,6} \tag{3.5}$$

No caso de chuvas convectivas, a rede de radares norte-americana NEXt Generation Weather RADar (NEXRAD) da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOOA) utiliza a relação proposta por Vieux e Bedient (1998), expressa por:

 $<sup>^{2}</sup>$ "Os sistemas estratiformes são caracterizados por chuvas leves e moderadas e grande área de cobertura" (DAMIAN, 2012).

$$Z = 300R^{1,4} \tag{3.6}$$

Um dos principais avanços dos radares foi a medição da velocidade radial dos alvos através do efeito *Doppler*. Isso possibilitou estudar processos de inicialização de tempestades, além de identificar fenômenos meteorológicos severos tais como frentes de rajadas, *microbursts* e *wind shears* (tesouras de vento), através da caracterização do movimento circular de sistemas convectivos. A adoção de radares do tipo Doppler melhorou a qualidade dos sistemas de alertas meteorológicos, minimizando danos físicos e materiais das populações atingidas (AHRENS, 1998, pp. 424–425).

A atual geração de radares meteorológicos constitui-se de radares de dupla polarização, em que há emissão e recepção do feixe de micro-ondas tanto no plano horizontal quanto no vertical, conforme ilustrado na Figura 3.4. Isso possibilita o cálculo de variáveis polarimétricas relativas à informação resultante de cada polarização. Assim, melhora-se a identificação dos alvos meteorológicos, a classificação dos hidrometeoros e a consequente estimativa de precipitação (KUMJIAN, 2013). O radar convencional de polarização simples geralmente emite e recebe o feixe de micro-ondas somente no plano horizontal, não sendo possível obter informações adicionais tais como a forma e o tamanho dos alvos.





Fonte: Adaptada de Kumjian (2013).

O Brasil dispõe atualmente de uma rede com 34 radares instalados (Figura 3.5), que foi expandida e modernizada na última década com a aquisição de radares *Doppler* 



Figura 3.5 - Rede de radares instalados ou em instalação no Brasil.

Fonte: Adaptado de Sakuragi (2018).

de dupla polarização. Ainda assim existem regiões sem cobertura ou com cobertura parcial devido a bloqueios por topografia, construções, torres metálicas entre outros.

Os dados de radar são obtidos pela varredura tridimensional da atmosfera ao redor do instrumento. Num radar meteorológico, geralmente fixa-se o ângulo de elevação da antena, começando-se pela elevação menor, e varrem-se todos os azimutes até completar um giro de 360 graus e assim por diante para as elevações discretas seguintes (Figura 3.7(a)). Existem variações desta forma de varredura depende do procedimento adotado e do tipo de visualização que se deseja obter. Considerando-se um dado azimute de uma dada elevação, a energia retroespalhada de volta ao radar pelos alvos (água liquida, granizo, neve, etc.) corresponde à refletividade (Z). Para cada elevação discreta gera-se um campo denominado *Plan Position Indicator* (PPI) (SÁNCHEZ-DIEZMA; CORRAL, 2000), que corresponde à projeção num plano horizontal das refletividades correspondentes aos alvos ao longo do feixe para cada azimute discreto utilizando coordenadas polares, isto é, azimute em relação ao Norte verdadeiro e distância radial, sendo esta obtida pelo tempo do eco de retorno ao radar. Na terminologia de radar, denomina-se "bin" como sendo o volume correspondente ao cone circular truncado definido ao longo do feixe de varredura do radar, assim como ilustrado na Figura 3.6 para um determinado feixe do radar. Dessa forma, o radar em cada elevação e azimute específicos varre uma sequência de bins ao longo do feixe. Os azimutes discretos são definidos pela resolução angular do radar, enquanto que a altura do cone (dimensão ao longo do feixe) é definida pela resolução radial do radar. Na prática, cada *bin* é aproximado por um cubo e a resolução radial resulta da divisão do alcance efetivo do radar pelo número de bins ao longo da direção do feixe (DUDA, 2008).

Figura 3.6 - Ilustração de um bin específico na direção radial do feixe do radar para ângulos de elevação e azimute determinados.



Fonte: Adaptada de Sánchez-Diezma e Corral (2000).

No caso dos radares do Cemaden, tem-se 1000 bins para um alcance de 250 km, resultando numa resolução radial de 250 m. A resolução azimutal é de 1<sup>o</sup>, tendo-se portanto 360 radiais. O conjunto de PPIs obtidos para diferentes elevações (Figura 3.7(c)) dá origem a um volume semiesférico de medidas de refletividade também denominado dado volumétrico ou volume do radar (SÁNCHEZ-DIEZMA; CORRAL, 2000).

A partir dos dados derivados dos PPIs é possível se obter outras imagens que são convenientes para o monitoramento da precipitação, como por exemplo à imagem Constant Altitude Plan Position Indicator (CAPPI), relativa a um corte transversal numa altitude constante, a qual é obtida a partir de vários PPIs, conforme ilustra a Figura 3.7. O CAPPI é apresentado em coordenadas cartesianas projetadas sobre a superfície e com correção de curvatura da Terra, sendo o CAPPI com altitude de 3 km um dos principais produtos de radar utilizado para o monitoramento de chuvas.

Figura 3.7 - Ilustração da varredura realizada com ângulo de elevação fixo (PPI), sua projeção no plano horizontal e o dado volumétrico bruto correspondente a varreduras em várias elevações. Considerando-se um plano horizontal fixo com determinada altitude, pode-se ter uma imagem CAPPI, que corresponde aos valores de refletividade dos *bins* interceptados pelo plano.





(a) Varredura correspondente a um ângulo de (b) Projeção no plano horizontal dos bins iluelevação fixo ( $\Phi$ ). minados pelo radar numa dada elevação e para

(b) Projeção no plano horizontal dos bins iluminados pelo radar numa dada elevação e para um dado azimute para obtenção de uma imagem PPI (requer todos os azimutes).



(c) Esquema ilustrativo para obtenção de uma imagem CAPPI, podendo-se ver um esboço parcial do dado volumétrico do radar.

Fonte: Adaptada de Sánchez-Diezma e Corral (2000).

A Figura 3.9, apresenta o exemplo de um PPI e um CAPPI 3 km correspondentes a uma mesma varredura do radar de Jaraguari (JG1), que foram gerados pelo software Rainbow <sup>®</sup>. Como é possível perceber ao se comparar essas imagens, a imagem PPI apresenta contaminação devida a ecos de terreno próxima ao radar, com valores de refletividade (< 8 dBZ). Essa contaminação é devida à interação de lóbulos secundários com a superfície (Figura 3.8), que acabam incrementado a refletividade associada ao volume imageado (SARAIVA et al., 1998; SÁNCHEZ-DIEZMA; CORRAL, 2000), podendo levar à falsa interpretação da existência de sistemas precipitantes atuando próximos ao radar e os consequentes erros na quantificação da precipitação. Por outro lado a imagem CAPPI é pouco afetada por esse efeito, pois os dados relativos a distâncias próximas ao radar são correspondentes a projeções de elevações mais altas, justificando assim sua conveniência para estimativa da precipitação.





(a) Feixe de micro-ondas do radar com lóbulo principal e lóbulos secundários.



(b) Ecos do terreno causados por lóbulos secundários (esquerda) e imagem da refletividade contaminada por esses ecos (direita).

Fonte: Adaptada de Sánchez-Diezma e Corral (2000).

Figura 3.9 - Imagens PPI da primeira elevação  $(0,3^o)$ e CAPPI 3 km do radar de Jaraguari, correspondentes à varredura das 14h UTC de 7 set. 2014.



(a)



(b) Fonte: Rainbow <sup>®</sup> (2017)

#### 3.2 Descargas atmosféricas

As descargas atmosféricas constituem uma fonte adicional de informação sobre tempestades. O raio (flash) pode ser formado por várias descargas atmosféricas de alta corrente (strokes), que normalmente estão associadas a tempestades (UMAN, 2001). A eletrificação das nuvens que por consequência levam a descargas atmosféricas, é resultado de processos que causam a separação das cargas elétricas dentro da nuvem tornando-a um dipolo elétrico positivo, com cargas positivas no topo e negativas na base (MENDES; DOMINGUES, 2002). Ou então, pode-se formar um tripolo elétrico, com uma boa parte da nuvem ocupada por cargas negativas entre duas regiões menos expressivas e praticamente com quantidades iguais de cargas positivas (Figura 3.10). Dependendo do local de observação, esse tipo de nuvem pode indicar um dipolo elétrico positivo ou negativo composto de cargas negativas no topo (WILLIAMS, 1989). Esses processos são definidos principalmente pelas teorias de eletrificação por precipitação ou por convecção. Segundo Mendes e Domingues (2002), a hipótese da precipitação consiste no acúmulo de cargas negativas por hidrometeoros em movimento descendente devido à gravidade, em detrimento a partículas leves positivamente carregadas. Esse acúmulo pode ocorrer por dois tipos de mecanismos microscópicos, indução elétrica e transferência de carga por meio de colisões entre granizo e cristais de gelo. Já o processo convectivo consiste no transporte de cargas elétricas para dentro da nuvem através das correntes ascendentes e seu acúmulo seletivo em regiões específicas, devido à captura de íons positivos pelos hidrometeoros que por sua vez atraem íons negativos livres na atmosfera (VONNEGUT, 1953 apud WILLIAMS, 1989).

As descargas atmosféricas podem ser classificadas por sua origem, destino, carga e sentido (UMAN, 2001). A Figura 3.11, exemplifica os tipos de descargas nuvem-solo (NS) também denominadas de raio, definidas em função do sinal da carga efetiva transferida da nuvem ao solo: negativas e positivas (ELAT, 2017).

Existem ainda as descargas intranuvem (IN) e nuvem-nuvem (NN) (Figura 3.12). A maior parte das descargas atmosféricas no solo tem como origem nuvens do tipo Cumulonimbus (CB), configurando assim descargas do tipo NS. Já os raios ascendentes são raros e normalmente registrados em topos de montanhas ou grandes estruturas como torres. Os NS são mais conhecidos especialmente porque apresentam maior potencial destrutivo. Por outro lado as descargas do tipo IN representam 70% do total de descargas registradas, embora não sejam tão conhecidos devido à dificuldade de serem visualizados pois ocorrem inter ou intranuvens do tipo CB ou ainda

Figura 3.10 - Ilustração da estrutura de uma nuvem de tempestade elétrica tripolo baseada em medidas no local por Simpson et al. (apud WILLIAMS, 1989).



Fonte: Adaptada de Simpson et al. (apud WILLIAMS, 1989).

nuvem-ar (UMAN, 2001).

As descargas do tipo IN são predecessoras das descargas NS, pois a partir das descargas intranuvem ocorre à fuga de elétrons pela base da nuvem fazendo surgir uma descarga capaz de quebrar à rigidez dielétrica do ar, tornando-o condutor ao invés de isolante, essa descarga é denominada líder escalonado e segue em direção ao solo. A carga armazenada nesse raio gera um campo elétrico intenso que ao aproximar-se do solo quebra a rigidez do ar fazendo surgir descargas ascendentes denominadas líder ascendente ou descargas conectantes em direção ao líder escalonado. Ao se encontrarem é formado um canal ionizado que permite então fluxo de corrente também conhecida como descarga de retorno, esse fluxo gera uma grande luminosidade e também radiação eletromagnética (EM) que podem ser detectadas por sensores (STRAUSS, 2013). Em média a descarga de retorno dura cerca de 100  $\mu s$  com pico de corrente de 30 kA com variações entre dezenas a centenas de quiloamperes, e a carga total transferida ao solo é de cerca de 20 *coulombs* (PINTO JUNIOR; PINTO, 2008).

As redes para localização de descargas ou *Lightning Location Networks* (LLN), são sistemas compostos de sensores que possibilitam a localização e caracterização das descargas atmosféricas através da análise do campo EM gerado, em frequências que vão desde a *Very Low Frequency* (VLF) até *Very High Frequency* (VHF) (PINTO JUNIOR et al., 2006).

Figura 3.11 - Classificação dos tipos de descargas no solo.



(a) Descarga NS negativa e raio ascendente negativo.



(b) Descarga NS positiva e raio ascendente positivo.

Fonte: Adaptada de ELAT (2017).

Iniciada no século XX a detecção de descargas através da análise quantitativa de sinais atmosféricos de rádio, também denominado *sferics*, foi aprimorada com o uso de múltiplos detectores para determinação da direção magnética de chegada ou *magnetic direction-finding* (MDF). Essa aplicação foi uma das primeiras a permitir a identificação e rastreio de tempestades elétricas a médias e longas distâncias com acurácia de 10km para posicionamento. Outra técnica empregada para detecção é a de tempo de chegada ou *Time-Of-Arrival* (TOA), onde a diferença constante do tempo de chegada do sinal da descarga entre dois sensores define uma hipérbole. A localização é determinada a partir da intersecção entre às hipérboles (Figura 3.13), para resolver os casos de ambiguidades devido a múltiplas intersecções, utiliza se a informação de MDF (CUMMINS; MURPHY, 2009).

Figura 3.12 - Classificação dos tipos de descarga na nuvem.



Ilustração dos tipos de descargas que ocorrem dentro da nuvem IN ou entre nuvens NN. Fonte: Adaptada de ELAT (2017).





Círculos apresentam a posição dos sensores. A imagem à direta demonstra a localização determinada pela intersecção das hipérboles de 2 sensores, baseada na diferença do tempo de chegada. A imagem à esquerda ilustra uma localização ambígua devido à dupla intersecção das hipérboles.

Fonte: Adaptada de Cummins e Murphy (2009).

O termo *Total Lightning Mapping* está ligado à identificação de forma apurada tanto de descargas NS quanto IN baseada em métodos de busca de direção magnética e TOA. Aplicações que se destacaram nessa área foram as redes baseadas no uso de múltiplos sensores na faixa do VHF, onde é possível através de um arranjo dos detectores determinar o ângulo de chegada da fonte de descarga através da diferença do tempo de chegada em cada sensor (TOA). Esse princípio é denominado interferometria e funciona bem quando o número adequado de sensores fornecem hipérboles que apontam para mesma direção, como demonstrado na Figura 3.14 presente no trabalho de Cummins e Murphy (2009).





A pequena distância entre os sensores permite um apontamento ideal para a fonte de descarga.

Fonte: Adaptada de Cummins e Murphy (2009).

No Brasil a atividade de detecção de descargas teve início a partir da aquisição de 4 sensores LPATS-III VLF/LF pela Companhia Energética de Minas Gerais (Cemig) em 1988, dando origem ao que iria se tornar mais tarde em 2004 a RINDAT já com integração de sensores pertencentes ao Sistema Meteorológico do Paraná (Simepar), Eletrobrás FURNAS e do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) totalizando 30 sensores. Os *Lightning Position and Tracking System* LPATS inicialmente instalados possuíam baixa eficiência de detecção, acurácia de localização além de cobertura limitada (PINTO JUNIOR et al., 2006). Com o tempo mais sensores foram incluídos a rede além da adoção de novas tecnologias como *Improved Accuracy through Combined Technology* (IMPACT) com um algoritmo que combinava as técnicas de direção magnética de chegada (MDF) e informações de tempo de chegada (TOA) (CUMMINS; MURPHY, 2009). Segundo Naccarato et al. (2016), a RINDAT contava com 27 sensores ativos em 2016 (Figura 3.15), além da previsão da instalação de novos equipamentos nas regiões Sul e Centro-Oeste totalizando 42 sensores em 2017.



Figura 3.15 - Distribuição geográfica dos sensores da RINDAT.

Fonte: Adaptado de Naccarato et al. (2016).

A rede BrasilDAT foi criada em 2008 sobre a coordenação do grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT/INPE), a princípio a partir da integração das seguintes redes: Sistema de Detecção de Descargas Atmosféricas e Eventos Meteorológicos Críticos (SIDDEM), Sistema de Proteção da Amazônia (SIPAM) e RINDAT. Totalizando 47 sensores do tipo LPATS e IMPACT (NACCARATO; PINTO JUNIOR, 2008). A partir de dezembro de 2010 em parceria com a Earth Networks, novos sensores denominados *WeatherBug Total Lightning Sensors* (WTLS) foram adicionados à rede. Esses equipamentos trabalham com ampla faixa de frequências (1Hz - 12MHz), possibilitando assim a detecção de descargas intranuvem. Segundo Pinto JUNIOR et al. (2011), a eficiência desses sensores se deve a nova abordagem de determinação do TOA para múltiplos detectores e a metodologia de correlação cruzada para análise da forma da onda para cada descarga recebida. Atualmente a rede BrasilDAT possui 56 sensores operacionais (Figura 3.16) (NACCARATO et al., 2016).

Segundo Naccarato et al. (2016), ambas as redes apresentam valores de eficiência de



Figura 3.16 - Distribuição geográfica dos sensores da BrasilDAT.

Fonte: Adaptado de Naccarato et al. (2016).

detecção (ED) entre 70 e 80%, enquanto que a acurácia para localização é de cerca de 400 a 900 m. No caso da rede BrasilDAT a taxa de acerto para discriminação do tipo de descarga fica em torno de 60 a 80%. Porém numa análise realizada por Naccarato et al. (2014), a ED da rede BrasilDAT em comparação com os dados do *Lightning Imaging Sensor* (LIS) a bordo do satélite TRMM no melhor caso ficou em torno de 50% (região Sudeste do Brasil) conforme ilustra a Figura 3.17, a eficiência ficou inclusive abaixo daquela estimada com o modelo relativo de ED (Figura 3.18), o qual combina a abordagem proposta por Murphy et al. (2002), para o ajuste de uma função para estimar ED através do cálculo da distribuição cumulativa de pico de corrente (DCP) com a metodologia apresentada por Rompala et al. (2003) que utiliza o cálculo da DCP para uma área de eficiência reconhecidamente melhor e ajuste de uma função teórica de distribuição de probabilidade. A partir dessa função de probabilidade e do cálculo da DCP para área de cobertura dividida em células, é possível determinar a proporção das descargas detectadas para cada célula. A eficiência para área de cobertura é então obtida através da razão entre a proporção detectada e número total de eventos (NACCARATO et al., 2006).



Figura 3.17 - Eficiência de detecção para rede BrasilDAT com referência aos dados de 2013 do sensor LIS.

Fonte: Adaptado de Naccarato et al. (2014).

## 3.3 Descrição do conjunto de dados

Neste trabalho, para teste das metodologias de identificação e correção de bloqueios propostas, foram utilizadas as informações de data (ano-mês-dia), horário (hora:minuto:segundo.microssegundo) e localização estimada (lat/long) de ocorrência de descargas atmosféricas. Esses dados são comumente encontrados no formato Universal ASCII Lightning Format (UALF), que são arquivos de texto formatados em colunas de atributos tais como latitude, longitude, instante de ocorrência, polaridade e tipo, sendo cada linha correspondente a uma descarga (*flash*). Especificamente para essa pesquisa as informações utilizadas foram exportadas a partir do banco de dados das instituições responsáveis, no formato *Comma-Separated Values* (CSV). Esses arquivos serviram de entrada, para o processamento nesse trabalho através da estrutura de dados *DataFrame* da biblioteca pandas<sup>3</sup> escrita em linguagem Python, a qual fornece uma gama de métodos para análise e visualização de dados, especialmente para o processamento de séries históricas.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>Documentação Pandas *DataFrame*, disponível em: https://pandas.pydata.org/pandas-docs/stable/generated/pandas.DataFrame.html, acesso em agosto 2017

Figura 3.18 - Eficiência de detecção estimada para rede BrasilDAT através do modelo relativo (RMED4) proposto por Naccarato et al. (2014).



Fonte: Adaptado de Naccarato et al. (2014).

Os seguintes tipos de descargas foram utilizadas nessa pesquisa, descargas nuvemsolo da RINDAT, descargas totais, isto é, nuvem-solo e intranuvem da BrasilDAT. Esses dados de descargas foram fornecidos pelo INPE e Cemaden, respectivamente. O Cemaden também forneceu os dados volumétricos dos radares de Jaraguari (JG1), Santa Teresa (ST1) e Almenara (AN1), os quais serão melhor descritos adiante.

A Figura 3.19 ilustra a taxa mensal de descargas nuvem-solo ocorridas nas áreas de alcance efetivo dos radares utilizados nesse trabalho, para o período de testes escolhido. Importante notar que a quantidade de registros de descargas feitos pela rede RINDAT é inferior aos da rede BrasilDAT. Isso se deve a inconsistências nos dados fornecidos, os quais apresentam valores nulos de detecção para vários meses do ano de 2015, que possuem registros pela rede BrasilDAT. A causa provável para esse problema é o problema em um ou mais sensores da rede que impediu a detecção de raios nas áreas mencionadas, ou falha na recepção e armazenamento dessa informação pela instituição responsável.

Os radares utilizados são do tipo Doppler de Banda S de dupla polarização, os quais

Figura 3.19 - Distribuição mensal de descargas atmosféricas nas áreas dos radares do Cemaden do conjunto de dados disponíveis para as redes RINDAT (a) e BrasilDAT (b).



são operados pelo Cemaden $^4,$ a Tabela 3.2 apresenta os parâmetros operacionais

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>Página do Cemaden com informações sobre a aquisição dos radares http://www.cemaden.

desses radares. A Figura 3.20 ilustra o alcance efetivo de cada radar, dado por um círculo de raio 250 km centrado no radar, assumindo-se ausência de bloqueios. Nesse caso, a Área Efetiva de Abrangência do Radar (AEAR) é simplesmente dada pela área do círculo para cada elevação considerada, sendo o círculo máximo relativo à elevação mais baixa. O correspondente alcance de 250 km aplica-se a esse tipo de radar, que sofre um menor efeito de atenuação de sinal que os demais tipos de radares (LEITÃO, 2007). Entretanto, para cada elevação, a AEAR pode ser diminuída pela presença de bloqueios devidos, por exemplo, ao relevo, e a variações do índice de refração da atmosfera (MONCUNILL, 2010).

Tabela 3.2 - Parâmetros operacionais dos radares Meteor 1600S (SELEX) do Cemaden

D. A	
Parametros	Caracteristicas
Frequência de Operação	2,7 - 2,9 GHz
Polarização	Horizontal-Vertical Simultânea
Freq. Repetição Pulso	600/480  Hz
Largura de Pulso	1°
Altitude	1009 m (ST1), 814 m (AN1) e 753 m (JG1)
Elevações	13 (0,3; 1,4; 2,6; 4,1; 5,8; 7,8; 10,2; 12,9; 16,1; 19,8;
	$24,1; 29,1; 35)^{\circ}$
Resolução Radial (PPI)	$250 \mathrm{~m}$
Resolução Temporal	$600~{\rm s}~(466~{\rm s}$ duração var redura volumétrica $250~{\rm km})$

Figura 3.20 - Localização dos radares utilizados na pesquisa, o círculo delimita o alcance de 250 km.



gov.br/contratos-2012/, acesso em 04 de Abril 2017.

Os radares do Cemaden utilizam o mesmo esquema de varredura volumétrica com 13 elevações, sendo que o conjunto das medidas para todas as elevações agrupadas num único arquivo constitui o chamado dado volumétrico. Os 3 radares selecionados são descritos a seguir:

- 1 Jaraguari instalação março de 2014, sendo um dos mais estáveis da rede de radares do Cemaden, apresentando poucas panes. Graças à ausência de montanhas à sua volta, demonstra uma visada praticamente sem obstrução devido à interceptação pelo relevo, como ilustra a Figura 4.16(a), onde foram identificados poucos azimutes afetados e mesmo assim com valores ínfimo de bloqueio(fração de bloqueio do feixe (BBF) < 1%) no caso desse radar (Figura 4.16(b)). Nesse caso pode-se considerar o raio efetivo praticamente igual ao alcance máximo de 250 km, embora como descrito na Seção 5.1, esse radar também apresente algumas falhas devidas a bloqueios por obstáculos.
- 2 Santa Teresa instalação novembro de 2014, apresentando bloqueio de feixe no quadrante noroeste (ver Seção 4.2 sobre detecção de bloqueios para maiores detalhes).
- 3 Almenara instalação outubro de 2014, apresentando bloqueio de feixe no quadrante sudoeste.

Para ratificar que as falhas observadas nas imagens dos radares objeto desse estudo eram devidas a bloqueios de visada, buscou-se identificar através de variáveis polarimétricas padrões que indicassem o efeito desse tipo de problema. Vale ressaltar que para os casos de obstrução total dos azimutes, como o que ocorre no quadrante noroeste do radar de Santa Teresa (Figuras 3.22(a), 3.22(b), 3.22(c), 3.22(d)), a identificação através dessas variáveis é impossível devido à perda total de informação naquele nível (elevação 0, 3°). Portanto, foram geradas imagens PPI da primeira elevação de cada um dos radares das seguintes variáveis: Refletividade (Z), Refletividade diferencial (ZDR), Diferencial de fase ( $\phi_{DP}$ ) e Diferencial de fase específica ( $K_{DP}$ ). As quais permitiram caracterizar adequadamente as regiões de bloqueios nas imagens de radar, tanto por serem afetadas pelos bloqueios parciais como é o caso de Z (Figuras 3.21(a), 3.22(a) e 3.23(a)) e ZDR, quanto por serem imunes a eles como ocorre com o  $\phi_{DP}$  e  $K_{DP}$ . A ZDR apresenta sensibilidade a bloqueios parciais anisotrópicos causados por árvores caducifólias (BOETTCHER et al., 2011) e torres (KUMJIAN, 2013) pois essas estruturas bloqueiam mais a polarização vertical que a
horizontal causando uma forte influência radial positiva da refletividade diferencial (Figuras 3.21(b), 3.22(b) e 3.23(b)). Já o  $\phi_{DP}$  é proporcional ao número e concentração de hidrometeoros, e tende a aumentar com a variação positiva do tamanho dos alvos, essa variável mede a diferença de fase entre a polarização horizontal e vertical da energia retroespalhada pelos alvos e não a energia diretamente, por esse motivo ela não é afetada por bloqueios parciais (KUMJIAN, 2013) (Figuras 3.21(c), 3.22(c) e 3.23(c)), assim como o  $K_{DP}$  é imune a bloqueios parciais (BOETTCHER et al., 2011) (Figuras 3.21(d), 3.22(d) e 3.23(d)).

Figura 3.21 - Caracterização de bloqueios (elipses em preto) no radar de Jaraguari utilizando imagens PPI de Refletividade (Z), Refletividade diferencial (ZDR), Diferencial de fase ( $\phi_{DP}$ ) e Diferencial de fase específica ( $K_{DP}$ ) correspondentes à varredura das 19h UTC de 7 set. 2014





Fonte: Adaptada de Rainbow <sup>®</sup> (2018)

Figura 3.22 - Caracterização de bloqueios (elipses em preto) no radar de Santa Teresa utilizando imagens PPI de Refletividade (Z), Refletividade diferencial (ZDR), Diferencial de fase ( $\phi_{DP}$ ) e Diferencial de fase específica ( $K_{DP}$ ) correspondentes à varredura das 01h UTC de 7 fev. 2015



Fonte: Adaptada de Rainbow  $^{\textcircled{R}}$  (2018)

A imagem da Figura 3.24, gerada a partir dos dados dos radares de Santa Teresa e Almenara, mostra o acumulado de precipitação para um período de 6 dias em fevereiro de 2015 estimado a partir da refletividade medida por esses radares e uma relação Z-R, podendo-se identificar facilmente os setores angulares sem ou com baixos valores de precipitação nos dois radares, devidos aos bloqueios de feixes causados a noroeste de ST1 e sudoeste de AN1. Para facilitar a identificação dos setores afetados, foi incluída na imagem o contorno dos bloqueios detectados com o método estatístico proposto nesse trabalho, e descrito na Seção 4.2.

Figura 3.23 - Caracterização de bloqueios (elipses em preto) no radar de Almenara utilizando imagens PPI de Refletividade (Z), Refletividade diferencial (ZDR), Diferencial de fase ( $\phi_{DP}$ ) e Diferencial de fase específica ( $K_{DP}$ ) correspondentes à varredura das 00h UTC de 7 fev. 2015



Fonte: Adaptada de Rainbow<sup>®</sup> (2018)

O radar JG1 foi utilizado para desenvolver, testar e aplicar a técnica proposta nesse trabalho para correção de bloqueios, pois sua visada apresenta menor grau de obstrução permitindo assim a simulação de bloqueios para estimativa de refletividade e comparação com a refletividade medida pelo radar. Os radares AN1 e ST1 foram escolhidos para os testes de validação da técnica proposta, pois além de sofrerem bloqueio de feixe pelo relevo, apresentam uma área de sobreposição que facilita as comparações quantitativas das estimativas de precipitação.

A Figura 3.25, apresenta a distribuição mensal dos dados volumétricos disponíveis



Figura 3.24 - Campo de precipitação acumulada nos radares de Santa Teresa e Almenara (1 a 6 fev. 2015) e delimitação das áreas afetadas por bloqueios.

Os setores angulares em preto delimitam as áreas afetadas por bloqueios, as quais foram encontradas utilizando o método estatístico proposto (ver Seção 5.1).

para os radares considerados. Cada dado volumétrico corresponde a uma varredura completa em elevação e azimute, ou seja, para cada elevação são varridos todos os azimutes. A variabilidade dessas distribuições deve-se principalmente a problemas na transmissão dos dados ao operador do sistema ou pane dos equipamentos, uma vez que as varreduras completas são feitas automaticamente a cada 10 minutos, independentemente de haver ou não sistema precipitante atuando na área do radar.





## 4 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia proposta para a identificação e mitigação de problemas relacionados a bloqueios em radares meteorológicos explorando a correlação entre a refletividade medida pelo radar e a densidade de ocorrência de descargas atmosféricas. Nesse escopo, o primeiro passo foi o desenvolvimento de um método para identificação de bloqueios do feixe de micro-ondas dos radares.

Neste trabalho a identificação de bloqueios foi baseada na análise estatística dos acumulados de refletividade de imagens PPI para um período de tempo superior a um ano. Essa análise permitiu identificar os bloqueios como sendo aqueles correspondentes a mínimos locais de acumulados de refletividade, como mostrado na Subseção 4.2.1. A principal vantagem dessa abordagem é trabalhar com dados brutos gerados tanto por radares de dupla polarização quanto de polarização simples, que constituem a grande maioria da rede atual no Brasil.

Além da identificação de bloqueios, este trabalho teve como objetivo desenvolver um método que permitisse o preenchimento de falhas devidas a bloqueios em radares, a partir da correlação existente entre a refletividade radar e o registro de descargas atmosféricas (MICHIMOTO, 1991), especialmente em áreas de precipitação convectiva (PETERSEN; RUTLEDGE, 1998). O método proposto baseia-se na determinação de um fator denominado *Instantaneous Reflectivity-Lightning Ratio* (IZLR), que permite estimar refletividade a partir do campo de densidade de descargas suavizado.

A base para o cálculo do IZLR é a otimização de forma iterativa de parâmetros para cálculo do campo de densidade de descargas. Isto é feito por um processo de otimização cuja função objetivo (*findWindow*) busca maximizar a correlação obtida entre a distribuição espacial do campo de refletividade do radar e o campo de densidade de descargas com base no *Matthews Correlation Coefficient* (MCC). Esse processo permite definir de forma "ótima" os parâmetros para integração temporal e espacial das descargas atmosféricas referentes a cada imagem do radar.

## 4.1 Métricas utilizadas

O processo de análise quantitativa objetiva a comparação de imagens a partir de informações quantitativas, sobre os fenômenos a que se propõe avaliar. Utilizando cálculos estatísticos que visam medir a eficiência/desempenho do valor estimado frente ao observado, por meio de índice ou métrica quantitativa pixel a pixel (WILKS, 2006).

Para o procedimento do cálculo da correlação entre os campos de refletividade do radar, densidade de ocorrência de descargas e refletividade estimada através do fator IZLR foram definidos limiares que permitiram a categorização dos dados de forma binária, ou seja, presença (pixel = 1) ou ausência de informação (pixel = 0) relacionada ao evento chuvoso (Figura 4.19). O processo de categorização permitiu a análise das estimativas de forma não probabilística através da tabela de contingência, a qual permite a sumarização dos dados e redução da dimensionalidade do problema de comparação dos pares de informação (observada/estimada) (WILKS, 2006).

Figura 4.1 - Tabela de contingência para sumarização dos eventos categorizados.



Fonte: Adaptada de Wilks (2006) e Paz e Collischonn (2011) (apud SANTOS, 2014).

Os símbolos ou categorias presentes na Figura 4.1, serão referenciados nesse trabalho como:

- (a) TP ou *True Positive Case* corresponde à quantidade de pixels corretamente estimados com presença de informação, ou seja, refletividade  $\geq 20$ dBZ equivalente ao limiar para chuva fraca  $\approx 1 \text{ mm h}^{-1}$  (ROGERS et al., 1991; GEÇER, 2005) e densidade de descarga = 0 *flash* ou precipitação acumulada (radar/estimada com IZLR) > 0 mm.
- (b) FP ou *False Positive Case* corresponde à quantidade de pixels incorretamente estimados com presença de informação, ou seja, refletividade < 20

dBZ e densidade de descarga > 0 flash ou precipitação acumulada (radar) = 0 mm e estimada (IZLR) > 0 mm.

- (c) FN ou False Negative Case corresponde à quantidade de pixels incorretamente estimados com ausência de informação, ou seja, refletividade ≥ 20 dBZ e densidade de descarga = 0 flash ou precipitação acumulada (radar) > 0 mm e estimada (IZLR) = 0 mm.
- (d) TN ou True Negative Case corresponde à quantidade de pixels corretamente estimados com ausência de informação, ou seja, refletividade < 20 dBZ e densidade de descarga = 0 flash ou precipitação acumulada (radar/IZLR) = 0 mm.
- (n) TP + TN + FP + FN corresponde total de eventos.

A tabela de contingência apresenta o quantitativo referente à frequência de cada ocorrência previamente delimitada pelos casos de presença ou ausência de informação, para comparação entre os dados estimados (IZLR) e observados (radar), sendo este último tomado como referência. A partir dessa sintetização foram obtidas medidas de desempenho baseadas nos seguintes índices e métricas:

#### a) Matthews Correlation Coefficient (MCC)

Essa métrica foi originalmente proposta por (MATTHEWS, 1975) para avaliação de previsões da formação de estruturas secundárias numa molécula bioquímica com base na sequência de aminoácidos. Desde então têm sido empregada com sucesso para análise de métodos de previsão baseados em classificação, sendo considerada uma das melhores para qualificar classificadores binários. Além de ser recomendada para problemas de classes desbalanceadas e para qualquer tamanho de conjunto de dados (BALDI et al., 2000). Segundo Baldi et al. (2000), o cálculo do MCC (Equação 4.1) pode ser entendido como um meio para obtenção do coeficiente de correlação entre duas variáveis a partir da matriz de contingência, onde os valores variam entre -1 (total desacordo entre o valor estimado e observado) e 1 (perfeita concordância).

$$MCC = \frac{TP \times TN - FP \times FN}{\sqrt{(TP + FP)(TP + FN)(TN + FP)(TN + FN)}}$$
(4.1)

O cálculo do MCC provê melhor capacidade de avaliação das previsões de forma balanceada, pelo fato de utilizar todos os termos da tabela de contingência (TP, TN, FP e FN). Porém algumas vezes o coeficiente apresenta certa limitação para avaliar de forma clara, por exemplo, a correlação tende a ser alta quando a resposta apresenta poucos ou nenhum caso de falso positivo o mesmo ocorre quando há número reduzido de casos verdadeiros positivos (BALDI et al., 2000).

O MCC não pode ser definido quando a soma de qualquer um dos termos: TP+FN, TP+FP, TN+FP ou TN+FN é igual à zero, por exemplo, quando não existe a previsão de casos positivos (BALDI et al., 2000).

#### b) Acurácia ou Proporção Correta (PC)

A obtenção da acurácia (Equação 4.2) visa quantificar percentualmente os acertos das estimativas sem contudo fazer distinção entre os acertos relativos à presença ou ausência de informação nos campos de dados observados e estimados categorizados. Seus valores variam de 0 a 1. Valores próximos a 1, indicam melhor desempenho do processo que gerou campo estimado em representar o campo observado (THEODO-RIDIS; KOUTROUMBAS, 2006).

$$PC = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$$
(4.2)

O fato de a acurácia ser apenas baseada no saldo dos acertos (TP + TN) frente o número total de eventos (TP + TN + FP + FN), pode levar a avaliação equivocada de um estimador por apresentar maior valor de acurácia, porém a resposta alcançada com o mesmo não é relevante para o problema. Como exemplo, para nossa aplicação o conveniente é que a resposta dada seja pertinente à determinação adequada dos casos de presença de informação no campo estimado que corresponda à correta identificação dos pixels com refletividade na imagem do radar a partir do campo de densidade de descargas atmosféricas. O fato de existir um grande desequilíbrio das classes, como há na maioria dos casos existe o predomínio dos eventos de ausência de informação ao compararmos os campos categorizados de refletividade e densidade de descargas. Isso pode levar a uma previsão majoritária dessa classe e alta acurácia de um estimador que não é útil ao domínio do problema, num problema conhecido como paradoxo da Acurácia (BROWNLEE, 2014).

No contexto desse trabalho a acurácia foi inicialmente utilizada para avaliar as estimativas feitas a partir da categorização do campo de densidade de descargas para a distribuição espacial da informação de refletividade da imagem do radar, num processo iterativo para definição de parâmetros de definição da janela temporal de integração de descargas e obtenção do fator IZLR. Porém após a realização de alguns testes de desempenho, descritos adiante na Seção 4.3.2 e pelo problema já mencionado, o coeficiente de correlação de Matthews apresentou melhor desempenho sendo adotado então para o uso na função objetivo minimizada através do processo de otimização (ver Seção 4.3.3).

## c) F-Score, Revocação (Recall) e Precisão (Precision)

A adoção da métrica *F-Score* visa complementar a informação fornecida pelo MCC, especialmente nos casos onde ocorre a prevalência de uma classe levando a uma indeterminação (MCC = 0) (BALDI et al., 2000). A *F-Score* (Equação 4.5) é a média harmônica ponderada da Revocação (Equação 4.4) e Precisão (Equação 4.3), no escopo desse trabalho ambas foram consideradas com mesma relevância ( $\beta = 1$ ). O conceito dessa medida vem da aplicação a problemas de recuperação de informações, onde a Revocação é a frequência com que uma classe relevante é recuperada, por exemplo, casos de presença de chuva (F1\_True) ou ausência de chuva (F1\_False), enquanto que a Precisão é a frequência com que a classe recuperada ou as previsões são relevantes. Existem variações dessa métrica dependendo do tipo de análise que se deseja fazer a partir da informação recuperada, quando a revocação tem maior peso ( $\beta = 2$ ) ou ( $\beta = 0, 5$ ) quando se atribui maior ênfase a precisão. A *F-Score* destinase a combinar estas informações em uma única medida de pesquisa denominada efetividade (*effectiveness*) (POWERS, 2015).

$$Precisão = \frac{TP}{TP + FP} \tag{4.3}$$

$$Revoca \tilde{a} o = \frac{TP}{TP + FN} \tag{4.4}$$

$$F_{\beta} = (1 + \beta^2) \times \frac{Precisão \times Revocação}{\beta^2 \times Precisão + Revocação}$$
(4.5)

O uso da F-Score é recomendado principalmente quando se está interessado em apenas uma classe de evento (*True* ou *False*), atentando-se ao fato que os valores TN podem se alterar sem contudo modificar o valor da F-Score (POWERS, 2015).

#### d) Viés ou Tendência

Esse índice foi utilizado nesse trabalho para avaliar os campos de precipitação acu-

mulada resultantes da conversão da refletividade medida pelo radar e a estimada através do IZLR, a fim de indicar quão bem os valores de refletividade obtidos para correção de falhas devido a bloqueios no radar, são capazes de representar os padrões de chuva identificados pelo radar. Dessa forma para obtenção do viés (Equação 4.6), ambos os campos resultantes foram classificados como presença (precipitação acumulada > 0 mm) ou ausência do evento de chuva (precipitação acumulada = 0 mm) (Figura 4.2). Segundo Wilks (2006), os valores de viés < 1 indicam que os valores estimados tendem a subestimar os valores observados, enquanto que viés > 1 indica tendência de superestimar os valores observados, já quando viés = 1 as estimativas concordam com os valores observados. Ou seja, nesse trabalho espera-se que a integração espaço-temporal das descargas atmosféricas através do processo iterativo, permita alcançar maior correlação espacial com as medidas de refletividade do radar, e assim possibilitar melhores estimativas de refletividade para toda área de alcance do radar.

$$Vi\acute{e}s = \frac{TP + FP}{TP + FN} \tag{4.6}$$

Figura 4.2 - Exemplo da classificação dos campos de acumulados de precipitação obtidos para o período das 16h de 26 nov. 2015 às 0h de 27 nov. 2015, a partir das medidas de refletividade do radar de Almenara e estimadas com IZLR.



#### e) Coeficiente de correlação de Pearson (r)

No contexto desse trabalho o cálculo dessa correlação teve objetivo de avaliar o grau de relacionamento entre os pares de informação obtidos a partir dos campos de

precipitação acumulada, como forma de medir o quanto as estimativas geradas pelo método proposto eram representativas dos valores medidos pelo radar. Embora esse seja um cálculo estatístico muito utilizado para diversas áreas de estudos, é preciso levar em conta que ele não indica a origem dos erros presentes nas comparações, o que pode ocultar os desvios que estejam presentes nas previsões (WILKS, 2006). Porém ele tem sido utilizado com frequência para medir a linearidade da associação entre variáveis para análise na comparação entre resultados relativos à previsão por sensores remotos e modelos hidrológicos (SANTOS, 2014). A seguinte Equação 4.7 para o cálculo da correlação de Pearson (r) foi adaptada a partir da sua definição clássica presente em Theodoridis e Koutroumbas (2006), para obter a correlação entre os (i) valores pontuais dos campos de precipitação estimada com o fator IZLR  $(P_e)$  e observada com radar  $(P_o)$ , sendo  $\bar{P}_e \in \bar{P}_o$  as médias desses "n" valores referente à quantidade de pixels amostrados desses campos.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n} (P_e - \bar{P}_e)(P_o - \bar{P}_o)}{\left(\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (P_e - \bar{P}_e)^2}\right) \left(\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (P_o - \bar{P}_o)^2}\right)}$$
(4.7)

#### f) Root Mean Square Error (RMSE)

O uso desse índice permite avaliar em termos do erro médio quadrático as estimativas expressas em valores numéricos contínuos (não categorizados), fornecendo ponderação nos pesos quanto aos erros espaciais (SANTOS, 2014). Ele provê através de um único valor a similaridade média entre dois conjuntos de dados, nesse caso do conjunto de pontos dos campos de precipitação acumulada observada e estimada. O cálculo da RMSE é fortemente afetado por valores espúrios do conjunto de estimativas, adota-se a premissa que todos os pontos do conjunto analisado possuem valores corretos, permitindo assim obter o valor real da dispersão dos valores comparados diante erros não sistemáticos (WILKS, 2006). Segundo Wilks (2006), apesar da RMSE não indicar à direção dos desvios dos valores estimados em relação aos observados, ela permite a caracterização de forma qualitativa da resposta levando em conta a localização entre esses valores, além de possibilitar a identificação de erros indesejáveis das estimativas.

Nessa pesquisa o cálculo da raiz do erro médio quadrático foi utilizado para avaliar em conjunto com outros índices o desempenho do método de estimação de refletividade proposto ("estimador") com base nos campos de precipitação acumulada obtidos como resposta da aplicação de uma relação Z-R aos valores de refletividade estimada através do fator IZLR e medidos pelo radar. A raiz do erro médio quadrático foi obtida segundo a Equação 4.8, diretamente sobre as matrizes de valores acumulados em milímetros indicando a diferença quantitativa entre os *i* valores estimados pelo IZLR ( $P_e$ ) e os valores observados pelo radar ( $P_o$ ), para o conjunto dos "n" pontos desses campos. A representação do erro médio quadrático (*Mean Square Error* - MSE) através da sua raiz apresenta à vantagem de conservar a unidade da variável estimada, facilitando assim a sua interpretação como a magnitude típica de erro. Para uma perfeita estimativa temos MSE e por consequência RMSE = 0, desta forma RMSE > 0 representa a medida do erro entre o valor estimado e o observado (WILKS, 2006).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (P_e - P_o)^2}{n}}$$
(4.8)

## 4.2 Identificação de bloqueios

Neste trabalho foi proposta a identificação e preenchimento de falhas devidas a bloqueios. No tocante à identificação, o método baseado na análise estatística dos acumulados de refletividade para cada azimute discreto, descrito na Seção 4.2.1, apresentou melhor desempenho que a abordagem inicial voltada à detecção de linhas, descrita no Apêndice . A verificação dos resultados obtidos para identificação de bloqueios nos radares analisados, foi realizada através do cálculo da fração de bloqueio proposto por Bech et al. (2003), ver Seção 4.2.2.

## 4.2.1 Detecção de bloqueios por acumulados da refletividade por azimute discreto

Esta detecção baseia-se na análise dos acumulados de refletividade ( $Z = mm^6/m^3$ ) para períodos de muitos meses para cada azimute discreto (com resolução de 1 grau), sendo considerados como bloqueios os azimutes que apresentaram acumulados abaixo de certo limiar com azimutes vizinhos com acumulados compatíveis, em termos de ter uma vizinhança suave. Uma vez que são considerados acumulados de muitos meses, espera-se uma distribuição suave de refletividades para os azimutes. Consequentemente, valores baixos de acumulados só poderiam ser causados por bloqueios, conforme se observa, por exemplo, na Figura 4.3 para o radar de Jaraguari no período de abril/2014 a setembro/2015. Nesta abordagem foi considerada somente a imagem PPI da elevação mais próxima à superfície (0,3 graus), pois se trata da elevação com maior potencial a sofrer bloqueios, na sua maioria causados pelo relevo. Entretanto, esta abordagem também aplica-se a bloqueios causados por obstáculos artificiais.

Figura 4.3 - Refletividade acumulada PPIs da primeira elevação (0,3 graus) do radar de Jaraguari (a) somados para o período de abril/2014 a setembro/2015 a cada 10 minutos. Os bloqueios correspondem às linhas horizontais caracterizadas por valores baixos de acumulado em relação às linhas vizinhas. Detalhe da região possivelmente afetada por eco de terreno (b), devido alta refletividade apresentada (> 80 dBZ) e geometria uniforme.



Fonte	Tipo	Período
JG1	Refletividade	$\mathrm{Abr}/2014$ a $\mathrm{Set}/2015$
ST1	Refletividade	Out/2014 a Fev/2016
AN1	Refletividade	Nov/2014 a Jan/2016

Tabela 4.1 - Descrição do período de dados utilizado para análise e detecção de bloqueios.

Como o objetivo desse processo é a identificação dos bloqueios através da determinação dos mínimos locais e como os cálculos estatísticos para esse fim podem ser afetados por *outliers*, foi então adotado um procedimento para sua remoção.

Assumindo uma distribuição normal e uma confiabilidade de 95%, foram excluídos todos os bins com refletividade acumulada fora do intervalo ( $\mu \pm 2\sigma$ ), definido em função da média ( $\mu$ ) e desvio padrão ( $\sigma$ ). Como exemplo, a Figura 4.4 ilustra a distribuição dos valores de refletividade acumulada para todos os bins dos PPIs do radar de Jaraguari para o período citado, onde é possível identificar que muitos bins ultrapassam o limite superior (linha vermelha a direita da linha verde que representa a média) adotado para eliminação de *outliers*, o mesmo não ocorre com o limite inferior para o período analisado (linha vermelha a esquerda). Esses bins são aqueles que apresentam valores muito altos de refletividade na imagem de acumulado (Figura 4.3), esses valores estão geralmente associados a ecos de terreno, pelo efeito dos lóbulos secundários como exposto na Seção 3.1. Geralmente medidas próximas ao radar (até  $\approx 20 \ km$ ) são afetadas em menor e maior grau pelo efeito dos lóbulos secundários (ELIA; ZAWADZKI, 2000; PELLARIN et al., 2002), por essa razão, nessa abordagem proposta para a identificação de bloqueios, foram excluídas todas as medidas obtidas nessa faixa de até 20 km próximo ao radar, enquanto que medidas mais distantes que 200 km, foram excluídas devido à altitude que o feixe de micro-ondas alcança a essa distância (acima de 5000 m sobre a superfície) e consequentemente apresentando valores baixos associados à refletividade de topo de nuvem.

Após a remoção dos *bins* indesejados, são realizados novos cálculos para definição de um limiar que permita a identificação de bloqueios, através de análise estatística dos acumulados de refletividade. Dessa forma, a média azimutal das refletividades acumuladas ( $\mu_a$ ) do PPI da primeira elevação (0,3 graus) é calculada considerandose 360 azimutes discretos e, para cada um destes, calculando-se os acumulados de 1000 *bins* (*j*) ao longo de cada azimute discreto *i* (vide Figura 4.3, por exemplo). Assim, a média azimutal é expressa por:

Figura 4.4 - Distribuição dos valores acumulados nos bins das imagens PPI do radar de Jaraguari para o período de abril/2014 a setembro/2015 a cada 10 minutos. Onde a  $\mu$  é representada pela linha verde, e o intervalo de  $\mu \pm 2 * \sigma$  delimitado pelas linhas vermelhas. Todos os bins com valores de refletividade acumulada fora desse intervalo foram removidos como outliers.



$$\mu_a = \frac{1}{360} \sum_{i=0}^{359} \sum_{j=0}^{999} Z_{ij}$$
(4.9)

A partir dos acumulados para cada azimute discreto também foi obtido o desvio padrão ( $\sigma_a$ ) das refletividades acumuladas, após alguns experimentos e com base na visualização do gráfico da distribuição dos valores de refletividade acumulada para cada azimute (Figura 4.5), foi definido o limiar para iniciar o processo de identificação dos bloqueios, como sendo ( $\mu_a - \sigma_a$ ).

O critério adotado para identificação de bloqueios foi selecionar todos os ângulos que possuem acumulados abaixo do limiar (acima definido) e que tenham uma vizinhança suave e contínua de azimutes com valores baixos de refletividade acumulada no gráfico (Figura 4.5). Assim, identificado um azimute com valor abaixo do limiar, pesquisa-se sua vizinhança e, caso esta seja suave e contínua, considera-se como bloqueio o azimute original e aqueles que constituem sua vizinhança, conforme ilustrado na mesma figura. Esta vizinhança é delimitada por comparação do valor de refletividade acumulada por azimute discreto, levando em conta que os ângulos vizinhos que se encontram nas depressões do gráfico, tendem a apresentar valores crescentes até o limite da borda. Estas depressões estão associadas a bloqueios que afetam mais que um único azimute discreto e que são causadas pelo relevo ou obstáculos artificiais tais como torres ou edificações, como por exemplo no radar de Jaraguari, que tem em suas proximidades afetando sua visada uma torre de comunicação e um prédio que abriga um radar de monitoramento de tráfego aéreo.

Figura 4.5 - Gráfico da refletividade acumulada em função do azimute com resolução azimutal de 1 grau para o radar de Jaraguari no período de abril/2014 a setembro/2015. O valor de refletividade acumulada para cada azimute (pontos azuis) considera apenas *bins* com distância radial de 20 a 200 km de forma a remover *outliers*. Pode-se observar que aparecem 5 faixas de obstrução e suas vizinhanças azimutais que foram agregadas (pontos vermelhos) correspondentes aos bloqueios.



O processo de identificação dos bloqueios se inicia pela determinação dos ângulos com maiores frações de obstrução, correspondentes aos azimutes que apresentam refletividade acumulada abaixo do limiar. Em seguida verifica-se a vizinhança à esquerda e a direita de cada faixa contínua de azimutes identificados no passo anterior, desta forma foi possível identificar todos os azimutes afetados por bloqueios caracterizados no gráfico como sendo aqueles com acumulados nas regiões de depressão (Figura 4.5).

Os ângulos vão sendo comparados iterativamente considerando-se primeiro os vizinhos à esquerda cada vez mais afastados do início da faixa até que o critério de parada seja atendido, ou seja, o ângulo verificado apresenta valor de refletividade acumulada menor que seu anterior, indicando assim que se atingiu a borda da depressão à esquerda, o mesmo processo se repete com o fim da faixa, verifica-se a vizinhança à direita. A título de exemplo, o gráfico da refletividade acumulada em função do azimute para o radar de Jaraguari, ilustrado na Figura 4.5, permite identificar 5 faixas de bloqueios. Eventualmente, há radares em que o bloqueio abrange uma larga faixa de azimutes, como ocorre no radar de Santa Teresa para faixa dos azimutes 305 até 352 (Figuras 4.6 e 4.7).

Figura 4.6 - Refletividade acumulada PPIs da primeira elevação (0,3 graus) do radar de Santa Teresa somados para o período de outubro/2014 a fevereiro/2016 a cada 10 minutos. Os bloqueios correspondem às linhas horizontais caracterizadas por valores baixos (< 60 dBZ) de acumulado em relação às linhas vizinhas.</p>



Figura 4.7 - Gráfico da refletividade acumulada em função do azimute com resolução azimutal de 1 grau para o radar de Santa Teresa no período de outubro/2014 a fevereiro/2016. O valor de refletividade acumulada para cada azimute (pontos azuis) considera apenas *bins* com distância radial de 20 a 200 km de forma a remover *outliers*. Pode-se observar que aparecem 3 faixas de obstrução e suas vizinhanças azimutais que foram agregadas (pontos vermelhos) correspondentes aos bloqueios.



Diferentemente do radar de Jaraguari, o período analisado para os radares de Santa Teresa e Almenara apresenta uma distribuição heterogênea de valores acumulados devido ao regime irregular de chuvas na região sudeste entre anos de 2014 e 2015 (MA-RENGO et al., 2015; COELHO et al., 2016). Ainda assim tanto a metodologia quanto o limiar utilizados para o primeiro radar analisado apresentaram bom desempenho para identificação de bloqueios, nessa condição climatológica distinta, como demonstram as Figuras 4.7 e 4.9.

Para o radar de Santa Teresa foram identificados três setores angulares afetados por bloqueio, que são detalhados na Seção 5.1, e ilustrados na Figura 4.7 através dos azimutes assinalados em vermelho.

Através de análise visual dos campos de refletividade acumulada para os radares Santa Teresa e Almenara (Figuras 4.6 e 4.8) é possível verificar que ambos apresentam bloqueios associados ao relevo, com predominância no caso do radar de Almenara. Assim, como demonstrado anteriormente, a partir da interação do feixe de micro-ondas com a superfície terrestre, tem-se uma resposta alta de refletividade ligada ao eco de terreno e adiante desse local uma subdetecção pela obstrução parcial do feixe, como ilustra a Figura 3.8.

Figura 4.8 - Refletividade acumulada PPIs da primeira elevação (0,3 graus) do radar de Almenara somados para o período de novembro/2014 a janeiro/2016 a cada 10 minutos. Os bloqueios correspondem às linhas horizontais caracterizadas por valores baixos (< 60 dBZ) de acumulado em relação às linhas vizinhas.



Para o radar de Almenara foram identificados seis setores angulares afetados por bloqueio, detalhados na Seção 5.1, e ilustrados na Figura 4.9, onde os azimutes afetados por bloqueio estão assinalados em vermelho.

Para todos os radares as etapas de processamento dos dados e análise estatística foram iguais, e estão descritas no fluxograma do método (Figura 4.10).

# 4.2.2 Estimativa da fração de bloqueio do feixe (BBF) utilizando modelo digital de elevação.

Com intuito de comparar e validar os resultados obtidos para identificação de bloqueios proposta nesse trabalho, foram realizados cálculos de fração de bloqueio do feixe utilizando a abordagem proposta por Bech et al. (2003), que simula a propagação do feixe de micro-ondas considerando condição padrão de refratividade da atmosfera. A função para o cálculo de interceptação do relevo pelo feixe descreve o padrão de propagação do feixe com base em funções geométricas e óticas, assumindo Figura 4.9 - Gráfico da refletividade acumulada em função do azimute com resolução azimutal de 1 grau para o radar de Almenara no período de novembro/2014 a janeiro/2016. O valor de refletividade acumulada para cada azimute (pontos azuis) considera apenas *bins* com distância radial de 20 a 200 km de forma a remover *outliers*. Pode-se observar que aparecem 5 faixas de obstrução e suas vizinhanças azimutais que foram agregadas (pontos vermelhos) correspondentes aos bloqueios.



que toda a energia emitida pelo radar é concentrada no lóbulo principal.

Segundo Bech et al. (2003), a porcentagem de área da seção transversal do feixe bloqueada pelo relevo pode ser expressa em função do raio da seção (a) e a diferença entre altura média do terreno e o centro do feixe (y). Dessa forma utilizando uma função simples de interceptação, deduzida a partir das considerações realizadas a cerca da interação entre o feixe de micro-ondas e o relevo como ilustrado na Figura 4.11, pode-se obter o cálculo do bloqueio parcial do feixe ou *Partial Beam Blockage* (PBB), como sendo a razão entre o bloqueio obtido integrando se a área sombreada (dy) nos limites correspondentes a altitude da parte de inferior da seção transversal do feixe (-a) e (y) e a área total da seção transversal do feixe do radar (a), resultando na seguinte Equação 4.10, proposta por Bech et al. (2003).

$$PBB = \frac{y\sqrt{a^2 - y^2} + a^2 \arcsin\frac{y}{a} + \frac{\pi a^2}{2}}{\pi a^2}$$
(4.10)



Figura 4.10 - Etapas da identificação de bloqueios pelo método estatístico.

Baseado nessas definições o bloqueio parcial do feixe ocorre quando -a < y < a, bloqueio total quando  $y \ge a$ , consequentemente quando  $y \le -a$  significa que não há bloqueio do feixe de micro-ondas. Importante mencionar que a altura do feixe depende da distância em relação ao radar e da condição de refratividade da atmosfera, que pode variar bastante levando a casos de propagação anômala do feixe podendo levar a erros na determinação dos bloqueios (BECH et al., 2003).

Essa abordagem utiliza como referência para topografia um modelo digital de elevação. Os cálculos realizados para os radares do Cemaden utilizaram dados do *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM) resolução aproximada de 30 m (1 segundo de arco de grau) de maneira a prover melhores estimativas de fração de bloqueio do feixe como indicado por Kucera et al. (2004). Porém esses dados normalmente apresentam áreas sem informação (*gaps*) que podem afetar a sua utilização dependendo

Figura 4.11 - Esquema utilizado para definir a função de interceptação proposta por Bech et al. (2003)



Onde: (a) é o raio da seção transversal do feixe, y é a diferença entre altitude do centro do feixe e o relevo, dy' é a parte diferencial da seção do feixe bloqueada e y' é a distancia do centro do feixe até dy' ambos referentes à integração ao longo do eixo vertical

Fonte: Adaptada de Bech et al. (2003).

da extensão dessas falhas. Nesse trabalho foi realizada a correção (preenchimento) desses gaps a partir da amostragem do dado SRTM resolução aproximada de 90 m (3 segundos de arco de grau) versão 4.1 fornecido pelo CGIAR-CSI<sup>1</sup>, utilizando o módulo *Patching* do SAGA-GIS<sup>2</sup> (Figuras 4.12 e 4.13).

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> "The Consortium for Spatial Information, CSI, is the CGIAR community of geo-spatial scientists that promotes and practices the application of spatial science to achieving these goals most effectively." disponível em: http://www.cgiar-csi.org/about acesso em 4 de outubro 2017.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>"Module Patching - fill gaps of a grid with data from another grid.", disponível em http: //www.saga-gis.org/saga\_tool\_doc/2.2.6/grid\_tools\_5.html acesso em 4 de outubro 2017.

Figura 4.12 - Informação de elevação do SRTM 30 m para área do radar de Almenara com *voids* identificados em vermelho (a) e resultado do preenchimento dos *voids* a partir da amostragem do SRTM 90 m, utilizando SAGA-GIS (b).



(a)



(b)

Figura 4.13 - Informação de elevação do SRTM 30 m para área do radar de Santa Teresa-ES com *voids* identificados em vermelho (a) e resultado do preenchimento dos *voids* a partir da amostragem do SRTM 90 m, utilizando SAGA-GIS (b).



A aquisição dos dados do SRTM para áreas de interesse correspondentes a cobertura

dos radares, foi realizada através de um script Python utilizando o pacote  $Elevation^3$ , que recebe como parâmetros um *bounding box* da área desejada ou as coordenadas de referência a partir de um *GeoTIFF* para identificar e baixar os *tiles* necessários. Os dados raster como é o caso do SRTM, são geralmente armazenados em bancos de dados em pequenas áreas denominada *tiles*, que são mais fáceis de serem gerenciadas e processadas, minimizando o consumo de memória pelo sistema (ESRI, 2018).

Utilizando a função proposta por Bech et al. (2003) implementada em Python na biblioteca *open source* Wradlib, foram então realizados os cálculos para identificação da fração de bloqueio do feixe para os radares do Cemaden. A Wradlib foi desenvolvida para fornecer a comunidade científica acesso livre e aberto a ferramentas para o processamento de dados de radares visando aplicações meteorológicas e hidrológicas, de forma colaborativa entre cientistas a fim de propiciar o compartilhamento do conhecimento a cerca de métodos e técnicas computacionais eficientes para essas aplicações de forma transparente, estruturada e bem documentada (HEISTERMANN et al., 2013).

As Figuras 4.14 e 4.15 apresentam as estimativas de fração de bloqueio do feixe considerando a primeira elevação da antena  $(0, 3^{o})$ , realizadas para os radares de Almenara e Santa Teresa, no caso de Jaraguari não foram encontradas obstruções relevantes considerando a interação com o relevo, como ilustra a Figura 4.16.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> "Elevation provides easy download, cache and access of the global datasets SRTM 30m Global 1 arc second V003 elaborated by NASA and NGA hosted on Amazon S3 and SRTM 90m Digital Elevation Database v4.1 elaborated by CGIAR-CSI." disponível em: http://elevation.bopen. eu/en/stable/quickstart.html acesso em 4 de outubro 2017.

Figura 4.14 - Fração de bloqueio do feixe para o radar de Almenara utilizando a abordagem de Bech et al. (2003): (a) Distribuição angular sobreposta ao mapa topográfico da área sob alcance do radar; (b) histograma sobreposto pela ilustração da propagação do feixe no azimute 208° no qual a fração de bloqueio foi máxima (99,98%).



O resultado obtido para o radar de Almenara apresenta a identificação de muitas áreas com algum nível de obstrução pelo relevo (Figura 4.14(a)), embora a grande maioria desses bloqueios esteja limitada a fração de bloqueio do feixe entre (1 - 20 %), como demonstra o histograma das frações de bloqueio dos feixes (Figura 4.14(b)). Esses níveis de obstrução não afetam tão seriamente a obtenção de informação pelo radar dessa forma eles não são identificados pelo método proposto nesse trabalho para identificação de bloqueios, ver Seção 5.1.

O radar de Santa Teresa apresenta uma visada mais livre de obstáculos se comparado a Almenara (Figura 4.15(a)), da mesma maneira concentra valores de fração de bloqueio do feixe na faixa de (1 - 20 %), como predominância de valores inferiores a 1% (Figura 4.15(b)). Figura 4.15 - Fração de bloqueio do feixe para o radar de Santa Teresa utilizando a abordagem de Bech et al. (2003): (a) Distribuição angular sobreposta ao mapa topográfico da área sob alcance do radar; (b) histograma sobreposto pela ilustração da propagação do feixe no azimute 337° no qual a fração de bloqueio foi máxima (88,34%).



Figura 4.16 - Fração de bloqueio do feixe para o radar de Jaraguari utilizando a abordagem de Bech et al. (2003): (a) Distribuição angular sobreposta ao mapa topográfico da área sob alcance do radar; (b) Histograma sobreposto pela ilustração da propagação do feixe no azimute 342° no qual a fração de bloqueio foi máxima (0,78%).



A desvantagem do método proposto por Bech et al. (2003) em relação ao proposto nesse trabalho é que seu escopo está restrito a obstruções físicas referentes à topografia, embora ambos apresentem resultados parecidos como pode ser observado na Tabela 5.1, o método desenvolvido nesse trabalho foi capaz de identificar também obstruções ligadas à intervenção humana como torres e prédios, ver Seção 5.1.

### 4.3 Correção de bloqueios

Para a correção dos bloqueios identificados no passo anterior, o trabalho apresenta uma nova abordagem que visa explorar a correlação identificada entre as medidas de alta refletividade normalmente associadas a precipitação convectiva e ocorrências de descargas atmosféricas (XU et al., 2013). Diversos autores têm procurado correlacionar à ocorrência de descargas atmosféricas para identificar áreas de precipitação convectiva (GOODMAN et al., 1988), ou gerar funções que permitem estimar precipitação baseada na taxa de ocorrência de descargas e massa precipitada estimada com radares meteorológicos (PETERSEN; RUTLEDGE, 1998; TAPIA et al., 1998; LE-ONIBUS et al., 2008; SIST et al., 2010; GARCIA et al., 2013). Há ainda aplicações que visam prover melhores estimativas de precipitação utilizando múltiplos sensores em satélites de orbita polar ou geoestacionários explorando dados de descargas elétricas atmosféricas e sua relação com a taxa de precipitação (SIST et al., 2011; BIRON et al., 2012).

Nesse escopo, este trabalho apresenta uma metodologia para correção de bloqueios por meio do cálculo do fator IZLR dado pela razão entre a refletividade medida pelo radar e o número de ocorrências de descargas atmosféricas na área varrida pelo radar livre de bloqueios. Tendo-se estimado o fator IZLR é então possível estimar a refletividade nas áreas afetadas por bloqueios. Assume-se que o fator IZLR possa fornecer uma estimativa correta se calculado para um intervalo de tempo que maximize a correlação entre refletividade e ocorrência de descargas para o radar considerado. A dificuldade está em se determinar esse intervalo de tempo, uma vez que o processo de eletrificação de nuvens é predominantemente não indutivo, e ocorre devido à colisão de cristais de gelo na presença de água super-resfriada em regiões de correntes ascendentes (updrafts) como demonstra a Figura 4.17 (CAREY et al., 2014), sendo que grande parte das descargas ocorrem nessas regiões associadas à convecção, em detrimento de outras áreas com precipitação estratiforme também registradas pelo radar (LIU et al., 2012). Por essa dinâmica e pelo fato da abordagem utilizar apenas um corte em altitude constante da refletividade medida, existe uma defasagem temporal entre os picos de ocorrência de descargas atmosféricas e o registro de refletividade pelo radar de Jaraguari, estimado em 100 minutos para as descargas IN e de 90 minutos para NS através do cálculo de correlação cruzada das séries de dados do evento de estudo, conforme mostrado na Figura 4.18.

Figura 4.17 - Distribuição típica de cargas dentro de nuvens de tempestades, evidenciando o processo de eletrificação por convecção devido a correntes ascendentes (updraft) e descendentes  $(out\ updraft)$ .



Fonte: Adaptada de The National Severe Storms Laboratory (2018)

Inicialmente foi estudada a identificação e o rastreio de células de tempestades com base nas observações discretas de descargas atmosféricas totais, através de funções de cálculo de densidade, nesse estudo foi utilizado o algoritmo de agrupamento *Density Based Spatial Clustering of Application with Noise* (DBSCAN) proposto por Ester et al. (1996). O algoritmo DBSCAN é baseado na conectividade entre os pontos através da densidade de pontos de vizinhança, e apresenta como principais vantagens: descoberta automática do número de agrupamentos, identificação de agrupamentos com formatos arbitrários e eliminação de *outliers* (CASSIANO; PESSANHA, 2014). Essa abordagem inicial para determinação da integração espaço-temporal de descargas atmosféricas totais para correlação com campos de refletividade medidos pelo radar, resultou num trabalho publicado no XVII Brazilian Symposium on Geoinformatics (GEOINFO) (RODRIGUES et al., 2016), cujo principal resultado foi a identificação, rastreio e caracterização de 13 sistemas precipitantes na área de alcance do radar de Jaraguari para o período analisado. Embora as células identificadas nesse trabalho tenham apresentando boa coerência com os núcleos de tempestades visualizados na imagem do radar, utilizando uma janela temporal fixa de 5 min. O presente trabalho propõe uma abordagem que visa definir de forma dinâmica o período de integração baseado no número de descargas atmosféricas disponíveis na área de alcance do radar o mais espacialmente distribuídas de maneira a aumentar a correlação entre esses campos a fim de incluir também as áreas com refletividade não tão intensas normalmente associadas à chuva fraca. Para tanto o método proposto é baseado no cálculo da correlação entre CAPPI 3km de refletividade do radar e o campo de densidade de descargas atmosféricas obtido a partir da projeção dos raios na mesma grade cartesiana do radar e suavizado com o filtro Gaussiano como forma de aumentar o raio de influência das descargas, a correlação é obtida através do MCC e da minimização de uma função objetivo que avalia a correlação de forma iterativa para definir a janela de integração temporal e o desvio padrão máximo para o filtro Gaussiano.

Figura 4.18 - Gráfico da refletividade medida pelo radar de Jaraguari e o registros de descargas atmosféricas pela rede BrasilDAT na área de alcance do radar para o período selecionado para análise e teste da abordagem dia 7 set. 2014 das 14h às 21h UTC (a). Cálculo da correlação cruzada para determinação do atraso entre o pico de refletividade medida pelo radar e as descargas intranuvem (b) e descargas nuvem-solo (c).



#### 4.3.1 Cálculo do fator IZLR

A abordagem proposta para a correção de bloqueios de visada em radares baseiase no cálculo de um fator instantâneo, fator IZLR, que é determinado pela razão entre soma das medidas de refletividade obtidas pelo radar e a soma da densidade de ocorrências de descargas atmosféricas totais registradas pela rede BrasilDAT ou nuvem-solo pela rede RINDAT projetadas numa grade cartesiana correspondente a da imagem do radar. Portanto, é necessária a definição de uma janela de tempo adequada, compatível com a resolução temporal do radar, e que compense a defasagem espacial e temporal entre a ocorrência de descargas e a refletividade. A definição da janela temporal assim como do parâmetro necessário para criação do campo de densidade de descarga nesse trabalho, é realizada através de um processo de otimização para minimização da função objetivo denominada *findWindow*, de maneira a prover maior correlação espacial possível com as medidas de refletividade feitas pelo radar, ver Seção 4.3.3. A função objetivo define a correlação através do MCC para medir a frequência com a qual as descargas estão associadas à refletividade medida pelo radar a partir da categorização dos campos de densidade de descargas e refletividade em casos de ocorrência ou não ocorrência de informação para cada pixel conforme descrito na Seção 4.3.2.

Uma forma de integrar as ocorrências de descargas elétricas, que são muito esparsas no tempo e no espaço, é o uso da técnica de estimação de núcleo (kernel estimation) (ROSENBLATT, 1971). Por exemplo, Strauss et al. (2010) utilizou o método estimador de núcleo Gaussiano para obtenção de campos de densidade de ocorrência de descargas elétricas. Essencialmente o algoritmo estimador de núcleos Gaussiano baseado na função de probabilidade da distribuição para estimativa dos expoentes de correlação e nível de ruído, pode ser apresentado na forma da Equação 4.11 do filtro Gaussiano bidimensional, quando na presença de ruído Gaussiano, como resultado da convolução entre função distribuição livre de ruído e uma função de distribuição Gaussiana normalizada pelo desvio padrão (YU et al., 2000). Neste trabalho foi empregada à função de filtro Gaussiano implementada na biblioteca Scipy do Python<sup>4</sup>, para simular um campo de densidade de ocorrência descargas. O campo de descargas atmosféricas suavizado pela aplicação do filtro Gaussiano apresenta uma distribuição espacial que se assemelha a imagem do radar. O filtro Gaussiano possui diversas aplicações, mas sua principal função é a eliminação de ruído e atenuação de sinais de alta frequência (filtro passa-baixa), através da operação de convolução de kernel (DENG; CAHILL, 1993).

O filtro Gaussiano bidimensional é definido como (DENG; CAHILL, 1993):

$$G(x,y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp \frac{(x^2 + y^2)}{2\sigma^2}$$
 (4.11)

onde:

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>Site documentação da função *Gaussian Filter*, disponível em https://docs.scipy.org/doc/ scipy-0.16.1/reference/generated/scipy.ndimage.filters.gaussian\_filter.html, acesso em maio 2017.
$\sigma$ - é o desvio padrão da distribuição Gaussiana;

- x é a coordenada horizontal latitudinal;
- y é a coordenada horizontal longitudinal.

O desvio padrão ( $\sigma$ ) determina o grau de suavização do campo de densidade de descargas (quanto maior, mais suave). No cálculo desse campo, somente descargas até uma distância horizontal de  $3*\sigma$  foram considerados para a aproximação discreta da função Gaussiana. Na abordagem aqui proposta, o desvio padrão foi definido de forma a otimizar a correlação entre o campo de densidade de descargas e a refletividade medida pelo radar.

A determinação dinâmica do fator IZLR levando em conta a variabilidade dos valores de refletividade (Z) e de ocorrência de descargas atmosféricas a cada nova imagem do radar, elimina problemas relacionados a condições climáticas devido à região geográfica, horário, estação do ano, etc. Isso difere de outras abordagens, que procuram utilizar um fator médio a partir da investigação de vários eventos de precipitação convectiva e regiões com características climáticas distintas (PETERSEN; RUTLEDGE, 1998; TAPIA et al., 1998). O fator IZLR é obtido "instantaneamente", ou seja, para cada varredura do radar, que mede o campo de refletividade, e para a correspondente de densidade de ocorrência de descargas. Considera-se uma grade espacial cartesiana, composta por um conjunto de pontos discretos (i, j) correspondente à área efetiva de abrangência do radar meteorológico. A partir do qual é definido um subconjunto de pontos (i',j') para os quais foi medida a refletividade radar e para os quais foi aplicado o filtro Gaussiano aos dados de descargas elétricas, esse subconjunto exclui do conjunto anterior os pontos afetados por bloqueios. O cálculo do IZLR é descrito na Equação 4.12, o qual é dado pelo quociente entre a somatória das refletividades para os pontos de grade (i', j') e a somatória das descargas que ocorreram nos pixels correspondentes a esses pontos de grade no intervalo de tempo correspondente à varredura considerada do radar. O número de descargas é obtido pela integração do campo suavizado Gaussiano para a área de cada pixel. Assim, o IZLR é atualizado a cada varredura do radar, na tentativa de se obter uma razão mais precisa face ao estágio corrente da atividade convectiva.

$$IZLR = \frac{\sum_{i'j'} Z_{i'j'}}{\sum_{i'j'} G_{i'j'}}$$
(4.12)

onde Z e G são definidos como:

Z - refletividade medida em cada ponto de grade (i',j');

G - número de descargas no pixel relativo ao ponto de grade (i',j')

## 4.3.2 Cálculo da correlação entre refletividade e a densidade de ocorrências de descargas atmosféricas.

O cálculo da correlação espacial e temporal entre a refletividade medida pelo radar e o registro de descargas atmosféricas, foi realizado através da obtenção de métricas de classificação assumindo-se que as ocorrências de descargas atmosféricas podem ser associadas à refletividade que é registrada pelo radar, especialmente nas áreas com precipitação convectiva (LIU et al., 2012). Assumida essa hipótese, os pixels da imagem de radar foram então categorizados como ausência/presença de informação (Figura 4.19), tomando como limiar  $Z > 20 \ dBZ$  (ver Seção 4.1), sendo esse considerado o dado observado. O mesmo foi realizado com o campo de densidade de descargas, onde o limiar adotado foi  $G > 0 flash/0,444 km^2$ . Esta área refere-se à grade cartesiana do CAPPI que é de 750 linhas por 750 colunas para um raio de 250 km de alcance, resultando numa resolução espacial de 0,666 km. A partir dos dados categorizados foram então obtidas as seguintes métricas para avaliação da classificação baseada na previsão a partir da informação de descargas atmosféricas: Acurácia, Precisão (Precision), Revocação (Recall), F1-Score e MCC. Todas as métricas foram calculadas utilizando-se funções do módulo *sklearn.metrics*<sup>5</sup> da biblioteca *Scikit-learn* desenvolvida em linguagem Python.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup>Documentação do módulo *sklearn.metrics*, disponível em http://scikit-learn.org/0.18/ modules/classes.html#module-sklearn.metrics, acesso em novembro 2017.

Figura 4.19 - Campos utilizados para o cálculo das métricas de correlação entre a refletividade medida pelo radar e as descargas registradas pela rede BrasilDAT, evento de 7 set. 2014 varredura das 14h00min UTC.



O cálculo foi realizado de forma iterativa, variando-se somente o início da janela de integração  $(t_i)$  fazendo  $t_0$  - 5 minutos a cada passo, até o limite de  $t_0$  - 60 minutos, onde  $t_0$  corresponde ao instante de termino da execução da tarefa de varredura do radar correspondente ao alcance de 250 km que leva em torno de 7 minutos, pois como dito anteriormente no Capitulo 3.1 a imagem CAPPI é construída a partir de outros campos intermediários (PPIs) que compõe o dado volumétrico do radar, por essa razão faz sentido considerar para integração também as descargas que podem ter ocorrido durante o período de execução dessas medidas intermediárias de refletividade pelo radar. A abordagem proposta visa testar várias janelas de tempo para integração dos dados de descargas, para calcular métricas considerando os dados observados (radar) e estimados (raios). Desta forma poder identificar a

melhor sobreposição espacial entre os campos permitindo uma melhor estimativa de refletividade usando o IZLR.

Como exemplo, temos o teste realizado considerando a varredura das 14h UTC do dia 7 set. 2014, ver Tabela 4.2, o processo para na sexta iteração, pois o valor da acurácia aferida foi menor que a anterior, caso contrário, seguiria até o limite de  $(t_0 - 60)$  minutos. Com base na acurácia a melhor janela temporal para integração dos dados de descarga para essa varredura do radar foi das 13:40 as 14:05.

Tabela 4.2 - Teste da condição de parada do processo iterativo para cálculo da janela temporal para integração das descargas atmosféricas e refletividade medida pelo radar de Jaraguari considerando a varredura das 14h UTC do dia 7 set. 2014.

Iteração	Descargas Atmo	Acurácia	
	Início	Fim	
1	2014-09-07 14:00	2014-09-07 14:05	0.8470
2	2014-09-07 13:55	2014-09-07 14:05	0.8485
3	2014-09-07 13:50	2014-09-07 14:05	0.8490
4	2014-09-07 13:45	2014-09-07 14:05	0.8518
5	2014-09-07 13:40	2014-09-07 14:05	0.8534
6	2014-09-07 13:35	2014-09-07 14:05	0.8530

Embora a acurácia tenha sido inicialmente utilizada como critério de parada do processo iterativo, após testes adicionais, identificou-se que o MCC apresentava melhor desempenho para nossa aplicação, isso se deve principalmente porque essa métrica é reconhecidamente a mais indicada para avaliação de classificadores binários (ver Seção 4.1 item a), especialmente para o nosso caso onde as classes se encontram desbalanceadas com prevalência da classe "ausência de informação". A título de exemplo, a Figura 4.20 traz a comparação entre os resultados obtidos utilizando-se como critério de parada a Acurácia e o MCC, onde é possível perceber que para o período de análise selecionado, o desempenho foi melhor ou no mínimo igual para todas as medidas de Revocação e F1-Score e ligeiramente pior em alguns horários considerando a Precisão quando se utilizou o MCC. Na Seção 5.2.2, são apresentados maiores detalhes sobre o uso dessa métrica para a avaliação dos resultados e testes realizados para correção de bloqueios dos radares objeto dessa pesquisa. Figura 4.20 - Comparação entre os resultados das métricas utilizando como critério de parada o melhor valor de acurácia alcançada em relação à classificação dos campos de refletividade e densidade de descarga para janelas temporais variáveis considerando dados do radar de Jaraguari e de descargas registradas pela rede BrasilDAT, evento de 7 set. 2014.

scan	criterio(acur) recall	criterio(mcc) recall	criterio(acur) precision	criterio(mcc) precision	criterio(acur) f1-score	criterio(mcc) f1-score
14:00	0.48	0.52	0.67	0.65	0.56	0.58
14:10	0.44	0.56	0.66	0.6	0.53	0.58
14:20	0.35	0.52	0.69	0.63	0.46	0.57
14:30	0.41	0.56	0.68	0.59	0.51	0.57
14:40	0.37	0.48	0.66	0.63	0.48	0.55
14:50	0.4	0.53	0.7	0.63	0.51	0.58
15:00	0.47	0.53	0.67	0.64	0.55	0.58
15:10	0.53	0.53	0.62	0.62	0.58	0.58
15:20	0.37	0.56	0.67	0.6	0.47	0.58
15:30	0.41	0.48	0.68	0.64	0.51	0.55
15:40	0.41	0.53	0.69	0.63	0.51	0.58
15:50	0.47	0.47	0.69	0.69	0.56	0.56
16:00	0.53	0.55	0.67	0.65	0.59	0.6
16:10	0.53	0.62	0.68	0.64	0.6	0.63
16:20	0.53	0.64	0.68	0.63	0.59	0.63
16:30	0.41	0.41	0.72	0.72	0.53	0.53
16:40	0.43	0.49	0.74	0.69	0.54	0.57
16:50	0.44	0.44	0.73	0.73	0.55	0.55
17:00	0.48	0.51	0.72	0.69	0.57	0.58
17:10	0.48	0.55	0.73	0.69	0.58	0.61
17:20	0.54	0.57	0.71	0.69	0.61	0.62
17:30	0.48	0.48	0.78	0.78	0.59	0.59
17:40	0.54	0.54	0.74	0.74	0.63	0.63
17:50	0.55	0.6	0.78	0.74	0.65	0.66
18:00	0.6	0.6	0.78	0.78	0.68	0.68
18:10	0.58	0.67	0.79	0.75	0.67	0.71
18:20	0.62	0.62	0.78	0.78	0.69	0.69
18:30	0.67	0.67	0.77	0.77	0.72	0.72
18:40	0.71	0.71	0.77	0.77	0.74	0.74
18:50	0.71	0.71	0.76	0.76	0.73	0.73
19:00	0.69	0.69	0.74	0.74	0.71	0.71
19:10	0.56	0.56	0.79	0.79	0.66	0.66
19:20	0.59	0.59	0.78	0.78	0.67	0.67
19:30	0.63	0.63	0.76	0.76	0.69	0.69
19:40	0.6	0.67	0.79	0.75	0.68	0.71
19:50	0.63	0.65	0.77	0.76	0.69	0.7
20:00	0.63	0.63	0.76	0.76	0.69	0.69
20:10	0.61	0.61	0.78	0.78	0.68	0.68
20:20	0.58	0.58	0.78	0.78	0.67	0.67
20:30	0.54	0.54	0.77	0.77	0.64	0.64
20:40	0.49	0.49	0.78	0.78	0.6	0.6

## 4.3.3 Janelas temporais dinâmicas para integração das descargas atmosféricas.

Nessa etapa o trabalho apresenta uma abordagem inovadora baseada no processo de otimização para minimização de uma função desenvolvida utilizando linguagem Python denominada (find Window), cujo objetivo é o de definir de forma dinâmica os parâmetros para o cálculo da correlação espaço-temporal entre a refletividade medida pelo radar e o campo de densidade de descarga gerado com uso do filtro Gaussiano. Foram testados alguns métodos para otimização através do módulo Optimize da biblioteca Scipy do Python, mas o que apresentou melhor desempenho em relação ao tempo de convergência para uma solução foi o método de Powell (POWELL, 1964). Esse método se assemelha a um método do tipo gradiente descendente, porém ele é baseado em minimizações sequenciais unidimensionais através de um subalgoritmo (por exemplo, método de Brent) utilizando um vetor de direções, por isso é denominado método de direção conjugada (PRESS et al., 2007; VAROQUAUX et al., 2015). O algoritmo implementado no módulo Optimize é uma modificação do método de Powell para encontrar o mínimo de uma função de multivariáveis (THE SCIPY COMMUNITY, 2017). Este método é indicado para o uso em funções objetivo onde não se conhece o cálculo de suas derivadas, bastando apenas avaliações da função com uma boa escolha de parâmetros para minimização do problema (PRESS et al., 2007).

A função *findWindow* a ser minimizada, recebe os seguintes parâmetros:

- $t_i$  início da janela temporal de integração, quantidade de minutos a decrementar em relação ao horário da varredura do radar;
- $t_f$  fim da janela temporal de integração, quantidade de minutos a incrementar em relação ao horário da varredura do radar;
- • $\sigma$  desvio padrão da distribuição Gaussiana.

A função minimize do módulo Optimize recebe como parâmetros a função a ser minimizada, um array com valores iniciais para os parâmetros que minimizam a função e o nome do método a ser utilizado, nesse caso Powell. Os seguintes valores foram definidos de forma empírica para a inicialização do processo de minimização da função findWindow:  $t_i = -40$ ,  $t_f = 0$  e  $\sigma = 2$ . Ao final do processo de otimização, a função retorna os valores de parâmetros que minimizaram a função bem como o maior valor de correlação medido através da métrica MCC. Dentro da função findWindow, a cada iteração são gerados os campos de densidade de descargas (filtro Gaussiano), integrando às descargas com base na janela temporal definida pelos valores  $t_i$  e  $t_f$  projetadas na mesma grade do CAPPI, e aplicação do filtro Gaussiano( $\sigma$ ). Como resultado tem o valor do MCC que avalia a capacidade dessa configuração de parâmetros em classificar corretamente os pixels com refletividade na imagem do radar a partir do campo suavizado de descargas atmosféricas. Nos testes realizados o processo de otimização demorou em média 25 segundos para cada imagem processada. Importante mencionar que foram adicionadas a função objetivo algumas condições que penalizam a escolha dos parâmetros durante o processo de otimização a fim de garantir que a janela de integração seja de no máximo  $t_0$  - 60 minutos e  $t_0$  + 10 minutos, bem como valor do desvio padrão menor que 20. Essas restrições visam garantir minimamente a equivalência física entre a refletividade medida pelo radar e o registro de descargas atmosféricas pelas redes de superfície, pois segundo Shackford (1960) a chuva/granizo são registrados pelo radar após a ocorrência da primeira descarga atmosférica num intervalo que varia (-2 a + 20) minutos em casos extremos (-104 a + 104) minutos. A limitação do desvio padrão visa não produzir campos de densidade de descargas excessivamente suavizados, que acabam gerando artefatos que não correspondem à distribuição real da refletividade medida pelo radar.

A Figura 4.21 apresenta em minutos o tamanho das janelas definidas para integração dos dados de descargas atmosféricas, assim como a maior correlação alcançada pelo processo de otimização, para cada imagem do radar processada. Mostra também os valores de refletividade acumulada em toda área de alcance do radar de Jaraguari e a quantidade de descargas registradas nessa mesma área pela rede BrasilDAT a cada 10 minutos com base no horário de início da varredura do radar. Em média o tamanho das janelas foi de 50 minutos, e o MCC variou entre 49,5 e 64,2 % levando em conta que somente valores positivos foram obtidos por essa métrica e que MCC = 1 corresponde a 100 % de correlação entre o dado observado e o estimado, para o evento analisado. Importante perceber que pelo processo de categorização adotado para essa abordagem, é indiferente para definição das janelas temporais de integração, que haja maior disponibilidade de descargas atmosféricas ou de refletividade medida pelo radar, mas sim o quanto esses dados estão sobrepostos espacialmente, permitindo ao menos de forma qualitativa uma boa recuperação de informação para áreas afetadas por bloqueios nos radares.

Figura 4.21 - Gráfico com a distribuição temporal dos acumulados de refletividade (Jaraguari) e descargas atmosféricas (BrasilDAT), para área de alcance do radar, assim como as janelas temporais para integração das descargas determinadas através do processo de otimização para o evento de 7 set. 2014.



Ao final do processo de otimização além da definição dos parâmetros de minimização da função objetivo, tem-se também disponível o campo de densidade de descarga suavizado que apresentou maior correlação com a imagem do radar. Esse campo é utilizado para obtenção do fator IZLR, conforme Equação 4.12, o que permite então estimar refletividade a partir dos dados de descargas atmosféricas incluindo áreas que possuem bloqueio no radar. A estimativa de refletividade em cada ponto de grade da área do radar onde houve registro de descarga atmosférica é então obtida através da multiplicação do IZLR pelo valor do campo de densidade de descargas suavizado, nos pontos de grade correspondentes. A seguir, as Figuras 4.22(a), 4.22(b) e 4.22(c), apresentam a imagem de refletividade real medida pelo radar (à esquerda), comparada com aquela estimada pelo IZLR a partir dos dados de descarga (à direita), em todos os casos é possível identificar que existe correlação visual entre ambas. Embora o processo de otimização para aumento da correlação espacial entre os campos tenha provido bons resultados, devido à natureza física dos fenômenos envolvidos, os pixels da imagem de refletividade estimada apresenta um pequeno deslocamento em relação aos da imagem do radar, pois em alguns eventos os núcleos de raios tendem a estar em regiões distintas das com ocorrência de precipitação em certos níveis, por exemplo, esta abordagem utilizou a refletividade medida somente em um nível 3 km de altitude (CAPPI), normalmente indicado para o registro de chuva próxima a superfície. Por outro lado, grande parte das descargas ocorre dentro das nuvens (IC) principalmente em regiões com correntes ascendentes, apresentando assim maior correlação com conteúdo integrado de gelo do que com a taxa de precipitação (PETERSEN et al., 2005). O fato de as descargas atmosféricas especialmente as intranuvens nem sempre estarem localizadas nas regiões com o registro de refletividade pelo radar, indica que para esse tipo de comparação por vezes se faz necessário um *upscaling* dos dados aumentando assim a correlação entre eles (XU et al., 2013).

Figura 4.22 - Comparação entre os campos de refletividade medida pelo radar de Jaraguari (à esquerda) e o estimado utilizando IZLR baseado no campo de densidade de descargas (BrasilDAT) suavizado com filtro Gaussiano (à direita). Para pior caso (a), caso médio (b) e melhor caso (c) do evento de 7 set. 2014. Os bloqueios identificados nesse radar estão desenhados como setores angulares em vermelho.



De maneira adicional foram realizadas estimativas simulando-se áreas de bloqueio no radar a fim de permitir a comparação direta entre refletividade obtida pelo radar e a estimada pelo método aqui proposto. A Figura 4.23 ilustra a distribuição espacial de informações categorizadas baseadas na imagem do radar e na estimativa realizada utilizando IZLR e o campo de densidade de descarga suavizado para o horário das 17h30min UTC do dia analisado, para toda área de alcance do radar, assim como para áreas de bloqueios simulados<sup>6</sup>, esse horário foi escolhido, pois apresentou o melhor resultado na comparação para áreas de bloqueios simulados (faixa de azimutes [103,107] e [329,333]) conforme ilustra o gráfico da Figura 4.24.

A avaliação das estimativas foi realizada de forma qualitativa com base nos campos resultantes categorizados, através das seguintes métricas: MCC e F-Score a fim de medir a capacidade do método de estimar corretamente a ocorrência de refletividade da imagem do radar, para as áreas de bloqueios simulados (Figura 4.24), nessa figura a variável *Support* indica o número de pixels classificados como presença (*True*) e ausência (*False*) de chuva nas áreas de bloqueios para cada varredura do radar. Essa informação auxilia a avaliação dos resultados das métricas, especialmente para os casos onde existe prevalência de uma das classes o que leva a indeterminação do cálculo do MCC. Na seção 5.2.2, são apresentados maiores detalhes sobre a aplicação e uso de cada uma dessas métricas para análise dos testes realizados.

Os casos de testes apresentados no Capítulo 5 foram selecionados a partir da taxa de ocorrência de descargas do tipo nuvem-solo classificados em eventos de atividade elétrica moderada (taxa de ocorrência acima de 100 flashes/h) a alta (acima de 300 flashes/h), conforme proposto por Elson (1993).

Além da avaliação dos campos de refletividade medida (radar) e estimada (IZLR), foram também analisados os campos de precipitação acumulada em cada caso de teste, obtidos a partir da conversão da refletividade em taxa de precipitação por meio das seguintes relações Z-R: (i) uma proposta por Marshall e Palmer (1948) relacionada a sistemas estratiformes de precipitação (refletividade < 36 dBZ) e outra, proposta por Vieux e Bedient (1998) para sistemas convectivos (refletividade  $\geq$  36 dBZ)

 $<sup>^6</sup>$ Os bloqueios simulados são setores angulares selecionados pois apresentam informações medidas pelo radar sem obstrução permitindo assim comparar com as estimativas.

Figura 4.23 - Classificação dos pixels do CAPPI do radar e do campo estimado com IZLR com rótulos ausência (0) ou presença (1) de informação para toda área de alcance do radar (a), para área de bloqueios simulados (b) da imagem das 17h30min UTC de 7 set. 2014.



Neste trabalho apenas foi investigado a correlação espacial entre as imagens de refletividade estimada a partir do campo de densidade de descargas e as imagens correspondentes de refletividade do radar, através do MCC de maneira a otimizar parâmetros relativos à geração do campo de densidade de ocorrência de descargas. Essa abordagem visa definir de forma dinâmica o raio de influência para a informação de descargas e permitir obter valores adequados que representem bem a razão entre as medidas de refletividade radar (Z) e a densidade de ocorrência de descargas (G) para o cálculo do IZLR e por consequência a estimativa de refletividade em áreas afetadas por bloqueio nos radares analisados.



Figura 4.24 - Gráfico com as métricas calculadas para avaliação das estimativas realizadas utilizando IZLR e filtro Gaussiano com descargas atmosféricas (BrasilDAT),

#### 5 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos para identificação e tratamento de bloqueios dos radares objeto desse estudo. Com base na metodologia apresentada foi possível identificar diversas áreas afetadas por bloqueios nesses radares causados por vários motivos como: interação com relevo, construções, torres metálicas entre outros. Portanto de maneira a mitigar os problemas advindos da subdetecção causada por esses bloqueios, foi desenvolvido um estimador de refletividade a partir da correlação entre as descargas atmosféricas e o campo de refletividade medido pelo radar em regiões sem obstrução para o preenchimento dessas falhas.

A avaliação dos campos de refletividade estimada foi realizada através do cálculo das seguintes métricas:

- MCC
- *F-Score* para os casos de presença (F1\_True) de chuva (refletividade entre 20 e 80 dBZ) e ausência (F1\_False) no radar.

A melhor correlação entre dados foi obtida através de um processo de otimização que define as janelas temporais para integração dos registros de descargas atmosféricas e valor do desvio padrão para filtro Gaussiano de maneira a obter a melhor cobertura espacial entre os valores observados (radar) e previstos (raios).

### 5.1 Bloqueios identificados

Os bloqueios podem ocorrer em decorrência da ação humana quando da introdução de um elemento construtivo que venha a barrar a propagação do feixe do radar ou devido a algum elemento natural como relevo ou árvores, causando um viés nas medidas realizadas pelo equipamento (ZHANG et al., 2013). Alguns desses problemas são consequências do lugar de instalação do radar, por ser um equipamento que precisa de uma infraestrutura relativamente complexa com necessidade de energia, acesso a rede de comunicação e segurança, nem sempre é possível à instalação em locais isentos de bloqueios (MONCUNILL, 2010).

No Brasil especialmente no caso dos radares do Cemaden, a instalação dos mesmos foi viabilizada através da cooperação com Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) e Universidade Federal de Alagoas (UFAL)<sup>1</sup> o que permitiu o uso do espaço e infraestrutura desses

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Informação consultada no site do Cemaden. Disponível em: http://www.cemaden.gov.br/

locais, mas que nem sempre resultou na melhor localização possível. De fato isso é corroborado pela considerável quantidade de bloqueios identificados para os radares de Santa Teresa e Almenara (Tabela 5.1), sendo em sua maioria devido à obstrução pelo relevo (Figura 5.2(b)), algo que é possível estimar através do cálculo da área efetiva de abrangência do radar (MONCUNILL, 1998), mas que na maioria das vezes é impossível evitarmos devido aos requisitos necessários para instalação do equipamento.

Tabela 5.1 - Identificação de bloqueios pelo método estatístico e abordagem de Bech et al. (2003) considerando valores de fração de bloqueio do feixe (BBF) acima de 20%.

Método estatístico proposto				
Radar	N.º Radiais Afetadas	Setores Angulares (°)		
JG1	51/360	14 - 18, 88 - 96, 293 - 332, 337 - 341, 351 - 352		
ST1	66/360	160 - 169, 194 - 200, 305 - 353		
AN1	84/360	10 - 35, 183 - 189, 196 - 231, 247 - 248, 252 - 255, 337 - 345		

Método proposto por Bech et al. (2003)				
Radar	N.º Radiais Afetadas	Setores Angulares (°)		
JG1	$00/360^{*}$	nenhum		
ST1	38/360	168, 217 - 224, 233 - 234, 237 - 242, 245, 247 - 253, 255, 263, 268, 277, 301 - 302, 310, 337 - 338, 342 - 345		
AN1	87/360	23, 141, 179 - 180, 184 - 188, 192 - 226, 243 - 261, 279, 290 - 291, 295 - 296, 298 - 300, 303 - 305, 329 - 332, 334 - 335, 338 - 344		

\* Os resultados para Jaraguari com esse método foram desprezíveis, com valores de fração de bloqueio do feixe (BBF) abaixo de 1%.

A análise estatística do campo de refletividade acumulada dos radares além de ser utilizada para identificação dos bloqueios permitiu também estimar a fração do bloqueio com base na diferença percentual dos valores registrados nos ângulos afetados em relação ao ângulo mais próximo não afetado pelo bloqueio. Esse cálculo serve

radares-meteorologicos-2. Acesso em 4 fev. 2018.

como indicativo da severidade da perda de informação na aquisição feita pelo radar.

As Figuras 5.1 e 5.2 ilustram os resultados obtidos pelo método estatístico para identificação e cálculo da fração de bloqueios, e compara com a fração de bloqueio obtida pela metodologia proposta por Bech et al. (2003), que modela a propagação do feixe de micro-ondas e sua interação com o relevo através de modelos digitais de elevação. A comparação entre esses resultados serve para avaliar e validar a metodologia proposta aqui para identificação de bloqueios, visto que boa parte das obstruções encontradas para os radares de Santa Teresa e Almenara são devidas ao relevo.

Figura 5.1 - Bloqueios identificados para o radar de Jaraguari, utilizando método de análise estatística (a), modelagem de propagação do feixe de micro-ondas e MDE proposto por Bech et al. (2003) (b).



O método proposto nesse trabalho conseguiu identificar as principais obstruções ocasionadas pelo relevo, bem como aquelas causadas por outros fatores como prédios e estruturas metálicas como ocorre no radar instalado em Jaraguari. Esse radar possui uma torre metálica localizada no seu azimute  $16^{\circ}$  e um prédio que abriga o radar de vigilância aérea localizado no azimute  $319^{\circ}$ . Foram identificadas ainda mais duas faixas de bloqueios (azimutes centrais  $94^{\circ}$  e  $296^{\circ}$ ) para as quais não foi possível determinar as razões pelo fato de não existir nenhum outro elemento de obstrução identificado a partir da observação do local de instalação, e também por não corresponder à interação com o relevo como pode ser comprovado pelo cálculo da fração de bloqueio do feixe ilustrado nas Figuras 4.16 e 5.1(b), onde os valores

encontrados foram desprezíveis (< 1%).

Apesar da semelhança entre os resultados obtidos para o cálculo da fração de bloqueio do feixe por ambos os métodos, fica evidente que a análise estatística apresenta desempenho superior por permitir a identificação e quantificação de azimutes afetados também por outros fatores além do relevo. Por exemplo, em Santa Teresa existe a obstrução de uma faixa de azimutes (305 a 352 graus) que foi parcialmente determinada pela outra abordagem, assim como ocorre Almenara na faixa de azimutes (9 a 31 graus). Os bloqueios encontrados para o radar de Jaraguari não são decorrentes de interação com o relevo, por isso a resposta para abordagem utilizando MDE foi praticamente nula para as áreas identificadas como bloqueio pelo método estatístico (Figura 5.1(b)).

Figura 5.2 - Bloqueios identificados para o radar de Santa Teresa (a e b) e Almenara (c e d), utilizando método de análise estatística (esquerda), modelagem de propagação do feixe de micro-ondas e MDE proposto por Bech et al. (2003) (direita).



#### 5.2 Correção de bloqueios utilizando IZLR

A identificação dos bloqueios é parte da solução apresentada nesse trabalho para a mitigação desse problema que afeta consideravelmente o monitoramento de eventos de tempo severo através dos radares meteorológicos (ZHANG et al., 2011).

Nessa seção serão apresentados os resultados obtidos para o processo de correção das falhas ocasionadas pelos bloqueios, através da estimativa de refletividade utilizando o fator IZLR, como exposto na metodologia a criação desse fator é baseada na correlação entre o campo de densidade de descarga e a refletividade medida pelo radar para áreas livres de obstrução.

A avaliação dos resultados foi feita através do cálculo de métricas para medir a correlação entre a refletividade observada no radar e a estimada com IZLR para áreas de bloqueios simulados em regiões onde houve a atuação de sistemas precipitantes durante o período analisado, essas áreas foram desenhadas como setores angulares na cor cinza em todas as imagens desse capítulo onde são apresentados os resultados das estimativas de refletividade com IZLR e também para os campos de acumulados de precipitação estimada a partir das medidas de refletividade pelo radar e estimada com IZLR.

# 5.2.1 Estimativa de refletividade com IZLR e métricas para análise dos resultados

Como já foi descrito na metodologia, o algoritmo utilizado para estimativa de refletividade é baseado na otimização da função *findWindow* que determina uma janela espaço-temporal "ótima" para integração das descargas, de maneira que a imagem de refletividade do radar e o campo de densidade de descarga tenham a melhor correlação possível medida pelo MCC. A cada nova imagem de refletividade do radar do tipo CAPPI 3 km (plano de informação com altitude constante), é criado de forma iterativa um mapa de densidade de descarga suavizado e calculado o MCC. O objetivo desse processo é que a imagem gerada a partir da informação de descargas seja espacialmente coerente com o registro do radar contribuindo assim para estimativa de refletividade em áreas afetadas pelos bloqueios. Por exemplo, para imagem do radar referente à varredura da 01h10min UTC do dia 27 janeiro 2015 (Figura 5.3), a janela definida para integração das descargas foi de sessenta minutos e o desvio padrão ( $\sigma = 7, 7$ ) para o filtro Gaussiano.

Figura 5.3 - Refletividade medida pelo radar de Jaraguari numa varredura específica e a correspondente densidade de ocorrência de descargas elétricas a partir de dados da rede BrasilDAT utilizados para o cálculo de correlação entre refletividade e densidade de descargas.



Após o fim do processo de otimização, o campo de descarga resultante é utilizado para calcular o IZLR com base na razão entre a informação de refletividade (Z) medida pelo radar para áreas não afetadas por bloqueios e a informação de densidade de descargas (G) para as mesmas áreas. Assume-se a premissa de que os sistemas precipitantes atuantes são grandes e uniformes o suficiente para que exista equivalência entre as áreas afetadas e não afetadas por bloqueios, permitindo assim estimar refletividade a partir do campo de densidade de descargas assumindo que existe equivalência entre as informações em toda a área de alcance do radar. Como resultado temos um mapa de refletividade estimada a partir dos dados descargas atmosféricas inclusive para áreas do radar que são afetadas por bloqueios parciais (Figura 5.4), para essa varredura foi calculado  $IZLR = 265088 \ (mm^6/m^3)/flash$ 

A medida de desempenho para as correções foram realizadas através do cálculo de métricas para a comparação entre a imagem original do radar e o campo de refletividade estimada.

As métricas permitem avaliar a correlação entre os dados utilizando o MCC que serve como indicador de qualidade nos casos de classificação binária, recomendado especialmente para casos de classes desbalanceadas como ocorre na análise dos dados de radar onde para área avaliada (alcance do radar e bloqueios) na maioria das vezes existe predomínio de pixels sem registro de refletividade (BROWNLEE, 2014).

Figura 5.4 - Correção das áreas com bloqueios parciais identificados para o radar de Jaraguari (setores angulares em preto), na varredura de 01h10min UTC de 27 jan. 2015: (a) refletividade medida pelo radar (esquerda), refletividade estimada pelo fator IZLR a partir de dados de descargas da rede BrasilDAT (direita) e (b) preenchimento das faixas de azimutes afetadas, com a combinação da refletividade medida e estimada.



### 5.2.2 Resultados para o radar de Jaraguari

Como foi descrito na Seção 3.3 esse radar foi escolhido como base para o desenvolvimento e aplicação das metodologias de identificação e correção de bloqueios por reunir características importantes para esse estudo como: alta disponibilidade de dados e poucas áreas com obstrução. Por essa razão, foram selecionados seis casos de testes para esse radar. A Tabela 5.2 apresenta a correlação média estimada com o MCC para esses casos, que foram selecionados com base na classificação da atividade elétrica (média/alta) conforme proposta por (ELSON, 1993). A tabela apresenta também os azimutes escolhidos para delimitar os setores angulares para simulação de bloqueios. Estes ângulos foram definidos para áreas com importantes registros de refletividade pelo radar para permitir à comparação com os valores estimados.

Tabela 5.2 - 0	Correlação média calculada com a métrica MCC entre a refletividade medida
I	pelo radar e a estimada com IZLR para os períodos de testes selecionados
I	para os setores angulares correspondentes à simulação de bloqueios no ra-
(	lar de Jaraguari, considerando-se dados de descargas das redes BrasilDAT e
I	RINDAT.

Período*		Setores Angulares ( $^{\circ}$ )	MCC	
Início	Fim		BrasilDAT	RINDAT
2015-01-11 03:00	2015-01-11 10:00	55 - 60, 75 - 80	0,56	0,60
2015-01-14 05:00	2015-01-14 13:00	31 - 36, 190 - 195	0,62	0,62
2015-01-26 17:00	2015-01-27 04:00	125 - 130, 190 - 195, 230 - 235	0,38	0,33
2015-02-04 11:00	2015-02-04 22:00	80 - 85, 130 - 135	0,37	0,44
2015-02-15 15:00	2015-02-15 20:00	120 - 125, 340 - 345	0,43	0,26
2015-02-26 15:00	2015-02-26 21:00	45 - 50, 130 - 135	0,40	0,43

\* Hora em Universal Time Coordinated (UTC).

Desses casos selecionados, serão descritos nesse trabalho os resultados para o caso com pior correlação média (Seção 5.2.2.1) e melhor correlação (Seção 5.2.2.2), o evento de 15 fev. 2015 e o evento de 14 jan. 2015 respectivamente . As Figuras 5.5 e 5.6 ilustram as características de precipitação e atividade elétrica para cada um desses casos. Os valores são referentes à taxa horária com base nos registros de descargas feitos pelas redes BrasilDAT e RINDAT, já a precipitação foi obtida pela conversão da refletividade (dBZ) para taxa de precipitação (mm) através das relações Z-R propostas por Marshall e Palmer (1948) e Vieux e Bedient (1998) para chuvas estratiformes e convectivas respectivamente. Tendo sido adotado o limiar de refletividade > 36 dBZ para caracterização de eventos convectivos. Figura 5.5 - Evolução temporal da precipitação calculada a partir da conversão da refletividade medida na área de cobertura do radar de Jaraguari no período de 15/02/2015 15h UTC até 15/02/2015 20h UTC e do número de descargas elétricas atmosféricas nessa área dados por ambas as redes de detecção: (a) descargas NS, IN e totais (NS + IN) registradas pela rede BrasilDAT e (b) descargas NS registradas pela rede RINDAT.



Figura 5.6 - Evolução temporal da precipitação calculada a partir da conversão da refletividade medida na área de cobertura do radar de Jaraguari no período de 14/01/2015 5h UTC até 14/01/2015 13h UTC e do número de descargas elétricas atmosféricas nessa área dados por ambas as redes de detecção: (a) descargas NS, IN e totais (NS + IN) registradas pela rede BrasilDAT e (b) descargas NS registradas pela rede RINDAT.



#### 5.2.2.1 Análise do pior caso

Foi tomado como referência o caso de teste do dia 15 fev. 2015 que apresentou a menor correlação média baseada no MCC utilizando dados da rede RINDAT, sendo assim um evento interessante para a comparação com o resultado obtido utilizando dados da rede BrasilDAT. A Figura 5.7, ilustra o desempenho da correção de bloqueios pela metodologia proposta com base em métricas que visam analisar a capacidade do método de estimar corretamente os casos de ocorrência ou não do registro de refletividade na comparação com a imagem do radar. Essa avaliação é principalmente para análise da espacialização da resposta uma vez que as métricas são obtidas a partir da categorização dos dados conforme exposto na Seção 4.3.2, neste caso o limiar de refletividade adotado para determinação dos eventos de presença de chuva foi  $Z > 20 \ dBZ$  para ambos os campos (observado/estimado). A avaliação das métricas para áreas de bloqueios deve levar em conta dois fatores, a presença ou não de sistemas precipitantes nessas áreas indicada pela variável *Support* e a identificação de núcleos de densidade de descargas sem refletividade associada no radar.

Figura 5.7 - Valores das métricas MCC, F-Score e variável (c) Support, calculadas entre a refletividade medida pelo radar de Jaraguari e a estimada pelo IZLR nas áreas de bloqueios simulados para o período de 15/02/2015 15h UTC até 15/02/2015 20h UTC, utilizando dados de descargas das redes: (a) BrasilDAT e (b) RINDAT.



No caso das estimativas realizadas com dados da BrasilDAT (5.7(a)) a correlação nas áreas de bloqueios variou entre 0, 11 e 0, 80 ficando na maior parte do tempo acima de 0, 35, enquanto que para as estimativas com dados da rede RINDAT (5.7(b)) a métrica variou entre -0, 50 e 0, 51 sendo que só um terço das medidas superou o valor de 0, 35. Para ambas as redes a menor correlação foi obtida próxima às 16 UTC, período o qual registrou um incremento acentuado de precipitação acumu-

lada na área do radar, que não é acompanhado pela quantidade de descargas. Para rede BrasilDAT o efeito desse incremento pode ser identificado às 15:50 UTC (ver Figura 5.7(a)) em concordância com menor valor do MCC, já para RINDAT foi às 16 UTC como ilustra a Figura 5.7(b). Desta forma devido à redução do número de descargas frente ao aumento das áreas com registro de refletividade no radar, fez com que o parâmetro desvio padrão ( $\sigma$ ) aumentasse demasiadamente durante o processo iterativo para definição dos parâmetros de integração espaço-temporal das descargas atmosféricas, resultando num campo de densidade de ocorrências de descargas extramente suavizado e com artefatos que não correspondem à distribuição real dos dados de descarga afetando a razão calculada com IZLR o que ocasionou valores espúrios de refletividade, especialmente para o caso dos dados da RINDAT como ilustra a Figura 5.8. Esse teste permitiu identificar o efeito prejudicial causado nas métricas de correlação pela resposta indesejada do processo de otimização para o ajuste do parâmetro  $\sigma$  que é utilizado para determinar o grau de suavização do filtro Gaussiano. A partir dessa constatação e da análise dos outros casos de teste, foi incluída na função objetivo uma condição para penalizar valores de  $\sigma > 20$  além das restrições que já existiam quanto à delimitação temporal da janela de descargas, esse limiar foi estabelecido com base na análise visual e das métricas obtidas.

Figura 5.8 - Comparação do campo de refletividade medido pelo radar de Jaraguari e estimado com IZLR para varredura das 15h50min UTC de 15 fev. 2015 utilizando dados da BrasilDAT (a) e 16h UTC de 15 fev. 2015 com dados da RINDAT (b).



Outra análise importante realizada teve por objetivo verificar espacialmente e quantitativamente a resposta obtida pela estimativa realizada com IZLR e os dados de descargas atmosféricas no que diz respeito ao preenchimento das falhas geradas na imagem do radar devido aos bloqueios identificados. Para tanto foram gerados campos de precipitação acumulada para o período analisado, a partir da conversão da refletividade (medida/estimada) em taxa de precipitação utilizando às relações Z-Rjá citadas. As Figuras 5.9(b) e 5.9(c) ilustram os acumulados de precipitação obtidos a partir dos resultados do IZLR utilizando dados das redes BrasilDAT e RINDAT respectivamente comparados com a resposta obtida pelo radar.

Figura 5.9 - Precipitação acumulada sobreposta pelos bloqueios identificados (setores angulares em preto) e simulados (setores angulares em cinza), obtida a partir da refletividade medida pelo radar de Jaraguari (a), estimada com IZLR (esquerda) e a diferença entre estimada e a medida (direita) para período de 15/02/2015 15h UTC até 15/02/2015 20h UTC, utilizando dados da Brasil-DAT (b) e RINDAT (c).



A precipitação acumulada obtida a partir das estimativas de refletividade com IZLR e dados da rede BrasilDAT foi a que apresentou distribuição espacial e quantitativa próximas a do radar, com pequena tendência a subestimar os valores observados com um viés = 0, 83, RMSE = 3, 77 e coeficiente de correlação de Pearson (r = 0, 71). Por outro lado, a resposta obtida com os dados da RINDAT não apresentou coerência com o campo do radar, apresentando tendência a superestimar os valores de precipitação com viés = 1, 18, RMSE = 4, 38 e r = 0, 62. O pior desempenho apresentado pela RINDAT se deve principalmente por conta do problema ligado à suavização do campo de densidade de descargas atmosféricas e pela não distribuição homogênea dos registros de descargas obtidos por essa rede diferentemente do que ocorreu com a rede BrasilDAT.

A distribuição homogênea de descargas atmosféricas registradas pela BrasilDAT permitiu estimar refletividade também nas áreas de bloqueios identificados nesse trabalho para esse radar (setores angulares em preto na imagem), onde é possível verificar que a precipitação estimada apresenta uma continuidade nessas áreas, enquanto que no radar a precipitação para essas áreas é menor e descontínua, principalmente nos bloqueios da direção leste e nordeste do radar. Figura 5.10 - Precipitação acumulada com detalhe em áreas sobrepostas pelos bloqueios identificados (setores angulares em preto) e simulados (setores angulares em cinza), obtida a partir da refletividade medida pelo radar de Jaraguari (a), estimada com IZLR (esquerda) e a diferença entre estimada e a medida (direita) para período de 15/02/2015 15h UTC até 15/02/2015 20h UTC, utilizando dados da BrasilDAT (b) e RINDAT (c).



106

As Figuras 5.10(b) e 5.10(c) apresentam com maior detalhe o resultado obtido pelo estimador para o preenchimento das falhas do radar, é possível identificar o efeito da subdetecção ocasionado no radar pelo bloqueio na direção leste, onde os valores acumulados são bem menores que os da vizinhança. E o preenchimento dessa falha pelos resultados obtidos com o IZLR. As estimativas realizadas com dados da BrasilDAT apresentam maior capacidade tanto na representação espacial quanto quantitativa da precipitação em relação ao radar do que os dados da RINDAT, pelos motivos já expostos anteriormente.

#### 5.2.2.2 Análise do melhor caso

O caso de teste que apresentou melhor correlação média foi o do dia 14 de janeiro de 2015 para as estimativas realizadas utilizando dados de ambas às redes de detecção de descargas atmosféricas. Em termos gerais os resultados foram muito semelhantes com uma pequena vantagem para as métricas obtidas utilizando dados da rede RIN-DAT que obteve valores do MCC entre 0, 34 e 0, 90 (Figura 5.11(b)), já para Brasil-DAT os valores variaram entre 0, 31 e 0, 84 (Figura 5.11(a)). Aproximadamente 73% das medidas de correlação superaram 0, 5, considerando que 1 representa perfeita correlação entre os dados comparados, esse caso apresentou bons resultados para estimar espacialmente a refletividade medida pelo radar para às áreas de bloqueios simulados indicando que o método proposto possui boa capacidade para preencher as falhas identificadas no radar devido a bloqueios.

As Figuras 5.12(b) e 5.12(c) ilustram os acumulados de precipitação obtidos a partir dos resultados do IZLR utilizando dados das redes BrasilDAT e RINDAT respectivamente comparados com a resposta obtida pelo radar. Embora esse evento não permita a análise adequada sobre as áreas de bloqueios identificados pois os sistemas precipitantes estavam mais ativos fora dessas áreas, ainda assim foi possível determinar mais uma vez o melhor desempenho das estimativas realizadas com os dados da rede BrasilDAT, que apresentou uma pequena tendência a subestimar os valores obtidos com as medidas do radar com viés = 0,96, RMSE = 3,69 e r = 0,69, enquanto que as estimativas com base nos dados da RINDAT apresentaram pequena tendência a superestimar as observações com viés = 1,03, RMSE = 4,20e r = 0,62. A melhor performance das estimativas obtidas através do fator IZLR utilizando a rede BrasilDAT não é somente pelos melhores índices e correlação alcançados, mas também porque elas apresentaram distribuição espacial e quantitativa muito mais coerente com a apresentada pela imagem do radar, inclusive preenchendo as descontinuidades devido a bloqueios no radar nas direções leste e noroeste. Já o resultado obtido com dados da RINDAT, não consegue representar bem espacialmente a distribuição da precipitação obtida pelo radar, além de apresentar muitas áreas com valores superestimados de precipitação em relação ao radar.

Figura 5.11 - Valores das métricas MCC, F-Score e variável (c) Support, calculadas entre a refletividade medida pelo radar de Jaraguari e a estimada pelo IZLR nas áreas de bloqueios simulados para o período de 14/01/2015 05h UTC até 14/01/2015 13h UTC, utilizando dados de descargas das redes: (a) Brasil-DAT e (b) RINDAT.



(c)

Figura 5.12 - Precipitação acumulada sobreposta pelos bloqueios identificados (setores angulares em preto) e simulados (setores angulares em cinza), obtida a partir da refletividade medida pelo radar de Jaraguari (a), estimada com IZLR (esquerda) e a diferença entre estimada e a medida (direita) para período de 14/01/2015 05h UTC até 14/01/2015 13h UTC, utilizando dados da Brasil-DAT (b) e RINDAT (c).



As Figuras 5.13(b) e 5.13(c) permitem a análise com maior detalhe das estimativas realizadas com dados de ambas às redes, pois representam o acumulado de precipitação até a distância de 100 km centrada no radar. Nelas é possível identificar que mesmo com a reduzida quantidade de sistemas atuantes nas áreas de bloqueios, para as estimativas realizadas com dados da BrasilDAT permitem preencher as descontinuidades da informação registradas pelo radar nessas áreas, como pode ser visualizado nas direções leste e noroeste do radar. Por outro lado o resultado obtido com a RINDAT não consegue o mesmo desempenho para o preenchimento das falhas além de superestimar a precipitação para muitas áreas.
Figura 5.13 - Precipitação acumulada com detalhe em áreas sobrepostas pelos bloqueios identificados (setores angulares em preto) e simulados (setores angulares em cinza), obtida a partir da refletividade medida pelo radar de Jaraguari (a), estimada com IZLR (esquerda) e a diferença entre estimada e a medida (direita) para período de 14/01/2015 05h UTC até 14/01/2015 13h UTC, utilizando dados da BrasilDAT (b) e RINDAT (c).





### 5.2.3 Resultados para o radar de Santa Teresa

O radar de Santa Teresa foi objeto desse estudo, pois apresenta uma grande faixa de obstrução na direção noroeste do radar causada por algum obstáculo artificial, visto que essa área de bloqueio identificada pelo método estatístico proposto nesse trabalho, não encontrou equivalência no cálculo de fração de bloqueio do feixe proposto por Bech et al. (2003) baseado na interceptação do feixe de micro-ondas pelo relevo como demonstram as Figuras 5.2(a) e 5.2(b). Outro fator importante para a escolha desse radar é que ele possui sobreposição espacial com o radar de Almenara o qual também foi objeto desse estudo, principalmente porque eles têm bloqueios em direções coincidentes que inviabilizam a cobertura pelo radar de uma grande área de interesse, que corresponde à região da bacia hidrográfica do rio São Mateus que nasce no estado de Minas Gerais e deságua no litoral norte do Espírito Santo (Figura 5.14). Essa bacia possui grande importância pela extensão por abranger muitos municípios monitorados pelo Cemaden<sup>2</sup>.

Figura 5.14 - Distribuição do acumulado de precipitação para primeira quinzena de maio de 2015 (a), com detalhe para área sem cobertura dos radares ST1 ao Sul e AN1 ao Norte da bacia hidrográfica do rio São Mateus (MG) (b).



Imagens ilustrativas das falhas devido a bloqueios coincidentes nos radares de Santa Teresa ao Sul e Almenara ao Norte da bacia hidrográfica, sem escala para quantificação da precipitação.

Os dados de descargas atmosféricas e volumes desses radares disponibilizados para essa pesquisa, infelizmente foram caracterizados por um período de regime irregular de chuvas na região sudeste entre anos de 2014 e 2015 (MARENGO et al., 2015; CO-ELHO et al., 2016). Além disso, houve ainda o problema relacionado à inconsistência

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Mapa de municípios monitorados pelo Cemaden na região Sudeste, disponível em: http://www. cemaden.gov.br/cemadenarquivos/municipiosprio/sudeste1.jpg acesso em 9 maio 2018.

apresentada pelos dados recebidos referentes à rede RINDAT, como mencionado na Seção 3.3. Todos esses fatores levaram a identificação de apenas dois casos de teste para cada um desses radares. Esses casos foram selecionados exclusivamente com base nos registros de descargas feitos pela rede BrasilDAT os quais apresentaram atividade elétrica com características desejadas, ou seja taxa de ao menos 100 descargas (*flash*) por hora na área do radar. A título de comparação as Figuras 5.15(a) e 5.15(b) ilustram a distribuição espacial das descargas registradas pela rede RINDAT nas áreas de alcance desses radares, no período de 2015 a 2016 foram registradas 28453 descargas do tipo nuvem-solo na área do radar de Santa Teresa enquanto que a rede BrasilDAT registrou 69707 do mesmo tipo nessa área. Já para o radar de Almenara a diferença foi ainda maior, foram 2953 registros pela RINDAT e 48911 pela BrasilDAT. Por esse motivo o desempenho alcançado com as estimativas realizadas com os dados da rede RINDAT foi inferior ao obtido com os da BrasilDAT.

Figura 5.15 - Distribuição espacial dos registros de descargas tipo nuvem-solo obtida pela RINDAT no período de 2015 a 2016 nas áreas dos radares de Santa Teresa (a) e Almenara (b).



A Tabela 5.3 apresenta a correlação média estimada com o MCC para os casos selecionados para o radar de Santa Teresa, adicionalmente ela traz a informação dos azimutes escolhidos para delimitar os setores angulares para simulação de bloqueios. Estes ângulos foram definidos para áreas com importantes registros de refletividade

pelo radar para permitir à comparação com os valores estimados.

Tabela 5.3 - Correlação média calculada com a métrica MCC entre a refletividade medida pelo radar e a estimada com IZLR para os períodos de testes selecionados para os setores angulares correspondentes à simulação de bloqueios no radar de Santa Teresa, considerando-se dados de descargas das redes BrasilDAT e RINDAT.

Período*		Setores Angulares (°)	MCC	
Início	Fim		BrasilDAT	T RINDAT
2015-03-22 16:00	2015-03-23 01:00	10 - 15, 90 - 95, 180 - 185	0,28	0,24
2015-12-07 15:00	2015-12-08 09:00	30 - 35, 90 - 95, 240 - 245	0,40	0,38
* Hora em Universal Time Coordinated (UTC).				

Esses casos serão identificados e descritos nesse trabalho como sendo o de pior desempenho evento iniciado em 22 de março 2015 e melhor desempenho evento do dia 7 de dezembro 2015, as medidas de desempenho são baseadas na correlação calculada com o MCC para as áreas de bloqueios simulados. As Figuras 5.16 e 5.17 ilustram as características de precipitação e atividade elétrica para cada um desses eventos considerando as detecções realizadas pelas redes RINDAT e BrasilDAT assim como a precipitação estimada com dados do radar de Santa Teresa. Durante os eventos analisados, não foi possível realizar as estimativas para a correção dos bloqueios com o IZLR para alguns horários, pois não dispunham de registros de descargas atmosféricas pela rede RINDAT, o mesmo não ocorrendo com as estimativas feitas com base nos dados da BrasilDAT. A Tabela 5.4 apresenta as janelas de integração temporal definidas para esses horários e a quantidade de registros de descargas obtidos pela rede BrasilDAT nessas janelas.

Início Varredura*	Janela de Integração			Flashes
	Início	Fim	$\Delta t \ (\text{min.})$	
2015-03-22 23:40:00	22:57:49	23:48:56	51	1032
2015-12-07 16:20:00	15:47:01	16:21:36	34	370
2015-12-07 16:30:00	15:52:19	16:33:51	41	631
2015-12-07 23:40:00	22:52:57	23:47:17	54	659
2015-12-08 03:30:00	02:50:14	03:44:14	53	1110
2015-12-08 03:40:00	03:03:47	03:46:25	42	1013
2015-12-08 03:50:00	03:10:55	03:58:49	47	1251
2015-12-08 04:00:00	03:25:03	04:13:16	48	1318
2015-12-08 04:10:00	03:25:06	04:15:06	50	1372

Tabela 5.4 - Horários sem registros de descargas atmosféricas pela rede RINDAT, mas que possui descargas registradas pela rede BrasilDAT.

\* O radar realiza duas tarefas uma com 13 elevações e alcance de 250 km ( $\approx 7$  minutos), outra com 3 elevações e alcance de 400 km. A janela de integração de descargas é sempre definida em relação ao instante final ( $t_0$ ) da tarefa de 250 km.

Figura 5.16 - Evolução temporal da precipitação calculada a partir da conversão da refletividade medida na área de cobertura do radar de Santa Teresa no período de 22/03/2015 16h UTC até 23/03/2015 01h UTC e do número de descargas elétricas atmosféricas nessa área dados por ambas as redes de detecção: (a) descargas NS, IN e totais (NS + IN) registradas pela rede BrasilDAT e (b) descargas NS registradas pela rede RINDAT.



Figura 5.17 - Evolução temporal da precipitação calculada a partir da conversão da refletividade medida na área de cobertura do radar de Santa Teresa no período de 07/12/2015 15h UTC até 08/12/2015 09h UTC e do número de descargas elétricas atmosféricas nessa área dados por ambas as redes de detecção: (a) descargas NS, IN e totais (NS + IN) registradas pela rede BrasilDAT e (b) descargas NS registradas pela rede RINDAT.



### 5.2.3.1 Análise do pior caso

O evento iniciado no dia 22 mar. 2015 apresentou a menor correlação média estimada com MCC para os cálculos realizados com dados de ambas as redes de detecção de descargas, sendo a RINDAT a qual apresentou o pior desempenho. A Figura 5.18, ilustra o desempenho com base nas métricas para avaliação das estimativas realizadas utilizando o fator IZLR para áreas de bloqueios simulados.

Figura 5.18 - Valores das métricas MCC, F-Score e variável (c) Support, calculadas entre a refletividade medida pelo radar de Santa Teresa e a estimada pelo IZLR nas áreas de bloqueios simulados para o período de 22/03/2015 16h UTC até 23/03/2015 01h UTC, utilizando dados de descargas das redes: (a) BrasilDAT e (b) RINDAT.



Para esse evento as estimativas realizadas com dados da BrasilDAT (5.18(a)) a correlação nas áreas de bloqueios variou entre 0 e 0,73 ficando na maior parte do tempo acima de 0,3, enquanto que para as estimativas com dados da rede RINDAT (5.18(b)) a métrica variou entre 0 e 0,62 apresentando na maior parte do tempo valores superiores a 0,22. Importante mencionar que para ambas as redes a menor correlação foi obtida quando não havia registros de descargas nas áreas escolhidas para simulação de bloqueios, levando a inconsistências na obtenção da correlação

(MCC = 0), isso ocorreu, pois esse evento foi particularmente caracterizado por sistemas esparsos de precipitação na área de alcance do radar, e no decorrer do período esses sistemas somente passaram parcialmente pelas áreas de bloqueio simuladas, como demonstra a Figura 5.19. Essa condição de impossibilidade de avaliação das estimativas para às áreas de bloqueio, é corroborada pela métrica F1-Score obtida para os casos de presença de informação de refletividade (*True*), que objetiva avaliar a capacidade do método de estimar os locais com presença de refletividade no radar. Como resultado temos  $F1_True = 0$  todas às vezes que não houve registros de descargas nas áreas de bloqueio, impossibilitando assim a estimativa de refletividade utilizando o fator IZLR.

Figura 5.19 - Refletividade sobreposta pelos bloqueios identificados (setores angulares em preto) e simulados (setores angulares em cinza), medida pelo radar de Santa Teresa (esquerda) e estimada com IZLR (direita) correspondente a varredura das 19h UTC de 22 mar. 2015, utilizando dados da RINDAT.



De maneira geral o desempenho das estimativas realizadas foi negativamente afetado pela baixa atividade elétrica registrada na área do radar, é o que indica também a métrica F1-Score para o caso de ausência de informação de refletividade (False), que avalia a capacidade do estimador de identificar os casos de ausência de refletividade no radar. Como é possível constatar no gráfico da Figura 5.18(c), a variável Support indica um aumento contínuo dos pixels com registro de refletividade pelo radar acompanhado também pela queda contínua dos valores de F1\_False, isso se deve principalmente ao aumento do sigma utilizado para o filtro Gaussiano, que acaba preenchendo de forma inadequada essas áreas devido à suavização excessiva

do campo de densidade de descargas, essa perda de desempenho do estimador é indicada pelo afastamento entre as métricas MCC e F1\_True. A Figura 5.20 ilustra essa situação, onde as áreas de bloqueios simulados são preenchidas de forma equivocada por causa da quantidade limitada de registros de descargas e grande suavização do campo de densidade de descargas o qual é utilizado para estimar refletividade com IZLR.

Figura 5.20 - Refletividade sobreposta pelos bloqueios identificados (setores angulares em preto) e simulados (setores angulares em cinza)(a), medida pelo radar de Santa Teresa (esquerda) e estimada com IZLR (direita) correspondente a varredura das 00h UTC de 23 mar. 2015, utilizando dados da BrasilDAT e (b) preenchimento das faixas de azimutes, com a combinação da refletividade medida e estimada.





As Figuras 5.21(b) e 5.21(c) ilustram os acumulados de precipitação obtidos a partir

dos resultados do IZLR utilizando dados das redes BrasilDAT e RINDAT respectivamente comparados com a resposta obtida pelo radar. Embora a baixa atividade elétrica registrada durante esse evento tenha limitado a capacidade de estimar adequadamente a precipitação acumulada na área do radar, ainda assim o resultado para o preenchimento das falhas foi bom com destaque para as estimativas obtidas com os dados da rede BrasilDAT que apresentou pequena subestimava com  $vi\acute{e}s = 0, 91$ , RMSE = 8,15 e coeficiente de correlação de Pearson r = 0,59, por outro lado os resultados alcançados com dados da RINDAT foram muito deficitários, apresentando maior subestimativa com  $vi\acute{e}s = 0, 74, RMSE = 10, 26$  e coeficiente de determinação r = 0, 32. As imagens dos acumulados demonstram que a resposta obtida pelo estimador utilizando dados da rede BrasilDAT apresenta uma distribuição espacial e quantitativa coerente com a apresentada pela imagem do radar, o que permite definir como válidas as estimativas obtidas para área "cega" do radar a noroeste e para as áreas de bloqueios parciais ao sul (setores angulares em preto). O acumulado obtido através do cálculo do fator IZLR utilizando dados da rede RINDAT não consegue representar adequadamente a distribuição espacial e quantitativa da precipitação acumulada pelo radar assim como apresenta algumas áreas com valores superestimados decorrentes do problema de suavização do campo de densidade de descargas.

Figura 5.21 - Precipitação acumulada sobreposta pelos bloqueios identificados (setores angulares em preto) e simulados (setores angulares em cinza), obtida a partir da refletividade medida pelo radar de Santa Teresa (a), estimada com IZLR (esquerda) e a diferença entre estimada e a medida (direita) para o período de 22/03/2015 16h UTC até 23/03/2015 01h UTC, utilizando dados da BrasilDAT (b) e RINDAT (c).





As Figuras 5.22(b) e 5.22(c) permitem visualizar com maior detalhe as estimativas de precipitação acumulada obtidas com o radar e com o fator IZLR, a fim de verificar a correção da falha devido ao bloqueio na direção noroeste do radar de Santa Teresa. O campo de precipitação obtido com o radar embora não mostre porque está bloqueado, indica que toda essa área estaria preenchida com valores de precipitação, é possível deduzir isso olhando para as áreas imediatamente próximas ao bloqueio que se encontram totalmente cobertas até o limite do alcance do radar. O método aqui empregado para estimar refletividade e por consequência a precipitação para correção dos bloqueios permitiu preencher parcialmente essa falha com valores coerentes que representam bem a distribuição espacial e quantitativa obtida pelo radar utilizando dados da rede BrasilDAT, uma vez que as diferenças variaram principalmente entre -8 e +12 mm e com menor efetividade com dados da rede RINDAT com diferenças principalmente entre -12 e +12 mm no acumulado do período para às áreas não afetadas por bloqueios.

Figura 5.22 - Precipitação acumulada com detalhe para correção da área com bloqueio identificado (setor angular em preto), obtida a partir da refletividade medida pelo radar de Santa Teresa (a), estimada com IZLR (esquerda) e a diferença entre estimada e a medida (direita) para o período de 22/03/2015 16h UTC até 23/03/2015 01h UTC, utilizando dados da BrasilDAT (b) e RINDAT (c).





Precipitação [mm]

-18.0









30





### 5.2.3.2 Análise do melhor caso

O evento correspondente ao período de 7 dez. 2015 15h a 8 dez. 2015 9h UTC apresentou melhor correlação média obtida com o MCC para as estimativas de refletividade em áreas de bloqueios simulados realizadas utilizando dados de ambas às redes de detecção de descargas atmosféricas. Esse evento foi caracterizado por baixa atividade elétrica registrada pela rede RINDAT, inclusive impossibilitando o cálculo do IZLR para nove horários conforme indicado na Tabela 5.4, além disso, na maior parte do tempo foi constituído de pequenas células de tempestades esparsas na área de alcance do radar com passagem pelas áreas analisadas o que justifica a variabilidade dos valores de correlação obtidos através do coeficiente MCC, que para rede BrasilDAT (Figura 5.23(a)) variou entre 0 e 0,76 com a maioria das medidas ultrapassando o valor de 0,45, já a correlação para as estimativas utilizando dados da RINDAT (Figura 5.23(b)) variou entre -0, 19 e 0, 82 sendo que somente um terço das medidas superou o limiar de 0, 45.

Com base na análise das métricas obtidas para os resultados com dados da rede BrasilDAT é possível identificar que os valores nulos (MCC = 0) que indicam indeterminação para os horários de 15h e 15h10min UTC, foram resultado da ausência de medidas de refletividade pelo radar e de registros de descargas atmosféricas nas áreas de bloqueios simulados, como atesta a variável Support que aponta nenhum pixel com presença de informação de refletividade (True) às 15h UTC nessas áreas, e a métrica F1 True = 0 para ambos os horários indicando total incapacidade em prever as ocorrências de refletividade nessas áreas para o radar. Já para o caso das estimativas realizadas com dados da rede RINDAT, as métricas indicam que o pior desempenho foi obtido para o horário das 22h10min UTC do dia 7, com MCC indicando anticorrelação entre a refletividade medida pelo radar e a estimada com IZLR nas áreas de bloqueios analisadas. Isso se deve a baixa atividade elétrica registrada pela RINDAT no período gerando uma resposta diversa daquela obtida pelo radar promovendo o preenchimento de áreas do bloqueio onde não havia registro de refletividade pelo radar, como ilustra a Figura 5.24(b), enquanto que a reposta obtida com a rede BrasilDAT (5.24(a)) para o mesmo horário reflete bem melhor a distribuição espacial das medidas do radar.

Figura 5.23 - Valores das métricas MCC, F-Score e variável (c) Support, calculadas entre a refletividade medida pelo radar de Santa Teresa e a estimada pelo IZLR nas áreas de bloqueios simulados para o período de 07/12/2015 15h UTC até 08/12/2015 09h UTC, utilizando dados de descargas das redes: (a) BrasilDAT e (b) RINDAT.





Figura 5.24 - Refletividade sobreposta pelos bloqueios simulados (setores angulares em cinza), medida pelo radar de Santa Teresa (esquerda) e estimada com IZLR (direita) para 22h10min UTC de 07 dez. 2015 utilizando dados da BrasilDAT (a) e RINDAT (b).



As Figuras 5.25(b) e 5.25(c) ilustram a precipitação acumulada para o evento do dia 7 dez. 2015, obtida a partir dos resultados da estimação de refletividade com o IZLR utilizando dados das redes BrasilDAT e RINDAT (direita), comparada com a obtida através da refletividade medida pelo radar de Santa Teresa (esquerda). Embora as estimativas com IZLR não apresentem na totalidade a mesma distribuição espacial do radar, nas áreas onde elas coexistem o método conseguiu apresentar valores coerentes aos obtidos pelo radar, principalmente quando a fonte de descargas utilizada foi a rede BrasilDAT, que apresentou pequena tendência em subestimar a precipitação acumulada com viés = 0,93, RMSE = 18,09 e r = 0,50. Já as

estimativas com dados da RINDAT apresentaram maior tendência em subestimar os acumulados com viés = 0,79, RMSE = 14,25 e r = 0,50.

Embora esse evento apresente erro maior e coeficiente de correlação de Pearson menor que o evento anterior tratado na Seção 5.2.3.1, as imagens de precipitação acumulada demonstram uma reposta adequada do método para correção das áreas de bloqueios. Essa condição é justificada porque o campo estimado apresenta algumas áreas com valores de acumulado superiores aos aferidos com o radar, principalmente em áreas vizinhas aos bloqueios identificados (setores angulares em preto), pois essas áreas que correspondem aos ângulos azimutais próximos a essa faixa bloqueada também são afetadas, mas em menor grau. Como efeito o radar apresenta subdetecção da refletividade nesses ângulos devido ao bloqueio parcial do feixe de micro-ondas, que quando comparada à refletividade estimada com IZLR acaba apresentando maior diferença, o que não indica necessariamente superestimativa, mas sim a obtenção de valores adequados para a correção dessas áreas afetadas.

O resultado alcançado com o fator IZLR para estimação de refletividade a partir dos dados de descargas atmosféricas apresentou boa capacidade de corrigir as falhas identificadas nesse radar, como demonstram as Figuras 5.25(b) (BrasilDAT) e 5.25(c) (RINDAT).

Figura 5.25 - Precipitação acumulada sobreposta pelos bloqueios identificados (setores angulares em preto) e simulados (setores angulares em cinza), obtida a partir da refletividade medida pelo radar de Santa Teresa (a), estimada com IZLR (esquerda) e a diferença entre estimada e a medida (direita) para o período de 07/12/2015 15h UTC até 08/12/2015 09h UTC, utilizando dados da BrasilDAT (b) e RINDAT (c).



129

As Figuras 5.26(b) e 5.26(c) permitem visualizar com maior detalhamento as estimativas realizadas utilizando o fator IZLR para correção da falha devido ao bloqueio na direção noroeste do radar. O método apresentou bons resultados demonstrando uma distribuição espacial do acumulado de precipitação semelhante a do radar. Novamente os dados de descargas totais providos pela rede BrasilDAT apresentou desempenho superior em relação às estimativas de refletividade feitas com dados da RINDAT, possibilitando o preenchimento das áreas afetadas por bloqueios no radar de Santa Teresa.

Figura 5.26 - Precipitação acumulada com detalhe da área sobreposta pelo bloqueio identificado (setor angular em preto), obtida a partir da refletividade medida pelo radar de Santa Teresa (a), estimada com IZLR (esquerda) e a diferença entre estimada e a medida (direita) para o período de 07/12/2015 15h UTC até 08/12/2015 09h UTC, utilizando dados da BrasilDAT (b) e RINDAT (c).



131

(c)

-42.5

-42.0

-41.0

-42.5

-42.0

-41.0

# 5.2.4 Resultados para o radar de Almenara

O radar de Almenara como já foi exposto anteriormente foi objeto de estudo nessa pesquisa por apresentar sobreposição espacial com o radar de Santa Teresa e também pelo fato de que ele poderia fornecer informação hidrológica para região de interesse da bacia hidrográfica do rio São Mateus, não fosse por uma grave obstrução na direção sudoeste do radar, como mostra a Figura 5.14. Porém diferentemente do que ocorre com o radar de Santa Teresa essa obstrução é causada por interação entre o feixe de micro-ondas emitido pelo radar e o relevo, como demonstra as Figuras 5.2(c) e 5.2(d), que apresentam os resultados obtidos para identificação dos bloqueios utilizando tanto o método estatístico proposto nesse trabalho quanto o proposto por Bech et al. (2003) que utiliza MDE para calcular a fração de bloqueios dessa região sudoeste o resultado obtido por ambos são equivalentes.

A principal questão é que esse bloqueio afeta uma região de grande interesse para o monitoramento de municípios em situação de risco de desastres naturais decorrentes de processos hidrológicos<sup>3</sup>, constituindo assim uma necessidade a correção dessas falhas no radar de Almenara.

A Tabela 5.5 apresenta a correlação média estimada com o MCC para os casos selecionados para o radar de Almenara, adicionalmente ela traz a informação dos azimutes escolhidos para delimitar os setores angulares para simulação de bloqueios. Estes ângulos foram definidos para áreas com importantes registros de refletividade pelo radar para permitir à comparação com os valores estimados.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>Mapa de municípios monitorados pelo Cemaden na região Sudeste, disponível em: http://www.cemaden.gov.br/cemadenarquivos/municipiosprio/sudeste1.jpg acesso em 9 maio 2018.

Tabela 5.5 - Correlação média calculada com a métrica MCC entre a refletividade medida pelo radar e a estimada com IZLR para os períodos de testes selecionados para os setores angulares correspondentes à simulação de bloqueios no radar de Almenara, considerando-se dados de descargas das redes BrasilDAT e RINDAT.

Período*		Setores Angulares (°)	MCC	
Início	Fim		BrasilDAT	RINDAT
2015-11-21 17:00	2015-11-22 05:00	140 - 145, 290 - 295, 315 - 320	0,54	0.02
2015-11-26 16:00	2015-11-27 00:00	40 - 45, 270 - 275, 305 - 310	0,56	0,50
* Hora em $U$	niversal Time	Coordinated (UTC).		

Esses casos serão descritos nesse trabalho como sendo o de pior desempenho evento iniciado em 21 de novembro 2015 e melhor desempenho evento do dia 26 de novembro 2015, as medidas de desempenho são baseadas na correlação calculada com o MCC para as áreas de bloqueios simulados. As Figuras 5.27 e 5.28 ilustram as características de precipitação e atividade elétrica para cada um desses eventos considerando as detecções realizadas pelas redes RINDAT e BrasilDAT assim como a precipitação estimada com dados do radar de Almenara.

Devido a todos os fatores já mencionados do regime irregular de chuvas que caracterizou o período e também a inconsistência apresentada pelos dados da rede RINDAT, os eventos selecionados apresentaram baixíssima atividade elétrica registrada pela rede RINDAT impossibilitando inclusive a obtenção do fator IZLR para vários instantes durante os eventos por não dispor de registro de descargas para integração, condição que não se repetiu quando o cálculo foi realizado utilizando dados da rede BrasilDAT. A Tabela 5.6 apresenta as informações referentes à janela de integração temporal definidas pelo método iterativo e a quantidade de descargas registradas pela rede BrasilDAT para esses instantes.

Tabela 5.6 - Horários sem registros de descargas atmosféricas pela rede RINDAT para evento iniciado no dia 21 nov. 2015, mas que possui descargas registradas pela rede BrasilDAT.

Início Varredura*	Janela de Integração		Flashes	
	Início	Fim	$\Delta t \ (\text{min.})$	
2015-11-21 17:00:00	16:30:10	17:08:40	38	58
2015-11-21 17:10:00	16:35:02	17:20:15	45	89
2015-11-21 17:20:00	16:46:27	17:34:36	48	115
2015-11-21 17:30:00	16:55:38	17:41:31	45	105
2015-11-21 18:20:00	17:43:38	18:22:46	39	142
2015-11-21 18:30:00	18:02:05	18:38:14	36	128
2015-11-21 18:40:00	18:05:03	18:48:12	43	139
2015-11-21 18:50:00	18:18:30	19:03:25	44	139
2015-11-21 19:40:00	19:07:09	19:48:43	41	212
2015-11-21 21:40:00	21:07:14	21:47:39	40	152
2015-11-21 21:50:00	21:14:15	22:04:19	50	143
2015-11-21 22:00:00	21:29:38	22:14:36	44	75
2015-11-21 22:10:00	21:36:22	22:20:17	43	60
2015-11-21 22:20:00	21:29:35	22:27:00	57	80
2015-11-21 22:50:00	22:16:53	22:48:33	31	60
2015-11-21 23:00:00	22:25:24	22:48:44	23	56
2015-11-21 23:10:00	22:39:15	23:17:26	38	270
2015-11-21 23:20:00	22:30:25	23:32:13	01	429
2015-11-21 23:30:00	22:54:44	23:35:41	40	357
2015-11-21 23:40:00	23:06:38	23:54:38	48	353
2015-11-21 23:50:00	23:19:45	00:03:45	44	240
2015-11-22 00:00:00	23:30:00	00:08:32	38	159
2015-11-22 00:50:00	00:13:24	01:04:06	50	197
2015-11-22 01:00:00	00:26:32	01:14:32	47	163
2015-11-22 01:10:00	00:44:37	01:24:59	40	154
2015-11-22 01:20:00	00:45:39	01:25:34	39	154
2015-11-22 01:30:00	00:57:16	01:38:09	40	186
2015-11-22 01:40:00	01:07:42	01:43:47	36	169
2015-11-22 01:50:00	01:15:32	01:55:23	39	227
2015-11-22 02:00:00	01:21:42	02:05:03	43	270
2015-11-22 02:10:00	01:26:30	02:07:54	41	265
2015-11-22 02:20:00	01:31:17	02:22:24	51	386
2015-11-22 02:30:00	01:50:53	02:07:37	16	111
2015-11-22 02:40:00	02:03:41	02:49:20	45	511
2015-11-22 02:50:00	02:17:56	02:49:01	31	387

\* O radar realiza duas tarefas uma com 13 elevações e alcance de 250 km ( $\approx 7$  minutos), outra com 3 elevações e alcance de 400 km. A janela de integração de descargas é sempre definida em relação ao instante final ( $t_0$ ) da tarefa de 250 km.

Figura 5.27 - Evolução temporal da precipitação calculada a partir da conversão da refletividade medida na área de cobertura do radar de Almenara no período de 21/11/2015 17h UTC até 22/11/2015 05h UTC e do número de descargas elétricas atmosféricas nessa área dados por ambas as redes de detecção: (a) descargas NS, IN e totais (NS + IN) registradas pela rede BrasilDAT e (b) descargas NS registradas pela rede RINDAT.



Figura 5.28 - Evolução temporal da precipitação calculada a partir da conversão da refletividade medida na área de cobertura do radar de Almenara no período de 26/11/2015 16h UTC até 27/11/2015 00h UTC e do número de descargas elétricas atmosféricas nessa área dados por ambas as redes de detecção: (a) descargas NS, IN e totais (NS + IN) registradas pela rede BrasilDAT e (b) descargas NS registradas pela rede RINDAT.



# 5.2.4.1 Análise do pior caso

O evento iniciado no dia 21 nov. 2015 apresentou a menor correlação média estimada com MCC para os cálculos realizados com dados de ambas as redes de detecção de descargas, sendo a RINDAT a qual apresentou o pior desempenho. A Figura 5.29, ilustra o desempenho com base nas métricas para avaliação das estimativas realizadas utilizando o fator IZLR para áreas de bloqueios simulados.

Figura 5.29 - Valores das métricas MCC, F-Score e variável (c) Support, calculadas entre a refletividade medida pelo radar de Almenara e a estimada pelo IZLR nas áreas de bloqueios simulados para o período de 21/11/2015 17h UTC até 22/11/2015 05h UTC, utilizando dados de descargas das redes: (a) Brasil-DAT e (b) RINDAT.



Nesse evento as estimativas realizadas com dados da BrasilDAT (Figura 5.29(a)) apresentaram correlação entre 0 (zero devido à ausência de descargas nas áreas de bloqueios simulados) e 0,78 calculada com MCC, sendo que na maior parte do tempo a correlação ficou acima de 0,56. Por outro lado os cálculos realizados com base na rede RINDAT (Figura 5.29(b)) apresentaram correlação baixíssima com

valores entre -0,08 e 0,11, e que na maioria dos horários a correlação foi igual à zero por não apresentar registros de descargas atmosféricas nas áreas de bloqueios simulados. Essa métrica visa avaliar a capacidade do estimador em representar bem espacialmente as medida de refletividade obtidas com o radar a partir dos dados de descargas atmosféricas nessas áreas.

A menor correlação obtida com dados da rede BrasilDAT foi para o horário das 23:40 UTC devido à ausência de registros de descargas atmosféricas nas áreas de bloqueios simulados levando a inconsistência no cálculo (MCC = 0), como ilustra a Figura 5.30(a). Já com os dados da RINDAT o horário das 21:10 UTC apresentou anticorrelação com as medidas do radar, isso se deve mais uma vez ao aumento do sigma utilizado para filtro Gaussiano devido à baixa atividade elétrica registrada no intervalo de integração que resulta num campos de densidade de descargas excessivamente suavizado preenchendo de forma equivocada as áreas de bloqueios (Figura 5.30(b)).

Figura 5.30 - Refletividade sobreposta pelos bloqueios simulados (setores angulares em cinza), medida pelo radar de Almenara (esquerda) e estimada com IZLR (direita) para o horário das 23h40min UTC de 21 nov. 2015 utilizando dados da BrasilDAT (a) e horário 21h10min UTC de 21 nov. 2015 com dados da RINDAT (b).



Analisando os resultados obtidos com base nos dados da BrasilDAT (Figura 5.29(a)) é possível identificar uma tendência a subestimar os casos de ocorrência de refletividade nas áreas de bloqueio através das estimativas com IZLR, como ilustra a variação da correlação medida com MCC e o número de pixels com presença de refletividade no radar (*True*) indicado pela variável *Support*. Toda vez que o número de pixels com presença de refletividade sofre um incremento nessas áreas a correlação tende a diminuir, provavelmente isso se deve a impossibilidade do método de representar adequadamente a distribuição espacial encontrada na imagem do radar devido à baixa atividade elétrica registrada nesse evento. Os resultados obtidos com dados da RINDAT (Figura 5.29(b)) para esse evento não forneceram condições para nenhum tipo de análise, pelos motivos já mencionados.

Com objetivo de complementar a análise das estimativas para esse evento foram então gerados campos de acumulado precipitação, obtidos a partir da refletividade estimada com o fator IZLR utilizando dados das redes BrasilDAT e RINDAT para comparação com os acumulados obtidos a partir da refletividade medida pelo radar (Figuras 5.31(b) e 5.31(c)). O resultado obtido com os dados da rede BrasilDAT apresentou bom desempenho para quantificar a precipitação se comparado com o radar, apresentando uma pequena tendência a subestimar com viés = 0,97, RMSE = 8,74e r = 0,54. Em contra partida até mesmo já esperado pela quantidade de horários não processados pela falta de registros de descargas, a precipitação acumulada estimada com dados da RINDAT não permitiu representar a distribuição espacial e os valores obtidos pelo radar, subestimando muito em relação ao dado observado com viés = 0,24 e apresentando maior erro com RMSE = 11,88 e r = 0,01.

As imagens dos acumulados demonstram que o método proposto possui boa capacidade para o preenchimento das falhas devido a bloqueios, pois os resultados estimados com IZLR apresentam distribuição espacial e quantitativa coerentes às exibidas pela resposta do radar nas outras áreas não afetadas. Para os bloqueios identificados (setores angulares em preto) na direção sudoeste e também noroeste o campo de precipitação acumulada estimada com fator exibe uma continuidade tanto para áreas internas quanto externas aos bloqueios o que não ocorre na imagem do acumulado do radar onde é possível identificar áreas sem precipitação (sudoeste) e com subestimativa (noroeste) (Figura 5.31(b)). Outro fator que interferiu de forma negativa para o desempenho das estimativas foi a obtenção pelo radar de resposta a falsos ecos, caracterizados pelos pixels espalhados em torno do radar formando anéis, e que podem ser melhor identificados a leste do radar. Esse fenômeno pode ter como causa algum efeito atmosférico como as camadas de inversão e a variação na densidade do ar, introduzida pela variação de temperatura (WEATHERTAP, 2018), ou então pode ter sido causado por interferência eletromagnética de algum outro equipamento emitindo na mesma frequência.

Figura 5.31 - Precipitação acumulada sobreposta pelos bloqueios identificados (setores angulares em preto) e simulados (setores angulares em cinza), obtida a partir da refletividade medida pelo radar de Almenara (a), estimada com IZLR (esquerda) e a diferença entre estimada e a medida (direita) para o período de 21/11/2015 17h UTC até 22/11/2015 05h UTC, utilizando dados da BrasilDAT (b) e RINDAT (c).



(c)

A Figura 5.32(b) permite apresentar com maior detalhe o efeito da correção através do preenchimento da falha a sudoeste do radar de Almenara pelas estimativas de precipitação obtidas com uso do fator IZLR e dados da rede BrasilDAT, as quais apresentaram desempenho muito superior às realizadas com dados da RINDAT (Figura 5.32(c)). A Figura 5.32(b) permite identificar que a precipitação estimada está distribuída de forma coerente tanto nas áreas com e sem bloqueios, embora um pouco subestimada, possui equivalência com os valores apresentados pelo radar nas áreas sem obstrução.

Figura 5.32 - Precipitação acumulada com detalhe para correção da área com bloqueio identificado (setor angular em preto), obtida a partir da refletividade medida pelo radar de Almenara (a), estimada com IZLR (esquerda) e a diferença entre estimada e a medida (direita) para o período de 21/11/2015 17h UTC até 22/11/2015 05h UTC, utilizando dados da BrasilDAT (b) e RINDAT (c).



(c)

### 5.2.4.2 Análise do melhor caso

Para o radar de Almenara o evento analisado correspondente ao período de 26 nov. 2015 16h a 27 nov. 2015 0h UTC apresentou melhor correlação média obtida com o MCC para as estimativas de refletividade nas seguintes áreas de bloqueios simulados através do cálculo do fator IZLR com base nos dados de descargas atmosféricas obtidas pelas redes RINDAT e BrasilDAT. Nesse período a atividade elétrica registrada pela BrasilDAT apresentou intensidade moderada (taxa de ocorrência acima de 100 flashes/h) segundo a classificação proposta por Elson (1993), enquanto que a RINDAT registrou baixíssima atividade elétrica no mesmo período, impossibilitando a estimação da refletividade para correção de bloqueios para vários horários. A Tabela 5.7 apresenta as janelas de integração definida pelo método iterativo para o cálculo do IZLR e o a quantidade de descargas obtidas com a BrasilDAT para cada um desses horários.

Início Varredura*	Janela de Integração Flash			Flashes
	Início	Fim	$\Delta t$ (min	n.)
2015-11-26 16:00:00	15:38:54	16:11:00	32	56
2015-11-26 16:10:00	15:58:49	16:17:01	18	54
2015-11-26 17:10:00	16:36:38	17:24:39	48	399
2015-11-26 17:20:00	16:52:57	17:26:12	33	268
2015-11-26 17:30:00	16:55:53	17:39:35	43	412
2015-11-26 17:40:00	17:17:45	17:53:11	35	432
2015-11-26 17:50:00	17:17:46	17:57:30	39	508
2015-11-26 18:00:00	17:25:22	18:14:53	49	731
2015-11-26 18:10:00	17:35:50	18:21:14	45	763
2015-11-26 18:20:00	17:59:00	18:29:47	30	617
2015-11-26 18:30:00	18:07:14	18:44:31	37	802
2015-11-26 18:40:00	18:07:24	18:49:02	41	861
2015-11-26 18:50:00	18:32:48	19:03:11	30	596
2015-11-26 19:00:00	18:33:01	19:05:53	32	646
2015-11-26 19:10:00	18:40:56	19:22:10	41	803
2015-11-26 19:20:00	18:46:53	19:26:34	39	828
2015-11-26 19:30:00	18:57:52	19:39:03	41	919
2015-11-26 19:40:00	19:04:22	19:54:28	50	1102
2015-11-26 19:50:00	19:17:33	20:00:18	42	925
2015-11-26 20:00:00	19:23:44	20:05:32	41	909
2015-11-26 21:20:00	20:33:10	21:27:49	54	812
2015-11-26 21:30:00	20:57:38	21:37:25	39	725
2015-11-26 23:30:00	22:56:44	23:40:47	44	444
2015-11-26 23:40:00	23:04:37	23:51:38	47	424
2015-11-26 23:50:00	23:11:18	00:04:34	53	390

Tabela 5.7 - Horários sem registros de descargas atmosféricas pela rede RINDAT para evento do dia 26 nov. 2015, mas que possui descargas registradas pela rede BrasilDAT.

\* O radar realiza duas tarefas uma com 13 elevações e alcance de 250 km ( $\approx 7$  minutos), outra com 3 elevações e alcance de 400 km. A janela de integração de descargas é sempre definida em relação ao instante final ( $t_0$ ) da tarefa de 250 km.

As métricas para esse evento analisado demonstram bom desempenho da correlação medida entre as áreas estimadas e observadas de refletividade, com o coeficiente de correlação de Matthew variando entre 0, 22 e 0, 89 utilizando dados da rede BrasilDAT (Figura 5.33(a)), sendo que na maior parte do tempo a correlação ficou acima de 0, 59. Por outro lado os resultados obtidos com os dados da rede RINDAT (Figura 5.33(b)) apresentam no geral menor correlação com as medidas do radar, com valores que variaram entre -0, 01 e 0, 82 onde somente metade das 23 varreduras processadas com esses dados superou o limiar de 0, 59, enquanto que com a BrasilDAT foram processados todos os horários do período (48 varreduras).

Figura 5.33 - Valores das métricas MCC, F-Score e variável (c) Support, calculadas entre a refletividade medida pelo radar de Almenara e a estimada pelo IZLR nas áreas de bloqueios simulados para o período de 26/11/2015 16h UTC até 27/11/2015 00h UTC, utilizando dados de descargas das redes: (a) Brasil-DAT e (b) RINDAT.



A Figura 5.34(a) ilustra o horário no qual foi obtida a menor correlação entre a refletividade estimada pelo IZLR e a medida pelo radar para as áreas de bloqueios utilizando dados da rede BrasilDAT, nela é possível identificar que no bloqueio
simulado na direção nordeste existe no radar a presença de pixels com refletividade que não são estimados pelo método por não haver registros de descargas elétricas nessa região. Já no caso das estimativas com dados da RINDAT (Figura 5.34(b)), o horário das 17h UTC apresenta uma pequena anticorrelação em relação às medidas obtidas pelo radar de Almenara, novamente isso se deve a baixa atividade elétrica registrada por essa rede o que leva ao aumento do *kernel size* durante o processo iterativo de definição dos parâmetros para integração da informação de descargas atmosféricas para o cálculo do fator IZLR. Essa suavização exagerada do campo de densidade de ocorrência leva ao preenchimento incorreto de áreas onde não houve medidas de refletividade pelo radar.

Nesse evento as métricas calculadas para ambas as redes não exibiram dependência em relação à disponibilidade de casos de presença (True) ou ausência False de refletividade nas áreas avaliadas. Pois houve variação positiva da correlação com MCC mesmo quando houve diminuição ou aumento dos pixels com refletividade nessas áreas. Durante todo o evento os valores obtidos para a métrica  $F1_True$ estiveram próximos dos valores da correlação MCC indicando boa capacidade do estimador de prever a refletividade observada pelo radar.

Figura 5.34 - Refletividade sobreposta pelos bloqueios simulados (setores angulares em cinza), medida pelo radar de Almenara (esquerda) e estimada com IZLR (direita) para o horário das 17h20min UTC de 26 nov. 2015 utilizando dados da BrasilDAT (a) e horário 17h00min UTC de 26 nov. 2015 com dados da RINDAT (b).



Infelizmente, nesse evento do dia 26 nov. 2015 os sistemas precipitantes estiveram mais ativos na região noroeste do radar de Almenara, não permitindo avaliar completamente a correção para áreas de bloqueios identificados (setores angulares em preto) nesse radar, os quais estão principalmente na região sudoeste. Mesmo assim o acumulado de precipitação obtido a partir das estimativas de refletividade realizadas com IZLR e os dados de descargas atmosféricas apresentaram boa distribuição espacial e valores próximos aos obtidos com o radar, especialmente quando a fonte utilizada foi a rede BrasilDAT (Figura 5.35(b)). Os acumulados obtidos com essa rede apresentou uma pequena tendência a subestimar os valores acumulados com o radar com  $vi\acute{e}s = 0,75$ , erro de RMSE = 7,28 e coeficiente de correlação r = 0,75 a maior correlação linear encontrada em todos os casos de testes para os três radares. Em contra partida o desempenho das estimativas baseadas nos dados da rede RIN-DAT foi muito ruim, com forte tendência a subestimar os valores observados pelo radar com  $vi\acute{e}s = 0,30$ , raiz do erro médio quadrático de RMSE = 9,84 e baixa correlação r = 0,40. Assim como ocorreu no evento do dia 21 nov. 2015, o baixo desempenho alcançado pela RINDAT (Figura 5.35(c)) se justifica pela quantidade de períodos sem registro de descargas que impediram o cálculo do fator IZLR e por consequência das estimativas de refletividade.

Figura 5.35 - Precipitação acumulada sobreposta pelos bloqueios identificados (setores angulares em preto) e simulados (setores angulares em cinza), obtida a partir da refletividade medida pelo radar de Almenara (a), estimada com IZLR (esquerda) e a diferença entre estimada e a medida (direita) para o período de 26/11/2015 16h UTC até 27/11/2015 00h UTC, utilizando dados da BrasilDAT (b) e RINDAT (c).



As seguintes Figuras 5.36(b) e 5.36(c) apresentam com maior detalhe os campos de acumulados de precipitação obtidos a partir das estimativas realizadas com dados da rede BrasilDAT e RINDAT respectivamente, com objetivo de permitir uma análise visual do efeito de correção das áreas afetas por bloqueios (setores angulares em preto). Os valores estimados com o fator IZLR utilizando dados da rede BrasilDAT apresentaram distribuição espacial e quantitativa próximas às obtidas com o radar, embora com pequena subestimativa, o método demonstra boa capacidade para correção das falhas nessas áreas. No entanto o resultado obtido com os dados da rede RINDAT não permitiu representar adequadamente a resposta obtida com o radar, devido à baixa atividade elétrica registrada por essa fonte.

No geral os acumulados obtidos a partir dos dados da rede BrasilDAT apresentam valores subestimados, exceto por uma área a oeste do radar onde os acumulados estimados com IZLR são superiores aos obtidos pelo radar. Isso provavelmente se deve ao fato que essa região do radar de Almenara é toda afetada por obstruções parciais do feixe de micro-ondas devido à interação com o relevo, nessa área as frações bloqueadas correspondem a valores que variam de 10% até 40%. Essa condição foi tratada na Seção 4.2.2 e ilustrada através da Figura 4.14 que mostra o resultado obtido para cálculo das frações de bloqueios estimadas através da equação de interceptação do feixe pelo relevo proposta por Bech et al. (2003).

Figura 5.36 - Precipitação acumulada com detalhe em áreas sobrepostas pelos bloqueios identificados (setores angulares em preto) e simulados (setores angulares em cinza), obtida a partir da refletividade medida pelo radar de Almenara (a), estimada com IZLR (esquerda) e a diferença entre estimada e a medida (direita) para o período de 26/11/2015 16h UTC até 27/11/2015 00h UTC, utilizando dados da BrasilDAT (b) e RINDAT (c).



## 6 COMENTÁRIOS FINAIS

Nesta dissertação, foram apresentados dois métodos relativos à identificação e preenchimento de falhas devidas a bloqueios de visada de radares meteorológicos. Esses instrumentos emitem pulsos de micro-ondas e medem a energia retroespalhada (refletividade) pelos alvos, comumente hidrometeoros, possibilitando a estimativa da precipitação. O primeiro método objetiva a identificação dos setores azimutais afetados por bloqueios totais ou parciais do feixe de micro-ondas do radar, geralmente causados pelo relevo, construções ou outros obstáculos. O segundo método provê a estimativa de refletividade para o preenchimento desses setores. O objetivo é melhorar a estimativa de precipitação nas áreas de cobertura dos radares afetados por bloqueios. Tal estimativa é importante, levando-se em conta que o Brasil ainda não dispõe de radares meteorológicos suficientes para cobertura completa do território nacional.

O primeiro método proposto baseia-se na análise estatística da refletividade acumulada para cada azimute discreto, que corresponde à soma das refletividades das varreduras feitas num determinado período para cada azimute, sempre para a elevação mais baixa do radar, que é a mais afetadas pelos bloqueios. Em cada varredura considerada, para cada azimute, somam-se as refletividades correspondentes a cada *bin* resultante da discretização espacial ao longo da direção radial do feixe. Os dados utilizados foram gerados no período de 2014 a 2016 por 2 radares na região Sudeste (Santa Teresa-ES e Almenara-MG) e um na região Centro-Oeste (Jaraguari-MS). Utilizou-se como referência o método para identificação de bloqueios em radares, exposto no trabalho de Bech et al. (2003), o qual utiliza modelos digitais de elevação de terreno e a orientação espacial do feixe em azimute e elevação. O método aqui proposto possibilitou resultados similares ou melhores, conforme o radar considerado. Essa melhor identificação deve-se à possibilidade de identificar obstáculos artificiais, não presentes nos modelos digitais de elevação.

O segundo método proposto visa complementar as medidas de refletividade para os azimutes correspondentes a bloqueios identificados para os eventos de precipitação convectiva. Esse preenchimento baseia-se na correlação existente entre precipitação convectiva e a ocorrência de descargas elétricas atmosféricas. Este método permite utilizar descargas do tipo nuvem-solo, caso da rede de detecção RINDAT, ou então descargas nuvem-solo e/ou intranuvem, caso da rede de detecção BrasilDAT. O método baseia-se na imagem das refletividades radar num plano horizontal de 3 km de altitude (CAPPI 3km), derivada das medidas de refletividade do radar em vários azimutes e elevações relativas à sua varredura mais recente. Essa altitude é sempre considerada nas imagens de radar por ser mais conveniente no monitoramento da precipitação. Na imagem CAPPI 3 km, utilizando-se uma grade cartesiana, identificam-se os pixels correspondentes aos bloqueios de feixe. A refletividade nos azimutes do radar afetados por bloqueios é estimada por uma razão entre a somatória (Z) das refletividades medidas nos pixels não afetados por bloqueios e a somatórias das descargas (L) ocorridas no intervalo de tempo da varredura nesses mesmos pixels. Essa razão é denominada IZLR, onde a primeira letra refere-se a "instantânea", por ser correspondente à varredura mais recente. No caso das ocorrências de descargas registradas pela rede de detecção considerada no intervalo de tempo da varredura, foi possível gerar um campo suavizado de densidade de ocorrência por meio da aplicação de um filtro Gaussiano. A soma dos valores das densidades dos pixels não afetados por bloqueios é então multiplicada pela área do pixel para se obter o número de descargas utilizado no cálculo do IZLR.

Foram selecionados para análise 6 eventos de precipitação convectiva do ano de 2015 a partir dos registros de descargas obtidos pelas redes BrasilDAT e RINDAT, com base na classificação de intensidade de atividade elétrica das tempestades proposta por Elson (1993), ocorridos nas áreas dentro do alcance efetivo dos radares de Jaraguari, Santa Teresa e Almenara. Constatou-se que, na maioria dos casos analisados, o desempenho de estimação pelo método proposto foi melhor utilizando dados de descargas totais (nuvem-solo + intranuvem) da rede BrasilDAT, com a correlação média dada pelo MCC no intervalo (0,28 - 0,62), em comparação com o desempenho obtido com uso de dados de descargas nuvem-solo da rede RINDAT, o qual resultou em correlação média no intervalo (0,02 - 0,62).

Além disso, uma avaliação complementar foi feita estimando-se a precipitação acumulada a partir da refletividade medida pelos radares e estimada com a razão IZLR para cada evento. Essa avaliação ratificou o melhor desempenho das estimativas de refletividade obtidas com os dados de descargas da rede BrasilDAT em relação àquelas feitas com o RINDAT, sendo que as primeiras permitiram obter campos de precipitação acumulada que representaram de forma coerente tanto a distribuição espacial quanto aos valores da precipitação.

No geral, a precipitação acumulada estimada pelo método proposto com IZLR nas áreas com bloqueios simulados apresentou pequena tendência a subestimar o valor observado pelos radares com viés no intervalo (0,83 - 0,97), RMSE no intervalo (3,69 - 18,09) e coeficiente de correlação (r) no intervalo (0,50 - 0,71) com base nos dados da rede BrasilDAT. No caso das estimativas realizadas com dados da rede RINDAT, houve forte tendência tanto a subestimar quanto a superestimar os valores observados pelos radares, com viés no intervalo (0,24 - 1,18), RMSE no intervalo (4,20 - 14,25) e correlação (r) no intervalo (0,01 - 0,62). As estimativas de refletividade obtidas pelo método proposto foram negativamente afetados pela baixa atividade elétrica registrada pela rede RINDAT em comparação com a BrasilDAT, sendo necessária uma maior investigação para se avaliar se, no período considerado, isso se deveu a uma intermitência no funcionamento da rede RINDAT, uma vez que ambas as redes possuem eficiência de detecção em torno de 70 - 80%, segundo Naccarato et al. (2016).

Em termos gerais, as diferenças observadas entre o campo de precipitação acumulada estimada a partir das refletividades medidas pelo radar e aquelas estimadas com o fator IZLR variaram no intervalo (-30 e 30 mm) utilizando dados de descargas de qualquer uma das redes de detecção. Entretanto, a análise visual das estimativas parece mostrar que a utilização de dados do RINDAT não permite corrigir as falhas dos bloqueios satisfatoriamente, pois resulta em valores e numa distribuição espacial que não é semelhante àquela obtida pelo radar, ao contrário das estimativas obtidas com dados da rede BrasilDAT. A razão IZLR é muito sensível a variações de precipitação e de ocorrência de descargas, sugerindo que seu valor possa ser também continuamente atualizado com base na comparação entre a refletividade real e a estimada nas áreas livres de bloqueio.

À luz dos testes realizados e de sua análise, espera-se que ambos os métodos propostos neste trabalho, para identificação de bloqueios e para estimação de refletividade a partir de dados de descargas elétricas atmosféricas nas áreas afetadas por bloqueios, possam representar um avanço no estudo de métodos relativos à mitigação dos efeitos causados por bloqueios em radares meteorológicos. Espera-se também que possam ser futuramente implementados em ambientes operacionais de previsão de tempo e de alerta de desastres ambientais, especialmente em área de risco em que a cobertura do radar é afetada por bloqueios. Outro ponto importante é que ambos os métodos aplicam-se tanto a radares de polarização simples quanto aos de polarização dupla, sendo que a rede de radares meteorológicos brasileira é formada predominantemente pelos primeiros.

# **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

AHRENS, C. D. Meteorology today: an introduction to weather, climate, and the environment. Minneapolis: West Publishing Company, 1998. 21

ATLAS, D.; ULBRICH, C. W. Path- and area-integrated rainfall measurement by microwave attenuation in the 1-3 cm band. Journal of Applied Meteorology, v. 16, n. 12, p. 1322–1331, 1977. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.1175/1520-0450(1977)016<1322:PAAIRM>2.0.C0;2>.9">https://doi.org/10.1175/1520-0450(1977)016<1322:PAAIRM>2.0.C0;2>.9</a>

BALDI, P.; BRUNAK, S.; CHAUVIN, Y.; ANDERSEN, C. A. F.; NIELSEN, H.
Assessing the accuracy of prediction algorithms for classification: an overview.
Bioinformatics, v. 16, n. 5, p. 412-424, may 2000. ISSN 1367-4803. Disponível em: <a href="https://academic.oup.com/bioinformatics/article-lookup/doi/10.1093/bioinformatics/16.5.412">https://academic.oup.com/bioinformatics/article-lookup/doi/10.1093/bioinformatics/16.5.412</a>>. 47, 48, 49

BECH, J.; CODINA, B.; LORENTE, J.; BEBBINGTON, D. The sensitivity of single polarization weather radar beam blockage correction to variability in the vertical refractivity gradient. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, v. 20, n. 6, p. 845–855, 2003. xvi, xvii, xviii, xxv, 5, 7, 8, 52, 59, 60, 61, 62, 65, 66, 68, 69, 70, 90, 91, 93, 112, 132, 151, 153

BECH, J.; GJERTSEN, U.; HAASE, G. Modelling weather radar beam propagation and topographical blockage at northern high latitudes. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, v. 133, n. 626, p. 1191–1204, jul 2007. ISSN 00359009. Disponível em: <a href="http://doi.wiley.com/10.1002/qj.98">http://doi.wiley.com/10.1002/qj.98</a>

BIRON, D.; SIST, M.; MELFI, D.; ZAULI, F.; VOCINO, A.; FACCIORUSSO, L.; LEONIBUS, L. Exploitation of lightning data for rainfall estimation by multi-sensor and cross-platform approach. In: INTERNATIONAL LIGHTNING METEOROLOGY CONFERENCE, 4., 2012, Broomfield. Proceedings... Broomfield, USA, 2012. p. 7. Disponível em: <www.vaisala.com/en/events/ildcilmc/Documents/Nowcasting/ ExploitationofLightningDataforRainEstimationbyMulti-SensorandCross-Platform. pdf>. 11, 12, 70

BOETTCHER, J.; PAYNE, C.; WOOD, A.; SESSING, M. **Dual-Polarization Radar Principles and System Operations**. Norman, Oklahoma: Warning Decision Training Branch (WDTB), 2011. Disponível em: <https://training.weather.gov/wdtd/courses/dualpol/documents/ DualPolRadarPrinciples.pdf>. 38, 39

BROWNLEE, J. Classification accuracy is not enough: more performance
measures you can use. 2014 . Disponível em:
<https://machinelearningmastery.com/
classification-accuracy-is-not-enough-more-performance-measures-you-can-use/>.
48, 95

CAREY, L. D.; BAIN, A. L.; MATTHEE, R. Kinematic and Microphysical Control of Lightning in Multicell Convection over Alabama during DC3. In: INTERNATIONAL LIGHTNING DETECTION CONFERENCE, 23., 2014. Proceedings... 2014. p. 10. Disponível em: <https://my.vaisala.net/ VaisalaDocuments/Scientificpapers/2014ILDCILMC/ILMC-Friday/ Careyetal-KinematicandMicrophysicalControlofLightninginMulticellConvectionoverAlaba pdf>. 70

CASSIANO, K. M.; PESSANHA, J. F. M. Análise espectral singular com clusterização baseada em densidade na modelagem de séries temporais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 46., 2014, Salvador, BA. **Proceedings...** Salvador, BA, 2014. p. 1287–1298. Disponível em: <http://www.din.uem.br/sbpo/sbpo2014/pdf/arq0268.pdf>. 71

COELHO, C. A. S.; CARDOSO, D. H. F.; FIRPO, M. A. F. A seca de 2013 a 2015 na região sudeste do Brasil. **Climanálise**, p. 55-61, 2016. Disponível em: <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/revista/pdf/30anos/ Coelhoetal.pdf>. 58, 112

COSTA, I. C. da. Avaliação dos dados produzidos pela rede de radares meteorológicos de Banda S localizados no Centro Sul do Brasil. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2007. 19, 20

CUMMINS, K. L.; MURPHY, M. J. An overview of lightning locating systems: history, techniques, and data uses, with an in-depth look at the US NLDN. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, IEEE, v. 51, n. 3, p. 499–518, 2009. 10, 29, 30, 31

DAMIAN, E. A. **Duas metodologias aplicadas à classificação de** precipitação convectiva e estratiforme com radar meteorológico. Dissertação (Mestrado em Métodos Numéricos em Engenharia) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012. Disponível em: <http://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/26996>. 20

DENG, G.; CAHILL, L. An adaptive gaussian filter for noise reduction and edge detection. In: NUCLEAR SCIENCE SYMPOSIUM AND MEDICAL IMAGING CONFERENCE, 1993. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 1993. p. 1615–1619. 74

DUDA, J. How to use and interpret Doppler weather radar. Iowa State University, 2008. 34 p. Disponível em: <https://education.wolfram.com/ summer/assets/alumni/2014/Howtoreadandinterpretweatherradar.pdf>. 23

ELAT. **Tipos de relâmpagos**. 2017. Disponível em: <http: //www.inpe.br/webelat/homepage/menu/relamp/relampagos/tipos.php>. Acesso em: 10 mar. 2017. 27, 29, 30

ELIA, R. D.; ZAWADZKI, I. Sidelobe contamination in bistatic radars. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, v. 17, n. 10, p. 1313–1329, 2000. 54

ELSON, D. B. Relating cloud-to-ground lightning to severe weather in Indiana on 2 June 1990. National Weather Digest, v. 18, n. 3, p. 15-21, 1993. Disponível em: <http://nwafiles.nwas.org/digest/papers/1993/ Vol18-Issue3-Dec1993/Pg15-Elson.pdf>. 85, 96, 144, 154

ESRI. Raster tiles. 2018. Disponível em: <http://edndoc.esri.com/arcsde/9. 2/concepts/rasters/entities/rastertiles.htm>. Acesso em: 14 mar. 2018. 65

ESTER, M.; KRIEGEL, H.-P.; S, J.; XU, X. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF KNOWLEDGE DISCOVERY AND DATA MINING, 2., 1996. **Proceedings...** 1996. p. 226-231. Disponível em: <http://www.aaai.org/Papers/KDD/1996/KDD96-037>. 71

FABRY, F. **Radar meteorology**: principles and practice. [S.l.: s.n.], 2015. 272 p. ISBN 9781107070462. 17, 19

FARIAS, J. F. da S.; CRUZ, P. P.; FOSTER, P. R. P. Variabilidade das anomalias de refração atmosférica através de dados de radiossonda. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 2006, Florianópolis. Anais... Florianópolis, 2006. Disponível em: <http: //www.cbmet.com/cbm-files14-7a57b877cf78488c91489b5de7031e3d.pdf>. 2 FORNASIERO, A.; BECH, J.; ALBERONI, P. Enhanced radar precipitation estimates using a combined clutter and beam blockage correction technique. **Natural Hazards and Earth System Science**, v. 6, n. 5, p. 697–710, 2006. 2, 7

FULTON, R. A.; BREIDENBACH, J. P.; SEO, D.; MILLER, D. A.; O'BANNON,
T. The WSR-88D rainfall algorithm. Weather and Forecasting, v. 13, n. 2, p. 377–395, 1998.

GARCIA, J. V. C.; STEPHANY, S.; D'OLIVEIRA, A. B. Estimation of convective precipitation mass from lightning data using a temporal sliding-window for a series of thunderstorms in Southeastern Brazil. Atmospheric Science Letters, v. 14, n. 4, p. 281–286, oct 2013. ISSN 1530261X. Disponível em: <a href="http://doi.wiley.com/10.1002/as12.453">http://doi.wiley.com/10.1002/as12.453</a>>. 13, 15, 70

GEÇER, C. Training course on weather radar systems: radar products and operational applications. 2005. Disponível em: <https://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/IOM-88\_TM-Radars/IOM-88\_Module-D.pdf>. 2, 46

GJERTSEN, U.; HAASE, G. Radar data quality - the challenge of beam blockages and propagation changes. In: WMO MÉTÉO-FRANCE SYMPOSIUM ON NOWCASTING AND VERY SHORT RANGE FORECASTING, 2005. **Proceedings...** [S.1.], 2005. 8

GOODMAN, S. J.; BUECHLER, D. E.; MEYER, P. J. Convective tendency images derived from a combination of lightning and satellite data. Weather and Forecasting, v. 3, n. 3, p. 173–188, 1988. 10, 70

HEISTERMANN, M.; JACOBI, S.; PFAFF, T. Technical note: an open source library for processing weather radar data (wradlib). **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 17, n. 2, p. 863–871, feb 2013. ISSN 1607-7938. Disponível em: <http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/17/863/2013/>. 65

HUBBERT, J. C.; DIXON, M.; ELLIS, S. M.; MEYMARIS, G. Weather radar ground clutter. part I: identification, modeling, and simulation. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, v. 26, n. 7, p. 1165–1180, jul 2009. ISSN 0739-0572. Disponível em:

<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/2009JTECHA1159.1>. 2

ICE, R. L.; SAXION, D. S.; BOYDSTUN, O. E.; ZITTEL, W. D.; HALL, R. W.; CATE, G. S.; RHOTON, R. D.; MACEMON, R. W.; WALKER, B. Sensitivity of

operational weather radars. In: CONFERENCE ON INTERACTIVE INFORMATION PROCESSING SYSTEMS FOR METEOROLOGY, OCEANOGRAPHY, AND HYDROLOGY, 27., 2011. **Proceedings...** American Meteorological Society, 2011. Disponível em:

<https://www.roc.noaa.gov/wsr88d/PublicDocs/Publications/ Sensitivity\_Operational\_Wx\_Radars\_Ice\_27thIIPS\_Jan2011.pdf>. 2

KUCERA, P. A.; KRAJEWSKI, W. F.; YOUNG, C. B. Radar beam occultation studies using GIS and DEM technology: an example study of Guam. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, v. 21, n. 7, p. 995–1006, 2004. 8, 61

KUMJIAN, M. R. Principles and applications of dual polarization weather radar. part I: description of the polarimetric radar variables. **Journal of Operational Meteorology**, v. 1, n. 19, p. 226–242, 2013. 1, 21, 38, 39

LANG, T. J.; NESBITT, S. W.; CAREY, L. D. On the correction of partial beam blockage in polarimetric radar data. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, v. 26, n. 5, p. 943–957, 2009. 7, 8

LEITÃO, M. J. M. **Sistemas de radar**. Porto-Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2007. Disponível em: <https://web.fe.up.pt/~mleitao/SRCO/Teoricas/SRCO\_RAD.pdf>. 17, 19, 20, 37

LEONIBUS, L. D.; BIRON, D.; LAQUALE, P.; ZAULI, F.; MELFI, D. Rainfall field reconstruction over italy through lampinet lightning data. In: INTERNATIONAL LIGHTNING METEOROLOGY CONFERENCE, 2., 2008, Tucson. **Proceedings...** Tucson, Arizona, USA, 2008. p. 6. Disponível em: <http://www.vaisala.com/en/events/ildcilmc/Documents/ RainfallFieldReconstructionOverItalyThroughLAMPINETLightningData. PDF>. 11, 70

LIU, C.; CECIL, D. J.; ZIPSER, E. J.; KRONFELD, K.; ROBERTSON, R. Relationships between lightning flash rates and radar reflectivity vertical structures in thunderstorms over the tropics and subtropics. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, Wiley-Blackwell, v. 117, n. D6, mar 2012. ISSN 01480227. Disponível em:

<http://doi.wiley.com/10.1029/2011JD017123>. 70, 76

MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A.; SELUCHI, M. E.; CUARTAS, A.; ALVES, L. M.; MENDIONDO, E. M.; OBREGÓN, G.; SAMPAIO, G. A seca e a crise

hídrica de 2014-2015 em São Paulo. **Revista USP**, n. 106, p. 31, set. 2015. ISSN 2316-9036. Disponível em:

<https://www.revistas.usp.br/revusp/article/view/110101/108684>. 58, 112

MARSHALL, J. S.; PALMER, W. M. K. The distribution of raindrops with size. **Journal of Meteorology**, v. 5, n. 4, p. 165–166, 1948. 20, 85, 97

MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY. Radar school: principles of radar. New York: McGraw-Hill, 1946. 17

MATROSOV, S. Y. Attenuation-based estimates of rainfall rates aloft with vertically pointing ka-band radars. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, v. 22, n. 1, p. 43–54, 2005. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.1175/JTECH-1677.1">https://doi.org/10.1175/JTECH-1677.1</a> 9

MATTHEWS, B. Comparison of the predicted and observed secondary structure of T4 phage lysozyme. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Protein Structure**, v. 405, n. 2, p. 442–451, oct 1975. ISSN 00052795. Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0005279575901099>. 47

MEISCHNER, P. Weather radar: principles and advanced applications. Berlim: Springer, 2003. 17, 18

MENDES, O.; DOMINGUES, M. O. Introdução à eletrodinâmica atmosférica. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 24, n. 1, p. 3-19, mar 2002. ISSN 1806-9126. Disponível em: <a href="http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\_arttext&pid=S1806-11172002000100002&lng=pt&nrm=iso&tlng=en>">http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\_arttext&pid=S1806-11172002000100002&lng=pt&nrm=iso&tlng=en>">http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\_arttext&pid=S1806-11172002000100002&lng=pt&nrm=iso&tlng=en>">http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\_arttext&pid=S1806-11172002000100002&lng=pt&nrm=iso&tlng=en>">http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\_arttext&pid=S1806-11172002000100002&lng=pt&nrm=iso&tlng=en>">http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\_arttext&pid=S1806-11172002000100002&lng=pt&nrm=iso&tlng=en>">http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\_arttext&pid=S1806-11172002000100002&lng=pt&nrm=iso&tlng=en>">http://www.scielo.php?script=sci\_arttext&pid=S1806-11172002000100002&lng=pt&nrm=iso&tlng=en>">http://www.scielo.php?script=sci\_arttext&pid=S1806-11172002000100002&lng=pt&nrm=iso&tlng=en>">http://www.scielo.php?script=sci\_arttext&pid=S1806-11172002000100002&lng=pt&nrm=iso&tlng=en>">http://www.scielo.php?script=sci\_arttext@sting=en>">http://www.scielo.php?script=sci\_arttext@sting=en>">http://www.scielo.php?script=sci\_arttext@sting=en>">http://www.scielo.php?script=sci\_arttext@sting=en>">http://www.scielo.php?scielo.php?scielo.php?scielo.php?scielo.php?scielo.php?scielo.php?scielo.php?scielo.php">http://www.scielo.php?scielo.php">http://www.scielo.php?scielo.php">http://www.scielo.php</arttep:">http://www.scielo.php</arttep:">http://www.scielo.php</arttep:"/>http://www.scielo.php">http://www.scielo.php</arttep:"/>http://www.scielo.php">http://www.scielo.php</arttep:"/>http://www.scielo.php">http://www.scielo.php</arttep:"/>http://www.scielo.php"/>http://www.scielo.php"/>http://www.scielo.php"/>http://www.scielo.php"/>http://www.scielo.php"/>http://www.scielo.php"/>http://www.scielo.php"/>http://www.scielo.php"/>http://www

//www.jstage.jst.go.jp/article/jmsj1965/69/3/69\_3\_327/\_article>. 45

MONCUNILL, D. F. Uma ferramenta para auxiliar na definição do posicionamento de radares meteorológicos. **Revista Brasileira de Meteorologia**, n. 2, p. 85–88, dez. 1998. Disponível em: <a href="http://www.rbmet.org.br/port/revista/revista\_artigo.php?id\_artigo=536">http: //www.rbmet.org.br/port/revista/revista\_artigo.php?id\_artigo=536</a>>. 90

\_\_\_\_\_. Estudo da influência da orografia na área efetiva de abrangência do radar meteorológico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 2010.

Anais... 2010. Disponível em: <http:

//www.cbmet.com/cbm-files/13-f7a6a0d38073d96becc252511db98781.pdf>.
37,89

MORDVINTSEV, A.; RAHMAN, A. **Hough line transform**. 2013. Disponível em: <http://opencv-python-tutroals.readthedocs.io/en/latest/py\_ tutorials/py\_imgproc/py\_houghlines/py\_houghlines.html>. 171

MURPHY, M.; PIFER, A.; CUMMINS, K.; PYLE, R.; BRAMER, J. The 2002 upgrade of the US NLDN. In: INTERNATIONAL LIGHTNING DETECTION CONFERENCE, 17., 2002. **Proceedings...** [S.l.], 2002. p. 16–18. 33

NACCARATO, K.; PINTO JUNIOR, O. The third generation relative detection efficiency model for the Brazilian Lightning Detection Network (BrasilDAT). In: INTERNATIONAL LIGHTINING DETECTION CONFERENCE, 20.; INTERNATIONAL LIGHTINING METEOROLOGY CONFERENCE, 2., 2008, Tucson. **Proceedings...** Tucson, Arizona, USA, 2008. 32

NACCARATO, K. P.; PINTO JUNIOR, O.; PINTO, I. A detection efficiency model for the Brazilian Lightning Detection Network (RINDAT). In: INTERNATIONAL LIGHTNING DETECTION CONFERENCE, 19., 2006, Tucson. **Proceedings...** Tucson, Arizona, USA, 2006. Disponível em: <http://mtc-m16b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m17080/2006/11.29. 16.25/doc/Adetectionefficiencymodel.pdf>. 34

NACCARATO, K. P.; PINTO JUNIOR, O.; SLOOP, C. D.; HECKMAN, S.; LIU, C. Evaluation of BrasilDAT relative detection efficiency based on LIS observations and a numeric model. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 2014. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 2014. p. 1814–1819. xiv, 33, 34, 35

NACCARATO, K. P.; SANTOS, W. A.; CARRETERO, M. A.; MOURA, C.; TIKAMI, A. Total lightning flash detection from space a CubeSat approach. In: **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2016. 31, 32, 33

NIELSEN, J. E.; THORNDAHL, S.; RASMUSSEN, M. R. A numerical method to generate high temporal resolution precipitation time series by combining weather radar measurements with a nowcast model. **Atmospheric Research**, v. 138, p. 1–12, mar 2014. ISSN 01698095. Disponível em:

<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169809513002883>. 1

PASQUALUCCI, F.; BARTRAM, B. W.; KROPFLI, R. A.; MONINGER, W. R. A millimeter-wavelength dual-polarization doppler radar for cloud and precipitation studies. Journal of Climate and Applied Meteorology, v. 22, n. 5, p. 758–765, 1983. Disponível em:

<https://doi.org/10.1175/1520-0450(1983)022<0758:AMWDPD>2.0.CO;2>. 1

PAZ, A.; COLLISCHONN, W. Avaliação de estimativas de campos de precipitação para modelagem hidrológica distribuída. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 1, p. 109–120, 2011. 46

PELLARIN, T.; DELRIEU, G.; SAULNIER, G.-M.; ANDRIEU, H.; VIGNAL, B.; CREUTIN, J.-D. Hydrologic visibility of weather radar systems operating in mountainous regions: case study for the ardèche catchment (france). Journal of Hydrometeorology, v. 3, n. 5, p. 539–555, 2002. 54

PETERSEN, W. A.; CHRISTIAN, H. J.; RUTLEDGE, S. A. TRMM observations of the global relationship between ice water content and lightning. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. 14, p. 1–4, jul 2005. ISSN 00948276. Disponível em: <a href="http://doi.wiley.com/10.1029/2005GL023236">http://doi.wiley.com/10.1029/2005GL023236</a>>. 83

PETERSEN, W. A.; RUTLEDGE, S. A. On the relationship between cloud-to-ground lightning and convective rainfall. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, v. 103, n. D12, p. 14025–14040, 1998. 10, 45, 70, 75

PINTO JUNIOR, O.; NACCARATO, K. P.; PINTO, I. R. C. A. The new Brazilian lightning detection network: First results. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, 11., 2011. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 2011. p. 152–153. 32

PINTO JUNIOR, O.; NACCARATO, K. P.; SABA, M. M. F.; PINTO, I. R. C. A.; ABDO, R. F.; GARCIA, S. A. d. M.; CAZETTA FILHO, A. Recent upgrades to the Brazilian integrated lightning detection network. In: INTERNATIONAL LIGHTNING DETECTION CONFERENCE, 2006. **Proceedings...** [S.1.], 2006. 28, 31

PINTO JUNIOR, O.; PINTO, I. d. A. **Relâmpagos**. 2. ed. São Paulo: Brasiliense, 2008. ISBN 9788511001129. 28

POWELL, M. J. D. An efficient method for finding the minimum of a function of several variables without calculating derivatives. **The Computer Journal**, v. 7, n. 2, p. 155–162, feb 1964. ISSN 0010-4620. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.1071/journal.com">https://doi.org/10.1071/journal.com</a>

//academic.oup.com/comjnl/article-lookup/doi/10.1093/comjnl/7.2.155>.
80

POWERS, D. M. W. What the F-measure doesn't measure: features, flaws, fallacies and fixes. 2015. Disponível em: <http://arxiv.org/abs/1503.06410>. 49

PRESS, W. H.; TEUKOLSKY, S. A.; VETTERLING, W. T.; FLANNERY, B. P. **Numerical recipe: the art of scientific computing**. 3. ed. [S.l.]: Cambridge University Press, 2007. 1195 p. ISBN 978-0-511-33555-6. 80

RODRIGUES, M. L.; STEPHANY, S.; VINHAS, L.; FERREIRA, K. R.; QUEIROZ, G. R.; GARCIA, J. V. C.; ANGELIS, C. F. Aplicação em banco de dados espaciais para o rastreio de células convectivas. In: BRAZILIAN SYMPOSIUM ON GEOINFORMATICS, 17., 2016, Campos do Jordão. **Proceedings...** Campos do Jordão, SP, 2016. p. 290–300. Disponível em: <http://www.geoinfo.info/proceedings\_geoinfo2016.pdf>. 72

ROGERS, R. R.; ZAWADZKI, I. I.; GOSSARD, E. E. Variation with altitude of the drop-size distribution in steady light rain. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, v. 117, n. 502, p. 1341–1369, 1991. Disponível em: <a href="https://www.altitude.com">https://www.altitude.com</a> (https://www.altitude.com</a>

//rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/qj.49711750211>. 46

ROMPALA, J. T.; BLAKESLEE, R. J.; BAILEY, J. C. Detection efficiency contours for regions serviced by lightning detection networks of limited scope. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ATMOSPHERIC ELECTRICITY, 12., 2003. **Proceedings...** Versailles, 2003. p. 101–104. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/9d0a/ 32d1094df0b87798610cedd01b27aee866ba.pdf>. 33

ROSENBLATT, M. Curve estimates. **The Annuals of Mathematical Statistics**, v. 42, n. 6, p. 1815–1842, 1971. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/2240110?seq=1#page\_scan\_tab\_contents>. 74

RYZHKOV, A.; DIEDERICH, M.; ZHANG, P.; SIMMER, C. Potential utilization of specific attenuation for rainfall estimation, mitigation of partial beam blockage, and radar networking. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, v. 31, n. 3, p. 599–619, 2014. 9

SAKURAGI, J. **Rede de Radar 20170815.kmz [mensagem pessoal**]. Arquivo fornecido via mensagem eletrônica recebida por <marcos.mlr@gmail.com> em 11 jun. 2018: [s.n.], 2018. 22

SÁNCHEZ-DIEZMA, R.; CORRAL, C. Curso de postgrado de climatología aplicada: el radar metereológico y sus aplicaciones hidrológicas. 2000. Disponível em: <http://www.crahi.upc.edu/index.php?option=com\_content& view=article&id=59&Itemid=109&lang=en>. 22, 23, 24, 25

SANTOS, A. S. P. Análise de desempenho dos campos de chuva estimados pelo satélite TRMM na Paraíba, para fins de modelagem hidrológica distribuída. Dissertação (Mestrado em em Engenharia Urbana e Ambiental) — Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2014. Disponível em: <http://tede.biblioteca.ufpb.br:8080/handle/tede/5541>. 46, 51

SARAIVA, E. A.; NOZU, I.; BENETI, C. Correção dos efeitos dos lóbulos laterais na precipitação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 10.; CONGRESSO FLISMET, 8., 1998. **Anais...** 1998. Disponível em: <http: //www.cbmet.com/cbm-files/13-d04035c05f558a472c340151a3c0b9a8.pdf>. 25

SHACKFORD, C. R. Radar indications of a precipitation-lightning relationship in New England thunderstorms. **Journal of Meteorology**, v. 17, n. 1, p. 15–19, 1960. 81

SIMPSON, G. C.; SCRASE, F. et al. The distribution of electricity in thunderclouds. Proceedings of the Royal Society of London A:
Mathematical, Physical and Engineering Sciences, The Royal Society, v. 161, n. 906, p. 309–352, 1937. xiii, 28

SIST, M.; ZAULI, F.; BIRON, D.; MELFI, D. Possible uses of lightning data for rainfall estimation by multi-sensor and cross-platforms approach. 2011. Disponível em: <a href="https://www.approach.com">https://www.approach.com</a>

//s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/32867536/2011EUM\_LI.pdf? AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1532693002&Signature= BlhJbCERLKoSTvCSio3Rpifsl1s%3D&response-content-disposition=inline% 3B%20filename%3DPossible\_uses\_of\_lightning\_data\_for\_rain.pdf>. 11, 12, 13, 70

SIST, M.; ZAULI, F.; MELFI, D.; BIRON, D. A study about the correlation link between lightning data and meteorological data. In: EUMETSAT

METEOROLOGICAL SATELLITE CONFERENCE, 4., 2012, Córdoba. **Proceedings...** Córdoba, ES, 2010. 11, 12, 70

STRAKA, J. M.; ZRNIĆ, D. S.; RYZHKOV, A. V. Bulk hydrometeor classification and quantification using polarimetric radar data: synthesis of relations. Journal of Applied Meteorology, v. 39, n. 8, p. 1341–1372, 2000. ISSN 0894-8763. Disponível em: <a href="https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10">https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10</a>. 1175/1520-0450%282000%29039%3C1341%3ABHCAQU%3E2.0.C0%3B2>. 1

STRAUSS, C. Monitoramento e previsão de atividade convectiva usando abordagens de mineração de dados. 134 p. Tese (Doutorado em Computação Aplicada) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013. Disponível em: <http:

//bdtd.ibict.br/vufind/Record/INPE\_3bf873d0972455ca5f676248c4409f3f>.
28

STRAUSS, C.; STEPHANY, S.; CAETANO, M. A ferramenta EDDA de geração de campos de densidade de descargas atmosféricas para mineração de dados meteorológicos. In: CONGRESSO NACIONAL DE MATEMÁTICA APLICADA E COMPUTACIONAL, 33., 2010, Águas de Lindóia. **Anais...** [S.l.], 2010. 14, 74

TAPIA, A.; SMITH, J. A.; DIXON, M. Estimation of convective rainfall from lightning observations. **Journal of Applied Meteorology**, v. 37, n. 11, p. 1497–1509, 1998. 10, 11, 13, 70, 75

The National Severe Storms Laboratory. Lightning types. 2018. Disponível em: <a href="https://www.nssl.noaa.gov/education/svrwx101/lightning/types/">https://www.nssl.noaa.gov/education/svrwx101/lightning/types/</a>. 71

THE SCIPY COMMUNITY. **Optimization and root finding: powell method**. 2017. Disponível em: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/ reference/generated/scipy.optimize.fmin\_powell.html>. 80

THEODORIDIS, S.; KOUTROUMBAS, K. **Pattern recognition**. 3. ed. San Diego-CA: Academic Press, 2006. 837 p. 48, 51

UMAN, M. A. The lightning discharge. [S.l.]: Courier Corporation, 2001. 27, 28

VAROQUAUX, G.; GOUILLART, E.; VAHTRAS, O.; HAENEL, V.; ROUGIER, N. P.; GOMMERS, R.; PEDREGOSA, F.; JEDRZEJEWSKI-SZMEK, Z.; VIRTANEN, P.; COMBELLES, C.; PINTE, D.; CIMRMAN, R.; ESPAZE, A.; CHAUVE, A.; BURNS, C. Scipy lecture notes. Zenodo, 2015. Disponível em: <a href="https://hal.inria.fr/hal-01206546">https://hal.inria.fr/hal-01206546</a>>. 80

VICENTE, G. A.; FERREIRA, M. E. Estimativa de precipitação via satélite para estudo de tempo e clima: avanços e perspectivas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 1998, Brasília. **Anais...** Brasília, 1998. Disponível em: <http:

//www.cbmet.com/cbm-files/13-95f9bb855c97c2fc66b30f2788d95abe.pdf>. 1

VIEUX, B. E.; BEDIENT, P. B. Estimation of rainfall for flood prediction from wsr-88d reflectivity: a case study, 17–18 october 1994. Weather and Forecasting, v. 13, n. 2, p. 407–415, 1998. 20, 85, 97

VILLARINI, G.; KRAJEWSKI, W. F. Review of the different sources of uncertainty in single polarization radar-based estimates of rainfall. **Surveys in Geophysics**, v. 31, n. 1, p. 107–129, jan 2010. ISSN 0169-3298. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s10712-009-9079-x>. 1, 2

VIVEKANANDAN, J.; YATES, D. N.; BRANDES, E. A. The influence of terrain on rainfall estimates from radar reflectivity and specific propagation phase observations. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 16, n. 7, p. 837–845, 1999. Disponível em:

<https://doi.org/10.1175/1520-0426(1999)016<0837:TIOTOR>2.0.CO;2>. 9

VONNEGUT, B. Possible mechanism for the formation of thunderstorm electricity. Bulletin of the American Meteorological Society, v. 34, p. 378–381, 1953. 27

WEATHERTAP. Radar tutorial. 2018. Disponível em: <https://www. weathertap.com/guides/radar/weather-radar-tutorial.html{#}inter3>. Acesso em: 18 mai. 2018. 140

WILKS, D. S. Statistical methods in the atmospheric sciences. 2. ed. San Diego: Elsevier, 2006. 45, 46, 50, 51, 52

WILLIAMS, E. R. The tripole structure of thunderstorms. Journal of Geophysical Research, v. 94, n. D11, p. 13151, 1989. ISSN 0148-0227. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1029/JD094iD11p13151>. xiii, 27, 28

WOLFF, C. Radar basic principles. 2009. Disponível em: <a href="http://www.radartutorial.eu/druck/Book1.pdf">http://www.radartutorial.eu/druck/Book1.pdf</a>>. 18, 19

XU, W.; ADLER, R. F.; WANG, N.-Y. Improving geostationary satellite rainfall estimates using lightning observations: underlying lightning–rainfall–cloud

relationships. Journal of Applied Meteorology and Climatology, v. 52, n. 1, p. 213–229, 2013. 1, 16, 70, 83

YU, D.; SMALL, M.; HARRISON, R. G.; DIKS, C. Efficient implementation of the gaussian kernel algorithm in estimating invariants and noise level from noisy time series data. **Physical Review E**, APS, v. 61, n. 4, p. 3750, 2000. 74

ZHANG, P.; ZRNIC, D.; RYZHKOV, A. Partial beam blockage correction using dual-polarimetric measurements applied for estimating VIL. 2010. Disponível em: <https://www.applickage.com/applied/lineary/l

//nssl.noaa.gov/publications/wsr88d\_reports/FINAL\_BeamBlockage.doc>.
4, 7, 9

ZHANG, P.; ZRNIĆ, D.; RYZHKOV, A. Partial beam blockage correction using polarimetric radar measurements. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, v. 30, n. 5, p. 861–872, 2013. 9, 89

ZHANG, P.; ZRNIC, D. S.; RYZHKOV, A. Verification of beam blockage correction by comparison between radar QPE and rain gage measurement. 2011. Disponível em: <https://www.nssl.noaa.gov/ publications/wsr88d\_reports/FINAL2011-Tsk3-PBB-rain.pdf>. 7, 93

# APÊNDICE A - IDENTIFICAÇÃO DE BLOQUEIOS (Transformada de Hough)

Esta abordagem busca a detecção dos bloqueios de forma dinâmica, isto é, a medida que imagens sucessivas do radar são recebidas. Ela é baseada na identificação das retas formadas na imagem de refletividade que correspondem à obstrução do feixe micro-ondas emitido pelo radar. Visando a identificação de tais linhas, as seguintes técnicas de processamento digital de imagens foram empregadas: binarização, detecção de bordas e transformada de Hough<sup>1</sup>. Entretanto, esta abordagem não apresentou bons resultados devido à variabilidade da distribuição dos ecos, ou seja, da energia refletida pelos alvos a cada nova imagem, o que prejudica a detecção de forma contínua das linhas que caracterizam os bloqueios, conforme se pode ver na Figura A.1 na qual constata-se que as linhas detectadas num determinado horário são totalmente diferentes daquelas detectadas 50 minutos depois, para um determinado dia e para imagens PPI correspondentes, isto é, para a mesma elevação. Nessa figura, observam-se as imagens PPI, que correspondem à refletividade bruta, tendo na escala vertical os diferentes azimutes, e na horizontal, a distância ao radar.

A solução encontrada como ilustra a Subseção 4.2.1, foi a criação de um filtro estático baseado no campo de refletividade acumulada para um longo período de tempo, pois dessa forma a distribuição dos valores em toda região de alcance do radar tende a ser mais homogênea. Explorando essa homogeneidade é possível identificar os bloqueios como linhas que se caracterizam por apresentarem valores bem abaixo aos da sua vizinhança como ilustra a Figura 4.3.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Utiliza conversão do espaço Euclidiano para espaço de parâmetros ou espaço de Hough (MORD-VINTSEV; RAHMAN, 2013).

Figura A.1 - PPI original do radar de Jaraguari e as imagens correspondentes após o processamento correspondente à binarização, detecção de bordas e transformada de Hough para diferentes horários do dia 7 de setembro de 2014. As linhas detectadas aparecem em vermelho.



(b) Sequência de imagens e linhas detectadas a partir do PPI das 23:50hs.

## APÊNDICE B - FUNÇÃO OBJETIVO (findWindow)

A seguir é apresentado o código fonte em Python da função utilizada para definir de forma ótima os parâmetros adequados para integração do dados de descargas atmosféricas baseada na correlação entre o campo de densidade de ocorrência de descargas atmosféricas e a imagem de refletividade do radar, medida pelo *Matthew Coeficient Correlation* (MCC).

```
def findWindow(params, Optmize=True, sign=-1):
        .....
        Arguments:
        param - A list of three elements, where param[0] represents ti,
          param[1] represents tf and param[2] represents sigma
          (bandwith of kernel) to find and integrate lightnings
          for classification and calculate metrics.
        Optimize - Equals False is for only to access lightning to create
            density map.
        sign - A multiplier for f. Since we want to optimize it, and the
               scipy optimizers can only minimize functions, we need to
               multiply it by -1 to achieve the desired solution.
        Returns:
        Matthew Coeficiente Correlation between actual (weather radar data)
        and predicted (lightning density map).
        .....
        ti, tf, sigma = params
        global blurred, start_w, stop_w
        .....
        When the parameters fall out of the admissible range, return a
        wildly huge number (far from the data to be fitted). This will
        (hopefully) penalize this choice of parameters so much that minimize
```

```
will settle on some other admissible set of parameters as optimal:
.....
if not (-55 <= tf <= 10) or not( -60 <= ti <= tf - 5) or sigma > 20.:
        return abs(tf) + abs(ti) + 2
.....
Define Timestamp to get lightnings data from Pandas dataframe to
create a gridded lightning density map and apply Gaussian filter:
.....
radartime = (periodo[p] + time_offset_limit)
time offset = datetime.timedelta(minutes=ti)
start_w = radartime + time_offset
time offset = datetime.timedelta(minutes=tf)
stop_w = radartime + time_offset
date_mask = (df_final.index >= start_w) & (df_final.index < stop_w)</pre>
dates = df_final.index[date_mask]
grid = np.zeros(shape=(proj_prod['size_y'],proj_prod['size_x']))
x = df_final.ix[dates].longitude.as_matrix(columns=None)
y = df_final.ix[dates].latitude.as_matrix(columns=None)
i = ((y - y0) / dy).astype(int)
j = ((x - x0) / dx).astype(int)
for row,col in zip(i,j):
    grid[row,col] += 1.
blurred = gaussian_filter(grid, sigma=sigma)
blurred[blurred < 0.00001] = 0
blurred[outer_disk_mask] = 0 #Limit to range of weather radar
blurred = np.ma.masked_values (blurred, 0.)
```

```
predicted = (np.array(blurred) > 0.) * 1
if Optmize:
    if id_radar != 'JG1':
        predicted[grid_bloqueio > 0] = 0. #Remove azimuths totally
        affected per beam blockage
mcc = sign * (matthews_corrcoef(actual.ravel(), predicted.ravel()))
```

del grid
del predicted
gc.collect()

return mcc

# PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

#### Teses e Dissertações (TDI)

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

#### Notas Técnico-Científicas (NTC)

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

## Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

São propostas de projetos técnicocientíficos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

#### Publicações Seriadas

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

# Pré-publicações (PRE)

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

#### Manuais Técnicos (MAN)

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

## Relatórios de Pesquisa (RPQ)

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

#### Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

# Programas de Computador (PDC)

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