

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TELEINFORMÁTICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TELEINFORMÁTICA

Análise Comparativa de Filtros Adaptativos de Ruído Speckle

Carlos Igor Ramos Bandeira

FORTALEZA – CEARÁ
DEZEMBRO 2009



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TELEINFORMÁTICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TELEINFORMÁTICA

Análise Comparativa de Filtros Adaptativos de Ruído Speckle

Autor

Carlos Igor Ramos Bandeira

Orientador

Profa. Dr. Fátima N. Sombra de Medeiros

*Projeto Final de Curso submetido
à Coordenação do Programa de
Graduação em Engenharia de
Teleinformática da Universidade
Federal do Ceará como parte dos
requisitos para a obtenção do grau de
Engenheiro de Teleinformática.*

FORTALEZA – CEARÁ

DEZEMBRO 2009

CARLOS IGOR RAMOS BANDEIRA

Análise Comparativa de Filtros Adaptativos de Ruído Speckle

Este Trabalho foi julgado adequado para a obtenção do título de Engenheiro de Teleinformática e aprovado em sua forma final pelo Departamento de Graduação em Engenharia de Teleinformática da Universidade Federal do Ceará.

Carlos Igor Ramos Bandeira

Banca Examinadora:

Prof^a Dra. Fátima N. Sombra de Medeiros
Orientadora

Prof Dr. Elvio César Giraudo
Universidade Federal do Ceará

Prof Dr. Menotti E. da Silva Machado
Universidade Federal do Ceará

Prof Dr. Sérgio Antenor de Carvalho
Universidade Federal do Ceará

Fortaleza, 10 de Dezembro de 2009

Resumo

A busca por ferramentas que possibilitem análise e interpretação das inúmeras características que compõem uma imagem, em especial as imagens de radar de abertura sintética (SAR), é de fundamental importância em uma vasta gama de aplicações, dentre as quais podemos citar o monitoramento ambiental de áreas de exploração de petróleo, monitoramento de redes e gasodutos, etc. O imageamento de regiões por radares de abertura sintética é feito independente da iluminação solar, mesmo quando a atmosfera se apresenta nublada ou durante precipitações. Essas imagens incorporam um tipo de ruído (de padrão granular) conhecido como ruído *speckle* o qual está associado aos sistemas de imageamento coerente, tais como os obtidos por microondas, laser e ultra-sonografia, que dificulta a extração e análise dos objetos presentes na cena.

O processamento de imagens SAR requer em determinadas aplicações, um pré-processamento que envolve muitas vezes a filtragem de ruído. Entretanto, em aplicações de detecção de alvos como bóias de coleta oceanográfica, navios e tanques de guerra, este processamento pode comprometer estas pequenas estruturas, descartando-as. A motivação deste trabalho consiste em realizar uma análise comparativa de filtros adaptativos de ruído *speckle* através de técnicas de processamento e análise de imagens SAR para disponibilizar uma base de materiais e métodos, a serem aplicados no desenvolvimento e avaliação destas técnicas. Pretende-se definir um novo método adaptativo para filtragem de ruído *speckle* no qual combinam-se as técnicas do filtro de Kuan (clássico e com janelamento adaptativo) e o método *Min/Max* para melhorar o desempenho deste filtro clássico e para configurar uma alternativa à filtragem da média utilizada nos pixels que não seguem o modelo multiplicativo.

Abstract

The search for tools that enable analysis and interpretation of numerous characteristics that make up an image, in particular the images of synthetic aperture radar (SAR), is of fundamental importance in a wide range of applications, among which we can mention the environmental monitoring of oil exploration areas, monitoring of networks and pipelines, etc. The imaging of regions for synthetic aperture radars is made independent of sunlight, even when the atmosphere appears cloudy or during rainfall. These images incorporate a kind of noise (granular pattern) known as the speckle noise which is associated with coherent imaging systems such as those obtained by microwave, laser and ultrasonography, which difficults the extraction and analysis of the objects on the scene.

The processing of SAR images requires in certain applications, a preprocessing that often involves the filtering of noise. However, in applications of detection of targets as float of oceanographic, data collection, ships and tanks, this processing can compromise these small structures and even discarde them. The motivation of this work is to conduct a comparative analysis of the adaptive filters of the noise speckle through techniques for processing and analysis of SAR images to provide a base material and methods to be applied in the development and assessment of these techniques. We intende to define a new adaptive method for filtering the speckle noise that combine the Kuan filter (classic and windowing adaptive) technique and the *Min/Max* method to improve the performance of the classic filter and to ensure an alternative for the mean filter used in the pixels that do not follow the multiplicative model.

Dedico este trabalho aos meus pais Carlos e Ozanira, às minhas irmãs Karla e Carol, à minha namorada Olinda e ao meu afilhado Samuel Bruno.

Agradecimentos

Agradeço a Deus, pois Ele constitui tudo de bom e maravilhoso que possuímos e a minha família pelo empenho e sacrifícios que realizaram para que eu pudesse ter chegado a esta etapa da vida.

Aos meus pais Carlos e Ozanira pelo seu empenho em cumprir a árdua tarefa de educar seus filhos e procurar serem presentes em suas vidas.

Às minhas irmãs Karla e Carol e ao meu afilhado Samuel Bruno que completam a minha família.

À minha namorada Olinda, que sempre esteve presente e me apoiou em diversos momentos importantes da minha vida.

À professora Fátima Sombra, orientadora dedicada e amiga, pois não apenas supervisionou meu projeto final de curso, como também ensinou no que consiste ética profissional, compreensão, competência e respeito ao próximo.

Aos atuais integrantes do Grupo de Processamento de Imagens que me permitiram compartilhar conhecimento na área de processamento de imagens e vivenciar diversos momentos felizes.

Aos amigos Iális, Gladeston, Janaina e Régis, alunos de pós-graduação do DETI, pelas importantes contribuições que deram a este trabalho e auxílio intelectual quando precisei.

Agradeço à ajuda dos meus amigos por terem apostado em mim, pois estes me possibilitaram a aquisição de um conhecimento que consiste em algo que nunca me será tirado. Não posso esquecer dos companheiros de curso pelas horas incansáveis em que, contrariando todos os momentos desfavoráveis, soubemos passar momentos de ânimo e entusiasmo com a Engenharia.

Expresso minha gratidão a todo o corpo docente do Departamento de Engenharia de Teleinformática.

"A satisfação está no esforço feito para alcançar o objetivo, e não em tê-lo alcançado."

Ghandi

Sumário

| | |
|--|------------|
| Lista de Figuras | x |
| Lista de Tabelas | xi |
| Lista de Símbolos | xi |
| Lista de Siglas | xiv |
| 1 Introdução | 1 |
| 1.1 Motivação e Objetivos | 3 |
| 1.2 Metodologia | 4 |
| 1.3 Organização do Trabalho | 5 |
| 2 Fundamentação Teórica | 6 |
| 2.1 Introdução | 6 |
| 2.2 Imagens SAR | 7 |
| 2.3 Modelagem do <i>Speckle</i> | 9 |
| 2.3.1 Caminhada Aleatória no Plano Complexo | 9 |
| 2.3.2 Modelo de Distribuição Rayleigh | 12 |
| 2.3.3 Modelo de Distribuição Raiz de Gama | 13 |
| 2.3.4 Modelo Multiplicativo para Ruído <i>Speckle</i> | 15 |
| 2.4 Métodos Clássicos para Filtragem de Ruído <i>Speckle</i> | 17 |
| 2.4.1 Filtros Lineares e Não Lineares | 18 |
| 2.4.2 Filtros Localmente Adaptativos | 20 |
| 2.4.3 Janelamento Adaptativo | 24 |
| 2.4.4 Redução de Ruído baseada em Curvatura | 28 |
| 3 Método Proposto | 33 |
| 4 Avaliação da Filtragem | 35 |
| 4.1 Introdução | 35 |
| 4.2 Medidas de Avaliação de Filtragem | 36 |
| 4.2.1 Relação Sinal-Ruído | 36 |
| 4.2.2 Índice de Preservação de Borda | 36 |

| | | |
|--|--|-----------|
| 4.2.3 | Coeficiente de Correlação | 37 |
| 4.2.4 | Erro Quadrático Médio | 37 |
| 5 | Resultados e Discussões | 38 |
| 5.1 | Avaliação dos Resultados | 38 |
| 5.2 | Resultados de Avaliação da Filtragem de Imagens Artificialmente Contaminadas com Estatística de Imagens SAR em Amplitude e 1 Visada | 39 |
| 5.3 | Resultados de Avaliação da Filtragem de Imagens Artificialmente Contaminadas com Estatística de Imagens SAR em Amplitude e Múltiplas Visadas | 41 |
| 5.4 | Resultados de Avaliação da Filtragem de Imagens SAR Reais | 45 |
| 6 | Conclusões e Trabalhos Futuros | 50 |
| 6.1 | Perspectiva de Trabalhos Futuros | 50 |
| Apêndice A Resultados de Filtragem de Imagens Contaminadas por Ruído <i>Speckle</i> | | 52 |
| A.1 | Imagens Artificialmente Contaminadas com Estatística de Imagens SAR em Amplitude e 1 Visada | 53 |
| A.2 | Imagens Artificialmente Contaminadas com Estatística de Imagens em Amplitude e Múltiplas Visadas | 55 |
| A.3 | Imagem SAR Real Gerada em Amplitude e 1 Visada | 59 |
| A.4 | Imagem SAR Real Gerada em Amplitude e Múltiplas Visadas | 61 |
| Referências Bibliográficas | | 69 |

Lista de Figuras

| | | |
|------|--|----|
| 2.1 | Sistema de imageamento por radar aerotransportado ¹ | 8 |
| 2.2 | Caminhada aleatória no plano complexo. | 10 |
| 2.3 | Máscara de 3x3 pixels com coeficientes arbitrários. | 18 |
| 2.4 | (a) Imagem CAMERAMAN original, (b) contaminada por ruído impulsivo sal e pimenta, (c) contaminada com ruído <i>speckle</i> e respectivos resultados de filtragem, (d)-(e) aplicando o filtro da média (3x3) e (f)-(g) aplicando o filtro da mediana (3x3). | 20 |
| 2.5 | (a) Imagem SAR580 e (b) respectivo histograma. | 21 |
| 2.6 | Imagem SAR580 filtrada com janela 5x5 associada ao (a) filtro de Lee e (b) respectivo histograma. | 22 |
| 2.7 | Imagem SAR580 filtrada com janela 5x5 associada ao (a) filtro de Kuan e (b) respectivo histograma. | 23 |
| 2.8 | Imagem SAR580 filtrada com janela 5x5 associada ao (a) filtro de Frost e (b) respectivo histograma. | 24 |
| 2.9 | Imagem SAR580 filtrada com janela adaptativa proposta por Li (1988) associada ao (a) filtro de Kuan e (b) respectivo histograma. | 26 |
| 2.10 | Descrição retirada de (MARQUES, 2004) do janelamento adaptativo proposto por Park, Song e Pearlman (1999). | 27 |
| 2.11 | Imagem SAR580 filtrada com janela adaptativa proposta por Park, Song e Pearlman (1999) associada ao (a) filtro de Kuan e (b) respectivo histograma. | 27 |
| 2.12 | (a) Imagem SAR580 filtrada com a técnica <i>total variation</i> utilizando 300 iterações e parâmetro de evolução do tempo igual a 0,5 e (b) respectivo histograma. | 29 |
| 2.13 | Diagrama de blocos do método <i>Min/Max</i> | 32 |
| 2.14 | (a) Imagem SAR580 filtrada com a técnica <i>Min/Max</i> utilizando 300 iterações e $R = 1$ e (b) respectivo histograma. | 32 |
| 3.1 | Diagrama de blocos do método proposto. | 33 |
| 3.2 | Diagrama de blocos do método <i>Min/Max</i> clássico e adaptativo. | 34 |
| 4.1 | Metodologia adotada para avaliação dos resultados. | 36 |

| | | |
|------|---|----|
| 5.1 | Imagem BLA (a) <i>SNR</i> e (b) <i>EPI</i> | 40 |
| 5.2 | Imagem CARTOON (a) <i>SNR</i> e (b) <i>EPI</i> | 42 |
| 5.3 | Imagem MANCHAS (a) <i>SNR</i> e (b) <i>EPI</i> | 44 |
| 5.4 | Imagem CAÇAPAVA (a) <i>SNR</i> e (b) <i>EPI</i> | 46 |
| 5.5 | Imagem CSAR (a) <i>SNR</i> e (b) <i>EPI</i> | 47 |
| 5.6 | Imagem FEIJO (a) <i>SNR</i> e (b) <i>EPI</i> | 49 |
| A.1 | (a) Imagem BLA, (b) versão artificialmente contaminada com estatística de imagens SAR em amplitude e 1 visada e (c) respectivo histograma. | 53 |
| A.2 | Imagem BLA contaminada artificialmente e processada pelos (a) Kuan 3x3, (b) Kuan 5x5, (c) Kuan 7x7, (d)-(f) respectivos histogramas. | 53 |
| A.3 | Imagem BLA contaminada artificialmente e processada pelos (a) Kuan Li, (b) Kuan Park, (c) <i>Min/Max</i> , (d)-(f) respectivos histogramas. | 54 |
| A.4 | Imagem BLA contaminada artificialmente e processada pelos (a) Kuan <i>Min/Max</i> 3x3, (b) Kuan <i>Min/Max</i> 5x5, (c) <i>Kuan Min/Max</i> 7x7, (d)-(f) respectivos histogramas. | 54 |
| A.5 | (a) Imagem CARTOON, (b) versão artificialmente contaminada com estatística de imagens SAR em amplitude e 6,7 visadas e (c) respectivo histograma. | 55 |
| A.6 | Imagem CARTOON contaminada artificialmente e processada pelos (a) Kuan 3x3, (b) Kuan 5x5, (c) Kuan 7x7, (d)-(f) respectivos histogramas. | 55 |
| A.7 | Imagem CARTOON contaminada artificialmente e processada pelos (a) Kuan Li, (b) Kuan Park, (c) <i>Min/Max</i> , (d)-(f) respectivos histogramas. | 56 |
| A.8 | Imagem CARTOON contaminada artificialmente e processada pelos (a) Kuan <i>Min/Max</i> 3x3, (b) Kuan <i>Min/Max</i> 5x5, (c) <i>Kuan Min/Max</i> 7x7, (d)-(f) respectivos histogramas. | 56 |
| A.9 | (a) Imagem MANCHAS, (b) versão artificialmente contaminada com estatística de imagens SAR em amplitude e 3 visadas e (c) respectivo histograma. | 57 |
| A.10 | Imagem MANCHAS contaminada artificialmente e processada pelos (a) Kuan 3x3, (b) Kuan 5x5, (c) Kuan 7x7, (d)-(f) respectivos histogramas. | 57 |
| A.11 | Imagem MANCHAS contaminada artificialmente e processada pelos (a) Kuan Li, (b) Kuan Park, (c) <i>Min/Max</i> , (d)-(f) respectivos histogramas. | 58 |
| A.12 | Imagem MANCHAS contaminada artificialmente e processada pelos (a) Kuan <i>Min/Max</i> 3x3, (b) Kuan <i>Min/Max</i> 5x5, (c) <i>Kuan Min/Max</i> 7x7, (d)-(f) respectivos histogramas. | 58 |
| A.13 | (a) Imagem CAÇAPAVA, imagem SAR em amplitude e 1 visadas e (b) respectivo histograma. | 59 |
| A.14 | Imagem CAÇAPAVA contaminada artificialmente e processada pelos (a) Kuan 3x3, (b) Kuan 5x5, (c) Kuan 7x7, (d)-(f) respectivos histogramas. | 59 |

| | |
|---|----|
| A.15 Imagem CAÇAPAVA contaminada artificialmente e processada pelos (a) Kuan Li, (b) Kuan Park, (c) <i>Min/Max</i> , (d)-(f) respectivos histogramas. | 60 |
| A.16 Imagem CAÇAPAVA contaminada artificialmente e processada pelos (a) Kuan <i>Min/Max</i> 3x3, (b) Kuan <i>Min/Max</i> 5x5, (c) <i>Kuan Min/Max</i> 7x7, (d)-(f) respectivos histogramas. | 60 |
| A.17 (a) Imagem CSAR, imagem SAR em amplitude e 6,7 visadas e (b) respectivo histograma. | 61 |
| A.18 Imagem CSAR contaminada artificialmente e processada pelos (a) Kuan 3x3, (b) Kuan 5x5, (c) Kuan 7x7, (d)-(f) respectivos histogramas. | 61 |
| A.19 Imagem CSAR contaminada artificialmente e processada pelos (a) Kuan Li, (b) Kuan Park, (c) <i>Min/Max</i> , (d)-(f) respectivos histogramas. | 62 |
| A.20 Imagem CSAR contaminada artificialmente e processada pelos (a) Kuan <i>Min/Max</i> 3x3, (b) Kuan <i>Min/Max</i> 5x5, (c) <i>Kuan Min/Max</i> 7x7, (d)-(f) respectivos histogramas. | 62 |
| A.21 (a) Imagem FEIJO, imagem SAR em amplitude e 3 visadas e (b) respectivo histograma. | 63 |
| A.22 Imagem FEIJO contaminada artificialmente e processada pelos (a) Kuan 3x3, (b) Kuan 5x5, (c) Kuan 7x7, (d)-(f) respectivos histogramas. | 63 |
| A.23 Imagem FEIJO contaminada artificialmente e processada pelos (a) Kuan Li, (b) Kuan Park, (c) <i>Min/Max</i> , (d)-(f) respectivos histogramas. | 64 |
| A.24 Imagem FEIJO contaminada artificialmente e processada pelos (a) Kuan <i>Min/Max</i> 3x3, (b) Kuan <i>Min/Max</i> 5x5, (c) <i>Kuan Min/Max</i> 7x7, (d)-(f) respectivos histogramas. | 64 |

Lista de Tabelas

| | | |
|-----|--|----|
| 2.1 | Nomenclatura padrão do IEEE para banda de radar ² | 7 |
| 2.2 | Valor teórico de σ_n para distribuição Rayleigh. | 14 |
| 2.3 | Valor teórico de σ_n para distribuição raiz de gama. | 15 |
| 2.4 | R_v x Janela. | 25 |
| 5.1 | Medidas de avaliação de filtragem sobre a imagem BLA. | 41 |
| 5.2 | Medidas de avaliação de filtragem sobre a imagem CARTOON. | 43 |
| 5.3 | Medidas de avaliação de filtragem sobre a imagem MANCHAS. | 45 |
| 5.4 | Medidas de avaliação de filtragem sobre a imagem CAÇAPAVA. | 47 |
| 5.5 | Medidas de avaliação de filtragem sobre a imagem CSAR. | 48 |
| 5.6 | Medidas de avaliação de filtragem sobre a imagem FEIJO. | 49 |

Lista de Símbolos

Notação matemática e estatística

| | |
|----------------|-------------------------------|
| \mathbf{x} | Notação vetorial |
| \mathbf{X} | Notação matricial |
| $\Re\{\cdot\}$ | Argumento Real |
| $\Im\{\cdot\}$ | Argumento Complexo |
| X, Z | Variáveis aleatórias |
| N | Número de amostras |
| $P\{\cdot\}$ | Probabilidade |
| $E[\cdot]$ | Operador esperança matemática |
| $Var[\cdot]$ | Operador variância |
| μ_s | Média amostral |
| σ | Desvio padrão |
| σ^2 | Variância |
| σ_s^2 | Variância amostral |

Variáveis

| | |
|--------------|--------------------------------|
| \mathbf{x} | Notação vetorial |
| n | Ruído |
| x | Pixel não ruidoso |
| z | Pixel ruidoso |
| N | Número de visadas |
| SNR | Relação sinal-ruído |
| MSE | Erro quadrático médio |
| EPI | Índice de preservação de borda |

Funções

$\ln(\cdot)$ Logaritmo natural

$\exp(\cdot)$ Função exponencial

e Exponencial

Lista de Siglas

| | |
|-----|--------------------------------|
| SAR | Radarm de Abertura Sintética |
| SNR | Relação Sinal-Ruído |
| MSE | Erro Quadrático Médio |
| EPI | Índice de Preservação de Borda |

Capítulo 1

Introdução

O termo Radar (*Radio Detection and Ranging*) tem sido utilizado de forma genérica para classificar os sistemas que operam na faixa de frequência de microondas e foram utilizados inicialmente para fins militares durante a Segunda Guerra Mundial e posteriormente para fins civis a partir da década de 70. Nos últimos anos tem havido um crescente interesse nos dados obtidos através de radares de abertura sintética (Synthetic Aperture Radar - SAR). A importância destes sistemas se deve à sua capacidade de gerar imagens de alta resolução sem depender da iluminação solar ou das condições meteorológicas, sendo desta forma um valioso instrumento para aplicações civis e militares.

Os radares de abertura sintética têm desempenhado um importante papel na área de sensoriamento remoto. Destaca-se sua importância, por exemplo, no mapeamento e monitoração do uso do solo e desmatamento em regiões como a Floresta Amazônica, acompanhamento e discriminação de culturas, cartografia, planejamento urbano e rural, etc. É crescente seu uso na vigilância de costa marítima quanto a desastres ambientais por derrame de óleo, controle de temperatura dos oceanos, rastreamento de cardumes, estudo da velocidade de correntes marítimas e invasão de águas territoriais.

A poluição por derrame de óleo em ambiente marinho é assunto de interesse público, político e científico, pois causa efeitos graves no frágil ecossistema marinho. Portanto, torna-se necessário que autoridades de controle e vigilância em vários países invistam em sistemas de prevenção e monitoramento remoto de áreas de risco. Estudos de monitoramento ambiental por imagens SAR têm sido bastante difundidos

e incentivados em países como a Noruega e o Canadá, tendo em vista que é possível minimizar ou até eliminar operações de risco ambiental que vão desde a limpeza ilegal de tanques de navios petroleiros ao desmatamento de florestas (MEDEIROS, 1999).

A crescente procura e disponibilidade atual e futura dos dados SAR geram uma profunda necessidade de desenvolvimento de técnicas automáticas de processamento e análise. Entretanto, a proposta e implementação destas técnicas são tarefas relativamente complexas, uma vez que os sistemas SAR fazem uso de radiação coerente¹e os dados gerados por tais dispositivos são corrompidos por um ruído multiplicativo denominado *speckle*. Este ruído causa grandes variações nos valores de intensidade de cada ponto da imagem e dificulta dramaticamente o emprego e implementação de técnicas automáticas para extração de informações destes dados.

Os dados SAR apresentam características predominantemente aleatórias e diversos estudos têm sido conduzidos no sentido da sua modelagem probabilística. As propriedades estatísticas dos dados SAR podem ser diferentes para os diversos alvos e para diferentes imagens, uma vez que o retroespalhamento é dependente de vários fatores, alguns relacionados ao sensor (comprimento de onda, ângulo de incidência, polarização), outro do alvo (rugosidade, permissividade) e outros do tipo de processamento (número de visadas, formato).

A redução do ruído *speckle* é uma tarefa importante para interpretação correta das imagens SAR. As técnicas para suavizar o ruído *speckle* podem ser classificadas em duas categorias. Na primeira, as técnicas reduzem a intensidade do ruído *speckle* pela média de cada posição da imagem e podem ser realizadas tanto no domínio espacial quanto no domínio da frequência. Este processo denominado processamento múltiplas visadas, é realizado durante a formação da imagem. As técnicas da segunda categoria suavizam o *speckle* depois da imagem ter sido formada através de algoritmos de processamento de filtragem (ZHANG, 2004).

O processo de filtragem na primeira categoria é equivalente a aplicar filtros passa-baixa, que são filtros eficientes e simples quando as áreas de interesse sobre a imagem são homogêneas. Contudo, existem muitas aplicações que tratam de áreas de interesse sobre imagens heterogêneas e, neste caso, os filtros passa-baixa não são eficientes. Por esse motivo, diversos filtros têm sido desenvolvidos de acordo com a

¹Em termos de aplicação para radar, o termo coerente é utilizado para descrever sistemas que preservam a fase do sinal recebido.

segunda categoria para a redução do ruído *speckle*. Estes filtros são classificados em lineares ou não-lineares, podendo ser adaptativos ou não.

Os métodos de filtragem clássicos incluem o filtro de Lee (LEE, 1980), filtro de Kuan (KUAN et al., 1985), filtro de Frost (FROST et al., 1982), filtro de Lee e filtro de Frost melhorados (LOPES; TOUZI; NEZRY, 1990), Gamma MAP (KUAN et al., 1987). Estas técnicas utilizam janelas de dimensões fixas ao longo de toda a imagem.

No entanto, pode-se incorporar aos métodos de filtragem, técnicas de janelamento adaptativo como as propostas por Li (1988) e por Park, Song e Pearlman (1999). O objetivo destas propostas consiste em variar as dimensões da janela de filtragem, ajustando-as de modo que janelas de dimensões maiores sejam aplicadas na filtragem de áreas homogêneas e janelas de dimensões menores em áreas de bordas e detalhes, para preservação das mesmas (MARQUES, 2004).

Segundo (COSTA, 2004), várias linhas de pesquisa têm conduzido a outros tipos de filtros, tais como, o homomórfico (JAIN, 1989; GONZALEZ; WOODS, 2002), o geométrico (CRIMMINS, 1986), os que obedecem o critério *Maximum A Posteriori* (MAP) (SANT'ANNA, 1995), os robustos (FRERY et al., 1997b), o proposto por Ruiz (1996) e por Xiao, Li e Moody (2003), os baseados nas operações morfológicas (CANDEIAS; FRERY, 1996), na abordagem *wavelets* (ARGENTI; ALPARONE, 2002; LEGUIZAMÓN, 1996) e nos filtros stack (BUEMI; JACOBO; MEJAIL, 2009). Além disso, pode-se fazer uso de outros modelos como o reavy-tailed rayleigh (ACHIM; KURUOGLU; ZERUBIA, 2006) e outras distribuições como a GA0 (MEJAIL et al., 2003).

Percebe-se que as linhas de pesquisas atuais têm procurado propor novas abordagens de filtragem do ruído *speckle*. Entretanto, ainda existem trabalhos que visam propor melhorias nos filtros clássicos como o método proposto por Lee et al. (2009). No intuito de seguir esta linha de pesquisa, o método proposto neste trabalho dispõe uma alternativa à filtragem da média utilizada nos pixels que não seguem o modelo multiplicativo.

1.1 Motivação e Objetivos

No processo de filtragem do *speckle* em imagens SAR normalmente ocorre perda de informação, apesar de ser observado que uma melhoria na qualidade destas imagens pode ser obtida através da aplicação de técnicas de filtragem desenvolvidas para este fim. Entretanto, é importante que a qualidade da informação extraída

deva ser assegurada para que estas sejam corretamente interpretadas independente da sua aplicação.

Este trabalho tem como objetivos principais:

- ▶ realizar uma revisão bibliográfica em artigos científicos e livros técnicos, estudando a análise estatística do ruído *speckle*, técnicas clássicas e adaptativas de filtragem de *speckle* em imagens sintéticas e reais;
- ▶ realizar um estudo comparativo de filtros adaptativos de ruído *speckle*;
- ▶ definir um novo método adaptativo para filtragem de ruído *speckle* no qual combinam-se as técnicas do filtro de Kuan (clássico e com janelamento adaptativo) e o método *Min/Max* para melhorar o desempenho deste filtro clássico e para configurar uma alternativa à filtragem da média utilizada nos pixels que não seguem o modelo multiplicativo.
- ▶ avaliação do método proposto em relação ao desempenho dos diferentes filtros descritos neste trabalho, entre os quais estão aqueles que consideram a estatística do ruído *speckle*;
- ▶ testes dos algoritmos em imagens SAR sintéticas e reais para validação do método.

1.2 Metodologia

A proposta deste trabalho consiste em desenvolver e avaliar métodos de supressão do ruído *speckle* presente em imagens SAR aplicadas ao sensoriamento remoto. Para esta finalidade, o desempenho dos filtros redutores de *speckle* é avaliado de acordo com os aspectos de redução da intensidade do ruído e perda da informação de bordas.

Neste trabalho são filtradas imagens contaminadas artificialmente com ruído *speckle* e imagens SAR reais, aplicando algoritmos de filtragem espacial (GONZALEZ; WOODS, 2002), filtros localmente adaptativos (LEE, 1981; KUAN et al., 1987; FROST et al., 1982), janelamento adaptativo (LI, 1988; PARK; SONG; PEARLMAN, 1999) e redução de ruído baseada em curvatura (OSHER; FEDKIW, 2002; SETHIAN, 1999). Posteriormente, medidas de avaliação quantitativa são utilizadas no intuito de permitir uma adequada verificação no comportamento dos filtros utilizados em vários tipos de imagens contendo uma diversidade satisfatória no que diz respeito à presença de alvos e detalhes.

1.3 Organização do Trabalho

Este trabalho apresenta a seguinte organização:

- ▶ no Capítulo 2 são introduzidos princípios da formação de imagens SAR e modelagem estatística do ruído *speckle*. São ainda revisados os principais métodos presentes na literatura que utilizam filtragem espacial, filtros localmente adaptativos, janelamento adaptativo e redução de ruído baseada em curvatura, aplicados no processamento de imagens SAR;
- ▶ no Capítulo 3 é apresentado o método proposto neste trabalho;
- ▶ no Capítulo 4 são apresentadas as medidas de avaliação de desempenho de filtragem, utilizadas neste trabalho;
- ▶ no Capítulo 5 são avaliados os métodos de filtragem empregados neste trabalho e apresentado um estudo comparativo de desempenho dos métodos de filtragem utilizados;
- ▶ o Capítulo 6 finaliza este trabalho com as discussões gerais, conclusões e contribuições a respeito dos resultados obtidos, destacando-se as perspectivas de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

2.1 Introdução

O sensoriamento remoto é hoje um dos mecanismos utilizados para a obtenção de informações da superfície terrestre, tendo como princípio a obtenção da mesma sem contato físico e de forma sistemática, assim como em um intervalo de tempo regular.

Grande parte do esforço de pesquisa na área de sensoriamento remoto se concentra na tarefa de extração de informações de imagens obtidas por satélites orbitais. Este esforço é particularmente importante no caso de países com extensões continentais como é o caso do Brasil. Satélites utilizando sensores nunca antes utilizados em missões orbitais civis tornaram-se operacionais. Este é o caso dos satélites que levam a bordo um tipo de sensor imageador ativo denominado radar de abertura sintética (SAR), que opera na região de microondas.

Sistemas imageadores SAR pela sua capacidade de aquisição independente de condições atmosféricas e penetração para além da camada superficial da cobertura vegetal, têm despertado o interesse da comunidade de Sensoriamento Remoto e motivado os governos das principais nações industrializadas a realizarem investimentos nesta área.

Neste capítulo são apresentados métodos de aquisição de imagens a partir de sistemas SAR, como é gerado o ruído *speckle* e o modelo estatístico adotado na literatura. É feita ainda uma revisão bibliográfica sobre os métodos de filtragem de imagens SAR na literatura.

2.2 Imagens SAR

Os sensores remotos são sistemas fotográficos ou óptico-eletrônicos capazes de detectar e registrar, sob a forma de imagens ou não, o fluxo de energia radiante refletido ou emitido por objetos distantes. Podem ser classificados em função da fonte de energia como ativos ou passivos. Os sistemas ativos possuem sua própria fonte de radiação eletromagnética, trabalhando em faixas restritas do espectro enquanto que os sistemas passivos, por não possuírem fonte própria de radiação, realizam a medição da radiação solar refletida ou radiação emitida pelos alvos (SPRING-DPI/INPE, 2009).

A faixa de microondas é dividida em bandas, designadas por letras, e está mostrada na Tabela 2.1. Os sensores que operam nesta faixa possuem a vantagem de adquirir dados independentemente da iluminação solar e de serem pouco influenciados pelas condições atmosféricas, uma vez que a transmitância atmosférica é praticamente inalterada para a faixa de microondas (DUTRA et al., 2003).

Tabela 2.1: Nomenclatura padrão do IEEE para banda de radar¹.

| Designação | Comprimento de Onda | Frequência |
|----------------------|---------------------|----------------|
| HF | 100 m - 10 m | 3 - 30 MHz |
| VHF | 10 m - 1 m | 30 - 300 MHz |
| UHF | 100 cm - 30 cm | 300 - 1000 MHz |
| Banda L | 30 cm - 15 cm | 1 - 2 GHz |
| Banda S | 15 cm - 7,5 cm | 2 - 4 GHz |
| Banda C | 7,5 cm - 3,75 cm | 4 - 8 GHz |
| Banda X | 3,75 cm - 2,50 cm | 8 - 12 GHz |
| Banda K _u | 2,50 cm - 1,67 cm | 12 - 18 GHz |
| Banda K | 1,67 cm - 1,11 cm | 18 - 27 GHz |
| Banda K _a | 1,11 cm - 0,75 cm | 27 - 40 GHz |
| Banda V | 7,5 mm - 4,0 mm | 40 - 75 GHz |
| Banda W | 4,0 mm - 2,7 mm | 75 - 110 GHz |
| Banda mm | 2,7 mm - 1,0 mm | 110 - 300 GHz |

¹IEEE Std. 521-2002, IEEE Standard Letter Designations for Radar-Frequency Bands

O radar é um exemplo de sistema ativo comumente usado em sensoriamento remoto. Em um radar de abertura real, a resolução em azimute é determinada pela largura angular do feixe (varredura) da faixa de terreno iluminada pelo feixe de radar. Para que dois objetos sejam discriminados numa imagem, devem estar separados em azimute por uma distância superior à largura do feixe no solo.

A resolução de azimute r_a representa o nível de detalhamento da região. Por se tratar de um parâmetro importante, pode-se relacionar a mesma com o comprimento da antena transmissora l , o comprimento de onda λ e o alcance R_0 entre o alvo e a plataforma móvel (RICHARDS, 1986 apud MEDEIROS, 1999, p. 10), através de uma equação dada por

$$r_a = \frac{R_0 \lambda}{l}. \quad (2.1)$$

Em um radar de abertura real, a resolução em azimute é determinada pela largura angular do feixe (varredura) da faixa de terreno iluminada pelo feixe de radar. Se r_a é da ordem de metros, isso significa que é possível o imageamento de alvos desta ordem. O alcance representa a largura da faixa imageada pelo sistema. A Equação 2.1 mostra que a resolução de azimute é inversamente proporcional ao comprimento de antena, ou seja, para se obter baixos valores de r_a (na ordem de metros) torna-se necessário a utilização de antenas com comprimentos na ordem de quilômetros, o que é impraticável (RICHARDS, 1986 apud MARQUES, 2004, p. 10).

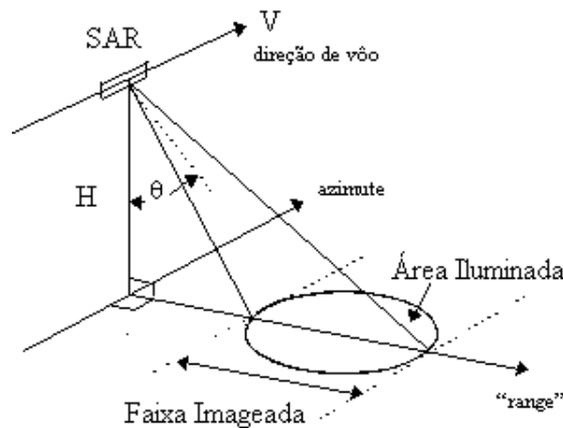


Figura 2.1: Sistema de imageamento por radar aerotransportado².

Este problema é contornado a partir do desenvolvimento dos sistemas SAR. Um sistema SAR, cujo funcionamento é exibido na Figura 2.1, é um sistema de

²Baseado em <http://www.dpi.inpe.br/spring/teoria/radar/img00010.gif>, acessado em 26 de outubro de 2006

radar de visada lateral que gera uma imagem de elevada resolução da superfície terrestre (para aplicações de sensoriamento remoto). O radar imageador de visada lateral registra dados ao se deslocar ao longo de sua trajetória. Desta forma, faixas contínuas da superfície do solo são iluminadas paralela e unilateralmente à direção de vôo e gravadas pelo sistema. Posteriormente, os sinais coletados são processados para que imagens de radar sejam geradas.

A dimensão transversal é denominada alcance (*range*). A extremidade do alcance mais próxima do nadir (os pontos diretamente abaixo do radar) denomina-se alcance próximo (*near range*) e a extremidade mais afastada do radar denomina-se alcance distante (*far range*). A dimensão longitudinal denomina-se azimute. Por ser um sistema ativo, a resolução real do sensor SAR tem duas dimensões: a resolução em azimute e a resolução de alcance (*range*). O sistema SAR usa o efeito Doppler (baseado no deslocamento da plataforma) e o histórico das mudanças de fase a ele associado para simular uma antena cujo comprimento é muitas vezes maior que o da antena real. Utiliza-se processamento de sinais digitais para focar a imagem e obter uma resolução maior que aquelas adquiridas por radar convencional (CANADA, 2009).

2.3 Modelagem do *Speckle*

Como a essência da imagem SAR é o imageamento coerente, o contraste entre os alvos e a desordem do fundo pode ser realçada através do processamento coerente de imagens SAR (LOPES; TOUZI; NEZRY, 1990).

Entretanto, inerente a este tipo de processamento encontra-se um ruído de padrão granular denominado *speckle*. Durante bastante tempo, este fenômeno foi investigado e pesquisadores concluíram que os métodos da teoria da probabilidade e da estatística têm sido os que melhor o descrevem. Logo, é importante conhecer as estatísticas de primeira e segunda ordem da amplitude, intensidade e fase do *speckle* que são derivadas da caminhada aleatória no plano complexo (GOODMAN, 1975 apud MEDEIROS, 1999, p. 10) e serão mostradas na seção a seguir segundo (MEDEIROS, 1999; MARQUES, 2004).

2.3.1 Caminhada Aleatória no Plano Complexo

Seja $u(x, y, z; t)$ a função das componentes de um campo elétrico em um ponto de observação (x, y, z) no instante de tempo t . Considere que cada componente de

u pode ser descrita pela expressão:

$$u(x, y, z; t) = A_u(x, y, z) e^{j2\pi ft} \quad (2.2)$$

em que f é a frequência e A_u representa o fasor de amplitude do campo com fase θ que é representado por:

$$A_u(x, y, z) = |A_u(x, y, z)| e^{j\theta} \quad (2.3)$$

A representação do fasor resultante é dada pelo somatório das N contribuições como mostra a expressão:

$$A(x, y, z) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=1}^N |A_u^k| e^{j\varphi_k} \quad (2.4)$$

em que φ_k representa a fase.

A representação fasorial do campo resultante A e suas contribuições no plano complexo é denominada caminhada aleatória. A Figura 2.2 ilustra a representação fasorial da caminhada aleatória e o fasor amplitude resultante da soma das N contribuições.

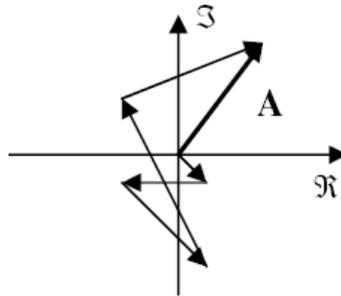


Figura 2.2: Caminhada aleatória no plano complexo.

As propriedades do campo elétrico resultante são derivadas em (GOODMAN, 1975 apud MEDEIROS, 1999, p. 12), supondo que a fase e a amplitude dos elementos fasoriais são estatisticamente independentes entre si e das amplitudes e fases dos outros elementos, bem como as fases dos elementos são uniformemente distribuídas dentro do intervalo $(-\pi, \pi)$.

Sejam as partes real e imaginária do campo descritas por:

$$\begin{aligned}\Re \{A\} &= \sum_{k=1}^N |A_u^k| \cos \Phi_k, \\ \Im \{A\} &= \sum_{k=1}^N |A_u^k| \sin \Phi_k.\end{aligned}\tag{2.5}$$

As esperanças matemáticas das partes real e imaginária do fasor complexo são obtidas através das expressões

$$\begin{aligned}E[\Re \{A\}] &= \sum_{k=1}^N E[|A_u^k|] E[\cos \Phi_k], \\ E[\Im \{A\}] &= \sum_{k=1}^N E[|A_u^k|] E[\sin \Phi_k].\end{aligned}\tag{2.6}$$

De acordo com o modelo apresentado acima, dois importantes resultados podem ser obtidos. Primeiramente, considerando a fase Φ_k uniformemente distribuída no intervalo $(-\pi, \pi)$ obtém-se:

$$\begin{aligned}E[\cos \Phi_k] &= E[\sin \Phi_k] = 0, \\ E[\Re \{A\}] &= E[\Im \{A\}] = 0.\end{aligned}\tag{2.7}$$

Analogamente, é provado que o segundo resultado importante é que os momentos de segunda ordem das partes real e imaginária do campo complexo são iguais e ortogonais, ou seja,

$$\begin{aligned}E[\Re \{A\}^2] &= E[\Im \{A\}^2] = \sigma^2, \\ E[\Re \{A\} \Im \{A\}] &= 0.\end{aligned}\tag{2.8}$$

Considerando o caso em que o número de componentes A_k^u é considerado grande, as partes real ($\Re \{A\}$) e imaginária ($\Im \{A\}$) serão a soma de um número grande de variáveis aleatórias independentes. De acordo com o Teorema Central do Limite, a densidade conjunta de $\Re \{A\}$ e $\Im \{A\}$ é assintoticamente gaussiana (GIBRA, 1973 apud MEDEIROS, 1999, p. 13), ou seja,

$$p(\Re \{A\}, \Im \{A\}) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{\Re \{A\}^2 + \Im \{A\}^2}{2\sigma^2}}.\tag{2.9}$$

Em sistemas físicos o sinal resultante da caminhada no plano complexo pode ser

medido em amplitude (x_A) ou intensidade (x_I), de acordo com as relações:

$$\begin{aligned} x_I &= (\Re\{A\})^2 + (\Im\{A\})^2, \\ x_A &= \sqrt{x_I}, \\ \theta &= \tan^{-1}\left(\frac{\Im\{A\}}{\Re\{A\}}\right). \end{aligned} \quad (2.10)$$

Na aquisição de imagens SAR, o sinal retroespalhado pode ser medido em intensidade ou amplitude. Os sinais medidos em intensidade e única visada seguem uma distribuição exponencial, os sinais medidos em amplitude e única visada seguem uma distribuição Rayleigh e os sinais medidos em amplitude e múltiplas visadas, que são objetos de estudo deste trabalho, a distribuição raiz de gama (MARQUES, 2004).

2.3.2 Modelo de Distribuição Rayleigh

Através de manipulações das Equações 2.8, 2.9 e 2.10, segundo técnicas de transformação de variáveis aleatórias, verifica-se que a amplitude (x_A) segue uma distribuição Rayleigh que descreve a distribuição estatística do sinal retroespalhado, obtido em amplitude e uma visada (MEDEIROS, 1999),

$$p_{x_A}(x_A) = \frac{x_A}{\sigma^2} e^{-\frac{x_A}{2\sigma^2}}, \quad x_A \geq 0 \quad (2.11)$$

com média e variância dadas, respectivamente, pela equações

$$E[x_A] = \sigma \sqrt{\frac{\pi}{2}}, \quad (2.12)$$

$$Var[x_A] = \left(2 - \frac{\pi}{2}\right) \sigma^2. \quad (2.13)$$

Assumindo que o modelo multiplicativo impõe média unitária para o ruído ($E[x_A] = 1$), o parâmetro σ pode ser determinado. Esta distribuição possui uma propriedade importante que relaciona o desvio padrão e a média, podendo ser denominada desvio padrão do *speckle* o qual é constante e expressa como

$$\sigma_n = \frac{\sqrt{Var(x_A)}}{E[x_A]} = \sqrt{\frac{4}{\pi} - 1} = 0,5227. \quad (2.14)$$

Em imagens contaminadas por ruído *speckle*, cujo modelo de distribuição é

Rayleigh, este valor também representa a relação sinal-ruído em regiões homogêneas da imagem (MARQUES, 2004).

2.3.3 Modelo de Distribuição Raiz de Gama

Há duas principais categorias de técnicas para redução da intensidade do ruído *speckle* em imagens SAR. A primeira é a técnica do processamento com múltiplas visadas (*multilook*) e a segunda é a técnica da filtragem da imagem no domínio espacial (PARK; SONG; PEARLMAN, 1999).

A primeira opção comentada consiste em gerar imagens SAR com múltiplas visadas. Esta técnica consiste em dividir o comprimento de abertura sintética (ou espectro de frequência Doppler) em N segmentos. Cada segmento é processado independentemente para formar uma imagem em amplitude ou intensidade e as N imagens são somadas para juntas formarem uma imagem SAR de N visadas (LEE et al., 1994). De acordo com a Equação 2.1, este processamento compromete a resolução em azimute da imagem, apesar de reduzir o desvio padrão do *speckle*. Uma alternativa para a obtenção da imagem em amplitude e múltiplas visadas, é a imagem final ser constituída da média das imagens em amplitudes de cada visada (LEE et al., 1994), ou seja,

$$x_{A_{N_Visadas}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{A_i}. \quad (2.15)$$

Assume-se neste caso que as imagens são estatisticamente independentes entre si.

Uma outra alternativa para obtenção da imagem em amplitude e múltiplas visadas consiste em fazer a média de N imagens intensidade (x_I) e aplicar a raiz quadrada ao resultado (LEE et al., 1994), ou seja,

$$(x_A)_{N_Visadas} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{I_i}}. \quad (2.16)$$

Para imagens em amplitude e múltiplas visadas o desvio padrão do ruído é reduzido da proporção de \sqrt{N} e sua função densidade de probabilidade é uma aproximação obtida da convolução de N distribuições Rayleigh estatisticamente independentes, sendo aproximada para $N > 2$ pela função raiz de gama (LEE et

al., 1994):

$$p(x_A) = \frac{2N^N}{\sigma^{2N}\Gamma(N)} x_A^{2N-1} e^{-\frac{Nx_A}{\sigma^2}}, \quad (2.17)$$

em que $\Gamma(\cdot)$ representa a função gama (BOAS, 1983). A média e variância da distribuição raiz de gama são dadas, respectivamente, pelas expressões

$$E[x_A] = \frac{\Gamma(N+0,5)}{\Gamma(N)} \sqrt{\frac{\sigma^2}{N}}, \quad (2.18)$$

$$Var[x_A] = \left(N - \frac{\Gamma^2(N+0,5)}{\Gamma^2(N)} \right) \frac{\sigma^2}{N}. \quad (2.19)$$

O desvio padrão do ruído *speckle* é obtido da Equação 2.14, da qual pode-se obter ainda o número equivalente de visadas *ENL* (*equivalent number of looks*),

$$\sigma_n = \frac{\sqrt{\frac{4}{\pi} - 1}}{\sqrt{N}} = \frac{0,5227}{\sqrt{N}}, \quad (2.20)$$

$$ENL_A = 0,2732 \frac{1}{\sigma_n^2}. \quad (2.21)$$

Tabela 2.2: Valor teórico de σ_n para distribuição Rayleigh.

| Número de Visadas (Looks) N | $\sigma_n = \frac{\sigma_z}{\bar{z}}$ | |
|----------------------------------|---------------------------------------|---------------------------|
| | Média de Amplitudes | Raiz da Intensidade Média |
| 1 | 0,5227 | 0,5227 |
| 2 | 0,3696 | 0,3630 |
| 3 | 0,3017 | 0,2941 |

Para a obtenção de imagens SAR em intensidade com múltiplas visadas o processo é análogo, ou seja, faz-se a média de N imagens intensidades independentes cuja distribuição resultante da média de N imagens com distribuição exponencial negativa é a distribuição gama. A função densidade gama, sua esperança matemática e variância são dadas pelas expressões (LEE et al., 1994):

$$p(x_A) = \frac{N^N x_I^{N-1}}{\Gamma(N)\sigma^{2N}} e^{-\frac{Nx_I}{\sigma^2}}, \quad x_I \geq 0, \quad (2.22)$$

$$E[x_I] = \sigma^2, \quad (2.23)$$

$$Var[x_I] = \frac{\sigma^2}{N}, \quad (2.24)$$

onde $\Gamma(N)$ é o valor da função gama e x é uma variável aleatória com parâmetros σ e N .

A razão entre o desvio padrão e a média para imagem SAR em intensidade e múltiplas visadas é dada pela expressão:

$$\sigma_n = \frac{1}{\sqrt{N}}. \quad (2.25)$$

O número equivalente de visadas ou número de *looks* é o inverso da variância do ruído e para imagens obtidas por detecção quadrática (intensidade) é dado por:

$$ENL_I = N = \frac{1}{\sigma_n^2}. \quad (2.26)$$

A Tabela 2.3 apresenta os resultados da relação entre o desvio padrão e a média sobre regiões homogêneas para imagens obtidas por detecção quadrática.

Tabela 2.3: Valor teórico de σ_n para distribuição raiz de gama.

| Número de Visadas (<i>Looks</i>) N | $\hat{\sigma}_n = \frac{\sigma_z}{\bar{z}}$ |
|---|---|
| 1 | 1 |
| 2 | 0,7071 |
| 4 | 0,5000 |
| 8 | 0,3536 |

2.3.4 Modelo Multiplicativo para Ruído *Speckle*

O ruído *speckle* em imagens SAR é produzido pelo sinal de eco do radar, o qual é inerente para todos os sistemas baseados no princípio do imageamento coerente como SAR, sonar e laser (ZHANG, 2004).

O modelo multiplicativo é muito utilizado na obtenção de distribuições que ajustam os dados de imagens SAR (OLIVER; QUEGAN, 1998). Este modelo se baseia numa interpretação física dos dados em que a imagem é corrompida pelo ruído *speckle*, sendo este um ruído dependente do sinal por causa da radiação coerente incidente sobre a superfície observada. Como o *speckle* é um ruído multiplicativo, não é adequado utilizar a distribuição gaussiana na descrição dos dados de imagens SAR (FRERY et al., 1997a).

Através do modelo multiplicativo é possível explicar o comportamento estocástico em que imagens observadas são o resultado do produto de duas variáveis aleatórias independentes: o retroespalhamento do terreno (x) livre de ruído, o ruído *speckle* (n), enquanto que z é a imagem observada contaminada pelo ruído (formato em amplitude ou em intensidade) (CRIBARY-NETO; FRERY; SILVA, 2002). O modelo segue a expressão:

$$z = xn, \quad (2.27)$$

onde n tem média unitária ($\bar{n} = 1$) com variância σ_n^2 . Como x e n são assumidos serem estatisticamente independentes, a média amostral e a variância em áreas homogêneas (área de retroespalhamento com constante de intensidade média) são derivadas das expressões (LEE, 1981)

$$\bar{z} = \bar{x} \cdot \bar{n} = \bar{x}, \quad (2.28)$$

logo,

$$E[z] = E[x], \quad (2.29)$$

$$\begin{aligned} \sigma_z^2 &= E[(z - \bar{z})^2] = E[(x \cdot n - \bar{x} \cdot \bar{n})^2] \\ \sigma_z^2 &= E[x^2] E[n^2] - 2E[x \cdot n \cdot \bar{x} \cdot \bar{n}] + E[\bar{x}^2 \cdot \bar{n}^2] \\ \therefore \sigma_z^2 &= E[x^2] E[n^2] - \bar{x}^2 \cdot \bar{n}^2. \end{aligned} \quad (2.30)$$

Considerando-se que as medições são efetuadas sobre áreas planas (homogêneas), $E[x^2] = \bar{x}^2$, e fazendo-se algumas manipulações matemáticas obtêm-se as expressões

da variância do ruído e da cena original como mostram as expressões a seguir:

$$\sigma_z^2 = \bar{x}^2 (E[n^2] - \bar{n}^2),$$

$$\sigma_z^2 = \bar{x}^2 \cdot \sigma_n^2 \therefore \hat{\sigma}_n = \frac{\sigma_z}{\bar{x}} = \frac{0,5227}{\sqrt{N}}, \quad (2.31)$$

$$\sigma_x^2 = E[x^2] - E^2[x]. \quad (2.32)$$

Da Equação 2.30 temos:

$$\begin{aligned} E[x^2] &= \frac{\sigma_z^2 + \bar{x}^2 \bar{n}^2}{E[n^2]} = \frac{\sigma_z^2 + \bar{x}^2 \bar{n}^2}{\sigma_n^2 + \bar{n}^2} \\ \therefore \sigma_x^2 &= \frac{\sigma_z^2 - \bar{x}^2 \bar{n}^2}{1 + \sigma_n^2}. \end{aligned} \quad (2.33)$$

O valor teórico de σ_n é conhecido e depende do tipo de detecção (linear ou quadrática) e do número de visadas (N) segundo a Tabela 2.2.

O desvio padrão σ_n do ruído *speckle*, também conhecido como coeficiente de variação, fornece a quantidade de variação da refletividade do terreno em imagens SAR para regiões onde o modelo multiplicativo vigora (MEDEIROS; MASCARENHAS; COSTA, 2003). Nesta situação pode ser utilizado como um dos critérios de avaliação de desempenho dos filtros redutores de *speckle* e é denominado índice β , calculado sobre regiões homogêneas da imagem. Quanto menor for este valor calculado sobre áreas homogêneas da imagem, maior será a redução do ruído. A expressão deste índice é dada por:

$$\beta = \frac{\sigma_z}{\bar{z}}. \quad (2.34)$$

2.4 Métodos Clássicos para Filtragem de Ruído *Speckle*

Vários filtros espaciais (LEE, 1981; KUAN et al., 1987; FROST et al., 1982) têm sido desenvolvidos para a redução do ruído *speckle* com o objetivo de aumentar a relação sinal-ruído e melhorar a separabilidade entre os alvos da superfície, com a mínima perda de informação. Assim sendo, é costume utilizar este tipo de filtragem para melhorar o aspecto visual das imagens de radar para fins de melhoria de análise e interpretação de imagens SAR.

No caso de áreas homogêneas (áreas agrícolas, por exemplo), os filtros devem preservar o valor do coeficiente de retroespalhamento (a informação radiométrica) e arestas entre as diferentes áreas. Para as áreas de textura (floresta, por exemplo), os filtros devem preservar, além disso, a variabilidade espacial (informação textural) (LOPES; TOUZI; NEZRY, 1990).

2.4.1 Filtros Lineares e Não Lineares

Os operadores de filtragem são geralmente classificados em filtros lineares e não-lineares. Filtros lineares calculam o valor resultante do pixel $f'(x, y)$ como uma combinação linear dos níveis de cinza em uma vizinhança local do pixel $f(x, y)$ na imagem original.

O domínio espacial refere-se ao próprio plano da imagem, ou seja, ao conjunto de pixels que compõe uma imagem. No domínio espacial, o nível de cinza de um ponto $f(x, y)$ após a transformação depende do valor do nível de cinza original do pixel e de outros da vizinhança de $f(x, y)$. Em geral, os pixels mais próximos contribuem mais significativamente para o novo valor de nível de cinza do que os pontos mais afastados.

No domínio espacial, o processo de filtragem normalmente é realizado por meio de matrizes denominadas máscaras, as quais são aplicadas sobre a imagem. A cada posição da máscara está associado um valor numérico, chamado de peso ou coeficiente. A Figura 2.3 mostra uma máscara genérica de 3x3 pixels. Denotando os níveis de cinza da imagem sob a máscara por $z_i = f(x, y)$, $1 \leq i \leq 9$, a resposta da máscara é

$$R = w_1z_1 + w_2z_2 + \dots + w_9z_9 = \sum_{i=1}^9 w_iz_i, \quad (2.35)$$

em que w_i representa os coeficientes da máscara.

| | | |
|-------|-------|-------|
| w_1 | w_2 | w_3 |
| w_4 | w_5 | w_6 |
| w_7 | w_8 | w_9 |

Figura 2.3: Máscara de 3x3 pixels com coeficientes arbitrários.

Os filtros não lineares não operam através de funções de transformação como mostra a Equação 2.35, mas através de operações sobre a informação da vizinhança

do pixel (GONZALEZ; WOODS, 2002).

Filtro da Média

O filtro da média é convolucional, linear e geral, pois não adota nenhum modelo específico para ruído *speckle*. Este filtro é considerado o mais simples e é muito utilizado para a redução de ruído.

O filtro da média utiliza uma janela deslizante em que cada pixel é substituído pelo valor médio de seus vizinhos. O fator de normalização é, em geral, igual à soma dos coeficientes da máscara, de modo a preservar o valor médio. Dessa forma, a aplicação de filtros da média em uma região homogênea da imagem, ou seja, com níveis de cinza constantes, não sofrerá alteração de seus níveis de cinza (PEDRINI; SCHWARTZ, 2007).

Por se tratar de um filtro passa-baixa, o filtro da média possui o efeito de suavização da imagem, uma vez que as frequências altas que correspondem às transições abruptas são atenuadas. A suavização tende também, pelas mesmas razões, a minimizar o efeito do ruído em imagens. Por outro lado, devido ao borramento causado pela filtragem passa-baixa, detalhes finos podem ser removidos da imagem.

Filtro da Mediana

Um das principais dificuldades no filtro da média é que as bordas e os detalhes finos da imagem não são preservados. Uma alternativa para solucionar tal problema é a utilização do filtro da mediana. Este trata-se de um filtro não-linear o qual consiste em substituir a intensidade de cada pixel pela mediana das intensidades na vizinhança do pixel. Para uma vizinhança de $n \times n$ pixels, sendo n ímpar, a mediana das intensidades ordenadas encontra-se na posição $(n^2 + 1)/2$.

O filtro da mediana é adequado para reduzir o efeito do ruído quando o padrão deste apresentar componentes impulsivas (*spikes*) como o ruído sal e pimenta (GONZALEZ; WOODS, 2002). Nesse caso, os níveis de cinza dos pixels que diferem significativamente de seus vizinhos (valores altos ou baixos), em uma dada vizinhança, serão descartados pelo filtro (PEDRINI; SCHWARTZ, 2007). Entretanto, este mesmo efeito não é observado em imagens contaminadas por ruído *speckle*, como pode ser observado na Figura 2.4.

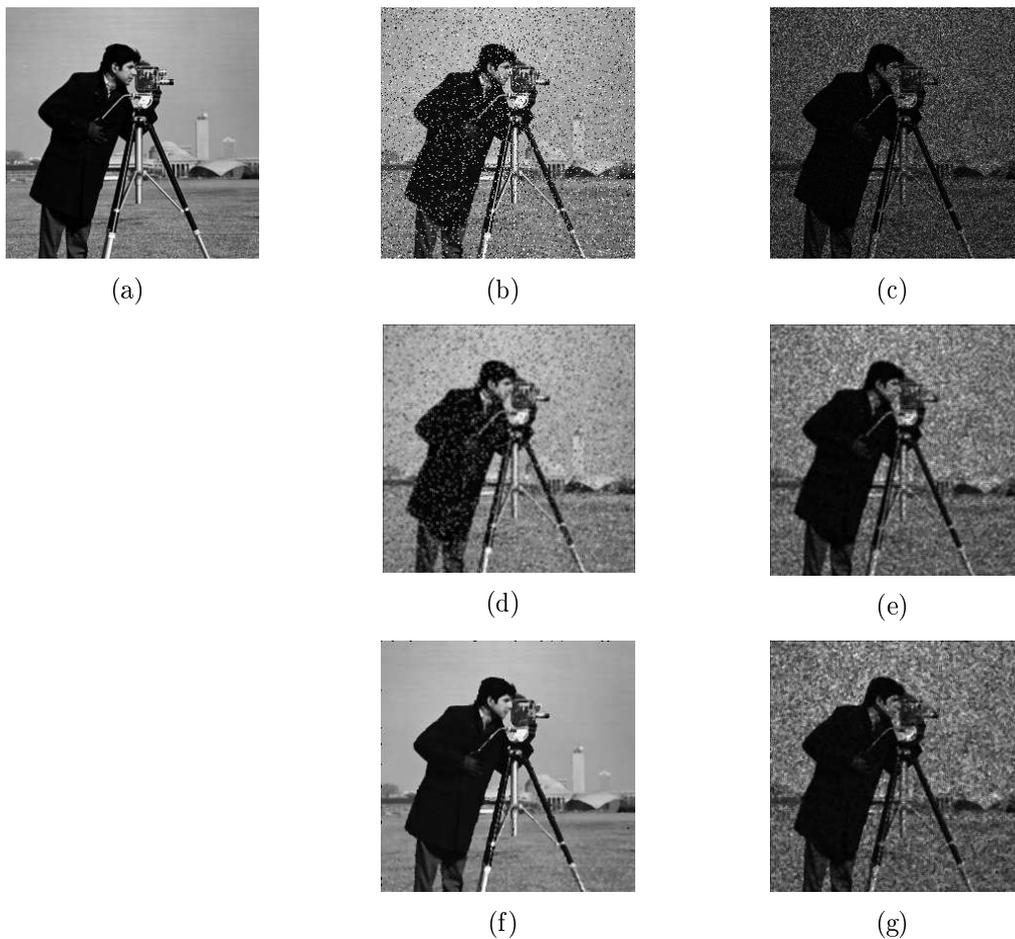


Figura 2.4: (a) Imagem CAMERAMAN original, (b) contaminada por ruído impulsivo sal e pimenta, (c) contaminada com ruído *speckle* e respectivos resultados de filtragem, (d)-(e) aplicando o filtro da média (3x3) e (f)-(g) aplicando o filtro da mediana (3x3).

2.4.2 Filtros Localmente Adaptativos

Vários filtros espaciais têm sido desenvolvidos para a redução do ruído *speckle* e para o aumento da relação sinal-ruído, com o objetivo de melhorar a separabilidade entre os alvos da superfície, com a mínima perda de informação.

Estes filtros são chamados adaptativos por utilizarem informações de uma vizinhança próxima ao pixel a ser processado, e podem ser aplicados a imagens corrompidas por ruído aditivo, multiplicativo ou uma combinação de ambos. Independente dos critérios de minimização de erro utilizados, estes filtros têm por objetivo melhorar visualmente as imagens e possibilitar a percepção de estruturas e detalhes das mesmas (MEDEIROS, 1999).

Um exemplo de aplicação é a imagem real SAR580 obtida por um sistema aerotransportado sobre a região de Freiburg na Alemanha. As características da imagem são: dimensão de 512x512 pixels, banda L, 1 visada e detecção em amplitude.

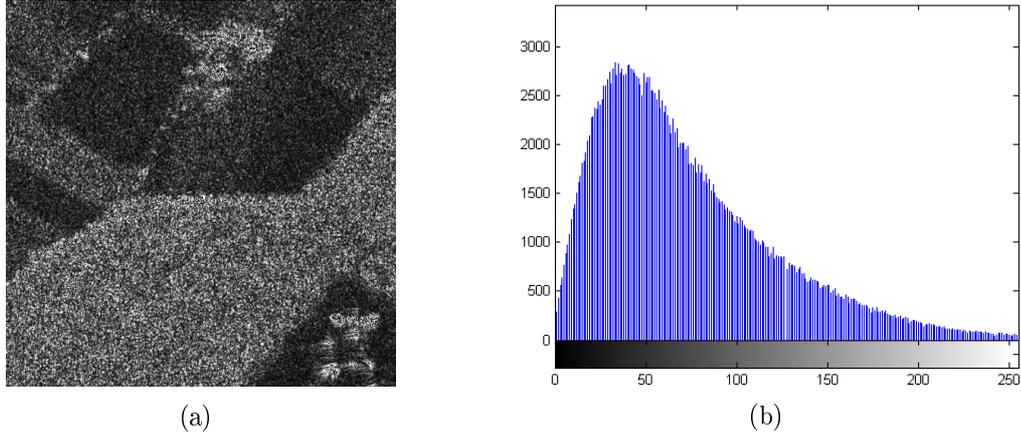


Figura 2.5: (a) Imagem SAR580 e (b) respectivo histograma.

Filtro de Lee

O filtro de Lee (LEE, 1981) adota o modelo multiplicativo para o ruído e obedece o critério de minimização local e linear do erro quadrático médio (*LLMSE*). Este filtro é dito linear porque realiza uma linearização por expansão em série de Taylor em torno de média do produto sinal e ruído para o valor do pixel observado, utilizando apenas os termos lineares. O resultado da linearização transforma o modelo multiplicativo do ruído em aditivo, ou seja, o ruído e o sinal tornam-se independentes. Finalmente, minimização do erro quadrático médio porque minimiza o erro quadrático médio através do filtro de Wiener (este filtro se baseia no mínimo erro quadrático médio).

A linearização do pixel ruidoso utilizando o modelo multiplicativo (Equação 2.27) é feita sobre \bar{x}, \bar{n} como mostra a expressão

$$z' = \bar{x}\bar{n} + \bar{x}(n - \bar{n}) + \bar{n}(x - \bar{x}). \quad (2.36)$$

Sabendo que o valor de $\bar{n} = 1$, o valor linearizado (z') é dado pela expressão

$$z' = x + \bar{x}(n - 1). \quad (2.37)$$

O filtro linear resultante utiliza estatística local e minimiza o erro quadrático médio. A variância para a imagem ideal ($\hat{\sigma}_x^2$) é estimada segundo a Equação 2.34, e o valor da imagem não ruidosa (\hat{x}) é dado segundo a equação

$$\hat{x} = \bar{z} + \frac{\hat{\sigma}_x^2 (z - \bar{z})}{\hat{\sigma}_x^2 + (\bar{z} \cdot \sigma_n)^2}. \quad (2.38)$$

Considerando o modelo multiplicativo e sendo z o valor do pixel ruidoso a ser filtrado, \hat{z} e $\hat{\sigma}_x^2$ correspondem à média e variância da vizinhança de z e $\sigma_n = 0,5227/\sqrt{N}$ o desvio padrão do *speckle*, em que N é o número equivalente de visadas da imagem SAR.

Deve ser verificado sempre se o valor de $\hat{\sigma}_x^2$ é consistente com o modelo. No caso de regiões homogêneas, a estimativa do pixel não ruidoso é a própria média calculada em uma janela, pois o valor de $\hat{\sigma}_x^2 \approx 0$. Em regiões próximas a bordas temos $\hat{\sigma}_x^2 \gg 0$ e portanto a melhor estimativa é o próprio pixel. Finalmente, para o caso em que os valores de $\hat{\sigma}_x^2 < 0$ não são consistentes com o modelo, o pixel é atualizado pela própria média local.

A Figura 2.6 apresenta o resultado obtido após a aplicação do filtro de Lee na imagem SAR580.

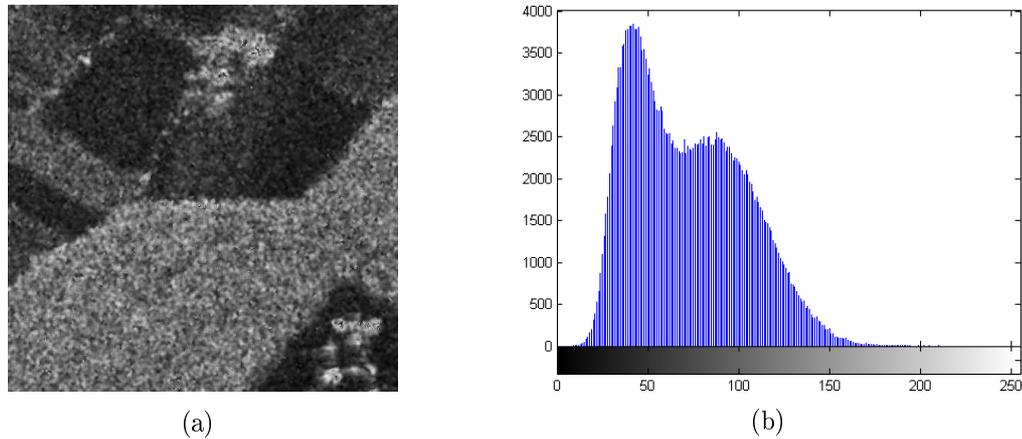


Figura 2.6: Imagem SAR580 filtrada com janela 5x5 associada ao (a) filtro de Lee e (b) respectivo histograma.

Filtro de Kuan

O filtro de Kuan (KUAN et al., 1987) adota o modelo multiplicativo, e é semelhante àquele de Lee (LEE, 1981), onde a estimação ponto a ponto é feita utilizando-se o

filtro de Wiener. A diferença entre eles, entretanto, consiste no fato de que no filtro de Kuan não envolve aproximação por expansão de primeira ordem da série de Taylor. Apesar disso, as expressões de cálculo das estatísticas locais são as mesmas (\bar{z} e σ_z^2). O filtro proposto por (KUAN et al., 1987) apresenta a expressão para estimativa da cena original, dada por

$$\hat{x} = \bar{z} + \frac{\hat{\sigma}_x^2 (z - \bar{z})}{\hat{\sigma}_x^2 + (\bar{z}^2 + \hat{\sigma}_x^2) \sigma_n^2}. \quad (2.39)$$

A Figura 2.7 apresenta o resultado obtido após a aplicação do filtro de Kuan na imagem SAR580.

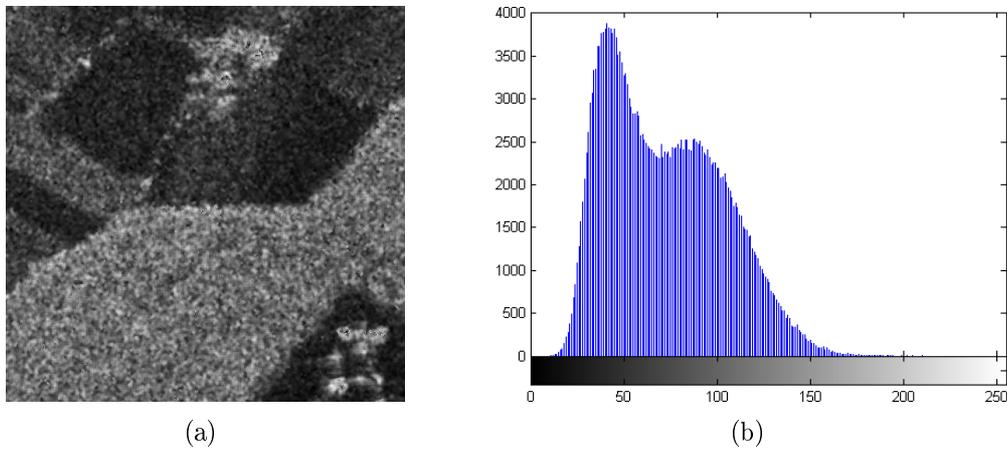


Figura 2.7: Imagem SAR580 filtrada com janela 5x5 associada ao (a) filtro de Kuan e (b) respectivo histograma.

Filtro de Frost

O filtro de Frost (FROST et al., 1982) é um filtro convolucional linear, derivado da minimização do erro quadrático médio sobre o modelo multiplicativo do ruído. Neste filtro incorpora-se a dependência estatística do sinal original, uma vez que se supõe uma função de correlação espacial exponencial entre pixels. É um filtro adaptativo que preserva a estrutura de bordas.

A atualização do pixel ruidoso é dada pela equação

$$\hat{x}(t) = z(t) * m(t), \quad (2.40)$$

em que $m(t)$ corresponde à função de correlação exponencial que relaciona os pixels

vizinhos, da forma

$$m(t) = \alpha \exp(-\gamma |t|), \quad (2.41)$$

em que,

$$\gamma^2 = \frac{2a\hat{\sigma}_x^2}{\sigma_n^2(\hat{\sigma}_x^2 + \bar{x}^2)} + a. \quad (2.42)$$

Os parâmetros t , γ , α , a e σ_x^2 correspondem respectivamente, à distância do pixel observado ao pixel central, à constante de decaimento, à constante de normalização, ao coeficiente de correlação e à variância estimada da imagem ideal, obtida a partir do modelo multiplicativo.

Para o filtro de Frost calcula-se a constante de decaimento, sendo a um parâmetro de entrada, cujo valor utilizado é 0,98 e $|t|$ representa as distâncias Euclidianas, calculadas do pixel em análise, a todos os vizinhos, segundo as dimensões da janela deslizante. Se $\hat{\sigma}_x^2 > 0$, γ é calculado segundo a Equação 2.42, caso contrário $\gamma = a$ (MARQUES, 2004).

A Figura 2.8 apresenta o resultado obtido após a aplicação do filtro de Frost na imagem SAR580.

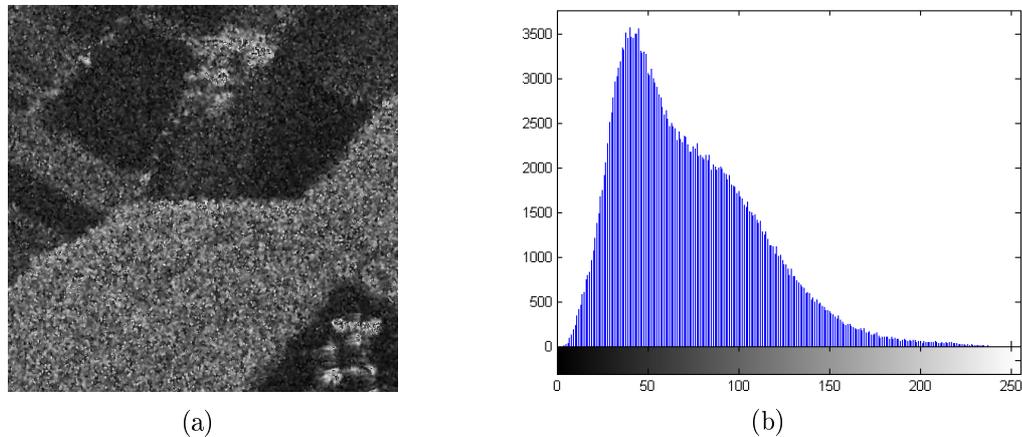


Figura 2.8: Imagem SAR580 filtrada com janela 5×5 associada ao (a) filtro de Frost e (b) respectivo histograma.

2.4.3 Janelamento Adaptativo

Um dos objetivos dos filtros adaptativos é utilizar propriedades locais para controlar os parâmetros destes para assim adaptá-los à não estacionaridade da imagem.

O algoritmo proposto por Li (1988) consiste numa técnica que emprega janelas de tamanhos variáveis no processo de filtragem de acordo com a razão das variâncias,

$$R_v = \frac{\hat{\sigma}_x^2}{\sigma_z^2} = \frac{\sigma_z^2 - \sigma_n^2 \bar{z}^2}{\sigma_z^2(1 + \sigma_n^2)}. \quad (2.43)$$

Esta razão permite estabelecer limiares de escolha do tamanho da janela de filtragem para estimação das estatísticas locais.

O principal problema desta técnica é a determinação empírica dos limiares de R_v dentro do intervalo $[0, 1]$ para utilização de cada janela. Algumas vezes esta razão pode assumir valores negativos como no caso de regiões muito homogêneas onde falha o modelo de caminhada aleatória, resultando assim em um numerador negativo (MEDEIROS, 1999).

Tabela 2.4: R_v x Janela.

| R_v | Janela |
|----------------------|---------------|
| $0 \leq R_v < 0,2$ | 9x9 |
| $0,2 \leq R_v < 0,4$ | 7x7 |
| $0,4 \leq R_v < 0,6$ | 5x5 |
| $0,6 \leq R_v < 0,8$ | 3x3 |
| $0,8 \leq R_v < 1,0$ | próprio pixel |

Como se pode avaliar da Equação 2.43, valores de R_v muito próximos de 0 indicam regiões homogêneas e portanto maiores janelas de filtragem são utilizadas de acordo com a Tabela 2.4. Quando o valor R_v se aproxima de 1, temos regiões com valores maiores de variância e janelas de tamanho menores são utilizadas com o intuito de preservar detalhes.

A Figura 2.9 apresenta o resultado obtido após a aplicação do filtro de Kuan associado à janela adaptativa proposta por Li (1988).

O algoritmo proposto por Park, Song e Pearlman (1999) consiste em ajustar automaticamente o tamanho da janela dependendo das características locais no intuito de reduzir o ruído *speckle* tanto quanto possível, enquanto preserva detalhes. Isto é realizado através do cálculo do coeficiente de variação C_h , definido pela razão

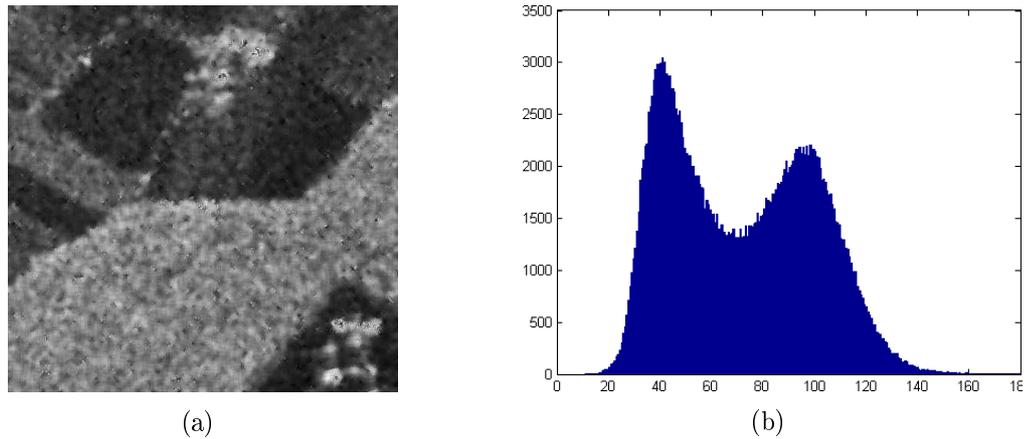


Figura 2.9: Imagem SAR580 filtrada com janela adaptativa proposta por Li (1988) associada ao (a) filtro de Kuan e (b) respectivo histograma.

entre o desvio padrão e a média dos pixels que formam a borda da vizinhança do pixel ruidoso.

O tamanho da janela de filtragem é determinado de acordo com a função de chaveamento apresentada na Equação 2.44:

$$N_h = \begin{cases} \min [N + 1, N_{max}], & \text{se } C_h \leq T_h \\ \max [N - 1, N_{min}], & \text{se } C_h > T_h \end{cases}, \quad (2.44)$$

onde N_{max} e N_{min} denotam, respectivamente, os tamanhos mínimo e máximo da janela permitidos e T_h é o limiar que determina o borramento na imagem processada. Em regiões homogêneas, ou seja, se C_h for menor que T_h o tamanho da próxima janela considerada é expandido a menos que seja maior que o tamanho máximo da janela. Se a janela de execução contiver pequenos detalhes, como bordas e alvos, o tamanho da janela diminui para o tamanho da janela mínima (Figura 2.10).

A filtragem do ruído é realizada utilizando-se a maior vizinhança homogênea possível. Regiões extremamente homogêneas são filtradas com janelas de até 15x15 pixels, e regiões com maiores valores de variância (bordas e detalhes) são filtradas com janelas menores (no mínimo 3x3 pixels).

O método proposto por Park, Song e Pearlman (1999), ao contrário do método proposto por Li (1988), determina valores de limiar estimados localmente pela equação

$$T_h = \sigma_n + \sigma_c. \quad (2.45)$$

Sendo σ_c o desvio padrão dos pixels da borda da vizinhança do pixel ruidoso tem-se:

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{1 + 2\sigma_n^2}{2N}} \cdot \sigma_n, \quad (2.46)$$

em que N é o número de pixels da borda da vizinhança do pixel ruidoso.

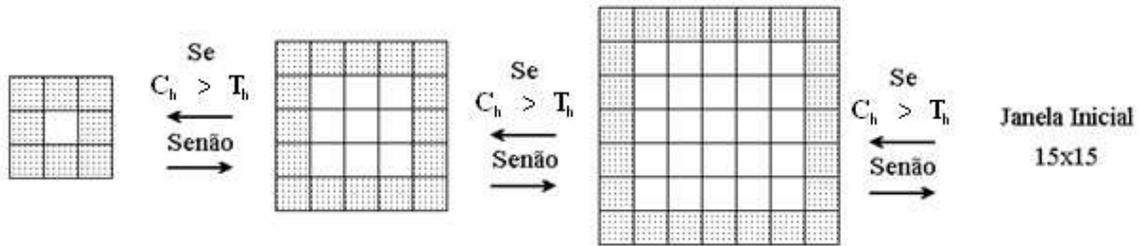


Figura 2.10: Descrição retirada de (MARQUES, 2004) do janelamento adaptativo proposto por Park, Song e Pearlman (1999).

As duas técnicas utilizadas neste trabalho que empregam janelas de tamanhos variáveis no processo de filtragem utilizam informação de homogeneidade da vizinhança do pixel ruidoso para estimar o tamanho ótimo da janela de filtragem.

A Figura 2.11 apresenta o resultado obtido após a aplicação do filtro de Kuan associado à janela adaptativa proposta por Park, Song e Pearlman (1999).

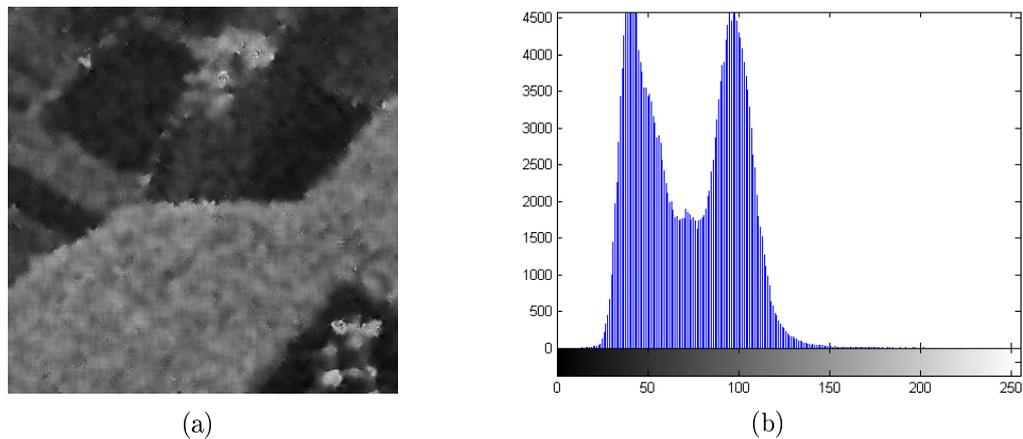


Figura 2.11: Imagem SAR580 filtrada com janela adaptativa proposta por Park, Song e Pearlman (1999) associada ao (a) filtro de Kuan e (b) respectivo histograma.

2.4.4 Redução de Ruído baseada em Curvatura

Princípio da técnica *Total Variation*

Este método iterativo se baseia na equação do padrão do fluxo de curvatura e como o próprio nome revela, leva em consideração o somatório dos elementos diferenciais em todas as direções de cada pixel presente na imagem ruidosa. Observa-se que mesmo borrando pequenos objetos (detalhes) presentes, é possível concluir que há informação de bordas preservada (OSHER; FEDKIW, 2002). A Equação 2.47 denota a saída $TV(\mu)$ da técnica não linear *total variation* que é dada por:

$$TV(\mu) = \sup_{h>0} \int \left| \frac{\mu(x+h) - \mu(x)}{h} \right| dx. \quad (2.47)$$

Em que, \sup representa o *supremum*, $\mu(x)$ é o valor inicial, $\mu(x+h)$ o valor final e h o elemento diferencial. Sendo $u_0(x, y)$ uma imagem contaminada por ruído, $u(x, y)$ uma imagem original e $n(x, y)$ uma função de ruído aditivo (ex: gaussiano, impulsivo, etc), temos:

$$u_0(x, y) = u(x, y) + n(x, y). \quad (2.48)$$

Este método apresenta duas restrições, e a primeira na Equação 2.49, nos diz que a média do ruído n é zero e a segunda na Equação 2.50, usa a informação *a priori* da variância σ do ruído.

$$\int_{\Omega} u dx dy = \int_{\Omega} u_0 dx dy \quad (2.49)$$

$$\int_{\Omega} \frac{1}{2} (u - u_0)^2 dx dy = \sigma^2, \quad \sigma > 0 \quad (2.50)$$

A partir dessas duas restrições, determinamos a equação de Euler-Lagrange que se baseia em equações diferenciais não lineares para minimizar a variação total na imagem, onde os parâmetros adotados são calculados a partir da Equação 2.51 (RUDIN; OSHER; FATEMI, 1992):

$$u_t = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u_x}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2}} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{u_y}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2}} \right) - \lambda_1 - \lambda_2 (u - u_0), \quad (2.51)$$

em que u_x representa a derivada primeira discreta de u horizontal, u_y a derivada

primeira discreta de u vertical e λ_1 e λ_2 os multiplicadores de Lagrange.

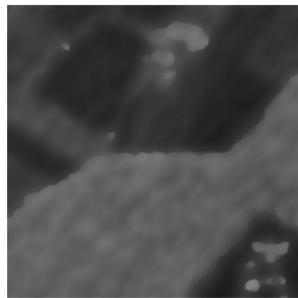
A solução para o procedimento usa a equação parabólica com o tempo como um parâmetro de evolução, ou seja, quando t aumenta nos aproximamos da versão filtrada da imagem ou de forma equivalente o método do gradiente descendente (RUDIN; OSHER; FATEMI, 1992). Logo, a partir Equação 2.51:

$$u_t = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u_x}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2}} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{u_y}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2}} \right) - \lambda(u - u_o). \quad (2.52)$$

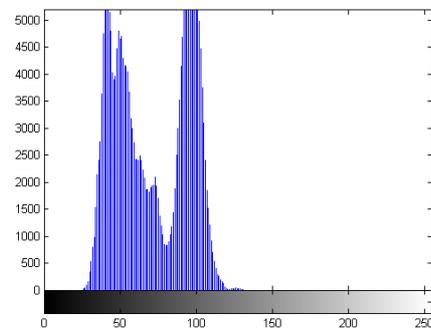
Podemos usar a Equação 2.52 com $\lambda = 0$ para um modelo de borramento e detecção de bordas, como definido em (PETROVIC; VANDERGHEYNST, 2001):

$$u_t = \nabla \cdot \frac{\nabla u}{|\nabla u|} = k \approx \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u_x}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2}} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{u_y}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2}} \right). \quad (2.53)$$

A Figura 2.12 apresenta o resultado obtido após a aplicação da técnica *total variation* na imagem SAR580. Percebe-se que houve redução de ruído e preservação de bordas, apesar do borramento excessivo.



(a)



(b)

Figura 2.12: (a) Imagem SAR580 filtrada com a técnica *total variation* utilizando 300 iterações e parâmetro de evolução do tempo igual a 0,5 e (b) respectivo histograma.

Princípio da técnica *Min/Max*

A técnica *Min/Max* consiste em um método iterativo baseado na equação padrão do fluxo de curvatura e uma função de chaveamento que caracteriza um método adaptativo sendo a curvatura bastante utilizada para realce e remoção de ruído

em imagem. Uma imagem é interpretada como uma coleção de contornos de mesma intensidade os quais podem ser evoluídos. Quando a técnica é aplicada na curvatura remove ambos os pontos de ruído, desde que eles correspondam a objetos de curvatura alta (cantos) e suaviza oscilações, enquanto preserva essencialmente limites dos objetos ou bordas. As variações no fluxo de curvatura conduzem aos esquemas eficazes para uma variedade de aplicações em processamento de imagens (SETHIAN, 1999).

A Equação 2.54 mostra a formulação padrão do fluxo de curvatura, onde k é a curvatura e I é a matriz da imagem (MALLADI; SETHIAN, 1996). A Equação 2.55 mostra a equação *level set* em que t é o tempo e $F(k)$ é uma função de velocidade baseada na curvatura definida na Equação 2.54, portanto

$$k = \frac{\nabla \cdot \nabla I}{|\nabla I|}, \quad (2.54)$$

$$\frac{dI}{dt} = F(k) \cdot |\nabla I|. \quad (2.55)$$

A técnica *Min/Max* faz uso de uma função de chaveamento mostrada na Equação 2.56, em que $Ave_{I(x,y)}^R$ é a média dos pixels em um círculo de raio R em torno do pixel $I(x, y)$. O parâmetro $T_{threshold}$ representa o limiar que é calculado como sendo a média do valor da intensidade dos dois pixels que estão a uma distância R e na direção perpendicular ao vetor gradiente. Esta equação possui dois fluxos, $\min(k, 0)$ e $\max(k, 0)$, que controlam o correto movimento das curvas de níveis da imagem. Estes fluxos são selecionados com base nos valores dos pixels locais da imagem (SETHIAN, 1999).

$$F(k) = \begin{cases} \max(k, 0) & \text{se } Ave_{I(x,y)}^R < T_{threshold} \\ \min(k, 0) & \text{Caso Contrário.} \end{cases} \quad (2.56)$$

Convém lembrar que a função de velocidade obtida em termos da curvatura, nesta metodologia, é dada pela Equação 2.56. Os demais parâmetros da Equação 2.57 são mostrados nas Equações 2.58 a 2.62 e consistem em distintas derivadas de I .

$$k = \nabla \cdot \frac{\nabla I}{|\nabla I|} = \frac{I_{xx}I_y^2 - 2I_xI_yI_{xy} + I_{yy}I_x^2}{(I_x^2 + I_y^2)^{3/2}}, \quad (2.57)$$

$$I_x = \frac{dI}{dx}, \quad (2.58)$$

$$I_y = \frac{dI}{dy}, \quad (2.59)$$

$$I_{xx} = \frac{d^2I}{dx^2}, \quad (2.60)$$

$$I_{yy} = \frac{d^2I}{dy^2}, \quad (2.61)$$

$$I_{xy} = \frac{d}{dy} \left(\frac{dI}{dx} \right), \quad (2.62)$$

em que $\frac{d}{dx}$ designa a primeira derivada com relação a x , e $\frac{d^2}{dx^2}$ a segunda derivada com relação a x .

O intervalo de tempo está diretamente ligado ao tempo de processamento até atingir a estabilidade, onde não há mais suavização. Conforme explicado em (MALLADI; SETHIAN, 1996), o intervalo de tempo deve satisfazer a Equação 2.63, definida como

$$\max(F(k)) \cdot dt \leq \Delta x, \quad (2.63)$$

onde $\max(F(k))$ é o maior valor de $F(k)$ para todos os pixels da imagem, dt é o valor de passo e Δx é a menor distância entre dois pixels consecutivos, que nesta abordagem, sempre será igual a 1. Observamos durante os testes que, o valor de $\max(F(k))$ aproxima-se de 2 e para respeitar a Equação 2.63, foi considerado nas imagens de teste o valor de passo $dt = 0,5$.

O diagrama de blocos do método *Min/Max* é exibido na Figura 2.13.

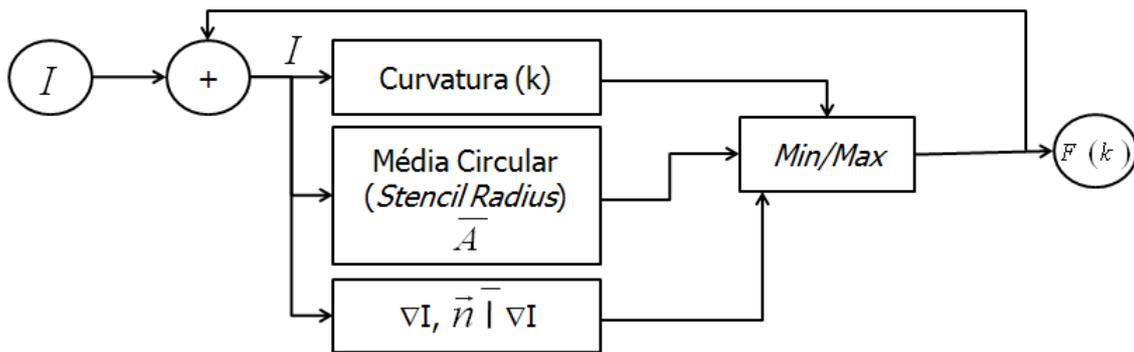


Figura 2.13: Diagrama de blocos do método *Min/Max*.

A Figura 2.14 apresenta o resultado obtido após a aplicação da técnica *Min/Max* na imagem SAR580.

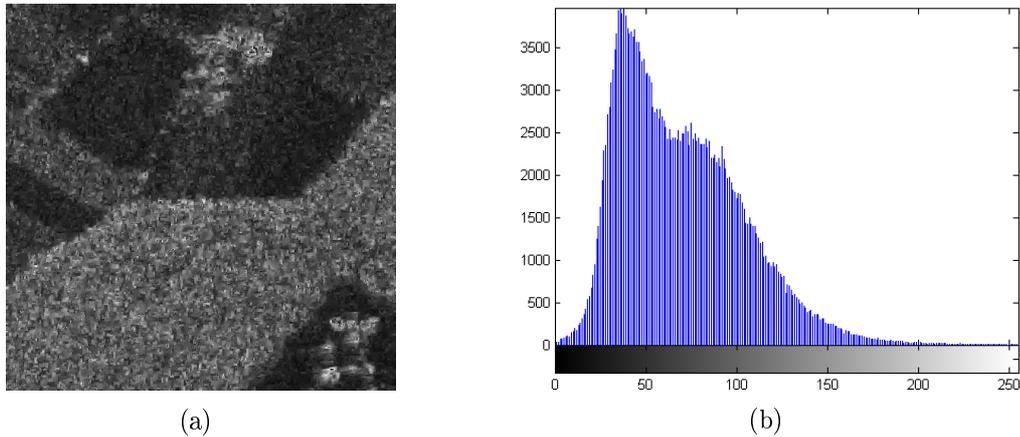


Figura 2.14: (a) Imagem SAR580 filtrada com a técnica *Min/Max* utilizando 300 iterações e $R = 1$ e (b) respectivo histograma.

Método Proposto

A proposta apresentada neste trabalho consiste em modificar o tratamento apresentado na literatura para pixels que não se ajustam ao modelo. Estes pixels comumente são atualizados pela média local numa janela fixa.

O método proposto é apresentado através no diagrama de blocos exibido na Figura 3.1.

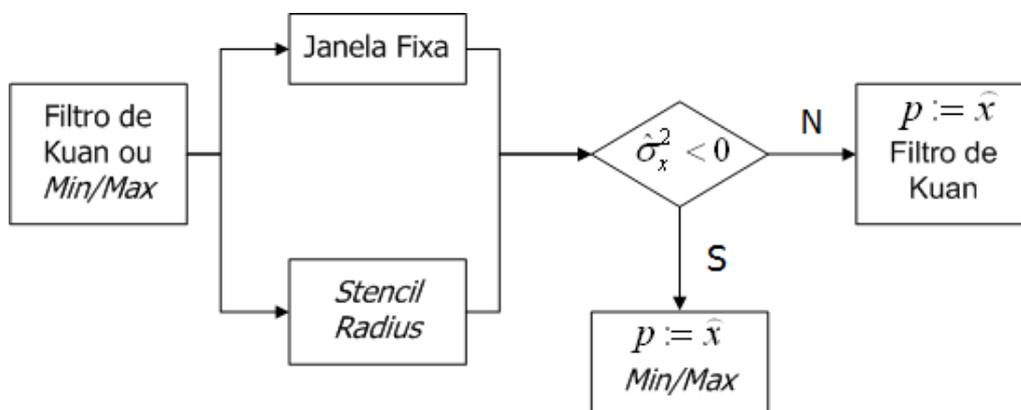


Figura 3.1: Diagrama de blocos do método proposto.

O método ilustrado no diagrama baseia-se na técnica *Min/Max* e se comporta de forma semelhante ao filtro da média, pois utiliza o filtro da média circular. Entretanto, ao se utilizar a função de chaveamento que utiliza o valor de limiar como parâmetro, observa-se respostas melhores para os pixels que não se adequam ao modelo.

A Figura 3.2 apresenta um diagrama que ilustra duas possíveis abordagens da técnica *Min/Max*. A primeira abordagem utiliza o método do janelamento

adaptativo proposto por Park, Song e Pearlman (1999) para em seguida fazer uso das medidas de avaliação. A segunda abordagem é baseada no *stencil radius*, ou seja, utiliza-se no processamento tamanhos de raio crescentes no intuito de reduzir ruído nas diversas escalas para em seguida fazer uso das medidas de avaliação.

As medidas de avaliação dos diversos métodos são apresentadas nos gráficos e nas tabelas presentes nas seções seguintes. Para uma análise comparativa dos resultados, apresenta-se no Apêndice A um conjunto de imagens processadas pelos diversos algoritmos de filtragem e seus respectivos histogramas.

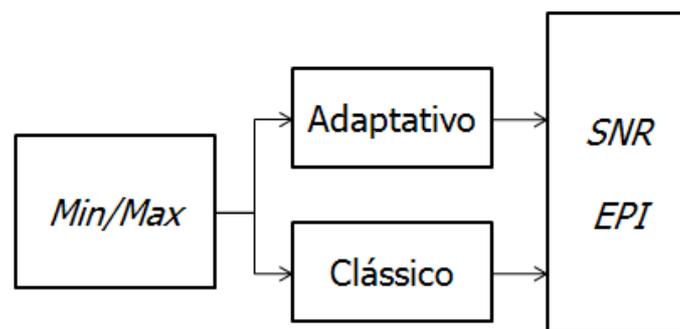


Figura 3.2: Diagrama de blocos do método *Min/Max* clássico e adaptativo.

Avaliação da Filtragem

4.1 Introdução

Ao avaliar o desempenho de uma técnica de supressão de *speckle*, os aspectos considerados incluem a capacidade de reter os pequenos detalhes, preservação de bordas (isto é, transições bruscas no nível de cinza ou textura), e mudanças graduais nos níveis de cinza. Várias medidas quantitativas têm sido desenvolvidas para esta tarefa, e incluem cinco aspectos usados para ponderar a qualidade de um algoritmo de filtragem, que consiste em analisar:

- i. quantidade de ruído *speckle* reduzido;
- ii. preservação de alvos;
- iii. preservação de bordas;
- iv. avaliação do coeficiente médio de retroespalhamento da imagem;
- v. introdução de artefatos de filtragem.

A redução do ruído *speckle* e a preservação de bordas é um par contraditório, pois a medida que se reduz o ruído *speckle* invariavelmente as bordas são degradadas. Dificilmente os algoritmos poderão satisfazer completamente os cinco aspectos simultaneamente apresentados acima.

No entanto, deve-se quantificar a qualidade do processamento de um algoritmo em uma imagem, através de medidas de avaliação, no intuito de permitir uma análise

e interpretação do comportamento daquele algoritmo em um conjunto específico de imagens.

Para a realização desses testes serão utilizadas imagens SAR reais, bem como, imagens contaminadas artificialmente por ruído *speckle* para fins de filtragem. Os resultados dos algoritmos de filtragem são avaliados segundo medidas de redução do ruído *speckle* e de preservação de bordas. A metodologia adotada é exibida na Figura 4.1.

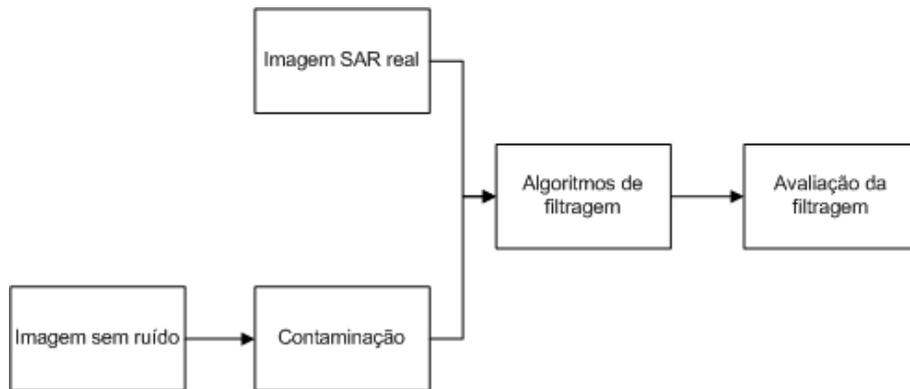


Figura 4.1: Metodologia adotada para avaliação dos resultados.

4.2 Medidas de Avaliação de Filtragem

4.2.1 Relação Sinal-Ruído

A relação sinal-ruído (*SNR*) em imagens SAR é expressa pela razão entre o desvio padrão e a média em regiões homogêneas, onde os dados se ajustam ao modelo multiplicativo. Valores abaixo de $0,5227/\sqrt{N}$, em que N é número de visadas da imagem, indicam uma redução do desvio padrão do ruído e de sua intensidade (MARQUES, 2004).

4.2.2 Índice de Preservação de Borda

Esta medida aplica-se às imagens artificialmente contaminadas e às reais. Como o próprio nome revela, tal métrica é utilizada para indicar o quanto as bordas de uma determinada imagem são preservadas após a etapa de filtragem. Os valores obtidos estão entre $[0, 1]$. Os melhores valores são aqueles mais próximos de 1, pois significa que houve uma maior preservação de bordas. Essa métrica pode ser calculada através da Equação 4.1:

$$EPI = \frac{\sum (\Delta g - \overline{\Delta g}) (\Delta \hat{g} - \overline{\Delta \hat{g}})}{\sqrt{\sum (\Delta g - \overline{\Delta g})^2 (\Delta \hat{g} - \overline{\Delta \hat{g}})^2}}, \quad (4.1)$$

em que Δg é a versão filtrada por um filtro passa-alta da imagem g obtida com uma janela 3×3 da aproximação padrão do operador Laplaciano (IVES; EICHEL; MAGOTRA, 1999; SATTAR et al., 1997).

4.2.3 Coeficiente de Correlação

Esta medida aplica-se às imagens artificialmente contaminadas e às reais. É utilizada para medir a similaridade entre duas imagens, cujos valores obtidos estão entre $[-1, 1]$. Os melhores valores são aqueles mais próximos de 1, pois significa que houve uma maior similaridade entre a versão original sem ruído e a versão filtrada. Essa métrica pode ser calculada através da Equação 4.2:

$$CoC = \frac{\sum (g - \bar{g}) (\hat{g} - \bar{\hat{g}})}{\sqrt{\sum (g - \bar{g})^2 (\hat{g} - \bar{\hat{g}})^2}}, \quad (4.2)$$

em que \bar{g} e $\bar{\hat{g}}$ é a média da imagem original e da filtrada, respectivamente. O CoC é uma medida chave da similaridade entre a imagem real do terreno e a imagem filtrada (GUPTA; CHAUHAN; SAXENA, 2005; SATTAR et al., 1997).

4.2.4 Erro Quadrático Médio

O erro quadrático médio (MSE) entre a imagem original e a filtrada é calculado da seguinte forma:

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [x(i, j) - \hat{x}(i, j)]^2, \quad (4.3)$$

em que M e N são as dimensões da imagem, x a imagem original sem contaminação de ruído e \hat{x} é a imagem estimada ou filtrada.

Esta medida aplica-se apenas às imagens artificialmente contaminadas, pois a versão original, ou seja, sem ruído está disponível para o cálculo.

Capítulo 5

Resultados e Discussões

5.1 Avaliação dos Resultados

No Capítulo 4 foram apresentados os métodos que compõem o conjunto de medidas de avaliação utilizadas neste trabalho. Tais medidas apresentam importância significativa, constituindo ferramentas de análise que permitem expressar, por meio de valores numéricos, o comportamento de filtros.

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais obtidos a partir dos algoritmos de filtragem disponíveis na literatura e o método desenvolvido neste trabalho. Os resultados são avaliados quantitativamente em relação à utilização do método de janelamento adaptativo e à substituição dos pixels que não se adequam ao modelo multiplicativo, pelo pixel estimado por meio do método de redução de ruído baseado em curvatura.

Nas próximas seções são apresentados os principais resultados obtidos. Com base na seguinte metodologia adotada para realização dos testes deve-se ressaltar que:

- ▶ o filtro de Kuan foi escolhido dentre os vários disponíveis na literatura por apresentar bons resultados de filtragem em relação à redução da intensidade do *speckle* em regiões homogêneas e pela capacidade de preservar detalhes;
- ▶ foram utilizados nos testes os métodos de janelamento adaptativo propostos por Li (1988) e por Park, Song e Pearlman (1999);
- ▶ dentre os métodos de redução de ruído baseados em curvatura escolheu-se o método *Min/Max*, pois é possível escolher o tamanho da janela de filtragem.

O comportamento desse método é determinado de acordo com uma função de chaveamento que depende de um valor de limiar;

- ▶ foram realizados testes com filtragem de imagens artificialmente contaminadas com ruído *speckle*, respeitando as distribuições Rayleigh e raiz de gama e a filtragem de imagens SAR reais geradas em amplitude com 1 ou múltiplas visadas;
- ▶ os resultados obtidos foram submetidos à avaliação dos efeitos do processo de filtragem nas imagens.

5.2 Resultados de Avaliação da Filtragem de Imagens Artificialmente Contaminadas com Estatística de Imagens SAR em Amplitude e 1 Visada

A Figura 5.1 e a Tabela 5.1 apresentam o conjunto de medidas para avaliação dos resultados de filtragem da imagem BLA (Apêndice A), artificialmente contaminada com ruído *speckle* segundo a distribuição Rayleigh, apresentando $SNR = 0,5227$.

Inicialmente, de acordo com os resultados apresentados, observa-se que o filtro da média, apesar de obter valores de SNR próximos aos do filtro de Kuan, causa a eliminação de características importantes da imagem como bordas e detalhes devido ao borramento excessivo. Por outro lado, o filtro da mediana, como discutido no Capítulo 2, apresenta uma melhor preservação de bordas apesar de não ser o mais adequado para filtragem deste tipo de ruído.

Durante a análise dos resultados, foi notável o desempenho dos filtros quando os mesmos utilizam o janelamento adaptativo. Na Figura 5.1(a) verifica-se que o menor valor de SNR é obtido pelo filtro de Kuan associado ao janelamento adaptativo de Park, Song e Pearlman (1999). Isto se deve ao fato do tamanho da janela de filtragem adequar-se localmente à imagem, permitindo um aumento da redução de ruído nas regiões homogêneas, o que pode ser observado pelos valores reduzidos de SNR .

A Tabela 5.1 comprova que os filtros que utilizam o janelamento adaptativo de Park, Song e Pearlman (1999) apresentaram o menor erro quadrático médio (MSE), ou seja, apresentaram uma maior fidelidade aos valores de intensidade dos pixels presentes na imagem sem contaminação. Contudo, os filtros que utilizam o janelamento adaptativo de Li (1988) apresentaram um resultado inferior.

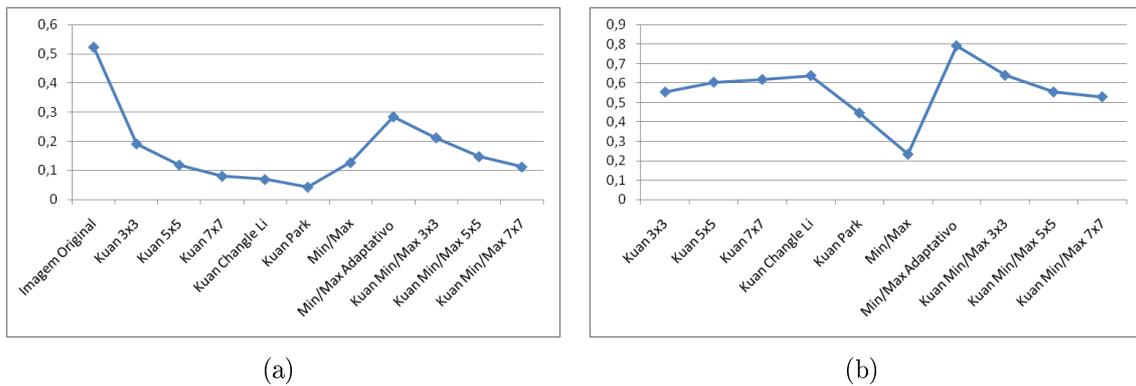


Figura 5.1: Imagem BLA (a) SNR e (b) EPI .

Na Figura 5.1(b) verifica-se o valor mínimo de EPI na técnica Min/Max . Isto se deve à sua característica de redução de ruído provocando borramento na imagem, mas procurando preservar informação de borda. Ainda na mesma figura, ocorre um valor de máximo na técnica Min/Max adaptativo. Ao verificar a Figura 5.1(a), o seu valor de SNR é o maior, indicando que houve uma redução inferior de ruído e uma maior preservação das características da imagem original.

Ao analisar na Tabela 5.1, o método proposto que combina o filtro de Kuan com a técnica Min/Max , apresentou valor de SNR intermediário entre os valores do filtro de Kuan e a técnica Min/Max . Isso pode ser explicado pelo fato de uma grande quantidade de pixels não se adequarem ao modelo multiplicativo, ou seja, muitos pixels possuem seus valores substituído pela técnica Min/Max . Verifica-se a ocorrência de uma melhoria significativa na preservação de bordas, por meio do EPI e do CoC que em geral, apresentaram os melhores valores. Isso se deve à característica da técnica Min/Max de preservar bordas apesar de um excessivo borramento em regiões homogêneas, justificando um aumento nos valores do MSE em relação ao filtro de Kuan.

Quando associado ao janelamento adaptativo, o método proposto apresentou resultados maiores em relação ao filtro de Kuan no valor de SNR apesar dos valores maiores de EPI , como pode ser visto na Tabela 5.1. Isto se deve ao aumento no critério de filtragem da técnica Min/Max quando associada ao janelamento adaptativo.

Tabela 5.1: Medidas de avaliação de filtragem sobre a imagem BLA.

| | Média | Mediana | Kuan | Min/Max | Kuan + Min/Max |
|---|----------|-----------|----------|-----------|----------------|
| <i>SNR</i> | | | | | |
| Janela 3x3 | 0,1645 | 0,2285 | 0,1915 | 0,2697 | 0,2123 |
| Janela 5x5 | 0,0970 | 0,1396 | 0,1192 | 0,1766 | 0,1477 |
| Janela 7x7 | 0,0694 | 0,0921 | 0,0808 | 0,1272 | 0,1124 |
| Janela Adaptativa Li | 0,0582 | 0,0708 | 0,0694 | 0,1971 | 0,2520 |
| Janela Adaptativa Park, Song e Pearlman | 0,0428 | 0,0445 | 0,0434 | 0,2843 | 0,1970 |
| <i>EPI</i> | | | | | |
| Janela 3x3 | 0,1371 | 0,0681 | 0,5541 | 0,5138 | 0,6394 |
| Janela 5x5 | 0,0106 | 0,0138 | 0,6042 | 0,3192 | 0,5543 |
| Janela 7x7 | 0,0091 | 0,0258 | 0,6181 | 0,2348 | 0,5295 |
| Janela Adaptativa Li | 0,0078 | 0,0135 | 0,6382 | 0,8451 | 0,6500 |
| Janela Adaptativa Park, Song e Pearlman | 0,0317 | 0,0040 | 0,4462 | 0,7910 | 0,7093 |
| <i>CoC</i> | | | | | |
| Janela 3x3 | 0,7347 | 0,7155 | 0,8137 | 0,8167 | 0,8372 |
| Janela 5x5 | 0,7020 | 0,6916 | 0,7733 | 0,7381 | 0,7797 |
| Janela 7x7 | 0,6926 | 0,6879 | 0,7667 | 0,6894 | 0,7542 |
| Janela Adaptativa Li | 0,6910 | 0,6847 | 0,7706 | 0,9165 | 0,8091 |
| Janela Adaptativa Park, Song e Pearlman | 0,6981 | 0,6956 | 0,7378 | 0,9058 | 0,8486 |
| <i>MSE</i> | | | | | |
| Janela 3x3 | 606,2446 | 1038,8741 | 716,9761 | 1427,9634 | 1010,4952 |
| Janela 5x5 | 459,6379 | 826,6483 | 487,6739 | 1267,3510 | 846,8004 |
| Janela 7x7 | 465,8480 | 834,1907 | 451,6478 | 1373,9848 | 866,1195 |
| Janela Adaptativa Li | 471,6176 | 868,0484 | 466,0781 | 1945,5692 | 1162,8597 |
| Janela Adaptativa Park, Song e Pearlman | 378,2320 | 691,5667 | 382,1657 | 1537,4133 | 907,9864 |

5.3 Resultados de Avaliação da Filtragem de Imagens Artificialmente Contaminadas com Estatística de Imagens SAR em Amplitude e Múltiplas Visadas

A Figura 5.2 e a Tabela 5.2 apresentam as avaliações sobre os resultados de filtragem (Apêndice A) da imagem CARTOON (Figura A.5) contaminada com ruído

speckle segundo o padrão de imagens em amplitude e 6,7 visadas, apresentando $SNR = 0,2019$.

Durante os testes com imagens contaminadas artificialmente, com *speckle* segundo a distribuição raiz de gama, observou-se que o janelamento adaptativo proposto por Park, Song e Pearlman (1999) apresentou pouca diferença quando combinado ao algoritmo de Kuan e ao método baseado em curvatura, sobretudo na preservação de bordas e SNR , como pode ser visto na Figura 5.2. A explicação decorre do fato que, em imagens de múltiplas visadas, o desvio padrão do *speckle* σ_n é reduzido na proporção de \sqrt{N} , onde N é o número de visadas. Como o janelamento adaptativo, bem como os métodos de filtragem localmente adaptativos e baseado em curvatura, são dependentes do valor de σ_n , ocorre a redução do efeito do janelamento adaptativo, fazendo com que a filtragem utilize janelas de dimensões menores.

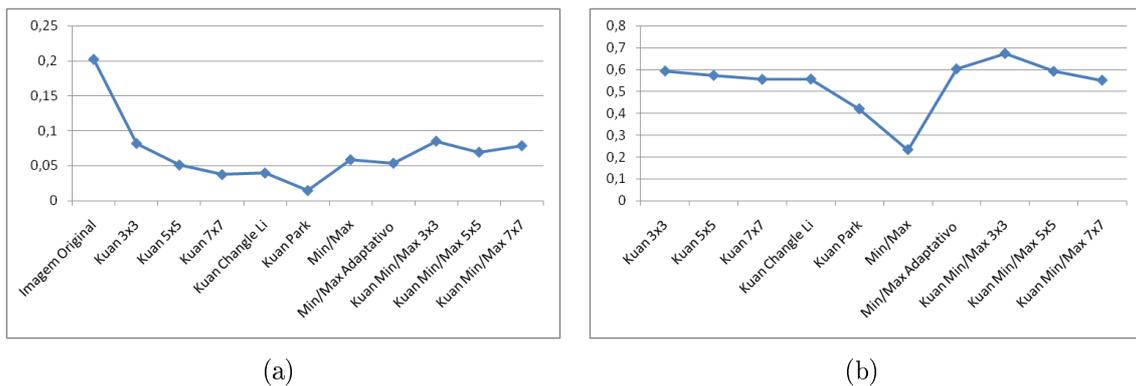


Figura 5.2: Imagem CARTOON (a) SNR e (b) EPI .

O método proposto apresentou um resultado satisfatório, uma vez que apresentou valores de SNR próximos aos obtidos pelo filtro de Kuan e desempenho superior quanto à preservação de bordas, como pode ser visto na Figura 5.2. Isso indica que houve redução de ruído com uma maior preservação de bordas. De acordo com a Tabela 5.2, verifica-se um aumento do CoC quando utilizado o método proposto, justificado pelo aumento de EPI . Entretanto, ocorreu um aumento no MSE ao utilizar o janelamento fixo e adaptativo. Isso pode ser justificado pela contribuição dos pixels que não se adequam ao modelo multiplicativo e foram substituídos pelos pixels do método *Min/Max*.

Tabela 5.2: Medidas de avaliação de filtragem sobre a imagem CARTOON.

| | Média | Mediana | Kuan | <i>Min/Max</i> | <i>Kuan + Min/Max</i> |
|---|----------|----------|----------|----------------|-----------------------|
| <i>SNR</i> | | | | | |
| Janela 3x3 | 0,0634 | 0,0757 | 0,0818 | 0,0851 | 0,0851 |
| Janela 5x5 | 0,0417 | 0,0428 | 0,0511 | 0,0637 | 0,0693 |
| Janela 7x7 | 0,0395 | 0,0302 | 0,0373 | 0,0586 | 0,0786 |
| Janela Adaptativa Li | 0,0349 | 0,0250 | 0,0396 | 0,0536 | 0,1492 |
| Janela Adaptativa Park, Song e Pearlman | 0,0126 | 0,0162 | 0,0146 | 0,0536 | 0,0479 |
| <i>EPI</i> | | | | | |
| Janela 3x3 | 0,0979 | 0,0983 | 0,5932 | 0,5065 | 0,6735 |
| Janela 5x5 | 0,0189 | 0,1843 | 0,5732 | 0,3375 | 0,5918 |
| Janela 7x7 | 0,0062 | 0,1798 | 0,5549 | 0,2329 | 0,5510 |
| Janela Adaptativa Li | 0,2513 | 0,2685 | 0,5563 | 0,8028 | 0,7029 |
| Janela Adaptativa Park, Song e Pearlman | 0,0359 | 0,2162 | 0,4200 | 0,6029 | 0,6039 |
| <i>Co C</i> | | | | | |
| Janela 3x3 | 0,9101 | 0,9098 | 0,9418 | 0,9337 | 0,9475 |
| Janela 5x5 | 0,8967 | 0,9027 | 0,9293 | 0,9089 | 0,9313 |
| Janela 7x7 | 0,8893 | 0,8993 | 0,9264 | 0,8918 | 0,9231 |
| Janela Adaptativa Li | 0,9041 | 0,9059 | 0,9272 | 0,9624 | 0,9364 |
| Janela Adaptativa Park, Song e Pearlman | 0,9002 | 0,9043 | 0,9159 | 0,9422 | 0,9397 |
| <i>MSE</i> | | | | | |
| Janela 3x3 | 199,3441 | 212,1977 | 198,1545 | 336,6758 | 255,3353 |
| Janela 5x5 | 190,8427 | 138,9555 | 118,0445 | 269,6651 | 181,5923 |
| Janela 7x7 | 230,2693 | 138,4894 | 109,4002 | 305,0941 | 186,4404 |
| Janela Adaptativa Li | 108,2810 | 97,7972 | 108,7267 | 749,6606 | 472,1158 |
| Janela Adaptativa Park, Song e Pearlman | 113,8755 | 80,9344 | 68,0770 | 283,0568 | 211,8870 |

A Figura 5.3 e a Tabela 5.3 apresentam as avaliações sobre os resultados de filtragem (Apêndice A) da imagem MANCHAS (Figura A.9) contaminada com ruído *speckle* segundo o padrão de imagens em amplitude e 3 visadas, apresentando $SNR = 0,3017$.

Durante os testes, observou-se que os filtros da média e da mediana eliminaram

diversos alvos além de não conseguirem uma redução do ruído eficiente, como pode ser visto nos resultados apresentados no Apêndice A.

A utilização do janelamento adaptativo proposto por Park, Song e Pearlman (1999), como pode ser visto na Figura 5.3(a), proporcionou ao filtro de Kuan valores menores de SNR indicando uma maior redução do ruído. Na Figura 5.3(b) verifica-se o valor mínimo de EPI na técnica Min/Max . Isto se deve à sua característica de redução de ruído, verificado pelo baixo valor de SNR , provocando borramento na imagem apesar de preservar alvos.

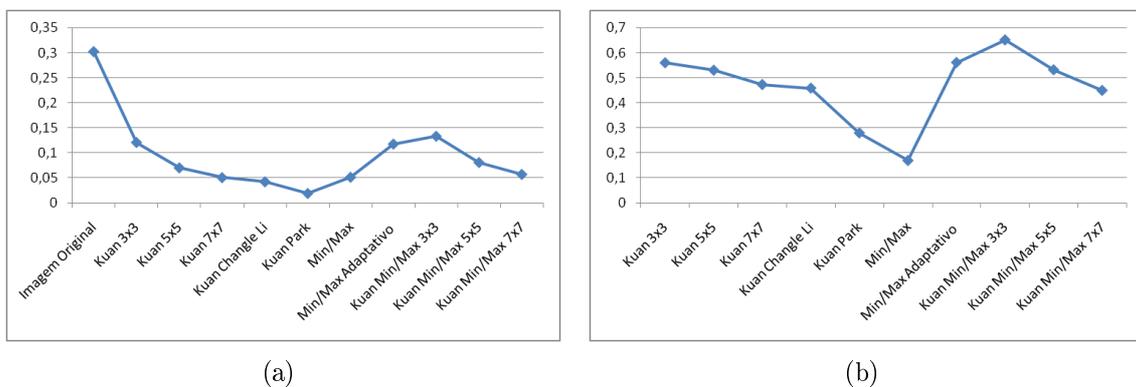


Figura 5.3: Imagem MANCHAS (a) SNR e (b) EPI .

O método proposto preservou todos os alvos presentes na imagem, além de alcançar valores de SNR semelhantes aos obtidos pelo filtro de Kuan. É importante destacar que os valores de EPI foram maiores como mostra a Figura 5.3. Por serem medidas relacionadas, o valor de CoC seguiu esse aumento apesar do valor maior do MSE em relação ao do filtro de Kuan, conforme apresentado na Tabela 5.3. Isso é justificado pela substituição dos pixels que não se adequam ao modelo multiplicativo pelos pixels estimados por meio da técnica Min/Max , que apresentaram o valor de MSE maior que o do filtro de Kuan.

Tabela 5.3: Medidas de avaliação de filtragem sobre a imagem MANCHAS.

| | Média | Mediana | Kuan | <i>Min/Max</i> | <i>Kuan + Min/Max</i> |
|---|----------|----------|----------|----------------|-----------------------|
| <i>SNR</i> | | | | | |
| Janela 3x3 | 0,1000 | 0,1206 | 0,1209 | 0,1388 | 0,1333 |
| Janela 5x5 | 0,0593 | 0,0723 | 0,0704 | 0,0877 | 0,0810 |
| Janela 7x7 | 0,0411 | 0,0526 | 0,0509 | 0,0517 | 0,0574 |
| Janela Adaptativa Li | 0,0316 | 0,0419 | 0,0427 | 0,0918 | 0,1678 |
| Janela Adaptativa Park, Song e Pearlman | 0,0167 | 0,0209 | 0,0194 | 0,1177 | 0,0929 |
| <i>EPI</i> | | | | | |
| Janela 3x3 | 0,1411 | 0,0415 | 0,5595 | 0,4872 | 0,6508 |
| Janela 5x5 | 0,0003 | 0,0482 | 0,5298 | 0,3100 | 0,5314 |
| Janela 7x7 | 0,0040 | 0,0600 | 0,4726 | 0,1693 | 0,4491 |
| Janela Adaptativa Li | 0,0973 | 0,1095 | 0,4584 | 0,7233 | 0,5494 |
| Janela Adaptativa Park, Song e Pearlman | 0,0035 | 0,0863 | 0,2792 | 0,5607 | 0,5249 |
| <i>Co C</i> | | | | | |
| Janela 3x3 | 0,7695 | 0,7584 | 0,8435 | 0,8277 | 0,8595 |
| Janela 5x5 | 0,7432 | 0,7427 | 0,8022 | 0,7646 | 0,8052 |
| Janela 7x7 | 0,7334 | 0,7389 | 0,7870 | 0,7268 | 0,7754 |
| Janela Adaptativa Li | 0,7428 | 0,7438 | 0,7849 | 0,8796 | 0,7805 |
| Janela Adaptativa Park, Song e Pearlman | 0,7394 | 0,7420 | 0,7588 | 0,8460 | 0,8299 |
| <i>MSE</i> | | | | | |
| Janela 3x3 | 173,1511 | 243,2962 | 210,2422 | 355,3448 | 285,7508 |
| Janela 5x5 | 115,7367 | 138,7483 | 104,9109 | 279,0937 | 206,6650 |
| Janela 7x7 | 113,4349 | 113,9928 | 79,153 | 242,7222 | 175,3809 |
| Janela Adaptativa Li | 71,8009 | 89,0285 | 73,8179 | 983,6623 | 606,0701 |
| Janela Adaptativa Park, Song e Pearlman | 60,5742 | 70,032 | 43,8048 | 280,0624 | 211,3787 |

5.4 Resultados de Avaliação da Filtragem de Imagens SAR Reais

Na Figura 5.4 e na Tabela 5.4 são apresentadas as avaliações sobre os resultados de filtragem da imagem CAÇAPAVA (Apêndice A) contaminada com ruído *speckle*

segundo o padrão de imagens em amplitude e 1 visada, apresentando $SNR = 0,5227$.

A Figura A.13 mostra a imagem CAÇAPAVA, gerada em amplitude e 1 visada pelo sistema RADARSAT e seu respectivo histograma. A imagem mostra uma região do Vale do Paraíba - SP, Brasil. Verifica-se na imagem parte do rio Paraíba e ao longo de suas margens pequenas bacias, mais a esquerda, regiões de cultivo de arroz.

Como comentado no Capítulo 4, a avaliação das técnicas de filtragem de imagens SAR reais, por meio do erro quadrático médio, se torna inviável, uma vez que não dispomos da cena original. Uma forma de avaliação quantitativa para a filtragem de imagens SAR reais é por meio do valor de SNR . A Figura 5.4(a) mostra o valor da SNR obtido nos resultados de filtragem da imagens em análise.

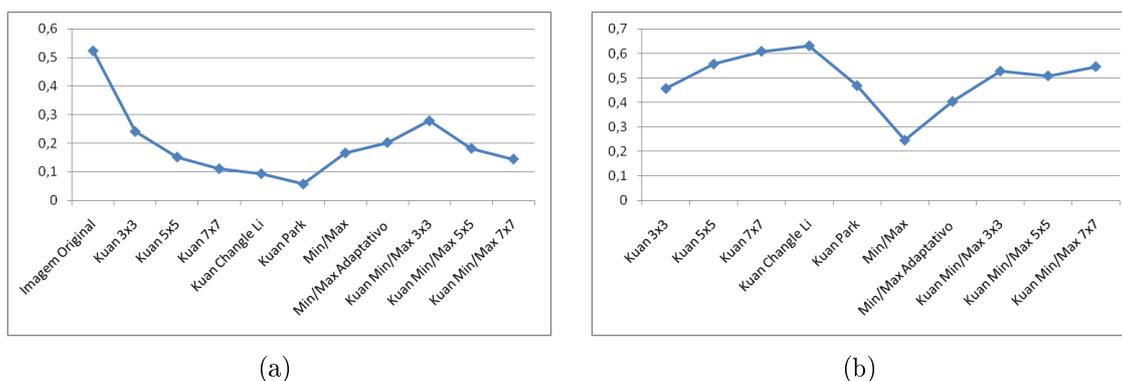


Figura 5.4: Imagem CAÇAPAVA (a) SNR e (b) EPI .

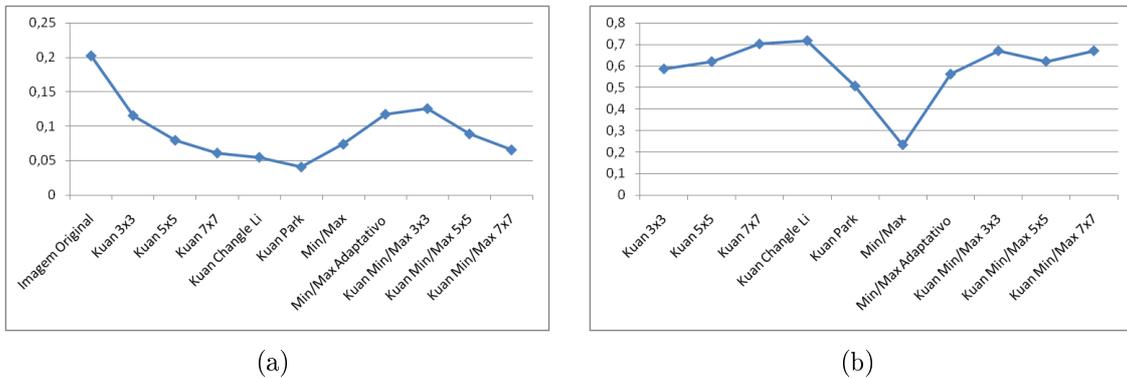
Em imagens reais geradas com 1 visada, assim como em imagens contaminadas artificialmente segundo este padrão, foi observado que houve um melhor desempenho do janelamento adaptativo proposto por Park, Song e Pearlman (1999), incorporado ao filtro de Kuan et al. (1987), pois obteve-se os menores valores de SNR . Esse desempenho também pode ser observado no histograma das imagens filtradas (Apêndice F), onde se verifica uma maior redução na variância do ruído. Entretanto, de acordo com a Figura 5.4(b) o janelamento proposto por Li (1988) apresentou o maior valor de EPI enquanto que o método *Min/Max* o menor valor.

No caso da imagem CAÇAPAVA, o método proposto apresentou o melhor resultado no EPI em relação ao filtro de Kuan apenas quando utilizou a janela 3x3 e o janelamento adaptativo proposto por Park, Song e Pearlman (1999), segundo ilustra a Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Medidas de avaliação de filtragem sobre a imagem CAÇAPAVA.

| | Média | Mediana | Kuan | Min/Max | Kuan + Min/Max |
|---|--------|---------|--------|---------|----------------|
| <i>SNR</i> | | | | | |
| Janela 3x3 | 0,2235 | 0,2733 | 0,2404 | 0,3149 | 0,2779 |
| Janela 5x5 | 0,1378 | 0,1694 | 0,1511 | 0,2054 | 0,1816 |
| Janela 7x7 | 0,0987 | 0,1206 | 0,1104 | 0,1656 | 0,1441 |
| Janela Adaptativa Li | 0,0796 | 0,0972 | 0,0929 | 0,2281 | 0,2524 |
| Janela Adaptativa Park, Song e Pearlman | 0,0517 | 0,0599 | 0,0568 | 0,2020 | 0,1762 |
| <i>EPI</i> | | | | | |
| Janela 3x3 | 0,0166 | 0,0374 | 0,4564 | 0,4836 | 0,5276 |
| Janela 5x5 | 0,0540 | 0,0234 | 0,5565 | 0,2897 | 0,5084 |
| Janela 7x7 | 0,0030 | 0,0072 | 0,6085 | 0,2453 | 0,5459 |
| Janela Adaptativa Li | 0,0014 | 0,0166 | 0,6309 | 0,7801 | 0,5994 |
| Janela Adaptativa Park, Song e Pearlman | 0,0126 | 0,0366 | 0,4684 | 0,4034 | 0,5497 |

Na Figura 5.5 e na Tabela 5.5 são apresentadas as avaliações sobre os resultados de filtragem da imagem CSAR (Apêndice A) contaminada com ruído *speckle* segundo o padrão de imagens em amplitude e 6,7 visadas, apresentando $SNR = 0,2019$.

**Figura 5.5:** Imagem CSAR (a) SNR e (b) EPI .

Conforme discutido para imagens geradas em 1 visada, observa-se para imagens geradas em múltiplas visadas, de acordo com a Figura 5.5(a), um melhor desempenho do filtro de Kuan, quando este é associado ao janelamento adaptativo proposto por Park, Song e Pearlman (1999) na redução de ruído. Isso pode ser comprovado pelo menor valor de SNR . Contudo, quando o filtro de Kuan é associado ao janelamento

proposto por Li (1988) apresenta o maior valor de EPI , conforme mostrado na Figura 5.5(b).

O método proposto, conforme valores apresentados na Tabela 5.5, possui valores de SNR próximos aos do filtro de Kuan, indicando que não há ganho significativo em relação à redução de ruído. Quando verificado os valores de EPI , observa-se que com a utilização de janelas fixas 3x3 e 5x5 o método proposto proveu valores maiores que os do filtro de Kuan, indicando uma melhor preservação de bordas.

Tabela 5.5: Medidas de avaliação de filtragem sobre a imagem CSAR.

| | Média | Mediana | Kuan | Min/Max | $Kuan + Min/Max$ |
|---|--------|---------|--------|-----------|------------------|
| <i>SNR</i> | | | | | |
| Janela 3x3 | 0,1092 | 0,1215 | 0,1154 | 0,1368 | 0,1255 |
| Janela 5x5 | 0,0724 | 0,0798 | 0,0797 | 0,0979 | 0,0888 |
| Janela 7x7 | 0,0543 | 0,0599 | 0,0612 | 0,0740 | 0,0658 |
| Janela Adaptativa Li | 0,0453 | 0,0510 | 0,0550 | 0,1140 | 0,1158 |
| Janela Adaptativa Park, Song e Pearlman | 0,0376 | 0,0394 | 0,0410 | 0,1173 | 0,1018 |
| <i>EPI</i> | | | | | |
| Janela 3x3 | 0,2536 | 0,2672 | 0,5863 | 0,5252 | 0,6707 |
| Janela 5x5 | 0,0957 | 0,0145 | 0,6203 | 0,3543 | 0,6214 |
| Janela 7x7 | 0,0229 | 0,0032 | 0,7025 | 0,2327 | 0,6707 |
| Janela Adaptativa Li | 0,0925 | 0,1086 | 0,7179 | 0,7580 | 0,6669 |
| Janela Adaptativa Park, Song e Pearlman | 0,0821 | 0,1212 | 0,5065 | 0,5618 | 0,6668 |

Um outro teste foi realizado para verificar o comportamento do algoritmo proposto em relação ao filtro de Kuan, no que diz respeito à preservação de pequenos alvos presentes em imagens SAR obtidas da costa marítima. A Figura 5.6 e a Tabela 5.6 apresentam os resultados de filtragem (Apêndice A) da imagem FEIJO (Figura A.21) contaminada com ruído *speckle* segundo o padrão de imagens em amplitude e 3 visadas, apresentando $SNR = 0,3017$.

A Figura 5.6(a) mostra que o filtro de Kuan associado ao janelamento adaptativo proposto por Park, Song e Pearlman (1999) apresenta o menor valor em relação aos outros, indicando que houve uma maior redução do ruído. Enquanto que na Figura 5.6(b) o filtro de Kuan com janela 3x3 apresenta o maior valor de EPI . Logo, há um indicativo da preservação de alvos, mas com pouca redução de ruído devido ao seu alto valor de SNR em relação aos demais.

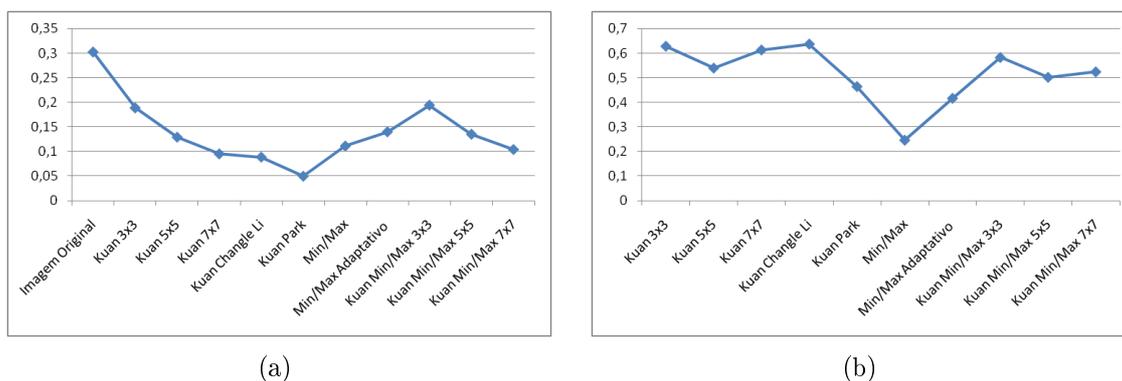


Figura 5.6: Imagem FEIJO (a) SNR e (b) EPI .

É importante ressaltar, ainda com base na Figura 5.6(b), que o menor valor de EPI foi obtido pelo método Min/Max . No Apêndice A, Figura A.23(c) pode ser visualizado que houve a perda de alguns alvos. Pode ser verificado ainda que o método proposto preservou todos os alvos, apesar de apresentar desempenho semelhante ao filtro de Kuan nos valores de SNR , conforme mostra a Tabela 5.6. Porém, os valores de EPI foram todos menores mostrando que o método proposto provoca borramento excessivo na imagem apesar de preservar todos os alvos.

Tabela 5.6: Medidas de avaliação de filtragem sobre a imagem FEIJO.

| | Média | Mediana | Kuan | Min/Max | $Kuan + Min/Max$ |
|---|--------|---------|--------|-----------|------------------|
| <i>SNR</i> | | | | | |
| Janela 3x3 | 0,1747 | 0,1915 | 0,1885 | 0,1929 | 0,1940 |
| Janela 5x5 | 0,1142 | 0,1248 | 0,1292 | 0,1374 | 0,1352 |
| Janela 7x7 | 0,0827 | 0,0920 | 0,0954 | 0,1112 | 0,1042 |
| Janela Adaptativa Li | 0,0702 | 0,0788 | 0,0888 | 0,1706 | 0,1603 |
| Janela Adaptativa Park, Song e Pearlman | 0,0448 | 0,0493 | 0,0501 | 0,1400 | 0,1036 |
| <i>EPI</i> | | | | | |
| Janela 3x3 | 0,3492 | 0,3159 | 0,6280 | 0,4810 | 0,5824 |
| Janela 5x5 | 0,1041 | 0,0301 | 0,5393 | 0,3009 | 0,5017 |
| Janela 7x7 | 0,0471 | 0,0214 | 0,6130 | 0,2460 | 0,5238 |
| Janela Adaptativa Li | 0,0232 | 0,0420 | 0,6369 | 0,7464 | 0,6265 |
| Janela Adaptativa Park, Song e Pearlman | 0,0135 | 0,0307 | 0,4641 | 0,4162 | 0,4525 |

Conclusões e Trabalhos Futuros

De acordo com os estudos e resultados apresentados, este capítulo finaliza as análises realizadas, destacando a eficiência do método proposto na filtragem de ruído *speckle* em relação aos métodos presentes na literatura e as conclusões finais.

Considerando a análise e discussão dos resultados experimentais obtidos é possível apresentar as seguintes conclusões e em seguida listar as perspectivas de trabalhos futuros.

- ▶ A utilização do janelamento adaptativo demonstrou ser uma ferramenta eficaz para filtragem de imagens contaminadas por ruído *speckle*, já que permite alterar e moldar o tamanho da máscara de filtragem de acordo com as características da vizinhança do pixel ruidoso;
- ▶ a utilização do método *Min/Max* para substituir os pixels que não se adequam ao modelo multiplicativo mostrou-se uma alternativa consistente e apresentou resultados satisfatórios. O método citado procura reduzir as diferenças entre os valores dos pixels na janela de filtragem de acordo com uma função de chaveamento baseada num filtro da média circular e em um limiar;
- ▶ o conjunto de medidas de avaliação adotado na metodologia proposta permitiu uma análise e interpretação satisfatória dos resultados de filtragem.

6.1 Perspectiva de Trabalhos Futuros

A metodologia adotada neste trabalho apresentou resultados satisfatórios. Para estudos futuros, podem ser listados os seguintes tópicos:

- ▶ aplicar e adequar as técnicas de janelamento adaptativo utilizadas em imagens contaminadas por outros modelos de ruído (ex. aditivo) ou por combinação de outros tipos de ruído (aditivo e multiplicativo);
- ▶ aplicar as técnicas de análise multiescala e multiresolução presentes na literatura para redução do ruído *speckle* e redução de ruído aditivo em imagens;
- ▶ propor algoritmos de filtragem de imagens SAR baseados em transformadas *wavelet* ortogonais e combiná-los ao método *Min/Max*;
- ▶ aplicar o método proposto de acordo com o tipo de região, determinado por outras distribuições estatísticas que modelem o ruído *speckle*;
- ▶ reunir todos os algoritmos implementados para a formação de uma *toolbox* de análise e processamento de imagens SAR.

Apêndice **A**

Resultados de Filtragem de Imagens Contaminadas por Ruído *Speckle*

O Apêndice A destina-se à apresentação dos resultados obtidos neste trabalho. Para proporcionar uma maior compreensão dos mesmos, para o filtro de Kuan foi utilizado com tamanhos de janela de filtragem 3x3, 5x5 e 7x7 e cujas as respectivas siglas adotadas são Kuan 3x3, Kuan 5x5 e Kuan 7x7. Analogamente, para o filtro de Kuan utilizado com o janelamento adaptativo proposto por Li (1988) e por Park, Song e Pearlman (1999) utilizou-se as siglas, respectivamente, Kuan Li e Kuan Park. Finalmente, para o método proposto, o filtro de Kuan combinado ao método *Min/Max*, com os tamanhos de janela de filtragem 3x3, 5x5 e 7x7 utilizou-se as siglas Kuan *Min/Max* 3x3, Kuan *Min/Max* 5x5 e Kuan *Min/Max* 7x7, respectivamente.

A.1 Imagens Artificialmente Contaminadas com Estatística de Imagens SAR em Amplitude e 1 Visada

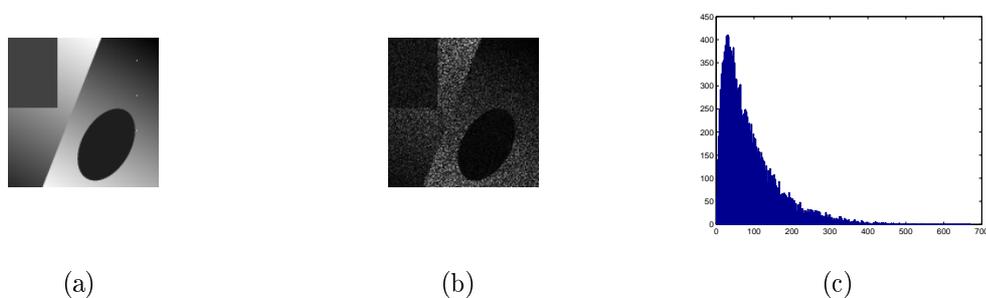


Figura A.1: (a) Imagem BLA, (b) versão artificialmente contaminada com estatística de imagens SAR em amplitude e 1 visada e (c) respectivo histograma.

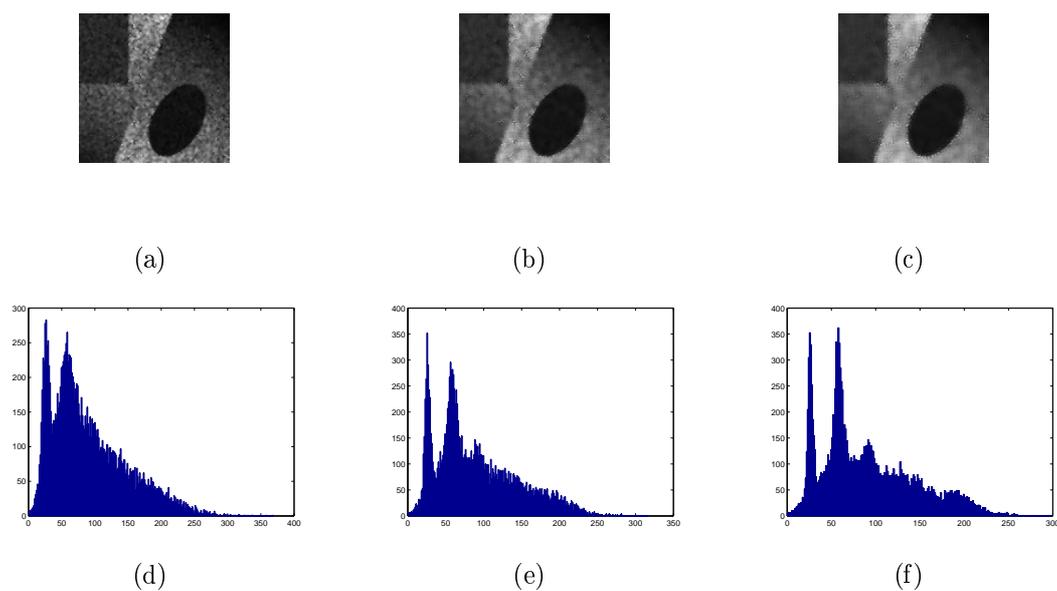


Figura A.2: Imagem BLA contaminada artificialmente e processada pelos (a) Kuan 3x3, (b) Kuan 5x5, (c) Kuan 7x7, (d)-(f) respectivos histogramas.

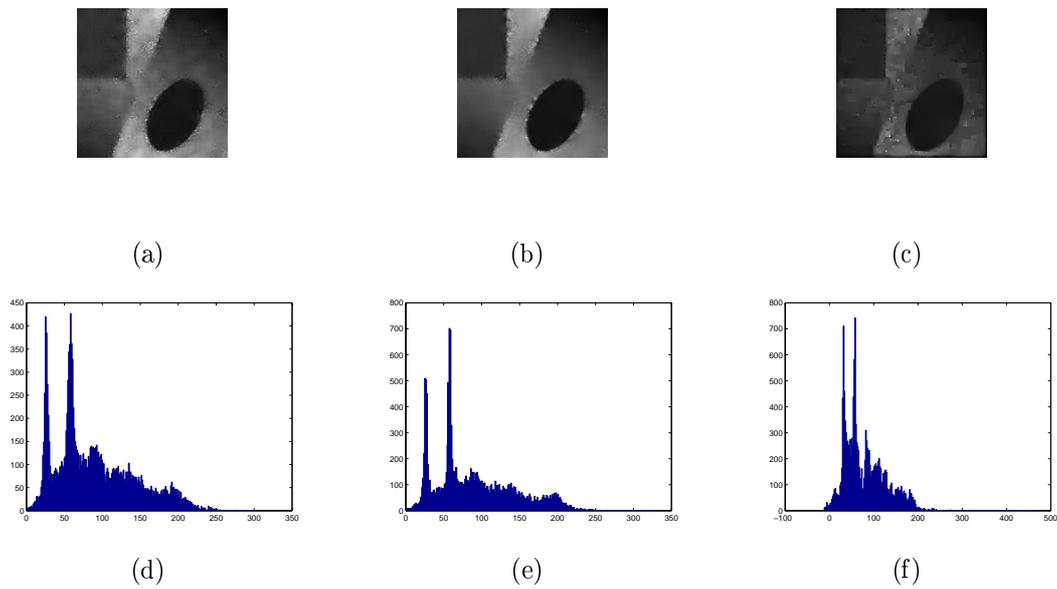


Figura A.3: Imagem BLA contaminada artificialmente e processada pelos (a) Kuan Li, (b) Kuan Park, (c) *Min/Max*, (d)-(f) respectivos histogramas.

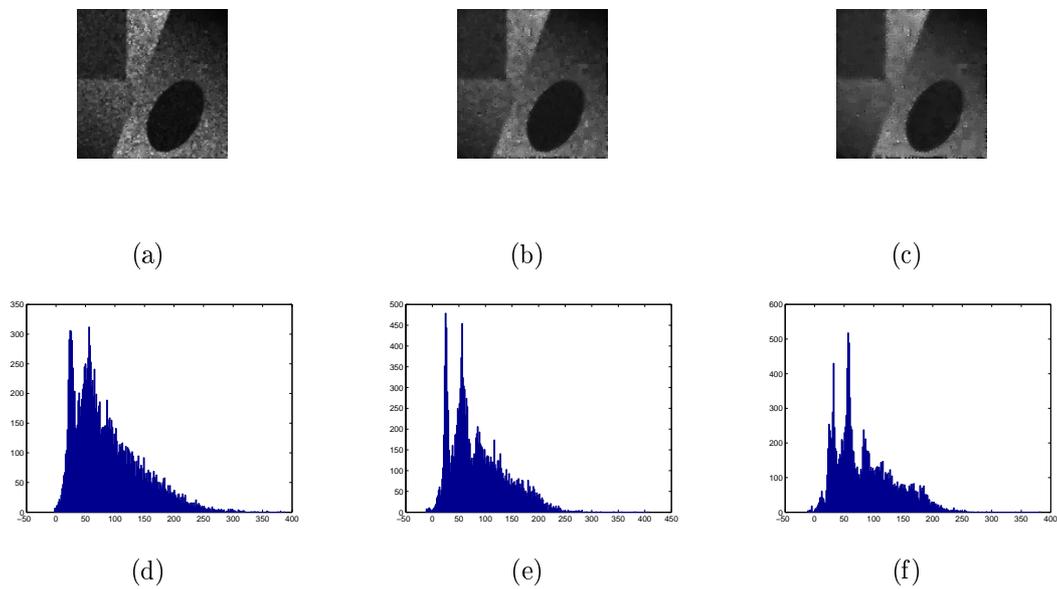


Figura A.4: Imagem BLA contaminada artificialmente e processada pelos (a) Kuan *Min/Max* 3x3, (b) Kuan *Min/Max* 5x5, (c) Kuan *Min/Max* 7x7, (d)-(f) respectivos histogramas.

A.2 Imagens Artificialmente Contaminadas com Estatística de Imagens em Amplitude e Múltiplas Visadas

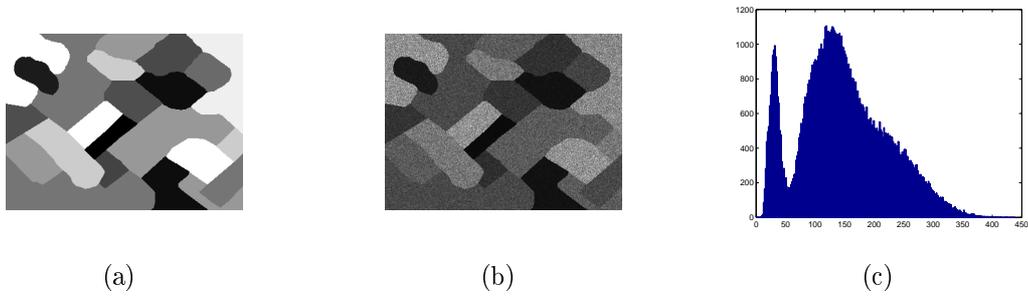


Figura A.5: (a) Imagem CARTOON, (b) versão artificialmente contaminada com estatística de imagens SAR em amplitude e 6,7 visadas e (c) respectivo histograma.

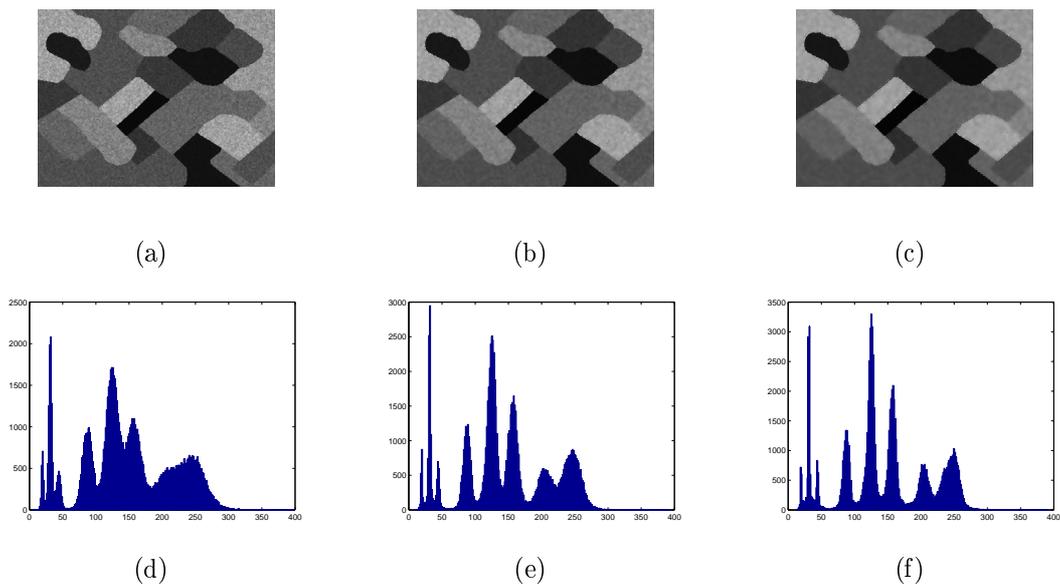


Figura A.6: Imagem CARTOON contaminada artificialmente e processada pelos (a) Kuan 3x3, (b) Kuan 5x5, (c) Kuan 7x7, (d)-(f) respectivos histogramas.

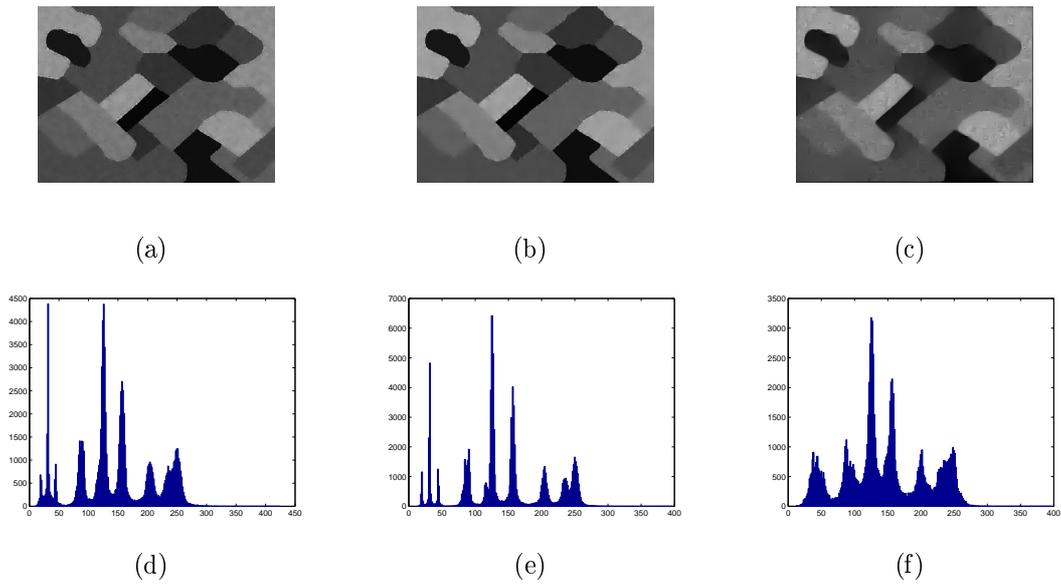


Figura A.7: Imagem CARTOON contaminada artificialmente e processada pelos (a) Kuan Li, (b) Kuan Park, (c) *Min/Max*, (d)-(f) respectivos histogramas.

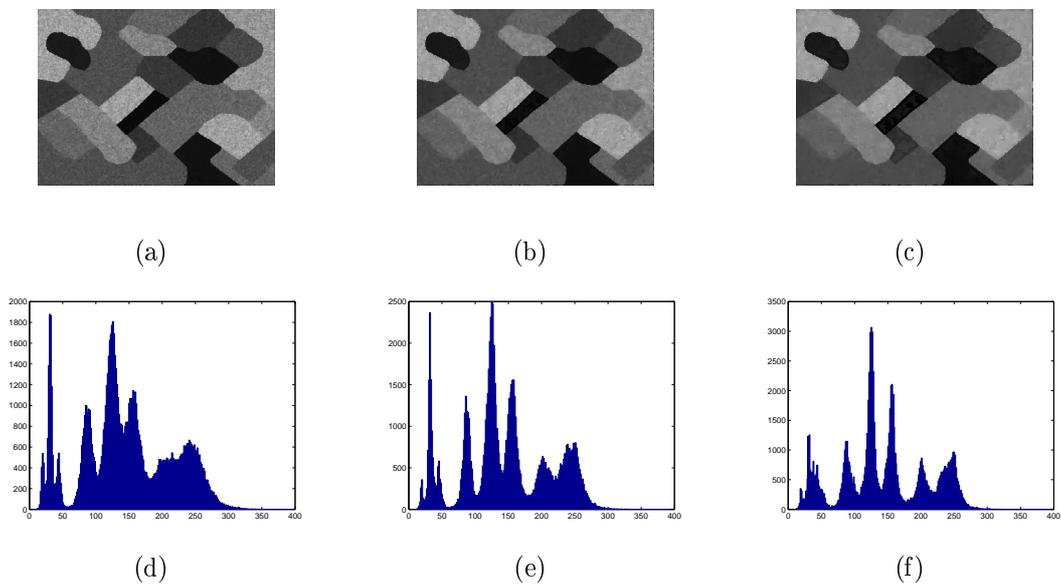


Figura A.8: Imagem CARTOON contaminada artificialmente e processada pelos (a) Kuan *Min/Max* 3x3, (b) Kuan *Min/Max* 5x5, (c) Kuan *Min/Max* 7x7, (d)-(f) respectivos histogramas.

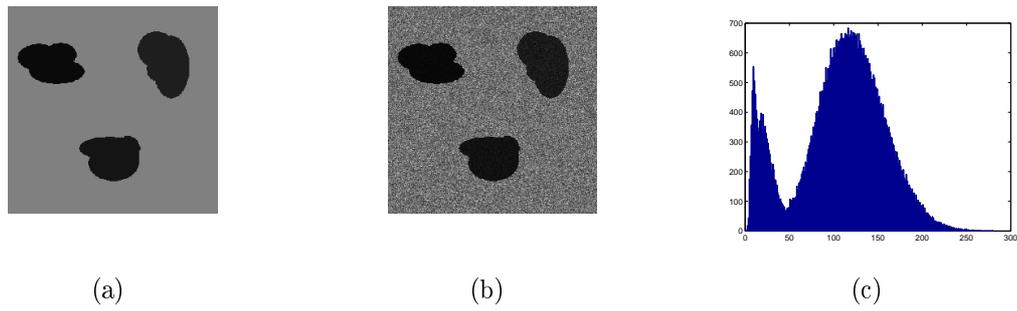


Figura A.9: (a) Imagem MANCHAS, (b) versão artificialmente contaminada com estatística de imagens SAR em amplitude e 3 visadas e (c) respectivo histograma.

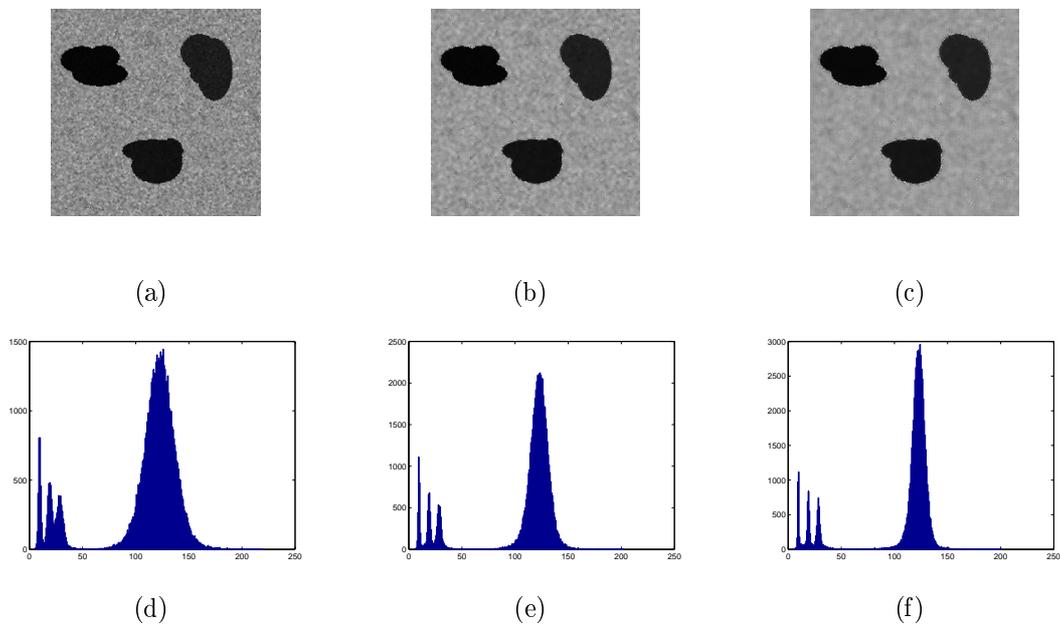


Figura A.10: Imagem MANCHAS contaminada artificialmente e processada pelos (a) Kuan 3x3, (b) Kuan 5x5, (c) Kuan 7x7, (d)-(f) respectivos histogramas.

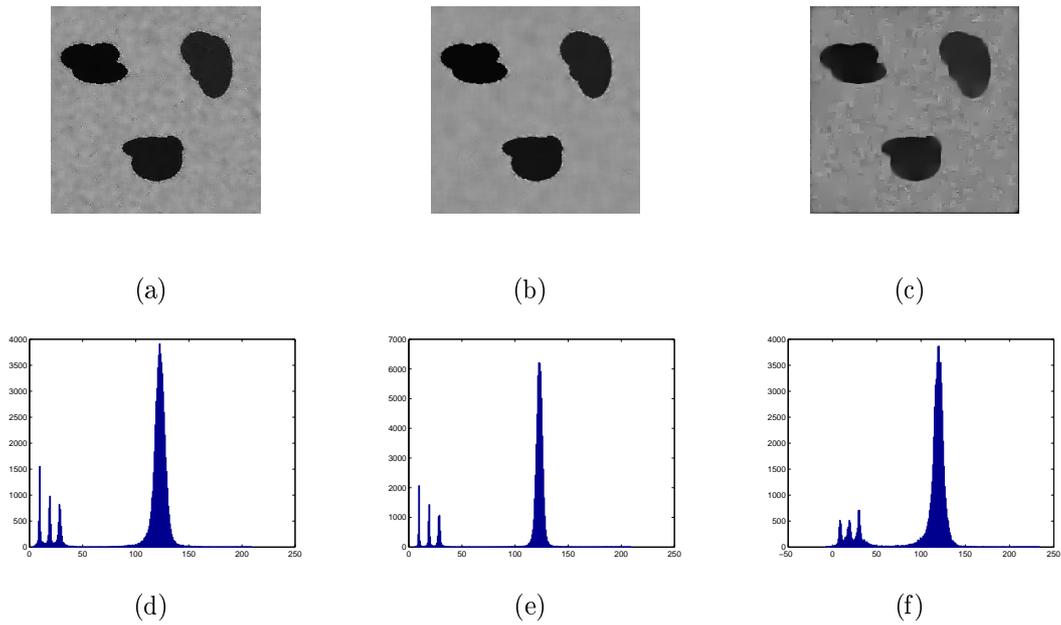


Figura A.11: Imagem MANCHAS contaminada artificialmente e processada pelos (a) Kuan Li, (b) Kuan Park, (c) *Min/Max*, (d)-(f) respectivos histogramas.

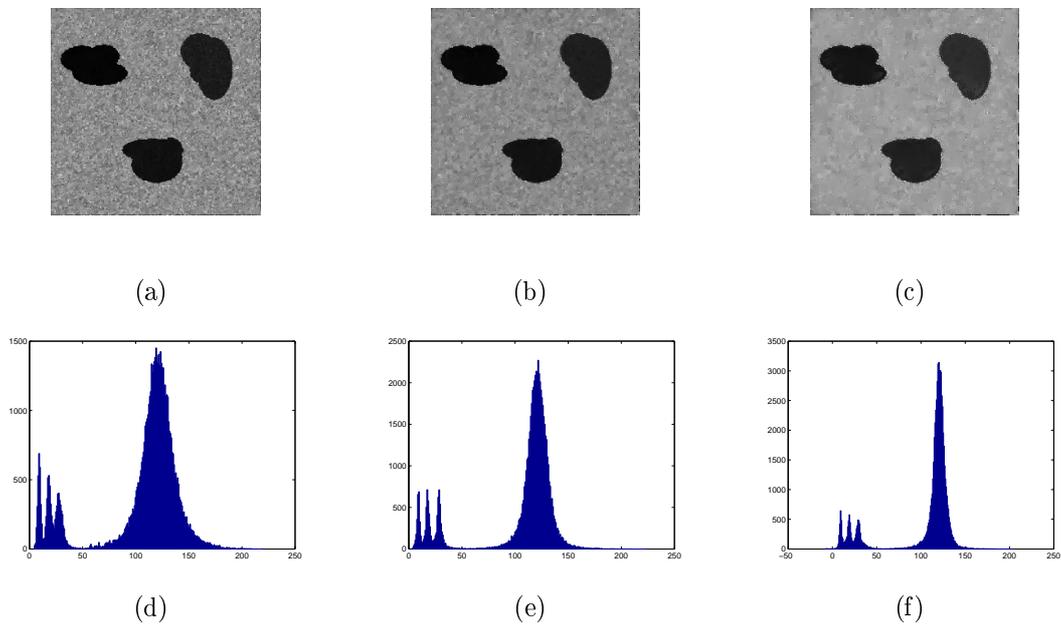


Figura A.12: Imagem MANCHAS contaminada artificialmente e processada pelos (a) Kuan *Min/Max* 3x3, (b) Kuan *Min/Max* 5x5, (c) Kuan *Min/Max* 7x7, (d)-(f) respectivos histogramas.

A.3 Imagem SAR Real Gerada em Amplitude e 1 Visada

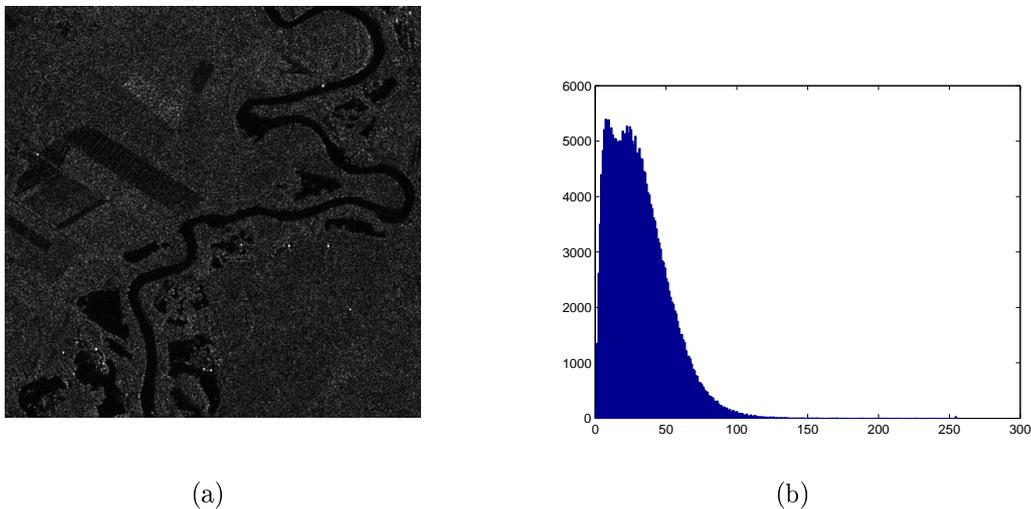


Figura A.13: (a) Imagem CAÇAPAVA, imagem SAR em amplitude e 1 visadas e (b) respectivo histograma.

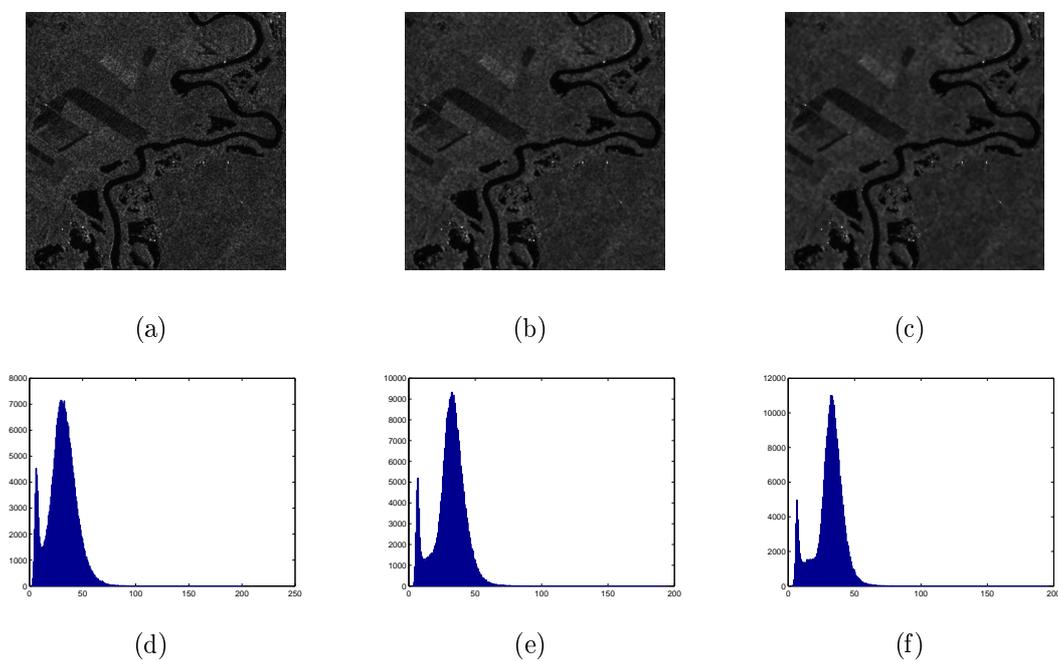


Figura A.14: Imagem CAÇAPAVA contaminada artificialmente e processada pelos (a) Kuan 3x3, (b) Kuan 5x5, (c) Kuan 7x7, (d)-(f) respectivos histogramas.

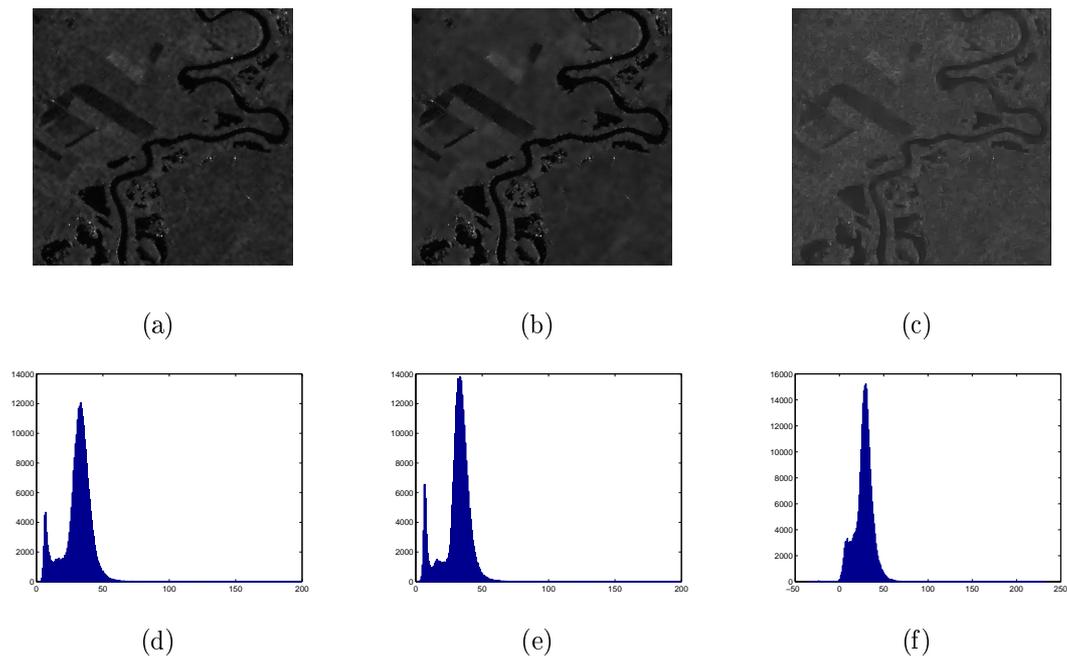


Figura A.15: Imagem CAÇAPAVA contaminada artificialmente e processada pelos (a) Kuan Li, (b) Kuan Park, (c) *Min/Max*, (d)-(f) respectivos histogramas.

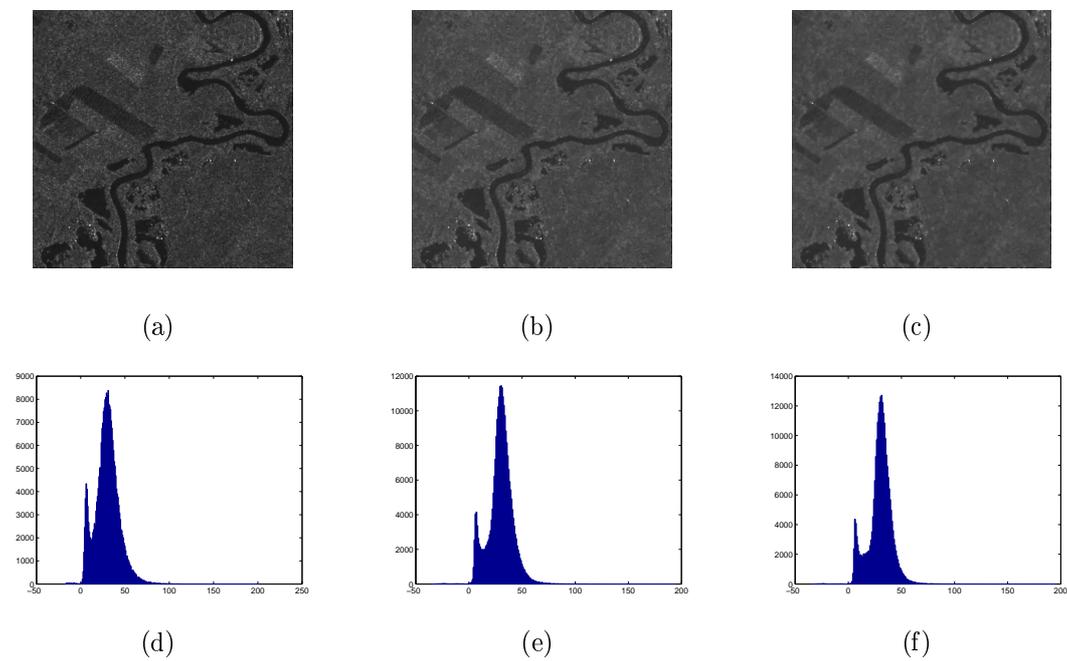


Figura A.16: Imagem CAÇAPAVA contaminada artificialmente e processada pelos (a) Kuan *Min/Max* 3x3, (b) Kuan *Min/Max* 5x5, (c) Kuan *Min/Max* 7x7, (d)-(f) respectivos histogramas.

A.4 Imagem SAR Real Gerada em Amplitude e Múltiplas Visadas

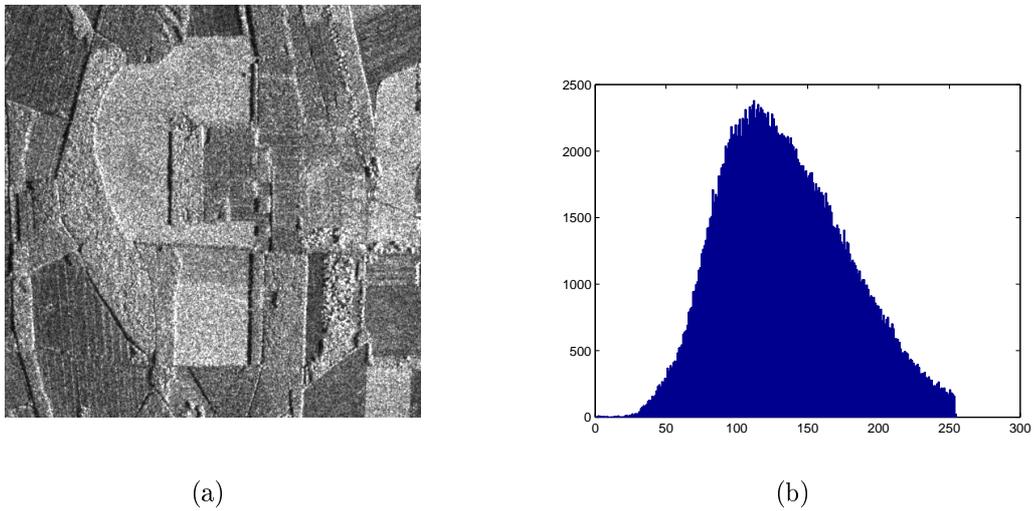


Figura A.17: (a) Imagem CSAR, imagem SAR em amplitude e 6,7 visadas e (b) respectivo histograma.

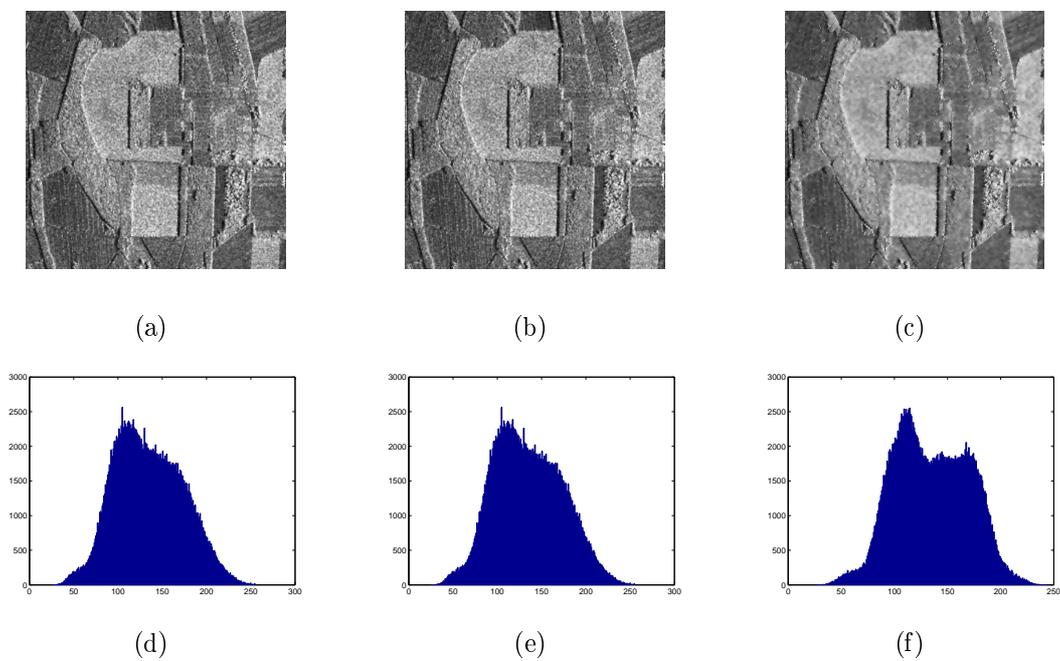


Figura A.18: Imagem CSAR contaminada artificialmente e processada pelos (a) Kuan 3x3, (b) Kuan 5x5, (c) Kuan 7x7, (d)-(f) respectivos histogramas.

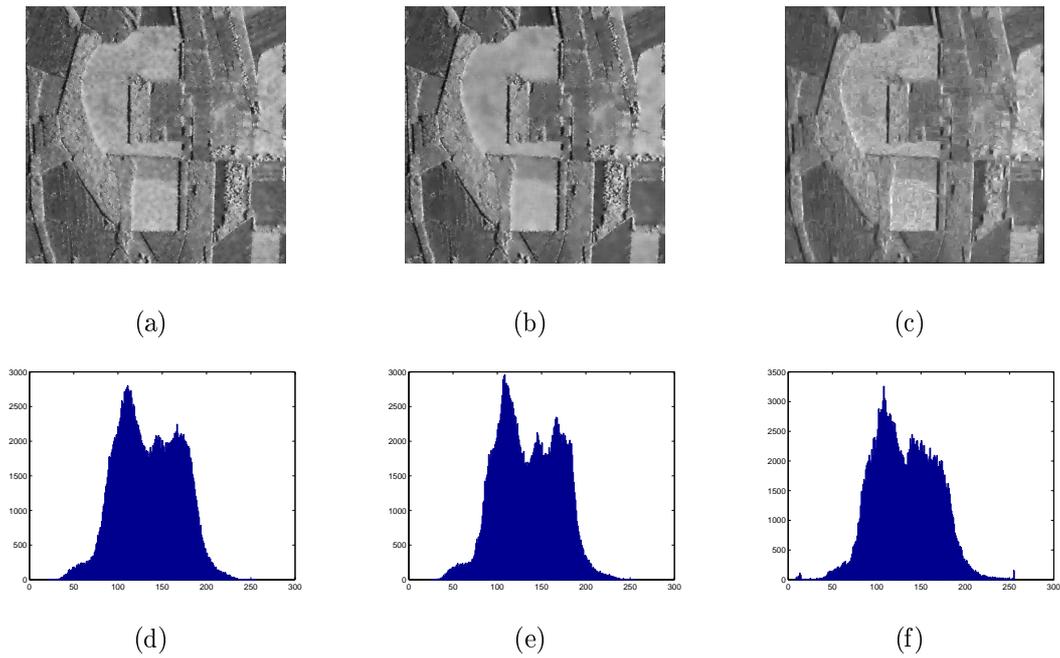


Figura A.19: Imagem CSAR contaminada artificialmente e processada pelos (a) Kuan Li, (b) Kuan Park, (c) *Min/Max*, (d)-(f) respectivos histogramas.

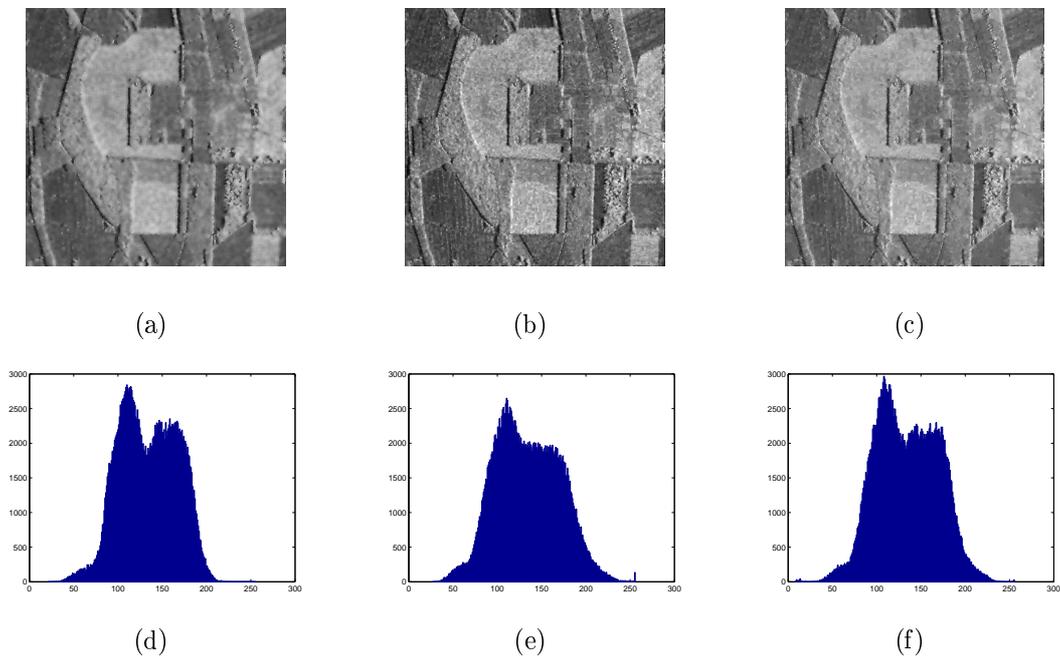


Figura A.20: Imagem CSAR contaminada artificialmente e processada pelos (a) Kuan *Min/Max* 3x3, (b) Kuan *Min/Max* 5x5, (c) Kuan *Min/Max* 7x7, (d)-(f) respectivos histogramas.

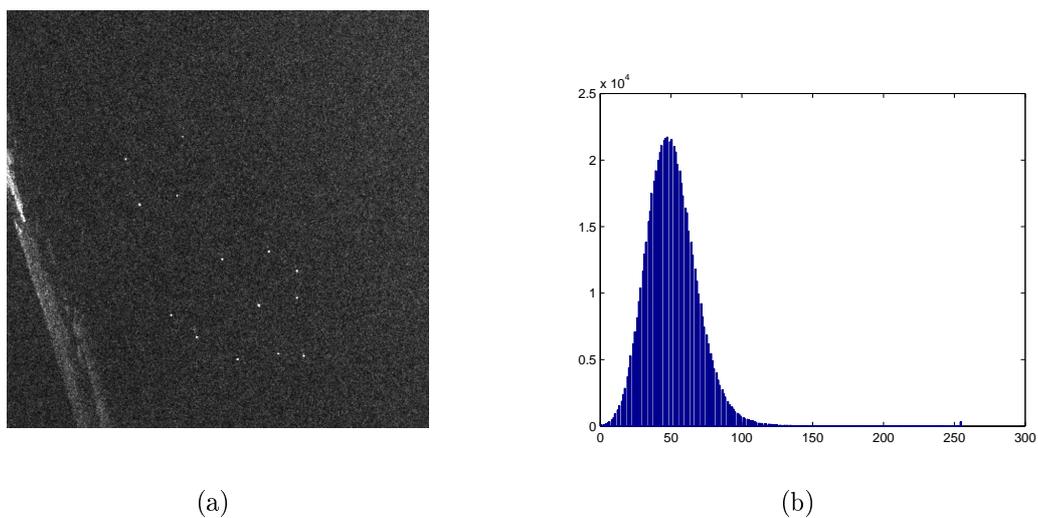


Figura A.21: (a) Imagem FEIJO, imagem SAR em amplitude e 3 visadas e (b) respectivo histograma.

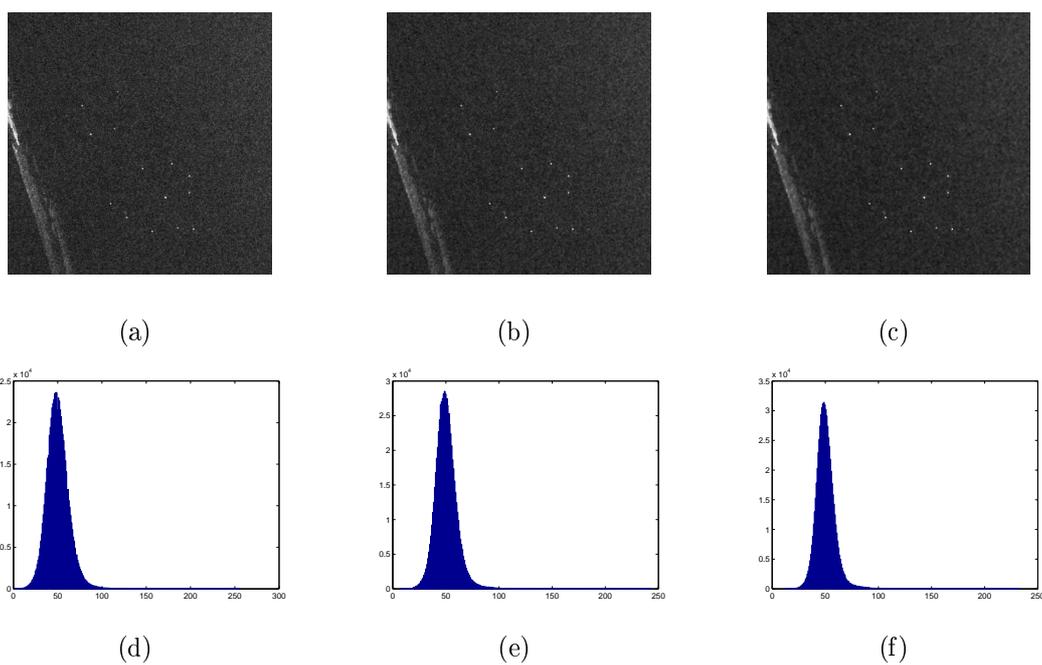


Figura A.22: Imagem FEIJO contaminada artificialmente e processada pelos (a) Kuan 3x3, (b) Kuan 5x5, (c) Kuan 7x7, (d)-(f) respectivos histogramas.

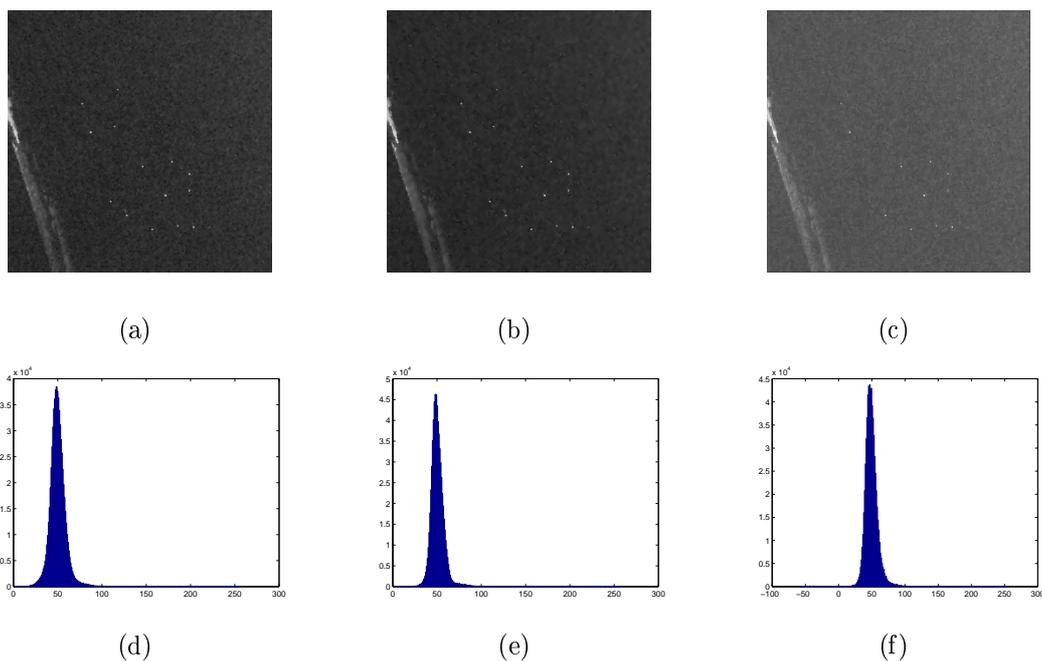


Figura A.23: Imagem FEIJO contaminada artificialmente e processada pelos (a) Kuan Li, (b) Kuan Park, (c) *Min/Max*, (d)-(f) respectivos histogramas.

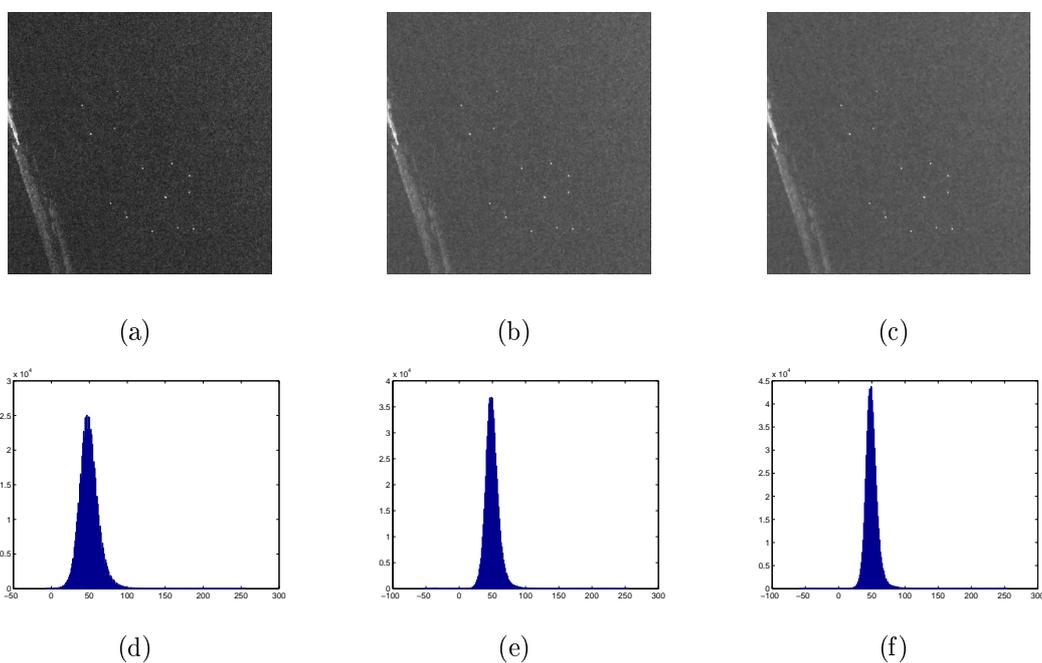


Figura A.24: Imagem FEIJO contaminada artificialmente e processada pelos (a) Kuan *Min/Max* 3x3, (b) Kuan *Min/Max* 5x5, (c) Kuan *Min/Max* 7x7, (d)-(f) respectivos histogramas.

Referências Bibliográficas

ACHIM, A.; KURUOGLU, E. E.; ZERUBIA, J. SAR image filtering based on the heavy-tailed Rayleigh model. *IEEE Transactions on Image Processing*, v. 15, n. 9, p. 2686–2693, Setembro 2006.

ARGENTI, F.; ALPARONE, L. Speckle removal from sar images in the undecimated wavelet domain. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 40, n. 11, p. 2363–2374, 2002.

BOAS, M. L. *Mathematical Methods in the Physical Science*. Canadá: John Wiley & Sons, 1983.

BUEMI, M. E.; JACOBO, J.; MEJAIL, M. SAR image processing using adaptive stack filter. *Pattern Recognition Letters*, 2009.

CANADA, N. R. *bas_intro_p*. Novembro 2009. Disponível em:
<<http://www.ccrs.nrcan.gc.ca>>.

CANDEIAS, A. L. B.; FRERY, A. C. Bitslice noise reduction using mathematical morphology. *Proceedings of the First Latino-American on Radar Remote Sensing: Image Processing Techniques, ESA Publications Division*, Buenos Aires, Argentina, p. 103–108, 1996.

COSTA, K. M. da. *Filtragem Interagente de Imagens com Ruído Speckle*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, Outubro 2004.

CRIBARY-NETO, F.; FRERY, A. C.; SILVA, M. F. Improved estimation of clutter properties in speckled imagery. *Comput. Statist. Data Anal*, v. 40, n. 8, p. 801–824, Outubro 2002.

CRIMMINS, T. R. Geometric filter for reducing speckle. *Optical Engineering*, v. 25, n. 5, p. 651–654, 1986.

DUTRA, L. V. et al. Processamento de imagens de radar de abertura sintética - princípios e aplicações. In: *Anais do IV Workshop em Tratamento de Imagens*. [S.l.]: NPDI/DCC/ICEX/UFMG, 2003. p. 4–13.

FRERY, A. C. et al. A model for extremely heterogeneous clutter. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 35, n. 3, p. 648–659, 1997.

FRERY, A. C. et al. Robust inference techniques for speckle noise reduction in 1-look amplitude SAR images. *Applied Signal Processing*, v. 4, n. 2, p. 61–76, 1997.

FROST, V. et al. A model for radar images and its application to adaptive digital filtering for multiplicative noise. *IEEE Transactions Pattern on Analysis and Machine Intelligence*, v. 4, n. 2, p. 157–166, Março 1982.

GIBRA, I. N. *Probability and Statistical Inference for Scientists and Engineers*. Nova Jersey: Prentice-Hall, 1973.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. *Digital Image Processing*. Segunda edição. Nova York: Prentice Hall, 2002.

GOODMAN, J. W. Statistical properties of laser speckle patterns, topics in applied physics: Laser speckle and related phenomena. In *J. C. Dainty (Ed), Springer-Verlag*, v. 9, p. 9–74, 1975.

GUPTA, S.; CHAUHAN, R.; SAXENA, S. Homomorphic wavelet thresholding technique for denoising medical ultrasound images. *Taylor & Francis Int. J. Med. Eng. Technol*, 2005.

IVES, R.; EICHEL, P.; MAGOTRA, N. A new SAR image quality metric. *Proceedings of 42nd IEEE Midwest Symposium on Circuits and Systems*, 1999.

JAIN, A. K. *Fundamentals of Digital Image Processing*. Englewood Cliffs, Nova Jersey: Prentice-Hall-International Editions, 1989.

KUAN, D. et al. Adaptive noise smoothing filter for images with signal-dependent noise. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, v. 7, n. 2, p. 165–177, Março 1985.

- KUAN, D. et al. Adaptive restorations of images with speckle. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, v. 35, n. 3, p. 373–383, 1987.
- LEE, J. Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, v. 2, n. 2, p. 165–168, Março 1980.
- LEE, J. Speckle analysis and smoothing of synthetic aperture radar images. *Computer Graphics Image Processing*, v. 17, p. 24–32, 1981.
- LEE, J. S. et al. Speckle filtering of synthetic aperture radar images: A review. *Remote Sensing Reviews*, v. 8, p. 313–340, 1994.
- LEE, J.-S. et al. Improved sigma filter for speckle filtering of sar imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 47, n. 1, p. 202–213, Janeiro 2009.
- LEGUIZAMÓN, S. Speckle reduction in sar images by using discrete wavelets transform. *Proceedings of the First Latino-American on Radar Remote Sensing: Image Processing Techniques*, ESA Publications Division, Buenos Aires, Argentina, p. 205–210, 1996.
- LI, C. Two adaptive filters for speckle reduction in SAR images by using the variance ratio. *International Journal of Remote Sensing*, v. 9, n. 4, p. 641–653, 1988.
- LOPES, A.; TOUZI, R.; NEZRY, E. Adaptive speckle filters and scene heterogeneity. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 28, n. 6, p. 992–1000, 1990.
- MALLADI, R.; SETHIAN, J. Image processing: Flows under min/max curvature and mean curvature. *Graphical Models and Image*, v. 58, n. 2, p. 127–141, Março 1996. 11.
- MARQUES, R. C. P. *Filtragem de Ruído Speckle em Imagens de Radar de Abertura Sintética e Avaliação dos efeitos sobre a Segmentação*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará, 2004.
- MEDEIROS, F. N. S. *Filtragem Adaptativa de Imagens de Radar de Abertura Sintética Utilizando Abordagem Maximum a Posteriori*. Tese (Doutorado) — Instituto de Física de São Carlos, 1999.

MEDEIROS, F. N. S.; MASCARENHAS, N. D. A.; COSTA, L. Evaluation of speckle noise MAP filtering algorithms applied to SAR images. *International Journal of Remote Sensing*, v. 24, n. 24, p. 5197–5218, Dezembro 2003.

MEJAIL, M. E. et al. Classification of SAR images using a general and tractable multiplicative model. *International Journal of Remote Sensing*, v. 24, n. 18, p. 3565–3582, 2003.

OLIVER, C.; QUEGAN, S. *Understanding Synthetic Aperture Radar Images*. Primeira edição. Boston: Artech House, 1998.

OSHER, S. J.; FEDKIW, R. P. *Level Set Methods and Dynamic Implicit Surfaces*. Primeira edição. [S.l.]: Springer, 2002.

PARK, J. M.; SONG, W. J.; PEARLMAN, W. A. Speckle filtering of SAR images based on adaptive windowing. *IEE Proc. Vis. Image Signal Processing*, v. 146, n. 4, p. 191–197, Agosto 1999.

PEDRINI, H.; SCHWARTZ, W. *Análise de Imagens Digitais: Princípios, Algoritmos e Aplicações*. [S.l.]: Thomson Learning, 2007. 528 pp. p.

PETROVIC, A.; VANDERGHEYNST, P. *Segmentation of Natural Images by Non-linear Scale-Space linking (Relatório Técnico)*. Ecublens, 2001.

RICHARDS, J. A. *Remote Sensing: Digital Image Analysis*. Primeira edição. Secaucus, NJ, EUA: Springer-Verlag Nova York, Inc., 1986.

RUDIN, L. I.; OSHER, S.; FATEMI, E. Nonlinear total variation based noise removal algorithms. *Physica D*, v. 60, p. 259–268, 1992.

RUIZ, P. D. Digital filtering of SAR images through localization of minimum speckle index regions. *Proceedings of the First Latino-American on Radar Remote Sensing: Image Processing Techniques, ESA Publications Division*, Buenos Aires, Argentina, p. 109–113, 1996.

SANT'ANNA, S. J. S. *Avaliação do Desempenho de Filtros Redutores de Speckle em Imagens de Radar de Abertura Sintética*. Dissertação (Mestrado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, São José dos Campos - SP, Brasil, 1995.

SATTAR, F. et al. Image enhancement based on a nonlinear multiscale method. *IEEE Transactions on Image Processing*, v. 6, n. 6, p. 888–895, 1997.

SETHIAN, J. *Level Set Methods and Fast Marching Methods: Evolving Interfaces in Computational Geometry, Fluid Mechanics, Computer Vision, and Materials Science*. Segunda edição. EUA: Cambridge University Press, 1999.

SPRING-DPI/INPE. *Tutorial de Geoprocessamento*. Novembro 2009. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/introducao_sen.html>.

XIAO, J.; LI, J.; MOODY, A. A detail-preserving and flexible adaptive filter for speckle suppression in SAR imagery. *International Journal of Remote Sensing*, v. 24, n. 12, p. 2451–2465, 2003.

ZHANG, Z. Z. *Introduction of Airborne and Spaceborn Synthetic Aperture Radar*. Primeira edição. Beijing: House of Electronics Industry, 2004.