



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Análise comparativa de filtros adaptativos anti-*speckle*
em imagens do R-99 sintetizadas via
Subsistema de Processamento SAR do PROSAR-BR**

Thiago de Souza Mansur Pereira

Orientador(a): Prof. Dra. Tati de Almeida

Co-orientador(a): Edinelson Ferreira de Sena – MsC (UnB)

Monografia apresentada ao Instituto
de Geociências como trabalho final do
Curso de Especialização
em Geoprocessamento 2011.

Brasília – DF
Dezembro 2011

AGRADECIMENTOS

À Força Aérea Brasileira, pela oportunidade oferecida para realizar mais esta capacitação profissional, ao amigo Edinelson Ferreira de Sena pela co-orientação e ao Coronel Ricardo de Queiroz Veiga, da FAB, por disponibilizar e esclarecer a utilização do Processador para geração de imagens SPSAR, de sua co-autoria.

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO..... | 4 |
| 1.1 OBJETIVO..... | 4 |
| 1.2 IMAGEAMENTO POR RAS MULTIPOLARIMÉTRICO | 5 |
| CAPÍTULO 2. <i>SPECKLE</i>: FENOMENOLOGIA E PROPRIEDADES BÁSICAS | 9 |
| 2.1 O QUE É <i>SPECKLE</i> ?..... | 9 |
| 2.2 FENOMENOLOGIA..... | 9 |
| 2.3 PROPRIEDADES BÁSICAS EM IMAGENS RAS | 10 |
| 2.3.1 <i>Influência em sinal monovisada</i> | 10 |
| 2.3.2 <i>Influência em sinal multivisada</i> | 11 |
| CAPÍTULO 3. METODOLOGIA | 13 |
| 3.1 PROCEDIMENTO | 13 |
| 3.2 FIGURAS DE MÉRITO PARA FILTRAGEM | 15 |
| 3.2.1 <i>Erro quadrático médio (EQM)</i> | 16 |
| 3.2.2 <i>Relação sinal-ruído (RSR)</i> | 16 |
| 3.2.3 <i>Relação sinal-ruído de pico (RSRP)</i> | 16 |
| 3.2.4 <i>Parâmetro de correlação (PC)</i> | 16 |
| 3.2.5 <i>Número equivalente de visadas (NEV)</i> | 17 |
| CAPÍTULO 4. BANCO DE FILTROS ANTI-<i>SPECKLE</i> | 18 |
| 4.1 MÉTODOS BÁSICOS DE REDUÇÃO DO <i>SPECKLE</i> | 18 |
| 4.2 A FILTRAGEM ESPACIAL ADAPTATIVA..... | 18 |
| 4.3 BANCO DE FILTROS ESPACIAIS ADAPTATIVOS COMPARADOS..... | 19 |
| 4.3.1 <i>Base de comparação</i> | 19 |
| 4.3.2 <i>O filtro de Lee</i> | 20 |
| 4.3.3 <i>O filtro de Kuan</i> | 20 |
| 4.3.4 <i>O filtro de Frost</i> | 21 |
| CAPÍTULO 5. ANÁLISE COMPARATIVA DO BANCO DE FILTROS..... | 22 |
| 5.1 CARACTERÍSTICAS DA IMAGEM-BASE | 22 |
| 5.2 AJUSTE DO BANCO DE FILTROS E RESULTADOS..... | 22 |
| 5.3 CRÍTICA DOS RESULTADOS..... | 25 |
| REFERÊNCIAS..... | 26 |
| APÊNDICE A – ROTINA PRINCIPAL EM MATLAB..... | 27 |
| APÊNDICE B – CÁLCULO DAS FIGURAS DE MÉRITO EM MATLAB | 28 |
| APÊNDICE C – IMAGENS FILTRADAS..... | 29 |

Capítulo 1. Introdução

Expõem-se os objetivos do trabalho e um resumo básico, tanto quanto necessário, sobre o processo de imageamento de um Radar de Abertura Sintética (RAS) – em inglês, *Synthetic Aperture Radar* (SAR). A metodologia utilizada para tratar o problema de redução de *speckle*, fenômeno responsável pelo indesejável aspecto granuloso nas imagens, consiste em avaliar um conjunto de filtros anti-*speckle*, disponíveis no *software* de processamento e análise de imagens geoespaciais ENVI, através de figuras de mérito definidas matematicamente e programadas em MATLAB. As imagens do R-99, aeronave sensora da Força Aérea Brasileira (FAB), foram sintetizadas a partir do Subsistema de Processamento SAR (SPSAR) do Processador SAR Brasileiro (PROSAR-BR), programado em IDL.

A metodologia adotada é descrita no Capítulo 3. O Capítulo 2 resume as propriedades básicas do *speckle* relevantes em imagens RAS, necessárias para compreender a atuação de filtros anti-*speckle* em geral, e do banco de filtros submetido à comparação, em particular. Foram escolhidos os filtros de Lee, Frost e Kuan, descritos Capítulo 4, pela ampla disponibilidade e utilização.

As figuras de mérito para filtragem, definidas no item 3.2, subsidiam a seleção criteriosa de um elemento do banco de filtros para redução de *speckle*, cujo resultado comparativo é apresentado no Capítulo 5.

1.1 Objetivo

O *speckle* é um fenômeno decorrente do processo de imageamento RAS que dificulta a utilização dessas imagens em diversas aplicações. A fim de reduzir este efeito, vários filtros estão disponíveis, e o usuário enfrenta o problema de selecionar um deles como o mais adequado para certa aplicação. O objetivo principal deste trabalho consiste em definir uma metodologia a fim selecionar um daqueles filtros anti-*speckle*, baseada em figuras de mérito calculadas para as imagens filtradas e na estatística assumida para o fenômeno *speckle*.

1.2 Imageamento por RAS multipolarimétrico

As etapas envolvidas no processo de imageamento são resumidas na Figura 1.1, a qual localiza o escopo deste trabalho. O radar emite uma onda eletromagnética (iluminação ou visada) que ao interagir com a cena “medida” na Terra, recebe um eco ou sinal refletido.

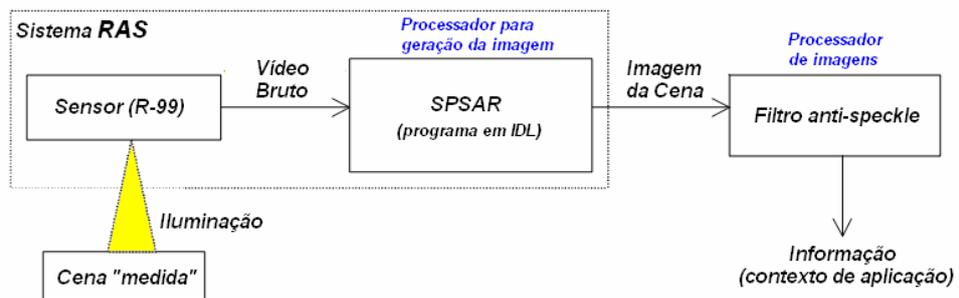


Figura 1.1. Processo de imageamento e posterior processamento para uso da imagem RAS.

Fonte: adaptado de Fernandes et al. (1998).

O sinal refletido deve ser armazenado na forma de vídeo bruto que, posteriormente, será transformado em imagem. O vídeo bruto corresponde às amostragens de sinal elétrico (voltagem) captado pelo sensor. A imagem é gerada quando esses sinais forem convertidos em forma matricial por linhas e colunas.

A conversão de vídeo bruto em uma imagem da cena é realizada por um processador para geração da imagem. Neste trabalho, foi utilizado o Subsistema de Processamento SAR (SPSAR) do PROSAR-BR, do Instituto de Estudos Avançados (IEAv) da FAB, programado em IDL e embutido no ENVI, cuja interface com o usuário pode ser vista na Figura 1.2. Veiga (2004) dá mais informações quanto ao SPSAR além do necessário ao escopo deste trabalho em filtragem de imagens já geradas (sintetizadas).

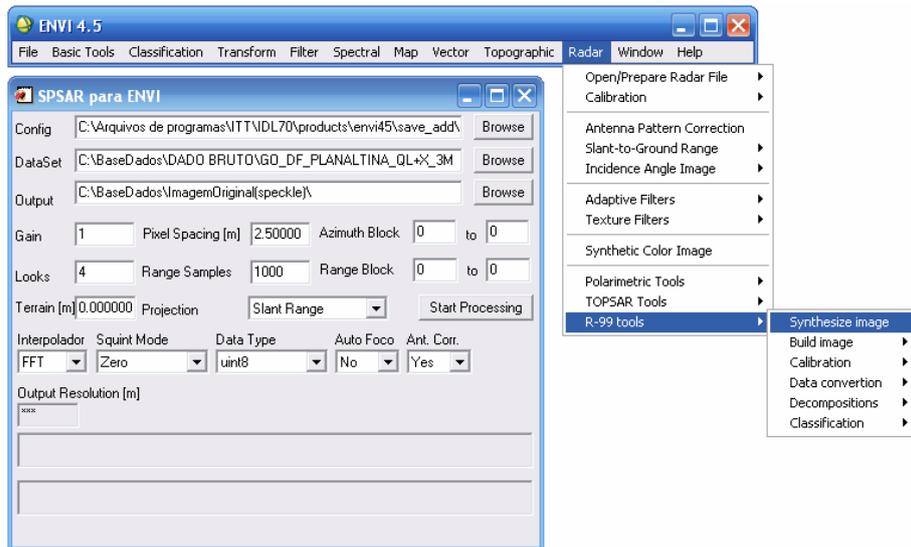


Figura 1.2. Interface do SPSAR no ENVI.

A imagem gerada pode sofrer novos processamentos na etapa conhecida genericamente como Processador de imagens. No presente contexto, esse processamento consiste nos filtros anti-*speckle*, também presentes no ENVI. O produto do processador de imagens destina-se a uma aplicação ou uso da informação contida na imagem acerca da cena real, como interpretação visual de formas, objetos, linhas ou regiões, ou sua classificação e segmentação.

Conforme ilustrado na Figura 1.3, para formar a imagem é necessário tomar várias visadas, no que se constitui uma abertura sintética (artificial), pois simula uma abertura de antena muito maior que a abertura da antena real.

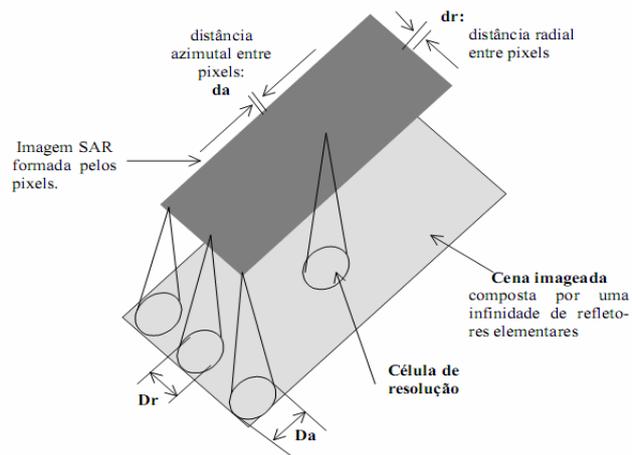


Figura 1.3. Correspondência entre células de resolução na cena e *pixels* na imagem a ser formada pelo Processador para geração de imagem.

Fonte: adaptado de Fernandes et al. (1998).

Para produzir a abertura sintética, o radar precisa mover-se continuamente, por plataforma espacial ou aerotransportado. O RAS da FAB, na Figura 1.4, é transportado pela aeronave R-99, que opera nas bandas L e X e que apresenta outros sensores, não abordados neste trabalho, cujos detalhes são descritos por Sena (2011).



Figura 1.4. Localização dos sensores do R-99. Fonte: Sena (2011).

O R-99 apresenta a capacidade de produzir imagens polarimétricas, formadas quando um pulso radar é transmitido em polarização Vertical (V) ou Horizontal (H), previamente definida, enquanto no retorno do eco, a recepção ocorre, simultaneamente, por antenas de polarização V e de polarização H. Ocorre que os alvos naturais, iluminados por uma única polarização, são capazes de refletir ondas eletromagnéticas com ambas as componentes V e H, com amplitude e fase características.

Há quatro combinações de polarização em um sistema RAS para formação de imagens, denotadas por VV, VH, HV e HH. Os pulsos radar costumam ser transmitidos nas polarizações V e H alternadamente.

O sistema RAS é capaz de detectar e medir as informações contidas na amplitude e na fase da onda refletida, medidas em relação à onda transmitida (pulso), e as transformar em Números Digitais (ND) para armazenamento e processamento.

De acordo com a informação extraída do sensor, definem-se tipos de imagem, como a tipo amplitude, cujos *ND* representam somente informação de amplitude relativa do eco, ignorada a informação de fase e definida uma combinação de polarização dentre as citadas. Analogamente, define-se imagem fase. Por fim, a imagem cujos *ND* representam amplitude e fase denomina-se imagem complexa (números complexos). Outras combinações são possíveis,

envolvendo combinações algébricas entre polarizações diversas, mas este trabalho só aborda imagens intensidade simples.

As imagens são compostas por *pixels* (*picture elements*), os quais representam uma unidade de informação oriunda da célula de resolução do sistema RAS, que ao ser projetada do sensor ao solo, registra um aspecto particular da cena real. Um único *ND*, também denominado “nível de cinza”, é associado a cada *pixel*. A representação mais comum de uma imagem, para fins de processamento ou filtragem, é a forma matricial.

Capítulo 2. *Speckle*: fenomenologia e propriedades básicas

Algumas propriedades do fenômeno *speckle* que, a rigor, não pode ser considerado ruído, são revisadas. O *speckle* é decorrente da natureza coerente do imageamento RAS e dificulta a interpretação visual, e o automatismo em classificação e segmentação das imagens. Suas propriedades estatísticas básicas, em função do tipo descrito de imagem, no Capítulo 1, afetam diretamente a formulação de filtros estimadores, conforme se depreende da discussão dos filtros resumidos no Capítulo 4.

2.1 O que é *speckle*?

O *speckle* é um fenômeno decorrente do imageamento coerente realizado pelo RAS, produzindo um aspecto granuloso na imagem (GOODMAN, 1976; OLIVER; QUEGAN, 1998), conforme contrastado entre uma imagem com *speckle* e sua versão filtrada, na Figura 2.1, o que pode dificultar a interpretação visual, a classificação e a segmentação das imagens.



Figura 2.1. Exemplo de imagem com *speckle* e sua versão filtrada.

2.2 Fenomenologia

A maioria das superfícies naturais apresenta-se extremamente rugosa na escala do comprimento de onda de um sistema RAS. Sob iluminação de uma emissão eletromagnética coerente, a onda refletida (eco radar) captada será resultado da contribuição (interferência) de muitos refletores independentes devidos à rugosidade da cena imageada (OLIVER; QUEGAN, 1998).

Dessa forma, a modulação imposta à onda refletida total pode ser escrita como

$$Ae^{i\phi} = \sum_{k=1}^N A_k e^{i\phi_k}, \quad (2.1)$$

onde cada refletor elementar colabora com uma onda refletida parcial de amplitude A_k e fase ϕ_k , sendo N o número total deles, geralmente muito grande.

As partes real e imaginária são

$$x = A \cos \phi, y = A \sin \phi, \quad (2.2)$$

denominadas de componente em fase e componente em quadratura, respectivamente.

Cada *pixel*, correspondente a uma célula de resolução é o resultado desta interferência, à qual se ajusta a natureza particular dos refletores. Portanto, a rigor, o *speckle* não é ruído, mas o modo pelo qual o RAS interage com a cena através da onda eletromagnética em retorno, e.g. nas bandas L ou X.

Esse modelamento limita-se ao sinal captado pela antena do sensor em uma iluminação (visada). Após captação, o sensor RAS pode distorcer o sinal, antes da gravação, efeito que pode ser compensado por processamento digital (OLIVER; QUEGAN, 1998).

2.3 Propriedades básicas em imagens RAS

O olho humano é capaz de obter informação de uma imagem a partir de formas, objetos, linhas ou regiões, delimitados pela intensidade em níveis de cinza ou mesmo pela textura, que é relacionada ao coeficiente de variação da imagem. Certamente, o *speckle* pode afetar a recuperação de informação quanto à cena por meio da imagem RAS. A seguir, discute-se a influência do *speckle* em sinais (dados) mono e multivisada.

2.3.1 Influência em sinal monovisada

A partir de (2.1), o *speckle* é modelado, matematicamente, como um Passeio Aleatório no plano complexo, por parte dos refletores elementares $A_k e^{i\phi_k}$ que, em conjunto, ora produzem reforço, ora produzem enfraquecimento do sinal $Ae^{i\phi}$ captado na antena do sensor RAS. Ademais, na presente análise, assume-se que os refletores estão uniformemente distribuídos na célula de

resolução. Como consequência do modelo, algumas propriedades estatísticas associadas ao sinal captado numa única visada (OLIVER, QUEGAN, 1998):

1. As componentes em fase x e em quadratura y têm função densidade de probabilidade (fdp) conjunta gaussiana, de média nula e variância $\sigma/2$ determinada pelas amplitudes A_k :

$$f_{xy}(x, y) = \frac{1}{\pi\sigma} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\sigma}\right) \quad (2.3)$$

2. A fase observada $\phi = \tan^{-1}(y/x)$ tem distribuição uniforme em $[-\pi, \pi]$;
3. A amplitude $A = \sqrt{x^2 + y^2}$ segue a fdp de Rayleigh:

$$f_A(A) = \begin{cases} \frac{2A}{\sigma} \exp\left(-\frac{A^2}{\sigma}\right), & A \geq 0 \\ 0 & , c.c. \end{cases} \quad (2.4)$$

com média $\sqrt{\pi\sigma}/2$ e desvio padrão $\sqrt{(1-\pi/4)\sigma}$. O coeficiente de variação vale 0,5227.

4. A intensidade $s = A^2$ segue uma fdp exponencial negativa:

$$f_s(s|\sigma) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma} e^{-s/\sigma}, & s \geq 0 \\ 0 & , c.c. \end{cases} \quad (2.5)$$

O coeficiente de variação vale 1.

A fim de apreciar a estatística relativa a uma única celular de resolução, assume-se que, numa área homogênea, as vizinhas sejam equivalentes nesse quesito. A idéia é semelhante ao simples experimento probabilístico com moedas: heurísticamente, computar a frequência relativa de resultado cara ou coroa, da mesma moeda lançada 1000 vezes, é o mesmo que lançar 1000 moedas uma só vez, desde que sejam “semelhantes”.

2.3.2 Influência em sinal multivisada

Será tratado aqui somente o caso de *speckle* tomado como intensidade, pois será utilizado neste trabalho. Define-se uma imagem “*V*-visadas” como aquela que se obteve por meio de uma média de V de amostras de sinais monovisada.

Matematicamente, o processamento para obter o sinal multivisada a partir dos sinais monovisada (OLIVER; QUEGAN, 1998) é definido por

$$s = \sum_{k=1}^V s_k, \quad (2.6)$$

onde s é a intensidade da influência do *speckle* em sinais de V -visadas e s_k representam as intensidades esperadas da influência do *speckle* em monovisada, que obedecem portanto a (2.5).

Partindo-se de (2.5) e (2.6), chega-se à nova fdp do *speckle* em processamentos multivisada, definida por

$$f_s(s|\sigma) = \begin{cases} \frac{1}{\Gamma(V)} \left(\frac{V}{\sigma}\right)^V s^{V-1} e^{-Vs/\sigma}, & s \geq 0 \\ 0 & , c.c. \end{cases} \quad (2.7)$$

onde V é o número de visadas, Γ é a função *gamma*.

Essa fdp define

$$\langle s \rangle = \sigma, \quad \text{var}(s) = \frac{\sigma^2}{V} \quad (2.8)$$

como a média e a variância, respectivamente, as quais implicam em

$$C_s = \frac{1}{\sqrt{V}} \quad (2.9)$$

como o novo coeficiente de variação associado à influência do *speckle*. Essa simples expressão só ocorre para *speckle* tomado em intensidade.

Para efeito de filtragem, costuma-se utilizar um modelo de *speckle* mais simplificado, conhecido como modelo multiplicativo, no qual a intensidade s ganha nova formulação.

Capítulo 3. Metodologia

Como exemplo de aplicação da metodologia, foi escolhida uma imagem do R-99, na área de Planaltina, utilizada por Sena (2011), para servir de imagem-base a processar pelos filtros de Lee, Frost e Kuan, disponíveis no ENVI.

Utilizou-se programação MATLAB para calcular figuras de mérito dos referidos filtros, relacionada no Apêndice. Os resultados foram reunidos em tabela para que fosse efetuada a comparação de desempenho.

3.1 Procedimento

O SPSAR forneceu imagens tipo amplitude, formato TIF, de oito bits (cada *pixel* poderia apresentar um nível de cinza inteiro de 0 a 255). Por razões descritas no Capítulo 2 e no Capítulo 4, converteu-se a imagem para o formato de 16 bits, pois a intensidade é o quadrado da amplitude e, no pior caso, $(256 \text{ níveis})^2 = (2^8 \text{ níveis})^2 = 2^{16}$ níveis, ou seja, seriam necessários 16 bits. Para tanto, basta usar o comando ENVI: *Basic Tools* → *Band Math*. Surge a tela da Figura 3.2, onde se insere a expressão $(\text{uint}(b1))^2$, onde “*uint*” converte a imagem-base carregada na variável “*b1*” de 8 para 16 bits e “*^2*” eleva esta conversão ao quadrado, dando imagem tipo intensidade que sofrerá processo de filtragem. Isso foi repetido para as quatro polarizações.

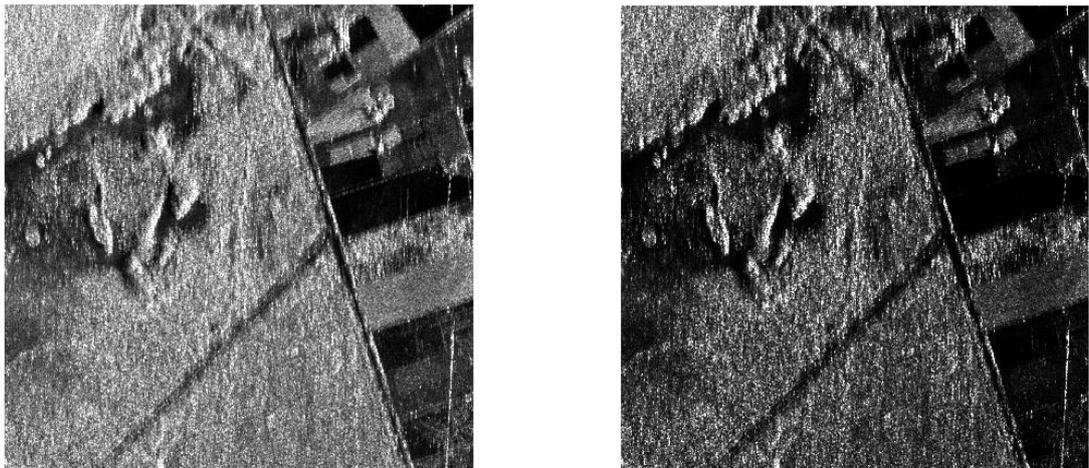


Figura 3.1. Imagem-base (banda L, HH) no formato amplitude (esq.) e no formato intensidade (dir.).

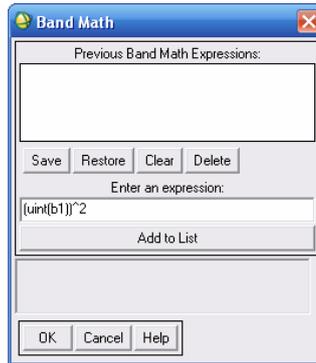


Figura 3.2. Conversão de imagem amplitude para intensidade.

A imagem-base recebe, a cada vez que muda a polarização, o nome ImagemBaseLPP.tif, onde *PP* pode ser “HH”, “HV”, “VH” ou “VV”, que indica banda L e tipo de polarização. Além disso, todas são imagens 4-visadas (conceito definido no item 2.3.2). Isto é importante no ajuste de parâmetros de filtragem por parte do usuário, conforme item.

Para filtrar umas dessas imagens, basta seguir o comando no ENVI: *Filter* → *Adaptive* → *Lee/Frost/Kuan*. Observa-se a interface com o usuário na Figura 3.3.

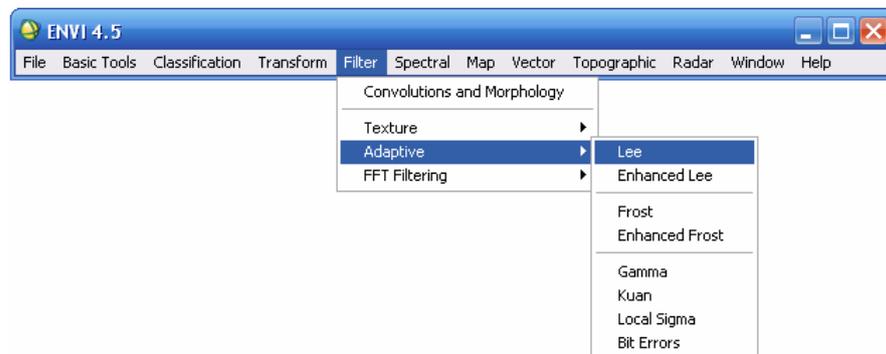


Figura 3.3. Filtragem adaptativa pelo ENVI.

De acordo com a imagem-base, tipo de filtro e tamanho do *kernel*, os nomes das imagens processadas são da forma ImagemBaseLPP_FFFFFKKK.tif, onde

1. *PP* pode ser “HH”, “HV”, “VH” ou “VV”;
2. *FFFFF* pode ser “Lee”, “Frost” ou “Kuan”;
3. e *KKK* pode ser 3x3, 5x5, 7x7 e 11x11.

Teríamos, por exemplo, a partir de ImagemBaseLVH.tif processada pelo filtro de Frost com *kernel* 7x7, o nome ImagemBaseLVH_Frost7x7.tif.

O ENVI requisita os parâmetros de entrada conforme e ilustra a Figura 3.4, cujos parâmetros de entrada exatos são discutidos no Capítulo 5.

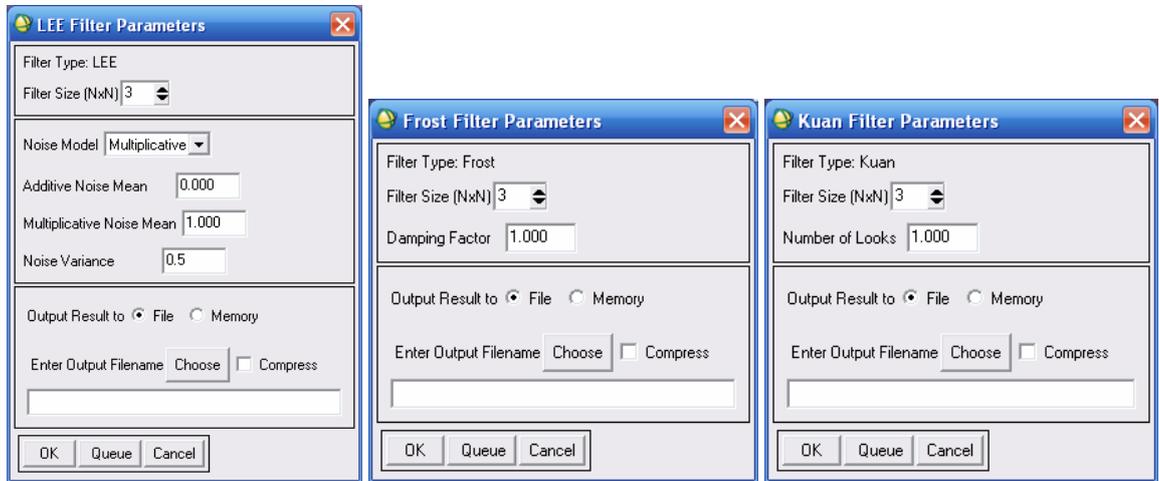


Figura 3.4. Parâmetros exigidos pelo ENVI para os filtros de Lee, Frost e Kuan.

A organização dos arquivos formato TIF segue a Figura 3.5, com significados óbvios, que implica a codificação MATLAB do Apêndice A. O SPSAR lê o dado (vídeo) bruto e sintetiza a imagem original a ser filtrada.

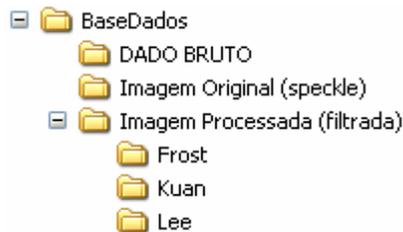


Figura 3.5. Organização dos arquivos com implicações na codificação MATLAB do Apêndice A.

3.2 Figuras de mérito para filtragem

As figuras de mérito, quanto à redução de *speckle*, são listadas a seguir. Para fixar a notação, I é a imagem-base (degradada pelo *speckle*) e \hat{I} é a imagem processada (filtrada) pelo banco de filtros, a partir da mesma imagem-base, I_i e \hat{I}_i são, respectivamente, os *ND* associados ao i -ésimo *pixel* e N o número total deles.

As codificações MATLAB correspondentes encontram-se no Apêndice B.

3.2.1 Erro quadrático médio (EQM)

O erro quadrático médio da imagem filtrada (SHI; FUNG, 1994) é dado por

$$EQM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{I}_i - I_i)^2 \quad (3.1)$$

Na comparação entre filtros, é desejável um baixo valor para (3.1).

3.2.2 Relação sinal-ruído (RSR)

A estimativa da relação sinal-ruído da imagem filtrada (SHI; FUNG, 1994) é dada por

$$RSR = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{i=1}^N I_i^2}{\sum_{i=1}^N (\hat{I}_i - I_i)^2} \right) \quad (3.2)$$

Na comparação entre filtros, é desejável um alto valor para (3.2).

3.2.3 Relação sinal-ruído de pico (RSRP)

A estimativa da relação sinal-ruído de pico da imagem filtrada (SHI; FUNG, 1994) é dada por

$$RSRP = 20 \log_{10} \frac{2^{N_{bits}}}{\sqrt{EQM}} \quad (3.3)$$

Na comparação entre filtros, é desejável um alto valor para (3.3).

3.2.4 Parâmetro de correlação (PC)

O parâmetro de correlação mede o grau de similaridade entre a imagem-base e a imagem filtrada, sendo útil para medir a conservação de bordas após processamento (MANSOURPOUR; RAJABI; BLAIS, 2006). Ocorre que filtros anti-*speckle* costumam apresentar uma característica passa-baixas, o que tenderia a eliminar bordas, as quais apresentam informação de “alta” frequência.

Tal figura de mérito é dada por

$$PC = \frac{G(\Delta I - \Delta \hat{I}, \Delta \hat{I} - \Delta(\bar{\hat{I}}))}{\sqrt{G(\Delta I - \Delta(\bar{I}), \Delta I - \Delta(\bar{I})) G(\Delta \hat{I} - \Delta(\bar{\hat{I}}), \Delta \hat{I} - \Delta(\bar{\hat{I}}))}}, \quad (3.4)$$

onde $\Delta(\cdot)$ denota um filtro passa-altas Laplaciano, $\bar{(\cdot)}$ denota o filtro Média e G é um operador.

No presente estudo, o *kernel* adotado para o filtro passa-altas Laplaciano (3x3) é dado por

$$\textit{kernel Laplaciano} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (3.5)$$

enquanto que, para o filtro Média, temos

$$\textit{kernel média} = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.6)$$

Finalmente, o operador gama é definido por

$$G(I_1, I_2) = \sum_{i=1}^N (I_1)_i (I_2)_i, \quad (3.7)$$

onde I_1 e I_2 são imagens genéricas, de mesmo tamanho, tomadas no i -ésimo *pixel*, sendo N o total deles.

Na comparação entre filtros, é desejável um valor próximo a 1 para (3.4).

3.2.5 Número equivalente de visadas (NEV)

O número equivalente de visadas (OLIVER; QUEGAN, 1998) da imagem é dado por

$$NEV = \frac{\langle \hat{I} \rangle^2}{\textit{var}(\hat{I})} \quad (3.8)$$

onde

$$\langle \hat{I} \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{I}_i \quad (3.9)$$

e

$$\textit{var}(\hat{I}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{I}_i - \langle \hat{I} \rangle)^2 \quad (3.10)$$

Na comparação entre filtros, é desejável um alto valor para (3.8), o que indicaria pouca influência do *speckle* na imagem. Uma valor igual a 1 significa *speckle* “puro”, isto é, sem informação de textura implicada pela influência da rugosidade na refletividade da cena imageada (LOPES; TOUZI; NEZRY, 1990; OLIVER; QUEGAN, 1998).

Capítulo 4. Banco de filtros anti-*speckle*

Os dois métodos básicos de redução de *speckle* são o processamento multivisada, na etapa do processador para geração da imagem, e a filtragem, na etapa do processador de imagens, na qual reside o banco de filtros submetido à metodologia deste trabalho. Foram estudados os filtros de Lee, de Kuan e de Frost, disponíveis no ENVI, os quais são resumidos brevemente neste capítulo.

4.1 Métodos básicos de redução do *speckle*

As técnicas de supressão ou redução de *speckle* podem ser reduzidas a duas categorias (SHI; FUNG, 1994).

A primeira, conhecida por processamento multivisada (*multilook*), consiste em obter a média de várias visadas (repetida iluminação da mesma cena) de certo conjunto de *pixels*, equivalendo à aplicação de um filtro passa-baixas associado à etapa do processador para geração de imagem. No caso do RAS do R-99, as imagens geradas podem apresentar 4, 8 ou 16 visadas. Essa técnica mostra-se suficiente para áreas razoavelmente homogêneas.

A segunda consiste em suavizar a imagem por processamento digital, tomando por base modelos estatísticos para o *speckle* e para a refletividade da cena medida, aplicados na etapa do processador de imagem. Em termos práticos para a aplicação em tela, o ENVI® representa este processador, ao disponibilizar uma série de filtros configuráveis pelo usuário.

4.2 A filtragem espacial adaptativa

O processo básico de filtragem espacial consiste em realizar a convolução da imagem original ruidosa com uma matriz numérica quadrada, conhecida como janela, máscara ou *kernel*, em movimento. O *pixel* considerado, num passo do processo de filtragem, situa-se ao centro do *kernel*, conforme ilustrado na Figura 4.1. O *pixel* de interesse está ao centro do *kernel*, em amarelo.

Computacionalmente, o processo de filtragem consiste em substituir o *ND* do *pixel* de interesse por um *ND* estimado, judiciosamente, considerando o comportamento estatístico da vizinhança ruidosa restrita ao *kernel*, operação que torna a filtragem espacial também adaptativa.

Esta nova característica permite reformular a filtragem espacial por se levar em consideração particularidades de regiões homogêneas e regiões heterogêneas numa imagem. Os filtros estudados neste trabalho promovem esse tipo de sensibilidade a características da imagem através do coeficiente de variação definido na seção 4.3.2.

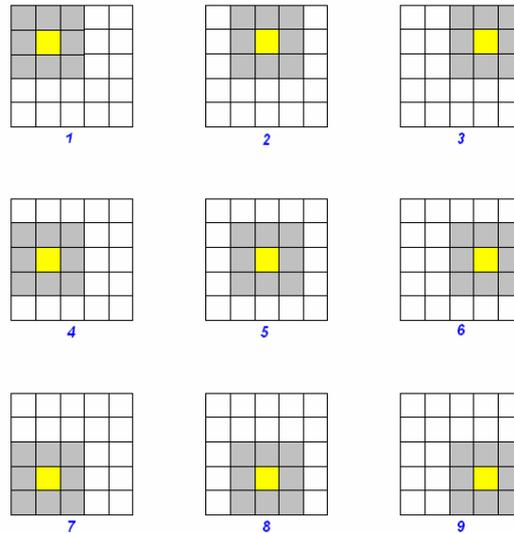


Figura 4.1. Movimento sequencial de uma janela 3x3 (*kernel*) pela imagem matricial no processo de filtragem (convolução). O *pixel* de interesse está ao centro da janela (amarelo).

4.3 Banco de filtros espaciais adaptativos comparados

Para os propósitos da metodologia deste trabalho, os filtros precisam apresentar base de comparação. Este quesito varia caso e caso, exigindo conhecimentos específicos, como que modelo é assumido para o *speckle*, que modelo é assumido para a refletividade da cena ou que parâmetros não são comuns e precisam ser ajustados, sem dar vantagem a um ou outro elemento do banco de filtros na comparação.

4.3.1 Base de comparação

A base de comparação dos filtros adaptativos (Lee, Kuan e Frost) foi estabelecida da seguinte forma:

1. Modelo de *speckle*: sempre multiplicativo (o de Lee admite aditivo ou combinação);
2. Tamanho e forma do *kernel*: 3x3, 5x5, 7x7 e 11x11;
3. Tipo de imagem: intensidade, exigido pelos três filtros em modelo multiplicativo.

Obviamente, todas as filtragens partiram da mesma imagem-base, conforme detalhado no Capítulo 5.

Os três filtros são adaptativos ao levar em consideração o mesmo parâmetro, o coeficiente de variação da imagem (LOPES; TOUZI; NEZRY, 1990), conforme (4.3). Entretanto, o filtro de Frost, conforme descrito adiante, apresenta um fator denominado K , não apresentado pelos filtros de Lee e de Kuan. A literatura recomenda adotar $K = 1$ para filtragem. Conforme descrito na metodologia, pode-se avaliar a influência dos parâmetros particulares de um filtro calculando-se figuras de mérito após o ajuste.

Outrossim, foram utilizados esses filtros já disponíveis no ENVI, respeitando-se a base de comparação.

4.3.2 O filtro de Lee

O filtro (LEE, 1980) pode utilizar um modelo multiplicativo ou um aditivo para o *speckle*. Para o modelo multiplicativo, a imagem filtrada, estimativa da imagem-base sem *speckle*, é dada por

$$\hat{I}(t) = I(t)W(t) + \bar{I}(t)(1 - W(t)), \quad (4.1)$$

onde

$$W(t) = 1 - \frac{C_s^2}{C_I^2(t)} \quad (4.2)$$

é uma função peso, e

$$C_s = \frac{\sigma_s}{\bar{s}}, \quad C_I(t) = \frac{\sigma_I(t)}{\bar{I}(t)} \quad (4.3)$$

são os coeficientes de variação do *speckle* e da imagem medida I , respectivamente.

Dessa forma, para efetuar a filtragem, elege-se um tamanho de *kernel*, no qual se estima o parâmetro $C_I(t)$ e a média simples $\bar{I}(t)$, executando-se (4.1) para obter o novo *ND* respectivo da imagem filtrada \hat{I} , conforme t percorra os *pixels* da imagem-base I .

4.3.3 O filtro de Kuan

Este filtro (KUAN et, al, 1985), assim como o anterior, usa o modelo multiplicativo. A imagem filtrada, estimativa da imagem-base sem *speckle*, também é dada por (4.1), porém a função peso é dada por

$$W(t) = \frac{1 - C_s^2 / C_I^2(t)}{1 + C_s^2}. \quad (4.4)$$

4.3.4 O filtro de Frost

Este filtro (FROST et al., 1982), assim como os anteriores, utiliza o modelo multiplicativo. Seguindo-se uma série de considerações, deduz-se a resposta a impulso do respectivo filtro bidimensional como

$$m(t, t_0) = e^{-K C_I^2(t_0) |t - t_0|}, \quad (4.5)$$

onde K é uma constante denominada de taxa de amortecimento, que caracteriza a resposta a impulso do sistema RAS, $C_I^2(t_0)$ é o coeficiente de variação de I no *kernel*, t_0 indica o *pixel* filtrado e $|t - t_0|$ indica a distância de t_0 até o limite do *kernel*, ponderando a influência dos *pixels* vizinhos.

Dessa forma, para efetuar a filtragem, aplica-se a convolução bidimensional

$$\hat{I}(t_0) = I(t) ** m(t, t_0) \quad (4.6)$$

para obter o novo *ND* respectivo a \hat{I} , conforme t_0 percorra os *pixels* de I .

Capítulo 5. Análise comparativa do banco de filtros

Uma imagem-base, oriunda do R-99 e sintetizada pelo SPSAR, foi utilizada para exemplificar a metodologia de comparação entre elementos de um banco de filtros, a fim de definir o mais indicado dentre eles para redução de *speckle*.

As figuras de mérito calculadas, tendo em conta a imagem-base e suas versões processadas pelos filtros de Lee, Frost e Kuan são apresentadas em forma de tabelas, após ajuste de seus parâmetros de acordo com propriedades do *speckle* em sinais multivisada, no item 2.3.2, com a base de comparação do item 4.3.1, e com a descrição teórica dos filtros nos itens 4.3.2, 4.3.3 e 4.3.4.

5.1 Características da imagem-base

As imagens-base são do tipo intensidade 4-visadas ($V = 4$), para todos os tipos de polarização, de modo que o coeficiente de variação dado em (2.9) vale $C_s = 1/\sqrt{4} = 0,5$.

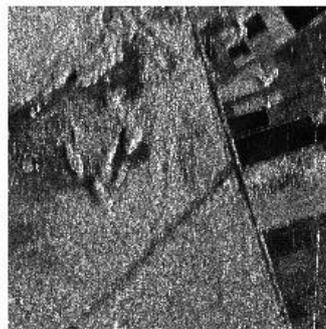
As imagens-base discutidas aqui, reunidas na Figura 5.1, são fragmentos das imagens trabalhadas em Sena (2011), onde se detalhou o planejamento de missão para coleta de imagem pela RAS do R-99 na área de Planaltina-GO.

5.2 Ajuste do banco de filtros e resultados

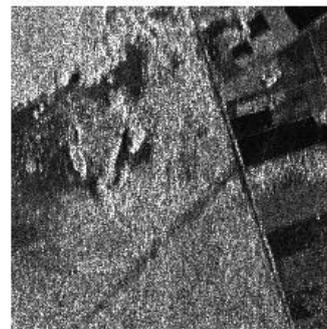
Os parâmetros de entrada para efetuar a filtragem estão relacionados na Tabela 5.1 . Os filtros de Frost e de Kuan utilizam o modelo multiplicativo internamente.

Tabela 5.1. Parâmetros de configuração para banco de filtros.

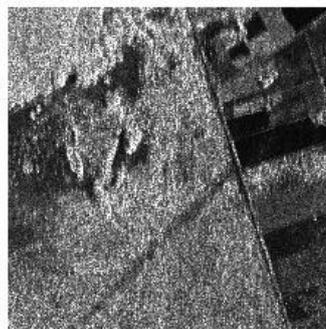
| Banco de filtros | Parâmetro de entrada | Parâmetro configurado | Observações |
|------------------|--|-----------------------|--|
| Lee | <i>Filter Size</i> (tamanho do filtro) | 3x3, 5x5, 7x7 e 11x11 | Dimensão do <i>kernel</i> |
| | <i>Noise Model</i> (modelo de <i>speckle</i>) | Multiplicativo | Admite também modelos aditivo ou combinado |
| | <i>Additive noise mean</i> (média do ruído aditivo) | NIL | Só para os modelos aditivo e combinado |
| | <i>Multiplicative noise mean</i> (média do ruído multiplicativo) | 1 | Servem para definir o coeficiente de variação $C_S = 0.5$ em conjunto, não importam valores individuais. |
| | <i>Noise Variance</i> (variância do ruído) | 0,5 | |
| Frost | <i>Filter Size</i> | 3x3, 5x5, 7x7 e 11x11 | Dimensão do <i>kernel</i> |
| | <i>Damping Factor</i> | 1 | Corresponde ao fator K. |
| Kuan | <i>Filter Size</i> | 3x3, 5x5, 7x7 e 11x11 | Dimensão do <i>kernel</i> |
| | <i>Number of Looks</i> | 4 | Corresponde ao número de visadas $V = 4$. |



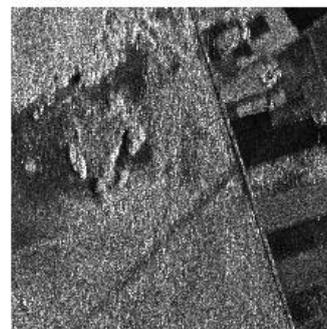
LHH



LHV



LVH



LVV

Figura 5.1. Imagens-base oriundas do R-99 para o banco de filtros comparado, com indicação do respectivo tipo de polarização na banda-L. Apesar do processamento multivisada ($V = 4$), ainda se pode observar o aspecto granuloso típico do *speckle* em todas.

Os resultados de cálculo das figuras de mérito estão resumidos na Tabela 5.2.

Tabela 5.2. Figuras de mérito calculadas para o banco de filtros analisado.

| Imagem Intensidade HH | | | | |
|-----------------------|--------|------------------|--------------|-------------|
| Fig. Mérito | Kernel | Banco de Filtros | | |
| | | <i>Lee</i> | <i>Frost</i> | <i>Kuan</i> |
| EQM | 3x3 | 73,85 | 148,13 | 41,48 |
| | 5x5 | 90,57 | 170,50 | 44,02 |
| | 7x7 | 94,36 | 188,77 | 47,79 |
| | 11x11 | 95,65 | 189,09 | 51,07 |
| RSR (dB) | 3x3 | 6,63 | 4,31 | 10,14 |
| | 5x5 | 5,61 | 3,91 | 9,63 |
| | 7x7 | 5,34 | 3,56 | 9,17 |
| | 11x11 | 5,17 | 3,54 | 8,82 |
| RSRP (dB) | 3x3 | 77,65 | 74,62 | 80,15 |
| | 5x5 | 76,76 | 74,01 | 79,89 |
| | 7x7 | 76,58 | 73,57 | 79,54 |
| | 11x11 | 76,52 | 73,56 | 79,25 |
| PC | 3x3 | 0,83 | 0,40 | 0,79 |
| | 5x5 | 0,85 | 0,39 | 0,93 |
| | 7x7 | 0,86 | 0,42 | 0,94 |
| | 11x11 | 0,87 | 0,44 | 0,94 |
| NEV | 3x3 | 39,34 | 36,69 | 40,67 |
| | 5x5 | 38,67 | 35,51 | 40,86 |
| | 7x7 | 38,49 | 33,55 | 40,79 |
| | 11x11 | 38,49 | 32,29 | 40,80 |

| Imagem Intensidade HV | | | | |
|-----------------------|--------|------------------|--------------|-------------|
| Fig. Mérito | Kernel | Banco de Filtros | | |
| | | <i>Lee</i> | <i>Frost</i> | <i>Kuan</i> |
| EQM | 3x3 | 78,05 | 156,09 | 43,75 |
| | 5x5 | 95,49 | 191,98 | 45,13 |
| | 7x7 | 99,62 | 200,70 | 48,75 |
| | 11x11 | 101,53 | 202,87 | 51,97 |
| RSR (dB) | 3x3 | 6,49 | 4,35 | 9,80 |
| | 5x5 | 5,57 | 3,76 | 9,30 |
| | 7x7 | 5,31 | 3,61 | 8,86 |
| | 11x11 | 5,13 | 3,58 | 8,51 |
| RSRP (dB) | 3x3 | 77,41 | 74,40 | 79,92 |
| | 5x5 | 76,53 | 73,50 | 79,78 |
| | 7x7 | 76,35 | 73,30 | 79,45 |
| | 11x11 | 76,26 | 73,26 | 79,17 |
| PC | 3x3 | 0,83 | 0,39 | 0,78 |
| | 5x5 | 0,84 | 0,36 | 0,93 |
| | 7x7 | 0,86 | 0,41 | 0,94 |
| | 11x11 | 0,87 | 0,43 | 0,94 |
| NEV | 3x3 | 44,05 | 41,37 | 45,53 |
| | 5x5 | 43,20 | 39,11 | 45,70 |
| | 7x7 | 42,90 | 37,99 | 45,55 |
| | 11x11 | 42,64 | 36,67 | 45,47 |

| Imagem Intensidade VH | | | | |
|-----------------------|--------|------------------|--------------|-------------|
| Fig. Mérito | Kernel | Banco de Filtros | | |
| | | <i>Lee</i> | <i>Frost</i> | <i>Kuan</i> |
| EQM | 3x3 | 83,17 | 166,33 | 46,52 |
| | 5x5 | 101,70 | 204,50 | 48,06 |
| | 7x7 | 106,10 | 213,81 | 51,92 |
| | 11x11 | 108,16 | 216,15 | 55,35 |
| RSR (dB) | 3x3 | 6,30 | 4,27 | 9,50 |
| | 5x5 | 5,40 | 3,70 | 8,96 |
| | 7x7 | 5,15 | 3,56 | 8,51 |
| | 11x11 | 4,97 | 3,53 | 8,15 |
| RSRP (dB) | 3x3 | 77,13 | 74,12 | 79,65 |
| | 5x5 | 76,26 | 73,22 | 79,51 |
| | 7x7 | 76,07 | 73,03 | 79,18 |
| | 11x11 | 75,99 | 72,98 | 78,90 |
| PC | 3x3 | 0,83 | 0,39 | 0,78 |
| | 5x5 | 0,85 | 0,37 | 0,93 |
| | 7x7 | 0,86 | 0,41 | 0,93 |
| | 11x11 | 0,87 | 0,43 | 0,94 |
| NEV | 3x3 | 49,46 | 46,37 | 51,15 |
| | 5x5 | 48,47 | 43,83 | 51,31 |
| | 7x7 | 48,10 | 42,56 | 51,13 |
| | 11x11 | 47,80 | 41,02 | 51,04 |

| Imagem Intensidade VV | | | | |
|-----------------------|--------|------------------|--------------|-------------|
| Fig. Mérito | Kernel | Banco de Filtros | | |
| | | <i>Lee</i> | <i>Frost</i> | <i>Kuan</i> |
| EQM | 3x3 | 69,8 | 86,46 | 83,99 |
| | 5x5 | 84,80 | 91,25 | 98,90 |
| | 7x7 | 88,25 | 84,12 | 106,25 |
| | 11x11 | 90,05 | 71,29 | 45,14 |
| RSR (dB) | 3x3 | 7,03 | 6,30 | 6,27 |
| | 5x5 | 6,04 | 6,12 | 5,42 |
| | 7x7 | 5,78 | 6,43 | 5,03 |
| | 11x11 | 5,61 | 7,10 | 9,76 |
| RSRP (dB) | 3x3 | 77,89 | 76,96 | 77,09 |
| | 5x5 | 77,05 | 76,73 | 76,38 |
| | 7x7 | 76,87 | 77,08 | 76,07 |
| | 11x11 | 76,78 | 77,80 | 79,78 |
| PC | 3x3 | 0,83 | 0,63 | 0,71 |
| | 5x5 | 0,85 | 0,68 | 0,83 |
| | 7x7 | 0,86 | 0,72 | 0,84 |
| | 11x11 | 0,87 | 0,76 | 0,95 |
| NEV | 3x3 | 35,69 | 33,78 | 35,63 |
| | 5x5 | 35,18 | 34,14 | 34,92 |
| | 7x7 | 35,06 | 34,14 | 34,60 |
| | 11x11 | 34,96 | 33,84 | 36,75 |

É preciso decidir, levando-se em conta o tipo de polarização da imagem-base, a conservação de bordas e o tamanho do *kernel*, qual filtro melhor atende às expectativas.

O NEV indica uma influência menor do *speckle* para filtragem de imagens-base LVH, donde se restringe a presente análise a somente este tipo de polarização. Discutir-se-á agora a análise comparativa com as figuras de mérito restantes.

A RSRP não se mostrou uma figura de mérito definidora. O baixo PC apresentado ($\sim 0,4$) apresentado para o filtro de Frost o elimina, contudo não é capaz de bem diferenciar os filtros de Lee e de Kuan.

Como o filtro de Kuan apresenta, simultaneamente, o menor EQM e maior RSR, é ele o escolhido.

Finalmente, quanto ao tamanho do *kernel*, é preciso reutilizar figuras de mérito. Com efeito, o *kernel* 11x11 não apresenta grande diferença nas figuras de mérito, de modo geral. A análise passa agora aos *kernels* 3x3, 5x5 ou 7x7.

Elimina-se o *kernel* 3x3, pois apresenta o menor PC = 0,78. Por fim, as figuras de mérito não se diferenciam muito bem para os *kernels* 5x5 e 7x7. No entanto, a que melhor se diferencia é o EQM, dando 48,6 para 5x5 contra 51,92 para 7x7. O menor EQM indica *kernel* 5x5.

Finalmente, o resultado da análise indica: filtro de Kuan 5x5 na imagem-base LVH para boa redução de *speckle* e boa conservação de bordas.

Caso se desejasse trabalhar com as quatro polarizações, começar-se-ia por adotar o filtro com o maior NEV e PC mais próximo a 1, prosseguindo-se a análise para as outras figuras de mérito, caso necessário, a fim de reforçar a confiança na análise.

5.3 Crítica dos resultados

Embora o *kernel* 5x5 seja indicado, o *kernel* 7x7 consumirá menor tempo de processamento; caso isto seja crítico, seriam necessários métodos complementares, como desempenho de classificadores, a fim de decidir a melhor opção com mais segurança.

Ademais, o uso do filtro deve estar inserido no contexto de uma aplicação da imagem RAS, para verificar como o *speckle* a afeta. Dessa forma, essa mesma aplicação pode demandar valores mais exigentes para as figuras de mérito.

REFERÊNCIAS

- SENA, E. F. **Classificação de imagens do radar de abertura sintética do SIPAM com síntese genética de redes neurais artificiais**, Dissertação de Mestrado. Brasília. UnB – Instituto de Geociências. 126p, 2011.
- VEIGA, R. Q. **Processador SAR com compensação de movimento para o SAR-SIVAM**, Dissertação de Mestrado. São José dos Campos. ITA. 180p, 2004.
- OLIVER, C. & QUEGAN, S. **Understanding Synthetic Aperture Images**, Artech House, 1998.
- FERNANDES, D. & FERNANDES, M. T. C. **Imagens de Radar de Abertura Sintética como instrumento de auxílio na avaliação do impacto ambiental**, In: Anais IX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Santos, Brasil, 11-18 Setembro, INPE, p. 733-744, 1998.
- GOODMAN, J. W. **Some fundamental properties of speckle**, *J. Opt. Soc. Am.*, Vol. 66, No. 11, Novembro, 1976.
- MANSOURPOUR, M.; RAJABI, M.A; e BLAIS, J.A.R. **Effects and performance of speckle noise reduction filters on active radar and SAR images**, 2006.
- SHI, Z. & FUNG, K. B. **A comparison of digital speckle filters**, In: *Proceedings of IGRASS 94*, 8-12 Agosto, 1994.
- LOPES, A.; TOUZI, R.; NEZRY, E. **Adaptive speckle filters and scene heterogeneity**, *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 28, No. 6, p. 992-1000, Novembro 1990.
- LEE, J. **Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics**, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. PAM1-2, No. 2, Março, 1980.
- FROST, V.S.; STILES, J.A.; SHANMUGAN, K.S.; HOLTZMAN, J.C. **A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise**, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 4, No. 2, pp. 157-166, Março, 1982.
- KUAN, D.T.; SAWCHUK, A.A.; STRAND, T.C.; CHAVEL, P. **Adaptive noise smoothing filter for images with signal-dependent noise**, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. PAMI(7), No. 2, Março 1985.

Apêndice A – Rotina principal em MATLAB

```
function [HH HV VH VV]=figurasMerito

%inicializar especificação de filtros, máscaras e polarizações utilizados
    BANCOFILTROS = {'Lee' 'Frost' 'Kuan'};
    TAMANHOMASCARA = {'3x3' '5x5' '7x7' '11x11'};
    TIPOPOLARIZACAO = {'LHH' 'LHV' 'LVH' 'LVV'};

%ENTRADA: imagens intensidade tif banda L do R-99
%A partir daqui, ocorre seleção, uma a uma, das imagens original com
%speckle(imagem-base) e imagem processa (filtrada), seguida do cálculo das
%figuras de mérito definidas no capítulo 4.

%especificar polarização da imagem
L=length(TIPOPOLARIZACAO);
for k=1:L

    POLARIZACAO=char(TIPOPOLARIZACAO(k));%polarização definida! "char" transforma variável
"struct" em variável "string"

    %ler imagem base (tif 16 bits)
    CAMINHO_IMGORG=strcat('C:\BaseDados\Imagem Original (speckle)\ImagemBase', POLARIZACAO);
    IMGORG=imread(CAMINHO_IMGORG,'tif');%lida a imagem original com speckle

    %ler imagem processada (por definição, trabalhei com tif 16 bits) seguindo o banco de filtros

    %especificar tipo de filtro (Lee, Frost e Kuan)
    M=length(BANCOFILTROS);
    for j=1:M

        FILTRO=char(BANCOFILTROS(j)); %filtro definido!

        %especificar máscara (3x3,5x5,7x7 e 11x11)
        N=length(TAMANHOMASCARA);
        for i=1:N

            MASCARA=char(TAMANHOMASCARA(i)); %máscara definida!

            %carregar imagem (ex. nome: ImagemBaseLHV_Lee7x7.tif)
            CAMINHO_IMGPROC='C:\BaseDados\Imagem Processada (filtrada)\'; %inicializa caminho
para o diretório da imagem processada
            CAMINHO_IMGPROC = strcat(
CAMINHO_IMGPROC,FILTRO,'\',strcat('ImagemBase',POLARIZACAO,'_',FILTRO,MASCARA) );
            IMGPROC=imread(CAMINHO_IMGPROC,'tif');%lida a imagem processada

            %calcular, armazenando, figuras de mérito para filtro e máscara selecionados
            EQM(i,j) = erroQuadraticoMedio(IMGPROC,IMGORG);
            RSR(i,j) = relacaoSinalRuido(IMGPROC,IMGORG);
            RSRP(i,j) = relacaoSinalRuidoDePico(IMGPROC,IMGORG,16);
            PC(i,j) = parametroDeCorrelacao(IMGPROC,IMGORG);
            NEV(i,j) = numeroEquivalenteDeVisadas(IMGPROC);
            FIGSMERITO = [EQM; RSR; RSRP; PC; NEV];
            switch(k)
                case 1, HH = FIGSMERITO;
                case 2, HV = FIGSMERITO;
                case 3, VH = FIGSMERITO;
                case 4, VV = FIGSMERITO;
                %formatar saída na tela
                disp(['Polarização: ' POLARIZACAO(2:3)]);
                format short
                FIGSMERITO
            end
        end
    end
end

end

%sair
end
```

Apêndice B – Cálculo das figuras de mérito em MATLAB

```
function EQM = erroQuadraticoMedio(IMGPROC,IMGORG)
    AUX = IMGPROC-IMGORG;
    NUM = sum(sum( AUX ));
    DEN = length(AUX)^2;
    EQM = NUM/DEN;
end
%-----
function RSR = relacaoSinalRuido(IMGPROC,IMGORG)
    NUM = sum( sum(IMGORG.^2) );
    DEN = sum( sum( (IMGPROC-IMGORG).^2 ) );
    RSR=10*log10(NUM/DEN);
end
%-----
function RSRP = relacaoSinalRuidoDePico(IMGPROC,IMGORG,BITSPorPIXEL)
    NUM = 2^BITSPorPIXEL;
    DEN = sqrt( erroQuadraticoMedio(IMGPROC,IMGORG) );
    RSRP = 20*log10(NUM/DEN);
end
%-----
function PC = parametroDeCorrelacao(IMGPROC,IMGORG)
    %aplicar filtro laplaciano
    ALPHA = 0;
    filt_lplcyn=-fspecial('laplacian',ALPHA);%cria filtro laplaciano
    LP_IMGORG = imfilter(IMGORG,filt_lplcyn);%filtra a img. original
    LP_IMGPROC = imfilter(IMGPROC,filt_lplcyn);%filtra a imagem processada

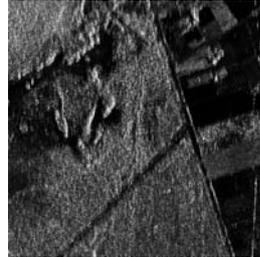
    %calcular Parâmetro de Correlacao PC
    TAMJANELA=3;
    filt_media = fspecial('average',TAMJANELA);%cria filtro média
    MEDIA_LP_IMGORG = imfilter(LP_IMGORG,filt_media);%filtra a img.
    MEDIA_LP_IMGPROC = imfilter(LP_IMGPROC,filt_media);%filtra a img.

    NUM = gama( LP_IMGORG-LP_IMGPROC , LP_IMGPROC-MEDIA_LP_IMGPROC );
    DEN = sqrt( gama( LP_IMGORG-MEDIA_LP_IMGORG , LP_IMGORG-MEDIA_LP_IMGORG )*...
    gama( LP_IMGORG-LP_IMGPROC , LP_IMGORG-LP_IMGPROC ) );
    PC = NUM/DEN;

    %sair
end
%-----
function NEV = numeroEquivalentedeVisadas(IMG)
    MEDIA = mean2(IMG);%mean2 calcula média global
    VARIANCIA = var(IMG(:)); %var calcula variância
    NEV = MEDIA^2/VARIANCIA;
end
%-----
function valor_G = G(s1,s2)
    valor_G=sum(sum(s1.*s2));
end
```

Apêndice C – Imagens filtradas

IMAGEM-BASE FILTRADA: LHH

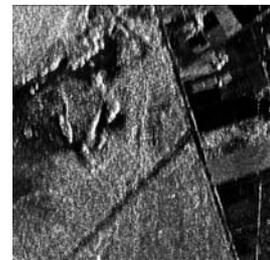
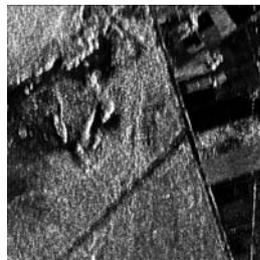
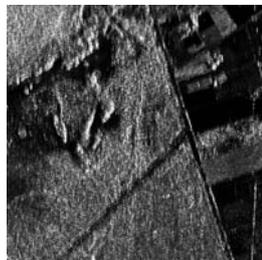


Lee

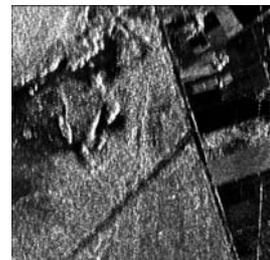
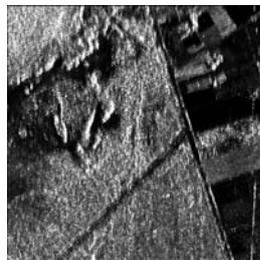
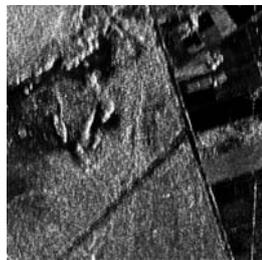
Frost

Kuan

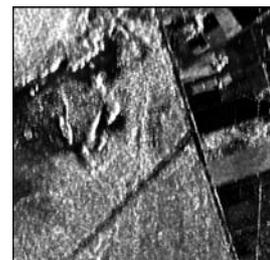
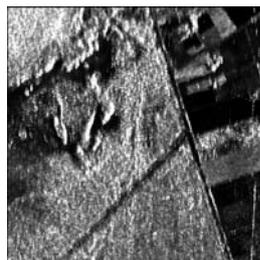
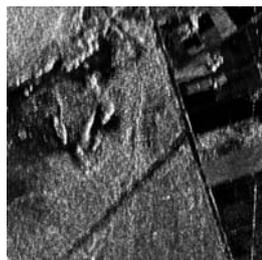
3x3



5x5



7x7



11x11

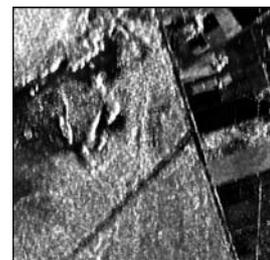
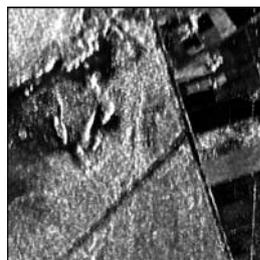
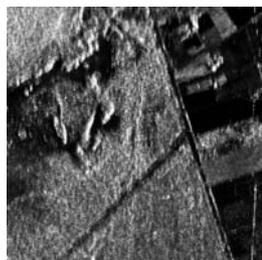
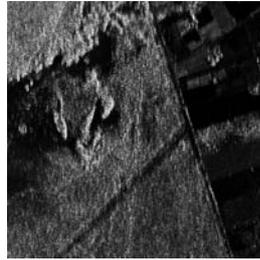


IMAGEM-BASE FILTRADA: LHV

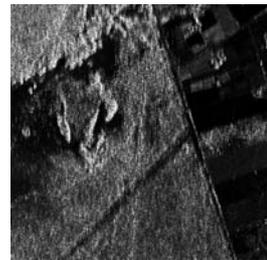
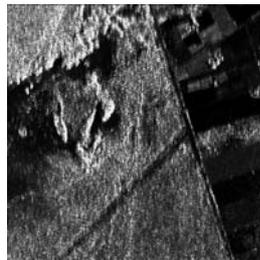
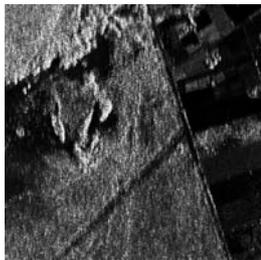


Lee

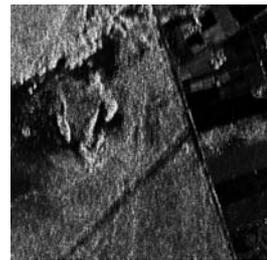
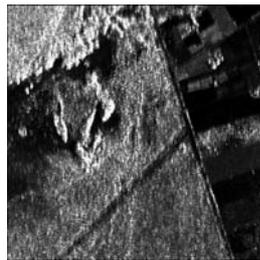
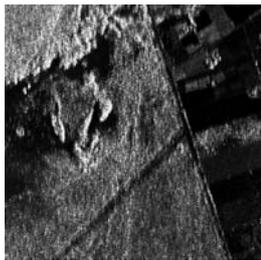
Frost

Kuan

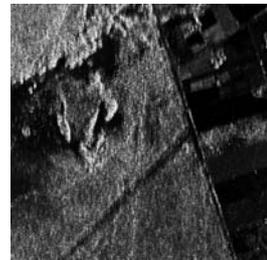
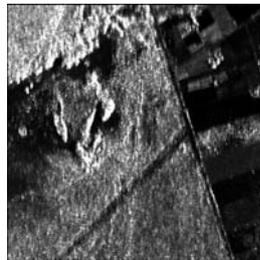
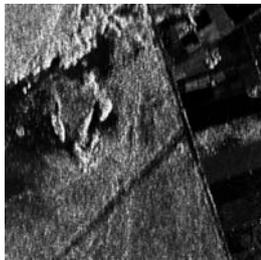
3x3



5x5



7x7



11x11

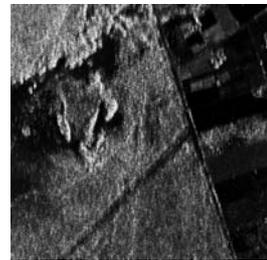
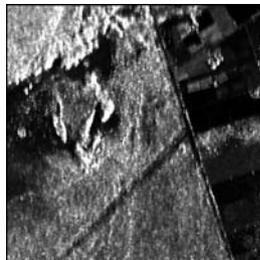
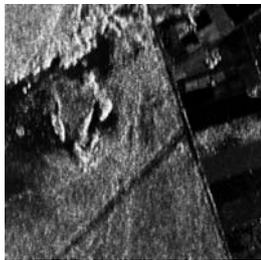
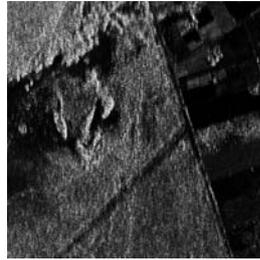


IMAGEM-BASE FILTRADA: LVH

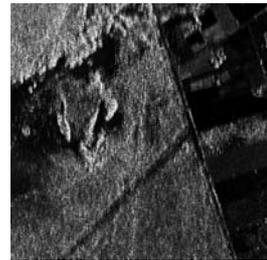
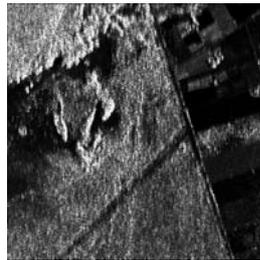
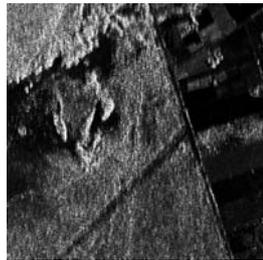


Lee

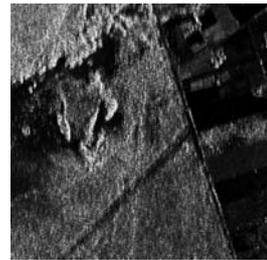
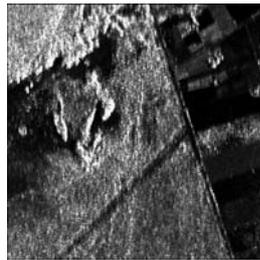
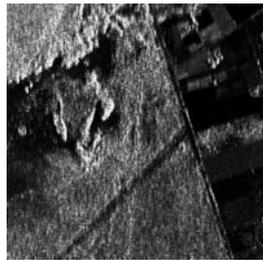
Frost

Kuan

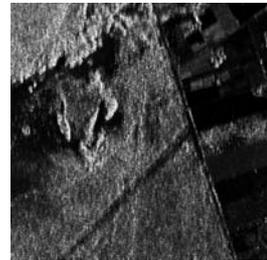
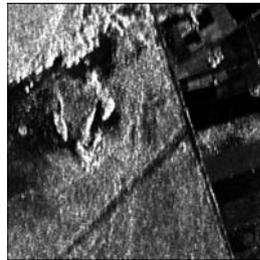
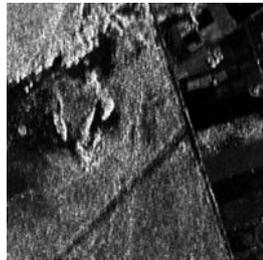
3x3



5x5



7x7



11x11

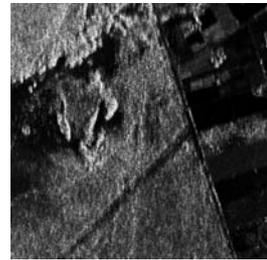
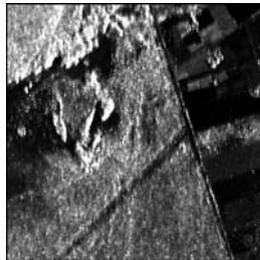
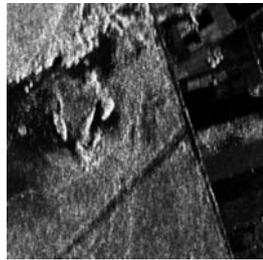
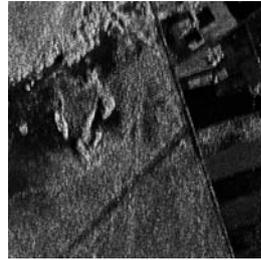


IMAGEM-BASE FILTRADA: LVV

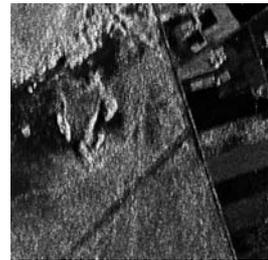
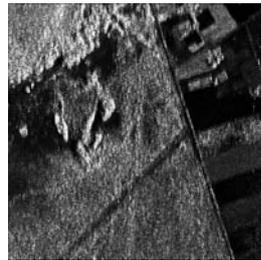
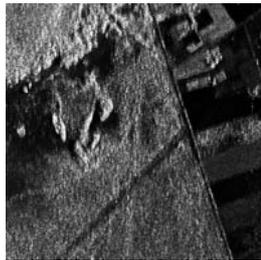


Lee

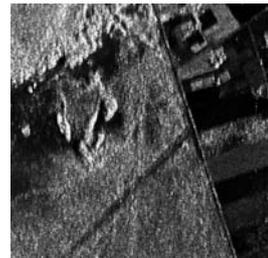
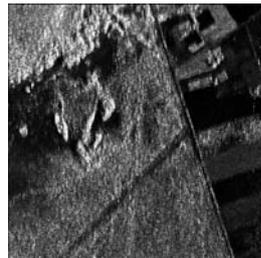
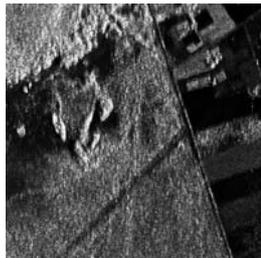
Frost

Kuan

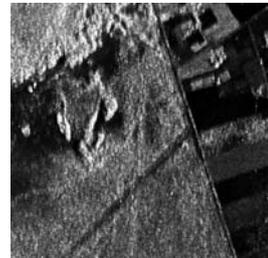
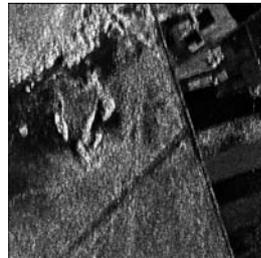
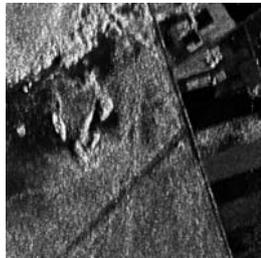
3x3



5x5



7x7



11x11

