

ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO DE FILTROS REDUTORES DE “SPECKLE” EM IMAGENS SAR

S.J.S. Sant’Anna, D. Fernandes, J.C. da S. Lacava

Instituto Tecnológico de Aeronáutica
Divisão de Engenharia Eletrônica
Praça Mal.Eduardo Gomes, 50 – 12228-900
São José dos Campos – SP
Tel: +55-12-347-6807 Fax: +55-12-347-5878
e-mail: {sidnei,david,lacava}@ele.ita.br

SUMÁRIO

O desenvolvimento de novos filtros redutores de *speckle* para processamento de imagens de radar de abertura sintética tem recebido bastante atenção por parte da comunidade científica. É comum projetar filtros de *speckle* visando a suavização do ruído enquanto se tenta preservar outras características na imagem, tais como bordas, alvos pontuais, etc. Contudo, o efeito dos filtros provocado nas imagens deve ser levado em consideração. Portanto, neste trabalho são propostos três medidas para se avaliar os resultados de dezesseis filtros de *speckle* sobre uma imagem SAR. Utilizando-se o número equivalente de *looks* para avaliar a relação sinal ruído, o filtro do coeficiente de variação apresentou o melhor desempenho. Na análise da perda de resolução, usou-se a detecção de bordas, não havendo nenhum filtro que pudesse ser considerado o melhor. E, por fim, no estudo da preservação textural, através da estimativa da dimensão fractal, pôde-se concluir que os melhores filtros foram o Textura Weibull e o de Lee.

1. INTRODUÇÃO

No mapeamento da superfície terrestre tem-se feito uso cada vez mais crescente de sistema sensores imageadores ativos que operam na faixa de microondas, principalmente o Radar de Abertura Sintética (SAR – *Synthetic Aperture Radar*). Com o aumento do uso deste tipo de sensor, muito se tem empenhado no desenvolvimento de novas técnicas de processamento de imagens SAR. As técnicas de filtragem espacial para imagens SAR sempre ganharam uma especial atenção, a qual pode ser observada com o número de novos filtros desenvolvidos a cada ano.

Os filtros espaciais visam minimizar (suavizar) os efeitos causados pelo ruído nas imagens. O ruído característico das imagens SAR é multiplicativo e conhecido como *speckle*. O *speckle* confere um aspecto granular às imagens SAR, sendo mais intenso onde for maior a intensidade do sinal. Este tipo de ruído é inerente aos sistemas sensores que processam coerentemente o sinal retroespalhado pelos alvos. O ruído *speckle* dificulta a interpretação visual dos dados SAR, assim como de uma segmentação/classificação automática destas imagens. Portanto, os filtros redutores de *speckle* são de grande importância prática, na extração de informações contida nos dados SAR.

Com a aplicação de um determinado filtro a uma imagem, visando a melhora da sua relação sinal ruído, outras caracterís-

ticas dessa imagem podem estar sendo degradadas. Por exemplo, a resolução espacial é afetada com o processo de filtragem. Desta forma, a análise dos resultados da aplicação de filtros sobre uma imagem deve ser feita segundo os aspectos que avaliam a degradação da qualidade global da imagem.

Pensando numa avaliação qualitativa tanto quanto quantitativa dos efeitos de alguns processos de filtragens sobre imagem SAR, analisou-se, neste trabalho, os resultados da filtragem de dezesseis filtros de ruído *speckle* propostos na literatura. Cada um deles possuindo características específicas de desenvolvimento e implementação. Estes filtros serão avaliados segundo três critérios distintos, de relação sinal ruído, de perda de resolução espacial e de preservação de textura.

O critério da relação sinal ruído é ilustrativo da quantidade de ruído eliminada pelo filtro, ou seja, teoricamente, indica a melhoria na imagem provocada pelo processo de filtragem. Já a análise da perda de resolução ilustrará a perda de definição (identificabilidade) de certas característica da imagem, resultante da aplicação do filtro. A avaliação segundo o critério da preservação textural de alvos extensos se justifica pelo fato de a textura ser um atributo muito importante no contexto do processamento de imagens SAR. Através deste atributo pode-se, por exemplo, discriminar diversos tipos de alvos, construir classificadores, etc.

Este trabalho foi elaborado em seções, com a seguinte organização: na Seção 2 são apresentados os filtros redutores de *speckle* utilizados para avaliação; os dados SAR usados são descritos na Seção 3; a Seção 4 é utilizada para descrever os critérios de avaliação bem com os resultados alcançados para cada filtro; e, finalizando, a Seção 5 contém as conclusões obtidas neste estudo.

2. FILTROS DE SPECKLE

A redução do ruído *speckle* em imagens SAR é realizada pelo processamento *multilook* ou através de filtragem espacial. No caso dos filtros, geralmente, utiliza-se uma janela móvel, quadrada e de tamanho ímpar (tipicamente 3×3 , 5×5 , etc.) que percorre toda a imagem. A filtragem se efetua pela substituição do valor do *pixel* central da janela de processamento por algum atributo estimado a partir dos valores dos *pixels* desta janela.

É comum no desenvolvimento de filtros redutores de *speckle* para imagens SAR, a adoção do modelo multiplicativo para os dados SAR. Neste modelo o valor de um *pixel* da imagem é

considerado uma variável aleatória (Y), sendo o resultado do produto de duas outras variáveis aleatórias: o ruído *speckle* (N) e o retroespalhamento da cena imageada (X). Assim, um valor observado numa imagem pode ser representado pela expressão $Y = X \cdot N$. De acordo com [1], na adoção do modelo multiplicativo para o desenvolvimento de filtros, o ruído é considerado possuir média unitária e variância σ_N^2 bem como ser não correlacionado com o sinal.

As principais características que descrevem os filtros utilizados neste estudo são apresentadas nas próximas sub-seções.

2.1 Filtros Clássicos (GRUPO I)

Os filtros aqui denominados de clássicos são aqueles que, de uma forma ou outra, podem ser considerados como referências no processo de filtragem de imagens SAR. Dentre os filtros clássicos a serem descritos, o único que não adota nenhum modelo específico para o ruído é o filtro da Média.

- Média: é o filtro mais simples e conhecido para a redução de ruído. O atributo estimado dentro da janela de filtragem (processamento) é a média aritmética dos valores dos *pixels*, que é trocada pelo valor do *pixel* central desta janela. É um filtro linear que produz um borramento indiscriminado na imagem;
- Lee: transforma o modelo multiplicativo em modelo aditivo através de uma expansão em série de Taylor em torno da média. Utiliza estatísticas locais para minimizar o erro quadrático médio através do filtro de Wiener. É um filtro adaptativo e tem como característica a preservação de bordas [2];
- Sigma de Lee: é um filtro de média aparada, uma vez que substitui o valor do *pixel* central da janela de filtragem pela média aritmética dos *pixels* que se encontram dentro do intervalo de dois desvios padrões em torno do valor do *pixel* central. Neste caso, está se levando em consideração que o ruído possui distribuição Gaussiana e é aditivo ao sinal [3];
- Frost: é um filtro convolucional linear, derivado da minimização do erro quadrático médio sobre o modelo multiplicativo. Neste filtro é incorporado a dependência estatística do sinal original através de uma função de correlação espacial exponencial entre os *pixels*. Ele é adaptativo e preserva estruturas do tipo bordas [4]; e
- MAP: é um filtro adaptativo e não linear. Consiste na troca do valor do *pixel* central da janela de processamento pela estimativa de máximo *a posteriori* (MAP) do sinal real (X) dada a observação (Y). Esta estimativa é obtida maximizando-se a função densidade de probabilidade *a posteriori* com relação a x , isto é, $\hat{x}_{MAP} = \max_x^{-1} \{f_{X|Y}(x|y)\}$. Para tanto, distribuições devem ser consideradas para as funções densidade de probabilidade *a priori* ($f_X(x)$) e *a posteriori* ($f_Y(y)$). E no caso do filtro MAP Gama-Gama a distribuição Gama é suposta para ambas funções densidade de probabilidade [5].

2.2 Filtros Robustos (GRUPO II)

O desenvolvimento dos filtros robustos é baseado na idéia de que filtrar é estimar certos parâmetros dentro de uma janela de processamento. Portanto, conhecidos o modelo de degradação

dos dados (modelo multiplicativo) e as funções densidade de probabilidade dos dados observados e do ruído, pode-se propor alguns estimadores baseado em um vetor de observações (janela de filtragem) a fim de se realizar a filtragem.

A utilização de técnicas robustas para a estimação advém do fato de que em regiões de bordas as observações podem ser consideradas como sendo contaminadas. Isto é, não são observações da mesma classe de alvo, e nestes casos os estimadores robustos possuem um desempenho melhor que outros estimadores [6].

Desta forma, foram considerados os seguintes estimadores com a propriedade de robustez: da Mediana, da Distância Inter Quartil (IQR - *Inter Quartil Range*), do Desvio Absoluto da Mediana (MAD - *Median Absolute Deviation*), dos Momentos Aparados (TMO - *Trimmed MOments*), de Máxima Verossimilhança Aparada (TML - *Trimmed Maximum Likelihood*) e o Melhor Estimador Linear Não Polarizado (BLUE - *Best Linear Unbiased Estimator*). Para maiores detalhes a respeito do desenvolvimento e implementação destes filtros robustos recomenda-se a leitura de [6] e [7].

2.3 Filtros Texturais (GRUPO III)

Os filtros deste grupo são assim denominados por substituírem o valor do *pixel* central da janela de filtragem por algum atributo que se acredite caracterizar a textura daquela região.

No filtro do Coeficiente de Variação, como o próprio nome sugere, o atributo estimado na janela de processamento é o coeficiente de variação [8]. O filtro, aqui denominado, Textura Weibull utiliza a estimação dos parâmetros de escala e forma de uma distribuição Weibull para executar a filtragem [9]. Neste caso o modelo Weibull de degradação é adotado para descrever os dados SAR. Os filtros de Homogeneidade e Dissimilaridade são baseados nas estimativas destas duas quantidades a partir da matriz de co-ocorrência de níveis de cinza, proposta em [10]. Estas medidas são apenas duas dentre as muitas derivadas da matriz de co-ocorrência, utilizadas na caracterização/descrição de texturas em imagens digitais. O parâmetro de ordem da distribuição K é usado como um descritor de textura (vide, por exemplo, [8]). Em [11] é proposta uma medida, denominada *Normalised Log Texture*, como uma aproximação da estimativa do parâmetro de ordem da distribuição K. Esta medida é definida por $U_Y = \ln(\bar{Y}) - \overline{\ln(Y)}$, onde \bar{Y} significa a média amostral da variável W . Assim neste filtro, o valor estimado de U_Y que substituirá o valor do *pixel* central da janela de processamento.

3. IMAGEM SAR

Em missão conjunta entre o Exército Brasileiro e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), realizada em setembro de 2000 na região da Floresta Nacional de Tapajós em Santarém, Pará, foram adquiridas imagens SAR nas bandas X e P. O sensor polarimétrico aerotransportado AeS1 da *Aerosensing Radarsysteme GmbH* foi utilizado na obtenção das imagens. A imagem usada na avaliação dos filtros foi obtida na banda P (frequência de 415MHz, ou seja, 72cm de comprimento de onda, aproximadamente) e na polarização HH. Esta imagem foi processada em amplitude (detecção linear) e uma visada, possuindo espaçamento entre *pixels* de 1,5m em distância e 0,67m em azimute.

Na imagem em questão, observou-se a existência de três classes de uso do solo dominantes. Estas classes são Floresta Primária, Sucessão Secundária Antiga (Regeneração) e uma chamada de Atividades Recentes, a qual inclui solo exposto, pastagem e algumas culturas agrícolas. As duas primeiras classes possuem médias tonais muito próximas, assim como texturas bem parecidas. A textura da classe Floresta aparenta ser (pelo menos visualmente) mais rugosa que a textura da classes Regeneração. Já a classe Atividades Recentes possui média tonal inferior à das outras duas classes e possui também uma textura bem menos rugosa quando comparada às outras duas texturas.

Uma imagem de tamanho 200×200 pixels, possuindo bordas degrau nas direções vertical e horizontal, foi criada para o estudo da perda de resolução. O esquema de montagem desta imagem teste é mostrado na Fig. 1, onde as regiões são amostras representativas e de tamanho 100×100 pixels de cada uma das classes.

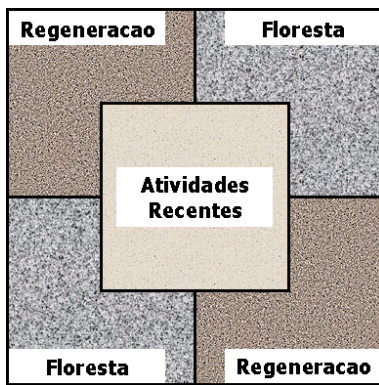


Figura 1 - Esquema de criação da imagem teste.

4. CRITÉRIOS DE ANÁLISE

No processo de filtragem empregou-se janelas de tamanho 7×7 pixels para todos os filtros. Para o filtro de Frost utilizou-se um coeficiente de correlação entre os pixels de 0,8. Os filtros robustos utilizados neste trabalho foram desenvolvidos para o caso em que os valores dos pixels a serem filtrados provêm da distribuição Rayleigh a um parâmetro. Este é o caso de imagens SAR processadas em amplitude e uma visada. Para os filtros aparados TMO, TML e BLUE utilizou-se uma proporção de deleção de 40%, ou seja, somente 31 dos 49 pixels da janela de processamento serão efetivamente usados para a estimação do parâmetro da distribuição Rayleigh.

Os critérios adotados para o estudo comparativo dos filtros são a relação sinal ruído (SNR), a perda de resolução espacial e a preservação da textura. Vale lembrar que ainda não existe um critério de avaliação único que quantifique todos os efeitos da filtragem em imagens digitais. É muito oportuno ter em mente que o “melhor” filtro depende do objetivo final desejado para a imagem filtrada. Portanto, os critérios de avaliação escolhidos servem como indicadores do comportamento dos filtros.

4.1 Relação Sinal Ruído

A relação sinal ruído é uma medida muito importante em processamento de imagens e, para imagens SAR, pode ser

estimada através do Número Equivalente de Looks (NEL). O NEL é definido por:

$$NEL = \left(\frac{4 - \pi}{\pi} \right) \left(\frac{1}{\hat{C}_V} \right)^2 \quad (1)$$

onde \hat{C}_V é o coeficiente de variação amostral estimado. Vale ressaltar que a SNR é diretamente proporcional ao NEL, ou seja, quanto maior o NEL maior também será a SNR. Afim de se determinar qual o filtro que possui a melhor SNR, calculou-se o NEL antes e após cada filtragem e verificou-se o maior valor.

De cada uma das três classes da imagem SAR foram extraídas 150 amostras, de 1000 pixels cada, para a estimação do NEL. O NEL médio, baseado nestas 150 amostras, e seu respectivo desvio padrão, são apresentados na Tabela 1, na qual estão realçadas as 5 maiores estimativas de NEL para cada classe.

Tabela 1: NEL médio e desvio padrão amostrais para cada classe.

Classes	Ativ.Recentes		Regeneração		Floresta	
	NEL	σ_{NEL}	NEL	σ_{NEL}	NEL	σ_{NEL}
Original	0,644	0,154	0,870	0,067	0,810	0,072
Média	3,278	1,666	9,711	2,906	6,832	2,103
Lee	1,232	0,391	1,938	0,217	1,718	0,221
Frost	1,301	0,626	3,418	0,723	2,936	0,662
Sigma	4,214	2,011	10,944	3,179	7,552	2,308
Gama	4,209	2,015	10,943	3,179	7,552	2,308
Mediana	4,246	1,742	7,468	2,301	6,400	1,911
IQR	2,001	1,025	5,123	1,189	4,187	1,087
MAD	2,362	1,459	4,841	1,002	3,906	0,868
TMO	4,539	1,998	10,509	3,104	7,437	2,119
TML	4,321	1,971	10,542	3,168	7,452	2,131
BLUE	2,828	1,465	8,438	2,462	6,240	1,787
CoefVar	12,373	4,942	18,018	5,252	17,338	3,802
TexWeib	2,239	0,807	4,973	1,084	4,258	0,845
HomCooc	7,009	2,505	4,969	1,262	4,025	1,009
DissCooc	3,654	1,712	8,525	2,713	6,387	1,968
NormLog	3,069	1,423	5,357	1,270	5,171	1,069

Da Tabela 1 pode-se observar que para o critério de avaliação da SNR não há nenhum grupo de filtros que tenha performance superior a outro. Isto é, os maiores valores de NEL estão distribuídos quase que igualmente pelos 3 grupos de filtros.

Para se verificar a diferença entre dois valores de NEL médio foi efetuado o teste Z unilateral. Este teste foi realizado ao nível de significância de 95% (isto é, se $|Z| > 1,65$ rejeita-se a hipótese de igualdade entre as médias) e para cada classe individualmente.

Observando-se os valores da Tabela 1 pode-se afirmar que o pior filtro do grupo I é o de Lee, enquanto que os melhores filtros são o Gama-Gama e Sigma, já que estes filtros, baseados no teste Z, podem ser considerados como tendo resultados iguais. No grupo II os filtros IQR e MAD são considerados os piores e os filtros robustos TMO e TML possuem os melhores desempenhos, tendo desempenhos bem semelhantes. Já no grupo III os piores filtros são Textura Weibull e HomCooc, enquanto que o melhor é o CoefVar.

Analisando-se apenas a performance dos filtros segundo o critério da relação sinal ruído pode-se afirmar que o pior filtro seria considerado o de Lee (o qual obteve uma melhora em torno de 100% nesta relação) e o melhor o CoefVar (com uma melhoria da relação sinal ruído em torno de 1900%). Estes filtros

possuem NEL médio estatisticamente diferentes para as 3 classes, de acordo com o teste Z.

4.2 Perda de Resolução

A perda de resolução numa imagem pode ser analisada através da detecção de bordas. O efeito da filtragem sobre uma borda de grau é o seu borramento (suavização) e consequentemente quanto maior for o borramento sofrido pela borda pior será sua detecção. Desta forma, considerar-se-á o filtro que cause a menor perda de resolução aquele para o qual sua imagem filtrada forneça a melhor detecção de bordas. O detector paramétrico descrito em [12] foi utilizado no processo de detecção das bordas na imagem teste. Para se quantificar a preservação das bordas na imagem após a filtragem, calculou-se as percentagens dos *pixels* corretamente (P_C) e erroneamente (P_E) detectados como bordas, bem como daqueles *pixels* de borda que deixaram de ser detectados (P_N). Para se determinar o desempenho dos filtros, segundo este critério, computou-se a distância Euclidiana (d_{l2}) em \mathfrak{R}^3 que é definida, com relação ao ponto $P \equiv (1,0,0)$, por:

$$d_{l2} = \sqrt{(P_C - 1)^2 + P_E^2 + P_N^2} \quad (2)$$

A imagem teste foi usada no estudo da detecção de bordas, mesmo sabendo-se do baixo contraste entre as 3 classes, o qual dificulta sobremaneira o processo de detecção das bordas. Tendo em mente este fato avaliou-se a perda de resolução, provocada pela filtragem, sob estas condições adversas de detectabilidade de uma borda.

Tabela 2: Percentagens dos *pixels* corretamente e erroneamente detectados e dos *pixels* de borda que não foram detectados e a distância Euclidiana.

Medidas	P_C	P_E	P_N	d_{l2}
Original	3,20	95,23	1,57	1,36
Média	8,89	78,79	12,32	1,21
Lee	5,80	76,64	17,56	1,23
Frost	3,61	83,94	12,45	1,28
Sigma	4,63	84,67	10,70	1,28
Gama	8,64	79,46	11,90	1,22
Mediana	7,22	87,94	4,84	1,28
Iqr	3,59	92,59	3,83	1,34
Mad	3,26	94,05	2,69	1,35
Tmo	11,20	75,96	12,84	1,18
Tml	10,70	70,25	19,05	1,15
Blue	8,84	68,71	22,45	1,16
CoefVar	8,62	70,06	21,32	1,17
TexWeib	7,43	85,24	7,33	1,26
HomCooc	5,18	85,38	9,44	1,28
DissCooc	4,75	87,99	7,26	1,30
NormLog	3,67	82,26	14,07	1,27

Os valores encontrados para P_C , P_E , P_N e d_{l2} são apresentados na Tabela 2, na qual também se encontram realçados os 3 melhores (cinza escuro) e os 3 piores resultados (cinza claro). A imagem teste, o mapa de bordas ideal, bem como os resultados das filtragens destes 6 filtros citados e seus correspondentes mapas de bordas são mostrados na Fig. 2. A pequena diferença tonal e textural entre as classes Floresta e Regeneração fica evidenciada

na Fig. 2 pela não visualização das bordas (limites) entre estas duas classes. O mesmo não ocorre com relação aos limites da classe Atividades Recentes.

Da Tabela 2 e da Fig. 2 verifica-se que a imagem ruidosa (original) apresenta o pior resultado de segmentação. Este fato mostra a dificuldade de uma segmentação automática devido ao efeito do ruído *speckle*.

Para a imagem de teste pode-se notar que o efeito do borramento das bordas, causado pelos filtros, foi menos significativo na detecção que o próprio ruído. Isto se deve ao fato de que a percentagem de *pixels* de borda erroneamente detectados (bordas espúrias) sempre ter sido superior à percentagem de *pixels* de borda que não foram detectados. O exposto acima pode ser observado na Fig. 2, onde os melhores filtros possuem menor número de bordas espúrias.

Considerando-se o baixo contraste entre as classes que compõem a imagem teste e o valor de d_{l2} , pode-se afirmar que os filtros, independente de grupo, melhoraram a detecção das bordas e possuem desempenho bem semelhantes. De acordo com os resultados obtidos para a detecção de bordas com a imagem teste não se pode afirmar que haja um destes filtros que seja melhor que os outros.

4.3 Preservação Textural

Na avaliação dos filtros quanto a preservação da textura de alvos extensos, utilizou-se a estimativa da dimensão fractal (DF) de algumas regiões. A DF, segundo alguns autores, é um bom descritor da rugosidade de um alvo, logo de sua textura. Uma imagem possui dimensão topológica igual a 2, enquanto sua dimensão fractal pode variar de 2 (inclusive), para regiões sem textura até 3 (exclusive), para regiões com textura mais rugosas (grosseira). Assim, o filtro que gerar uma imagem que possuir sua DF mais próxima da DF da imagem original (não filtrada) será considerado como aquele que preservou melhor a textura.

A estimação da DF foi baseada no método chamado de *Differential Box Counting* (DBC) proposto em [13]. Para tanto, foram usadas 60 amostras de tamanho 50×50 *pixels* de cada classe, sendo que o valor médio da DF para cada classe e seu respectivo desvio padrão são apresentados na Tabela 3. Nesta tabela as DF estimadas dos 5 filtros que alteraram menos a textura original (ou seja os melhores segundo este critério) de cada classe são realçadas em tom cinza escuro.

Pode-se notar que o processo de filtragem afeta a textura original, uma vez que os valores de DF estimado nas imagens filtradas são sempre inferiores ao DF estimado na imagem não filtrada. O filtro que mais afeta as texturas das 3 classes é o DissCooc (o pior), e os que menos afetam são o de Lee e o Textura Weibul (os melhores).

Analisando-se a Tabela 3, nota-se que os grupos de filtros I e III possuem os melhores desempenhos com relação à preservação textural das classes. Os filtros Sigma e Gama-Gama possuem o mesmo desempenho neste critério de avaliação, sendo muito parecido com o obtido com o filtro da Média.

Através do teste Z unilateral, à 95% de nível de confiança, verificou-se que as DF estimadas após o processamento dos

filtros IQR e de Frost não são significativamente diferentes. E também, baseado no teste Z, observou-se que as DF estimadas dos 5 melhores filtros podem ser consideradas iguais.

Tabela 3: Estimativas da dimensão fractal média e seus correspondentes desvios padrões.

Classes	Ativ.Recentes		Regeneração		Floresta	
	DF	σ_{DF}	DF	σ_{DF}	DF	σ_{DF}
Original	2,583	0,090	2,706	0,053	2,671	0,063
Média	2,381	0,042	2,403	0,030	2,414	0,028
Lee	2,541	0,081	2,661	0,045	2,638	0,061
Frost	2,433	0,087	2,559	0,040	2,528	0,056
Sigma	2,371	0,041	2,396	0,025	2,402	0,025
Gama	2,371	0,041	2,396	0,025	2,402	0,025
Mediana	2,371	0,040	2,467	0,028	2,455	0,025
IQR	2,482	0,058	2,512	0,035	2,506	0,040
MAD	2,448	0,065	2,476	0,040	2,494	0,040
TMO	2,370	0,039	2,403	0,029	2,411	0,023
TML	2,362	0,037	2,393	0,032	2,407	0,025
BLUE	2,384	0,042	2,424	0,033	2,429	0,031
CoefVar	2,425	0,030	2,409	0,022	2,412	0,019
TexWeib	2,541	0,054	2,568	0,044	2,557	0,046
HomCooc	2,498	0,032	2,566	0,025	2,562	0,024
DissCooc	2,301	0,056	2,389	0,023	2,402	0,025
NormLog	2,505	0,047	2,538	0,029	2,541	0,029

Dada a alta semelhança entre as texturas das classes Floresta e Regeneração calculou-se a estatística Z entre as DF estimadas para estas classes na imagem original. E através desta estatística verificou-se que estas duas classes não podem ser consideradas diferentes a um nível de 95% de confiança. Desta forma, com a medida da dimensão fractal estimada através do método DBC não seria possível a separação entre estas texturas.

5. CONCLUSÕES

Para um estudo comparativo de filtros redutores de *speckle* em imagens SAR adotou-se os critérios de avaliação da relação sinal ruído, da perda de resolução espacial e da preservação de textura. Outros resultados, distintos daqueles obtidos, podem ser encontrados caso haja mudanças nos parâmetros de cada filtro, por exemplo, no tamanho da janela de processamento ou na proporção de deleção utilizada nos filtros robustos.

Os filtros tiveram desempenhos muito bom no critério da relação sinal ruído. O filtro de Lee, que possuiu a pior performance, melhorou esta relação em 100%, em média, e o filtro do CoefVar, que teve o melhor resultado, melhorou a relação sinal ruído em 1900%.

Os resultados da avaliação dos filtros segundo o critério da perda de resolução através da detecção de bordas não foram significativamente diferentes para os filtros. Pode-se afirmar que, no caso em estudo, o baixo contraste entre as classes influenciou negativamente na detecção das bordas da imagem teste.

Deve-se observar a limitação da avaliação da perda de resolução, pois poderá haver variações nos resultados obtidos devido à escolha de um outro limiar ou ainda de outro tipo de detector de bordas. Os valores encontrados para d_{l2} são fortemente influenciados pela ponderação dada às medidas P_C , P_E e P_N . Neste trabalho estas medidas foram ponderadas igualmente, resultados melhores talvez possam ser obtidos, caso as pondere distintamente, por exemplo, penalizando-se mais fortemente a medida P_E .

No critério da preservação da textura os filtros que são baseados em atributos texturais obtiveram, no geral, os melhores desempenhos, juntamente com os filtros de Lee e de Frost, enquanto que os filtros robustos (Grupo II) apresentaram os piores resultados, nesta avaliação. Sugere-se, ainda, outras modelos de caracterização de texturas, tais como *wavelets*, modelos autorregressivos, entre outros, para que se possa estudar ainda mais os efeitos das filtragens sobre a textura de uma imagem.

O estudo realizado auxilia na escolha preliminar de alguns filtros que podem ser adequados para a filtragem de imagens SAR visando a melhora de algum atributo requerido. A escolha final do filtro dependerá das características da imagem a ser filtrada e do tipo de informação que se deseja obter com a filtragem.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à FAPESP pelo suporte financeiro dado através da bolsa de doutorado, processo nº 00/10215-4. E, também, ao INPE e ao Exército Brasileiro por cederem a imagem de estudo.

6. REFERÊNCIAS

- [1] J.W. Goodman, "Some fundamental properties of speckle," *Journal Optical Society of America*, vol. 66, nº 11, pp.1145-1150, 1976.
- [2] J.S. Lee, "Speckle analysis and smoothing of synthetic aperture radar," *Computer Graphics and Image Processing*, vol.17, pp.24-32, 1981.
- [3] J.S. Lee, "A simple speckle smoothing algorithm for synthetic aperture radar images," *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, vol.SMC-13, pp. 85-89, 1981.
- [4] V.S. Frost, J.A. Stiles, K.S. Shanmungan, J.C. Holtzman, "A model for radar images and its applications to adaptive digital filtering of multiplicative noise," *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol.PAMI-4, nº 2, pp.157-166, 1982.
- [5] A. Lopes, E. Nezri, R. Touzzi, H. Laur, "Structure detection and statistical adaptive speckle filtering SAR images," *International Journal of Remote Sensing*, vol.14, pp.1735-1758, 1993.
- [6] A. C. Frery, S.J.S. Sant'Anna, N.D.A. Mascarenhas, O.H. Bustos, "Robust inference techniques for speckle noise reduction in 1-look amplitude SAR images," *Applied Signal Processing*, vol.4, pp.61-76, 1997.
- [7] S.J.S. Sant'Anna, "Avaliação do desempenho de filtros redutores de *speckle* em imagens de radar de abertura sintética," Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE-6125-TDI/586, São José dos Campos, SP, 1995.
- [8] S.J.S. Sant'Anna, C.C.F. Yanasse, A. C. Frery, "Estudo comparativo de alguns classificadores utilizando-se imagens Radarsat da região de Tapajós," In: Proceedings of First Latino-American Seminar on Radar Remote Sensing – Image Processing Techniques, Buenos Aires, Argentina, 2-4 December, 1996. (ESA SP-407, 1997).
- [9] A. F.C. Ferreira, D. Fernandes, "Speckle filter for Weibull-distributed SAR images," International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Honolulu, Hawaii, pp.642-644, vol II, 2000.

[10] R.M. Haralick, "Statistical and structural approaches to texture," Proc. of IEEE, vol.67, n° 5, pp.786-804, 1979.
 [11] C.J. Oliver, "Optimum texture estimator for SAR clutter," *J.Phys. D: Appl. Phys.*, vol.26, pp.1824-1835, 1993.

[12] A. C. Bovik, D.C. Munson Jr., "Optimal detection of object boundaries in uncorrelated speckle," *Optical Engineering*, vol.25, n°11, pp. 1246-1252, 1986.
 [13] N. Sarkar, B.B. Chaudhuri, "An efficient approach to estimate fractal dimension of texture image," *Pattern Recognition*, vol.25, pp.1035-1041, 1992.

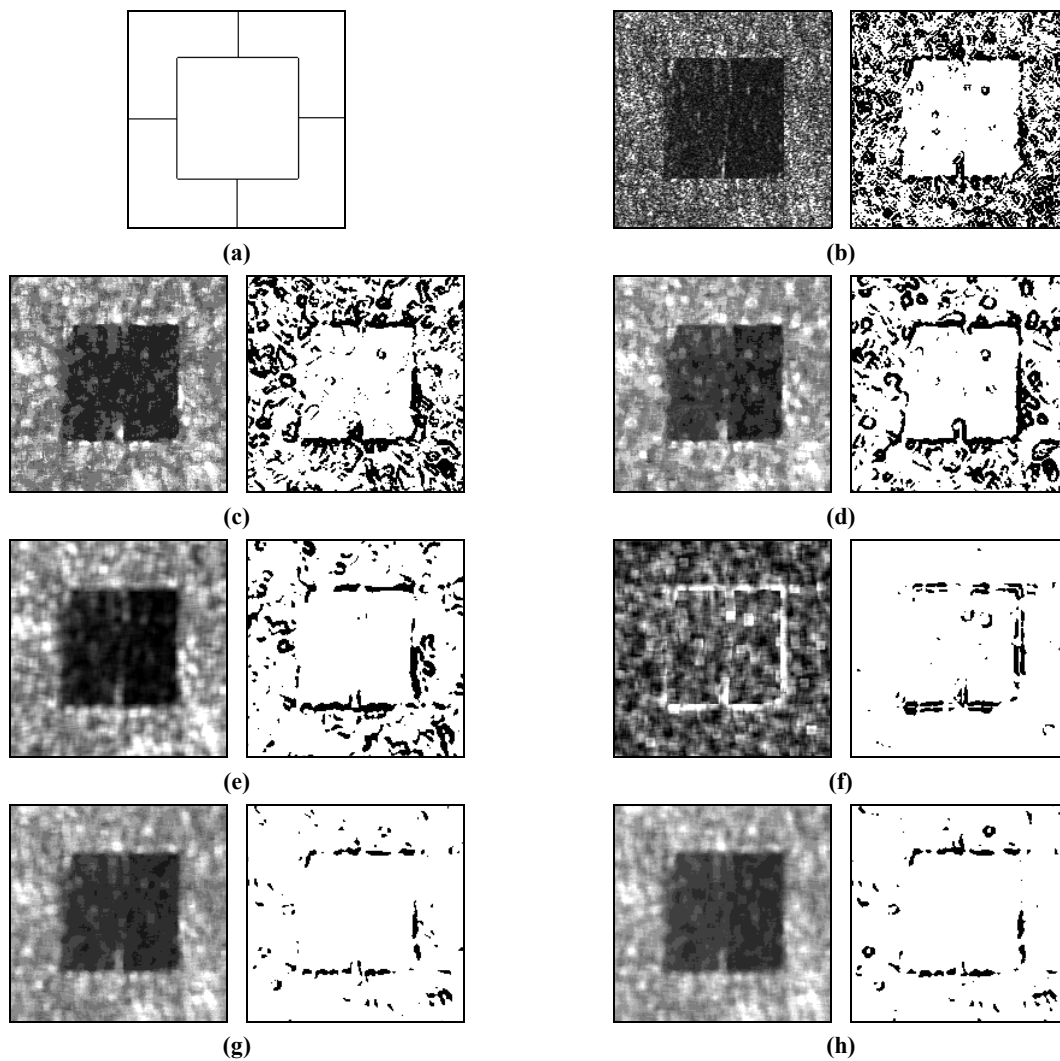


Figura 2 – Imagem teste e imagens filtradas com seus respectivos mapas de borda e o mapa de bordas ideal: (a) Mapa ideal; (b) Original (sem filtrar); (c) MAD;(d) IQR; (e) DissCooc; (f) CoefVar; (g) BLUE; e (h) TML.