

SELEÇÃO DE JANELAS DE PROCESSAMENTO PARA UM FILTRO POLARIMÉTRICO

SIDNEI JOÃO SIQUEIRA SANT'ANNA^{1,2}
CORINA DA COSTA FREITAS¹
J. C. DA S. LACAVA²
DAVID FERNANDES²

¹INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Caixa Postal 515 - 12201-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
{sidnei,corina}@dpi.inpe.br

²ITA – Instituto Tecnológico de Aeronáutica
12228-900 - São José dos Campos - SP – Brasil
{david,lacava}@ele.ita.br

Abstract. The selection of suitable windows size to be employed by a polarimetric speckle noise reduction filter is addressed in this work. This filter was developed to polarimetric SAR data (amplitude or intensity images). The criteria used to select the windows are based on retention of tonal mean, improvement of signal to noise ratio, which was measure through equivalent number of looks (ENL), and computational time. In order to check the difference between two estimated ENL, the Walsh test was performed at a confidence level of 95%. It was concluded that the most suitable windows size were 11x11 pixels to compute the image intensities and 5x5 pixels to estimate the speckle correlation.

Keywords: image processing, polarimetric speckle filter, signal to noise ratio.

1. Introdução

O sensoriamento remoto há muito tem sido um importante provedor de dados usados no mapeamento da superfície terrestre, visando os mais variados enfoques. Nas últimas décadas, a utilização de sensores radar (que operam na faixa de microondas do espectro eletromagnético) vem ganhando especial atenção por parte dos pesquisadores/cientistas, principalmente os radares de abertura sintética (SAR – *Synthetic Aperture Radar*). As imagens SAR, por serem geradas através de um processamento coerente do sinal de retorno dos alvos, apresentam um tipo de ruído característico, denominado *speckle*. Este ruído é formado pelas interferências construtivas e destrutivas da energia eletromagnética retroespalhada pelo alvo imageado, causando uma aparência granular nas imagens SAR.

O ruído *speckle* é uma das principais limitações para a utilização das imagens SAR pelos geocientistas, porque ele dificulta tanto a interpretação visual quanto a classificação automática dos dados SAR. A redução deste tipo de ruído sem, contudo, alterar significativamente as principais características das imagens (resolução, textura, etc) representa um grande desafio para os pesquisadores da área de processamento de imagens. Este desafio aumentou ainda mais devido ao crescente uso de imagens SAR polarimétricas, ficando bem evidente na afirmação de Lee et al. (1999): “O problema da redução do *speckle* é mais complexo nos dados SAR polarimétricos do que nos dados em uma única polarização, devido as dificuldades de preservação das propriedades polarimétricas e de se trabalhar com termos cruzados.”

O estudo de filtros polarimétricos redutores de ruído *speckle* tem sido focado em alguns trabalhos científicos, como, por exemplo, os apresentados por Novak e Burl (1990), Lee et al. (1991), Touzi e Lopes (1994), Lee et al. (1999), Nezry e Yakam-Simen (1999), Zou et al. (2000) e Schou et al. (2000), entre outros. Cada um destes trabalhos apresenta técnica e abordagem distintas. Estes novos filtros são propostos com o objetivo de reduzir o efeito do *speckle*, mas preservando as propriedades polarimétricas e as características estatísticas dos dados SAR e não degradando tanto as principais qualidades das imagens, que é o objetivo

secundário dos filtros desenvolvidos para dados com uma única polarização. Desta forma, ressalta-se mais uma vez a complexidade de desenvolvimento e implementação dos filtros polarimétricos.

Os filtros polarimétricos possuem como entrada vários canais (imagens polarimétricas) e podem ser caracterizados pelo número de canais gerados na filtragem. Quando se obtém apenas uma imagem filtrada, o filtro é dito ser escalar. Entretanto, quando mais de um canal é gerado no processo de filtragem, este filtro é denominado vetorial.

Neste trabalho é realizado um estudo de um filtro polarimétrico vetorial proposto por Lee et al. (1991), o qual utiliza duas janelas móveis diferentes para realizar a filtragem: uma para a estimação do coeficiente de correlação local entre os canais (W_c) e uma para o cálculo da intensidade média local de cada canal (W_f). Nos filtros com apenas um canal de entrada o tamanho da janela de processamento é um dos parâmetros cruciais para os resultados da filtragem. Já no caso deste filtro polarimétrico vetorial (o qual utiliza duas janelas de processamento) a influência do tamanho destas janelas dever ser mais sensível nos resultados de filtragem que no caso dos filtros escalares com um canal de entrada apenas. Portanto, neste estudo foram utilizados 4 valores distintos para W_f e 11 valores para W_c (além de usar também as imagens inteiras na estimativa do coeficiente de correlação), visando avaliar os resultados de filtragens do filtro polarimétrico. Para a estimação do coeficiente de correlação local entre os canais ainda usou-se a imagem inteira. Sendo a avaliação baseada nos critérios da preservação da média tonal das imagens, do aumento da relação sinal ruído e do tempo computacional de processamento.

Com o objetivo de selecionar os tamanhos das janelas de processamento mais adequados para o filtro polarimétrico vetorial proposto por Lee et al. (1991) organizou-se este trabalho em seções. Na Seção 2 encontrar-se-á uma descrição dos dados polarimétricos, na Seção 3 tem-se um breve resumo descritivo do filtro polarimétrico vetorial, na Seção 4 são expostos e discutidos os resultados obtidos e, finalizando, na Seção 5 são apresentadas as conclusões.

2. Dados Polarimétricos

Boa parte dos sistemas SAR convencionais operam com uma única antena transmitindo e recebendo os sinais eletromagnéticos com polarização fixa e numa determinada frequência. Estes sistemas, normalmente, geram imagens nos formatos amplitude ou intensidade, perdendo-se assim, a informação contida na fase do sinal de retorno. Já no caso dos sistemas SAR polarimétricos em cada elemento de resolução das imagens podem existir até quatro valores distintos para a amplitude ou intensidade do sinal de retorno, incluindo suas respectivas fases. Estes valores estão relacionados com as possíveis combinações de polarização dos sinais transmitido e recebido. Deste modo, para cada célula de resolução é medida uma matriz de 2×2 de valores complexos, denominada matriz de espalhamento complexa, denotada por $[S]$ e descrita por:

$$[S] = \begin{pmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{pmatrix},$$

onde os subscritos h e v representam, respectivamente, as componentes do campo elétrico de transmissão e recepção do sinal, polarizadas linearmente na horizontal e na vertical.

Quando se supõe o princípio da reciprocidade de um meio e se considera que o radar polarimétrico está calibrado, pode-se afirmar que a relação de igualdade entre as componentes S_{hv} e S_{vh} é satisfeita. Assim, a matriz $[S]$ reduz-se a um vetor composto pelas componentes S_{hh} , S_{hv} e S_{vv} para cada elemento de resolução, sem perda de informação.

Este último é o caso dados polarimétricos utilizados neste trabalho, que são provenientes da missão SIR-C/X-SAR sobre o Perímetro Irrigado de Bebedouro. A região do perímetro é

agrícola e fica situada nas cercanias do sub-médio São Francisco (09° 07' S, 40° 18' W), aproximadamente a 40 km nordeste do município de Petrolina-PE.

As imagens foram adquiridas em 14 de abril de 1994, nas bandas C (5,304 GHz) e L (1,254 GHz), nas polarizações HH, HV e VV, com ângulo de incidência de 49,496°, número de *looks* nominal de 4,785, espaçamento entre *pixels* de 12,5 x 12,5 m, no formato amplitude e com tamanho de 407 x 370 *pixels*. Na **Figura 1** são mostradas estas imagens, que apresentam pivôs centrais com solo preparado, resto de cultura e culturas de milho e soja, e um rio que corta uma área de caatinga. Nota-se, desta figura, que as imagens na banda L apresentam um contraste maior e uma identificação melhor dos alvos que nas imagens na banda C.

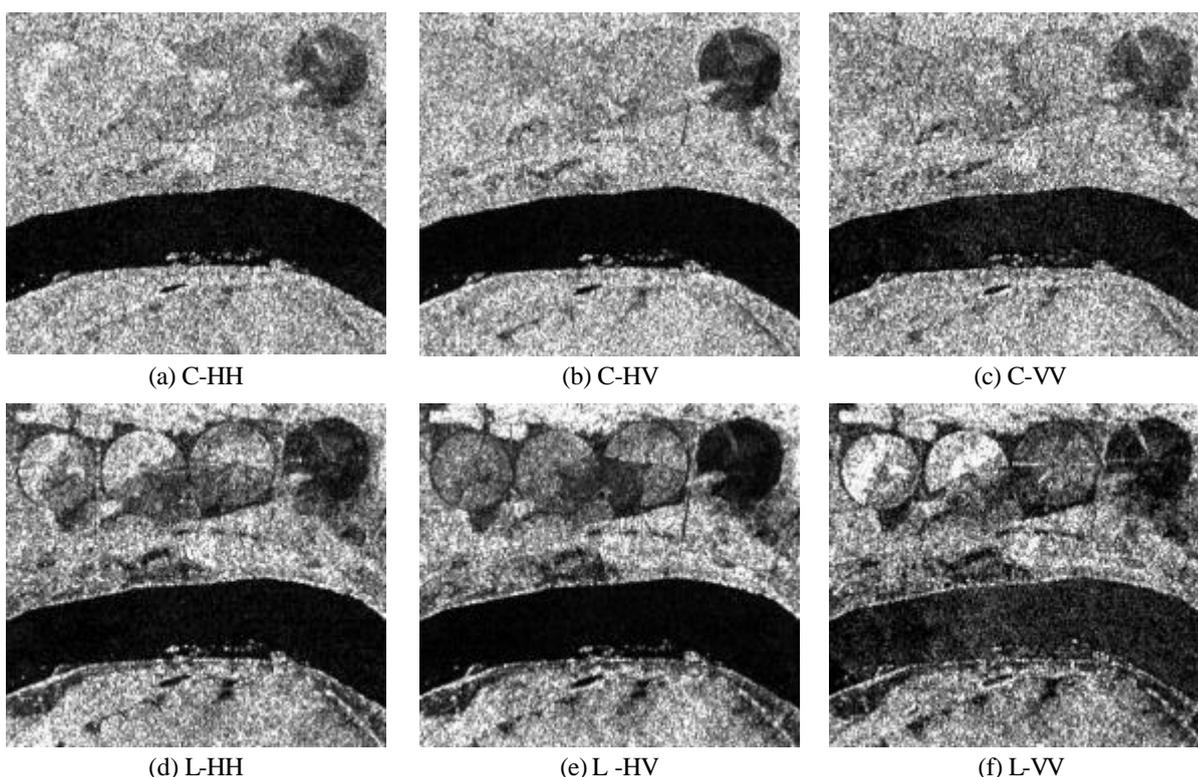


Figura 1: Imagens do SIR-C/X-SAR da região de Bebedouro.

3. Filtro Polarimétrico

O filtro polarimétrico proposto por Lee et al. (1991) é vetorial e baseado no modelo multiplicativo do ruído, isto é, $z_i = x_i n_i$, para $i = \{hh, hv, vv\}$, onde z_i representa a imagem observada, x_i o *backscatter* da cena imageada e n_i o ruído *speckle*. Este filtro pode ser aplicado a imagens polarimétricas processadas com uma ou multivisadas e nos formatos amplitude ou intensidade.

O algoritmo desenvolvido utiliza a correlação do *speckle* das três polarizações para definir fatores ótimos de ponderação a serem aplicados nas equações de estimativa dos *backscatters*. As estimativas dos *backscatters*, mediante a redução do ruído *speckle*, de cada polarização, são realizadas localmente através de janelas móveis e são definidas por:

$$\hat{x}_{hh} = \frac{z_{hh} + (a/\mathbf{x})z_{hv} + (b/\mathbf{g})z_{vv}}{(1+a+b)}; \quad \hat{x}_{hv} = \mathbf{x}\hat{x}_{hh} \quad \text{e} \quad \hat{x}_{vv} = \mathbf{g}\hat{x}_{hh},$$

onde os parâmetros \mathbf{x} e \mathbf{g} são calculados localmente pelas seguintes razões entre médias amostrais:

$$\mathbf{x} = \frac{E(z_{hv})}{E(z_{hh})} \quad \text{e} \quad \mathbf{g} = \frac{E(z_{vv})}{E(z_{hh})},$$

com $E(\cdot)$ representando a esperança matemática, enquanto os parâmetros a e b são otimamente escolhidos de forma a minimizar o erro quadrático médio de x_{hh} , sendo expressos por:

$$a = \frac{(1 - \mathbf{r}_{hh-vv})(1 - \mathbf{r}_{hv-vv} + \mathbf{r}_{hh-vv} - \mathbf{r}_{hh-hv})}{(1 - \mathbf{r}_{hv-vv})(1 + \mathbf{r}_{hv-vv} - \mathbf{r}_{hh-vv} - \mathbf{r}_{hh-hv})} \quad \text{e} \quad b = \frac{(1 - \mathbf{r}_{hh-hv})(1 - \mathbf{r}_{hv-vv} - \mathbf{r}_{hh-vv} + \mathbf{r}_{hh-hv})}{(1 - \mathbf{r}_{hv-vv})(1 + \mathbf{r}_{hv-vv} - \mathbf{r}_{hh-vv} - \mathbf{r}_{hh-hv})}$$

onde \mathbf{r}_{i-j} é o coeficiente de correlação entre as imagens i e j , para $i, j \in \{hh, hv, vv\}$, o qual para áreas homogêneas é igual a correlação do *speckle*.

Em geral, para áreas homogêneas é aconselhável que sejam usados grandes tamanhos de janelas para serem obtidas boas estimativas tanto da média amostral quanto do coeficiente de correlação. Contudo, em áreas de bordas, por exemplo, pequenas janelas são preferíveis, pois diminuem a contaminação da amostra, além de afetarem menos a resolução espacial. No caso das imagens polarimétricas as janelas pequenas também diminuem o acoplamento entre as imagens. Desta forma, nota-se o quão complicado é definir um tamanho ideal para as janelas de processamento de um filtro.

4. Análise e Resultados

Com o objetivo de avaliar a performance do filtro polarimétrico vetorial e a influência dos tamanhos das janelas de processamento, filtrou-se cada conjunto de imagens das bandas C e L. Para tanto, janelas quadradas de $W_i \times W_i$ pixels, para $i = \{c, f\}$, de tamanho ímpar foram usadas, com $W_f = \{5, 7, 9, 11\}$ (para o cálculo das intensidades médias locais de cada imagem), enquanto $W_c = \{3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21, 23\}$ (para a estimativa do coeficiente de correlação entre as imagens), além de usar também as imagens inteiras na estimativa do coeficiente de correlação. Desta maneira, para cada banda (C e L) foram geradas 144 imagens filtradas, as quais foram avaliadas de acordo com os critérios da preservação da média tonal da imagem, da relação sinal ruído e do tempo computacional gasto para o processamento da imagem.

Na análise da preservação da média tonal das imagens filtradas pode-se afirmar que para qualquer uma das combinações de W_f e W_c , tanto na banda C quanto na banda L, mantêm-se satisfatoriamente os valores das médias tonais das imagens não filtradas (originais). Isto se deve ao fato da maior diferença entre as médias tonais das imagens originais e filtradas não ultrapassar o valor de 0,61, correspondendo a 0,55% da média tonal original para a banda C e polarização VV, e também por não ser maior que 0,75 (0,79%) na banda L e polarização HH. Observou-se também que os maiores erros percentuais foram registrados para W_f igual a 5 pixels e os menores para W_f igual a 11 pixels, independente da banda. Já a variação em W_c não apresentou mudanças significativas nos valores das médias tonais. Na **Tabela 1** são apresentadas as médias tonais das imagens originais e a menor e a maior diferenças entre as médias tonais das imagens originais e filtradas, para cada banda e polarização. O valor que aparece entre parêntesis, nesta tabela, representa o erro percentual com relação a média tonal original. Da tabela pode-se observar que a banda L apresenta, no geral, maiores erros percentuais que os obtidos para a banda C.

O algoritmo do filtro polarimétrico vetorial foi implementado em linguagem IDL (*Interactive Data Language*) versão 5.5. As filtragens foram realizadas utilizando-se um microcomputador pessoal do tipo PC-AMD com *clock* de 1,2 GHz e memória RAM de 512 Mbytes. O tempo computacional gasto (medido em segundos) para efetuar cada filtragem,

usando-se a configuração mencionada é apresentado numa forma tabular (**Tabela 2**), assim como na **Figura 2**, onde as curvas para os diferentes valores de W_f estão sobrepostas.

TABELA 1 – Médias tonais das imagens originais e os menores e os maiores erros das médias tonais filtradas.

Banda	C			L		
	HH	HV	VV	HH	HV	VV
Original	114,82	112,84	110,91	94,56	85,36	87,51
Menor Erro	0,09 (0,08)	0,02 (0,02)	0,14 (0,13)	0,16 (0,17)	0,00 (0,00)	0,16 (0,18)
Maior Erro	0,50 (0,43)	0,58 (0,51)	0,61 (0,55)	0,75 (0,79)	0,60 (0,70)	0,65 (0,74)

Da **Tabela 2** e da **Figura 2** pode-se afirmar que os valores de W_c afetam mais drasticamente o tempo computacional de filtragem que os valores de W_f e que a medida que W_c cresce o tempo computacional também o faz numa relação não linear. Cabe ressaltar que o valor de W_c igual a 25 que aparece tanto na tabela quanto no gráfico da **Figura 2** é referente à estimativa do coeficiente de correlação entre as imagens quando todos seus *pixels* são utilizados para este cômputo. Portanto, como este coeficiente é calculado somente uma vez, isto explica o fato do tempo computacional gasto nesta circunstância ser o menor de todos.

TABELA 2 – Tempo computacional, em segundos, para o processamento.

W_c/W_f

5
7
9
11

3
18,82
18,73
18,89
18,95

5
20,87
20,81
21,51
21,04

7
24,32
24,32
24,41
24,50

9
28,78
28,81
28,90
29,14

11

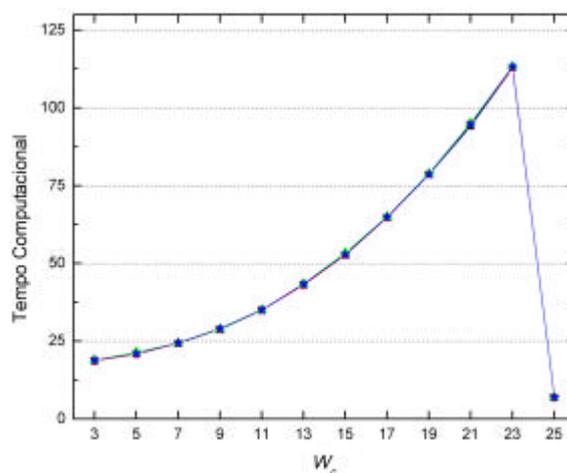


Figura 2 – Tempo computacional de filtragem.

34,98
35,05
35,10
35,17

13
43,12
43,13
43,47
43,36

15
52,76
52,77
53,49
52,99

17
64,85
64,88
65,09
65,04

19
78,62
78,72
78,98
78,75

21
94,32
94,95
95,17
94,79

23
112,81
112,99
113,28
113,32

25
6,90
6,93
6,96
7,04

Para a avaliação da performance do filtro polarimétrico segundo o critério da relação sinal ruído usou-se a estimativa do número equivalente de *looks* (NEL), que é uma medida diretamente proporcional à relação sinal ruído. Logo, quanto maior o valor do NEL maior será a relação sinal ruído. Para tanto, 16 amostras com 900 *pixels* cada foram extraídas de áreas

homogêneas das imagens, calculando-se os seus respectivos valores de NEL, a partir dos quais se obteve um NEL médio para cada uma das imagens (originais e filtradas). Na **Tabela 3** são mostrados os valores estimados para o NEL médio das imagens originais, com seus respectivos desvios padrões, apresentados entre parêntesis. Vale notar que estes valores de NEL estimados a partir das imagens são inferiores ao valor nominal apresentado na Seção 2. Fato este que é justificado pela correlação espacial existente entre os *pixels* das imagens.

Os gráficos dos valores dos NEL's médios para cada banda/polarização são mostrados na **Figura 3**. Nesta figura cada barra de erro corresponde a um desvio padrão com relação ao NEL médio obtido após cada filtragem, assim como as linhas tracejadas também representam um desvio padrão em torno do NEL médio das imagens originais (linhas sólidas). Os quatro grupos de 12 pontos consecutivos (referentes a cada tamanho de W_c , sendo 3 o valor de W_c do ponto mais a esquerda e assim consecutivamente) são relativos aos 4 valores de W_f utilizados nas filtragens.

TABELA 3 – NEL médio das imagens originais e seus respectivos desvios padrões.

Banda/Polariz.	HH	HV	VV
C	2,164 (0,442)	2,622 (0,592)	2,396 (0,615)
L	2,549 (0,612)	4,510 (0,952)	2,980 (0,955)

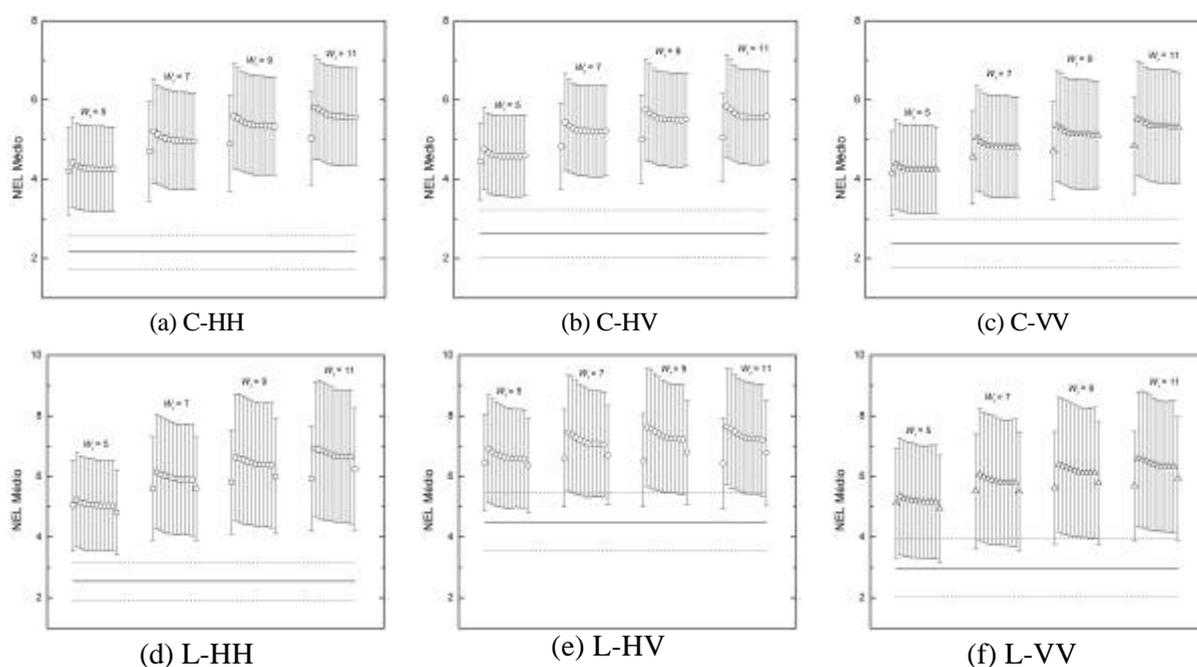


Figura 3 – NEL médio estimado para cada banda/polarização.

A partir da análise da **Figura 3** verifica-se que a aplicação do filtro polarimétrico sempre provoca um aumento da relação sinal ruído, independentemente da banda/polarização. Contudo, aparentemente, o ganho é maior na banda C que na banda L. Nota-se que com o aumento de W_f aumenta-se também o NEL, ou seja, a relação sinal ruído. Já com o aumento de W_c o valor do NEL estimado tende a diminuir, exceto para tamanhos de W_c iguais a 3 *pixels* que apresentam, no geral, os menores valores de NEL. A diminuição do NEL com o aumento de W_c é mais pronunciada na banda L que na banda C.

A fim de evidenciar o aumento da relação sinal ruído obtido com cada filtragem calculou-se o percentual de melhora de seus respectivos NEL's médios com relação àqueles das

imagens originais. Os resultados alcançados são mostrados nos gráficos da **Figura 4**, onde os símbolos quadrado, círculo, triângulo e estrela referem-se, respectivamente, aos valores de W_f iguais a 5, 7, 9 e 11 pixels. A análise da **Figura 4** serve para corroborar com o que foi mencionado anteriormente com relação a **Figura 3** e também para verificar que com o aumento de W_f tende-se a diminuir a melhoria percentual da relação sinal ruído de um valor de W_f para o seu consecutivo. Isto mostra que o aumento indiscriminado de W_f não necessariamente levará a obtenção da melhor relação sinal ruído. Pode-se observar ainda, que a melhora percentual da polarização HV é a menor de todas e que, para a banda L, esta melhora para os valores de W_f iguais a 9 e 11 pixels são praticamente as mesmas.

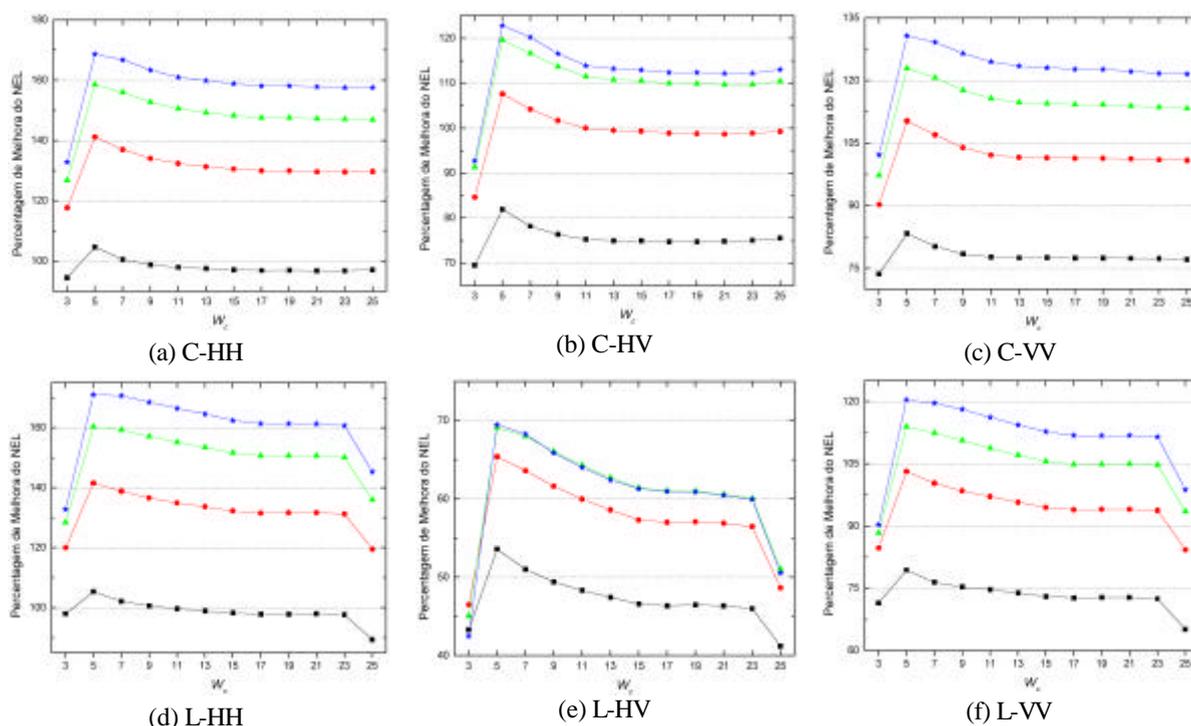


Figura 4 – Percentagem de melhora do NEL para cada banda/polarização.

Para testar se dois valores de NEL médio eram estatisticamente diferentes, foi realizado o teste não paramétrico de Walsh (Siegel, 1975), com nível de significância de 95%. Os resultados deste teste mostraram que os NEL médios são estatisticamente diferentes para os pares de NEL das imagens filtradas com distintos valores de W_f . O mesmo resultado foi obtido para a comparação entre os NEL's médios das imagens originais e filtradas para qualquer tamanho de W_f e W_c . No entanto, quando a comparação é realizada entre dois valores de NEL médio quando W_f é fixo, os resultados mostraram que não há evidência de se rejeitar a hipótese de que estes NEL's são iguais a partir de alguns tamanhos de W_c . Os tamanhos de W_c a partir dos quais é verificada a igualdade dos NEL são mostrados na **Tabela 4**.

TABELA 4 – Valores de W_c para os quais a igualdade entre os NEL's é aceita.

Banda	C			L		
	HH	HV	VV	HH	HV	VV
5	11	11	9	13	15	15
7	13	11	11	13	13	15
9	13	9	11	13	15	15
11	11	11	13	15	13	15

Como os tamanhos de W_f e W_c praticamente não afetam a média tonal, o tempo computacional, independente de W_f , é menor para os menores valores de W_c (exceto quando toda imagem é usada) e a maior percentagem de melhora da relação sinal ruído é obtida para W_f e W_c iguais a 11 e 5 *pixels*, respectivamente, pode-se concluir que os “melhores” tamanhos de janela são $W_f = 11$ *pixels* e $W_c = 5$ *pixels*. Na **Figura 5** são mostradas as imagens filtradas por estes tamanhos de janela. Numa comparação visual das imagens filtradas com as imagens originais pode-se notar que aquelas possuem uma melhor definição/discriminação dos alvos, com uma quantidade menor de ruído.

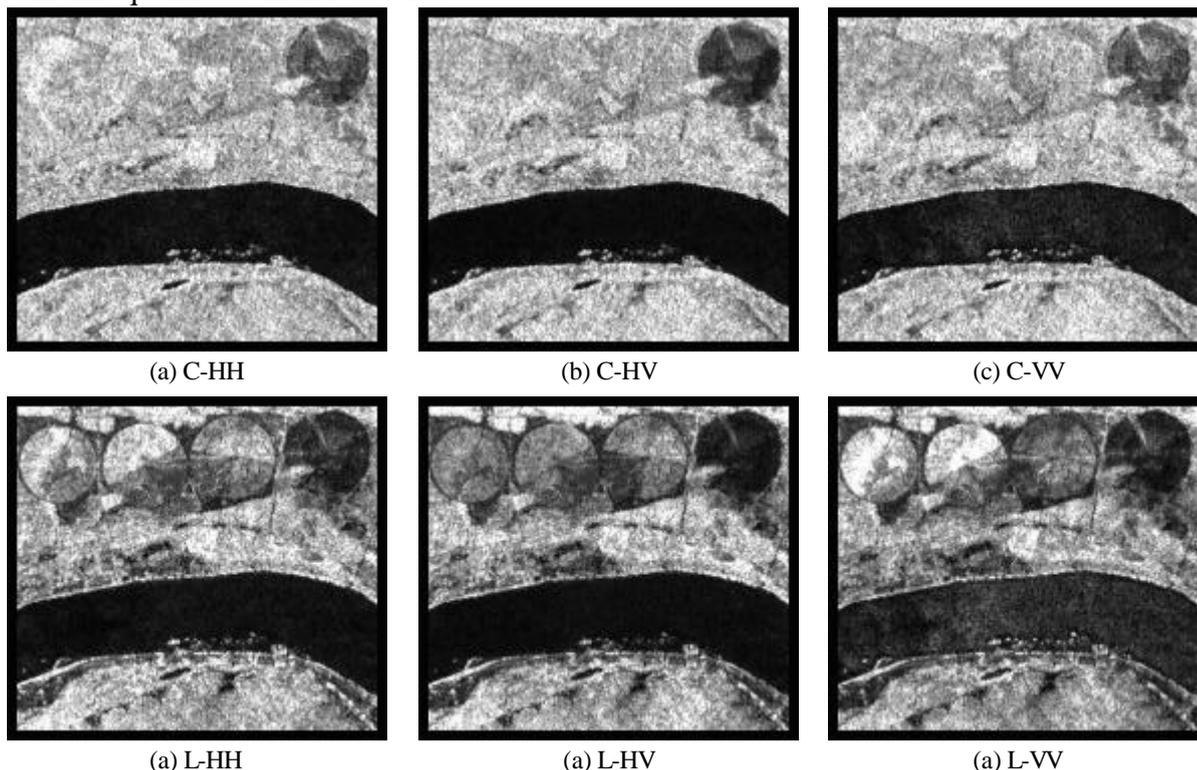


Figura 5 – Imagens filtradas com os melhores resultados ($W_f = 11$ *pixels* e $W_c = 5$ *pixels*).

5. Conclusões

De acordo com os resultados obtidos pode-se concluir que os tamanhos de W_f e de W_c mais indicados para se realizar filtragens seriam 11 e 5 *pixels*, respectivamente, independente da banda. Tamanhos estes que são diferentes daqueles encontrados por Lee et al. (1991). Esta diferença pode ser explicada já que os resultados de filtragem são dependentes da cena imageada.

A escolha de um filtro ou uma certa configuração de parâmetros que definem um filtro como sendo o “melhor” filtro redutor de *speckle* não deve ser baseada em apenas um critério, pois, é sabido que os filtros espaciais degradam outras características das imagens, tal como a sua resolução espacial. Portanto, ainda são necessários mais estudos da performance dos filtros polarimétricos quando se avalia, por exemplo, a preservação textural e/ou a assinatura polarimétrica dos mais variados alvos da superfície terrestre.

A contribuição fundamental deste estudo é a diminuição do espaço de variáveis a serem usadas na avaliação da performance do filtro polarimétrico em questão. A partir deste estudo já se tem uma idéia do comportamento deste filtro, segundo os critérios da preservação da média tonal da imagem, da relação sinal ruído e do tempo computacional de processamento, quando se variam os parâmetros W_f e W_c .

Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente desenvolvido com recursos da FAPESP (processo 00/10215-4) e do CNPq (processo 300927/92-4).

Referências

- Lee, J.S.; Grunes, M.R.; Mango, S.A. Speckle reduction in multipolarization, multifrequency SAR imagery, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 29, no 4, p. 535-544, 1991.
- Lee, J.S.; Grunes, M.R.; de Grandi, G.. Polarimetric SAR Speckle filtering and its implication for classification, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 37, no 5, p. 2363-2373, 1999.
- Nezry, E.; Yakam-Simen, F. On the preservation of polarimetric signatures and polarimetric texture signatures by full polarimetric MAP filters, In: IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Hamburg, Germany, June-July 1999, *Anais*. CD-ROM.
- Novak, L.M.; Burl, M.C. Optimal speckle reduction in polarimetric SAR imagery, *IEEE Transactions Aerospace and Electronic Systems*, v.26, p. 293-305, 1990.
- Siegel, S. *Estatística não paramétrica para as ciências do comportamento*. São Paulo, SP, McGraw-Hill, 1975. 350p.
- Schou, J.; Dierking, W.; Skriver, H. Multi-look polarimetric SAR image filtering using simulated annealing, In: IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Honolulu, Hawaii, July 2000, *Anais*. CD-ROM.
- Touzi, R.; Lopes, A. The principle of speckle filtering in polarimetric SAR imagery, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 32, no 5, p. 1110-1114, 1994.
- Zou, Q.; Pi, Y.; Liu, G. Polarimetric speckle reduction by multi-texture maximum likelihood method, In: IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Honolulu, Hawaii, July 2000, *Anais*. CD-ROM.