

## Comparação de filtros adaptativos para redução do ruído speckle em imagens SAR

Carina Regina de Macedo<sup>1</sup>  
Igor Ogashawara<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil  
{crmacedo, igoroga}@dsr.inpe.br  
ljmtorres@dpi.inpe.br

**Abstract.** Speckle noise in the SAR images is a significant disturbing factor for SAR image processing and analysis, since it does enhance the difficulty of visual and automatic interpretation. To reduce this noise and preserve the SAR images texture, many filters are proposed in the literature. This situation makes the studies of comparison among filters essential for the users of these images. This study aimed to analyze seven adaptive speckle filters algorithms: Lee, Enhanced Lee, Frost, Enhanced Frost, Kuan, Gamma MAP e SDNM. The comparison of each filtering result from each algorithm was obtained by the calculation of the equivalent number of looks (ENL) and through the structural similarity (SSIM). The samples from the image were extracted from homogeneous areas from the following patterns of land cover: urban, vegetation and water. The ENL has the objective of measuring the signal to noise ratio and the SSIM was calculated to evaluate the changes in the structure, brightness and contrast in the samples. The Lee adaptive filter had the lowest values of ENL and the highest of the SSIM which indicates that the filter preserved the original image and lightly reduced the noise. The Gamma MAP and Enhanced Lee filters got the highest values for ENL and the lowest for the SSIM. The urban areas samples showed the highest values of ENL and lowest of SSIM which showed that in this land pattern the speckle noise is more intense due to the heterogeneity of the area.

**Palavras-chave:** equivalent number of looks (ENL), Structural Similarity (SSIM), radar, remote sensing, número equivalente de looks (NEL), Similaridade Estrutural (SSIM), radar, sensoriamento remoto.

### 1. Introdução

O Radar de Abertura Sintética (SAR) é um sistema ativo de detecção remota que ilumina a superfície terrestre com radiação eletromagnética (REM), de natureza coerente na faixa espectral das micro-ondas e registra a amplitude e fase da radiação retroespalhada em direção do sensor (Qiu et al, 2004). Devido à esta natureza coerente das micro-ondas, ocorre-se um efeito inerente a esse sistema de detecção e este efeito é comumente nomeado de "speckle" (Woodhouse, 2006).

O "speckle" atribui aos dados SAR um aspecto granuloso que dificulta a discriminação dos alvos, tanto por métodos visuais quanto por algoritmos de segmentação e classificação (Solbo e Eltoft, 2008). A redução desse ruído é fundamental para a interpretação de imagens SAR, e esta é realizada basicamente a partir de duas técnicas: o processamento multi-look e a utilização de filtros pós processamento. Para Shi e Fung (1986), o processamento multi-look é equivalente a aplicação de um filtro que permite a passagem de baixas frequências que, além de reduzir o ruído speckle, reduz também informações relacionadas à textura. Dessa forma a utilização de filtros adaptativos são as mais comuns para a correção do speckle uma vez que buscam preservar a textura enquanto reduzem o ruído em questão.

Muitos filtros adaptativos têm sido desenvolvidos para a melhoria da qualidade das imagens, porém a comparação entre eles varia de acordo com o que o intérprete busca identificar. Dessa forma muitas metodologias foram propostas, cada uma visando avaliar um determinado parâmetro. A maioria dos métodos para comparação de filtros busca avaliar a relação sinal-ruído (Sant'Anna e Mascarenhas, 1996) e parte do pressuposto que quanto maior for a relação sinal-ruído da imagem filtrada mais o filtro reduziu o efeito speckle.

O principal objetivo do trabalho foi avaliar comparativamente os diferentes filtros adaptativos existentes. Esta avaliação foi realizada utilizando-se de uma imagem AIRSAR, banda L e de polarização HV que foi processada em diferentes janelas de filtragem. A

comparação entre os filtros foi realizada por meio da avaliação da “habilidade” de cada filtro no aumento da relação sinal-ruído e na preservação do brilho, do contraste e da estrutura da imagem original. A avaliação de tal habilidade foi realizada por meio do cálculo do número equivalente de “looks” (NEL) e do índice de similaridade estrutural (SSIM).

## 2. Revisão Bibliográfica

### 2.1 Filtros Estudados

Os filtros testados utilizam o modelo multiplicativo para o ruído e, segundo Lee (1981), os dados observados na imagem  $Z_{i,j}$  são:

$$Z_{i,j} = X_{i,j}v_{i,j}$$

No qual  $X_{i,j}$  representa o sinal e  $v_{i,j}$  o ruído com média 1 e variância  $\sigma_v^2$ .

Desta maneira, foram avaliados alguns dos filtros adaptativos mais utilizados implementados no software ENVI 4.8 da *ITT Visual Information Solutions*. Além deles foi também avaliado o filtro Distâncias Estocásticas usando Nagao-Matsuyama (SDNM).

O filtro desenvolvido por Lee (1980) adota um modelo multiplicativo para ruído; esse modelo é, por meio da aplicação de uma aproximação linear ideal, transformado em outro do tipo aditivo. Ao modelo aditivo se aplica o critério da minimização do erro quadrático médio.

O mesmo modelo multiplicativo do ruído é adotado por Kuan et al. (1985); estes autores propõem a transformação deste modelo em um sinal dependente do modelo de ruído aditivo. Após essa transformação, o filtro de Kuan aplica ao modelo o critério da minimização do erro quadrático médio. O filtro resultante desse processo tem a mesma forma que o filtro de Lee, porém com diferente fórmula de ponderação.

O filtro Gamma MAP (máxima a posteriori) desenvolvido por Lopes et al. (1990a) é uma adaptação do filtro Kuan MAP desenvolvido por Kuan et al. (1987), sendo que este último filtro assume que a refletividade da cena tem uma distribuição gaussiana. Segundo Shi e Fung (1994), admitir essa distribuição não se torna realista visto que pode assumir implicitamente refletividade negativa, assim o filtro de Lopes et al. (1990a) modificou o filtro Kuan MAP assumindo uma distribuição gama, que se acredita mais adequada para casos reais.

Frost et al. (1982) propuseram o desenvolvimento de um filtro em que o retroespalhamento da cena é estimado pela convolução entre a imagem observada e o fator de ponderação exponencial. Esse fator de ponderação é calculado com a utilização das estatísticas locais da imagem.

Os filtros Enhanced Lee e Enhanced Frost idealizados por Lopes et al. (1990b) propuseram a diminuição do speckle por meio da separação da imagem em três diferentes classes de homogeneidade; essa divisão é feita em função do coeficiente de variação. Classes consideradas homogêneas tem seu valor substituído pela média dos valores do filtro; para classes heterogêneas mantém-se o modelo de filtragem do algoritmo original; e as classes que contêm os chamados “ponto alvo” não alteram o valor do pixel.

O filtro SDNM modificado por Torres et al. (2012) consiste na definição de uma janela em torno de cada pixel e na comparação de amostras sobrepostas, sendo que apenas as que passarem por um teste de significância são utilizadas para calcular o valor filtrado. Para definir as amostras foram utilizadas modificações nas janelas definidas por Nagao e Matsuyama (1979). Esse filtro utiliza um modelo gama com número variável de looks permitindo as mudanças na heterogeneidade.

## 2.2 Avaliação de Filtros

### 2.2.1 Número Equivalente de “Looks”

O número de looks (NEL) em uma imagem de intensidade é a medida estatística de flutuações introduzidas pelo efeito speckle. Assim, o NEL dá a ideia essencial sobre o embaçamento de regiões na imagem que deveriam ter uma aparência homogênea, mas são

corrompidas pelo efeito speckle (Salinas e Fernández, 2007). A estimação do NEL em áreas homogêneas de imagens em intensidade e 1-look pode ser estimada pela equação 1 (Solbo e Eltoft, 2008):

$$NEL = \left( \frac{1}{CV} \right)^2 \quad 1)$$

No qual CV é o coeficiente de variação.

### 2.2.2 Índice de Similaridade Estrutural

O índice de similaridade estrutural (SSIM) foi proposto por Wang et al. (2004) na tentativa de desenvolver um método para calcular a fidelidade entre duas imagens. O índice SSIM é considerado uma métrica de referência completa, ou seja, a medição da qualidade de uma determinada imagem é baseada em uma imagem inicial não comprimida e livre de distorções e ruídos. O resultado varia entre 0 a 1.

O cálculo é realizado por meio de duas regiões locais correspondentes "m" e "n" com a composição de três medidas de similaridades entre: a similaridade de brilho b (m; n), de contraste c (m; n) e de estrutura e (m; n) como:

$$\begin{aligned} SSIM(m, n) &= b(m, n) \cdot c(m, n) \cdot e(m, n) \\ &= \left( \frac{2\mu_m\mu_n + C_1}{\mu_m^2 + \mu_n^2 + C_1} \right) \left( \frac{2\sigma_m\sigma_n + C_2}{\sigma_m^2 + \sigma_n^2 + C_2} \right) \left( \frac{\sigma_{m,n} + C_3}{\sigma_m\sigma_n + C_3} \right) \end{aligned} \quad 2)$$

Sendo que  $\mu_m$ ,  $\mu_n$  e  $\sigma_m$ ,  $\sigma_n$  representam, respectivamente, as médias e os desvios padrão das regiões locais m e n, e  $\sigma_{m,n}$  indica a correlação entre as regiões. As constantes  $C_1 = 6; 5025$ ,  $C_2 = 58; 5225$  e  $C_3 = C_2/2$  têm como função estabilizar cada componente (Wang et al, 2004). Os índices SSIM locais calculados para janelas de 11 x 11 x 11 voxels com sobreposição para cada posição espacial s = (x; y; z) da imagem são sumarizados em um índice SSIM global por meio da média dos índices locais.

## 3. Metodologia

A imagem intensidade da cidade de São Francisco, Califórnia, EUA, utilizada para o desenvolvimento desse trabalho, era do tipo single look e foi adquirida pela NASA/JPL com o sistema AIRSAR, banda L e polarização HV. A essa imagem foram aplicados os filtros Lee, Enhanced Lee, Frost, Enhanced Frost, Kuan, Gamma e SDNM (nível de significância 80, 90 e 99).

O processo de filtragem com o algoritmo SDNM foi realizado por meio do ambiente de estatística computacional "R" e envolveu a utilização de janelas 5x5 e 7x7; a janela 3x3 não foi utilizada por impossibilitar a realização da análise estatística requerida pelo algoritmo desse filtro. Os demais filtros foram aplicados no software ENVI 4.8 e foram utilizadas janelas 3x3, 5x5 e 7x7.

O teste do desempenho dos filtros adaptativos envolveu a escolha de sete amostras homogêneas e representativas de áreas urbanas, áreas vegetadas e água (Tabela 1 e Figura 1).

Tabela 1. Tabela com as características das amostras selecionados para o teste do desempenho dos filtros adaptativos. Os valores de NEL são correspondentes a imagem Real.

| Rótulo | Nome          | Qtd de Pixels | NEL   |
|--------|---------------|---------------|-------|
| A1     | Água 1        | 47,259        | 1,00  |
| A2     | Água 2        | 33,015        | 4,78  |
| V1     | Vegetação 1   | 9,600         | 19,11 |
| V2     | Vegetação 2   | 3,692         | 21,94 |
| V3     | Vegetação 3   | 18,060        | 14,22 |
| U1     | Área Urbana 1 | 18,392        | 15,71 |
| U2     | Área Urbana 2 | 22,790        | 12,20 |

O valor do NEL e do SSIM foi calculado para cada uma dessas amostras, sendo esse procedimento realizado para todas as imagens resultantes da aplicação dos filtros. A obtenção do NEL envolveu a extração da média e do desvio padrão de cada amostra no software ENVI 4.8, esses valores foram então levados ao software Excel 2010 para o cálculo do NEL; já o cálculo do SSIM foi realizado no software MATLAB.

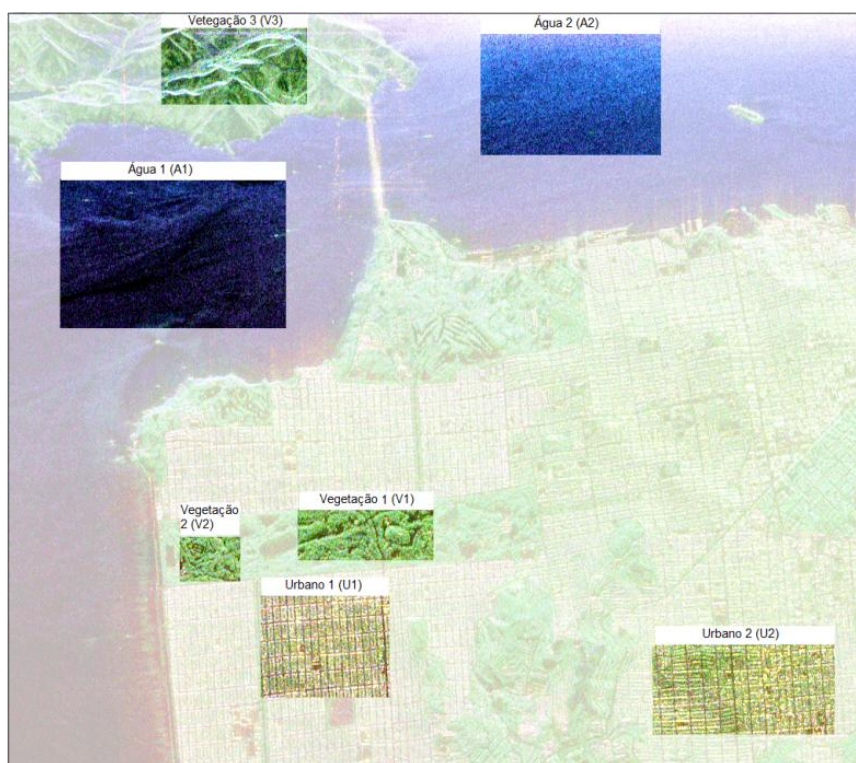


Figura 1. Localização das amostras selecionadas para o teste do desempenho do classificador.

#### 4. Resultados e Discussão

Os valores de NEL e SSIM calculados para cada amostra homogênea retirada das imagens filtradas podem ser encontrados na Tabela 2 (filtros com janela de filtragem 3x3), Tabela 3 (janela de filtragem 5x5) e Tabela 4 (janela de filtragem 7x7).

Tabela 2. Valores de NEL e SSIM calculados para as amostras resultantes da filtragem com janela 3x3.

| Filtros<br>Speckle | NEL (ENVI) |      |       |       |       |       |       | SSIM |      |      |      |      |      |      |
|--------------------|------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
|                    | A1         | A2   | U1    | U2    | V1    | V2    | V3    | A1   | A2   | U1   | U2   | V1   | V2   | V3   |
| Lee                | 1,28       | 5,67 | 35,6  | 40,96 | 21,05 | 25,10 | 16,09 | 0,97 | 0,88 | 0,89 | 0,89 | 0,91 | 0,91 | 0,90 |
| E. Lee             | 1,64       | 6,17 | 59,51 | 65,15 | 27,86 | 36,26 | 18,95 | 0,76 | 0,38 | 0,51 | 0,51 | 0,60 | 0,58 | 0,59 |
| Frost              | 1,78       | 6,10 | 58,66 | 64,51 | 27,55 | 35,76 | 18,90 | 0,66 | 0,40 | 0,52 | 0,52 | 0,61 | 0,58 | 0,59 |
| E. Frost           | 1,76       | 6,11 | 59,26 | 64,90 | 27,74 | 36,11 | 18,95 | 0,62 | 0,38 | 0,51 | 0,51 | 0,60 | 0,58 | 0,59 |
| Kuan               | 1,59       | 5,94 | 56,39 | 64,21 | 26,52 | 34,14 | 18,67 | 0,81 | 0,39 | 0,51 | 0,51 | 0,61 | 0,58 | 0,59 |
| Gamma              | 1,95       | 6,18 | 59,53 | 65,15 | 27,88 | 36,31 | 18,95 | 0,56 | 0,37 | 0,51 | 0,51 | 0,60 | 0,58 | 0,59 |

Entre todos os valores de NEL calculados para as amostras das imagens filtradas com janela 3x3, os valores obtidos pelo filtro Lee foram os menores. Em contrapartida, esse filtro foi o que apresentou para todas as amostras os maiores valores de SSIM. Esses fatos mostram que o filtro Lee foi o que mais preservou a imagem original, porém a redução do ruído speckle foi menor que a dos demais filtros.

Para essa mesma janela de filtragem, os filtros Enhanced Lee, Enhanced Frost e Gamma MAP apresentaram valores muito próximos de NEL e SSIM, com exceção para a amostra A1. Desses, o filtro Gamma MAP apresentou os maiores valores de NEL; os valores de SSIM foram próximos ou iguais aos apresentados pelos outros dois filtros. Assim, pode-se dizer que esse filtro aumentou a relação sinal ruído da imagem (maior diminuição do ruído), sendo que alterações no brilho, contraste e estrutura da imagem foram muito semelhantes às causadas pelos demais filtros.

O filtro Kuan apresentou baixos valores de NEL, sendo estes maiores apenas que os encontrados para o filtro Lee. A preservação do contraste, do brilho e da estrutura das imagens filtradas com o filtro Kuan foram semelhantes a preservação causada por outros filtros, porém a relação sinal ruído obtida por esse filtro foi baixa. Um aspecto negativo desse filtro foi que, para todas as janelas de filtragem, ele introduziu pontos pretos e brancos nas imagens (Figura 2).

Tabela 3. Valores de NEL e SSIM calculados para as amostras resultantes da filtragem com janela 5x5.

| Filtros<br>Speckle | NEL (ENVI) |      |        |        |       |       |       | SSIM |      |      |      |      |      |      |
|--------------------|------------|------|--------|--------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
|                    | A1         | A2   | U1     | U2     | V1    | V2    | V3    | A1   | A2   | U1   | U2   | V1   | V2   | V3   |
| Lee                | 1,37       | 5,88 | 50,73  | 56,77  | 26,16 | 32,59 | 18,37 | 0,96 | 0,84 | 0,81 | 0,82 | 0,86 | 0,85 | 0,86 |
| E. Lee             | 1,95       | 6,46 | 118,59 | 122,40 | 43,37 | 60,87 | 24,01 | 0,69 | 0,18 | 0,15 | 0,18 | 0,35 | 0,28 | 0,38 |
| Frost              | 2,17       | 6,37 | 116,63 | 120,74 | 42,23 | 59,60 | 23,82 | 0,54 | 0,19 | 0,17 | 0,19 | 0,36 | 0,29 | 0,39 |
| E. Frost           | 2,16       | 6,38 | 118,01 | 121,84 | 43,14 | 60,85 | 24,01 | 0,49 | 0,18 | 0,15 | 0,18 | 0,35 | 0,28 | 0,38 |
| Kuan               | 1,89       | 5,80 | 48,98  | 54,03  | 27,54 | 36,96 | 19,22 | 0,82 | 0,37 | 0,24 | 0,17 | 0,45 | 0,45 | 0,41 |
| Gamma              | 2,47       | 6,46 | 118,59 | 122,40 | 43,38 | 61,13 | 24,01 | 0,42 | 0,18 | 0,15 | 0,18 | 0,35 | 0,28 | 0,38 |
| SDNM (80)          | 2,09       | 6,23 | 72,25  | 75,39  | 30,47 | 39,85 | 19,73 | 0,4  | 0,31 | 0,42 | 0,43 | 0,54 | 0,51 | 0,54 |
| SDNM (90)          | 2,11       | 6,26 | 73,95  | 76,62  | 30,76 | 40,40 | 19,82 | 0,39 | 0,3  | 0,4  | 0,42 | 0,54 | 0,5  | 0,54 |
| SDNM (99)          | 2,15       | 6,29 | 78,74  | 80,42  | 31,37 | 41,81 | 20,04 | 0,37 | 0,27 | 0,37 | 0,40 | 0,52 | 0,48 | 0,52 |

Para todos os filtros é possível perceber que o aumento das janelas de filtragem provocou um aumento na relação sinal ruído (aumento do NEL) e a diminuição dos valores de SSIM. Dessa maneira, o aumento das janelas de filtragem provocaram um aumento na relação sinal ruído e também um aumento do borramento (perda de detalhes) da imagem.

Os filtros SDNM apresentaram, geralmente, valores de NEL maiores que os obtidos pelo filtro Lee e Kuan e menores que os obtidos pelos demais filtros. As modificações causadas na estrutura, no brilho e no contraste das imagens originais foram pequenas, sendo maiores apenas que as modificações causadas pelo filtro Lee. Porém, o comportamento do filtro SDNM foi diferente para a amostra A1, visto que esse filtro apresentou os valores mais baixos de SSIM sem, com isso, ter sido o que mais melhorou a relação sinal ruído.

Os diferentes níveis de significância utilizados para o filtro SDNM apresentaram diferentes resultados. Os valores de NEL aumentaram conforme o nível de significância e os valores de SSIM diminuíram com o aumento desse nível.

Tabela 4. Valores de NEL e SSIM calculados para as amostras resultantes da filtragem com janela 7x7.

| Filtros Speckle | NEL (ENVI) |      |        |        |       |       |       | SSIM |      |      |      |      |      |      |
|-----------------|------------|------|--------|--------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
|                 | A1         | A2   | U1     | U2     | V1    | V2    | V3    | A1   | A2   | U1   | U2   | V1   | V2   | V3   |
| Lee             | 1,40       | 5,95 | 59,86  | 66,52  | 30,64 | 38,23 | 20,30 | 0,96 | 0,83 | 0,79 | 0,79 | 0,83 | 0,82 | 0,84 |
| E. Lee          | 2,12       | 6,56 | 184,75 | 180,10 | 63,42 | 86,30 | 29,09 | 0,67 | 0,12 | 0,04 | 0,07 | 0,21 | 0,14 | 0,25 |
| Frost           | 2,37       | 6,47 | 181,39 | 177,91 | 60,41 | 84,33 | 28,63 | 0,50 | 0,14 | 0,06 | 0,08 | 0,23 | 0,16 | 0,27 |
| E. Frost        | 2,39       | 6,48 | 183,68 | 179,37 | 63,06 | 86,16 | 29,09 | 0,44 | 0,12 | 0,04 | 0,07 | 0,21 | 0,14 | 0,25 |
| Kuan            | 2,01       | 5,95 | 70,40  | 73,10  | 32,34 | 42,36 | 20,73 | 0,81 | 0,54 | 0,58 | 0,52 | 0,58 | 0,57 | 0,54 |
| Gamma           | 2,81       | 6,56 | 184,75 | 180,10 | 63,42 | 86,85 | 29,09 | 0,36 | 0,12 | 0,04 | 0,07 | 0,21 | 0,14 | 0,25 |
| SDNM (80)       | 2,53       | 6,43 | 132,59 | 133,79 | 46,58 | 63,60 | 24,61 | 0,26 | 0,15 | 0,11 | 0,15 | 0,32 | 0,25 | 0,36 |
| SDNM (90)       | 2,54       | 6,44 | 134,89 | 135,60 | 46,95 | 64,78 | 24,72 | 0,26 | 0,15 | 0,11 | 0,14 | 0,32 | 0,24 | 0,35 |
| SDNM (99)       | 2,56       | 6,46 | 139,47 | 139,47 | 47,75 | 67,37 | 24,90 | 0,25 | 0,14 | 0,10 | 0,13 | 0,31 | 0,22 | 0,34 |

As janelas 5x5 e 7x7 resultaram em uma grande queda nos valores do SSIM, as exceções foram os valores obtidos pelo filtro Lee. Assim, os valores muito baixos de SSIM para as amostras de área urbana dos filtros Enhanced Lee, Frost, Enhanced Frost e Gamma MAP podem indicar que elas sofreram perdas de estrutura, brilho e contraste consideráveis.

Para as amostras representativas de áreas urbanas (U1 e U2), houve uma queda acentuada nos valores de SSIM; esse fato indica que essas amostras sofreram maior modificação em relação a imagem original. Essas amostras também apresentaram altos valores de NEL, que, segundo Solbo e Eltoft (2008), está relacionado a presença de inúmeros espalhadores fortes.

A amostra representativa de água A1 foi a mais preservadas em relação a imagem original para todos os filtros, sendo o SDNM a exceção. Porém essa amostra apresentou baixa relação sinal ruído. Já a amostra A2 apresentou baixos valores de NEL e de SSIM, ou seja, os filtros causaram mudanças significativas na estrutura, no brilho e no contraste da imagem, sem com isso aumentar a relação sinal ruído.

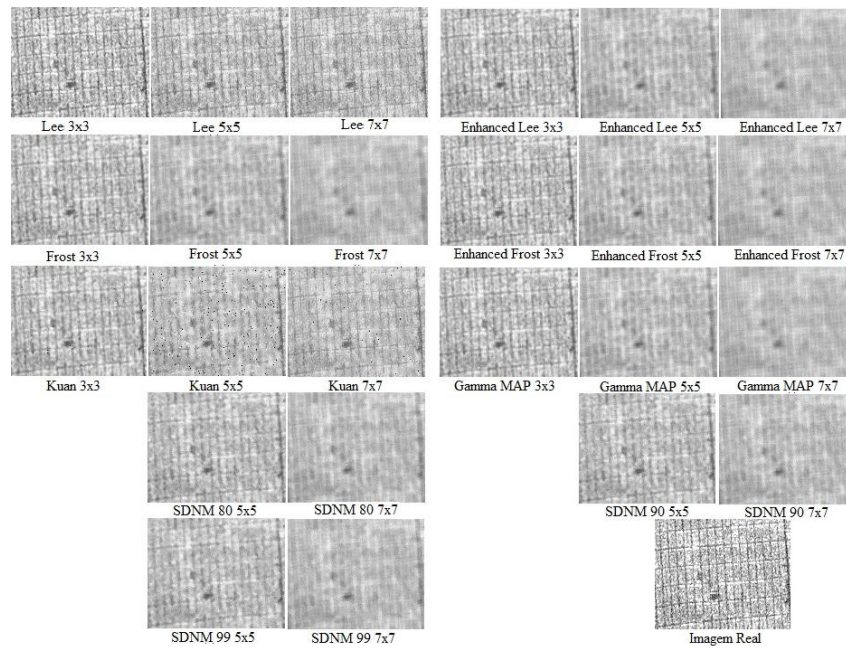


Figura 2. Amostra U1 após processo de filtragem utilizando os filtros pré definidos para este trabalho.

## 5. Considerações Finais

Dos filtros analisados no presente trabalho o filtro Lee obteve os menores valores de NEL e os maiores valores de SSIM, indicando que ele preservou a imagem original e pouco suavizou o ruído. Os filtros Enhanced Lee e Gamma MAP apresentaram valores próximos ou iguais tanto de NEL como de SSIM e preservaram a estrutura, o brilho e o contraste da imagem de forma similar aos filtros Frost e Enhanced Frost, porém obtendo uma maior relação sinal ruído.

O filtro SDNM obteve valores intermediários de NEL e SSIM. Porém, para a amostra A1 este filtro apresentou os valores mais baixos de SSIM todavia melhorou a relação sinal ruído. Já o resultado obtido pelo filtro Kuan não foi satisfatório, visto que esse filtro causou o aparecimento nas imagens de pontos brancos e pretos inexistentes na imagem original.

Foi possível analisar que distintos alvos causaram diferenças nos padrões dos valores de SSIM e NEL encontrados. Isso mostra que a eficiência dos filtros varia de acordo com o alvo, sendo as áreas urbanas as mais problemáticas quanto a preservação de contraste, brilho e estrutura.

Concluiu-se que a utilização do SSIM para a comparação de filtros adaptativos, apesar de não ser ideal quando não se tem uma imagem simulada, auxilia o entendimento da degradação que o filtro causa na imagem original. É importante destacar que recentemente filtros utilizando wavelets têm sido desenvolvidos e pesquisas apontaram para bons resultados em relação a redução do efeito speckle. Dessa forma é interessante buscar uma maneira de compará-los com os filtros atuais em pesquisas futuras.

## Agradecimentos

Ao Leonardo Torres por ter colaborado com orientação e por ter aplicado o filtro SDNM (nível de significância 80, 90 e 99) na imagem SAR.

## Referências Bibliográficas

- 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 Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. 4, n. 2, p. 157-166, 1982.
- Kuan, D.T.; Sawchuk, A.A.; Strand, T.C.; Chavel, P. Adaptive Noise Smoothing Filter for Image with Signal-Dependent Noise. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. 7, n. 2, p. 165-177, 1985.
- Kuan, D.T.; Sawchuk, A.A.; Strand, T.C.; Chavell, P. Adaptive restoration of images with speckle. **IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process.**, v. 35, n. 3, p. 373-383, 1987.
- Lee, J.S., Digital Image Enhancement and Noise Filtering by Use of Local Statistics. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v.2, n. 2, p. 165-168, 1980.
- Lee, J.S. Speckle Analysis and Smoothing of Synthetic Aperture. **Computer Graphics and Image Processing**, v. 17, p.24-32, 1981.
- Lopes, A.; Nezry, E.; Touzi, R.; Laur H. Maximum a posteriori Speckle filtering and first order texture models in SAR images. In: Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1990. **Anais...** 1990. Artigos, p. 2409-2412. On-line. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=00689026>>. Acesso em: 08 out. 2012.
- Lopes, A.; Touzi, R.; Nezry, E. Adaptive speckle filters and scene heterogeneity. **IEEE Trans. Geosc. Remote Sensing**, v. 28, n. 28, p. 992-1000, 1990.
- Nagao, M.; Matsuyama, T. Edge preserving smoothing. **Computer Graphics and Image Processing**, v. 9, p. 394-407, 1979.
- Qiu, F.; Berglund, J.; Jensen, J.R.; Thakkar, P.; Ren, D. Speckle Noise Reduction in SAR Imagery Using a Local Adaptive Median Filter. **GIScience and Remote Sensing**, v. 41, n. 03, p. 244-266, 2004.
- Salinas, H.M.; Fernández, D.C. Comparison of PDE-Based Nonlinear Diffusion Approaches for Image Enhancement and Denoising in Optical Coherence Tomography. **IEEE Transactions on Medical Imaging**, v. 26, n. 06, 2007.
- San'tanna, S.J.S.; Mascarenhas, N.D.A. Comparação do Desempenho de Filtros Redutores de "Speckle". In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 8, 1996, Salvador. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1996. Artigos, p. 871-877. CD-ROM, On-line. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/sid.inpe.br/deise/1999/02.01.15.54/doc/T122.pdf>>. Acesso em: 07 nov. 2012.
- Shi, Z.; Fung, K. B. A Comparison of Digital Speckle Filters. In: Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1994. **Anais...** 1996. Artigos, p. 2129-2133. On-line. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=399671>>. Acesso em: 10 out. 2012.
- Solbo, S.; Elsoft, T. A stationary wavelet-domain wiener filter for correlated speckle. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 46, n. 04, p. 1219-1230, 2008.
- Torres, L.; Cavalcante, T.; Frery, A. C. Speckle Reduction using Stochastic Distances. In: Iberoamerican Congress on Patter Recognition (CIARP), 17, 2012, Buenos Aires. **Anais...** 2012. Artigos. On-line. Disponível em: <<http://arxiv.org/pdf/1207.0704v1.pdf>>. Acesso em: 02 nov. 2012.
- Wang, Z.; Bovik, A.C.; Sheikh, H.R.; Simoncelli, E.P. Image quality assessment: From error measurement to structural similarity. **IEEE Transactios on Image Processing**, v. 13, n. 1, p. 600-612, 2004.
- Woodhouse, I.H. **Introduction to Microwave Remote Sensing**. CRC Press, 2006. 369 p.