

## Simulação e Restauração de Imagens HRC CBERS 2B

Lino Augusto Sander de Carvalho  
Giovanni de Araujo Boggione  
Leila Maria Garcia Fonseca  
Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil  
[\[lino,leila}@dpi.inpe.br](mailto:{lino,leila}@dpi.inpe.br), [evlyn@dsr.inpe.br](mailto:evlyn@dsr.inpe.br)

**Abstract** : Restoration is an image processing technique for correcting distortions inserted by sensor systems during the imaging process. Blurring is one of the most notable effects, which reduce the amount of information on the image. There are several restoration techniques presented in literature. However, the application of such filters depends intrinsically on the type of sensor, which leads to a comparison between techniques, in order to find the method that better fits the proposed sensor. An alternative for a comparison is image simulation. Through image simulation techniques it is possible to estimate characteristics from existing or planned sensors, enabling an assessment sensors performance or the quality of image processing techniques applied to these images. This work proposes the comparison of three restoration methods applied to HRC (High Resolution Camera) sensor, from, CBERS 2B (China Brazil Earth Resource Satellite) satellite: Wiener filter, Richardson-Lucy filter and Modified Inverse Filter. For the comparison, an image from HRC - CBERS 2B sensor is simulated using PRISM (Panchromatic Remote-sensing Instrument Mapping) sensor from ALOS (Advanced Land Observing System) satellite as input. Statistical measures show that Richardson-Lucy method outperforms the other two methods. Visual results of the simulation and restoration are also shown.

**Palavras-chave:** HRC CBERS-2B, PRISM, image simulation, image restoration, restauração, simulação.

### 1 Introdução

Segundo Fonseca (1988), a restauração é uma técnica de processamento de imagens que visa corrigir distorções inseridas pelos sistemas sensores no processo de imageamento. Um dos efeitos causados pelas distorções do sensor é o de suavização ou borramento das feições na imagem, os quais reduzem as informações de detalhes mais finos (bordas) na imagem.

Várias técnicas de restauração são apresentadas na literatura e podem ser agrupadas em duas grandes áreas: os filtros iterativos e os não iterativos. Os filtros de restauração não-iterativos baseiam-se em operações de deconvolução aplicadas diretamente à imagem degradada. A classe de filtros de restauração iterativos, por outro lado, parte do princípio de que uma imagem pode ser restaurada de modo iterativo tomando-se como ponto de partida a análise do modelo de degradação e do ruído aleatório presente na imagem (Puetter et al 2005). Entretanto, a aplicação de tais filtros depende intrinsecamente do tipo de sensor, o que leva necessidade de uma comparação, com o objetivo de encontrar o método que mais se adéqua ao sensor proposto.

Uma alternativa para a comparação das técnicas de restauração é a simulação de imagens. A simulação consiste no uso de ferramentas que permitam gerar imagens com características específicas de resolução espacial, espectral e radiométrica. Através das técnicas de simulação de imagens é possível estimar as características das imagens que serão adquiridas pelos sensores planejados ou já existentes, possibilitando uma avaliação do desempenho destes sensores, além de procedimentos aplicados às estas imagens (Banon,1990)

Este trabalho propõe a comparação entre três técnicas tradicionais de restauração aplicadas ao sensor HRC do satélite CBERS 2B: o filtro de Wiener, o filtro de Richardson – Lucy e o filtro inverso Modificado. Para tal uma imagem do sensor HRC do satélite CBERS 2B foi simulada partir do sensor PRISM. Uma avaliação utilizando medidas estatísticas de qualidade de imagens foi feita buscando identificar qual destes métodos de restauração possui a melhor aplicabilidade ao HRC.

## 2 Simulação da resolução espacial efetiva de um sensor

A técnica de simulação utilizada neste trabalho leva em conta a Função de Espalhamento Pontual – FEP do sensor. A simulação é realizada por meio da convolução da FEP do filtro de simulação pela imagem de entrada ou, no domínio da frequência, pelo produto do espectro de Fourier da imagem pela Função Transferência de Modulação - FTM do filtro de simulação (Fonseca, 2009, Papa et al., 2008). A Figura 1 ilustra o processo de simulação da resolução espacial de um sensor.

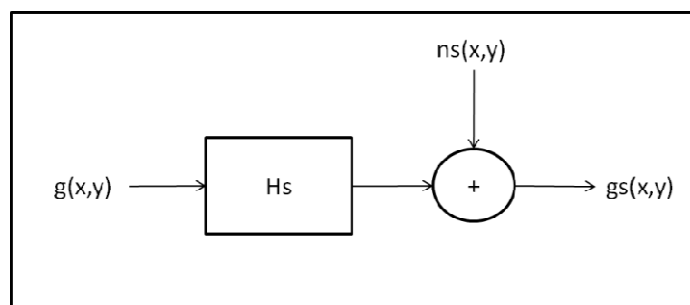


Figura 1 – Modelo de simulação da resolução espacial de um sensor.

Sendo  $g$  a imagem de entrada ao sistema de simulação,  $gs$  a imagem simulada,  $hs$  a resposta do filtro de simulação e  $n$  o ruído aditivo, a imagem simulada pode ser representada, no domínio do espaço, por:

$$gs = hs * g + ns \quad (1)$$

Por outro lado, a imagem  $g$ , adquirida por um sensor com melhor resolução espacial do que aquele que gerou a imagem  $gs$  pode ser modelada por:

$$g = he * f \quad (2)$$

onde  $f$  é a cena e  $he$  a FEP do sensor de entrada.

Considerando as equações (1) e (2) a imagem  $gs$  pode ser representada por:

$$gs = hs * he * f + ns \quad (3)$$

Finalmente, pode-se chegar à conclusão que a resposta do sensor,  $h$ , que gerou a imagem  $gs$  é a combinação das respostas dos sistemas de entrada e de simulação:

$$h = hs * he \quad (4)$$

No domínio de Fourier, a resposta em frequência do sensor que produziu a imagem  $gs$ ,  $H$ , é o produto das respostas em frequência dos sistemas de entrada  $He$  e do filtro de simulação  $Hs$ :

$$H = Hs \cdot He \quad (5)$$

Supondo que as respostas dos sistemas sejam modeladas por uma função gaussiana, separável nas direções *across-track* and *along-track* tem-se que (Fonseca et al., 2009):

$$\sigma_s = \sqrt{\sigma_H^2 - \sigma_e^2} \quad (6)$$

onde  $\sigma_s$  é o desvio padrão de  $hs$  e  $\sigma_H^2$  e  $\sigma_e^2$  são as variâncias das funções gaussianas que modelam  $h$  e  $he$ , respectivamente. Portanto, conhecida a resposta do sensor a ser simulado e a do sensor de alta resolução de entrada, pode-se projetar um filtro de simulação gaussiano com desvio padrão  $\sigma_s$ :

$$hs(x) = e^{\frac{-(x)^2}{2\sigma_s^2}} \quad (7)$$

Para que a simulação possa ser fiel à imagem original, um ruído gaussiano aleatório é adicionado à imagem (Papa et al., 2008). Este ruído é medido em laboratório antes do lançamento do satélite e a partir das imagens digitais após o lançamento do satélite (Gouvêa et al., 2009).

### 3 Filtros de Restauração

#### Filtro Inverso Modificado

O Filtro Inverso Modificado (FIM), ou de compensação da função de transferência, é uma aproximação do filtro inverso, que procura controlar os problemas inerentes à presença de ruído na imagem a ser restaurada (Fonseca, 1988). Ao invés de se tentar projetar um filtro de tal forma que, após a aplicação do filtro, se tenha uma recuperação perfeita do sinal degradado, o que se faz é admitir uma recuperação parcial do sinal para atenuar o efeito do ruído na imagem restaurada. Neste caso, uma função  $D$  que representa a resposta desejada do sistema, e não mais a ideal como no caso do filtro inverso, é utilizada no projeto do FIM e é representado por :

$$P(u) = \begin{cases} \frac{D(u)}{H(u)} & |u| \leq u_c \\ 0 & \text{caso contrario} \end{cases} \quad (8)$$

onde  $u_c$  é a frequência de corte do sistema. Por simplicidade, adotamos a representação matemática em uma dimensão, que equivale a usar dois filtros, um para cada direção ( $x$  e  $y$ ). A função  $D(u)$  deve ter um comportamento melhor que a resposta do sensor  $H(u)$ , ou seja a atenuação das componentes em frequência deve ser mais suave do que a da função  $H(u)$ . Em Fonseca et al. (1993), a função  $D(u)$  escolhida é a função de Hanning representada abaixo:

$$D(u) = \begin{cases} 1 & 0 \leq u \leq u_w \\ 0.5 * (1 + \cos \left[ \frac{\pi(u - u_w)}{(u_c - u_w)} \right]) & u_w \leq u \leq u_c \end{cases} \quad (9)$$

onde  $u_w$  é a frequência para a qual a FTM é igual ao valor de 0,5 (o valor máximo é 1) (Fonseca, 1988). Esta função tem valor constante igual a 1 no intervalo  $0 \leq u \leq u_w$  que quer dizer que, neste intervalo de frequências a resposta desejada do sensor é ideal, ou seja, não há suavização do sinal.

#### Filtro de Wiener

O Filtro de Wiener é projetado pela minimização do erro quadrático médio entre a imagem original ( $f$ ) e a restaurada ( $f'$ ) (Gonzalez e Woods, 2009):

$$P(u, v) = \frac{1}{H(u, v)} \frac{|H(u, v)|^2}{|H(u, v)|^2 + S_n/S_f} \quad (10)$$

onde  $S_n$  é o espectro de potência do ruído e  $S_f$  é o espectro de potência da imagem não degradada e  $H(u,v)$  é a FTM. O problema deste filtro é que os valores dos espectros de potência da imagem e do ruído são frequentemente desconhecidos. Neste caso, a relação entre os espectros pode ser substituída por uma constante  $K$  que, normalmente, é definida empiricamente:

$$P(u,v) = \frac{1}{H(u,v)} \frac{|H(u,v)|^2}{|H(u,v)|^2 + K} \quad (11)$$

### Filtro Richardson-Lucy

O método de restauração Richardson-Lucy (RL) foi proposto por Richardson (1972) e Lucy (1974). Entretanto, Shepp e Vardi (1982) a partir da minimização da função de máxima verossimilhança para uma imagem corrompida por um ruído com distribuição de Poisson propuseram a seguinte expressão para o filtro RL:

$$f'_{i+1}(x,y) = f'_i(x,y) \left[ h(x,y)^T * \frac{g(x,y)}{h(x,y) * f'_i(x,y)} \right] \quad (12)$$

onde  $f'_i$  é a estimativa da imagem na iteração  $i$ ,  $g$  é a imagem original degradada e  $h$  é a FEP do sistema.

Segundo Lucy (1974), o método trata bem o ruído com distribuição de Poisson. Entretanto, alguns artefatos são comuns quando a relação sinal/ruído é baixa. Segundo White (1994), o problema principal deste filtro é a amplificação do ruído quando o número de iterações é grande. Assim, deve-se parar o processo iterativo quando a presença de ruído começar a deteriorar o sinal.

## 4 Medidas de Qualidade de Imagem

### ISNR - Improved Signal to Noise Ratio

O ISNR é definido da seguinte forma:

$$ISNR = 10 \log_{10} \left\{ \frac{\sum_{xy} [g(x,y) - f(x,y)]^2}{\sum_{xy} [f'(x,y) - f(x,y)]^2} \right\} \quad (13)$$

onde  $g, f$  e  $f'$  são, respectivamente, as imagens degradada, original e restaurada. Este índice indica o quanto a imagem restaurada é similar à imagem original. Portanto, quanto maior o índice melhor é o resultado da restauração (Papa et al., 2008).

### UIQI - Índice de Medida Universal da Qualidade em Imagem

Wang & Bovik (2002) propuseram um índice que leva em consideração três fatores: perda de correlação, distorção de brilho e distorção de contraste. Este índice é conhecido por índice universal de qualidade de imagem (UIQI) e é dado por:

$$UIQI = \frac{\sigma_{AB}}{\sigma_A \sigma_B} \cdot \frac{2\mu_A \cdot \mu_B}{(\mu_A)^2 + (\mu_B)^2} \cdot \frac{2\sigma_A \sigma_B}{\sigma_A^2 + \sigma_B^2} \quad (14)$$

onde  $A$  representa a imagem a ser testada e  $B$  representa a imagem de referência;  $\mu_A$  e  $\mu_B$  correspondem às respectivas médias de  $A$  e  $B$ ;  $\sigma_A^2$  e  $\sigma_B^2$  são as variâncias de  $A$  e  $B$ , respectivamente; e  $\sigma_{AB}$  é a covariância entre  $A$  e  $B$  (Wang e Bovik, 2002).

## 5 Simulação das imagens HRC CBERS-2B

O objetivo de simulação da resolução espacial das câmeras HRC do CBERS-2B é modelar o efeito de borrramento das imagens produzidas por este sensor e, posteriormente, avaliar os filtros de restauração. Para isto, uma imagem do sensor PRISM do satélite ALOS (ALOS, 2010) foi usada para a simulação da imagem HRC. Esta imagem foi escolhida por sua similaridade com o sensor HRC. Porém, embora, as imagens PRISM e HRC apresentem resolução espacial nominal similar, as imagens HRC, devido às características de projeto, possuem uma qualidade visual (mais borramento) inferior às imagens PRISM.

Tabela 1 - Características dos sensores HRC – CBERS 2B e PRISM - ALOS

Características	HRC – CBERS 2B	PRISM - ALOS
Banda espectral ( $\mu\text{m}$ )	0,50 - 0,80 (pancromática)	0,52 - 0,77 (pancromática)
Campo de Visada	2,1°	de -1,5 a +1,5 graus
Resolução espacial	2,7 x 2,7 m	2,5 x 2,5 m
Largura da faixa imageada	27 km (nadir)	70 km (apenas nadir)
Quantização	8 bits	8 bits

Um recorte (1000 x 500) da imagem do sensor PRISM, da data de 11/04/2008, foi adquirido para a realização dos testes. Esta imagem possui objetos com bordas bem definidas e feições lineares que facilitam a análise dos resultados, já que o efeito dos filtros de restauração é mais visível em regiões que possuem mais informação de detalhes. O recorte de imagem utilizado neste experimento é ilustrado na Figura 2.

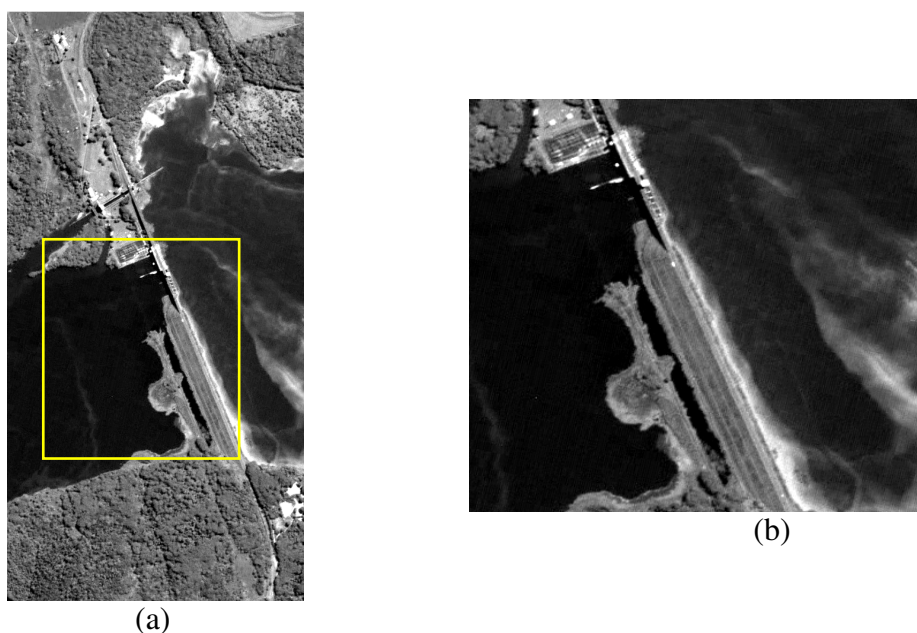


Figura 2 - Recorte da imagem PRISM – (a) Recorte utilizado para os testes dos filtros de restauração (b) Imagem ampliada da região destacada em A.

A imagem HRC foi simulada a partir da imagem PRISM, usando um filtro de simulação gaussiano com os valores de desvio padrão apresentados na Tabela 2. O valor destes desvio padrões foi calculado a partir da Equação (6) onde se considerou o valor do EIFOV do sensor PRISM como 1.5 vezes o IFOV, ou seja, 3.75 metros.

Tabela 2 - Valores de sigma para o filtro de simulação.

Direção	Desvio Padrão
Along Track	1,44
Across Track	1,28

Foi utilizado um filtro de tamanho de janela 11x11 para que a FEP do filtro de simulação pudesse ser completamente caracterizada. Para simular, com maior fidelidade a imagem gerada pela câmera HRC adicionou-se à imagem um ruído gaussiano baseado nos valores de relação sinal-ruído (SNR) calculados por Gouvêa et al. (2009). O valor da relação sinal/ruído utilizado é a média entre os valores de relação sinal-ruído mínimo e máximo medidos em órbita (Tabela 3).

Tabela 3 - Valores de relação sinal ruído utilizados para a imagem HRC

	Largura de Banda ( $\mu\text{m}$ )	SNR
HR	0,50 – 0,80	37,5 dB

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** figura 3 mostra o resultado da imagem HRC Simulada juntamente com uma comparação com a imagem PRISM e uma imagem HRC da data de 22/08/2008.

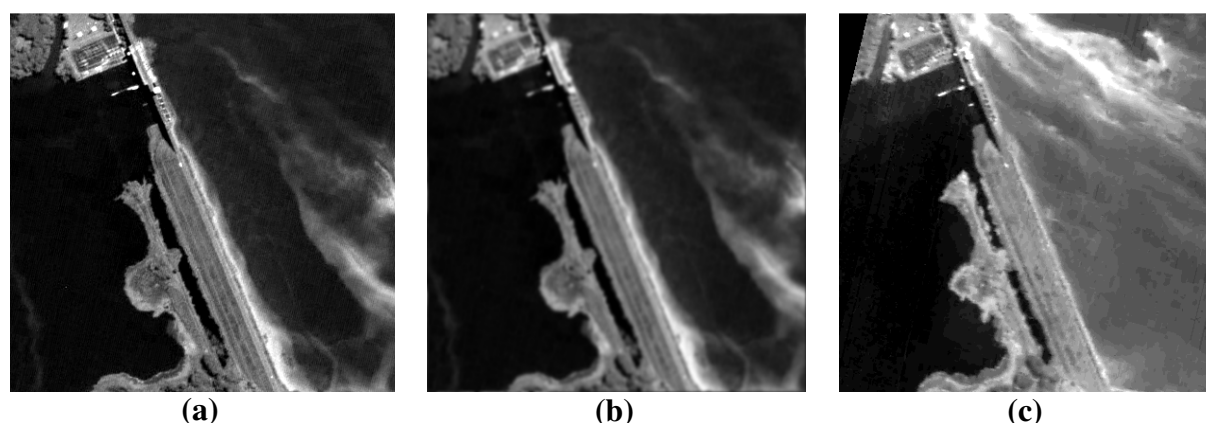


Figura 3 – (a) Imagem PRISM Original (b) Imagem HRC Simulada (c) Imagem HRC Original

Embora, as imagens PRISM e HRC tenham uma diferença de aquisição de, aproximadamente, 5 meses, pode-se observar, de uma forma geral, uma semelhança na acuidade visual das feições nas imagens. As diferenças observadas como, por exemplo, o acúmulo de material no entorno da barragem na imagem HRC simulada, são devido à diferença na data de aquisição.

## 6 Seleção do melhor método de restauração

Após a simulação da imagem HRC, os filtros de restauração foram aplicados à imagem simulada para serem comparados. Posteriormente, as medidas de avaliação foram calculadas para todas as imagens restauradas. Finalmente, foi feita a comparação entre as medidas de qualidade. A escolha do melhor método de restauração seguiu o critério dos melhores valores das medidas de qualidade para a imagem HRC Simulada. A Tabela 4 apresenta os valores de medida de qualidade para cada um dos filtros testados para restaurar as imagens HRC Simuladas. Os valores das medidas que indicam o melhor desempenho do filtro são marcados

em vermelho. O valor negativo para a medida ISNR indica maior sensibilidade do filtro ao ruído na imagem.

Quanto maior o valor do ISNR melhor é a robustez do método em relação ao ruído na imagem. A análise quantitativa (Tabela 4) mostrou que diferença de desempenho entre os filtros RL, FIM, Wiener não é muito significativa.

Tabela 4– Medidas de qualidade para imagem HRC simulada

Medidas/Filtros	Média	Desvio Padrão	ISNR	UIQI
RL	53,95	14,39	0,17	0,9367
Wiener	53,05	14,55	-0,20	0,9335
FIM	53,94	13,79	-0,06	0,9324

A Figura 4 mostra um recorte das imagens restauradas pelos filtros FIM, Wiener, RL. A análise visual mostrou que a imagem restaurada pelo filtro RL apresentou um efeito de realce semelhante aos filtros, Wiener e FIM, mas com um melhor controle do ruído. A imagem restaurada pelo filtro RL apresenta também um maior realce de feições, que pode ser observado na região da floresta, onde os componentes do dossel (espécies emergentes) estão mais bem definidos. Pode-se observar, também, uma melhor definição das feições na estrutura da barragem.

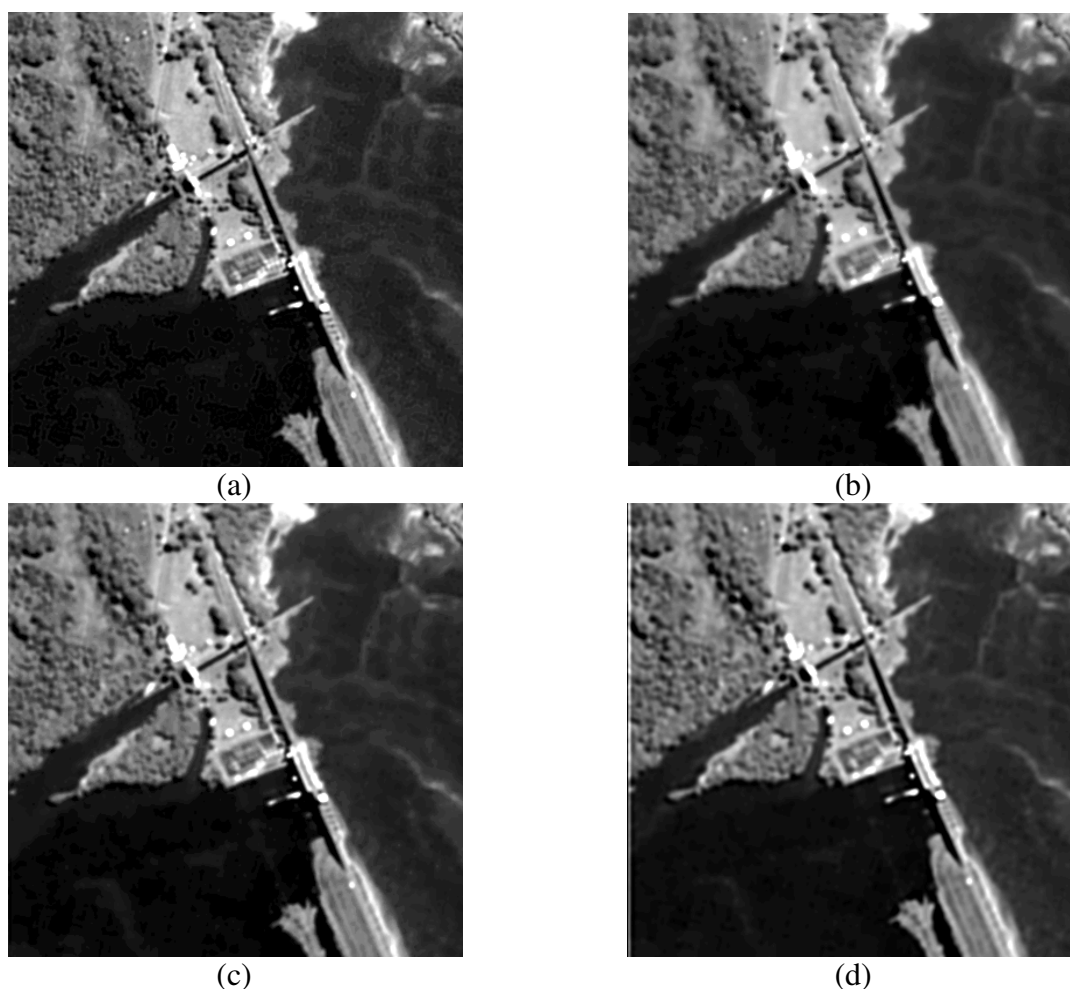


Figura 4 - Recortes das imagens Originais e Restauradas: (a) PRISM Original (b) FIM, (c) Wiener, (d) RL.

## 7 Conclusão

Este trabalho buscou comparar três técnicas de tradicionais de restauração aplicadas ao sensor HRC do satélite CBERS 2B, sendo elas: o filtro de Wiener o Filtro Inverso Modificado e o filtro de Richardson-Lucy. Para tal foi utilizada uma técnica de simulação de imagens, onde foi utilizada uma imagem do sensor PRISM do satélite ALOS como imagem de entrada, pois este apresentava características semelhantes ao sensor HRC.

A metodologia de simulação aplicada partiu dos dados da função de espalhamento pontual e do valor da relação sinal ruído para o sensor HRC CBERS 2B. Pode-se observar que a simulação teve êxito na simulação da resolução espacial do sensor HRC uma vez que visualmente as imagens originais HRC e simulada HRC tiveram similaridade. É necessário ressaltar que não houve preocupação em simular a resposta espectral do sensor HRC.

A comparação entre os métodos revelou que o filtro de Richardson-Lucy apresentou o melhor resultado na remoção do efeito de borramento. Este filtro também apresentou bons resultados na remoção do ruído aleatório. Entretanto a análise visual demonstrou que não houve diferença estatística significativa entre os métodos de restauração.

## Agradecimentos

À CAPES e INPE pelo auxílio financeiro.

## Referências

ALOS. Disponível em <http://www.ibge.gov.br/alos/sensores.php>. Acesso em jan. 2010

BANON, G. J. F. Simulação de imagens de baixa resolução. **Controle Automação**, v. 2, n. 3, p. 180-192, mar./abr. 1990. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/iris@1912/2005/07.19.20.30.33>>. Acesso em: 24 maio 2010.

FONSECA, L. M. G. **Restauração e interpolação de imagens do satélite landsat por meio de técnicas de projeto de filtros fir. 1988**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica) - Instituto Tecnológico da Aeronáutica. São Jose dos Campos: ITA, 1988.

FONSECA L.M.G. **Ralcam3 spatial resolution performance assessment**. (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009). Comunicação Pessoal.

LUCY, B. L. An iterative technique for the rectification of observed images. **The Astronomical Journal**, v. 79, n.6, p. 745-754, 1974.

FONSECA, L. M. G. **Restauração e interpolação de imagens do satélite landsat por meio de técnicas de projeto de filtros fir. 1988**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica) - Instituto Tecnológico da Aeronáutica. São Jose dos Campos: ITA, 1988.

PAPA, J.P.; MASCARENHAS, N.D.A.; FONSECA, L.M.G.; BENSEEBA, K. 2008. Convex restriction sets for CBERS-2 satellite image restoration. **International Journal of Remote Sensing**, 29(2), p. 443-458.

PUETTER, R. C.; GOSNELL, T. R.; YAHIL, A. Digital Image Reconstruction: Deblurring and Denoising. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**. v. 43, 139-194 p. 2005.

RICHARDSON, W. H. Bayesian-based iterative method of image restoration. *Journal of the Optical Society of America*, v. 62, n. 1, p. 55-59, 1972.

WANG, Z.; BOVIK, A. C. A universal image quality index. **IEEE Signal Processing Letters**, v. 9, n. 3, 81-84 p. 2002.



WHITE., R.L. Image restoration using the damped richardson-lucy method. **In Th restoration of HST images and spectra II**. Baltimore: Space Telescope Science Institute, 1994.