

1. Publicação nº, <i>INPE-4189-PRE/1076</i>	2. Versão	3. Data <i>Junho/87</i>	5. Distribuição <input type="checkbox"/> Interna <input checked="" type="checkbox"/> Externa <input type="checkbox"/> Restrita
4. Origem <i>DPI</i>	Programa <i>PREPRO</i>		
6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) <i>REAMOSTRAGEM TRANSFORMADA DE FOURIER</i> <i>RESTAURAÇÃO WIENER</i>			
7. C.D.U.: <i>519.674:528.711.7</i>			
8. Título <i>INPE-4189-PRE/1076</i> <i>"TÉCNICAS DE RESTAURAÇÃO PARA REAMOSTRAGEM DE IMAGENS DO SATÉLITE LANDSAT-5"</i>		10. Páginas: <i>12</i>	11. Última página: <i>12</i>
9. Autoria <i>Leila Maria Garcia Fonseca</i> <i>Nelson Delfino d'Ávila Mascarenhas</i> <i>Gerald Jean Francis Banon</i>		12. Revisada por <i>Flávio Roberto D. Velasco</i>	
Assinatura responsável <i>Leila M. G.</i>		13. Autorizada por <i>Dr. Marco Antonio Raupp</i> <i>Diretor Geral</i>	
14. Resumo/Notas <i>São mostrados neste trabalho alguns resultados da restauração para reamostragem de imagens do TM (Thematic Mapper), utilizando técnicas no domínio de Fourier. A imagem restaurada é comparada à imagem reamostrada com o interpolador de convolução cúbica. A comparação é feita visualmente e através do perfil radiométrico de uma linha da imagem.</i>			
15. Observações <i>Trabalho submetido para apresentação no V Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, que se realizará de 8 a 10 de Setembro de 1987, em Campinas, SP.</i>			

TÉCNICAS DE RESTAURAÇÃO PARA REAMOSTRAGEM
DE IMAGENS DO SATÉLITE LANDSAT-5

Leila M.G. Fonseca
Nelson D.A. Mascarenhas
Gerald J.E. Banon

Instituto de Pesquisas Espaciais
Caixa Postal 515 - São José dos Campos - SP

RESUMO

São mostrados neste trabalho alguns resultados da restauração para reamostragem de imagens do TM (Thematic Mapper), utilizando técnicas no domínio de Fourier. A imagem restaurada é comparada à imagem reamostrada com o interpolador de convolução cúbica. A comparação é feita visualmente e através do perfil radiométrico de uma linha da imagem.

I. INTRODUÇÃO

Desde a década de 40 muitos sistemas imageadores não-fotográficos têm sido desenvolvidos para detetar energia refletida ou emitida de uma cena remota [1]. Nas últimas décadas os sensores MSS (Multispectral Scanner) e TM (Thematic Mapper) do satélite Landsat e HRV (High Resolution Visible) do Spot têm-se destacado na importante missão de gerar imagens com resoluções espacial e radiométrica cada vez melhores.

No processo de formação de imagem, devido à propriedade de difração do elemento ótico, transientes nos componentes eletrônicos e efeitos de espalhamento na atmosfera, as componentes em alta frequência existentes na cena original são atenuadas ou eliminadas. São estas componentes que

dão os detalhes da cena, e, quando atenuadas, os detalhes são suavizados gerando uma imagem que é uma cópia borrada da cena.

Em sensoriamento remoto é de interesse melhorar a resolução espacial e radiométrica das imagens, e, então, uma boa aproximação da imagem original sobre uma grade fina torna-se necessária. Técnicas de interpolação para reamostrar os dados de imagens sobre uma grade mais fina como a do Vizinho Mais Próximo (VMP), Bilinear e Convolação Cúbica têm sido utilizadas [2-5].

Uma técnica de reamostragem que tem dado resultados mais satisfatórios é a de restauração de imagens [3,4,6]. A restauração não é propriamente uma técnica de interpolação. Entretanto, pode ser utilizada como uma técnica de reamostragem pela estimativa do valor de radiância da cena nos pontos da grade desejada.

Este trabalho propõe mostrar alguns resultados de restauração utilizando técnicas no domínio de Fourier como a Compensação da Função de Transferência (CFT) [8,9] e do filtro de Wiener [10]. Estas técnicas são aplicadas para reamostrar uma imagem TM (Thematic Mapper) do Landsat-5 em uma grade de 15 m ("pixel" original=30 m). A imagem cobre o aeroporto de Cubica em São Paulo (7/11/85, banda 3) e tem somente correção de "skew".

Uma imagem restaurada é comparada à imagem reamostrada com o interpolador de convolação cúbica [2] visualmente e através do perfil radiométrico ao longo de uma linha da imagem. O interpolador de convolação cúbica foi escolhido por gerar imagens de melhor qualidade que o VMP e bilinear.

II. MODELOS DOS SISTEMAS IMAGEADORES

Idealmente a saída de um processo de formação de imagem corresponde a medidas das intensidades da imagem sobre uma grade de pontos Λ . A saída, devido às degradações inerentes ao sistema, é modelada como uma saída

amostrada de um sistema linear e invariante no espaço mais um ruído aditivo (Fig. 1):

$$g_{\Lambda}(\underline{x}) = [h(\underline{x}) * f(\underline{\eta}) + n(\underline{x})] S_{\Lambda}(\underline{x}).$$

$$[g_T(\underline{x}) + n(\underline{x})] S_{\Lambda}(\underline{x}) = g(\underline{x}) \cdot S_{\Lambda}(\underline{x}), \quad (1)$$

onde \underline{x} é um vetor bidimensional de coordenadas espaciais, f a cena original, h a FEP* do sistema, n o ruído aditivo independente do sinal, g_{Λ} a imagem de saída amostrada e S_{Λ} uma função de amostragem bidimensional, onde Λ define a grade de amostragem usada.

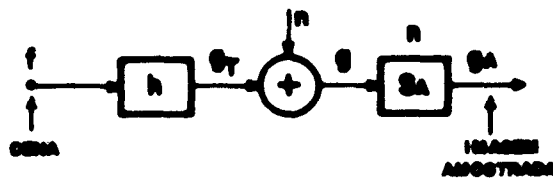


Fig. 1 - Modelo contínuo-discreto para um sistema imageador [10].

Considerando a frequência de amostragem suficientemente grande em relação às frequências contidas em g , pode-se lidar com g ao invés de g_{Λ} . A transformada de Fourier de g , no caso unidimensional, é representada por

$$G(u) = F(u) \cdot H(u) + N(u), \quad (2)$$

onde G , F , H e N são as transformadas de Fourier de g , f , h e n , respectivamente.

A função H é conhecida como a função de transferência do sistema. Quando a fase de H é zero ou desprezível, o sistema pode ser caracterizado somente pelo seu módulo, conhecido como a Função de Transferência de Modulação (FTM).

* FEP - Função de Espalhamento Pontual é equivalente à resposta impulsiva da teoria de controle.

III. O PROBLEMA DE INTERPOLAÇÃO E RESTAURAÇÃO DE IMAGENS

Na área de processamento de imagens a técnica de estimar valores de amostras de uma imagem em pontos de uma grade desejada, cujo tamanho é dado pelo tamanho de cada elemento de imagem ("pixel"), é conhecida como reamostragem. É uma técnica muito utilizada nos processos de correção geométrica e ampliação de escalas.

O processo de reamostragem é um problema de reconstrução - de terminação de uma imagem analógica a partir de um conjunto de amostras da imagem degradada:

$$gr(x) = g\Delta(x)*r(x), \quad (3)$$

onde r é o filtro de reconstrução e gr é a estimativa de g (Fig. 2).

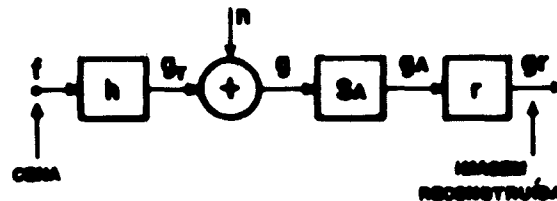


Fig. 2 - Modelo do processo de reconstrução.

Alternativamente o estimador poderia ser derivado para estimar a cena original, antes do sensor, e r seria o filtro de restauração, cuja saída seria a estimativa de f . Desta forma, usando coeficientes de processamento apropriados (obtidos por um método de restauração eficiente), dados de imagem com qualidade espacial e radiométrica, levemente melhor que os dados brutos podem ser sintetizados durante o processo de reamostragem [4].

IV. TÉCNICAS DE RESTAURAÇÃO

O processo de restauração pode ser melhor entendido através da Eq. (2), onde F pode ser obtida pela divisão de G por H , isto é,

$$F(u) = \frac{G_T(u)}{H(u)} + \frac{N(u)}{H(u)} \quad (4)$$

A estimativa \hat{f} pode ser obtida pela transformada inversa de (4), a saber,

$$\hat{f}(x) = \tau^{-1} \left[F(u) + \frac{N(u)}{H(u)} \right]. \quad (5)$$

Esta aproximação é conhecida como método do filtro inverso. Na prática o filtro inverso é irrealizável devido a sua instabilidade e à existência de zeros em H. Alguma aproximação deve ser feita.

Baseado em Arguello et al. [8] e George et al. [9] este trabalho sugere uma aproximação no domínio de Fourier da qual pode ser derivado um operador linear no domínio espacial.

F será aproximada por \hat{F} no domínio da frequência,

$$\hat{F}(u) \sim F(u) \quad (6)$$

onde $\hat{F}(u) = G(u).R(u)$, e (7)

R é o filtro de restauração.

Substituindo G, obtêm-se, na ausência de ruído,

$$\hat{F}(u) = F(u).H(u).R(u). \quad (8)$$

O produto H.R resulta numa função denominada D,

$$D(u) = H(u).R(u), \quad (9)$$

que seria a função de transferência desejada do sistema.

Desde que é desejável restaurar, da melhor forma possível, o conteúdo em alta frequência de F, deve-se selecionar uma função D que é positiva e diferente de zero na faixa que se deseja restaurar, e que minimize o "overshoot" no domínio espacial [9].

Selecionada D, R pode ser determinada diretamente:

$$R(u) = D(u)/H(u). \quad (10)$$

Assim a transformada inversa de R, r , é uma função que, quando convolvida com

a cena degradada, resulta numa imagem \hat{f} próxima de f .

A técnica descrita acima é conhecida por Filtro Inverso Modificado (FIM) ou Compensação da Função de Transferência (CFT) [8].

O filtro de Wiener avalia quão próximo \hat{f} está de f pelo critério do erro quadrático médio. O filtro, sob este critério, no domínio de Fourier, é dado por

$$R(u) = \frac{1}{H(u)} \left[\frac{|H(u)|^2}{|H(u)|^2 + P_n(u)/P_f(u)} \right], \quad (11)$$

onde P_n e P_f são os espectros de potência do ruído e sinal, respectivamente. Geralmente não se tem informação da relação P_n/P_f , que pode ser aproximada por uma constante K [7]. Esta é determinada empiricamente.

V. APLICAÇÃO

Um parâmetro de extrema importância nos esquemas de restauração é a FTM do sistema. A FTM do TM é aproximada por um modelo gaussiano separável, onde a variância é dada pela relação [6],

$$\sigma^2 = \frac{W_{1/2}^2}{8 \ln 2}, \quad (12)$$

onde $W_{1/2}$ é a largura da função de espalhamento na metade de seu valor máximo. Foram utilizados os dados de Fonseca [11] no cálculo de σ^2 . O valor encontrado foi de $312,23m^2$ e $371,71m^2$, aproximadamente, ao longo da linha e coluna da imagem do TM (bandas 1-4).

A imagem do TM, que cobre o aeroporto de Cumbica em São Paulo (7/11/85, banda 3), é reamostrada numa grade de 15m utilizando o interpolador de convolução cúbica paramétrica com $\alpha = -0,5$ [2], FIM e filtro de Wiener.

Uma "função de compensação ideal" é usada [8] para o FIM (Eq. (10)):

$$D(u) = \begin{cases} 1 & 0 \leq u \leq U_0, \\ 0,5 + 0,5 \cos\{\pi(u - U_0)/(u - U_0)\} & U_0 < u \leq U_n, \end{cases}$$

onde U_n é a frequência de Nyquist do TM que é igual a 0,01669 ciclos por metro (ciclos/m). Esta função passa uma certa banda da cena sem distorção. Desde que a FTM do TM é separável [11], o filtro $r(x)$ é também separável. O tamanho do filtro de restauração escolhido é 8x4 "pixels" ao longo da linha e coluna da imagem, truncado com uma janela parabólica (janela de Shlien).

A Fig. 3 mostra a FTM do TM (bandas 1-4) e a "função ideal" com $U_0 = 0,00902$ ciclos/m. Entretanto à medida que se aumenta U_0 , mais o FIM se aproxima do filtro inverso e a instabilidade do filtro é aumentada.

A Fig. 4 ilustra os FIMs para dois valores de frequência U_0 e de Wiener para $K = 0,1$. O FIM tem o mesmo comportamento do filtro inverso até a frequência U_0 escolhida, e a partir desta ocorre uma suavização. Observando as curvas, verifica-se que o FIM com $U_0 = 0,01202$ ciclos/m, próxima da frequência de Nyquist, tem realce maior. Por outro lado pode-se observar na Fig. 5 que sua função de espalhamento possui níveis de lóbulos laterais maiores (NLL). Lóbulos laterais são indesejáveis em $r(x)$ porque geram "overshoot" na imagem. Os filtros de Wiener e FIM com $U_0 = 0,00902$ ciclos/m possuem menores NLL às custas de um realce menor. O filtro de Wiener atenua aquelas frequências onde a relação sinal/ruído é alta, isto é, na vizinhança de $u = 0$. O uso de um K menor para remediar este problema provocaria o realce das frequências próximas de U_n originando uma imagem ruidosa.

As Figuras 6-8 correspondem à sequência de imagens do TM que mostram uma comparação entre a imagem interpolada com o interpolador de convolução cúbica e a restaurada com o FIM, $U_0 = 0,01202$ ciclos/m (512x512 "pixels"). As imagens restauradas com o FIM ($U_0 = 0,00902$ ciclos/m) e com o de Wiener não são mostradas porque estas se mostraram visualmente semelhantes.

A imagem interpolada apresenta um aspecto borrado enquanto na

restaurada nota-se mais realce, principalmente de objetos lineares presentes na imagem.

Dos perfis radiométricos ao longo de uma linha da imagem pode-se observar que onde aparecem picos ou vales acentuados, os valores obtidos pela restauração são, geralmente, mais extremos. Observa-se também que as variações bruscas de níveis de cinza são acompanhadas de "overshoot". Em áreas mais uniformes foi observado que os valores da imagem restaurada mostra pequenas flutuações onde a interpolada é aproximadamente plana. Este comportamento pode ser explicado pelo efeito de suavização do interpolador de convolução cúbica, assim como pelo ruído introduzido na restauração ou até mesmo informações consistentes com pequenos detalhes visíveis em fotos aéreas [3].

VI. CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi mostrar alguns resultados da restauração aplicada na reamostragem de imagens do TM utilizando técnicas, no domínio de Fourier, simples, de baixo esforço computacional, e fáceis de ser usadas.

Visualmente as imagens restauradas apresentaram melhor qualidade espacial do que a imagem reamostrada com o interpolador de convolução cúbica. Os resultados foram satisfatórios partindo do ponto de que os problemas da filtragem inversa foram evitados [10].

Deve-se observar, finalmente, que a análise dos resultados poderia ser mais precisa se apoiada em um modelo do terreno.

VII - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] HORD, R.M. Digital image processing of remotely sensed data. New York, N.Y., Academic, 1982.

- [2] PARK, S.K.; SHOWENGERDT, R.A. Image reconstruction by parametric cubic convolution. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 23(3): 258-272, Sept., 1983.
- [3] KALMAN, L.S. Comparison of cubic-convolution interpolation and least-squares restoration for resampling Landsat MSS imagery. Datilografado.
- [4] WILSON, C.L. Image mapping software at ERIM; Annual International Users' Conference on Computer Mapping Hardware, Software, and Data Bases, Cambridge, MA, July 15-20, 1979. 21 p.
- [5] BERNSTEIN, R. All-digital precision processing of ERTS images; Final Report. Greenbelt, MD, NASA. GSFC, 1975. (NAS5-21716).
- [6] MALARET, E.R. Methods of image restoration for incoherent and coherent systems. Ph.D. thesis. West Lafayette, IN, Purdue University, School of Electrical Engineering, 1985.
- [7] BRIGHAM, E.O.; SMITH, H.W.; BOSTICK, F.X.; DUESTERHOEFT, W.C. An iterative technique for determining inverse filters. IEEE Trans. on Geoscience Electronics, 6(2):86-96, May, 1968.
- [8] ARGUELLO, R.J.; SELLNER, H.R.; STULLER, J.A. Transfer function compensation of sampled imagery. IEEE Transactions on Computers, 21(7):812-818, July, 1972.
- [9] GEORGE, C.F.; SMITH, H.W.; BOSTICK, F.X. The applications of inverse convolution techniques to improve signal response of recording geophysical data. Proceedings of the IRE, 50(11):2313-2319, Nov., 1962.
- [10] ANDREWS, H.C.; HUNT, B.R. Digital image restoration. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 1977.
- [11] FONSECA, L.M.G. Determinação e avaliação das funções de transferência de modulação dos sistemas MSS e TM (Landsat-5). S.J. Campos, INPE, 1987. No prelo.

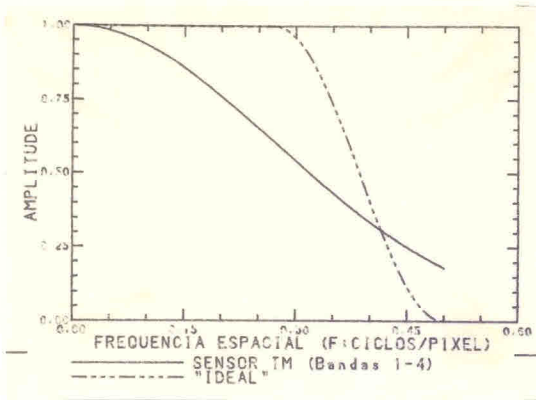


Fig.3-FTM dos sistemas TM e "desejada".

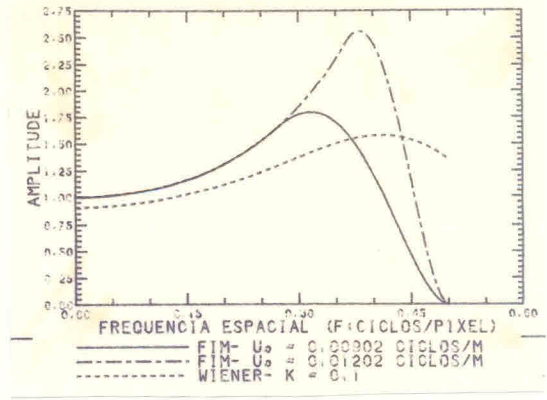


Fig.4-Filtros de restauração.

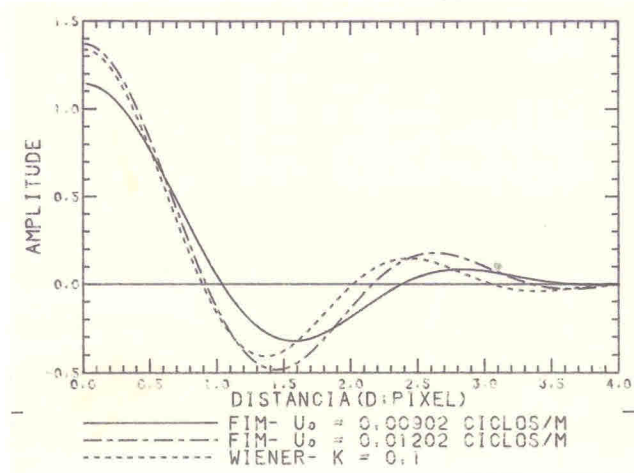


Fig.5-Funções de espalhamento dos filtros de restauração.



Fig.6-Imagem do TM original (512x512), banda 3, cobrindo o aeroporto de Cumbica, "pixel" = 30 m.
-A região central de 256x256 "pixels" na imagem foi tomada para reamostragem.

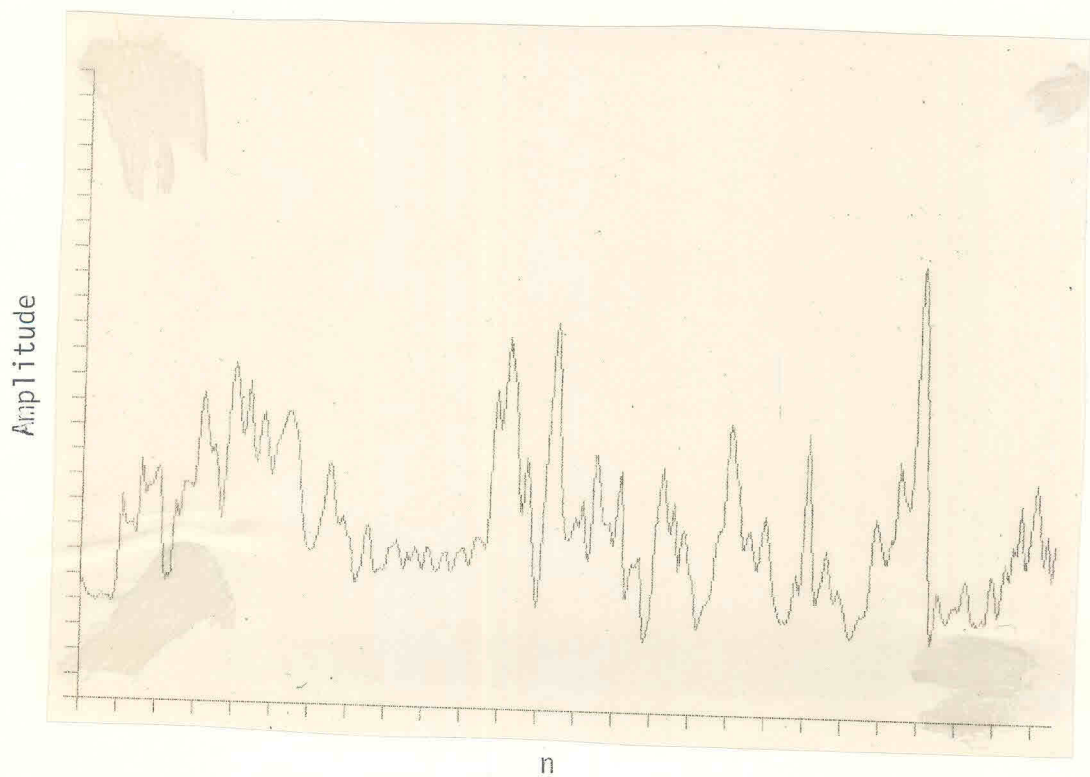


Fig.7-Imagem interpolada - convolução cúbica, "pixel" = 15m.
-O perfil radiométrico da linha 263 é mostrado.

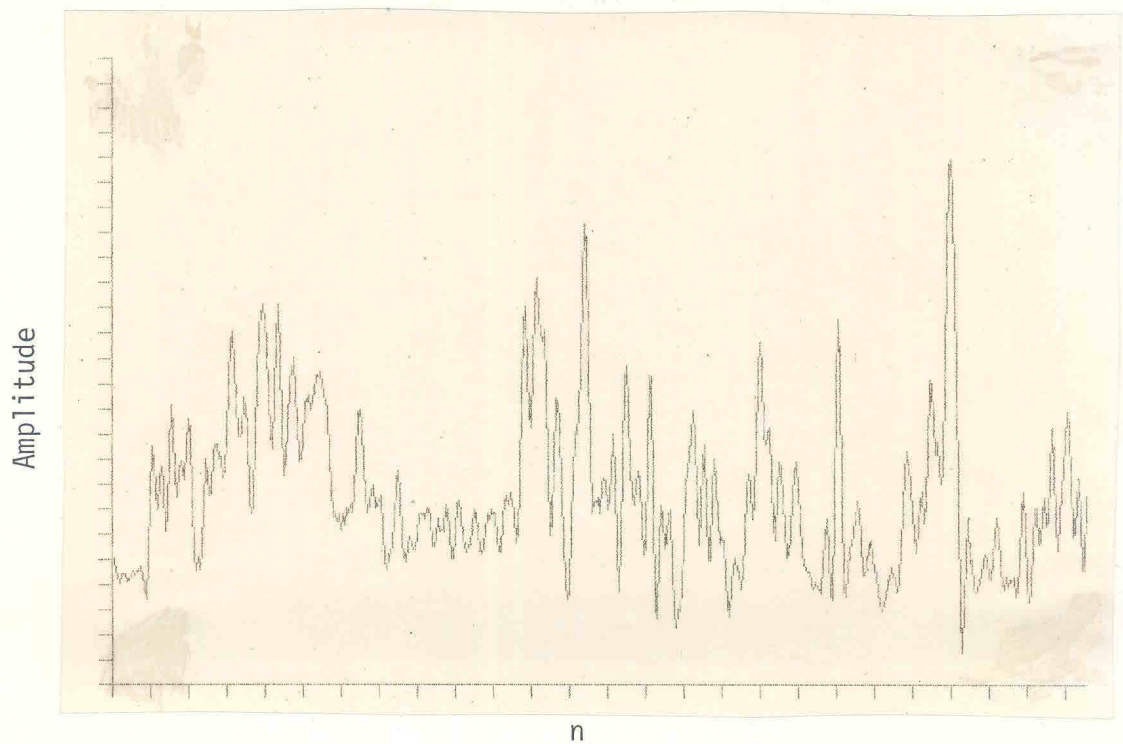


Fig.8-Imagem restaurada - FIM, $U_0 = 0,01202$ ciclos/m, "pixel" = 15m.
-O perfil radiométrico da linha 263 é mostrado.