

Determinação da resolução espacial efetiva da câmera HRC-CBERS-2B pelo método de espalhamento de borda

Lino Augusto Sander de Carvalho ¹

Cesar Strauss ¹

Leila Maria Garcia Fonseca ¹

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil

lino@dsr.inpe.br , cstrauss@cea.inpe.br , leila@dpi.inpe.br

Abstract. The CBERS-2B (China-Brazil Earth Resources Satellite) was launched on October 2007 and carries three sensors: a Wide Field Imager (WFI), a Medium Resolution Camera (CCD) and a High Resolution Camera (HRC). Due to the limitations of the sensor components (diffraction, electronic filter, focusing error, transitions from air to vacuum and thermal state) and the movement of the satellite during the imaging process, the images acquired by the imaging system undertake a blurring effect. To assess this effect, a parameter known as EIFOV (Effective Instantaneous Field of View) can be used. This parameter is obtained from PSF (Point Spread Function) or MTF (Modulation Transfer Function) that is modeled as a Gaussian function. This function is estimated using different subimages of natural edges extracted from the original image of a scene. Therefore, this paper aims to calculate the effective spatial resolution of HRC camera on-board of CBERS-2B. The EIFOV values are estimated in along- and across-track direction based on approach proposed by Bensebaa et al. (2007).

Palavras-chave: Função de Espalhamento Pontual, Câmera de Alta Resolução, Método do Degrau de Borda, Point Spread Function, High Resolution Camera, Step Edge Method.

1. Introdução

Antes e após o lançamento de um satélite, testes de avaliação de desempenho dos sensores a bordo são realizados. Parâmetros que medem a qualidade radiométrica e geométrica das imagens são medidos e comparados com os parâmetros especificados no projeto dos sensores. Um dos parâmetros medidos é a Função de Transferência de Modulação (FTM) ou sua transformada de Fourier inversa, a Função de Espalhamento Pontual (FEP) do sensor, que nos dá uma indicação do desempenho do sensor em termos de sua resolução espacial efetiva (Fonseca, 1988). Antes do lançamento, alguns valores da FTM, para algumas frequências, são medidos. A partir destes dados e da suposição de que a FTM pode ser modelada como uma função gaussiana (Fonseca, 1988), esta função pode ser estimada. Outro parâmetro muito utilizado para avaliar a resolução espacial do sensor após o lançamento é o EIFOV (*Effective Instantaneous Filed of View*), que é medido em função do desvio padrão da função FEP estimada como uma gaussiana.

Vários métodos são utilizados na obtenção da FTM. Um deles é a determinação da função de espalhamento de borda (FEB), que pode ser obtida através de uma imagem de bordas de uma superfície opaca. Dada a função de borda ideal (f) como entrada de um sistema linear e invariante ao deslocamento (H), a saída é uma função de borda borrada (Figura 1).

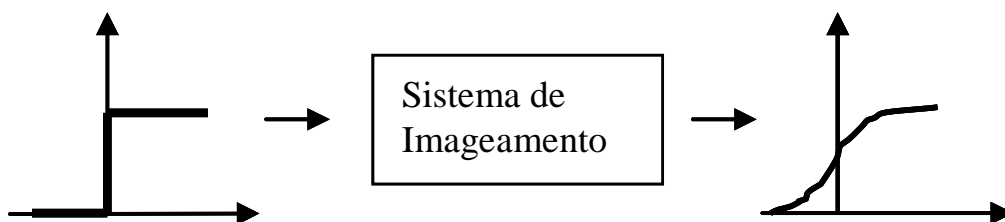


Figura 1. Sistema de Imageamento linear e invariante ao deslocamento

Neste caso, segundo Bensebaa et al. (2007), a Função de Espalhamento de Borda (FEB) pode ser caracterizada pela Função Erro (ERF), que é a convolução de uma função degrau ideal com a função gaussiana. A diferenciação da FEB dá origem a uma segunda função, chamada de Função de Espalhamento de Linha (FEL), conforme mostra a Equação 1:

$$FEL(x) = \frac{d}{dx} FEB(x) \quad (1)$$

Assim, a Função de Espalhamento Pontual (FEP) do sistema é obtida a partir do módulo normalizado da FEL (Fenster e Cunningham, 1987).

Este trabalho tem como objetivo determinar a resolução espacial efetiva da câmera HRC do satélite CBERS-2B, utilizando o método proposto por Bensebaa et al., (2007). As características da câmera HRC são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1: Características da câmera HRC- CBERS-2B.

Banda espectral	0,50 - 0,80 μm
Campo de Visada	2,1°
Resolução espacial	2,7 x 2,7 m
Largura da faixa imageada	27 km (nadir)
Resolução temporal	130 dias na operação proposta
Taxa de dados da imagem	432 Mbit/s (antes da compressão)
Quantização	8 bits

2. Metodologia

O método consiste em estimar a Função de Espalhamento Pontual do sistema de imageamento a partir de imagens de bordas naturais. Estas bordas naturais são caracterizadas por variações bruscas de níveis de cinza entre alvos na imagem. Um tipo de alvo adequado para este estudo são áreas de culturas agrícolas, que podem ser considerados alvos homogêneos (pouca variação de tons de cinza) dentro do seu contorno.

Considerando a borda do alvo natural como ideal, a resposta do sistema é modelada como uma função gaussiana e a imagem deste alvo é modelada como uma função ERF (Equação 4). O parâmetro EIFOV é calculado diretamente em função do desvio padrão da Função de Espalhamento Pontual (Bensebaa et al., 2007).

Como as bordas dos alvos naturais estão dispostas em diferentes direções, vários recortes de imagens de bordas em diferentes direções são usados no experimento. Outra necessidade do uso de diferentes recortes é o fato de que o espalhamento nas direções *along-track* e *across-track* é diferente, exigindo que o desvio padrão seja calculado nestas duas direções.

Inicialmente, escolhemos o conjunto de imagens de borda a serem processadas. As imagens são realçadas e transformadas em imagens binárias. Posteriormente, aplicamos um ajuste linear aos pontos de borda para determinar a borda contínua. Após o ajuste, extraímos o perfil radiométrico da borda. Por fim, aplicamos um ajuste não linear ao perfil radiométrico para obter o desvio padrão da curva. A partir do conjunto de valores de desvio padrão obtidos através de todos os recortes, calculamos o valor de EIFOV ótimo.

A metodologia é apresentada segundo o diagrama da Figura 2, e será descrita, com mais detalhes, nas seções a seguir.

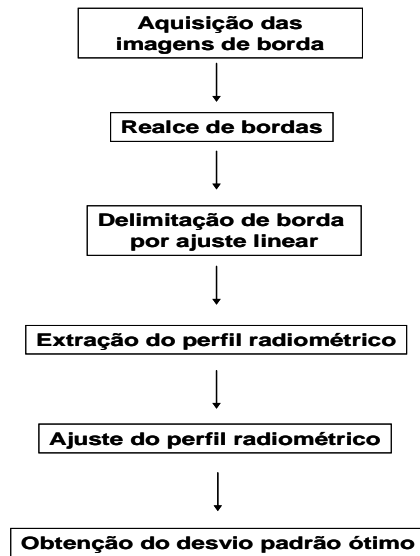


Figura 2. Etapas de processamento para determinação do EIFOV.

2.1 Escolha da Cena

A cena HRC/CBERS-2B escolhida foi adquirida na órbita ponto 166/113, na data de 04 de junho de 2008, na região da cidade de Sorriso, Estado de Mato Grosso, Brasil (INPE, 2008). Esta região foi escolhida devido à presença de áreas de cultivo agrícola, que apresentam bordas visíveis e com bom contraste (Figura 3).

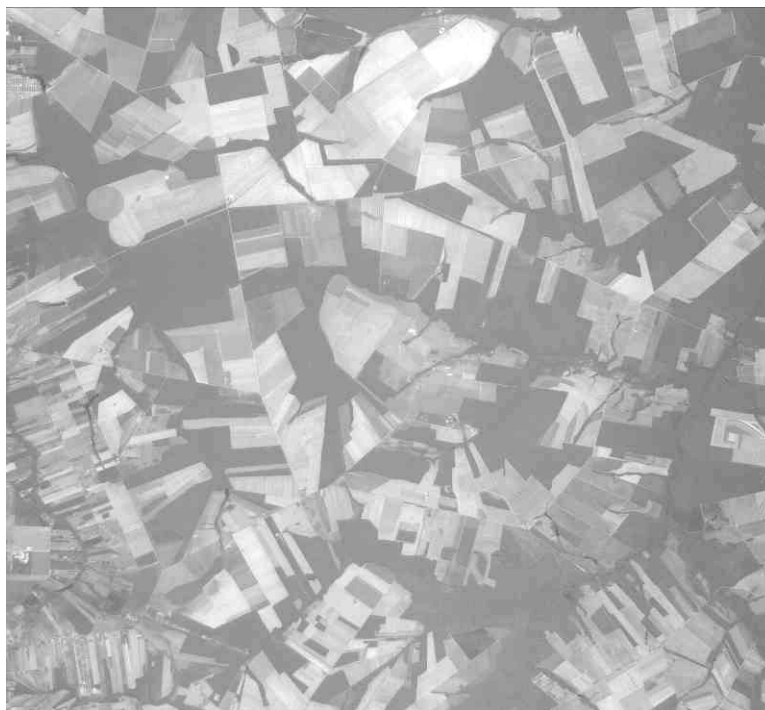


Figura 3. Cena HRC-CBERS-2B órbita ponto (166/113).

Selecionamos oito (8) recortes dentre os vinte e um (21) que obtivemos, mostrados na Figura 4. Os critérios para a escolha dos recortes foram: (1) bordas com contraste alto e (2) maior variação angular possível entre os recortes.

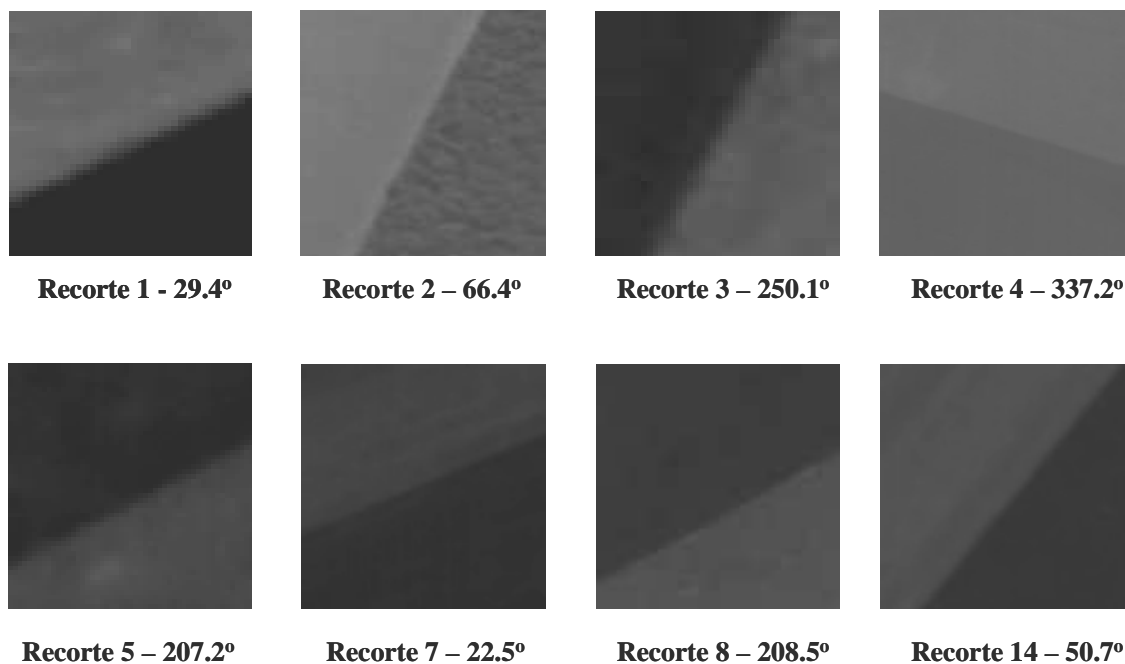


Figura 4. Recortes selecionados.

2.2 Identificação da Borda

Para a identificação das bordas, usamos o filtro “Sobel” (Gonzales e Woods, 1992). A seguir, as imagens de gradiente de bordas foram limiarizadas para gerar imagens binárias separando os *pixels* em “*pixels de borda*” e “*pixels não-borda*”. A Figura 5 mostra o resultado do procedimento aplicado para o Recorte 8. O mesmo procedimento foi aplicado para os outros recortes.

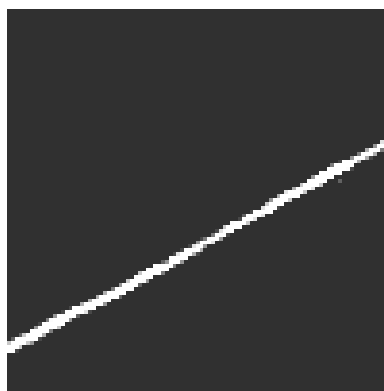


Figura 5. Recorte 8 após Filtragem e Limiarização.

2.3 Ajuste linear dos pontos de Borda.

Nesta fase, nós ajustamos uma reta aos *pixels* de borda, através de regressão linear mostrada na Equação 2:

$$y = ax + b \quad (2)$$

onde, y é a reta que minimiza o erro quadrático (Wonnacott e Wonnacott, 1980). O resultado desta operação é apresentado na Figura 6.

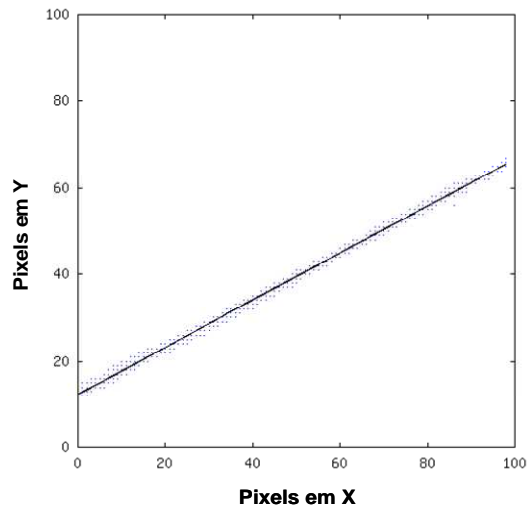


Figura 6. Ajuste linear dos pixels de borda do Recorte 8.

Posteriormente à regressão linear, calculamos a seção transversal ao longo da normal da reta ajustada. Para cada ponto na direção desta seção transversal, obtivemos o valor de seu nível de cinza e o plotamos em um gráfico, em função da distância do ponto à borda ($x = 0$). Este resultado estabelece a relação entre a distância do ponto à reta ajustada e seu correspondente valor de nível de cinza (pontos em azul na Figura 7).

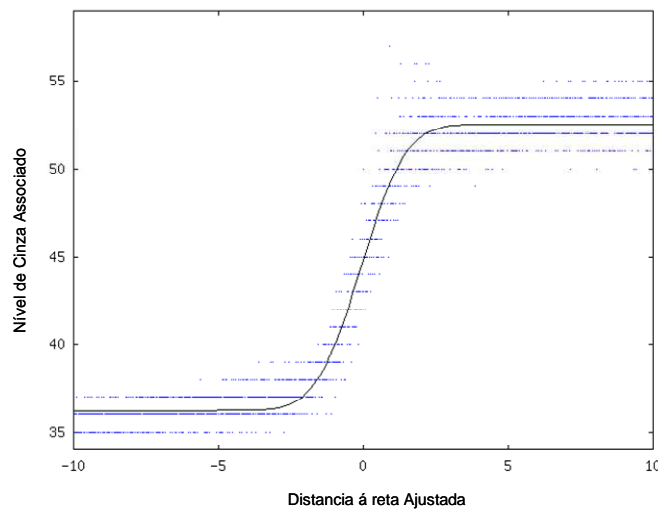


Figura 7. Seção transversal e ajuste não linear para o Recorte 8.

A Equação 3 descreve o método de cálculo (Santos, 1999):

$$\rho(x, y) = \frac{(ax + b - y)}{\sqrt{1^2 + a^2}}, \quad (3)$$

2.4 Ajuste do perfil do sensor por regressão não-linear

Uma vez encontrada a seção transversal à normal da reta ajustada, um ajuste não linear foi efetuado de forma a ajustar uma curva contínua aos pontos, como mostra a Figura 7 (Bensebaa et al., 2007). O método utilizado baseou-se na aproximação da Função de Espalhamento de Borda (FEB) através da Função Erro, conforme descrito na Equação 4:

$$erfc = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt , \quad (4)$$

O modelo da Função de Espalhamento de Borda é então representado pela Equação 5 (Bensebaa et al., 2007):

$$FEB(\rho) = 0.5 \cdot erfc\left(\frac{(\mu + \rho)}{\sqrt{2} \cdot \sigma}\right) \cdot (P_1 - P_2) + P_2 , \quad (5)$$

onde P_1 e P_2 representam o menor e o maior valor da seção cruzada calculada, respectivamente. Os parâmetros μ e σ representam, respectivamente, os parâmetros de média e desvio padrão da função ajustada.

O algoritmo ajusta o valor ótimo de μ e ρ de acordo com o cálculo de Erro Médio Quadrático. O ajuste foi realizado para todos os recortes considerados. O ajuste para o Recorte 8 está representado na Figura 7.

2.5 Ajuste à Elipse

Uma vez calculados os valores de σ para cada um dos recortes selecionados, o problema se reduz ao ajuste de uma elipse aos pontos associados ao desvio padrão (Bensebaa et al., 2007). A separação da FEB nas componentes nas direções x e y permite que os pontos sejam ajustados à elipse, cuja fórmula dada por (Equação 6):

$$\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2} = 1 , \quad (6)$$

Os valores de EIFOV, calculados para cada um dos recortes, estão dispostos no gráfico da Figura 8, onde o eixo x representa os valores do EIFOV na direção *across-track*, e o eixo y representa os valores de EIFOV na direção *along-track*.

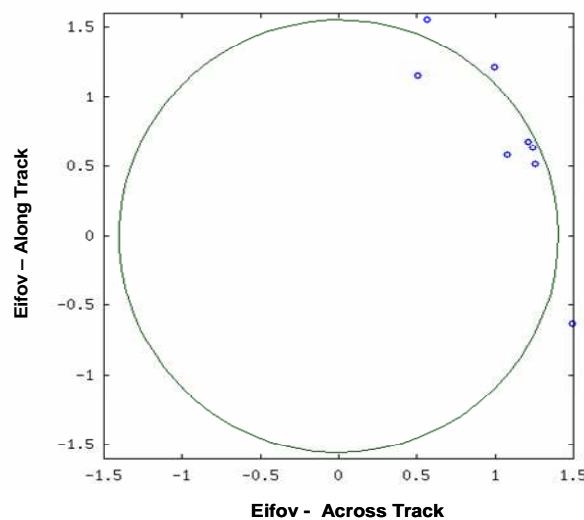


Figura 8. Ajuste à Elipse.

Os pontos são calculados de acordo com as seguintes equações:

$$x = \sigma \cdot \frac{1}{\sqrt{a^2 + 1}}, \quad y = \sigma \cdot \frac{|a|}{\sqrt{a^2 + 1}}, \quad (7)$$

onde σ é o valor previamente calculado para o desvio padrão da borda de cada um dos recortes tomados. O ajuste da elipse nos leva aos valores do desvio padrão nas direções x e y (σ_x e σ_y).

Apesar dos recortes obtidos apresentarem variações que vão de 29.4° a 337.2°, as inclinações obtidas do ajuste linear se limitam à faixa entre -90° e 90°. Por esta razão não temos pontos nos quadrantes à esquerda. Entretanto, este fato não representa problema, pois o algoritmo traz todos os pontos para o primeiro quadrante ao ajustar a elipse, aproveitando a propriedade de simetria.

2.6 Cálculo do EIFOV

Após o cálculo do valor ótimo de σ , o valor do EIFOV ótimo é calculado a partir da fórmula abaixo (Slater, 1980):

$$EIFOV_{\text{Ótimo}} = 2,35\sigma_{\text{Ótimo}} \text{ PIXEL}, \quad (8)$$

onde o fator 2,35 foi obtido determinando-se a largura da gaussiana onde a função FEP é igual a 0,5 (Equação 9):

$$e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} = \frac{1}{2}, \quad (9)$$

Logo, $t = \sqrt{2\ln 2}$ e $2t = 2,35$

3. Resultados

Os valores do EIFOV nas direções *along-track* e *across-track* são obtidos a partir dos eixos horizontal e vertical da elipse (σ_x e σ_y). A Tabela 1 apresenta os valores de EIFOV_{Ótimo} calculados, juntamente com o valor do IFOV nominal do sistema.

Tabela 1 – Valores de IFOV nominal e EIFOV_{Ótimo} calculado da câmera HRC-CBERS.

	IFOV	EIFOV
<i>Along -Track</i>	2,7 m	4,1 m
<i>Cross - Track</i>	2,7 m	4,6 m

Na teoria, os valores de EIFOV são aproximadamente 1,5 vez o valor da resolução nominal. Ou seja, no caso da HRC, que foi projetada com uma resolução nominal de 2,7 m, o EIFOV esperado é aproximadamente igual a 4,05 m. Pelos resultados obtidos, podemos concluir que a resolução efetiva do sensor HRC na direção *along-track* atende os requisitos de especificação da câmera, enquanto que na direção *across-track*, a resolução efetiva está um pouco fora das especificações. Isto quer dizer que as imagens da câmera HRC apresentam um pequeno efeito de borramento. Este borramento pode ser provocado pelo movimento do satélite, similar ao “andar de um caranguejo”, que se desloca fazendo um movimento para os lados.

4. Conclusão

Este trabalho calculou os valores de EIFOV nas direções *along-* and *cross-track* do sensor HRC-CBERS-2B utilizando o Método de Degrau de Borda proposto por Bensebaa et al. (2007). De uma forma geral, o procedimento de determinação da FEP de uma câmera em órbita é bem mais desafiador do que uma medida realizada em laboratório, onde as condições são controladas e os alvos são ideais. Em órbita, limitações como baixo contraste das bordas, inclinações de borda variáveis, textura e não-uniformidades na vizinhança da borda, além de outros fatores, introduzem incertezas no cálculo.

Os valores obtidos indicaram que a resolução efetiva do sensor HRC está fora de especificações na direção *across-track*, o que provoca uma pequena perda de resolução das imagens, produzindo a aparência de um pequeno borramento.

O algoritmo foi implementado em C++ utilizando a biblioteca Terralib.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo apoio financeiro à execução deste trabalho.

Referencias Bibliográfica

Bensebaa K. W.; Fonseca, L. M. G.; Banon G. J. F.; Erthal, G. J. On-orbit Spatial Resolution Estimation of CBERS-2 Imaging System Using Ideal Edge Target, In: **Signal Processing for Image Enhancement and Multimedia Processing**. Springer, 2007, 1ª ed., v.31, p. 1-14.

China-Brasil Earth Resource Satellite (CBERS). Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>>. Acesso em: 15.set.2008.

Cunningham, I. A.; Fenster, A. A method for modulation transfer function determination from edge profiles with correction for finite-element differentiation. **Medical Physics**, v. 14, n.17, p. 533-537, 1987.

Déliot, P.; Viallefont, F.; Léger, D.; Valorge, C. On-orbit MTF assessment of satellite cameras. In: Morain e Budge (Org.) **Post – Launch Calibration of Satellite Sensors**. ISPRS Book Series, Taylor & Francis Group, London, 2004. 193 p, v. 2.

Fonseca, L. M. G. **Restauração e interpolação de imagens do satélite Landsat por meio de técnicas de projeto de filtros FIR**. 1988. 148 p. (INPE-6628-TAE/30). Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos. 1988.

Gonzalez R. C., Woods, R. E. **Processamento de Imagens Digitais**. Editora Edgard Blücher, 2000. 509 p.

Santos, R. J. **Um curso de geometria analítica e álgebra linear**. Editora Imprensa Universitária, 2001. 226p.

Slater, P. N. **Remote Sensing optics and optical system**. London: Addison and Wesley, 1980. 467 p.

Wonnacott, T. H.; Wonnacott, R. J. **Introdução à Estatística**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1980. 589 p.