

1. Publicação nº <i>INPE-3293-PRE/608</i>	2. Versão	3. Data <i>Out., 1984</i>	5. Distribuição ☐ Interna ☒ Externa ☐ Restrita
4. Origem <i>DPI/DSL</i>	Programa <i>PROCIM</i>		
6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) <i>Processamento de Imagens Classificação de Imagens</i> <i>Deteção de Bordas Registro de Imagens</i> <i>Métodos de Interpolação</i>			
7. C.D.U.: 621.376.5			
8. Título <i>EXPERIÊNCIAS COM PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS NO INPE</i>		10. Páginas: 18	
		11. Última página: 16	
9. Autoria <i>Nelson D. A. Mascarenhas</i>		12. Revisada por <i>G. G. Neto</i> <i>Gilberto Camara Neto</i>	
Assinatura responsável <i>Nelson Mascarenhas</i>		13. Autorizada por <i>Nelson de Jesus Parada</i> <i>Nelson de Jesus Parada</i> <i>Diretor Geral</i>	
14. Resumo/Notas <i>Serão descritas brevemente neste artigo quatro diferentes experiências de pesquisa em processamento digital de imagens no INPE: 1) deteção de bordas por meio de testes de hipóteses; 2) interpolação de imagens por filtros de resposta finita ao impulso; 3) métodos de extração espacial de atributos em classificação multiespectral; 4) registro translacional de imagens por testes sequenciais de hipóteses.</i>			
15. Observações <i>Aceito para apresentação no "Seminário sobre Processamento de Sinais e Tratamento de Informações" que se realizará em 16 de outubro no Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ.</i>			

EXPERIÊNCIAS COM PROCESSAMENTO DIGITAL DE
IMAGENS NO INPE

Nelson D.A. Mascarenhas

CONSELHO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO - CNPq
INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE
CAIXA POSTAL 515, 12200, SÃO JOSÉ DOS CAMPOS, SP

RESUMO

Serão descritas brevemente neste artigo quatro diferentes experiências de pesquisa em processamento digital de imagens no INPE: 1) detecção de bordas por meio de testes de hipótese; 2) interpolação de imagens por filtros de resposta finita ao impulso; 3) métodos de extração espacial de atributos em classificação multiespectral; 4) registro translacional de imagens por testes sequenciais de hipóteses.

EXPERIMENTS WITH DIGITAL IMAGE PROCESSING AT INPE

ABSTRACT

In this article four different research experiments with digital image processing at INPE will be described: 1) edge detection by hypothesis testing; 2) image interpolation by finite impulse response filters; 3) spatial feature extraction methods in multispectral classification; 4) translational image registration by sequential tests of hypotheses.

1 - ABORDAGEM BAYESIANA PARA A DETECÇÃO DE BORDAS EM IMAGENS.

Em processamento digital de imagens é freqüentemente necessário delinear os limites entre duas regiões que têm diferentes níveis de cinza, os quais permanecem aproximadamente constantes em cada região. Esta tarefa computacional de segmentação de imagens é usualmente chamada detecção de bordas.

O problema de detecção de bordas em imagens tem recebido grande atenção nos últimos anos. De modo geral, entretanto, os métodos propostos têm sido heurísticos, usualmente baseados em técnicas de diferenciação do tipo gradiente. A abordagem aqui proposta é baseada na teoria de decisão estatística. A imagem é modelada pela soma de sinal e ruído que são independentes, aditivos, gaussianos e auto-regressivos em duas dimensões. A solução ótima, em termos da teoria de decisão estatística, leva a um teste que decide entre hipóteses múltiplas, com postas e sobrepostas. Para maiores detalhes o leitor deve consultar Mascarenhas e Prado (1980). Considerando quatro "pixels" da imagem, definem-se sete possíveis hipóteses que envolvem tais "pixels". Denotando por s o sinal sem ruído e por v o sinal ruidoso, a decisão ótima consiste em seleccionar o valor de i ($i = 1, 2, \dots, 7$), para o qual:

$$A_i(v) = \int_{\text{região } i} \sigma(s) f(v/s) ds \quad (1)$$

é máximo onde $\sigma(s)$ denota a função densidade de probabilidade a priori do sinal s , e $f(v/s)$ representa a função densidade de probabilidade condicional de v , dado s .

Entretanto, uma redefinição do problema é necessária e isso leva a uma formulação que envolve decisões binárias sobre hipóteses não-sobrepostas. Se a existência de uma borda envolve um limiar Δ e se os custos de decisão são denotados por C_{01} , C_{10} , C_{00} , C_{11} , esta decisão é tomada por:

$$\frac{\int_{|| > \Delta} \sigma(s) f(v/s) ds}{\int_{|| < \Delta} \sigma(s) f(v/s) ds} \underset{0}{\overset{1}{>}} \frac{C_{01} - C_{00}}{C_{10} - C_{11}}, \quad (2)$$

onde C_{ij} é o custo de decidir pela hipótese i , quando a hipótese j é verdadeira.

Obtém-se, assim o conhecido teste bayesiano que decide entre duas hipóteses compostas, o qual envolve uma razão de verossimilhança.

O numerador e o denominador da Expressão 2 são computados sob as hipóteses de separabilidade das matrizes de covariância dos processos que descrevem o sinal e o ruído, bem como sob a hipótese de que ambos os processos são gaussianos.

Para que a solução do problema seja viável, devem-se usar tabelas que evitem a repetição dos cálculos numéricos das integrais. Além disto, deve-se fazer uma nova aproximação de modo que, ao invés de examinar os quatro "pixels" ruidosos ao tomar a decisão, apenas duas variáveis aleatórias sejam observadas. Assim, ao decidir borda do tipo 1 (borda a 45°) versus não-borda do tipo 1, ao invés de observar $v(i,j)$, $v(i,j+1)$, $v(i+1,j)$ e $v(i+1,j+1)$, serão observados apenas $v(i,j)$ e $\frac{v(i,j+1) + v(i+1,j) + v(i+1,j+1)}{3} = v'$ onde $v(i,j)$ represen

ta

o valor do "pixel" ruidoso na posição (i,j) da imagem.

O numerador da expressão adota a forma:

$$\int \int \int \int_{|s_1 - \frac{s_2 + s_3 + s_4}{3}|} f(v_1, v'/s_1 s_2 s_3 s_4) f_{s_1 s_2 s_3 s_4}(s_1, s_2, s_3, s_4) ds_1 ds_2 ds_3 ds_4 \quad (3)$$

É possível mostrar que no caso gaussiano e nas condições de alta ou baixa relação sinal-ruído a Expressão 3 pode ser obtida fazendo uma integração dupla ao invés de uma integração quádrupla, isto é, a Expressão 3 pode ser dada por:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} ds_1 \int_{s_1-\Delta}^{s_1+\Delta} ds' f(v_i, v'/s_1, s') f_{S_1 S'}(s_1, s'), \quad (4)$$

que pode também ser especializada no caso gaussiano.

Ainda sob esta hipótese, tanto o numerador como o denominador têm a forma geral:

$$K \int_{-\infty}^{+\infty} dx \exp(-x^2) \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_a^b \exp(-y^2/2) dy. \quad (5)$$

A integração interna:

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int dy \exp(-y^2/2) \quad (6)$$

pode ser efetuada armazenando uma tabela de distribuição gaussiana, enquanto a integração de $-\infty$ a $+\infty$ pode ser colocada na forma:

$$K \int_{-\infty}^{+\infty} dx \exp(-x^2) f(x). \quad (7)$$

Esta integral pode ser calculada numericamente pela aplicação da fórmula de Gauss-Hermite:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} dx \exp(-x^2) dx \cong \sum_{k=1}^m H_k f(x_k),$$

onde x_K é o $K^{\text{ésimo}}$ zero do polinômio de Hermite do grau m , e os pesos H_K são dados por:

$$H_K = \frac{2^m (m-1)! \sqrt{\pi}}{H_m'(x_K) H_{m-1}(x_K)} \quad (9)$$

sendo os valores de x_K e H_K dados por tabelas.

Resultados experimentais foram obtidos com imagens de história em quadrinhos (Cebolinha), com 128×128 "pixels" e diferentes relações sinal-ruído, e com imagens reais de satélite, o que evidencia um bom desempenho do algoritmo.

2 - INTERPOLAÇÃO DE IMAGENS POR FILTROS DE RESPOSTA FINITA AO IMPULSO.

O problema de interpolação em processamento digital de imagens ocorre em aplicações como mudança de escala da imagem, correção geométrica, reamostragem, etc. A abordagem aqui apresentada é baseada em métodos de processamento digital de sinais que representam uma extensão para duas dimensões de trabalhos anteriores em uma dimensão, segundo um esquema separável nas direções vertical e horizontal.

Uma classe de interpoladores de imagem é analisada: estas funções são obtidas através de técnicas de projeto de filtros de resposta finita ao impulso (em Inglês F.I.R.). Seu comportamento é comparado com os interpoladores usuais em processamento digital de imagens, como o do vizinho mais próximo, o bilinear e a convolução cúbica. Para maiores detalhes o leitor poderá consultar Câmara Neto e Mascarenhas (1983) e Câmara Neto (1983).

A abordagem de processamento digital de sinais mostra que o processo de interpolação, que é essencialmente um problema de variação da taxa de amostragem do sinal analógico original, pode ser formulado como um processo de filtragem passa-baixas. A restrição de fase linear sugere a implementação por meio de filtros de resposta finita, ao invés dos filtros de resposta infinita.

O interpolador bidimensional é obtido em dois passos: um filtro unidimensional é projetado e a interpolação bidimensional é feita pela convolução da resposta do filtro nas direções horizontal e vertical. Três métodos de projeto foram usados:

- a) projeto de janelamento,
- b) projeto de filtros com fase linear e ondulação constante (em Inglês "equiripple"),
- c) projeto de interpoladores com mínimo erro médio quadrático no domínio do tempo.

Os filtros obtidos utilizam regiões de 4×4 "pixels" para interpolar um "pixel" na imagem resultante.

No projeto por meio de janelas, uma sequência finita $w(k)$ é utilizada para modificar o interpolador ideal de Nyquist $\tilde{h}(k)$ (função sinc) de modo a obter o filtro finito:

$$h(k) = \tilde{h}(k) \cdot w(k).$$

Entre as janelas utilizadas estão as janelas de Hamming, a do co-seno, a de Kaiser e a de Papoulis. Uma janela parabólica proposta por Shlien foi também empregada, tendo a forma:

$$w(k) = 1 - \left(\frac{2k}{N-1} \right)^2 \quad k = -\frac{N-1}{2}, \dots, \frac{N-1}{2}$$

para um filtro de tamanho N .

Uma técnica mais sofisticada de projeto envolve a otimização segundo critério de Chebyshev, o qual consiste na minimização do erro máximo, num intervalo de frequência desejado.

Filtros de interpolação também foram propostos minimizando o erro médio quadrático entre as amostras interpoladas e a saída do interpolador ideal (Oetken et alii (1975)). Os parâmetros do filtro dependem da função de autocorrelação da entrada. Foi subsequentemente mostrado que este procedimento de projeto poderia também minimizar o máximo erro normalizado, se o sinal de entrada é suposto ser limitado em faixa e espectralmente plano. Duas medidas de desempenho foram utilizadas para avaliar o erro de interpolação: a perda de resolução e o erro de interpolação. Foi observado que as janelas simples de Shlien (janela parabólica) e a janela do co-seno tiveram o melhor comportamento, mesmo se comparadas com filtros com propriedades de otimalidade.

Para verificar os resultados acima, um experimento de ampliação de escala foi feito: uma imagem teste foi reduzida 8 vezes de seu tamanho original 512 x 512 para uma imagem de 64 x 64. A imagem reduzida foi interpolada ao seu tamanho original pelos vários interpoladores. Os parâmetros calculados foram o erro e o valor absoluto do erro. Os resultados obtidos corroboram as conclusões anteriores de que os interpoladores projetados sob condições de otimalidade não têm um desempenho melhor do que aqueles projetados pelo método de janelamento. Em termos visuais, as imagens geradas pelos interpoladores de Shlien, sinc, co-seno e convolução cúbica são superiores aos de mais. Os resultados visuais podem talvez ser interpretados em termos da complexidade da visão humana, que certamente não se baseia no erro quadrático como critério de fidelidade visual.

Técnicas heurísticas também foram utilizadas baseadas em medidas da densidade local de bordas, dados que indicam o interpolador mais adequado para aquela região. Áreas que não têm uma grande densidade de bordas podem ser interpoladas por um processo mais simples. Desta maneira, uma grande economia no processo de interpolação pode ser obtida.

O chamado operador de máxima variação foi utilizado para medir a densidade de bordas. Para uma região de 2×2 o operador de máxima variação é definido por:

$$MV = \max\{(|a-b| + |c-d|), (|a-c| + |b-d|)\}.$$

a	b
c	d

Fig. 1 - Região da imagem 2×2 .

Um procedimento heurístico foi desenvolvido de modo que o operador MV é comparado a um limiar. Se MV é menor do que um dado limiar, a interpolação é feita pela função bilinear. Caso contrário, um interpolador de ordem mais alta como o de Schlien ou convolução cúbica é obtido.

Um processo adaptativo de interpolação também foi utilizado no problema de mudança de escala. Fixando a porcentagem da interpolação bilinear em $(70 \pm 3)\%$ as imagens obtidas tinham a mesma qualidade que as anteriores, mas o tempo de computação foi reduzido de 40%.

O algoritmo adaptativo foi aplicado ao problema de rearmostragem a imagem LANDSAT, que é a mostrada numa grade retangular de $57m \times 79m$. Por interpolação esta grade foi alterada para uma mais conveniente, por exemplo, $50m \times 50m$. O bom desempenho do algoritmo foi confirmado neste experimento, uma vez que uma economia de 50% no tempo de processamento foi observada, sem nenhuma diferença visual.

3 - ALGUNS EXPERIMENTOS COM MÉTODOS DE EXTRAÇÃO ESPACIAL DE ATRIBUTOS EM CLASSIFICAÇÃO MULTIESPECTRAL.

Este parágrafo descreve o uso de novas técnicas de extração de atributos espaciais locais em um ambiente de classificação supervisionada. Em adição, a alta dimensionalidade do vetor de atributos aumentado é contornada por um processo de seleção de atributos, baseado nas distâncias entre as distribuições das classes a serem discriminadas.

O problema de classificação de imagens multiespectrais tem sido abordado tradicionalmente através de atributos espectrais derivados de cada canal. Todavia, a inclusão de atributos espaciais pode ser útil.

No caso de filtragem local, a imagem de saída é obtida pela convolução da imagem original com a resposta impulsiva do filtro especificado por uma máscara, isto é, uma matriz de pesos (por exemplo 3 x 3 ou 5 x 5). A Figura 2 especifica possíveis máscaras para a implementação de um filtro espacial passa-baixas. A Figura 3 apresenta uma aproximação do operador laplaciano digital.

$$\frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

(a)

$$\frac{1}{25} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

(b)

Fig. 2 - Filtragens passa-baixas.

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

(a)

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -8 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

(b)

Fig. 3 - Aproximações digitais do operador laplaciano.

Uma classe de filtros não-lineares pode ser implementada por dois estágios: em primeiro lugar, uma convolução linear é efetuada, seguida por uma função não-linear pontual como, por exemplo, o valor absoluto ou a função raiz quadrada. Claramente, filtros não-lineares podem ser definidos de diferentes maneiras. Neste artigo, um filtro não-linear denotado por variação foi utilizado. Considerando uma vizinhança 3 x 3 ao redor do "pixel" da forma:

$$\begin{matrix} a & b & c \\ d & x & e \\ f & g & h \end{matrix}$$

a variação total (T.V.) é a soma da variação vertical (V.V.) e a variação horizontal (H.V.), isto é:

$$V.V. = |a-d| + |b-x| + |c-e| + |d-f| + |x-g| + |e-h|$$

$$H.V. = |a-b| + |d-x| + |f-g| + |b-c| + |x-e| + |g-h|$$

$$T.V. = V.V. + H.V.$$

No presente trabalho, a tarefa de classificação foi efetuada pelo critério de máxima verossimilhança sob a hipótese gaussiana (para maiores detalhes ver Dutra e Mascarenhas, 1984).

Embora útil para a discriminação das classes, os processos de extração de atributos espaciais podem aumentar a dimensionalidade do algoritmo de classificação, o que pode reduzir a eficiência computacional e exigir um número excessivo de amostras para treinamento. Portanto, torna-se necessário um processo de seleção de atributos, ou seja, a redução da dimensionalidade do problema.

Neste trabalho a distância de Jeffreys-Matusita foi utilizada, sendo dada no caso gaussiano por:

$$\rho = e^B,$$

$$d^2_{JM} = 2(1 - \rho),$$

$$B = \frac{1}{8} (\underline{\mu}_1 - \underline{\mu}_2)^T \frac{(\underline{\Sigma}_1 + \underline{\Sigma}_2)}{2} (\underline{\mu}_1 - \underline{\mu}_2) + \frac{1}{2} \ln \left\{ \frac{\left| \frac{1}{2}(\underline{\Sigma}_1 + \underline{\Sigma}_2) \right|}{\left| \underline{\Sigma}_1 \right|^{1/2} \left| \underline{\Sigma}_2 \right|^{1/2}} \right\}$$

onde $\underline{\mu}_i$ e $\underline{\Sigma}_i$, $i=1,2$ são o vetor média e a matriz de covariância da classe i , respectivamente. Foram usados como critérios para seleção de atributos a máxima distância média e a máxima distância mínima sobre todos os pares de classes.

A extração de atributos espaciais utilizou filtros lineares ou não-lineares. No último caso dois processos adicionais podem ser empregados em cascata, de uma maneira heurística:

- 1) Um reescalonamento da saída do filtro não-linear como uma operação para melhorar o caráter gaussiano no qual o estágio de classificação está baseado.
- 2) Uma filtragem linear do tipo média com duas finalidades: a) melhorar a hipótese gaussiana pela combinação linear de variáveis aleatórias, embora algo dependentes; b) reduzir as componentes de alta frequência que contêm ruído se o filtro não-linear for do tipo derivada.

Os filtros lineares usados neste trabalho foram filtros passa-altas ou passa-baixas. Os filtros passa-altas extraem informação sobre a intensidade da rugosidade local e, eventualmente, sobre sua direção. Os filtros passa-baixas tendem a diminuir a variância das classes forçando os vetores de atributo a estar próximos dos vetores média de cada classe, sob a hipótese de que os vetores pertencentes à mesma classe tendem a estar próximos espectral e espacialmente.

Considerando principalmente as limitações físicas do meio computacional, foi tomada a decisão de selecionar quatro atributos.

Os experimentos foram feitos com uma imagem de satélite Landsat-3 que cobre a área de Ribeirão Preto. Um total de quatro experimentos foram feitos. Nos três primeiros foram utilizados um total de 12 atributos, de acordo com a seguinte distribuição:

- 1) Os atributos de 1 a 4 correspondem aos canais originais do Landsat.
- 2) Os atributos de 5 a 8 foram obtidos pela convolução dos canais de 4 a 7 do Landsat com a máscara da Figura 4.

- 3) Os atributos de 9 a 12 dão informação sobre a variação local dos canais originais. Tais atributos foram obtidos por diferentes processos, dependendo do conjunto de experimentos.

$$\frac{1}{21} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Fig. 4 - Máscara convolucional.

Seis classes foram definidas: 1) cana-de-açúcar; 2) cana-de-açúcar nova; 3) pasto; 4) água; 5) área urbana, 6) floresta.

No primeiro experimento, os atributos de 9 a 12 foram derivados dos canais originais utilizando o operador variação total e filtragem passa-baixas através da máscara da Figura 4.

No segundo experimento, os atributos de 9 a 12 foram obtidos dos canais 4 a 7 do Landsat, seguido por uma operação de reescalonamento e filtragem passa-baixas através da máscara da Figura 4. O resultado da operação de reescalonamento foi proporcional à raiz quadrada da entrada. Foi observado empiricamente que tal operação tendia a melhorar o caráter gaussiano dos histogramas.

No terceiro experimento, os atributos de 9 a 12 foram obtidos dos canais originais do Landsat por um operador laplaciano reescalonado e suavizado.

Foi possível observar no processo de seleção de atributos dos primeiros três experimentos que os canais espectrais não foram selecionados em qualquer ocasião. Este fato sugere um quarto experimento, no qual os canais espectrais são substituídos pelos canais espaciais, de acordo com a seguinte distribuição:

- 1) Os atributos de 1 a 3 são os canais de 4 a 6 do Landsat suavizados pela máscara da Figura 5.
- 2) Os atributos de 4 a 6 são os canais de 4 a 6 do Landsat suavizados pela máscara da Figura 4.
- 3) Os atributos de 7 a 9 são os canais 4, 5 e 7 do Landsat que passam pela operação de variação total, reescalonados e suavizados pela máscara da Figura 4.
- 4) Os atributos de 10 a 12 são os canais 4, 5 e 6 do Landsat que passam pela operação valor absoluto do laplaciano, reescalonado e suavizado pela máscara da Figura 4.

$$\frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Fig. 5 - Filtragem por média 3x3

Os resultados obtidos mostram alguma melhoria no desempenho médio* da classificação e uma sensível redução em sua confusão média pelo uso de atributos espaciais.

Todavia, em geral, a rejeição média (pelo uso de um limiar nas funções discriminantes) apresentou uma tendência ao crescimento, o que pode ser considerado como não tão danoso como classificação errônea. A área classificada se tornou mais homogênea e surgiu frequentemente uma região de rejeição nas bordas entre classes distintas. Isso é devido ao fato de que as medidas de rugosidade dão valores muito altos nessas regiões de transição. O método proposto permite portanto a

*Desempenho médio é definido como a percentagem média de classificação correta para cada área (de treinamento ou teste), ponderada pelo número de ponto de área. Definições análogas são válidas para a confusão média e rejeição média, substituindo o termo classificação correta por erro de classificação e de rejeição, respectivamente.

detecção de áreas com desempenho de classificação usualmente pobre e permite rejeitá-las ao invés de classificá-las erroneamente.

Foi observado um aumento na dimensionalidade dos dados que passam de dois para três através da aplicação da transformação de Karhunen-Loeve. Este aumento da dimensionalidade pode ser atribuído ao uso da informação espacial.

4 - REGISTRO TRANSLACIONAL POR TESTES SEQUENCIAIS DE HIPÓTESES.

O problema de registro translacional consiste em encontrar numa imagem de referência o melhor casamento possível com outra imagem. Uma das possíveis aplicações destas técnicas consiste na classificação de imagens que utilizam dados multitemporais.

O problema de registro translacional tem sido abordado nos últimos anos através de dois tipos de técnicas, de modo geral: as técnicas correlacionais e os algoritmos sequenciais nos erros acumulativos. O trabalho aqui descrito se insere na segunda classe de métodos. A abordagem utilizada é baseada na teoria de testes sequenciais de hipóteses.

Numa primeira fase do trabalho (Mascarenhas and Pereira, 1983), dois modelos diferentes foram utilizados: o primeiro é baseado na hipótese gaussiana e usa o fato de a variância do erro entre duas imagens tender a ser baixa no ponto de registro. O segundo método usa imagens binárias derivadas das imagens originais. O modelo estatístico para o erro acumulado resultante é uma distribuição binomial, e a posição de registro é caracterizada por uma baixa probabilidade de o erro binário ser unitário. Em ambos os métodos duas sequências de limiares são utilizadas: uma que leva à rejeição do ponto e outra à sua eventual aceitação. Elas incluem o registro de uma imagem Landsat com suas versões ruidosas, casamento de diferentes canais da mesma imagem multiespectral, bem como segmentos de duas imagens obtidas em diferentes datas. O registro correto foi obtido, na maioria das vezes, mesmo

em condições de baixa relação sinal-ruído, com um esforço computacional modesto.

Numa segunda fase (Mascarenhas and Erthal, 1984), foi testado com êxito o modelo exponencial para o módulo do erro entre as duas imagens a serem registradas. Além disso, foi utilizado um esquema de truncamento do teste segundo o modelo proposto por Chien e Fu (1966). Finalmente, foram estabelecidas relações entre os modelos binomial e gaussiano. Obteve-se a curva da probabilidade do erro binário no ponto de registro como função da relação sinal-ruído.

Supondo um modelo markoviano e separável para a função de correlação cruzada entre os sinais das duas imagens, foram obtidas as curvas do erro binário como função do deslocamento da posição de registro para vários valores dos coeficientes de correlação nas direções horizontal e vertical e para vários valores da relação sinal-ruído. Finalmente, para o modelo gaussiano, foram obtidas as curvas da variância do erro em função do deslocamento da posição de registro para diferentes valores da relação sinal-ruído.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CÂMARA NETO, G. *Métodos de interpolação em imagens digitais por meio de técnicas de projeto de filtros F.I.R.* São José dos Campos, INPE, Mar. 1983. (INPE-2683-TDL/120).
- CÂMARA NETO, G.; MASCARENHAS, N.D.A. Methods for image interpolation through FIR Filter design techniques. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ACOUSTICS, SPEECH AND SIGNAL PROCESSING, MA, 1983. *Proceedings*. Local, IEEE Pres, 1983, p.391-394.
- CHIEN, Y.T. e FU, K.S. A modified sequential recognition machine... using time-varying stopping boundaries. *IEEE Transactions on Information Theory*, 11-12 (2):206-214, abr. 1966.
- DUTRA, L.V. e MASCARENHAS, N.D.A. Some experiments with spatial feature extraction methods in multispectral classification. *International Journal of Remote Sensing*, 5(2):303-313, 1984.
- OETKEN, G.; PARKS, T.W.; SCHUSSLER, H. New results in the design of digital interpolators. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 23(3):301-309, June 1975.
- MASCARENHAS, N.D.A.; ERTHAL, G.J. On the relationship between gaussian and binomial models for image registration by sequential tests of hypotheses. Presented in the *International Congress of Photogrammetry and Remote Sensing*, 15., Rio de Janeiro, June 1984.
- MASCARENHAS, N.D.A.; PEREIRA, J.A.G. Image registration by sequential tests of hypotheses: Gaussian and binomial techniques. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING ENVIRONMENT, 16, Buenos Aires, Argentina, 1982. *Papers selected*. Ann Arbor, MI, ERIM, 1982, pp. 503-512.
- MASCARENHAS, N.D.A.; PRADO, L.O.C. A Bayesian approach to edge detection in images, *IEEE transactions on Automatic Control*, AC 25 (1):36-40, Fev.1980.