

TRANSFORMAÇÕES LINEARES E NÃO-LINEARES PARA REALCE VISUAL
DE IMAGENS DE RECURSOS NATURAIS

G. Câmara Neto

Instituto de Pesquisas Espaciais

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

Caixa Postal 515, 12200 - São José dos Campos, SP, Brasil

RESUMO

Os processos de realce de imagens constituem uma coleção de técnicas que procura melhorar a aparência visual delas, convertendo-as em uma forma mais adequada para a análise humana. Objetiva-se - no escopo deste trabalho - realçar cenas de recursos naturais, obtidas por imageadores multiespectrais da série LANDSAT e utilizadas para análise no Laboratório de Tratamento de Imagens Digitais do INPE. Desenvolveu-se o SISTEMA REALCE, que utiliza transformações lineares e não-lineares para auxiliar a foto-análise das imagens. As transformações oferecidas pelo SISTEMA REALCE incluem: (a) *transformação de componentes principais*: obtém novos canais não-correlacionados - sem informação redundante - a partir das bandas multiespectrais originais; (b) *transformação de análise canônica*: determina a combinação linear dos quatro canais originais que fornece a melhor separação entre as classes - a partir dos dados de treinamento; (c) *transformação logarítmica e exponencial*: utilizadas para filtragem homomórfica, tais transformações são úteis para realçar as imagens, levando-se em conta as propriedades do sistema visual humano; (d) *transformação para análise de culturas agrícolas*: transformação linear dos canais originais que procura isolar os diversos fenômenos do desenvolvimento de culturas agrícolas, tais como brilho do solo e desenvolvimento de vegetação.

ABSTRACT

Image enhancement techniques are a collection of procedures aiming at correcting the images to a representation that is more suitable for human analysis. The objective of this paper is to report results in enhancement of natural resources images obtained by multispectral scanner LANDSAT satellites. The Realce System was developed, with four main options: (a) *principal components transformation*: obtains new uncorrelated channels, with no redundant information; (b) *canonical analysis transformation*: determines the linear combination that yields the best separation among the clusters in the training data. (c) *logarithmic and exponential transformation*: useful to enhance an image, taking into account human visual system properties. (d) *tasseled cap transformation*: linear transformation that tries to isolate the phenomena associated with crop development, such as soil brightness and vegetation greenness.

1. INTRODUÇÃO: O PROBLEMA DO REALCE DE IMAGENS DE RECURSOS NATURAIS

O objetivo das técnicas de realce visual é auxiliar o analista na interpretação da informação contida em imagens; num sistema de realce, faz-se um esforço consciente para melhorar a aparência das imagens, com respeito a algum objetivo específico. Numa aplicação típica, o analista deseja extrair dos dados à sua disposição características que não são facilmente identificáveis; para tanto, ele dispõe de um conjunto de procedimentos, definidos a partir de diferentes considerações de natureza teórica e matemática. A decisão a respeito da técnica a ser utili-

zada dependerá, entretanto, dos objetivos desejados: a ênfase - no caso do analista - deverá ser a de verificar cuidadosamente os diferentes resultados obtidos. Adequando as técnicas disponíveis à cada aplicação.

No caso do INPE, as imagens a ser realçadas são de recursos naturais, utilizados pelos pesquisadores da área de Sensoriamento Remoto, especialmente Geógrafos e Geólogos.

O interesse pelo Realce visual nasce no momento em que o usuário de um Sistema de Processamento Digital de Imagens deseja não apenas classificar a imagem, mas muitas vezes é interessante obter informações visuais acerca da área estudada. Por exemplo, no caso de aná-

lises geomorfológicas, os quatro bandas do LANDSAT podem-se mostrar insuficientes para uma representação adequada da regosidade do terreno (Câmara Neto et alli, 1980); surge, então, a necessidade do realce.

Neste trabalho, foram estudados várias técnicas de transformações lineares, que, aplicadas a imagens multiespectrais de satélites da série LANDSAT, permitem gerar novos canais a partir de combinações lineares dos canais da imagem original. Desenvolveu-se ainda uma transformação não-linear, que utiliza os princípios da filtragem homomórfica (no domínio do logaritmo) para realçar a imagem, levando-se em conta as propriedades do sistema visual humano. Estes métodos foram implementados no Laboratório de Tratamento de Imagens Digitais do INPE e o resultado final é o SISTEMA REALCE, que já vem sendo utilizado com resultados satisfatórios.

No que se segue, a Seção 2 apresenta uma descrição dos fundamentos matemáticos dos procedimentos que compõem o SISTEMA REALCE; na Seção 3, descreve-se a utilização deste sistema.

2. FUNDAMENTOS MATEMÁTICO-METODOLÓGICOS DO SISTEMA REALCE

Os procedimentos para transformações em imagens multiespectrais incluem técnicas para realce de componentes individuais de imagens, tais como alargamento de contraste ("contrast stretching"), modificações de histograma, e acentuação de bordas. Consideram-se dois tipos de transformações:

- a) transformações lineares, que envolvem o processamento combinado de diversas coordenadas da imagem;
- b) transformação logarítmica, que envolve a modificação do contraste de imagem, de uma maneira mais conveniente para o observador humano. Os diversos procedimentos serão apresentados a seguir.

2.1 - TRANSFORMAÇÕES LINEARES

No caso de transformações lineares, representa-se cada ponto X da imagem por um vetor quadridimensional, com intensidades x_1, x_2, x_3, x_4 em cada canal, a saber:

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \quad x_i \in [0,255] \quad i = 1, \dots, 4$$

Computa-se, para cada elemento X de imagem original, a transformação $Y = AX$, onde A é uma matriz unitária 4 x 4. O projeto das transformações envolve um conjunto de técnicas matemáticas que procuram levar em conta as características estatísticas e espectrais da imagem. Entre estas técnicas estão: a) transformação de componentes principais; b) transformação de análise canônica; c) transformação para análise de culturas agrícolas.

TRANSFORMAÇÃO DE COMPONENTES PRINCIPAIS

A transformação de componentes principais (também chamada transformação de Karhunen-Loève) é baseada nas propriedades estatísticas de imagem. Trata-se de uma transformação linear que fornece, como resultado, componentes não correlacionados, ou seja, sem informação redundante. A matriz de transformação A faz a diagonalização da matriz de covariância K_X da imagem original, de tal modo que a nova matriz de covariância.

$$K_Y = AK_X A^T = \Delta \quad (1)$$

Seja uma matriz diagonal Δ^* . Para a obtenção da matriz de transformação A, tem-se que a matriz de covariância K_X é definida para os vetores X ("pixels") como:

$$K_X = E \left\{ \left| X - E(X) \right|^T \left| X - E(X) \right| \right\}, \quad (2)$$

onde o operador $E(\cdot)$ denota "o valor esperado de". A transformação de principais componentes é obtida a partir dos autovetores A_i ($i = 1, \dots, n$) que satisfazem

$$K_X A_i = \lambda_i A_i, \quad (3)$$

onde os λ_i são os autovalores da matriz K_X . Os vetores A_i formam uma base de coordenadas (ortonormal), e seu conjunto compõe a matriz A que diagonaliza K_X .

As componentes principais apresentam uma série de interessantes propriedades. Algumas delas são:

1) As novas componentes são mutuamente não correlacionados, ou seja, a matriz de covariância K_Y de Y é diagonal. Isto origina-se do fato que

$$Y = AX, \quad (4)$$

e da teoria de probabilidade sabe-se que:

$$K_Y = A K_X A^T$$

Mas como

$$K_X A^T = \lambda A^T \quad (\text{definição de autovetores}),$$

tem-se:

$$K_y = A\lambda A^T = AA^T\lambda$$

A matriz K_y será dada por:

$$K_y = \begin{cases} \lambda_i & , \text{ se } i=j \\ 0 & , \text{ se } i \neq j \end{cases}$$

Daí tem-se que:

$$K_y = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_4 \end{bmatrix} .$$

Como se vê, as variâncias das novas componentes são os autovalores da matriz de covariância de imagem original. No caso particular onde o vetor aleatório X tem distribuição normal, as componentes principais serão mutuamente independentes.

2) Se desejar obter apenas m componentes de Y a partir das n componentes do vetor original X , fazendo-se com que o erro quadrático médio das componentes omitidas seja mínimo, ter-se-á a partir das propriedades de transformação -

$$\overline{\epsilon^2}(m) = \sum_{i=m+1}^n A_i K_X A_i^T = \sum_{i=m+1}^n \lambda_i \quad (5)$$

Isto significa que, caso se omitam os componentes correspondentes aos menores autovalores, o erro será mínimo para uma dada redução de dimensionalidade.

3) Após a transformação de componentes principais, pode-se - aplicando um ganho conveniente - fazer com que as variâncias de cada uma das novas componentes sejam iguais. Assim a nova matriz de covariância será expressa como:

$$K_y = \sigma^2 I \quad (6)$$

Ao tomar uma nova rotação ortogonal (qualquer) R , a matriz de covariância resultante permanecerá invariante, a saber

$$K_2 = RK_y R^T = R\sigma^2 I R^T = \sigma^2 I \quad (7)$$

Após a nova rotação, as componentes continuam decorrelacionados; o procedimento mais favorável para realce por deconexão é en-

tão, após a transformação de Karhunen-Loève, impor a igualdade entre as variâncias e trazer de volta a imagem para o espaço MSS original. Soha e Schwartz (1978) acreditam que esta seja a maneira de conseguir a máxima expansão cromática a partir das imagens LANDSAT; como é sabido, a matriz inversa de transformação de Karhunen-Loève é obtida, transpondo-se a matriz A utilizada para a transformada direta.

4) No caso específico das imagens LANDSAT foi observado experimentalmente que praticamente toda a informação está contida nas duas primeiras componentes principais. De uma maneira geral, estas componentes correspondem a 97% da informação.

Também, como para a apresentação da imagem em falsa cor, utilizam-se 3 cores primárias, a escolha das três primeiras componentes principais é uma escolha natural, incluindo assim praticamente toda a informação de imagem. Por causa da concentração nas duas primeiras componentes, no entanto, a aparência da imagem em falsa-cor pode não ser aquela intuitivamente esperada.

Para maiores detalhes, o leitor deverá consultar Câmara et alii (1980) e Santisteban e Muñoz (1978).

TRANSFORMAÇÃO DE ANÁLISE CANÔNICA

A transformação de análise canônica provém de teoria estatística, onde essa transformação é utilizada para reduzir a dimensionalidade de dados multivariados com mínima perda de variância discriminatória. A transformação de análise canônica promete ser particularmente útil com o advento do Mapeador Temático (7 canais) do satélite LANDSAT-D, com resolução de 30 m; isto causará um grande aumento no volume de dados a ser processado. Tal transformação permitirá a obtenção de um pequeno conjunto de novas componentes contendo a maior parte da variância discriminatória. É comum pelo menos 95% de variância discriminatória estar contida nos primeiros 2 ou 3 eixos transformados, independentemente do número de variáveis (Güanadesikan, 1977).

Para computar a transformação de análise canônica, devem ter sido obtidos anteriormente - a partir dos dados de treinamento - os vetores média e as matrizes de covariância multiespectrais para cada classe de interesse. A transformação que maximiza a separação entre as classes é derivada abaixo.

Considera-se h_{mn}^i , intensidade na banda n do m -ésimo pixel (pertencente à classe i) depois da transformação. Então a soma R , sobre todas as classes - dos quadrados das distâncias de cada ponto à média da classe h_{mi} , será:

$$R \equiv \sum_{i=1}^H \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{n=1}^N (\hat{h}_{mn}^i - \bar{h}_n^i)^2, \quad (8)$$

sendo que a média \bar{h}_n^i da classe n no canal i será dada por:

$$\bar{h}_n^i = \frac{1}{M_i} \sum_{m=1}^{M_i} \hat{h}_{mn}^i, \quad (9)$$

onde H é o número de classes, M_i é o número de "pixels" de treinamento pertencentes à i -ésima classe e N é o número de canais.

Considera-se também a soma S sobre todas as classes, dos quadrados das distâncias das médias de cada classe à média do canal ("grande média"), após a transformação. A soma S é expressa por:

$$S = \sum_{i=1}^H \sum_{n=1}^N M_i (\bar{h}_n^i - \bar{h}_n)^2, \quad (10)$$

onde a média sobre todos os pontos ("grande média") no n -ésimo canal será:

$$\bar{h}_n = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^H M_i \bar{h}_n^i. \quad (11)$$

A transformação que procura maximizar a separação entre as classes de treinamento é a solução do seguinte problema: Determinar o coeficiente de transformação, a_{ns} , tal que após a transformação, a soma S - sobre todas as classes - da distância dos quadrados das médias das classes à grande média, seja maximizada; impõe-se a restrição que a soma R - sobre todos os pontos de treinamento - dos quadrados das distâncias de cada ponto à média de sua classe, seja mantida constante.

A solução para o problema acima pode ser encontrada por meio de multiplicadores de Lagrange. Os coeficientes da transformação, a_{ns} , são as soluções da equação:

$$A_n (BW^{-1}) = \lambda_n A_n. \quad (12)$$

Deste modo, os coeficientes a_{ns} são os componentes do autovetor A_n com maiores autovalores da BW^{-1} , onde os coeficientes de BW^{-1} são dados a seguir.

A matriz B ("entre-classes") terá seus coeficientes B_{sr} (elemento da matriz de covariância "entre-classes", que relaciona os canais s e r) calculados por:

$$B_{sr} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^H M_i (\bar{h}_s^i - \bar{h}_s) (\bar{h}_r^i - \bar{h}_r), \quad (13)$$

onde \bar{h}_s^i é a média da classe i no canal s , \bar{h}_s é a grande média no canal s .

Os elementos W_{sr} da matriz W denotam a covariância "intra-classes" entre os canais s e r e são computados tomando-se:

$$W_{sr} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^H M_i C_{sr}^i. \quad (14)$$

C_{sr}^i indica a covariância de classe i entre os canais s e r , que pode ser calculada a partir dos dados de treinamento - por:

$$C_{sr}^i = \frac{1}{M_i - 1} \sum_{m=1}^{M_i} (\hat{h}_{ms}^i - \bar{h}_s^i) (\hat{h}_{mr}^i - \bar{h}_r^i). \quad (15)$$

A imagem resultante após a transformação - pode ser vista como o produto de um realce: diferentes classes tenderão a ocupar diferentes intervalos na escala de níveis de cinza; isto corresponderá - utilizando-se a representação falsa-cor da imagem - à distribuição das categorias em cores distintas.

Pode-se também utilizar essa transformação no contexto de redução de dimensionalidade para classificação. Estudos recentes (Merembeck and Turner, 1979) indicam os seguintes resultados:

- a) Aplicaram-se as transformações de componentes principais e análise canônica a um conjunto de oito canais, obtidos de combinação multi-temporal de duas passagens do satélite LANDSAT. Utilizando-se um classificador de máxima verossimilhança, os dados originais foram classificados; os resultados foram comparados com aqueles obtidos ao tomarem-se apenas as três primeiras combinações obtidas pelas transformações. Evidenciaram-se as vantagens da segunda abordagem:
 - 1) para as três primeiras combinações, aquelas resultantes da análise canônica tiveram um desempenho melhor que os componentes principais, ambas resultando num erro de classificação não muito superior ao original.
- b) A transformação de análise canônica permite uma redução no esforço computacional; mesmo considerando-se o tempo adicional envolvido, houve uma queda de um fator de 2 sobre a classificação aplicada aos oito canais originais.

TRANSFORMAÇÃO PARA CULTURAS AGRÍCOLAS

O objetivo de transformação para análise de culturas agrícolas é fornecer uma representação física da natureza espectral/temporal dos dados LANDSAT. Este modelo foi desenvolvido na Universidade de Michigan (Kauth and

Thomas, 1976) e revelou-se uma ferramenta bastante útil na redução da dimensionalidade das imagens multiespectrais do satélite LANDSAT.

A transformação é também chamada "tasseled cap" e nasce de uma análise que leva em conta as características de cada canal: Ao se observar (Figura 1) uma distribuição típica dos dados agrícolas nos canais 2 e 3 (bandas 5 e 6), pode-se notar que os dados estão concentrados em um "triângulo". O vértice superior do triângulo corresponde ao "ponto de verde": baixa reflectância no canal 2 (centrado na faixa de absorção de clorofila da vegetação) e máxima reflectância no canal 3 (centrada no pico de reflectância de celulose para as culturas agrícolas). Na base do "triângulo" está a "linha dos solos": uma diagonal onde se situa o lugar geométrico da reflectância das culturas, na emergência e após o corte.

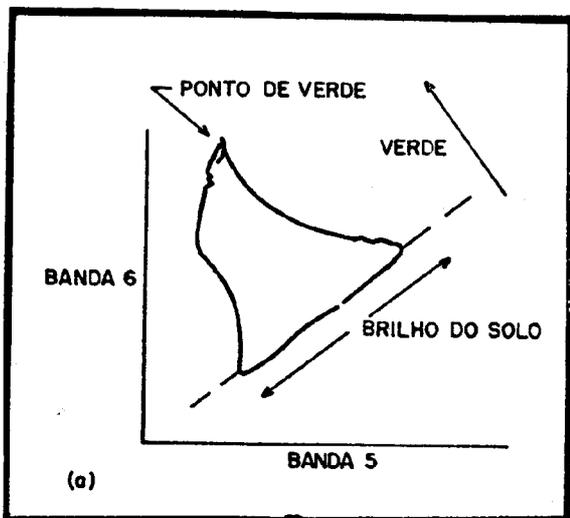


Fig. 1 - Distribuição típica dos dados agrícolas nas bandas 5 e 6 da imagem LANDSAT.

Observando-se ainda o espalhamento normal nos canais 1 e 2 (bandas 4 e 5), vê-se que os dados assumem uma forma de "charuto amassado" (Figura 2), evidenciando a forte correlação entre os canais 1 e 2.

Tais considerações levaram Kauth e Thomas (1976) a definir eixos de máxima variação nos dados LANDSAT e atribuir uma interpretação física a esses eixos. Inicialmente, uma coleção de pontos ao longo da linha diagonal dos solos foi escolhida, utilizando-se dados de um condado americano para milho e um eixo ajustado a estes pontos no espaço quadridimensional; chamou-se a esse eixo de "brilho". Posteriormente, tomou-se um

"pixel" perto do "ponto de verde" e calculou-se (utilizando-se o processo de ortogonalização de Gram-Schmidt) um segundo eixo; ortogonal ao primeiro; este segundo eixo foi denominado "verdidão".

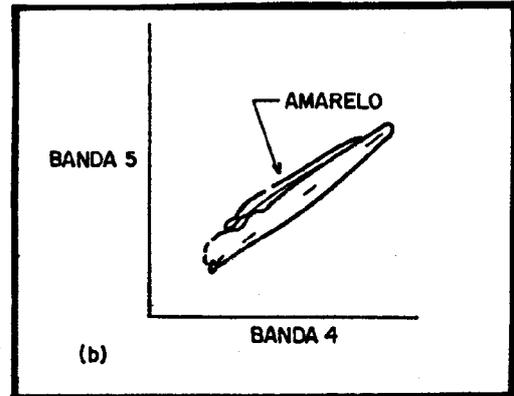


Fig. 2 - Distribuição típica dos dados agrícolas nas bandas 4 e 5 do satélite LANDSAT.

Para a maior parte dos propósitos práticos, a informação agrícola contida nas imagens LANDSAT está quase totalmente contida no plano definido pelos eixos de "brilho" e "verdidão". Kauth e Thomas (1976) definem ainda os eixos de "amarelidão" e "nenhuma destas"; os versores que descrevem essas quatro direções formam uma matriz de rotação chamada Transformação de "Tasseled Cap". A matriz A é descrita a seguir.

$$A = \begin{bmatrix} 0.5738 & 0.4532 & 0.4344 & 0.5410 \\ -0.5072 & -0.4388 & 0.2325 & 0.7043 \\ -0.6429 & 0.7307 & 0.2159 & -0.0790 \\ 0.0099 & -0.2900 & 0.8431 & -0.4527 \end{bmatrix}$$

A transformação de Kauth-Thomas foi largamente utilizada no Programa LACIE da NASA (Experimento para Revisão de Safras em Grandes Áreas); os eixos de "brilho" e "verdidão" serviram como dados auxiliares para os analistas, e os resultados indicaram sua grande aplicabilidade. Para maiores detalhes, o leitor deve consultar Kauth e Thomas (1976).

2.2 - TRANSFORMAÇÃO LOGARÍTMICA

A utilização de transformação logarítmica é justificada, propondo-se em modelo simplificado, onde se supõe que uma imagem $f(i,j)$ possa ser caracterizada por duas componentes. Uma componente é a quantidade de luz incidente sobre a cena observada, enquanto a outra é a medida de luz refletida pelos objetos presentes na cena; estas componentes são chamadas componentes de iluminação e reflectância e são

denotadas por $i(i,j)$ e $r(i,j)$, respectivamente. As funções $i(i,j)$ e $r(i,j)$ combinam-se multiplicativamente para formar a imagem $f(i,j)$:

$$f(i,j) = i(i,j) \cdot r(i,j), \quad (16)$$

onde:

$$0 < i(i,j) < \infty$$

e

$$0 < r(i,j) < 1.$$

Ao tomar-se uma transformação logarítmica:

$$g(i,j) = \log[f(i,j)] = \log i(i,j) + \log r(i,j), \quad (17)$$

a imagem após esta modificação - pode ser vista como uma soma de dois termos: uma componente (*reflectância*) que varia rapidamente, com presença de *altas frequências espaciais*, e uma componente (*iluminação*) com *baixo conteúdo de frequências espaciais*. A imagem pôde ser então passada por um sistema linear - tal como uma filtragem passa-altas - sem alterar sua estrutura básica. Este procedimento, conhecido como *filtragem homomórfica*, permite o realce dos contornos da imagem, tornando-a mais agradável ao observador humano. Como se sabe, o sistema visual humano possui uma não-linearidade e é bastante sensível a bordos (Cornsweet 1970; Câmara Neto, 1982). Deste modo, a idéia de *filtragem homomórfica* - inicialmente proposta para imagens por Stockham (1972) - permite o realce de imagens, levando-se em conta as propriedades do sistema visual humano.

3. UTILIZAÇÃO DO SISTEMA REALCE

As idéias expostas anteriormente foram utilizadas para a implementação no L.T.I.D. (Laboratório de Tratamento de Imagens Digitais do INPE) do SISTEMA REALCE, que permite ao usuário optar pelos diversos procedimentos descritos acima ou por uma combinação destes.

Para o uso do sistema, é suficiente que seja digitado o comando RUN SISROT (Sistema de Rotação) no terminal de controle do L.T.I.D., o que causará o aparecimento do seguinte "cardápio" opções:

*** REALCE VISUAL DE IMAGENS *

- (1) AQUISIÇÃO DA MATRIZ DE COVARIÂNCIA
- (2) TRANSFORMAÇÃO DE COMPONENTES PRINCIPAIS
- (3) TRANSFORMAÇÃO DE ANÁLISE CANÔNICA
- (4) TRANSFORMAÇÃO PARA CULTURAS AGRÍCOLAS

(5) LOGARÍTMO E EXPONENCIAÇÃO DA IMAGEM

(X) SAÍDA

? >

Ao escolher qualquer das opções, o gerenciador do sistema se encarregará de chamar o programa correspondente. A seguir, serão descritos os diversos componentes do sistema.

3.1 - AQUISIÇÃO DA MATRIZ DE COVARIÂNCIA

Obtém-se tal objetivo com o programa MATCOV, que permite ao usuário escolher entre adquirir os parâmetros para toda a tela ou para posições selecionadas pelo cursor.

O programa MATCOV cria o arquivo TRANSF.MAT, onde está armazenada a matriz de transformação (autovetor da matriz de covariância), os respectivos autovalores e as médias dos canais originais. Deve ser utilizado anteriormente à transformação de componentes principais.

3.2 - TRANSFORMAÇÃO DE COMPONENTES PRINCIPAIS (PRINCO)

Esta opção do sistema pode ser utilizada para realizar a transformação de *componentes principais, strictu sensu* ou para a transformação de *análise canônica*. No primeiro caso, a entrada é o arquivo TRANSF.MAT gerado pelo programa MATCOV e no segundo caso, um arquivo semelhante ao gerado pelo programa ANALYS (Transformação de Análise Canônica), opção número 3 do sistema.

Para a transformação de componentes principais, o usuário deverá optar inicialmente pela transformação direta - que leva a imagem do espaço MSS original para os canais transformados - utilizando ainda a opção "realce simples"; neste caso, a matriz de covariância resultante será diagonal, tendo as variâncias iguais; a execução do programa PRINCO é terminada. Se desejado for, poder-se-á chamar novamente o programa PRINCO, e fazendo-se uso da *transformação inversa* - que leva a imagem dos canais transformados para o espaço MSS original - obter o procedimento de *realce por decomposição*, descrito por Soha e Schwartz (1978). No último caso, dever-se-á tomar a opção "sem realce de contraste" do programa PRINCO. Para maiores detalhes, o leitor deverá consultar Câmara et alii (1980).

Para a *transformação de análise canônica*, um arquivo TRANSF.MAT deverá ter sido criado pelo programa ANALYS, o qual contém a matriz de transformação. Neste caso, utilizando-se a transformação direta e a opção "realce simples", o resultado final serão os canais modificados pelo procedimento de análise canônica.

A transformação de componentes principais pode ser também usada no contexto de um *realce*

homomórfico: inicialmente aplica-se uma filtragem logarítmica aos canais originais, após o que obtêm-se os principais componentes (Taylor, 1974).

3.3 - TRANSFORMAÇÃO DE ANÁLISE CANÔNICA

O programa ANALYS é utilizado para o cálculo da matriz de transformação para análise canônica. Com este fim, necessita-se de um arquivo gerado pelo programa MAXVER, contendo as médias e matrizes de covariância para cada classe de treinamento.

O algoritmo computa a matriz de transformação, colocando-a num arquivo TRANSF.MAT em disco; deverá então ser acionado o programa PRINCO (opção 2 do sistema), que se encarregará de realizar a rotação espectral, mostrando os quatro novos canais na tela do visualizador do L.T.I.D.

3.4 - TRANSFORMAÇÃO PARA ANÁLISE DE CULTURAS AGRÍCOLAS

Ao utilizar a Transformação para análise de culturas agrícolas, basta escolher a opção correspondente ao "cardápio" do sistema. As novas componentes serão resultantes da rotação imposta pela matriz descrita na Seção 2, acrescido de um "offset" para evitar valores negativos.

3.5 - TRANSFORMAÇÃO LOGARÍTMICA E EXPONENCIAL

O uso da transformação logarítmica pode ser feito de *per si*, ou anteriormente a uma transformação de componentes principais. Em qualquer dos casos, o realce é feito a partir da equação abaixo, que relaciona - para um canal - o "pixel" x com o novo ponto y :

$$y = \text{GANHO} * \log(x). \quad (18)$$

O ganho deve ser escolhido de tal forma que o valor máximo de y não ultrapasse o maior nível de cinza aceitável no visualizador, isto é, 255. Usualmente toma-se o $\text{GANHO} = 46$, pois $46 * \log(255) = 255$, mas ganhos maiores poderão ser utilizados, conforme a conveniência do fotointérprete.

Para o emprego do logaritmo no âmbito da filtragem homomórfica, recomenda-se, após a conversão inicial, o uso de um filtro passa-altas e, em seguida, da transformação exponencial inversa.

Os filtros podem ser projetados através das diversas técnicas disponíveis para casos bidimensionais (Câmara Neto e Ribeiro, 1981); já existem, no L.T.I.D. do INPE, programas que fornecem os coeficientes do filtro 2-D,

a partir da especificação de sua resposta em frequência.

A justificativa do uso do logaritmo, que precede a transformação de componentes principais, é a de que o produto final será mais "agradável" ao observador humano. Taylor (1974) argumenta no sentido de que a primeira principal componente obtida nestas condições é equivalente à quantidade de "brilho" presente na imagem LANDSAT original. Embora a natureza subjetiva dessas conclusões seja inegável, a qualidade visual das imagens obtidas utilizando-se este procedimento é superior àquela conseguida quando se emprega apenas uma transformação simples de Karhunen-Loève. Para maiores detalhes, veja-se Taylor (1974) e Câmara Neto (1982).

4. CONCLUSÕES

A teoria de realce visual em imagens ainda está a reclamar uma maior sistematização, carecendo de uma formulação matemática; isso permitiria o desenvolvimento de algoritmos específicos para realce, levando-se em conta as propriedades do sistema visual humano. No momento atual, a falta de um maior conhecimento sobre estas propriedades tem impedido a formulação de uma *medida quantitativa de realce*.

O SISTEMA REALCE, descrito neste trabalho, representa uma tentativa - consideradas as limitações acima descritas - de unificar toda uma série de trabalhos dispersos pela literatura, colocando os algoritmos resultantes à disposição do usuário do Laboratório de Tratamento de Imagens Digitais do INPE.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CÂMARA NETO, G.; ARAÚJO, E.O.; MASCARENHAS, N.D.A.; R.C.M. *Realce visual de imagens de recursos naturais: aplicação em geologia*. São José dos Campos, INPE, 1980. (INPE-1952-RPE/267).
- CÂMARA NETO, G.; RIBEIRO, E.A. *Filtros bidimensionais para processamento digital de imagens: técnicas de projeto e implementação*. São José dos Campos, INPE, 1981. (INPE-2273-PRE/053).
- CÂMARA NETO, G. *Aplicação de princípios colorimétricos e modelos visuais humanos a imagens multiespectrais*. São José dos Campos, INPE. No prelo.
- CORNSWEET, T.N. *Visual perception*. New York, Academic, 1970.
- GNADESEKIAN, R. *Methods for statistical data analysis of multivariate observations*. New York, John Wiley, 1977.
- KAUTH, R.J.; THOMAS, G.S. *The tasseled cap: a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crop*

as seen in LANDSAT. In: MACHINE PROCESSING OF REMOTELY SENSED DATA, 3., West Lafayette, 1976. *Proceedings*. West Lafayette Purdue University, 1976, p. 413-41.

MEREMBECK, B.F.; TURNER, B.J. Directed canonical analysis and the performance of classifiers under its associated linear transformation. In: MACHINE PROCESSING OF REMOTELY SENSED DATA, 5., West Lafayette, 1979. *Proceedings*. West Lafayette, Purdue University, 1979. p. 314-22.

SANTISTEBAN, A.; MUÑOZ, L. Principal components of a MSS image: application to a geological problem. *IBM Journal of Research & Development*, 22(5):444-J4, Sept. 1978.

SOHA, J.M.; SCHWARTZ, A.A. Multispectral histogram normalization contrast enhancement. In: CANADIAN SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING, 5., Victoria, Canada, 1978. *Proceedings*. Ottawa, Canadian Remote Sensing Society, 1978, p. 86-93.

STOCKHAM, T. Image processing in the context of a visual model. *Proceedings of the IEEE*, 60(7):828-41, Jul. 1972.

TAYLOR, M.M. Principal components colour display of ERTS imagery. In: CANADIAN SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING, 2., Guelph, Canada, 1974. *Proceedings*. Ottawa, Canadian Remote Sensing Society. 1974, v.1, p. 295-313.