

---

## ESTATÍSTICA APLICADA AO PROCESSAMENTO DE IMAGENS DE SATÉLITE

Roberto Rosa  
Prof. Dr. do Dep. de Geografia - UFU  
Jorge Luis da Silva Brito  
Prof. do Dep. de Geografia - UFU

**RESUMO:** *Nas últimas décadas o crescimento no uso de computadores e sistemas de processamento de imagens tem sido muito rápido. As vantagens oferecidas por esses sistemas não são somente em termos do grande número de novas aplicações, mas também na crescente sofisticação e disponibilidade de instrumentos e técnicas com possibilidades de resolução dos mais variados tipos de problemas. A partir do momento em que os dados de sensoriamento remoto são extraídos das fitas compatíveis com o computador, algumas estatísticas univariadas (valor mínimo e máximo em cada banda, frequência, média, desvio padrão e variância) e multivariadas (matriz de covariância e correlação) desses dados espectrais precisam ser calculadas. O objetivo deste artigo é apresentar algumas técnicas estatísticas para escolha da melhor banda ou combinação de bandas para interpretação visual e classificação de imagem de satélite. Esses procedimentos foram aplicados em uma área teste de 25 x 25 km em Uberlândia - MG. Em uma primeira aproximação, uma imagem pode ser considerada resultante da reflectância ou emitância dos alvos da cena. A tonalidade ou cor em cada ponto é determinada pela alteração espectral da radiação solar incidente ou da radiação emitida por cada elemento da superfície. Diferentes objetos refletem e/ou emitem diferentes quantidades de energia em diferentes comprimentos de ondas, e essas diferenças espectrais são registradas em uma imagem na forma de variações tonais ou de cor. A banda ou a combinação de bandas mais apropriada para cada aplicação pode ser escolhida por técnicas estatísticas. Para Uberlândia, as melhores combinações de bandas foram: TM 3-TM 4-TM 7, TM 4-TM 5-TM 7, TM 2-TM 4-TM 7 e TM 2-TM 3-TM 4. Os procedimentos para escolha destas bandas são descritos e apresentados neste trabalho.*

Palavras Chaves: *Processamento de Imagens, Sensoriamento Remoto, Técnicas Estatísticas*

**ABSTRACT:** *Within the last decade, the development an application of computer-based Image Processing Systems have undergone very rapid and evolutionary advances. The advances are not only in terms of the number of new practice involved but also in terms of the increasing sophistication of the available tools and techniques and growing variety of problem areas addressed. Once the digital remote sensor data are extracted from the computer-compatible tape, it is useful to calculate some fundamental univariate (the minimum and maximum value for each band, the frequencies, the mean, the standard deviation and variance) and multivariate statistics (covariance and correlation matrix) of the multispectral data. The purpose of this paper is the provides statistical techniques for choose the best bands or combination bands for visual interpretation and classification of satellite image. Those procedures were an application of the test site with 25 x 25 km in Uberlândia - MG. Satellite data applications have already been demonstrated in many fields, while different applications rely on different interpretations of the image data. In order to extract ground surface information from the radiance received by the remote sensor, different relationships between the ground feature and radiance must be determined. The most appropriate band or combination of bands for spatial remote imagery should be selected for each applications. For Uberlândia, the best bands are: TM 3-TM 4-TM 7, TM 4-TM 5-TM 7, TM 2-TM 4-TM 7 e TM 2-TM 3-TM 4. Those procedures will be described and presented along with results demonstrating the performance of image digital processing techniques.*

Key Words: *Image Processing, Remote Sensing, Statistical Techniques*

## 1 - INTRODUÇÃO

Os satélites orbitais destinados ao levantamento, mapeamento e monitoramento dos recursos terrestres fornecem produtos analógicos e digitais que têm sido utilizados para diferentes aplicações temáticas. De modo geral, esses produtos de sensoriamento remoto se prestam a diversos tipos de estudos, dada sua visão sinóptica da superfície terrestre.

Em 1972 a NASA lançou o primeiro satélite destinado à observação dos recursos terrestres, o ERTS (Satélite Tecnológico para os Recursos da Terra), mais tarde denominado Landsat 1, tendo como objetivo adquirir dados espaciais, espectrais e temporais, de forma global, sinóptica e repetitiva dos alvos da superfície. Em 1975, 1978, 1982 e 1984 foram lançados respectivamente os Landsats 2, 3, 4 e 5, cada qual em substituição ao anterior.

Esses satélites utilizam uma plataforma do tipo Nimbus, onde são instalados os sensores e os demais subsistemas destinados à gravação e transmissão de dados, medição e controle de atitude e temperatura, retransmissão etc. A potência para o funcionamento do sistema é conseguida através de painéis solares que convertem a radiação solar em energia elétrica.

Os satélites da série Landsat deslocam-se do norte para o sul em órbita geocêntrica, circular, quase polar e heliossíncrona, isto é, o ângulo Sol-Terra-satélite permanece constante, o que garante condições semelhantes de iluminação ao longo do ano, na área imageada.

Os Landsats 1, 2 e 3 estavam equipados com dois sistemas sensores; um sensor "Multispectral Scanner System" (MSS) e um sensor "Return Beam Vidicom" (RBV).

Nos Landsats 4 e 5 o sistema RBV foi substituído pelo sensor "Thematic Mapper" (TM), com sete bandas espectrais, três no visível (bandas 1, 2 e 3), uma no infravermelho próximo (banda 4), duas no infravermelho médio (bandas 5 e 7) e uma no infravermelho termal (banda 6), que incorporaram tecnologia mais avançada que o MSS, porém manteve-se o sistema MSS com quatro bandas espectrais, duas no visível (bandas 4 e 5) e duas no infravermelho próximo (bandas 6 e 7). O Landsat 4 teve problemas com o sensor TM, o que obrigou a NASA a fazer o lançamento antecipado do Landsat 5, com os mesmos sensores que o Landsat 4. O Landsat 6 foi lançado em substituição ao Landsat 5, porém, sem sucesso. Mais informações sobre os satélites da série Landsat podem ser encontradas nos manuais de usuários dos produtos Landsat, NASA (1984), bem como em diversas publicações, como por exemplo Novo (1989) e Rosa (1992).

Para a elaboração do presente trabalho foram utilizados dados digitais obtidos pelo sensor TM do satélite norte-americano Landsat 5. Esse satélite opera a uma altitude nominal de 705 km em órbita circular quase polar, imageando a mesma área a cada 16 dias. O satélite cruza o equador do norte para o sul às 9:45 horas e no paralelo de 34 graus no extremo sul do Brasil às 9:50 horas. Cada órbita gasta 98,9 minutos, sendo realizadas 14 voltas ao redor da Terra por dia.

O sensor TM opera simultaneamente como já mencionado em sete bandas espectrais, com um campo de visada instantâneo (IFOV) ou resolução espacial equivalente a um quadrado no terreno de 30 x 30 metros nas bandas do visível, infravermelho próximo e infravermelho médio e de 120 x 120 metros na banda termal. Cada banda espectral é destinada a uma aplicação específica, conforme pode ser observado na Quadro 1.

**QUADRO 1 - Bandas Espectrais do Sensor Thematic Mapper e suas Principais Aplicações**

BANDA	INTERVALO ESPECTRAL	APLICAÇÕES
1	0,45-0,52 $\mu\text{m}$	Mapeamento de superfície de água e a análise de materiais em suspensão. Diferenciação solo/vegetação. Sensibilidade concentração clorofila.
2	0,52-0,60 $\mu\text{m}$	Mapeamento da vegetação sadia pela reflectância verde
3	0,63-0,69 $\mu\text{m}$	Banda de absorção da clorofila; útil na diferenciação de espécies vegetais
4	0,76-0,90 $\mu\text{m}$	Estudos de volume de biomassa e delineamento de corpos d'água
5	1,55-1,75 $\mu\text{m}$	Estresse hídrico em vegetação e uso do solo
6	10,40-12,50 $\mu\text{m}$	Propriedades termais dos alvos
7	2,08-2,35 $\mu\text{m}$	Identificação de minerais com íon hidroxila

FONTE; NASA, 1984

## 2 - PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

Os dados obtidos pelo sensor TM podem ser apresentados na forma de imagens fotográficas (em papel e/ou transparências positivas) ou no formato de imagens digitais, que são armazenadas em fitas magnéticas, para posterior análise por computador.

Em uma primeira aproximação, uma imagem pode ser considerada resultante da reflectância ou emitância dos alvos da cena. A tonalidade ou cor em cada ponto é determinada pela alteração ou interação espectral da radiação solar incidente ou da radiação emitida por cada elemento de resolução da superfície. Diferentes objetos refletem e/ou emitem diferentes quantidades de energia em diferentes comprimentos de ondas e estas diferenças espectrais são registradas em uma imagem na forma de variações tonais, de cores ou de densidade. Os sensores remotos buscam detectar e mostrar as diferenças em tonalidade ou cor entre alvos ou entre um alvo e o ambiente, sem as quais não haveria imagem identificável. Deste modo cada pixel contém a informação espectral do alvo de interesse, mais a informação atmosférica, relevo, sazonalidade, etc..

Uma imagem, por sua vez, pode ser definida como sendo um conjunto de pontos, onde cada ponto (pixel) corresponde a uma unidade de informação do terreno, formada através de uma função bidimensional  $f(x,y)$ , onde  $x$  e  $y$  são coordenadas espaciais, e o valor de  $f$  no ponto  $x, y$  é proporcional ao brilho ou radiância da cena. Em uma imagem digital, quanto maior o intervalo de possíveis valores assumidos por um pixel, maior a sua resolução radiométrica; e quanto maior o número de elementos da matriz, maior a sua resolução espacial.

Uma imagem digital só assume valores inteiros, tanto em relação aos níveis de cinza (números digitais) que representam a radiância da cena, quanto em relação às coordenadas espaciais e, portanto, pode ser expressa numa forma matricial, onde as linhas  $i$  e  $j$  correspondem às coordenadas espaciais  $x$  e  $y$  e o valor digital no ponto  $x, y$  corresponde ao nível de cinza do pixel daquele ponto.

Em uma imagem digital, quanto maior o intervalo de possíveis valores assumido por um

pixel, maior é a sua resolução radiométrica; e quanto maior o número de elementos da matriz, maior a sua resolução espacial. Os níveis de cinza podem ser analisados através de um histograma, em termos de sua frequência numérica ou porcentagem de ocorrência, e fornecem informações referentes ao contraste e nível médio de cinza, não fornecendo, entretanto, nenhuma informação sobre a distribuição espacial. A média dos níveis de cinza corresponde ao brilho da imagem, enquanto que a variância refere-se ao contraste. Quanto maior a variância, maior será o contraste da imagem.

Dentre as técnicas de processamento de imagens tipicamente usadas para mapeamentos podemos citar: transferência da imagem da fita magnética para o disco rígido, visualização temporária e produção de cópias em papel, processamento de imagens, realce de imagens, classificação de imagens e, estatísticas.

a) - Transferência da imagem de fitas magnéticas para o disco rígido

Os dados digitais são normalmente armazenados em fitas magnéticas, porém, para o processamento dos mesmos devemos transferir a informação da fita magnética para o disco rígido, uma vez que esse último possibilita manipulação dos dados de forma mais rápida e segura.

b) - Visualização temporária e produção de cópias em papel

As imagens, após terem sido carregadas no disco rígido por meio do uso de softwares específicos, podem ser visualizadas e examinadas no monitor de vídeo, em preto e branco ou a cores, podendo ser facilmente modificadas. Essas imagens também podem ser impressas com apoio de impressoras e plotters especiais para posterior análise.

c) - Processamento de imagens

O processamento de imagens propriamente dito está relacionado com a correção de distorção, degradação e ruído introduzido na imagem durante o processo de imageamento. Os principais tipos de processamento de imagens são: correção radiométrica e correção geométrica.

Correção radiométrica - as imagens originais freqüentemente apresentam degradações radiométricas, em função de desajustes na calibração dos detetores, erros esporádicos na transmissão dos dados e influências atmosféricas. A correção radiométrica de imagens visa corrigir essas degradações e é uma das mais importantes fases do processamento digital, pois caso essas imperfeições não sejam removidas, poderão ser enfatizadas; por exemplo, quando da aplicação posterior da técnica de realce de imagens.

As principais correções radiométricas são o "stripping" (padrão sucessivo de linhas horizontais que aparecem na imagem devido, por exemplo, à diferença ou desajuste de calibração dos detetores) e o "dropelines" ou linhas com ausência de informação (padrão horizontal anômalo na imagem que ocorre pela perda de informações quando da gravação ou transmissão defeituosa ou ainda no processamento posterior dos dados).

A atmosfera é um dos principais provocantes de degradações nas imagens originais, muitas vezes comprometendo a análise e interpretação destas. A intensidade da influência atmosférica depende do comprimento de onda, ou seja, varia de banda para banda (faixa espectral de operação do sistema sensor), e a sua correção na imagem pode ser feita a partir de um modelo matemático.

Correção geométrica - um outro tipo de distorção que as imagens originais apresentam são as chamadas distorções geométricas, que diminuem a precisão da informação. Uma série de aplicações como na cartografia, confecção de mosaicos, sistema geográfico de informações e detecção de mudanças de alvos necessitam de dados com uma boa precisão, o que leva a uma necessidade de efetuarmos tais correções.

Algumas das distorções geométricas são causadas pelos deslocamentos sofridos pelo sistema de eixos do sensor, que podem ser de três tipos, o "row", o "pitch" e "yaw", que provocam um não alinhamento das varreduras consecutivas. As variações do tipo "row" afetam a imagem no sentido longitudinal à varredura, enquanto que as variações do tipo "pitch" provocam distorções transversais à varredura. Um efeito semelhante a um leque é provocado pelas variações do tipo "yaw".

Outras distorções são provocadas pela variação da altitude do satélite, com distorção na escala, e pela variação da velocidade da plataforma, com conseqüente superposição negativa ou positiva das varreduras consecutivas. Também o movimento de rotação da Terra provoca um deslocamento gradual das varreduras no sentido oeste, assim como as imperfeições do mecanismo eletro-ótico-mecânico do satélite fazem com que a velocidade de deslocamento do espelho não varie linearmente ao longo de sua trajetória, resultando numa aparente variação no comprimento da varredura. Finalmente, quando a superfície do terreno varrida pelo espelho não é normal à órbita do satélite, pode ocorrer um arrasto no sentido transversal à varredura.

As imagens têm, portanto, erros geométricos sistemáticos e não-sistemáticos. Dois tipos de correções são mais freqüentemente usados: a retificação geométrica e o registro geométrico.

Retificação de imagem é o processo com que uma imagem é transformada planimetricamente. A geometria de uma imagem extraída de uma fita magnética tem um sistema de coordenadas x, y (linhas e colunas) que não é planimétrico. Para tornar a imagem planimétrica, converte-se o sistema de coordenadas x, y da imagem para um sistema de coordenadas padrão nos mapas. Por exemplo, o sistema de coordenadas UTM. Isto pode ser feito associando-se pontos de um mapa padrão (folha topográfica) aos mesmos pontos da imagem a ser retificada. No entanto, isto não remove distorções causadas pela topografia e deslocamentos do relevo nas imagens.

O registro de imagens é o processo que envolve a superposição de uma mesma cena que aparece em duas ou mais imagens distintas, de tal modo que os pontos correspondentes nestas imagens coincidam espacialmente. O objetivo do registro é basicamente manipular dados não diretamente correlacionados como sobrepor imagens obtidas por diferentes sensores, sobrepor imagens de diferentes épocas, ou de diferentes tomadas de posição, etc.. A finalidade é, por exemplo, construir mosaicos, detectar mudanças de alvos, obter composições coloridas ou cruzar diferentes informações.

Os mesmos princípios de processamento de imagens são usados para a retificação e o

registro de imagens. A diferença é que na imagem retificada a referência é um mapa, com uma projeção cartográfica específica, enquanto que no registro de imagem a referência é outra imagem. Estas distorções geométricas podem ser corrigidas através do uso de determinados modelos matemáticos que descrevam as distorções existentes nos dados. Após a aquisição dos coeficientes deste modelo, uma função de mapeamento é criada para a construção da nova imagem corrigida.

#### d) - Realce de imagens

Esta técnica tem por objetivo modificar, através de funções matemáticas, os níveis de cinza ou os valores digitais de uma imagem, de modo a destacar certas informações espectrais e melhorar a qualidade visual da imagem, facilitando a análise posterior do fotointérprete. A seguir são descritas as principais técnicas de realce de imagens.

Ampliação de contraste - geralmente os níveis de cinza originais de uma cena, obtidos por um sistema sensor qualquer, não ocupam todo o intervalo possível. Esta técnica de realce de contraste, ou "contrast stretch", através de uma transformação matemática, amplia o intervalo original para toda a escala de níveis de cinza ou números digitais disponíveis.

Embora a transformação mais comum seja a linear, pode-se implementar qualquer outro tipo de transformação, dependendo do histograma original e do alvo ou feição de interesse, ou seja, esta transformação pode ainda ser: logarítmica, exponencial, raiz quadrada etc.

Composição colorida - a utilização de composições coloridas é fundamentada pelo fato de que o olho humano é capaz de discriminar mais facilmente matizes de cores do que tons de cinza. Para cada banda associa-se uma cor primária (azul, verde ou vermelha) ou, ainda, as suas complementares (amarela, magenta ou cian), de modo que para cada alvo diferente da cena associa-se uma cor ou uma combinação de cores diferentes.

Essa técnica comumente utiliza imagens que já estejam realçadas por ampliação de contraste. Uma das únicas restrições a este método é que ele permite a utilização simultânea de no máximo três bandas. A reconstituição das cores

na imagem advém do processo aditivo das cores primárias (azul, verde e vermelho). A imagem resultante é costumeiramente denominada imagem colorida RGB (red, green e blue).

Um outro tipo de realce por composição colorida é a transformação IHS, que envolve uma decomposição de uma imagem RGB em componentes de intensidade, matiz e saturação.

Divisão de bandas - esta técnica consiste na divisão do valor digital dos pixels de uma banda pelos correspondentes valores de uma outra banda. É amplamente utilizada em pesquisa mineral e de discriminação litológica.

Ao se efetuar uma razão entre bandas, os quocientes variam em um intervalo que compreende valores reais contínuos. Para a discretização destes valores, multiplicam-se os quocientes por um "ganho" e adiciona-se um "off-set", cujos valores ideais do ganho e off-set variam de acordo com a imagem e com o tipo de "ratio" (divisão de bandas ou razão de canais). Esses valores devem atribuir à imagem resultante uma maior variância possível dos níveis de cinza (números digitais), sem saturá-la, e a média deve estar próximo da média do intervalo máximo dos valores digitais da imagem.

Essa técnica possui a vantagem de atenuar os efeitos multiplicativos relativos à topografia, ângulo de elevação e azimute solar, além de enfatizar a separação dos alvos com comportamento de gradiente diferente nas curvas de reflectância. Possui, também, a capacidade de reduzir a dimensão dos dados, ou seja, as informações de quatro bandas podem ser obtidas através de uma única composição colorida, usando-se três imagens ratio. Porém, possui a desvantagem de perder as características espaciais da cena, devido à atenuação das influências de iluminação ou sombreamento do relevo, além de atenuar a discriminação de alvos com comportamento de gradiente semelhante nas curvas de reflectância, e perder as informações espectrais originais.

Filtragem espacial - a técnica de filtragem espacial consiste em uma transformação dos níveis de cinza pixel a pixel, levando-se em consideração a informação espacial, isto é, a relação existente entre os pixels vizinhos.

Filtragem espacial é definida como qualquer técnica ou processo de tratamento de imagens que modifica o conteúdo da imagem e tende a enfatizar feições de interesse do usuário, enquanto suprime outras indesejáveis como, por exemplo, o ruído. É bastante utilizada em geologia estrutural, no realce de certas feições de imagem como os lineamentos, falhas, xistosidade etc..

Os três principais tipos de filtros são o passa-alta, passa-baixa e passa-faixa. Denomina-se passa-alta quando ocorre diminuição dos componentes de baixa frequência e aumento dos de alta frequência, ocorrendo um realce das bordas e detalhes da imagem, enfatizando, por exemplo, redes de drenagem.

Os filtros do tipo passa-baixa tendem a aumentar os componentes de baixa frequência e diminuir os de alta frequência, ocorrendo perda de detalhes e redução do contraste da imagem, porém atenua a influência de processos ruidosos provocados, por exemplo, por defeitos do sensor e erros na transformação matemática. Os filtros passa-faixa atenuam influências de ruídos periódicos.

Componentes principais - a técnica de componentes principais consiste na geração de novas bandas, não correlacionadas, de tal forma que o máximo de informação possível encontra-se nas primeiras componentes. Envolve uma transformação linear dos dados originais, através de uma rotação e translação de eixos no espaço de atributos espectrais.

Ao contrário das imagens ratio, que requerem uma escolha cuidadosa das combinações de bandas para enfatizar determinadas características espectrais, essa técnica não requer nenhuma informação adicional inicial.

Embora haja perda das características espectrais originais, são importantes na redução da dimensionalidade dos dados. Por exemplo, informações de quatro bandas espectrais podem ser reduzidas para duas, ou de sete para três bandas. Além disso, as imagens resultantes geralmente apresentam um melhor poder de discriminação visual.

#### e) - Classificação de imagens

Classificação, em sensoriamento remoto, significa a associação de pontos de uma imagem à

uma classe ou grupo. Por exemplo, água, cultura, área urbana, reflorestamento, cerrado etc., ou ainda o processo de reconhecimento de classes ou grupos cujos membros exibem características comuns.

Ao se classificar uma imagem assume-se que objetos/alvos diferentes apresentam propriedades espectrais diferentes e que cada ponto pertence a um única classe. Além disto, os pontos representativos de certa classe devem possuir padrões próximos de tonalidade e textura. A classificação pode ser dividida em supervisionada e não-supervisionada.

Classificação supervisionada - é utilizada quando se tem algum conhecimento sobre as classes na imagem, quanto ao seu número e pontos na imagem representativos destas classes. Antes da fase de classificação propriamente dita o analista obtém as características das classes, por exemplo, média e variância de cada classe, que serão utilizadas como termos de comparação na classificação, fase esta denominada de treinamento. Os principais algoritmos de classificação supervisionada disponíveis são o single-cell e o maxver.

Classificação não-supervisionada - é utilizada quando não se tem informações sobre a área imageada, por exemplo, não se dispõe de dados prévios sobre o número de classes presentes. As classes são definidas no algoritmo de classificação. O algoritmo mais utilizado neste tipo de classificação é o k-médias.

### 3 - ANÁLISE ESTATÍSTICA

Uma vez que os dados de sensoriamento remoto são extraídos de fitas compatíveis com computador (CCT's), eles são usados para calcular algumas univariações e multivariações estatísticas dos dados multispectrais. Isto geralmente envolve o cálculo do valor máximo e do valor mínimo de cada banda da imagem, a média, o desvio padrão, a matriz de covariância e a frequência dos valores de nível de cinza de cada banda individual, os quais são usados para produzir histogramas (Short, 1982).

Para facilitar o tratamento estatístico de imagens, podemos definir uma imagem digital como uma matriz, com dimensões de alguns milhares de linhas e de colunas (Figura 1), onde temos:

- i = linha na imagem
- j = coluna na imagem
- k = banda da imagem (exemplo: TM 4)
- l = outra banda da imagem (Exemplo TM 3)
- ND<sub>ijk</sub> = Valor do nível digital na linha i, coluna j e banda k. ( Na Figura 1 ND<sub>4,2,1</sub>=78).
- NDR = Amplitude de variação do valor do nível digital (NDR = 2<sup>8</sup>, variando de 0 a 255)
- n = número total de elementos da imagem (pixels)
- mk = média da banda da imagem
- Sk = desvio padrão da banda da imagem
- Var<sub>ckl</sub> = variância de uma matriz de classe c para as bandas k e l.
- COVar<sub>ckl</sub> = covariância de uma matriz de classe c para as bandas k e l.

i	(1,1)	30	57	60	87	123	89	
		20	67	78	90	189	67	
		40	89	89	23	137	57	
		50	78	90	123	138	79	
		10	67	78	145	134	56	
		60	56	89	180	124	40	
		(6,6)						j

Fig. 1 - Valores de níveis digitais de um conjunto de 36 pixels na banda 1.

As medidas estatísticas mais usadas em processamento de imagens são: a média, o desvio padrão, a amplitude, a variância, a covariância e a correlação dos níveis digitais. Elas possibilitam fazer uma análise da redundância e qualidade das bancas espectrais, análise de componentes principais, seleção de feições e classificação de imagens.

As medidas estatísticas univariadas, ou seja, de uma única variável (média, desvio padrão, variância e a amplitude) nos fornecem idéia dos tipos de alvos presentes na imagem. Por exemplo, as áreas com valores altos de níveis digitais na banda 3 do sensor TM, correspondem a áreas de solos arenosos, enquanto que as áreas com altos valores de níveis digitais na banda 4 do sensor TM correspondem a áreas de cobertura vegetal com muita biomassa verde (Matas e Reflorestamentos).

Apesar das informações obtidas através das análises estatísticas univariada serem úteis, elas não nos mostram as correlações existente entre as bandas. Portanto, para fazermos uma análise profunda da variação conjunta entre as bandas precisamos aplicar os métodos de análise multivariada (covariância e correlação).

As diferenças derivadas de medidas espectrais para cada pixel freqüentemente mudam conjuntamente em muitas alvos da superfície. Se não existe uma relação entre os valores dos níveis digitais entre duas bandas, então dizemos que os valores são mutuamente independentes; isto é, um aumento ou decréscimo do nível digital de uma banda não é acompanhado pela mudança nos valores do nível digital na outra banda. No entanto, para a maioria dos alvos da superfície, as medidas espectrais de um pixel individual são dependentes, necessitando assim de alguma medida das interações mútuas entre as bandas.

Para avaliar as variações mútuas entre duas ou mais bandas espectrais utiliza-se a medida da covariância entre as bandas, que consiste em se determinar a variação conjunta de duas bandas espectrais em relação às suas respectivas médias.

Para o cálculo da covariância, encontra-se a soma dos produtos corrigidos (SP), definido pela equação (Davis, 1973; Davies e Hicks, 1975):

$$SP_{kl} = S \sum_{i=1}^n (ND_{ik} - m_k) \cdot (ND_{il} - m_l) \quad (01)$$

Nesta notação, ND<sub>ik</sub> é a i-ésima medida da banda k, e ND<sub>il</sub> é a i-ésima medida da banda l com n pixels na área de estudo. As médias da banda k e l são m<sub>k</sub> e m<sub>l</sub> respectivamente. A equação (01) é computacionalmente calculada mais eficientemente quando escrita da seguinte forma:

$$SP_{kl} = \frac{S \sum_{i=1}^n ND_{ik} \cdot S \sum_{i=1}^n ND_{il}}{n} - \left( S \sum_{i=1}^n ND_{ik} \right) \cdot \left( S \sum_{i=1}^n ND_{il} \right) / n \quad (02)$$

A quantitativa  $S(ND_{ik} \times S ND_{ij})$  é chamada de soma dos produtos não correlacionados. A relação de  $SP_{kl}$  com a soma dos quadrados (SS) pode ser dada pela seguinte equação:

$$(03) \quad \frac{\sum_{i=1}^n S ND_{ik}^2 - (\sum_{i=1}^n S ND_{ik})^2}{n} = SS_k$$

A variância é calculada dividindo a soma dos quadrados, SS, por  $(n - 1)$ , e a covariância é calculada dividindo SP por  $(n - 1)$ . Desta forma, a covariância entre os valores de nível digital nas bandas k e l,  $Cov_{kl}$  é igual a (Davis, 1973):

$$(04) \quad Cov_{kl} = \frac{SP_{kl}}{n - 1}$$

A soma dos produtos (SP) e a soma dos quadrados (SS) podem ser calculadas para todas as combinações possíveis de todas as bandas espectrais. Estes dados podem ser então arranjados numa matriz de covariância (i linhas por j colunas), conforme mostra a tabela 1. Todos os elementos da matriz, exceto os da diagonal, apresentam-se duplicados (por exemplo:  $Cov_{12} = Cov_{21}$ ), o mesmo que  $Cov_{kl} = Cov_{lk}$ ). A tabela 1 é geralmente calculada por programas de processamento de imagens, sendo que os elementos da diagonal são a variância de cada banda ( $Var = SS$ ) e os outros elementos da matriz representam a covariância entre as bandas (Cov).

**Tabela 1 - Matriz de variância e covariância para quatro bandas espectrais**

	BANDA 1	BANDA 2	BANDA 3	BANDA 4
BANDA 1	SS <sub>1</sub>	Cov <sub>12</sub>	Cov <sub>13</sub>	Cov <sub>14</sub>
BANDA 2	Cov <sub>21</sub>	SS <sub>2</sub>	Cov <sub>23</sub>	Cov <sub>24</sub>
BANDA 3	Cov <sub>31</sub>	Cov <sub>32</sub>	SS <sub>3</sub>	Cov <sub>34</sub>
BANDA 4	Cov <sub>41</sub>	Cov <sub>42</sub>	Cov <sub>43</sub>	SS <sub>4</sub>

Fonte: Jensen, 1986.

**Tabela 2 - Estatística univariada de uma cena do Município de Uberlândia, contendo as 7 bandas espectrais do sensor TM/Landsat, correspondente a uma área de 850 x 850 pixels (25Km x 25Km).**

BANDA µm	TM 1 0,45-0,52	TM2 0,52-0,60	TM3 0,63-0,69	TM4 0,76-0,90	TM5 1,55-1,75	TM6 10,4-12,5	TM7 2,08-2,35
Média	49,91	24,49	27,71	54,35	71,47	127,45	21,35
Desvio Padrão	4,93	4,30	8,87	9,94	21,81	2,42	10,77
Variância	24,30	18,49	78,68	98,80	475,68	5,86	115,99
Valor Mínimo	31	13	0	3	0	119	0
Valor Máximo	218	88	255	115	237	138	79

A estimativa do grau de correlação entre as bandas espectrais  $k$  e  $l$  ( $r_{kl}$ ) é definido pela razão entre a covariância duas bandas ( $Cov_{kl}$ ) e o produto dos desvios padrão destas duas bandas ( $S_k$  e  $S_l$ ). Desta forma temos:

$$(05) \quad r_{kl} = \frac{Cov_{kl}}{S_k S_l}$$

Como o coeficiente de correlação é uma razão, ele varia de -1 a +1. No exemplo dado, um coeficiente de correlação +1 entre duas bandas indica uma correlação positiva, ou seja, uma perfeita correlação entre os valores de níveis digitais das duas bandas (isto é, um acréscimo de nível digital numa banda, acarretará o mesmo acréscimo no nível digital em outra banda). Contrariamente, um coeficiente de correlação -1 poderia indicar que uma banda está inversamente correlacionada com a outra (isto é, um acréscimo no nível digital de uma banda acarretará um decréscimo no valor do nível digital da outra banda). Um coeficiente de correlação zero sugere que não existe uma relação linear entre as duas bandas espectrais.

#### 4 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DE UMA IMAGEM TESTE

Para demonstrar a utilidade dessas medidas, foram selecionados os dados digitais de uma cena com as 7 bandas do sensor TM/Landsat, órbita 221 ponto 73 de 28 de abril de 1991, correspondente a uma área de 850 x 850 pixels (aproximadamente 25Km x 25Km) do município de Uberlândia (Tabelas 2).

Analisando a tabela 2, observa-se que a banda TM 1 apresenta uma grande variação de nível digital (isto é de 31 a 218). Esta grande variação é devido a alta influência do espalhamento atmosférico na região do espectro eletromagnético registrado por essa banda (comprimentos de onda do azul). A radiância na banda TM 3 tem mínimo de zero devido a alta absorção da vegetação e máximo de 255 devido à presença de solos arenosos (alta reflectância). Os valores próximo de zero nas bandas TM 5 e TM 7 correspondem à áreas de alta umidade, provavelmente áreas com presença de veredas e vegetação hidrófila). Os valores de níveis digitais alto na banda TM 4 correspondem a áreas de cobertura vegetal com grande quantidade de biomassa (áreas de reflorestamento, mata e cerradão).

#### A tabela 3 mostra os valores de variância entre as sete bandas espectrais para a área teste.

Tabela 3 - Matriz de valores de variância e covariância da cena do Município de Uberlândia, contendo as 7 bandas espectrais do sensor TM/Landsat, correspondente a uma área de 850 x 850 pixels.

Banda ( $\mu\text{m}$ )	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	TM7
	0,45-0,52	0,52-0,60	0,63-0,69	0,76-0,90	1,55-1,75	10,4-12,5	2,08-2,35
1	24,30						
2	18,73	18,49					
3	39,47	34,32	78,68				
4	8,11	15,87	4,94	99,80			
5	93,32	82,28	175,29	42,29	475,68		
6	7,09	6,36	13,50	2,89	38,16	5,86	
7	45,83	38,50	89,77	0,58	22,85	17,66	115,99

Os elementos da diagonal da tabela 3 representam a variância das bandas individuais e os demais valores representam a covariância entre as bandas, conforme mostrado na tabela 1. A partir desses valores foram calculados os coeficiente de

correlação entre as sete bandas (Tabela 04), utilizando-se a equação (05).

Na tabela 4, os valores de níveis digitais na banda TM 7 estão altamente correlacionados

com os valores das bandas TM 3 e TM 5. A alta correlação sugere que existe uma quantidade substancial de informações redundantes contidas nessas bandas. Isto nos mostra que numa seleção de bandas espectrais para geração de uma composição colorida ou para se fazer uma

classificação automática de imagens, pode-se eliminar as bandas que tem alto coeficiente de correlação. Ao contrário, uma baixa correlação entre bandas sugere que as mesmas contém algum tipo de informação que não são encontradas nas demais bandas.

**Tabela 4 - Coeficiente de correlação entre as sete bandas espectrais da cena do Município de Uberlândia, contendo as 7 bandas espectrais do sensor TM/Landsat, correspondente a uma área de 850 x 850 pixels.**

BANDA ( $\mu\text{m}$ )	TM1 0,45-0,52	TM2 0,52-0,60	TM3 0,63-0,69	TM4 0,76-0,90	TM5 1,55-1,75	TM6 10,4-12,5	TM7 2,08-2,35
1	1,00						
2	0,89	1,00					
3	0,91	0,90	1,00				
4	0,17	0,37	0,06	1,00			
5	0,88	0,87	0,91	0,19	1,00		
6	0,59	0,59	0,61	0,12	0,70	1,00	
7	0,87	0,82	0,94	0,00	0,94	0,66	1,00

Analisando-se a tabela 4 verifica-se que as bandas TM 3 e TM 7, TM 5 e TM 7, TM 2 e TM 3, TM 1 e TM 3 e, TM 2 e TM 3, apresentaram uma alta correlação entre elas ( $r > 0,89$ ), indicando que existe informações substancialmente redundantes entre estas bandas espectrais. A banda TM 6 foi a que apresentou menor correlação com as demais bandas. Isto é explicado pelo fato da banda TM 6 estar localizada na região do espectro emissivo de radiação eletromagnética, sendo bastante influenciada pela umidade, principalmente da atmosfera. Com exceção da banda TM 6, na faixa do espectro refletivo, mais usadas em sensoriamento remoto, as bandas que tiveram menor correlação foram: TM 4 e TM 7, TM 3 e TM 4, TM 1 e TM 4, TM 4 e TM 5 e, TM 2 e TM 4 ( $r < 0,37$ ).

Essas análises tornam-se imprescindíveis

na seleção de bandas espectrais para a geração de composições coloridas e para a classificação de imagens. Apesar da banda TM 1 apresentar baixa correlação com a banda TM 4 ela é pouco utilizada em sensoriamento remoto, uma vez que as informações nela contidas sofrem grande influência da atmosfera, mascarando portanto as informações dos alvos de superfície. Já a banda TM 6 é pouco utilizada devido à sua baixa resolução espacial (resolução espacial de 120 x 120 m para a banda TM 6 e 30 x 30 m para as demais bandas). Diante do exposto e com base na tabela 04, o conjunto de três bandas espectrais com menores correlações entre si, ou seja, com maior grau de informação, úteis para a geração de composições coloridas para posterior interpretação visual, tendo como objetivos mapeamentos diversos, em área de cerrado, especialmente da cobertura vegetal e uso da terra são, em ordem, as seguintes:

Bandas TM 3, TM 4 e TM 7 com  $r_{3,4} = 0,06$ ;  $r_{3,7} = 0,94$  e  $r_{4,7} = 0,00$   
 Bandas TM 4, TM 5 e TM 7 com  $r_{4,5} = 0,19$ ;  $r_{4,7} = 0,00$  e  $r_{5,7} = 0,94$   
 Bandas TM 2, TM 4 e TM 7 com  $r_{2,4} = 0,37$ ;  $r_{2,7} = 0,82$  e  $r_{4,7} = 0,00$   
 Bandas TM 2, TM 3 e TM 4 com  $r_{2,3} = 0,90$ ;  $r_{2,4} = 0,37$  e  $r_{3,4} = 0,06$

## 5 - CONCLUSÕES

Sempre que desejarmos realizar operações de processamento de imagens, tais como geração de composição colorida e classificação de imagens, necessitamos antes selecionar um conjunto de no mínimo três bandas espectrais que representem melhor todas as possíveis variações espectrais dos alvos contidos na área de interesse. As técnicas de estatística univariada e multivariada constituem-se em ferramentas importantes para a seleção destas bandas. No caso da área teste, os resultados mostraram que o melhor conjunto de bandas do sensor TM/Landsat para representar as variações espectrais dos alvos é a combinação TM 3, TM 4, e TM 7.

No entanto, é necessário ressaltar que a melhor combinação de bandas varia de região para região. Por exemplo, a melhor combinação de bandas para uma região úmida, pode não ser válida para uma região seca. Os resultados obtidos neste trabalho mostram que os cálculos do coeficiente de correlação entre bandas espectrais são de fundamental importância na seleção de bandas espectrais com o objetivo de mapear e monitorar os recursos naturais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- COLWELL, R. N., 1983. Manual of Remote Sensing. Falls Church, Virginia: American Society of Photogrammetry.
- DAVIES, H.G.; HICKS, G. A. Mathematics for Scientific and Technical Students. New York, NY, John Wiley & Sons, 1975.
- DAVIS, J.C. Statics and data analysis in Geology. New York, NY, Logman Inc, 1973.
- FERREIRA, C.C.; SIMÕES, N.N. Tratamento estatístico e gráfico em Geografia. Gradiva, Lisboa, 1987.
- HORD, R. M., 1986. Remote Sensing: Methods and Applications. New York: John Wiley & Sons.
- JENSEN, J.R. Introductory Digital Image Processing - A Remote Sensing Perspective. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N J, 1986.
- KREJCIE, R.V.; MORGAN, D.W. Determinating sample size for research activities. Educational and Psychological Measurement, 30(3): 607-610, 1970.
- KING, LS. Statical analysys in geography. Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, 1969.
- ROSA, R., 1992. Introdução ao Sensoriamento Remoto. Uberlândia, Brazil: Edufu.
- SHORT, N. Principles of Computer Processing of Landsat Data- Appêndix A in the Landsat Tutorial Workbook,. Nasa Technical Reference Publication. Washington, D.C, NASA. 1982. P.421-453
- SILVA, B.C.N. Métodos quantitativos aplicados em Geografia: uma introdução. Geografia, 3(6): 33-73. 1978.
- 
- SWAIN, P. H. and DAVIS, S. M., 1978. Remote Sensing: The Quantitative Approach. New York: McGraw-Hill Book Company.
- SZEKIELDA, K. -H., 1988. Satellite Monitoring of the Earth. New York: John Wiley & Sons.
- WESTERVELT, J., 1991. Introduction to GRASS 4.0. Champaign, IL: USA-CERL.