

DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA TRANSFORMAÇÃO  
"TASSELED CAP" PARA ANÁLISE E CLASSIFICAÇÃO  
DE IMAGENS OBTIDAS PELO SATÉLITE SPOT

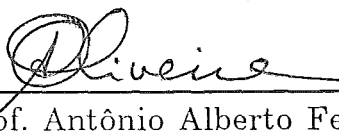
Mára Regina Labuto Fragoso da Silva

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE SISTEMAS E COMPUTAÇÃO.

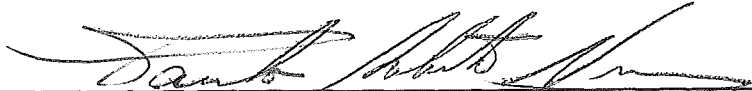
Aprovada por:



Prof. Gelson Vieira Mendonça, Ph.D.  
(Presidente)



Prof. Antônio Alberto Fernandes de Oliveira, D.Sc.



Prof. Paulo Roberto Rosa Lopes Nunes, Ph.D.



Prof. Ubiratan Porto dos Santos, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL  
NOVEMBRO DE 1990

**daSILVA, MÁRA REGINA LABUTO FRAGOSO**

Determinação dos Parâmetros da Transformação "Tasseled Cap"  
para Análise e Classificação de Imagens Obtidas pelo Satélite SPOT  
[ Rio de Janeiro ] 1990

X, 68 p., 29,7cm. (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia de Sistemas de  
Computação, 1990)

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Processamento de Imagens 2. Sensoriamento Remoto

I. COPPE/UFRJ II. Título (série).



Meus Agradecimentos:

- A Deus, pela existência de tudo
- Aos meus pais, pela minha existência
- Ao meu marido e meus filhos, pela existência do dia a dia
- Ao Gelson, orientador desta tese, pela realização deste trabalho
- Aos membros da banca de tese, pelo tempo dispendido na leitura, análise, audiência e crítica
- A todos os companheiros da IBM e, em especial, ao Raul Braga e Antônio Machado, pelas críticas e sugestões
- Ao Centro Científico da IBM, pelas excelentes condições de trabalho e apoio concedido durante o desenvolvimento desta tese
- Ao CNPq e CAPES pelo suporte financeiro concedido no início do mestrado
- Aos que lêem este trabalho, pelo cumprimento de sua finalidade.



Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.).

**DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA TRANSFORMAÇÃO  
"TASSELED CAP" PARA ANÁLISE E CLASSIFICAÇÃO  
DE IMAGENS OBTIDAS PELO SATÉLITE SPOT**

**Mára Regina Labuto Fragoso da Silva**

Novembro de 1990

Orientador: Gelson Vieira Mendonça

Programa: Engenharia de Sistemas e Computação

A transformação "Tasseled Cap" é um tipo de transformação linear, criada em 1976 por Kauth e Thomas, planejada para maximizar a informação de maior importância em uma análise multiespectral de dados. Esta transformação vem sendo utilizada com sucesso em diversas aplicações e pode ser encontrada na literatura, tendo como aplicação os dados de dois sensores diferentes do satélite Landsat: MSS e TM. Como uma evolução natural, torna-se necessário adaptá-la ao sensor multiespectral do satélite SPOT: HRV. O trabalho desenvolvido nesta tese tem como finalidade apresentar a matriz de rotação com a qual se deve ajustar os dados do sensor HRV nas três faixas de frequência em que opera para gerar as coordenadas "HRV Tasseled Cap" para o satélite SPOT. Esta operação cria uma nova imagem, à partir de uma combinação linear das imagens iniciais das bandas 1, 2 e 3 do sensor multiespectral HRV, resumindo a informação contida nestas três bandas. São possíveis três combinações, ou seja, três novas imagens: "Brightness", "Greenness" e "Yellowness", associadas às características do solo, vegetação e névoa atmosférica, respectivamente. A transformação "HRV Tasseled Cap" é muito útil na discriminação e na verificação do estágio de desenvolvimento da plantação, na classificação de áreas verdes, desmatamento, zonas urbanas, água, etc., somando-se a isto, a excelente resolução do sensor HRV, sua precisão radiométrica e geométrica, e ao grande raio de ação e maior periodicidade do satélite SPOT.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.).

**DETERMINATION OF "TASSELED CAP" TRANSFORMATION  
PARAMETERS FOR IMAGES OBTAINED  
BY THE SPOT SATELLITE**

**Mára Regina Labuto Fragoso da Silva**

November, 1990

Thesis Supervisor: Gelson Vieira Mendonça

Department: Computer Science

"Tasseled Cap" is a type of linear transformation, proposed by Kauth and Thomas in 1976, intended to maximize the most important information in a multispectral data analysis. This transformation has been successfully used in several applications and can be found in the literature using two different sensors of Landsat satellite: MSS and TM. As a natural evolution, it was necessary to adapt it to the SPOT satellite multispectral sensor: HRV. The work on this thesis has the purpose of presenting the rotation matrix which is used to adjust the HRV data, in its three operation bands, to generate the HRV Tasseled Cap coordinates for the SPOT satellite. This operation creates a new image, resulting from a linear combination of the initial images (bands 1, 2 and 3) of HRV multispectral sensor, reducing the information of these three bands. There are three possible combinations or three new images: "Brightness", "Greenness" and "Yellowness", related, to the soil, vegetation and atmospheric haze features, respectively. The HRV Tasseled Cap transformation is useful in crop discrimination and observation of development stages, in classification of green areas, deforestation, urban areas, water, etc. Moreover, the HRV sensor has excellent resolution, radiometric and geometric accuracy, and in addition, the SPOT satellite has a better range of action and more periodicity in the data acquisition.

# Índice

## I. Introdução 1

## II. Revisão da Literatura 5

II.1 Criação da Estrutura Tasseled Cap 5

II.2 A transformação MSS Tasseled Cap 7

II.3 A transformação TM Tasseled Cap 11

II.4 O satélite SPOT 13

O sensor HRV 15

## III. Fundamentos Teóricos 17

III.1 Conceito 17

III.2 Teoria 18

## IV. Materiais e Métodos 31

IV.1 Materiais 31

IV.2 Métodos 33

## V. Resultados 35

V.1 Cálculo 35

V.2 Análise 40

V.3 Comparação 49

V.4 Correção de Efeitos Externos 55

Calibração dos Detectores 58

Restauração da Imagem 59

## VI. Conclusões 60

## VII. Referências Bibliográficas 63

Apêndice A. Bandas Espectrais dos Satélites Citados 66

Apêndice B. Rede de Estações de Recepção de Dados do Satélite SPOT 68

Apêndice C. Poder de Discriminação das Bandas do Satélite SPOT 69

## Figuras

1. Plano formado pelas bandas 2(5) e 3(6). 7
2. Plano formado pelas bandas 1(4) e 2(5). 8
3. A Transformação Tasseled Cap no Plano Tridimensional. 9
4. Variação da umidade de solo no plano de solos (Crist e Ciccone, 1984) 14
5. Perfeita correlação entre bandas e informação. 18
6. Informação não alinhada no plano bidimensional. 19
7. Informação não alinhada no plano tridimensional. 20
8. Informação contida em dois planos. 21
9. Vista direta da informação nos dois planos. 22
10. Vista sobreposta da informação contida nos dois planos. 23
11. Localização da característica desejada. 24
12. Ajuste dos eixos do plano da característica desejada. 25
13. Rotação dos eixos. 27
14. Direção e sentido dos parâmetros Tasseled Cap 29
15. Valores de pixel da banda 1 x banda 2. 36
16. Valores de pixel da banda 1 x banda 3. 37
17. Valores de pixel da banda 2 x banda 3. 38
18. Valores de pixel de BRIGHTNESS X GREENNESS. 41
19. Valores de pixel de BRIGHTNESS X YELLOWNESS. 42
20. Valores de pixel de GREENNESS X YELLOWNESS. 43
21. Plano de Vegetação. 44
22. Imagem SPOT da região de Tucuruí na banda 1 multiespectral. 46
23. Imagem SPOT da região de Tucuruí na banda 2 multiespectral. 47
24. Imagem SPOT da região de Tucuruí na banda 3 multiespectral. 48
25. Histogramas da imagem SPOT nas bandas 1, 2 e 3 multiespectrais. 49
26. Imagem "BRIGHTNESS" 50
27. Imagem "GREENNESS" 51
28. Imagem "YELLOWNESS" 52
29. Histogramas das imagens "BRIGHTNESS", "GREENNESS" e "YELLOWNESS". 53
30. Coeficientes BRIGHTNESS da HRV Tasseled Cap. 56
31. Coeficientes GREENNESS da HRV Tasseled Cap. 57
32. Coeficientes YELLOWNESS da HRV Tasseled Cap. 58
33. Imagem "GREENNESS" TM da região de Tucuruí. 54

34. Histogramas comparados das imagens "GREENNESS"	55
--	----

## Tabelas

1. Coeficientes Tasseled Cap para o sensor MSS 10
2. Coeficientes Tasseled Cap para o sensor TM 12
3. Coeficientes Tasseled Cap para o sensor SPOT 40
4. Bandas Espectrais do Multispectral Scanner System (MSS) / Landsat 66
5. Bandas Espectrais do Thematic Mapper (TM) / Landsat 66
6. Bandas Espectrais do High Resolution Visible scanner (HRV) / SPOT 67

## I. Introdução

A utilização de imagens obtidas através de sensores a bordo de satélites orbitais (sensoriamento remoto), têm como finalidade:

1. identificar objetos existentes em áreas de grande dimensão ou de difícil acesso;
2. classificar uma imagem, ou seja, agrupar as várias características da imagem em classes;
3. monitorar uma área.

A identificação de objetos através de satélites depende da resolução do sensor, ou seja, o tamanho da menor área captada pelo sensor. No satélite Landsat, a resolução do sensor MSS varia de 79m x 79m a 82m x 82m, dependendo da faixa de frequência; enquanto que a resolução do sensor TM é de 30m x 30m. No satélite SPOT, a resolução do sensor HRV no modo multiespectral é de 20m x 20m, o que representa uma melhor definição da imagem, em relação ao satélite Landsat.

A classificação de imagens segundo os tipos de solos, vegetação, área urbana, etc., baseia-se no reconhecimento de padrão espectral - quando as regras de decisão são fundamentadas nas radiâncias espectrais observadas nos elementos da imagem (pixel), ou no reconhecimento de padrão espacial - quando as regras de decisão são fundamentadas em formas geométricas e tamanhos presentes na imagem.

A monitoração de imagem por satélite tem como finalidade acompanhar algum evento, como por exemplo: incêndio, desmatamento, rota das pragas, etc., e pode ser feita utilizando-se imagens da cena em diferentes períodos.

Outros fatores que influenciam bastante o uso de sensoriamento remoto são: seu baixo custo, comparado com o trabalho de campo, nem sempre possível, e uma alta frequência (no caso do satélite SPOT é de 1 a 26 dias, dependendo da localidade).

Os sensores captam as radiações emitidas ou refletidas pelos objetos da superfície e as traduzem em valores digitais de pixel (elemento de imagem).

Pode-se utilizar os dados de sensores que operam em várias faixas do espectro de frequência - análise multiespectral da imagem ou utilizar o sensor operando em apenas uma faixa de frequência, em diversas datas - análise multitemporal da imagem.

No caso da análise multiespectral, tem-se a vantagem de estender a faixa de frequência até o comprimento de onda do infravermelho ou até microondas, descobrindo detalhes não perceptíveis, se analisados somente na faixa do espectro de frequência visível. Para isto, torna-se necessário saber como as classes respondem à estas frequências. Porém, muitos fatores externos influenciam o padrão das classes desejadas e o número de variáveis é muito grande. Assim sendo, ao se projetar um método de processamento e classificação de imagens, deve-se proceder do seguinte modo:

- encontrar diversas formas de apresentar os dados;
- dentre eles, escolher o que melhor representa a estrutura dos dados desejados;
- criar um modelo visual desta estrutura de dados, que sugerirá uma interpretação física ou uma série de testes;
- sujeitar a descrição física a uma série de testes, resultando num refinamento da descrição ou abandono da mesma.

A transformação "Tasseled Cap" é um tipo de transformação linear, criada em 1976 por Kauth e Thomas [1]. Planejada para maximizar a informação de maior importância em uma análise multiespectral de dados, ela reduz drasticamente o volume de dados a ser trabalhado, sem que se perca a informação contida nas diversas faixas que compõem a gama espectral dos sensores. Esta transformação vem sendo utilizada com sucesso em diversas aplicações [2-9]. Ela pode ser encontrada na literatura, tendo como aplicação os dados de dois sensores diferentes do satélite Landsat: o sensor MSS (Multispectral Scanner System), denominando-se de transformação "MSS Tasseled Cap", e o sensor TM (Thematic Mapper), denominando-se de transformação "TM Tasseled



Cap". Como uma evolução natural, torna-se necessário adaptá-la ao sensor multiespectral do satélite SPOT: o sensor HRV (High Resolution Visible scanner) criando-se o "HRV Tasseled Cap", uma vez que os dados destes dois satélites citados são os mais usados na atualidade, existindo uma correspondência muito grande entre as diversas faixas de operação de seus sensores (Vide Tabelas 4, 5 e 6 no Apêndice A).

O trabalho desenvolvido nesta tese tem como finalidade apresentar a matriz de rotação com a qual se deve ajustar os dados do sensor HRV nas três faixas de frequência em que opera, para gerar as coordenadas "HRV Tasseled Cap" do satélite SPOT. Esta operação cria uma nova imagem, à partir de uma combinação linear das imagens iniciais das bandas 1, 2 e 3 do sensor multispectral HRV, resumindo a informação contida nestas três bandas, ou seja, evitando a multiplicidade de informação, para que o usuário trabalhe apenas com uma imagem, ao invés de três, reduzindo, assim, o volume de dados. Uma outra vantagem da transformada "HRV Tasseled Cap" é gerar três possíveis combinações, ou seja, três novas imagens, com as seguintes aplicações:

- imagem BRIGHTNESS, realça as características de tipos de solo;
- imagem GREENNESS, realça as características de tipos de vegetação;
- imagem YELLOWNESS, realça as características de amarelecimento ou senescência da vegetação.

É feita também nesta tese, uma comparação entre as imagens obtidas pelo SPOT e as imagens similares obtidas pelo Landsat.

Existem outras transformações que estabelecem novas coordenadas como uma combinação linear das bandas espectrais, mas na transformação "Tasseled Cap" os novos eixos, nos quais os dados são descritos, ou seja, as novas imagens geradas, foram planejados para maximizar a informação dos fenômenos mais importantes (espectralmente observáveis) do desenvolvimento da plantaçao. Estes fenômenos, de grande importância para a agricultura, são os seguintes: solo nu, processos de desenvolvimento da cobertura vegetal, desenvolvimento do amarelecimento e colheita. O conhecimento destes fatores permite o estudo do tipo de solo, sua adequação a um determinado plantio ou uso, discriminação de plantações, acompanhamento de seu crescimento e o

que acontece após a colheita, possibilitando, inclusive, uma previsão da estimativa de safra.

É possível também a aplicação destes dados para classificação de zona urbana, estudos sobre desmatamento, modelos de névoa atmosférica, determinação de umidade de solo, e outros.

Na seqüência de apresentação deste trabalho, no capítulo II é apresentado um breve resumo da literatura existente, no que concerne:

- à criação da estrutura "Tasseled Cap" e aos tipos de transformação "Tasseled Cap" existentes, no intuito de se definir uma metodologia para a criação da nova transformação;
- ao satélite SPOT e seu funcionamento, no intuito de demonstrar sua excelente performance e suas inúmeras aplicações, justificando assim o interesse desta pesquisa;
- ao sensor HRV, no intuito de explicar seu funcionamento para uma escolha adequada da imagem a ser utilizada.

No capítulo III é desenvolvida uma base conceitual e teórica para o cálculo da matriz "Tasseled Cap" para o sensor HRV.

No capítulo IV são relacionadas as imagens, os processos, os programas e os materiais utilizados, definidos após o estudo inicial desenvolvido no capítulo II.

No capítulo V são apresentados os cálculos, os resultados e sua análise, com a ajuda de tabelas, gráficos e imagens, uma comparação com os resultados obtidos para outro sensor, assim como considerações sobre a influência dos efeitos externos.

No capítulo VI são apresentadas algumas conclusões.

## II. Revisão da Literatura

### II.1 Criação da Estrutura Tasseled Cap

Em 1976, Kauth e Thomas [1] analisaram dados de uma cena de agricultura da companhia Fayette Co., situada em Illinois, Estados Unidos, recebidos pelos 4 canais do sensor MSS do satélite Landsat.\* Eles plotaram os valores de pixel encontrados em um canal, contra os correspondentes valores de pixel de outro canal, dois a dois, até se completar o total de seis combinações possíveis. O canal 4 mostrou estar altamente correlacionado com o canal 5, enquanto que o canal 6 era altamente correlacionado com o canal 7 (efeito observado como dados concentrados em uma reta inclinada). Quanto aos demais canais, a forma foi de um triângulo, com dois vértices na reta inclinada e um vértice próximo ao eixo do canal 6 ou 7.

Ao pesquisarem a razão física para os dados formarem um triângulo, eles se reportaram a um trabalho realizado no "Environmental Research Institute" de Michigan, em 1975, que estudou o comportamento de uma plantação de trigo em resposta às emissões de ondas nos comprimentos de  $0,75 \mu\text{m}$  e  $0,65 \mu\text{m}$ , em dois tipos de solo: claro e escuro. Neste modelo, existe uma relação clara entre as trajetórias encontradas e as plotagens feitas com os canais 5 e 6 do MSS, tendo em vista que eles têm, como ponto central de suas faixas, estes comprimentos de onda, conforme Tabela 4, encontrada no Apêndice A.

Uma primeira observação quanto às comparações entre estes dois resultados, mostrou que os diferentes tipos de solo formam uma região de solo elíptica diagonal, com solos escuros tendo valores de pixel próximos à origem e solos mais claros com valores de pixel altos em

---

\* A denominação das bandas do sensor MSS é a seguinte: bandas 1, 2, 3 e 4 nos satélites Landsat 1, 2 e 3, após denominadas bandas 4, 5, 6 e 7 nos satélites Landsat 4 e 5. Usaremos a denominação mais recente, ou seja, bandas 4, 5, 6 e 7, para maior facilidade.

ambos os eixos, e a inclinação dependente de variáveis externas globais como a névoa atmosférica e umidade de solo (Figura 1 e Figura 2).

Para se analisar as trajetórias, deve-se concentrar na linha de solos nos dois extremos: claro e escuro (Figura 1).

Sabe-se que no início da plantação o fator dominante na resposta espectral é o tipo de solo. À medida que a plantação cresce, o verde e as sombras sobre o solo dominam a resposta espectral e, como resultado, há um escurecimento considerável no solo claro e um desvanecimento da cor escura do solo escuro, pois há uma diferença pequena entre a radiância de um solo escuro e a radiância de um solo escuro com sombra.

Quando as coberturas vegetativas dos dois tipos extremos de solo alcançam a maturidade, suas trajetórias se encontram à esquerda, implicando numa cobertura total da área vegetativa sobre o solo. A resposta, então, é dominada pela biomassa verde, ocorrendo isto em altos valores na banda 6, devido à estrutura celular interna da planta, isto é, a absorção é baixa e a reflexão e transmissão são altas devido ao espalhamento para cima e para baixo causado por descontinuidades do índice de refração entre o espaço intercelular e paredes hidratadas da célula. Ao mesmo tempo, ocorrem baixos valores na banda 5 (porque a clorofila nas plantas é altamente absorvida nesta faixa).

Quando a plantação envelhece e se torna amarelecida, suas trajetórias permanecem juntas, mas se movem para fora do ponto de biomassa verde, para fora deste plano (pois os elementos de cor amarela seguem uma direção diferente dos elementos de cor verde), podendo isto ser visto no plano formado pelas bandas 5 versus 4 (Figura 2).

Após a colheita, as trajetórias movem-se, em princípio, para suas posições originais de solo.

Combinando-se os dois diagramas em uma versão tridimensional, a figura formada pelas trajetórias assemelham-se a um boné com borlas na ponta - "tasseled cap"- de onde surgiu o nome da transformação (Figura 3).

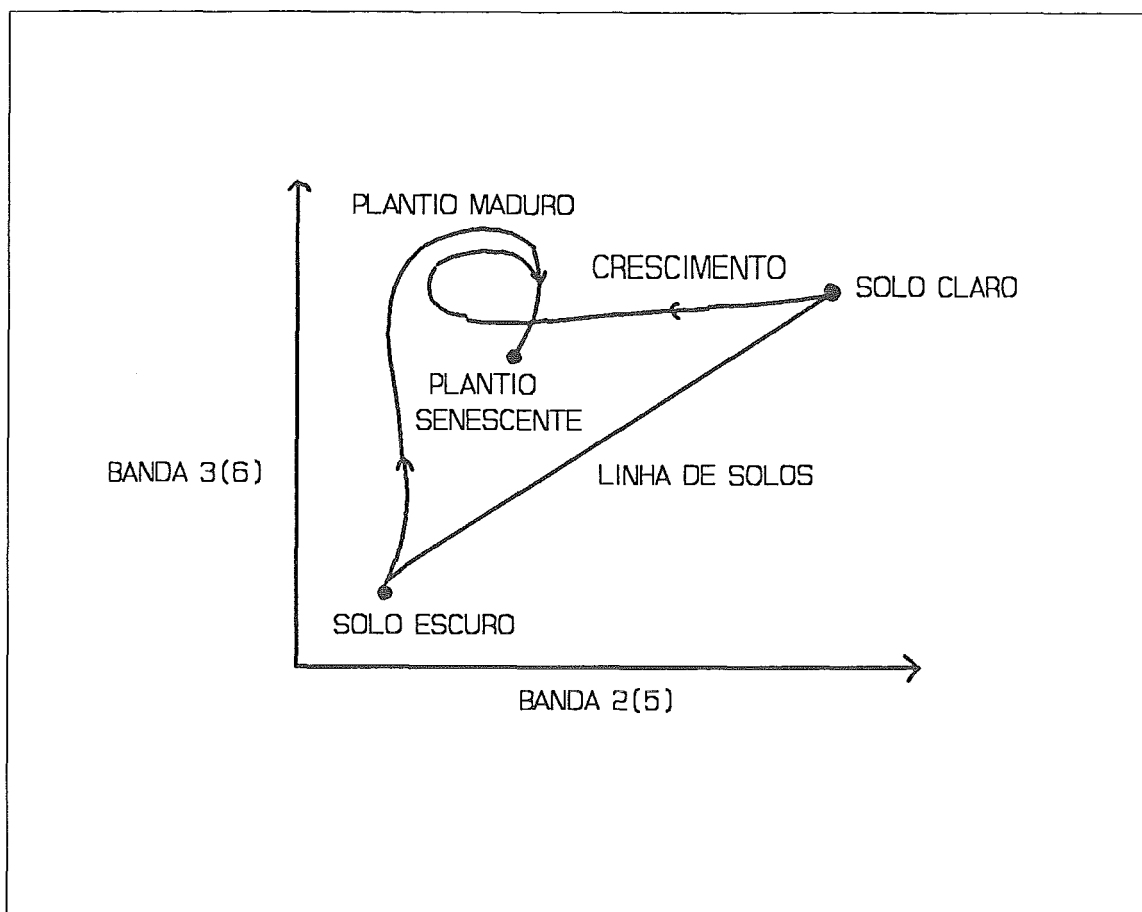


Figura 1. Plano formado pelas bandas 2(5) e 3(6).

## II.2 A transformação MSS Tasseled Cap

Ao estudar o comportamento da Figura 3, Kauth e Thomas consideraram o desenvolvimento de uma transformação linear que, conforme o número de bandas (quatro) do sensor MSS, deveria ter quatro eixos ortogonais.

O critério para a escolha dos eixos foi tomar um dos eixos como sendo a diagonal principal da elipse do plano de solos, pois esta linha é próxima àquela ao longo da qual a reflectância normalizada de todos os canais é de mesmo valor e caracteriza o estado de brilho ou reflectância do solo ("BRIGHTNESS").

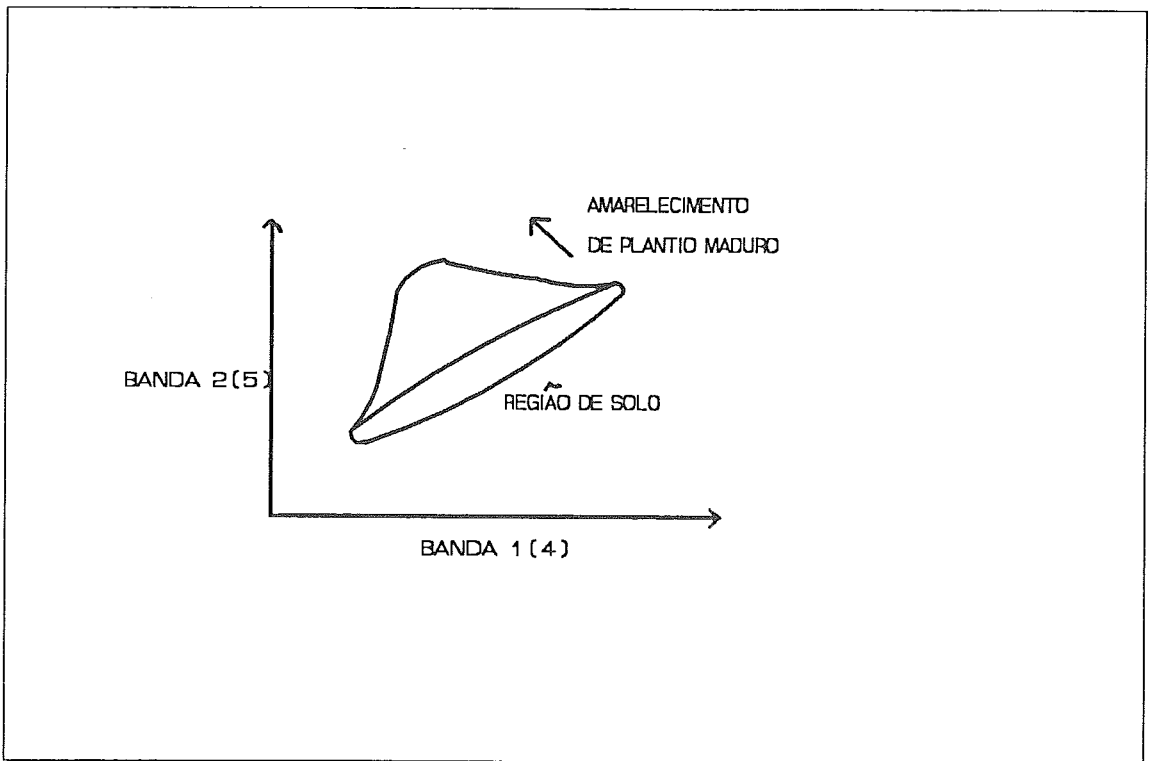


Figura 2. Plano formado pelas bandas 1(4) e 2(5).

Como segundo eixo, foi selecionado o desenvolvimento da biomassa verde em direção à maturidade, que, inclusive, é perpendicular ao primeiro, e pode ser considerado um indicador de estado de verde ("GREENNESS").

Como terceiro eixo, foi escolhido aquele que indica o amarelecimento da plantação, ortogonal à linha de solos (primeiro eixo) e ao estado de verde (segundo eixo), e pode ser considerado um indicador de estado de amarelecimento ("YELLOWNESS").

Um quarto eixo, que necessitava ser ortogonal aos outros três, e não devia apresentar associação com o brilho do solo, estado de verde ou estado de amarelecimento, foi chamado de sem importância ("NON-SUCH") por Kauth e Thomas.

A transformação que produz a nova descrição dos dados pode ser expressa como:

$$Z = RX + C \quad (1)$$

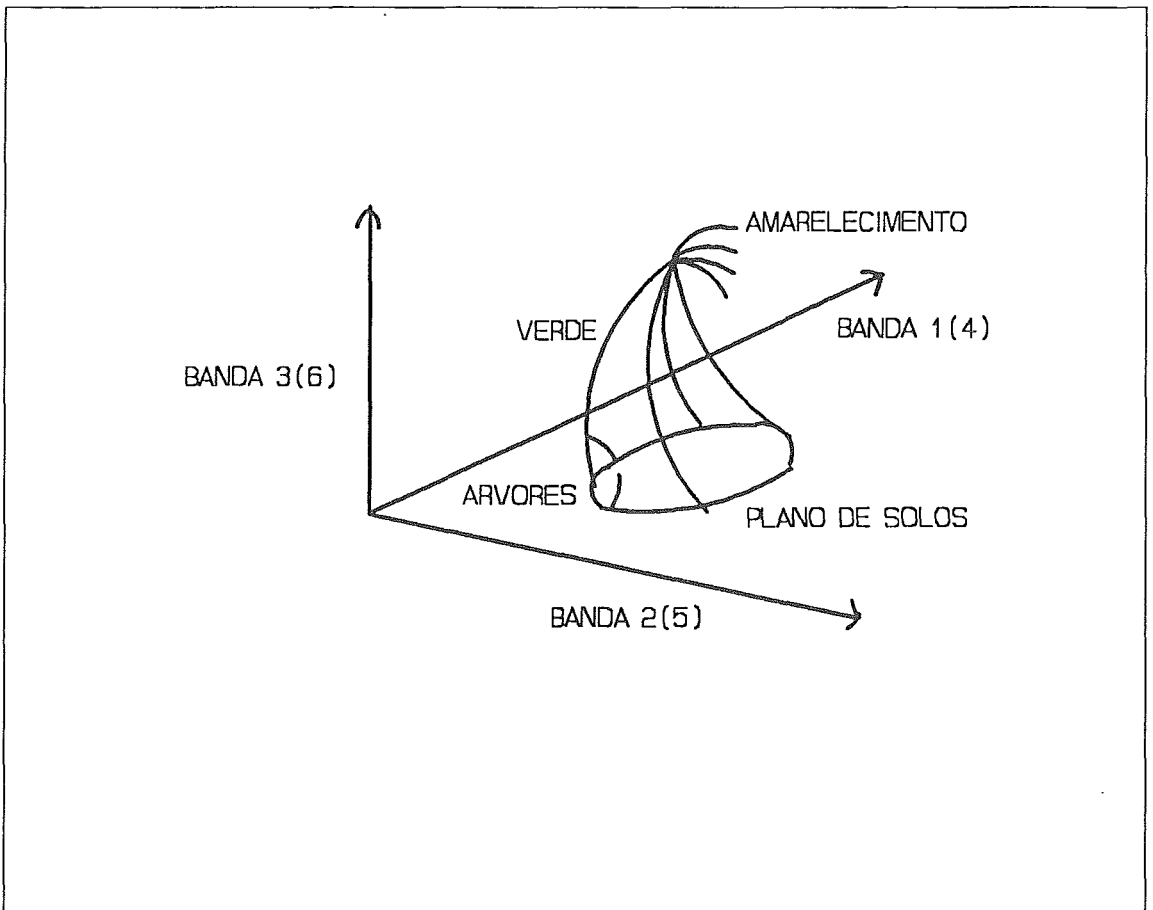


Figura 3. A Transformação Tasseled Cap no Plano Tridimensional.

onde:

$X$  = valor do pixel na banda usada

$Z$  =  $Z(\text{BRIGHTNESS})$ , para o primeiro componente

$Z(\text{GREENESS})$ , para o segundo componente

$Z(\text{YELLOWNESS})$ , para o terceiro componente

$Z(\text{NON-SUCH})$ , para o quarto componente

$R$  = matriz de transformação

$C$  = constante para evitar valores negativos de  $Z$  (arbitrariamente escolhido)

A direção do primeiro eixo foi escolhida como a que melhor se adequava em um conjunto de classes de solo. Os vetores unitários subseqüentes foram gerados usando-se o procedimento de ortogonalização de Gram-Schmidt nas direções desejadas (Apêndice B).

Deve-se ter cuidado na escolha de  $C$ , para que o resultado não seja negativo nem sature a imagem de saída, e, portanto, recomenda-se realizar um reescalonamento linear do histograma de  $Z$ .

A matriz para o sensor MSS é vista na Tabela 1.

Tabela 1. Coeficientes Tasseled Cap para o sensor MSS				
CARACTERÍSTICA	MSS4	MSS5	MSS6	MSS7
Brightness	0,33231	0,60316	0,67581	0,26278
Greenness	-0,28317	-0,66006	0,57735	0,38833
Yellowness	-0,89952	0,42830	0,07592	-0,04080
Non-such	-0,01594	0,13068	-0,45187	0,88232

Ao analisarmos os coeficientes da matriz, percebe-se que o estado de brilho do solo é uma soma ponderada das quatro bandas e como foi definido na direção da variação principal da reflectância do solo, mede a reflectância total do solo.

O estado de verde é um contraste entre as respostas das bandas infravermelho próximo (bandas 6 e 7) e visível (bandas 4 e 5) - equivalente a um índice de biomassa. O espalhamento da radiação infravermelha pela estrutura celular da vegetação e a absorção da radiação visível pelos pigmentos das plantas, como a clorofila, produzem altos valores de "greenness" para altas densidades de vegetação verde. O estado de amarelecimento pode ser visto como a diferença entre as bandas vermelha visível (banda 5) e verde visível (banda 4), sendo sensível aos efeitos de espalhamento atmosférico e redefinido posteriormente [3] como parâmetro que diagnostica a névoa atmosférica.



Não foi constatada nenhuma característica física associada com o quarto parâmetro.

### **II.3 A transformação TM Tasseled Cap**

Estudos de simulação das bandas TM refletivas (excluindo a banda 6 - termal) encontraram correlações com as bandas MSS, sugerindo que, assim como com os dados MSS, a dimensionalidade dos dados TM poderia também ser reduzida.

Seria interessante, portanto, aplicar o mesmo conceito da matriz "Tasseled Cap" para o sensor TM, o que foi feito por Crist e Cicone [5].

Os dados foram coletados pelo "Laboratory for Applications of Remote Sensing" (LARS) na Universidade de Purdue e incluem dados coletados no campo (Purdue Agronomy Farm) e medidas de amostragem de solo em laboratório. Para os dados coletados no campo usou-se um espectrorradiômetro do tipo Exotech Model 20C e os fatores de reflectância foram computados por comparação a um padrão de sulfato de bário. As condições de controle ficaram a 0,1 bar de tensão de umidade.

O modelo atmosférico de Dave [10] foi empregado, assim como funções de resposta do detector de pré-lançamento, obtidas da NASA, para computar as radiâncias atmosféricas no limite da camada atmosférica para as seis bandas refletivas TM.

Foram plotados os dados das bandas, duas a duas, e o método de análise através de "componentes principais" foi usado somente como ponto de partida para a análise da dispersão de dados TM. Estes componentes foram girados, dois ou três por vez, de modo que se preservou a ortogonalidade dos seis componentes. Pelo processo de aplicação de várias rotações, as relações entre os dados TM no espaço foram descobertas e definidas. Uma vez que o espaço de dados foi compreendido em termos espectrais, a informação descritiva coletada, junto com os dados espectrais do laboratório, pôde ser usada para associar as variações de dados TM no espaço característico definido com as características físicas da cobertura vegetativa ou do solo.

Assim, uma nova fonte importante de informação de solo foi fornecida pela inclusão das bandas infravermelho médio do TM (bandas 5 e 7), como o estado de umidade de solo ("WETNESS"), conforme visto na Tabela 2.

CARACTER.	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
Brightness	0,33183	0,33121	0,55177	0,42514	0,48087	0,25252
Greenness	-0,24717	-0,16263	-0,40639	0,85468	0,05493	-0,11749
Wetness	0,13929	0,22490	0,40359	0,25178	-0,70133	-0,45732
Fourth	-0,83104	0,07447	0,42144	-0,07579	0,23819	-0,25247
Fifth	-0,32530	0,05361	0,11485	0,11140	-0,46571	0,80549
Sixth	0,11381	-0,89714	0,42038	0,06686	-0,01629	0,02706

Os coeficientes dos dois primeiros componentes, são comparáveis àqueles definidos como "MSS Brightness" e "MSS Greenness".

O parâmetro "TM Brightness" é a soma ponderada de todas as bandas, traduzindo a reflectância total e os processos físicos que afetam a reflectância total. Portanto, diferenças nas características do solo, tais como distribuição do tamanho das partículas, serão claramente expressas. O parâmetro "TM Brightness" não é idêntico ao "MSS Brightness", por causa da influência das bandas infravermelho médio, mas é equivalente.

O parâmetro "greenness" responde à combinação de alta absorção nas bandas visíveis (devido aos pigmentos das plantas e particularmente a clorofila) e alta reflectância no infravermelho médio (devido à estrutura interna da folha e o resultante espalhamento da radiação no infravermelho próximo), o qual é uma característica de vegetação verde. Pode ser visto como o contraste entre a banda infravermelho próximo (banda 4) com as bandas visíveis (bandas 1, 2 e 3), uma vez que as bandas infravermelho médio (bandas 5 e 7) praticamente se cancelam. Este parâmetro mostra-se quase idêntico ao "MSS Greenness" e estudos comprovaram que ele é moderadamente correlacionado com outros

índices de cobertura vegetativa, tais como percentagem de cobertura verde, índice de área foliar e biomassa fresca [11].

Quanto ao terceiro componente, as evidências sugerem que o conteúdo de umidade do solo é o fator determinante, pois:

1. análises dos espectros de reflectância mostraram a faixa infravermelho médio como a mais sensível à umidade de solo e o terceiro componente contrasta a reflectância do infravermelho médio (bandas 5 e 7) com as reflectâncias das faixas visíveis e infravermelho próximo (bandas 1, 2, 3 e 4);
2. as plotagens do plano de solos de solo nu e arenoso mostram que as variações não estão relacionadas às propriedades do solo (ex.: distribuição de tamanho das partículas ou mineralogia), mas a alguma característica intrínseca ao solo, mais de acordo com a característica de umidade de solo, pois apresentam basicamente a mesma forma para tipos diferentes de solo, apenas se deslocando ao longo dos dois eixos [5];
3. vetores plotados mostrando a magnitude e direção de variação na resposta espectral dentro do plano de solos para 10 séries de solos, variando em cada vetor com respeito à umidade de solo (definida como percentagem de peso das amostras secas) seguem as mesmas direções da plotagem do plano de solos (Figura 4). Outras propriedades de solo, incluindo as proporções de areia fina, média, e barro, conteúdo de óxido de ferro, e conteúdo de matéria orgânica, foram avaliadas do mesmo modo, mas nenhuma demonstrou a concordância com a plotagem do plano de solos conforme a propriedade umidade de solo demonstrou.

## II.4 O satélite SPOT

O satélite SPOT-1 (Systeme Pour l'Observation de la Terre) foi lançado em 1986 pela França. Este satélite iniciou uma nova era no sensoriamento remoto, pois foi o primeiro satélite para recursos terrestres a incluir um conjunto linear de sensores e a empregar técnicas de varredura "push-broom" (explicado adiante). É também o primeiro sistema a ter um sistema óptico direcional. Isto permite

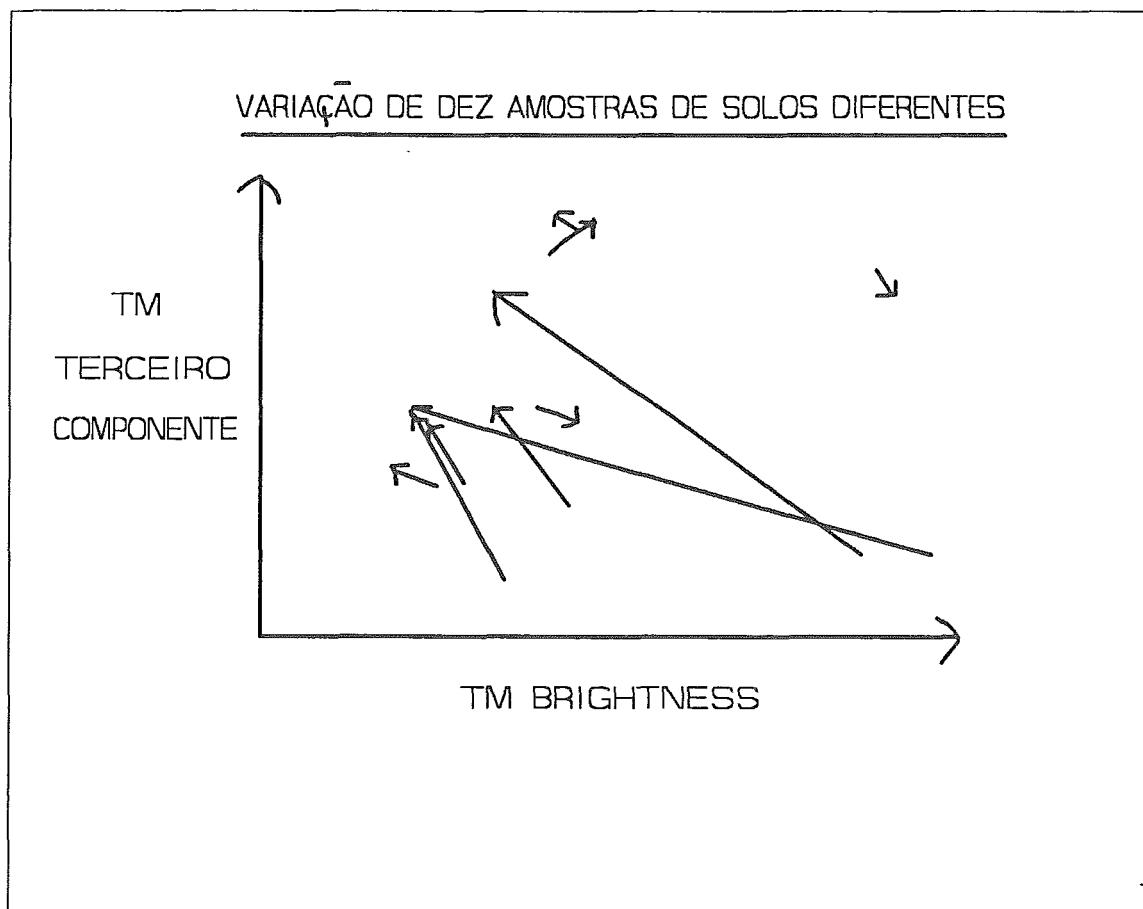


Figura 4. Variação da umidade de solo no plano de solos (Crist e Cicone, 1984). Cada vetor representa as duas amostras (seca e úmida) de um mesmo tipo de solo.

visualizações laterais e imagens estereoscópicas cobrindo a mesma cena, em duas passagens distintas do satélite.

Assim como os satélites da série Landsat, o SPOT-1 tem uma órbita circular, próxima aos pólos, síncrona com o Sol. Sua altitude é de 832 Km e inclinação de 98,7°. Seu padrão orbital repete-se a cada 26 dias. Isto significa que cada ponto dado na terra pode ser captado, com o mesmo ângulo de visada, a cada 26 dias. Porém, os sistemas ópticos direcionais permitem adquirir imagens fora do nadir (projeção normal do satélite sobre a terra), a cada 1 a 5 dias, dependendo da latitude da área. Isto aumenta a viabilidade de aquisição de imagens nas áreas onde a cobertura de nuvens é um problema, e, além disto, fornece a oportunidade de visualizar uma dada área na frequência de 1 a vários dias, monitorando algum evento.

Atualmente, a SPOT Corporation possui uma rede de recepção de dados que cobre quase todo o planeta (Apêndice C).

As imagens são distribuídas mundialmente pela firma SPOT Image e no Brasil pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), seu representante oficial. Seu acervo conta com cerca de 1.540.000 cenas, sendo 30% sem nuvens e 25% com 10% de cobertura de nuvens, que podem ser adquiridas em fitas magnéticas ou fotos com escalas 1/200.000, 1/100.000, 1/50.000 e 1/25.000 [12].

### **O sensor HRV**

O sensor do SPOT-1 consiste de dois sistemas HRV (High Resolution Visible) idênticos. Cada HRV é designado para operar em dois modos:

1. resolução de 10m pancromático (preto e branco) com 1 canal
2. resolução de 20m multispectral com 3 canais

O sistema de varredura "push-broom" emprega um arranjo linear de CCD's (Charge-Coupled Devices) um ao lado do outro, ao longo de uma linha perpendicular à órbita do satélite, com as seguintes vantagens em relação aos sistemas de varredura mecânicos tradicionais:

- mais leve
- requer menor potência
- menores dimensões
- elimina partes móveis, aumentando o tempo de vida útil do sensor
- maior precisão geométrica, pois elimina os erros introduzidos pela variação de velocidade de varredura do espelho
- maior precisão radiométrica
- maior resolução espacial
- maior relação sinal-ruído
- menor custo

Como desvantagens, podemos citar:

- mais detectores para calibrar
- não pode operar em comprimentos de onda maiores que o infravermelho próximo

A frequência de operação dos canais multiespectrais foram escolhidas no campo visível (verde e vermelho) e uma no infravermelho próximo, especialmente para permitir o reconhecimento das espécies vegetais (Apêndice D). Porém, existem pesquisas feitas pelo INFRAMER (Institute Français du Mer), para utilizar as imagens SPOT em cartas náuticas em águas claras até 30-40m de profundidade para estudos em batimetria [12].

### III. Fundamentos Teóricos

#### III.1 Conceito

Uma análise dos conceitos fundamentais envolvendo a Transformação "Tasseled Cap" foi feita por Crist e Kauth [13], buscando desmistificar a sua complexidade.

Os sinais de um sensor podem ser usados para definir um espaço multidimensional onde cada banda do sensor corresponde a uma dimensão. As arestas do espaço são determinadas pelos valores de sinal máximos e mínimos possíveis das bandas.

Como a probabilidade de ocorrência de uma combinação de sinais de duas ou mais bandas não é a mesma, os dados tendem a se concentrar em certas porções do espaço, formando uma nuvem amorfa. Esta nuvem, influenciada por uma certa característica física, pode se alongar ou estreitar, ou se desassociar.

Se as bandas (eixos do plano) estiverem localizadas de tal modo que elas respondam distintamente, sem correlação, às diferentes características físicas, então a variação em uma destas características produzirá variação em apenas uma banda (um eixo) e, neste caso, cada banda pode ser associada com uma característica física particular. Neste caso, exemplificando uma informação cujo conjunto de dados pertençam a apenas um plano, podemos ter uma correlação perfeita entre as bandas e a informação (Figura 5) ou a informação fora de alinhamento com os eixos no plano bidimensional ou tridimensional, ou "n-dimensional" (Figura 6 e Figura 7).

Se tivermos os dados da informação desejada pertencendo a dois planos, as figuras se tornam mais complexas (Figura 8, Figura 9 e Figura 10).

Para extrairmos a informação, devemos visualizá-la da maneira mais direta possível, de modo que ela se apresente inteira e separada das

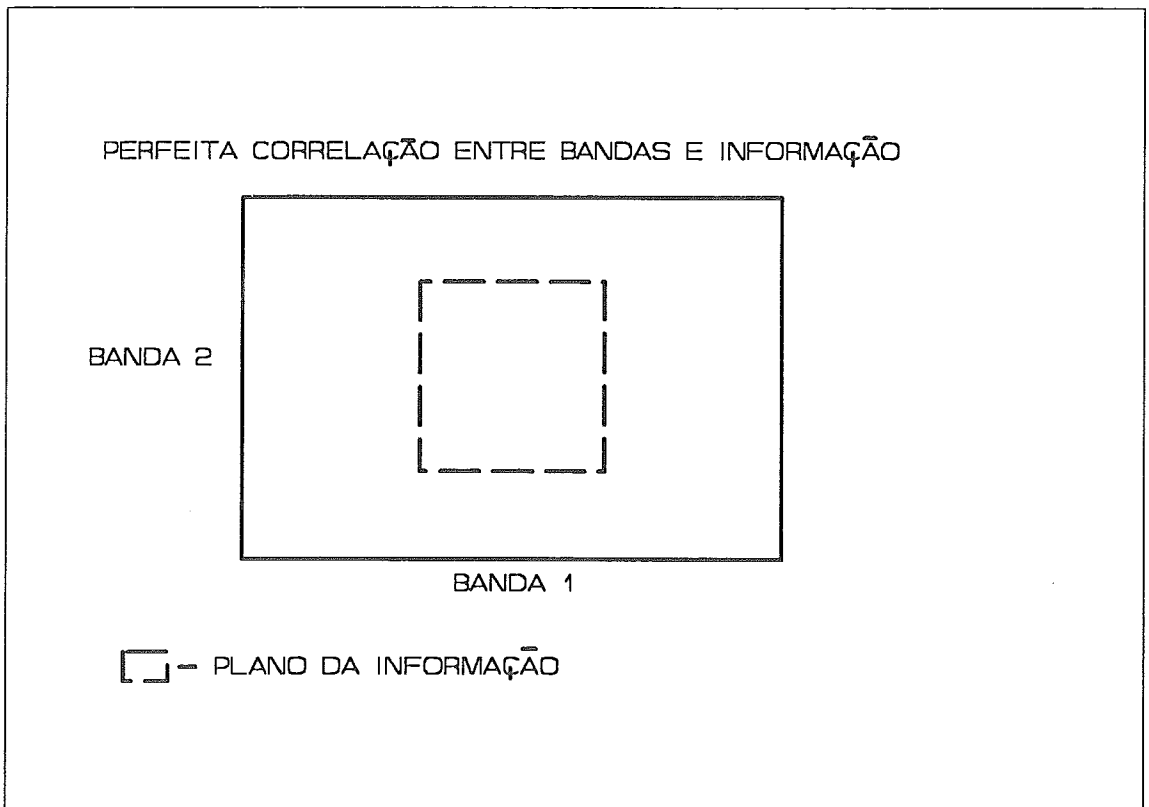


Figura 5. Perfeita correlação entre bandas e informação.

outras estruturas, preservando sua informação e relação geométrica com as demais.

A transformação Tasseled Cap identifica as estruturas existentes para um sensor particular e uma aplicação em particular, muda a perspectiva desta estrutura de modo que os dados sejam vistos da maneira mais direta e define as novas direções (novos eixos) que correspondem à variação espectral associada com uma característica física particular principal ou exclusiva (Figura 7, Figura 11 e Figura 12).

### III.2 Teoria

Sensores remotos multiespectrais fornecem dados na forma de várias imagens espectrais do objeto observado. Cada imagem representa a distribuição espacial de luz refletida das frequências contidas na correspondente janela espectral. Portanto, uma correlação bastante alta é esperada entre estas diferentes imagens espectrais do mesmo objeto. O



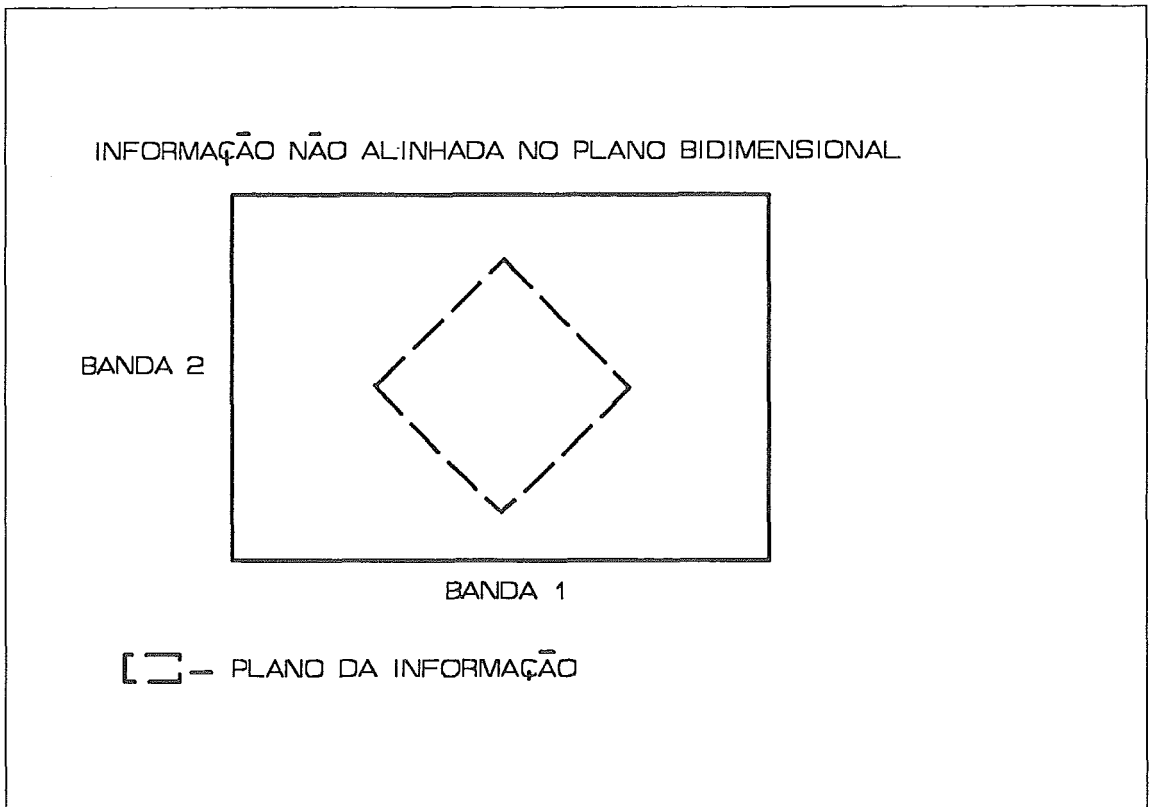


Figura 6. Informação não alinhada no plano bidimensional.

grau de correlação depende da natureza física do objeto, da largura das janelas espectrais e da quantidade e natureza do ruído presente nos dados.

Se houver correlação entre duas ou mais bandas, elas responderão com igual intensidade à uma mesma característica da cena e serão ditas redundantes. Para melhor visualizar-se a informação desejada, deve-se criar um plano onde os eixos (bandas) sejam descorrelacionados, isto é, que cada banda contenha uma informação única, mas que a informação total seja capturada por alguma combinação das bandas.

A transformação Tasseled Cap tem sua base teórica derivada da transformada de Hotelling \*, que lida com propriedades estatísticas de uma imagem. Seu desenvolvimento é mostrado a seguir:

\* Também conhecida como componentes principais ou transformada discreta de Karhunen-Loève.

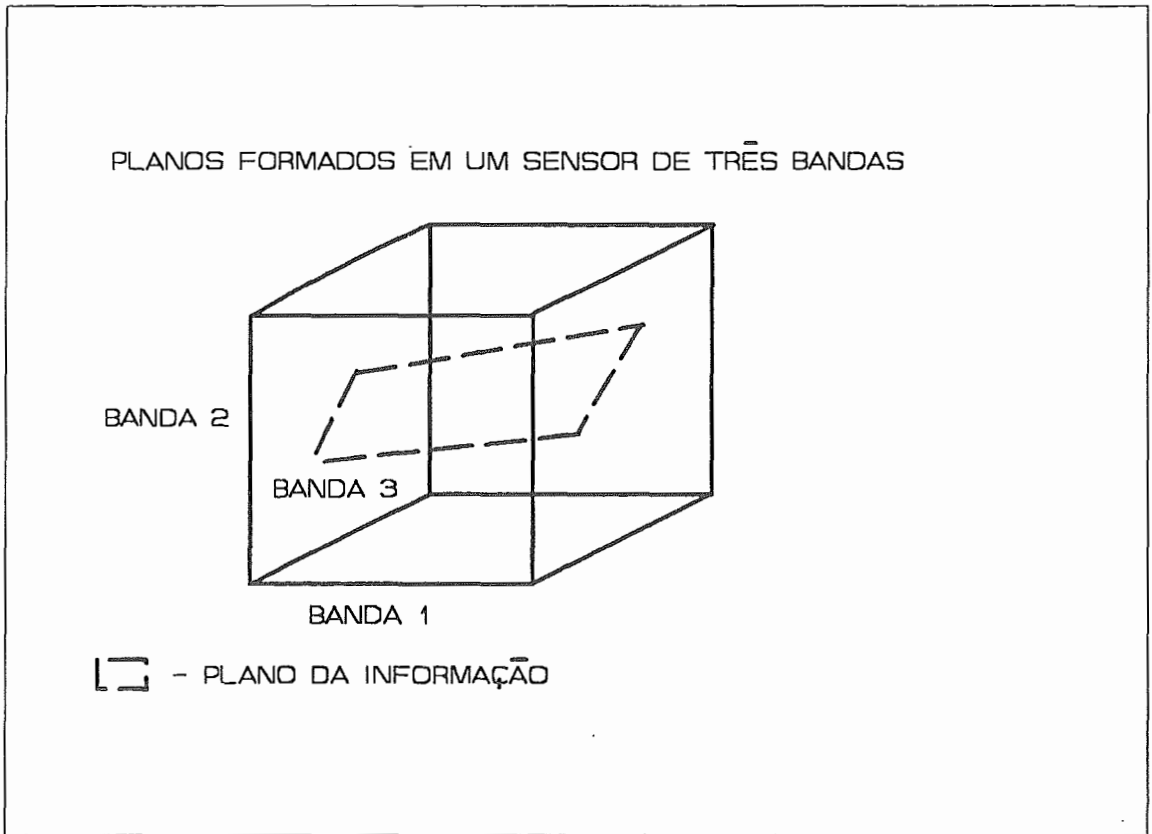


Figura 7. Informação não alinhada no plano tridimensional.

Consideremos uma imagem  $f(x,y)$  de dimensão  $N \times N$  recebida por  $M$  canais. Logo, o conjunto de imagens recebidas é:

$$\{f_1(x,y), f_2(x,y), \dots, f_M(x,y)\} \quad (2)$$

onde:

$f$  - função valor do pixel

$x, y$  - localização do pixel

$N$  - número de pixels das linhas/colunas da imagem

$M$  - número de canais/bandas (ou número de imagens recebidas)

Podemos expressar cada imagem  $f_i(x,y)$ ,  $i=1$  a  $M$ , na forma de um vetor  $x_i$  unidimensional, como se segue:

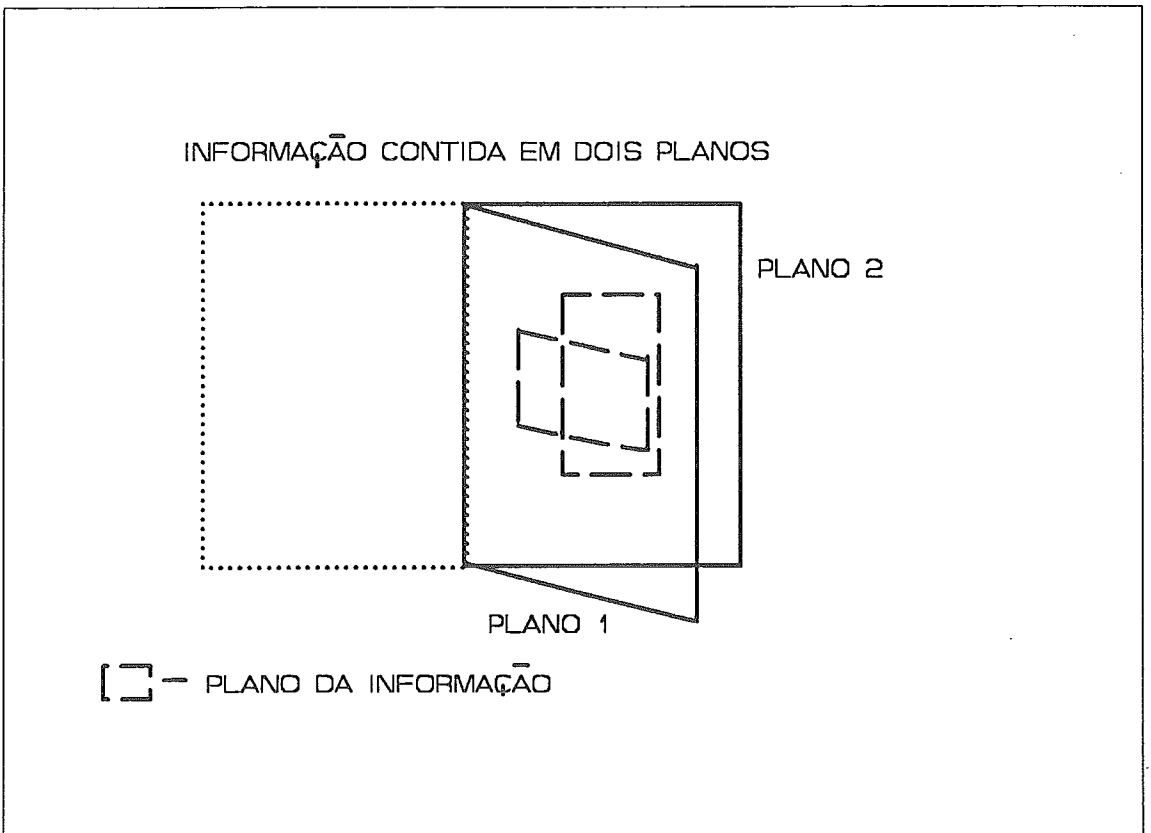


Figura 8. Informação contida em dois planos.

$$x_i = \begin{bmatrix} x_{i1} \\ x_{i2} \\ \dots \\ x_{ij} \\ \dots \\ x_{iN^2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

onde  $x_{ij}$  denota o  $j$ -ésimo componente do vetor  $x_i$ .

A matriz de covariância do vetor  $x$ , onde  $x$  representa qualquer um dos vetores  $x_i$ ,  $i=1$  a  $M$ , é definida como:

$$C_x = E\{(x - m_x)(x - m_x)'\} \quad (4)$$

onde

$$m_x = E\{x\} \quad (5)$$

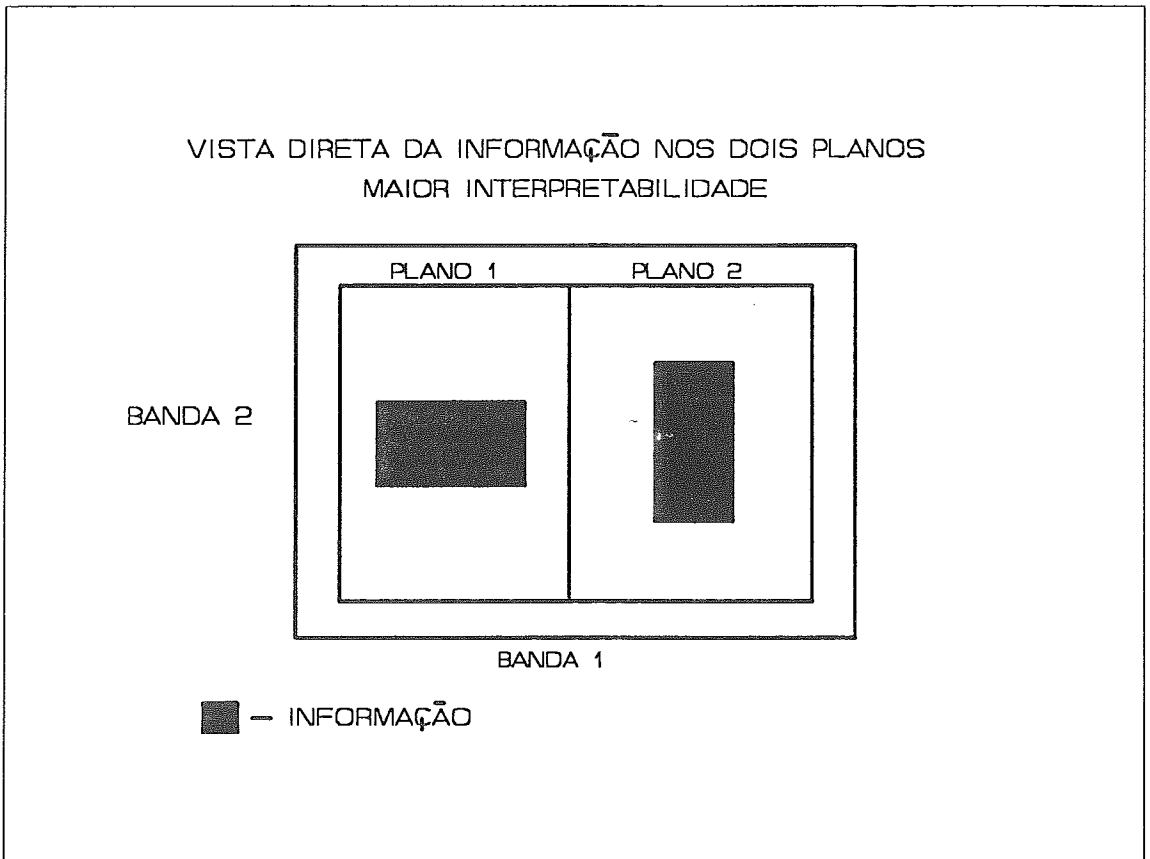


Figura 9. Vista direta da informação nos dois planos.

é o vetor média,  $E$  é o valor esperado e (') indica transposição.

As equações (4) e (5) podem ser aproximadas por amostragem, usando-se as relações:

$$m_x \simeq \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x_i \quad (6)$$

e

$$C_x \simeq \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (x_i - m_x)(x_i - m_x)' \quad (7)$$

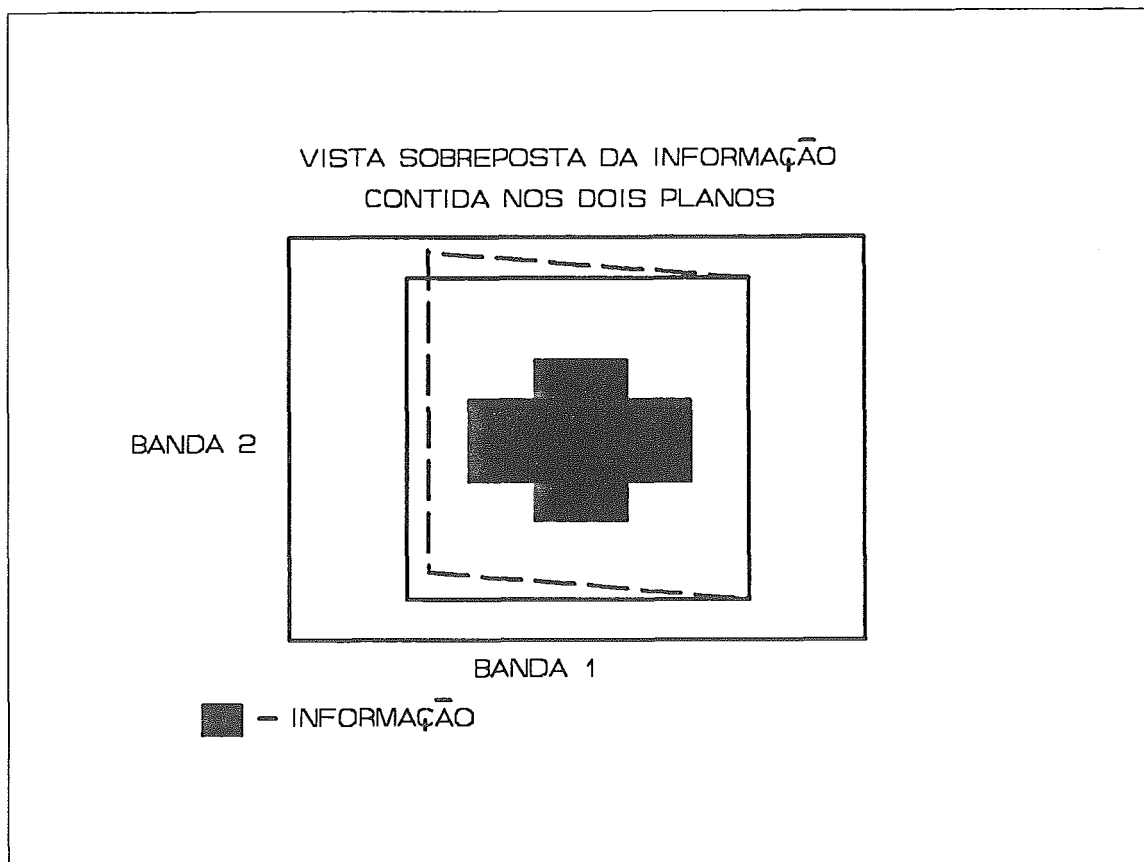


Figura 10. Vista sobreposta da informação contida nos dois planos.

$$C_x \approx \frac{1}{M} \left[ \sum_{i=1}^M x_i x_i' \right] - m_x m_x' \quad (8)$$

O vetor média é de dimensionalidade  $N^2$  e  $C_x$  é uma matriz  $N^2 \times N^2$ .

Sejam  $e_i$  e  $\lambda_i$ ,  $i=1,2,\dots,N^2$  os autovetores e autovalores correspondentes de  $C_x$ .

Assume-se que os autovalores foram arrumados em ordem decrescente, de modo que  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \dots \geq \lambda_{N^2}$ .

Uma matriz de transformação cujas linhas são os autovetores de  $C_x$  é dada por:

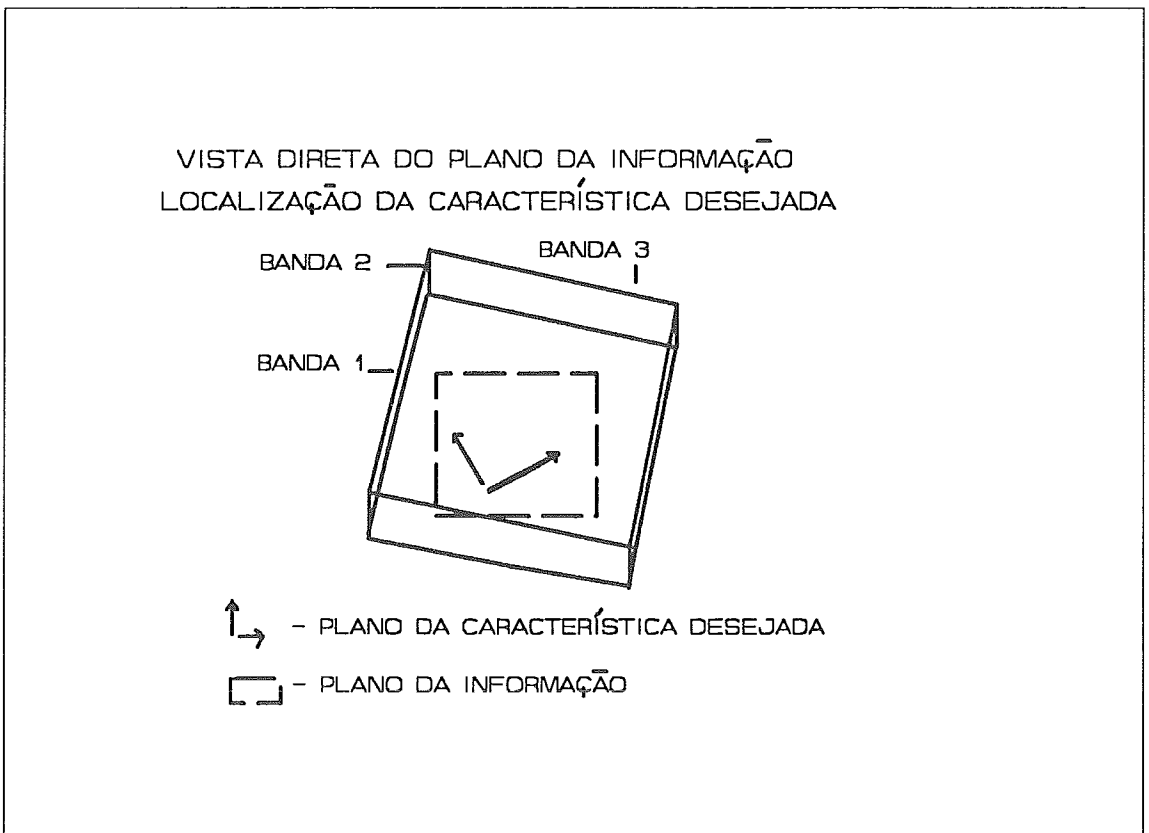


Figura 11. Localização da característica desejada.

$$A = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & \dots & e_{1N^2} \\ e_{21} & e_{22} & \dots & e_{2N^2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ e_{N^2 1} & e_{N^2 2} & \dots & e_{N^2 N^2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

onde  $e_{ij}$  é o  $j$ -ésimo componente do  $i$ -ésimo autovetor. A transformada de Hotelling, então, consiste simplesmente em multiplicar a matriz  $A$  por um vetor imagem centralizado em relação à sua média  $(x - m_x)$ , para obter um novo vetor imagem  $y$ :

$$y = A(x - m_x) \quad (10)$$

A equação (10) tem algumas propriedades importantes. Vamos examinar primeiro a matriz de covariância dos vetores  $y$ . Esta matriz é dada por:

$$C_y = E\{(y - m_y)(y - m_y)'\} \quad (11)$$

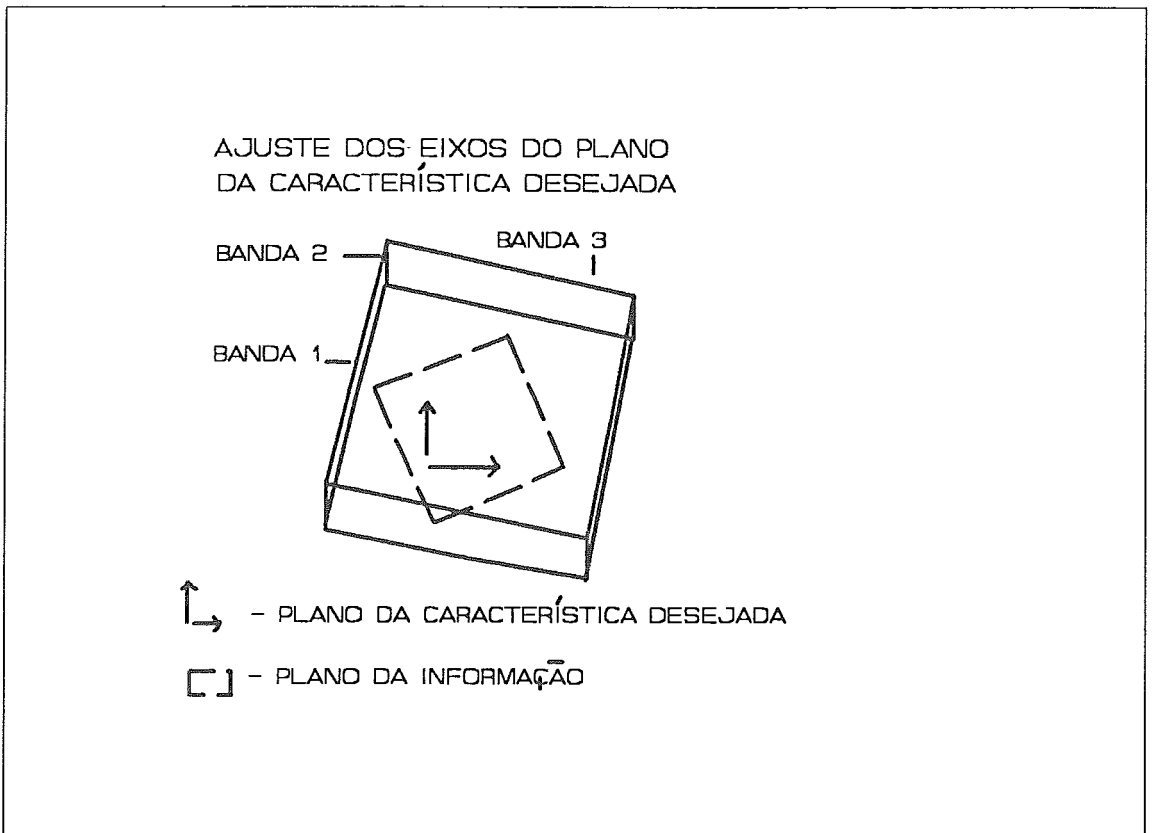


Figura 12. Ajuste dos eixos do plano da característica desejada.

onde  $m_y$  é igual ao vetor zero, 0, como pode ser mostrado:

$$\begin{aligned}
 &= E\{y\} \\
 &= E\{A(x - m_x)\} \\
 m_y &= AE\{x\} - Am_x \\
 &= Am_x - Am_x \\
 &= 0
 \end{aligned} \tag{12}$$

A substituição das equações (10) e (12) em (11) leva às seguintes expressões para  $C_y$  em termos de  $C_x$ :

$$\begin{aligned}
 &= E\{(Ax - Am_x)(Ax - Am_x)'\} \\
 C_y &= E\{A(x - m_x)(x - m_x)'A'\} \\
 &= AE\{(x - m_x)(x - m_x)'\}A' \\
 &= AC_xA'
 \end{aligned} \tag{13}$$

onde o último passo sai da definição de  $C_x$  dada na equação (4).

Pode ser mostrado [14] que  $C_y$  é uma matriz diagonal com elementos iguais aos autovalores de  $C_x$ , isto é:

$$C_y = \begin{bmatrix} \lambda_1 & & & \\ & \lambda_2 & & 0 \\ & 0 & \dots & \\ & & & \lambda_{N^2} \end{bmatrix} \quad (14)$$

A importância desta propriedade é que, uma vez que os termos fora da diagonal principal são zero, os elementos de  $y$  são descorrelacionados. Além disto, cada autovalor  $\lambda_i$  é igual à variância do  $i$ -ésimo elemento de  $y$  ao longo do autovetor  $e_i$ .

Agora, suponhamos que os vetores básicos (linhas da matriz  $A$ ) sejam escolhidos de modo a apontarem na direção da máxima variância dos dados, sujeitos às restrições de serem mutuamente ortogonais e as componentes transformadas serem descorrelacionadas. Estes requisitos levam à solução declarada acima na qual as bases são autovetores da matriz de covariância.

Estas propriedades podem ser usadas com vantagem na rotação da imagem. Vamos considerar que desejamos girar o objeto de modo a que ele se alinhe com alguma direção invariável. Consideremos o sistema de coordenadas com eixos  $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$ , mostrados na Figura 13.

Se novas coordenadas fossem escolhidas, tendo uma orientação diferente, mas a mesma origem do sistema original, então poder-se-ia dizer que houve uma rotação dos eixos no plano. Sejam  $\theta_1 =$  ângulo de  $y_1$  com o plano  $x_1x_2$  e  $\theta_2 =$  ângulo de  $y_1$  com o plano  $x_1x_3$ , os ângulos de rotação. Os novos e antigos eixos são relacionados conforme se segue:

$$y_1 = x_1 \cos \theta_1 \cos \theta_2 + x_2 \cos \theta_1 \sin \theta_2 + x_3 \sin \theta_1 \quad (15)$$

$$y_2 = -x_1 \sin \theta_2 + x_2 \cos \theta_2 \quad (16)$$

$$y_3 = -x_1 \sin \theta_1 \cos \theta_2 - x_2 \sin \theta_1 \sin \theta_2 + x_3 \cos \theta_1 \quad (17)$$



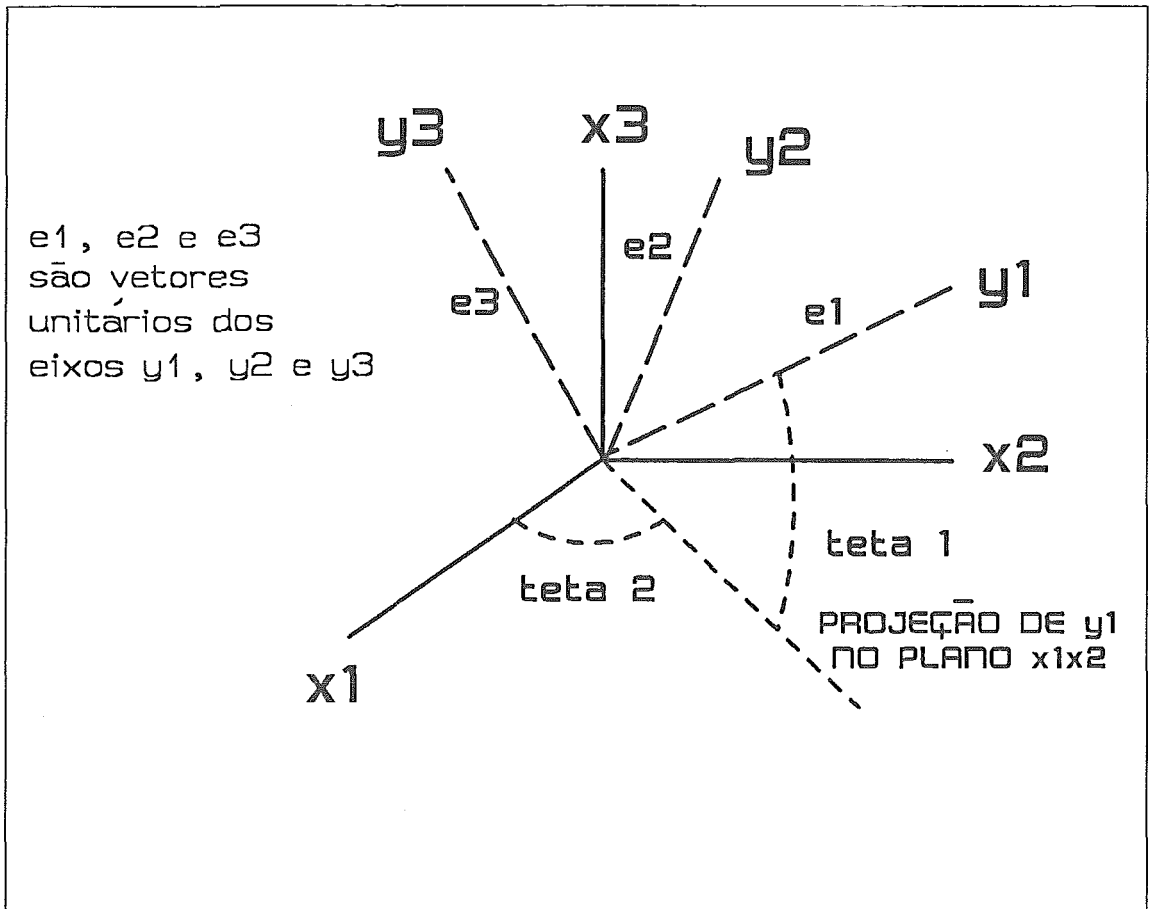


Figura 13. Rotação dos eixos.

Ou seja:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \cos \theta_2 & \cos \theta_1 \sin \theta_2 & \sin \theta_1 \\ -\sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 \\ -\sin \theta_1 \cos \theta_2 & -\sin \theta_1 \sin \theta_2 & \cos \theta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (18)$$

Uma vez que os autovetores de  $C_x$  apontam nas direções de variância máxima (sujeitos à condição de serem ortogonais), deve-se selecionar o novo sistema de modo que ele fique alinhado com estes autovetores.

Sejam os vetores  $e_1, e_2$  e  $e_3$  os autovetores normalizados com os quais alinharemos os eixos  $y_1, y_2$  e  $y_3$ . Sejam  $e_{11}, e_{21}$  e  $e_{31}$  as projeções de  $e_1, e_2$  e  $e_3$  ao longo do eixo  $x_1$ ;  $e_{12}, e_{22}$  e  $e_{32}$  as projeções de  $e_1, e_2$  e  $e_3$  ao longo do eixo  $x_2$  e  $e_{31}, e_{32}$  e  $e_{33}$  as projeções de  $e_1, e_2$  e  $e_3$  ao longo do eixo  $x_3$ . A equação (18) pode então ser reescrita da forma:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (19)$$

que é da forma  $y = Ax$ , onde:

$$A = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} \end{bmatrix} \quad (20)$$

Nota-se que a equação (19) é análoga à transformação de Hotelling onde a média não foi subtraída dos vetores originais. A subtração do vetor média simplesmente centraliza o objeto de modo que seu centro de gravidade esteja na origem do novo sistema de coordenadas. Neste caso, a transformação se torna  $y = A(x - m_x)$ . Para o procedimento de rotação, normalmente utiliza-se a regra da mão direita na escolha da direção dos autovetores.

Para a transformação "Tasseled Cap" realiza-se uma rotação na imagem na direção associada às características físicas da cena, como a radiância ("brightness"), o estado de verde ("greenness") e o estado de senescência ("yellowness") que são representados por eixos ortogonais (Figura 14).

Portanto, pode ser visto que a transformação "Tasseled Cap" utiliza apenas a base teórica da transformada de Hotelling mas não é equivalente. A análise pela transformada de Hotelling fornece redução do volume de dados, mas apresenta obstáculos substanciais com respeito à interpretação física das características derivadas. Além disto, ela é extremamente dependente da cena, uma vez que é puramente estatística.

A transformação "Tasseled Cap" enfatiza especificamente as estruturas de dados inerentes. Ela extrai a informação relevante da cena, visualizando as estruturas no modo mais direto possível, um modo no qual cada estrutura de dados possa ser vista em sua totalidade, e separadamente. Além disto, a mudança para um novo conjunto de dados do mesmo sensor não requer mudanças, porque a transformação é definida baseada em características físicas invariantes e fundamentais da cena. Uma vez que as características da transformação são

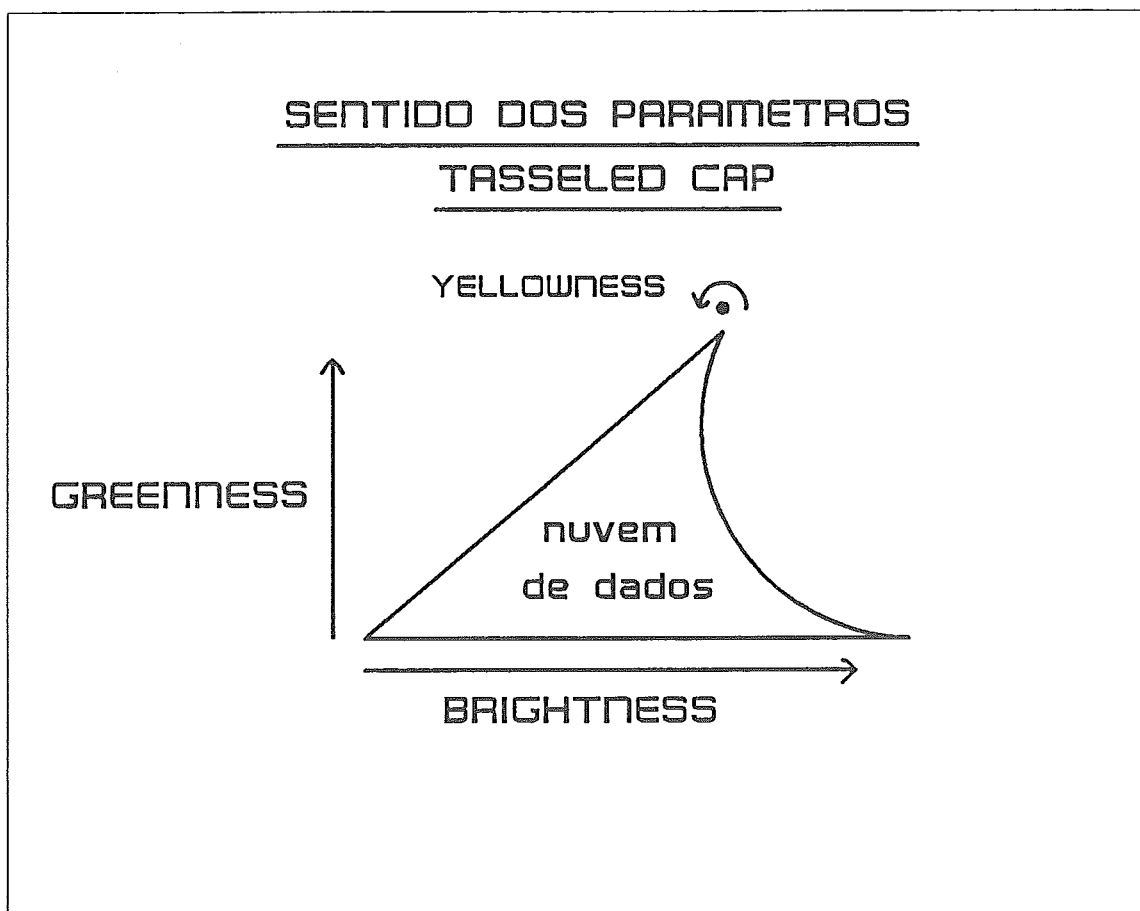


Figura 14. Direção e sentido dos parâmetros Tasseled Cap. O sentido de YELLOWNESS é para fora do plano, perpendicular aos outros dois parâmetros.

adequadamente alinhadas para responder àquelas características, elas serão aplicáveis a qualquer conjunto de dados do mesmo sensor, embora a atmosfera, geometria de iluminação e desvios na latitude possam afetar os resultados. Porém, o conteúdo de um conjunto particular de dados determinará que porções das estruturas de dados são ocupadas, mas não afetará as próprias estruturas de dados.

Sob o enfoque de se estudar as características físicas da cena (classes da cena), é preferível usar as bandas mais adequadas, isto é, que forneçam maior número de informação no sentido das próprias características físicas, do que usar as bandas menos correlacionadas, determinadas por meios estatísticos.

Logo, temos os seguintes pontos a considerar:

- Como as características da transformação são ortogonais, as rotações aplicadas a um subconjunto de características não afetará as outras características, ou a interrelação entre o subconjunto girado e as outras características.
- Como a expressão das estruturas de dados é influenciada pela calibração e resposta do detector do sensor, as transformações são dependentes do sensor, isto é, uma mudança para um sensor ou uma aplicação diferente exige um novo cálculo.
- Uma mudança no conjunto de dados do mesmo sensor não requer alteração da transformação.
- Como as bandas espectrais do satélite SPOT operam na mesma faixa de frequência das bandas espectrais do satélite MSS, os parâmetros finais da transformação "Tasseled Cap" serão os mesmos, ou seja: "brightness", "greenness" e "yellowness".

Em resumo, a transformação "Tasseled Cap" é muito útil em qualquer aplicação para a qual as classes de cena sejam distintas e possuam propriedades espectrais características.

## IV. Materiais e Métodos

### IV.1 Materiais

As imagens a serem usadas na determinação dos parâmetros "Tasseled Cap" devem conter alguma proporção de campos de agricultura, vegetação natural, floresta, água e características humanas (ex.: estradas, aeroportos, zonas urbanas), para que a classificação seja bem genérica.

Para o cálculo dos parâmetros foi usada a imagem com as seguintes características:

- imagem SPOT: S1X2-12789.700.357
- local de aquisição: INPE (Brasil)
- pré-processamento executado no INPE: Correção Radiométrica
- meio: fita magnética
- latitude: 3° 18' sul (coordenada SPOT: K700)
- longitude: 49° 42' oeste (coordenada SPOT: J357)
- região: cidade de Tucuruí, estado do Pará, Brasil
- ângulo de incidência: 0°
- data: 7/8/88
- cobertura de nuvens: 0 %
- bandas espectrais: 1, 2 e 3
- sensor: HRV2 multiespectral

Como a imagem SPOT é muito grande, foi utilizada apenas uma parte da imagem com 1024 linhas por 1024 colunas.

As linhas da imagem usada foram: números 1977 a 3001

As colunas da imagem usada foram: números 2008 a 3032

Para a comparação do fator "greenness" foi usada a imagem com as seguintes características:

- imagem LANDSAT: 224.63B
- local de aquisição: INPE (Brasil)
- pré-processamento executado no INPE: Correção Radiométrica
- meio: fita magnética
- latitude: 3° 18' sul (coordenada LANDSAT: 63)
- longitude: 49° 42' oeste (coordenada LANDSAT: 224)
- região: cidade de Tucuruí, estado do Pará, Brasil
- data: 1/8/88
- cobertura de nuvens: 0 %
- bandas espectrais: 1, 2, 3, 4, 5 e 7
- sensor: TM multiespectral

Como a resolução do satélite Landsat é de 30m x 30m (área de 1 pixel) e a do satélite SPOT é de 20m x 20m (área de 1 pixel), usou-se o método de interpolação bilinear\* para alterar as dimensões da imagem Landsat, e assim ajustá-la à imagem SPOT.

O "software" usado para o processamento das imagens e apresentação na tela do monitor se constitui de alguns programas em FORTRAN e o pacote IBM (International Business Corporation) denominado IAX (Image Access eXecutive) contendo um grande conjunto de rotinas especificamente para processamento de imagens. Para a impressão de imagens foi usado o programa de "halftoning", com uma matriz de 4 x 4 pontos dando origem a 9 níveis de cinza em uma impressora laser modelo 3820 com resolução de 9,4488 pontos por milímetro.

---

\* Método onde o valor do nível de cinza a ser atribuído ao pixel é determinado a partir do valor dos quatro pixels vizinhos.

O "hardware" utilizado foi um computador IBM-3090 modelo 180E com 64 megabytes de memória, utilizando o terminal colorido tipo IBM-3192.

## IV.2 Métodos

Os métodos de abordagem do problema poderiam ser de dois tipos:

### 1. método usando programação não-linear/otimização/minimização:

utilizam-se duas imagens do mesmo lugar e mesma data (ou o mais próximo possível): uma obtida com o sensor TM (Landsat) e outra com o sensor HRV (SPOT). Executa-se a Transformação "Tasseled Cap" na imagem TM e esta imagem transformada serviria como parâmetro de saída da imagem HRV, calculando-se os elementos da nova matriz "HRV Tasseled Cap" através de um método de minimização do erro médio quadrático entre as equações formadas pela combinação de bandas.

### 2. método usando componentes principais/análise gráfica/rotação:

este foi o método inicial, desenvolvido por Kauth e Thomas. Utiliza-se uma imagem que possua várias classes (como campos de agricultura, vegetação natural, floresta, água e características humanas: zonas urbanas, estradas, aeroportos), obtida com o sensor HRV, verifica-se graficamente a relação entre as diversas bandas do sensor, plotando os valores das bandas, duas a duas, e aplica-se uma rotação nos eixos no sentido de melhor visualizar as diversas classes da cena, adequando o gráfico aos primeiros gráficos traçados por Kauth e Thomas para o sensor MSS do satélite Landsat.

O primeiro método apresenta as seguintes desvantagens:

- ao se utilizar duas imagens: uma TM e outra HRV, aparece inicialmente um problema devido à diferença de resolução dos sensores: 30m para TM e 20m para HRV, tendo-se que fazer um ajuste no valor de pixel do HRV para coincidir com 30m, alterando o valor original do pixel;
- como os dois satélites têm períodos de aquisição de dados diferentes: a frequência do Landsat-TM é de 16 dias e a do SPOT-HRV é de 26 dias em nadir, fica muito difícil encontrar duas imagens do mesmo

lugar obtidas no mesmo dia. Este inconveniente pode gerar diferenças nos valores registrados nas duas imagens, devido à diferentes ângulos de observação, sombras devido a diferentes estações do ano, diferenças atmosféricas e de névoa, etc.

- não permite uma análise mais profunda do sensor HRV, correlação entre suas bandas e captação das várias classes da cena, considerando-se o seu comportamento igual ao do sensor TM.

Pelos motivos acima e, ainda, considerando-se a filosofia inicial da transformação "Tasseled Cap", ou seja, adequar os novos eixos a uma melhor visualização da característica desejada, o segundo método pareceu ser a escolha mais adequada.



## V. Resultados

### V.1 Cálculo

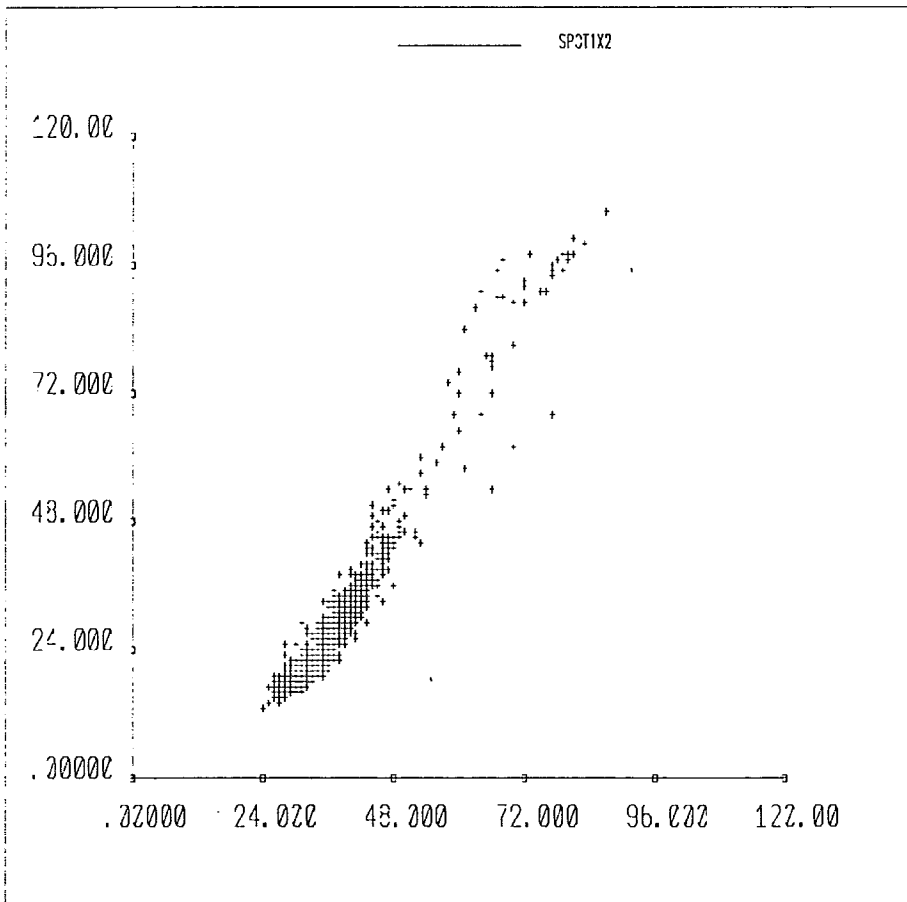
Seguindo os procedimentos de Kauth e Thomas [1], primeiramente, foram plotados os gráficos:

- valores de pixel da banda 1 x valores de pixel da banda 2 na Figura 15,
- valores de pixel da banda 1 x valores de pixel da banda 3 na Figura 16,
- valores de pixel da banda 2 x valores de pixel da banda 3 na Figura 17.

usando uma taxa de amostragem de 1 a cada 20 pixels (portanto a cada 400m, já que a resolução do sensor é de 20m), num total de 2500 pontos da imagem.

Estes gráficos são muito semelhantes aos encontrados por Kauth e Thomas em seu trabalho original e confirmam a forma de um gorro borlado ("tasseled cap") conforme mostrado na Figura 3, tendo como plano de solos o gráfico mostrado na Figura 15 e como vistas laterais os gráficos mostrados nas Figura 16 e Figura 17.

A Figura 15 indica uma alta correlação entre as bandas 1 e 2. Como os dados estão agrupados em uma zona pequena do espaço bidimensional, estes dados provavelmente fornecerão muito pouca informação de valor. Os eixos usados podem não ser o melhor arranjo na análise da característica multiespectral espacial dos dados associada a estas duas bandas. O objetivo é girar os eixos originais para que os valores originais de reflectância sejam redistribuídos (na verdade, reprojutados) em um novo conjunto de eixos onde haja a maior discriminação possível na imagem, neste caso, ao longo da reta inclinada que contenha o maior número de pontos.



---

Figura 15. Valores de pixel da banda 1 x banda 2.

As Figura 16 e Figura 17 indicam uma menor correlação entre as bandas 1 e 3 e entre as bandas 2 e 3, podendo-se notar que há maior variação na Figura 17 (nuvem de dados mais espalhada). Conclui-se que devemos girar os eixos até coincidi-los com a base do triângulo formado pela nuvem de dados.

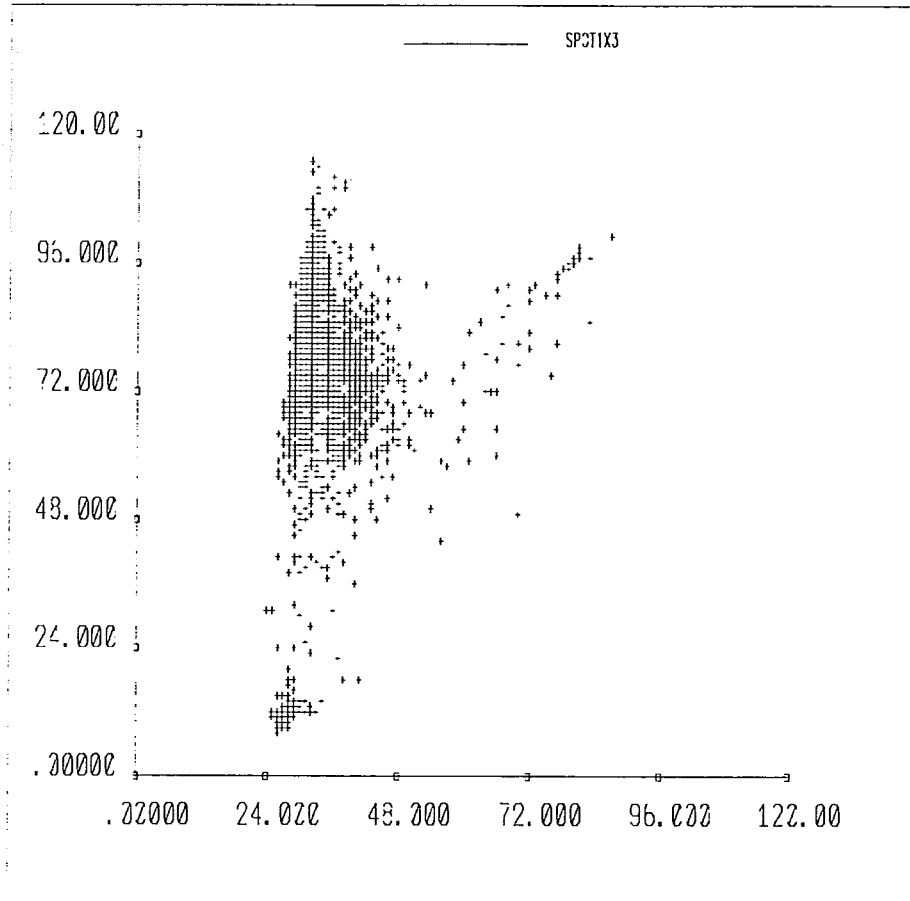


Figura 16. Valores de pixel da banda 1 x banda 3.

Deste modo, utilizando métodos de análise de regressão calculamos a dependência de uma variável em relação à outra, ou seja, sua curva de regressão, pelo método dos mínimos quadrados de Gauss. Este procedimento pode ser resumido do seguinte modo:

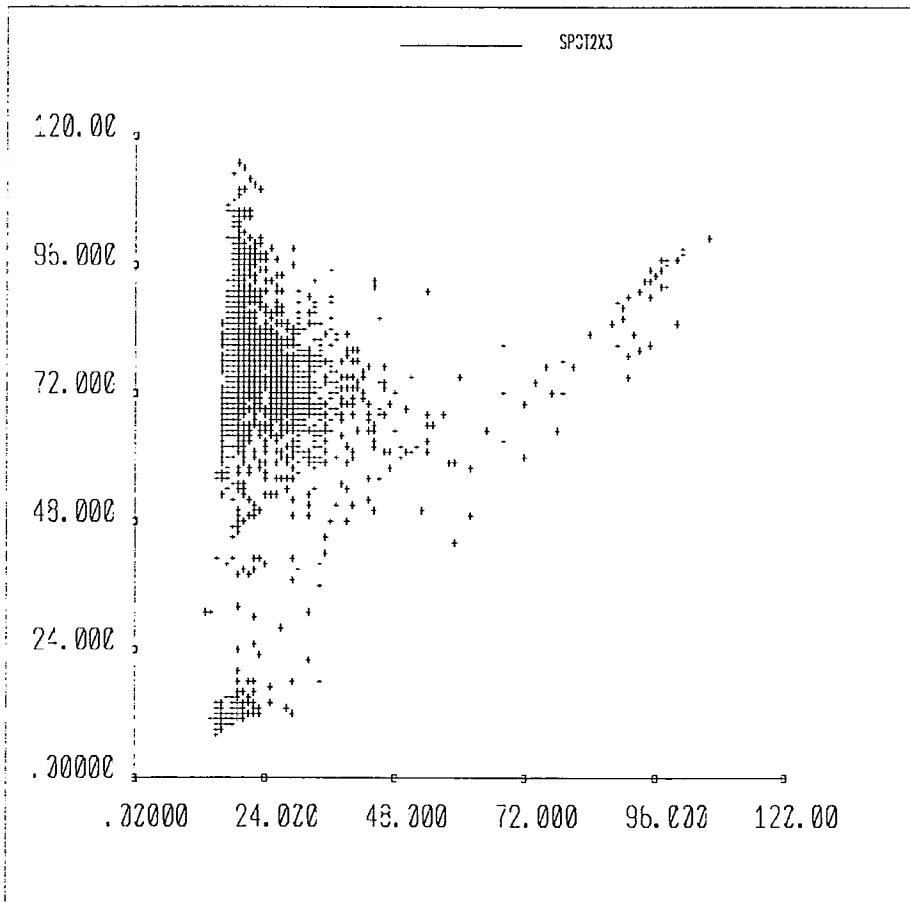


Figura 17. Valores de pixel da banda 2 x banda 3.

Deve ser encontrada uma linha reta que passa através dos pontos dados de tal modo que a soma dos quadrados das distâncias destes pontos até a linha reta seja mínima, considerando-se a distância medida na direção vertical.

Calculando-se para os dados do gráfico representado na Figura 15, foi encontrado o ângulo de  $56,35^\circ$  com o eixo horizontal, como inclinação da reta. Escolhendo-se os dados do gráfico representado na Figura 17, por formarem uma nuvem de dados mais espalhada, foram retirados os pontos que estivessem acima de uma reta partindo da origem e com inclinação de  $50^\circ$  em relação ao eixo horizontal (arbitrado visualmente), e aplicando-se o mesmo método de análise de regressão com os pontos restantes, foi encontrado o ângulo de  $45,57^\circ$  com o eixo horizontal, como inclinação da reta da base do triângulo formado pela nuvem de dados.

Substituindo estes valores na equação (18), como  $\theta_1 = 45,57^\circ$  e  $\theta_2 = 56,35^\circ$ , temos:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,38790 & 0,58274 & 0,71410 \\ -0,83243 & 0,55412 & 0 \\ -0,39570 & -0,59445 & 0,70004 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (21)$$

Sendo:

- $y_1$  = Reflectância do Solo ("BRIGHTNESS")
- $y_2$  = Estado de Senescência ("YELLOWNESS")
- $y_3$  = Estado de Verde ("GREENNESS")
- $x_1$  = valores de pixel na banda 1 (vetor  $1 \times N^2$ , sendo neste caso  $N = 1024$ )
- $x_2$  = valores de pixel na banda 2 (vetor  $1 \times N^2$ , sendo neste caso  $N = 1024$ )
- $x_3$  = valores de pixel na banda 3 (vetor  $1 \times N^2$ , sendo neste caso  $N = 1024$ )

Tomando-se  $y_1$ ,  $y_2$  e  $y_3$  com a direção adequada (Figura 14).

Portanto, a matriz final para o sensor SPOT é vista na Tabela 3.

Tabela 3. Coeficientes Tasseled Cap para o sensor SPOT			
CARACTERÍSTICA	X1	X2	X3
Brightness	0,38790	0,58274	0,71410
Greenness	-0,39570	-0,59445	0,70004
Yellowness	-0,83243	0,55412	0

## V.2 Análise

Os dados transformados são vistos na Figura 18, Figura 19 e Figura 20, usando-se o mesmo conjunto de amostras da Figura 15, Figura 16 e Figura 17.

Nota-se que a Figura 18 contém quase toda a variação dentro da amostra escolhida, na linha de solos paralela ao eixo "brightness". Estamos vendo o "boné borlado" ("tasseled cap") em vista direta lateral. Nesta figura podemos analisar os seguintes pontos mostrados na Figura 21:

- Ponto A : solo nu - aparece na região ao longo da borda, também chamada "linha de solo";
- Ponto B : crescimento do verde - quando as plantas emergem no campo, as características espectrais das mesmas causam um aumento em "greenness", enquanto as sombras que elas causam, diminuem "brightness", a menos que o solo seja muito escuro;
- Ponto C : cobertura completa de vegetação - um contínuo crescimento da plantaçao causa um aumento na vegetação densa ("greenness") e diminuição da sombra ("brightness");
- Ponto D : senescência - o desenvolvimento do envelhecimento da plantaçao resulta numa diminuição de "greenness", enquanto o efeito "brightness" difere com os vários tipos de plantaçao.

Deve ser observado que esta trajetória independe do tipo de plantaçao.

Na Figura 19 nota-se toda a extensão da aba do boné.

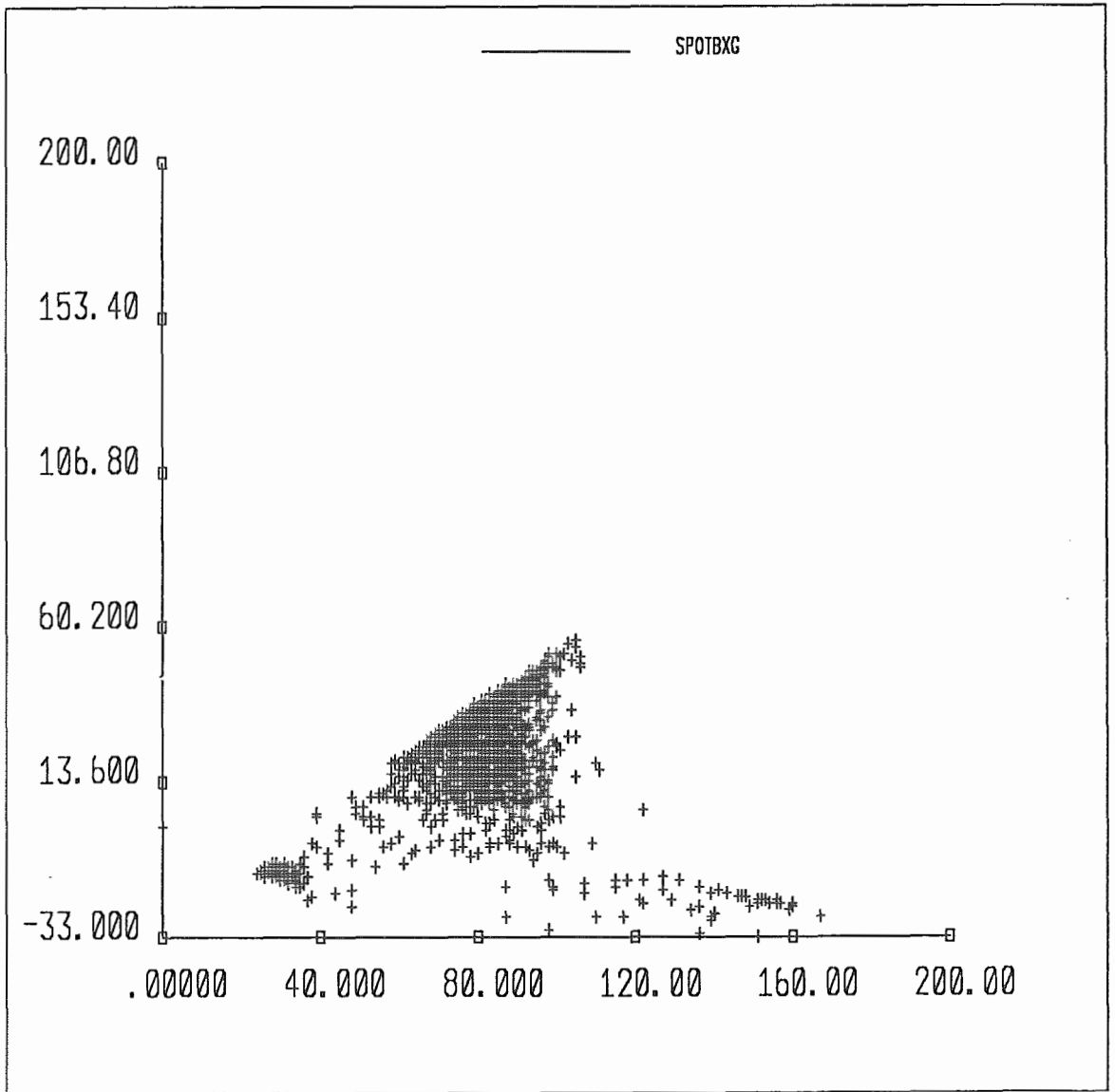


Figura 18. Valores de pixel de BRIGHTNESS X GREENNESS.

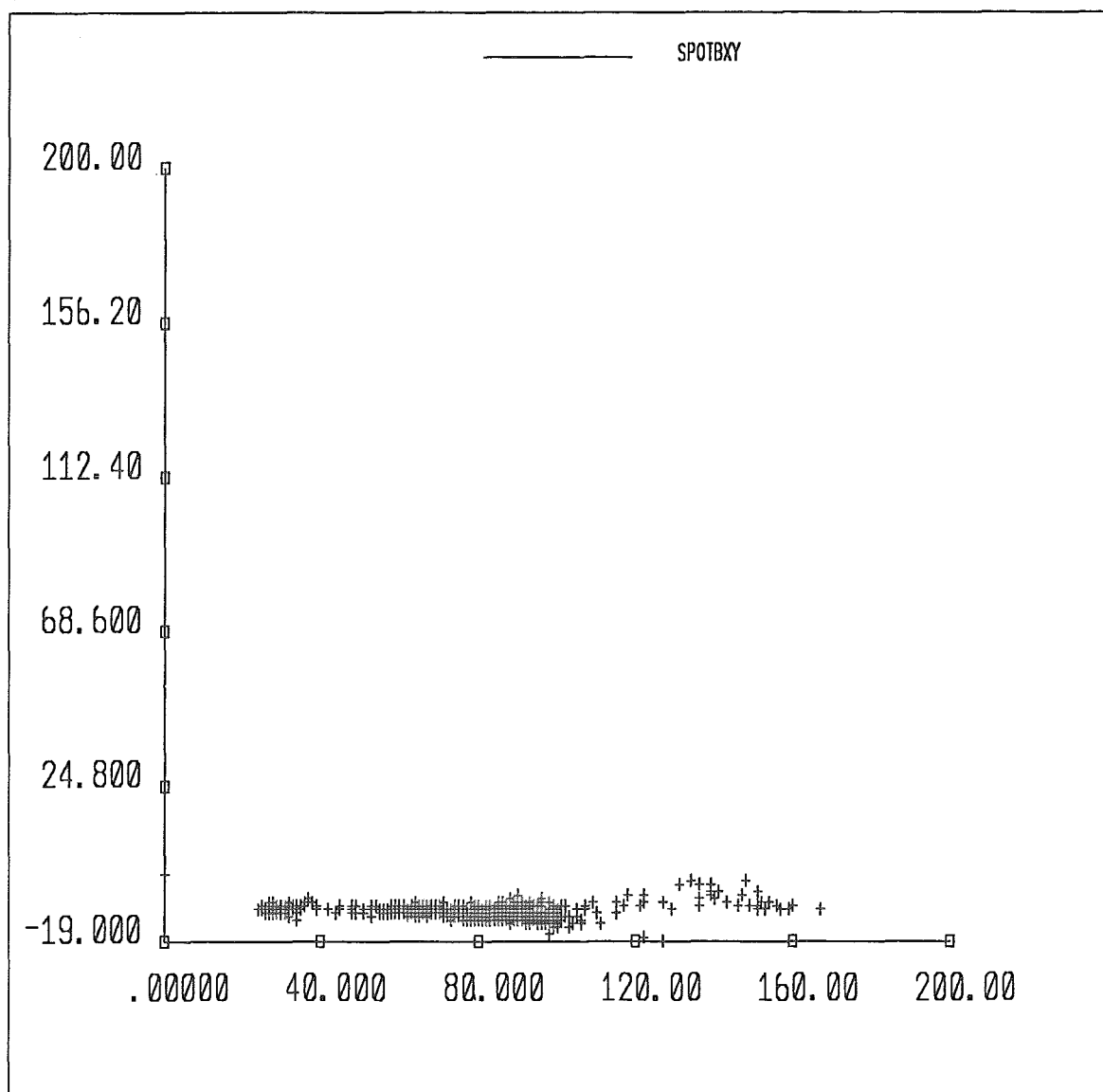


Figura 19. Valores de pixel de BRIGHTNESS X YELLOWNESS.

Na Figura 20 nota-se que os dados foram fortemente comprimidos na direção de "yellowness". Há poucos objetos classificados como "yellowness", que devem ser materiais amarelos.



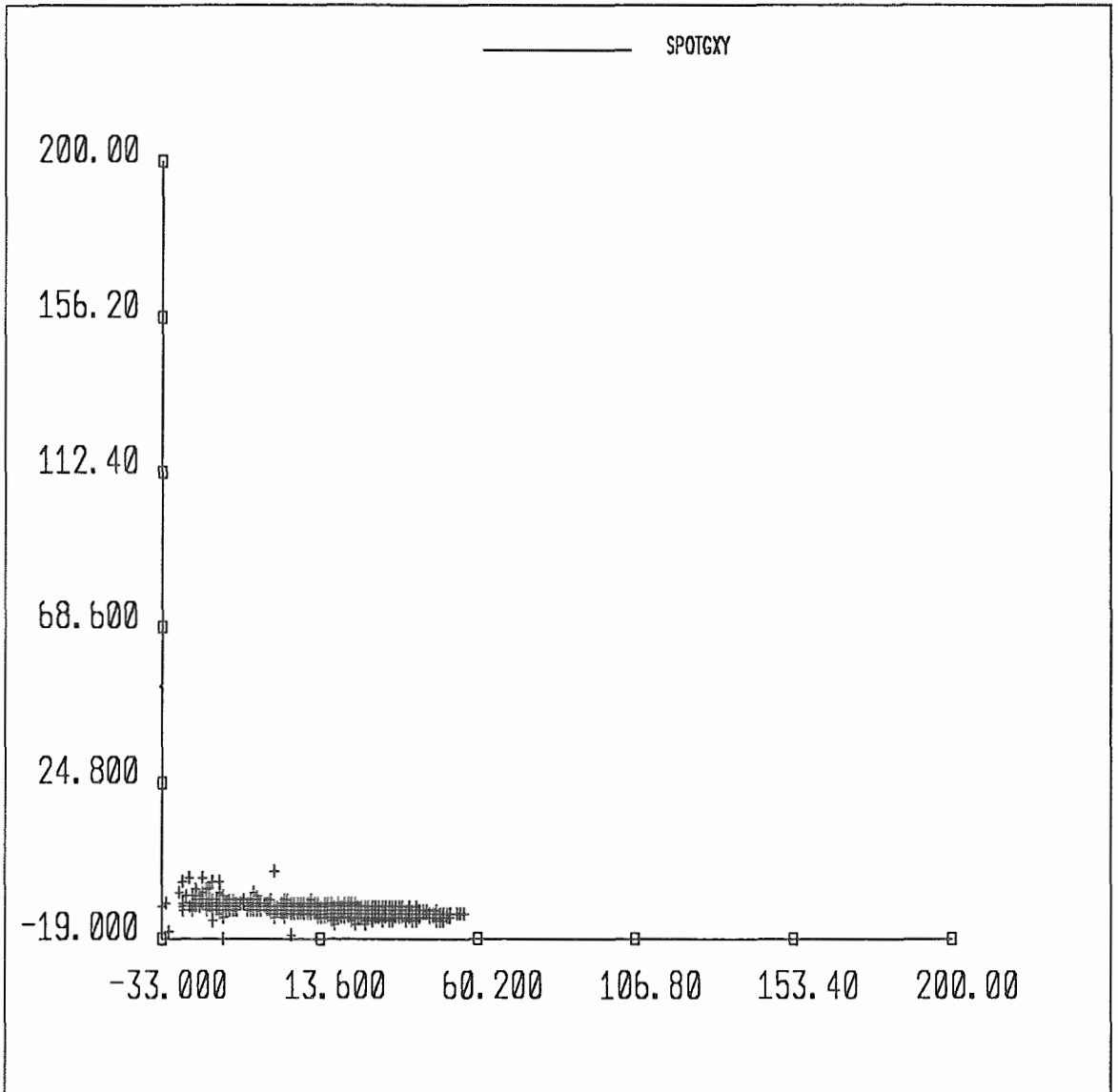


Figura 20. Valores de pixel de GREENNESS X YELLOWNESS.

Um segundo método de apresentação dos dados transformados é dado por meio da visualização da imagem transformada.

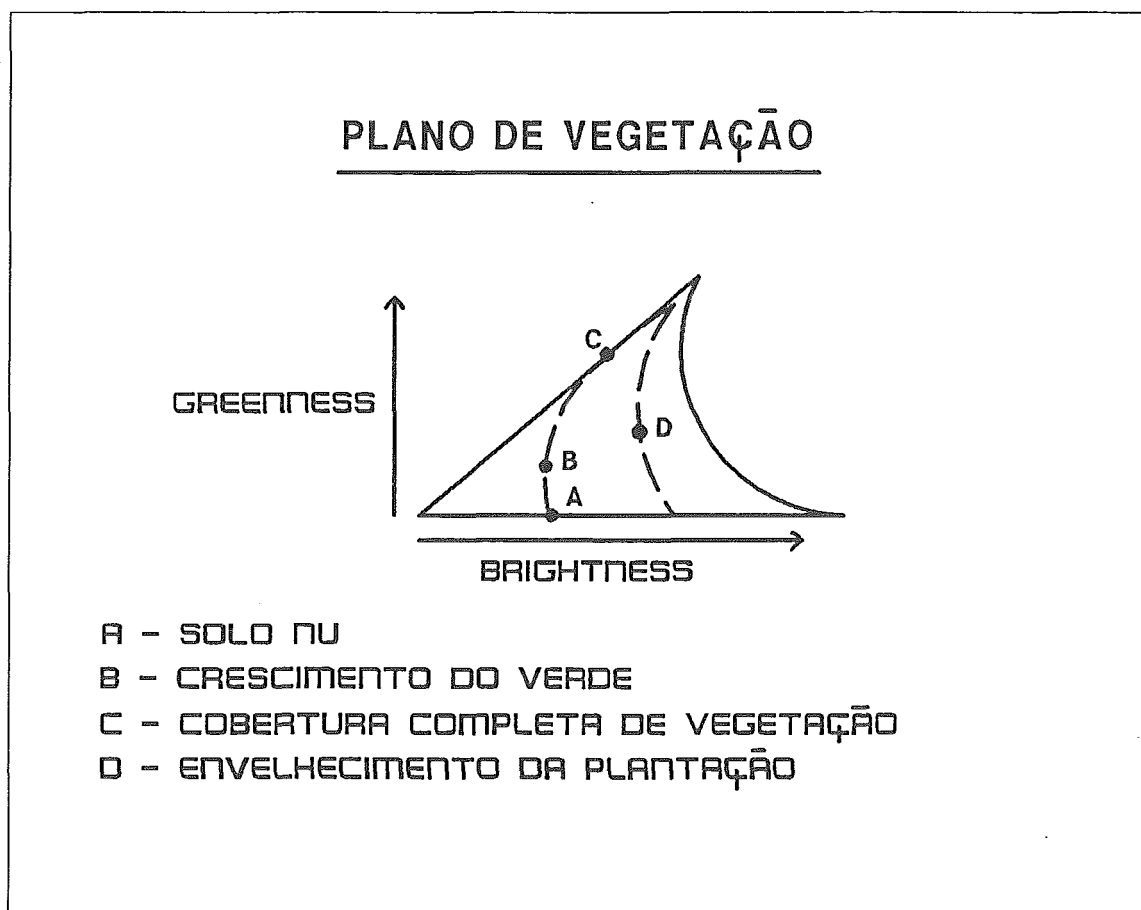


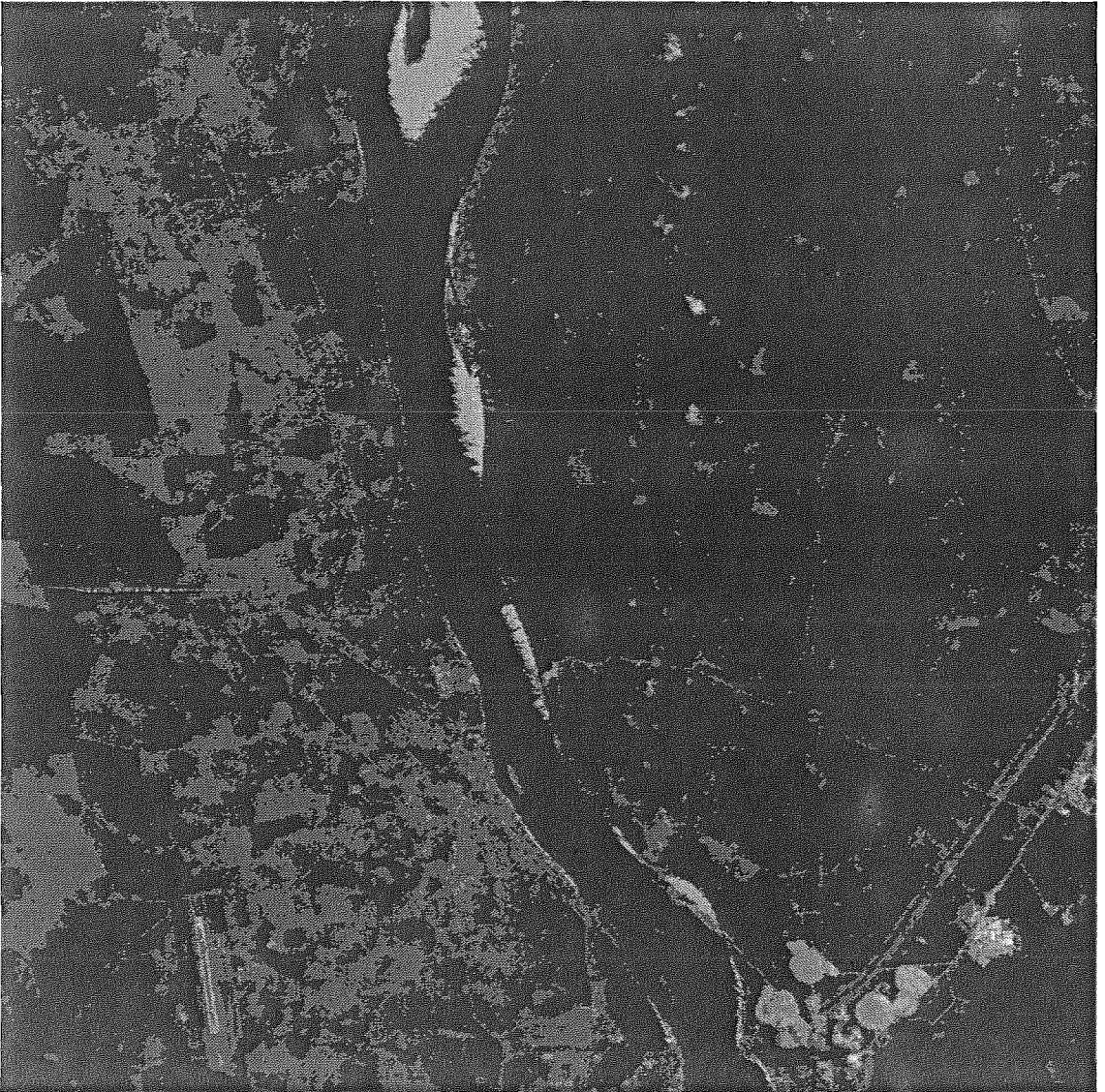
Figura 21. Plano de Vegetação.

Seguem-se as imagens utilizadas como dados de entrada e seus respectivos histogramas:

- Banda 1 multiespectral - verde visível (Figura 22)
- Banda 2 multiespectral - vermelha visível (Figura 23)
- Banda 3 multiespectral - infravermelho próximo (Figura 24)
- histogramas das três bandas (Figura 25)

Utilizando-se os parâmetros calculados na Tabela 3 e substituindo-os na equação (1), foram geradas as seguintes imagens:

- "Brightness", com  $C=0$  (Figura 26);
- "Greenness", com  $C=120$  (Figura 27);
- "Yellowness", com  $C=40$  (Figura 28).



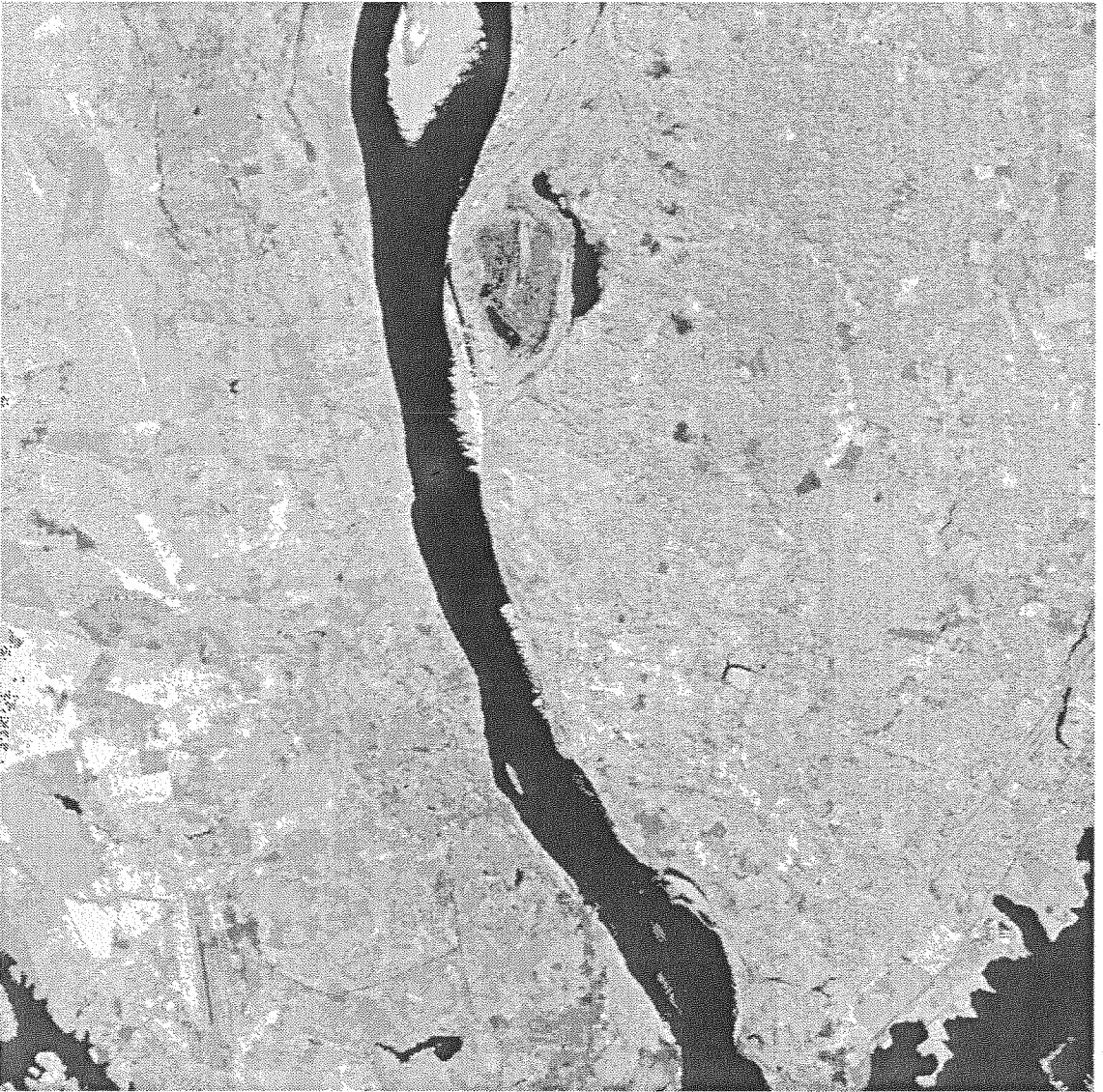
---

Figura 22. Imagem SPOT da região de Tucuruí na banda 1 multiespectral.



---

Figura 23. Imagem SPOT da região de Tucuruí na banda 2 multiespectral.



---

Figura 24. Imagem SPOT da região de Tucuruí na banda 3 multiespectral.



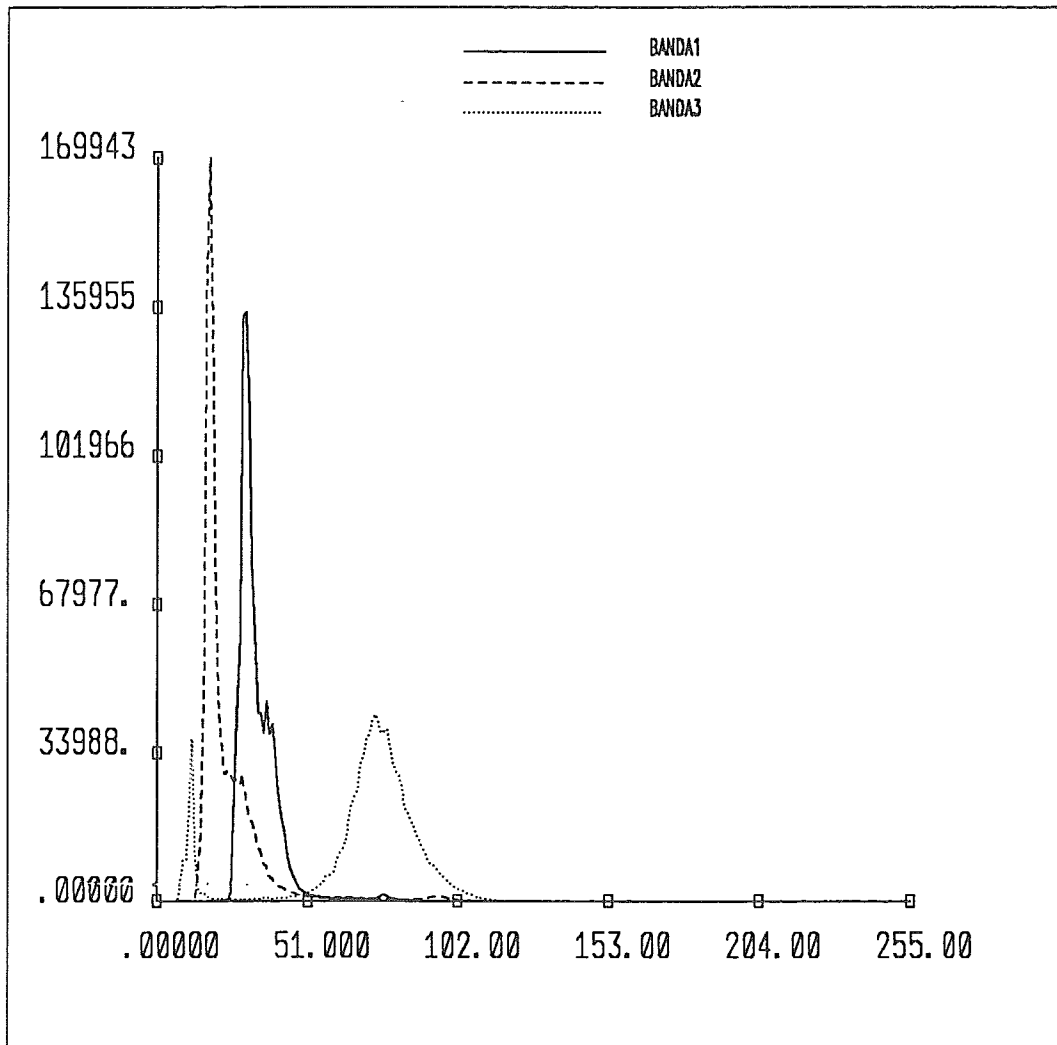


Figura 25. Histogramas da imagem SPOT nas bandas 1, 2 e 3 multiespectrais.

Uma comparação de seus histogramas (Figura 29) mostra como existe pouca informação em "yellowness", e como são discriminadas as classes da cena em "brightness" e "greenness", podendo-se utilizar um método de classificação nestas imagens que agrupe os modos do histograma em classes ("density slicing").

Conforme pode ser visto na Figura 30, o parâmetro "brightness" é composto da soma ponderada das três bandas, com maior ênfase na banda 3 (infravermelho próximo) e define a reflectância total do solo, como na transformação "MSS Tasseled Cap", com os coeficientes de valor muito próximo ao das bandas 4, 5 e 6 desta (Tabela 1).

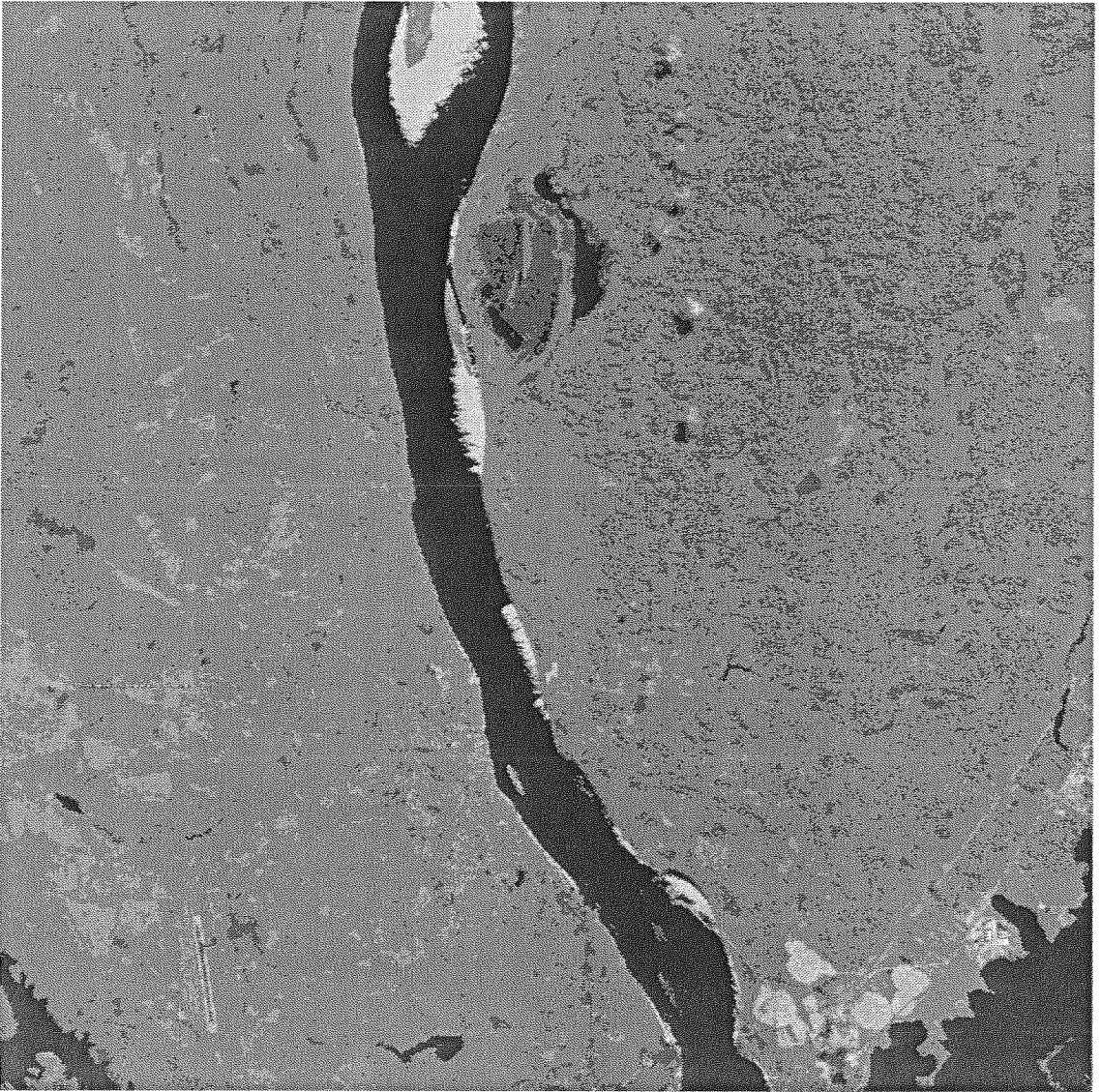


Figura 26. Imagem "BRIGHTNESS". Destacam-se as nuvens e suas sombras, relevo do terreno, água, areia nas margens e ilhas, pista do aeroporto (à esquerda, em baixo) e campos de obras (terrenos de solo amarelado, redondos, à direita em baixo).

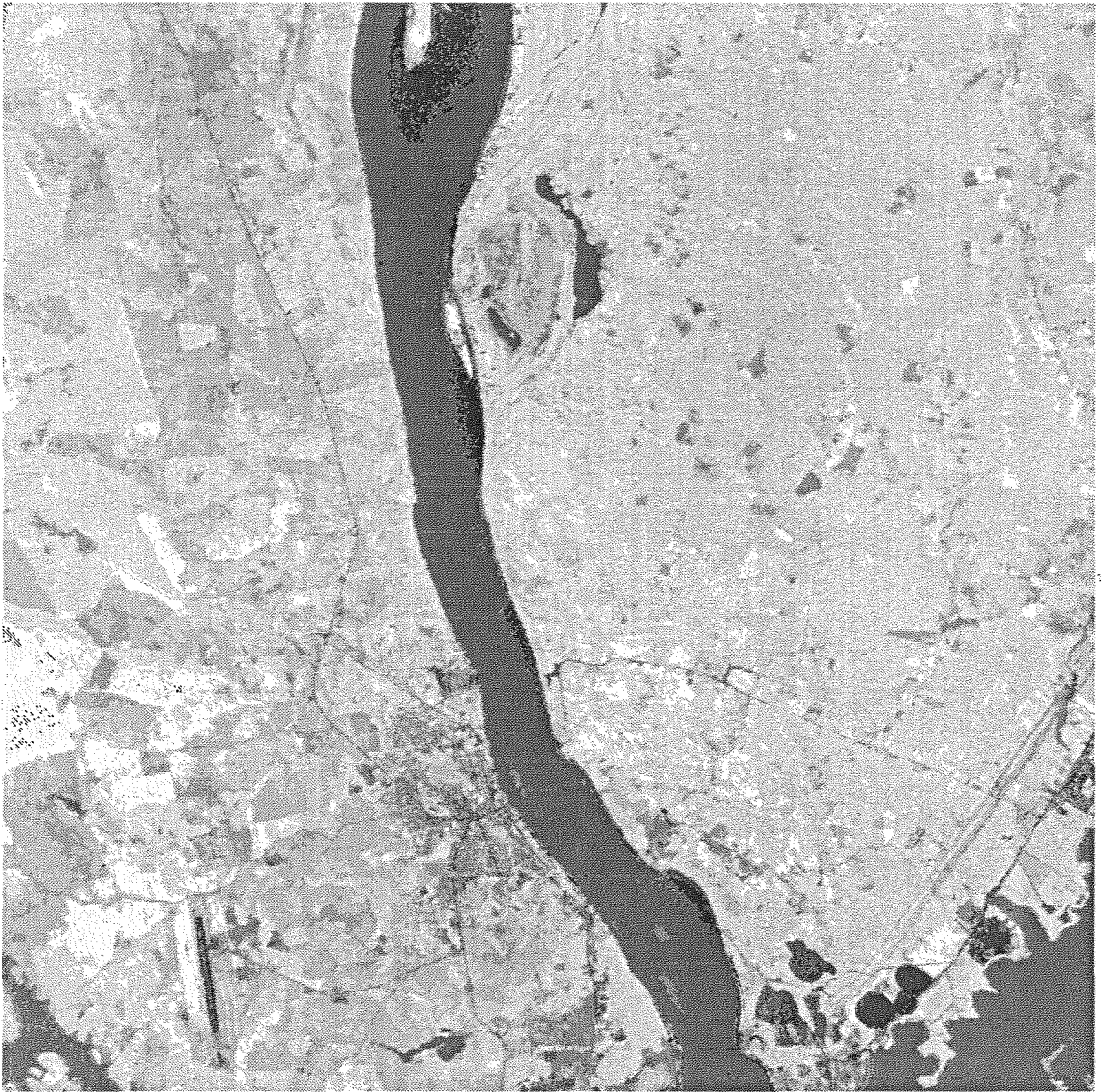
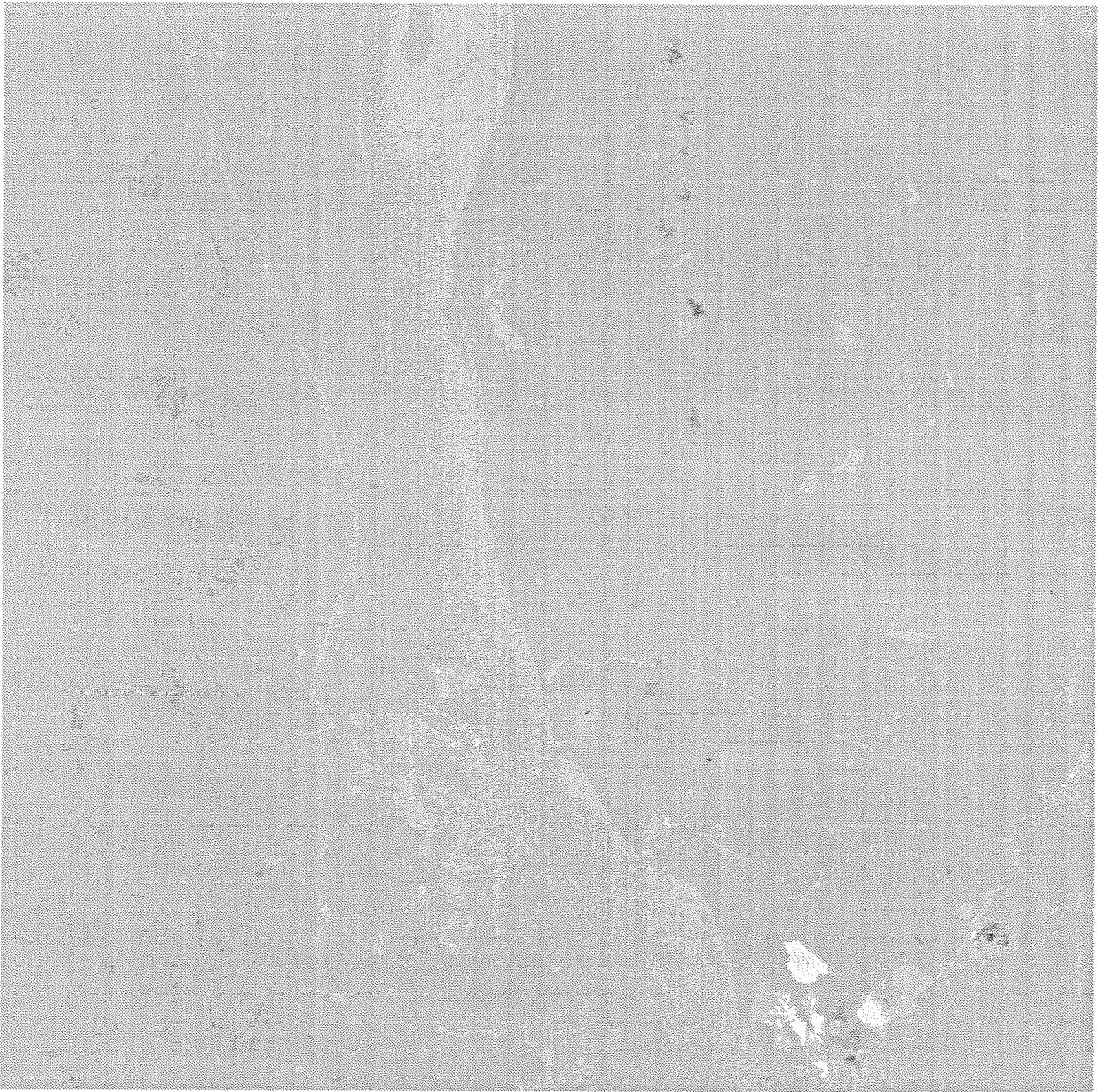


Figura 27. Imagem "GREENNESS". Destacam-se os tipos de vegetação, estradas, zona urbana, água, areia nas margens e ilhas, pista do aeroporto (à esquerda, em baixo) e campos de obras (terrenos de solo amarelado, redondos, à direita, em baixo).





---

Figura 28. Imagem "YELLOWNESS". Destacam-se as nuvens (em cor escura) e campos de obras (em cor clara por serem de solo amarelado). Observa-se, não muito nitidamente, areia das margens e ilhas (por serem levemente amareladas).

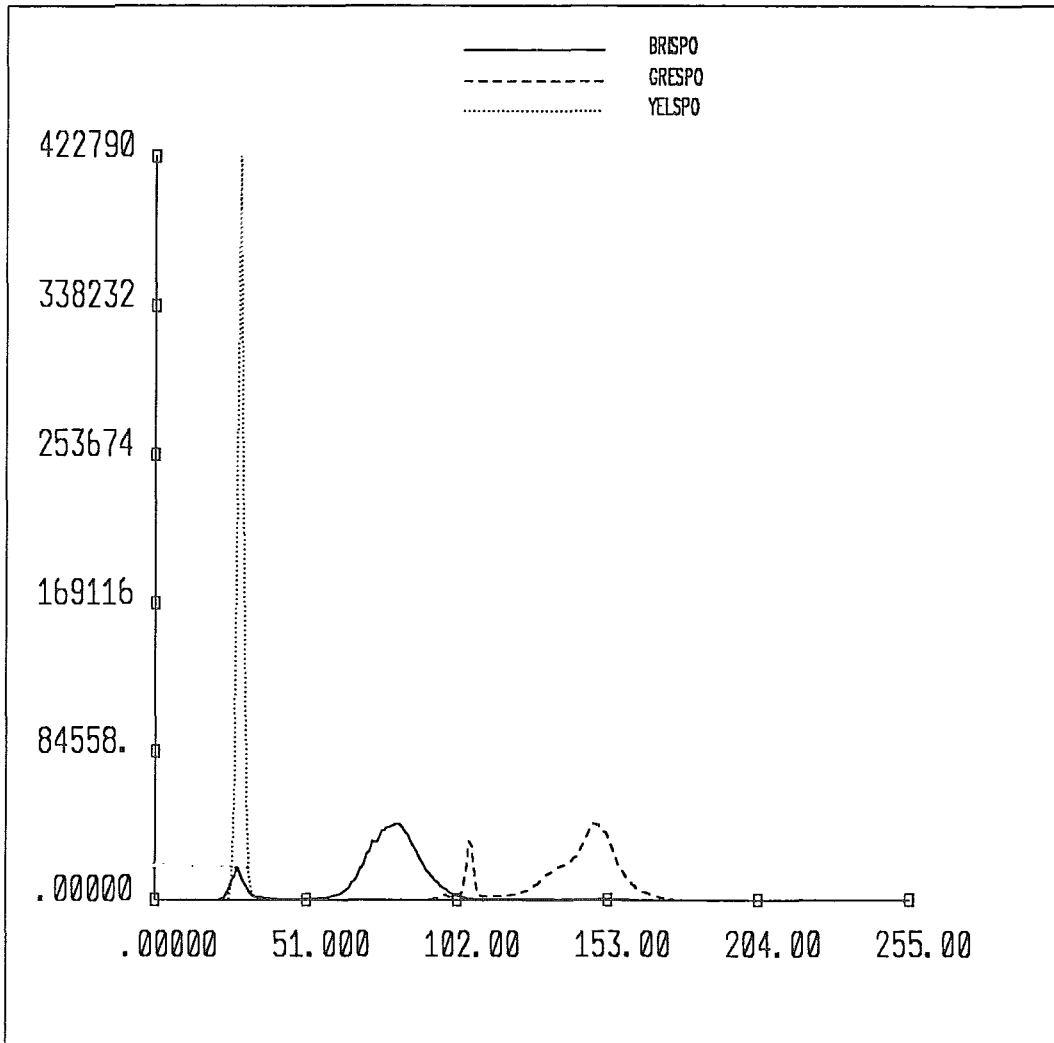


Figura 29. Histogramas das imagens "BRIGHTNESS", "GREENNESS" e "YELLOWNESS".

O parâmetro "greenness" pode ser visto na Figura 31 como um contraste entre as bandas visíveis (bandas 1 e 2) e a banda infravermelho próximo (banda 3), pois, assim como na transformação "MSS Tasseled Cap", houve um espalhamento da radiação infravermelha pela estrutura celular da vegetação e a absorção da radiação visível pelos pigmentos das plantas, como a clorofila.

O parâmetro "yellowness" pode ser visto na Figura 32 como a combinação de apenas duas bandas (bandas 1 e 2), não tendo nenhuma componente da banda 3, e equivale a uma diferença entre as bandas vermelha visível (banda 2) e verde visível (banda 1), assim como na

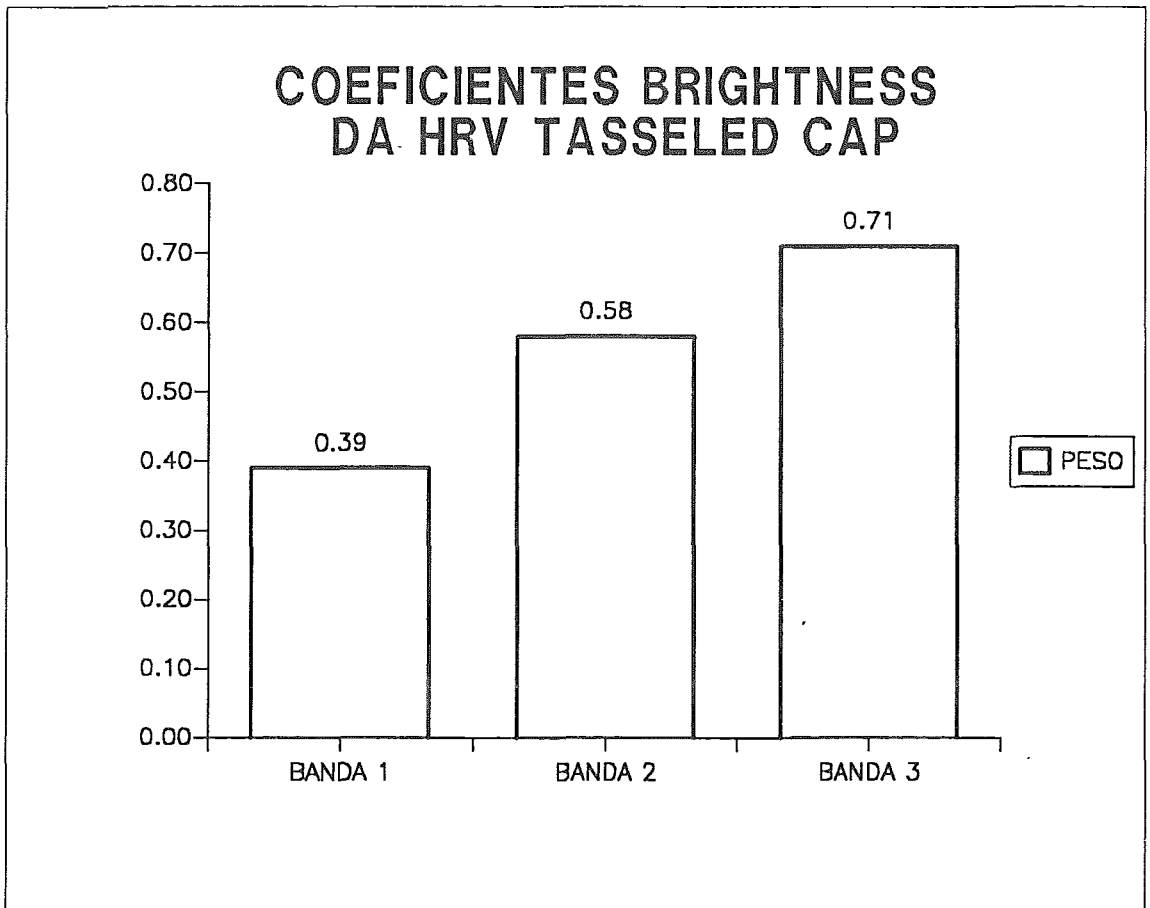


Figura 30. Coeficientes BRIGHTNESS da HRV Tasseled Cap.

transformação "MSS Tasseled Cap". Foi observado [15], [16] que a característica "yellowness" pode representar o estado físico da atmosfera, detetando a névoa atmosférica e nuvens.

### V.3 Comparação

À título de comparação com as transformações já existentes, foi calculada a imagem "greenness" de uma mesma área utilizando-se o sensor TM do satélite Landsat e o sensor HRV do satélite SPOT, com diferença de apenas 1 semana na aquisição (Figura 27 e Figura 33).

Na Figura 34 são apresentados os histogramas das duas imagens. Deve-se ressaltar que para a imagem TM foram usadas seis bandas e para a imagem SPOT apenas três bandas, contendo a imagem menos informação. Para ambas foi calculado um fator  $C=120$  para que os valores de "greenness" não ficassem negativos, mas o deslocamento no

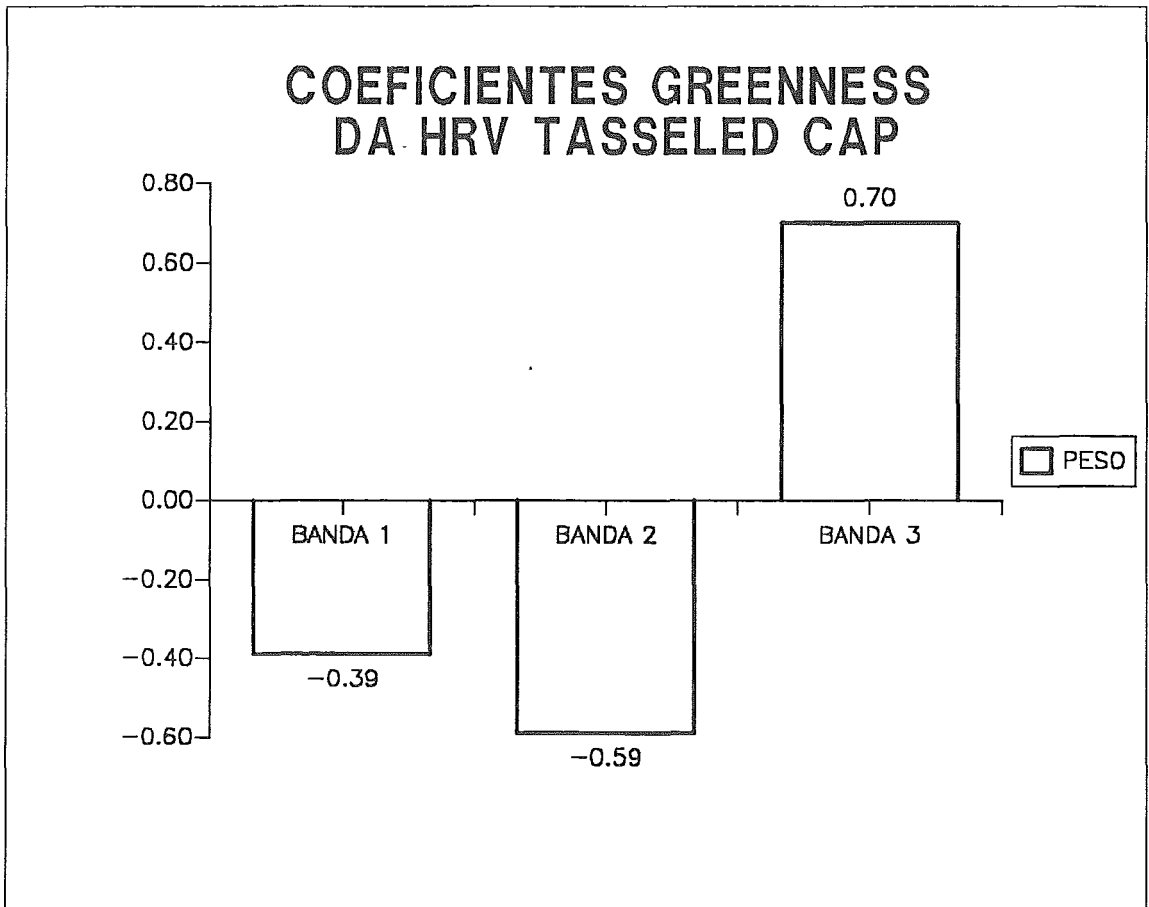


Figura 31. Coeficientes GREENNESS da HRV Tasseled Cap.

eixo de valores de cinza não deve ser considerado, uma vez que os sensores são diferentes e sua calibração e funcionamento são totalmente diversos, devendo-se levar em conta apenas a discriminação das classes e a área de cada modo.

#### V.4 Correção de Efeitos Externos

A reflectância varia com certas condições de observação, produzindo valores diferentes de resposta dos sensores. Itens como geometria de iluminação e vista, quantidade de névoa na atmosfera, quantidade de vapor d'água, quantidade de nuvens, distribuição de altura das nuvens e valor médio de reflectância da cobertura na vizinhança de pontos particulares a serem observados, são alguns fatores de influência que combinados podem afetar a classificação de algumas cenas.



---

Figura 33. Imagem "GREENNESS" TM da região de Tucuruí.. Observa-se que a resolução do sensor é bem pior do que a do HRV, destacando-se, não muito nitidamente, as estradas, a zona urbana e o aeroporto. Observa-se com mais detalhe, a água e tipos de vegetação.

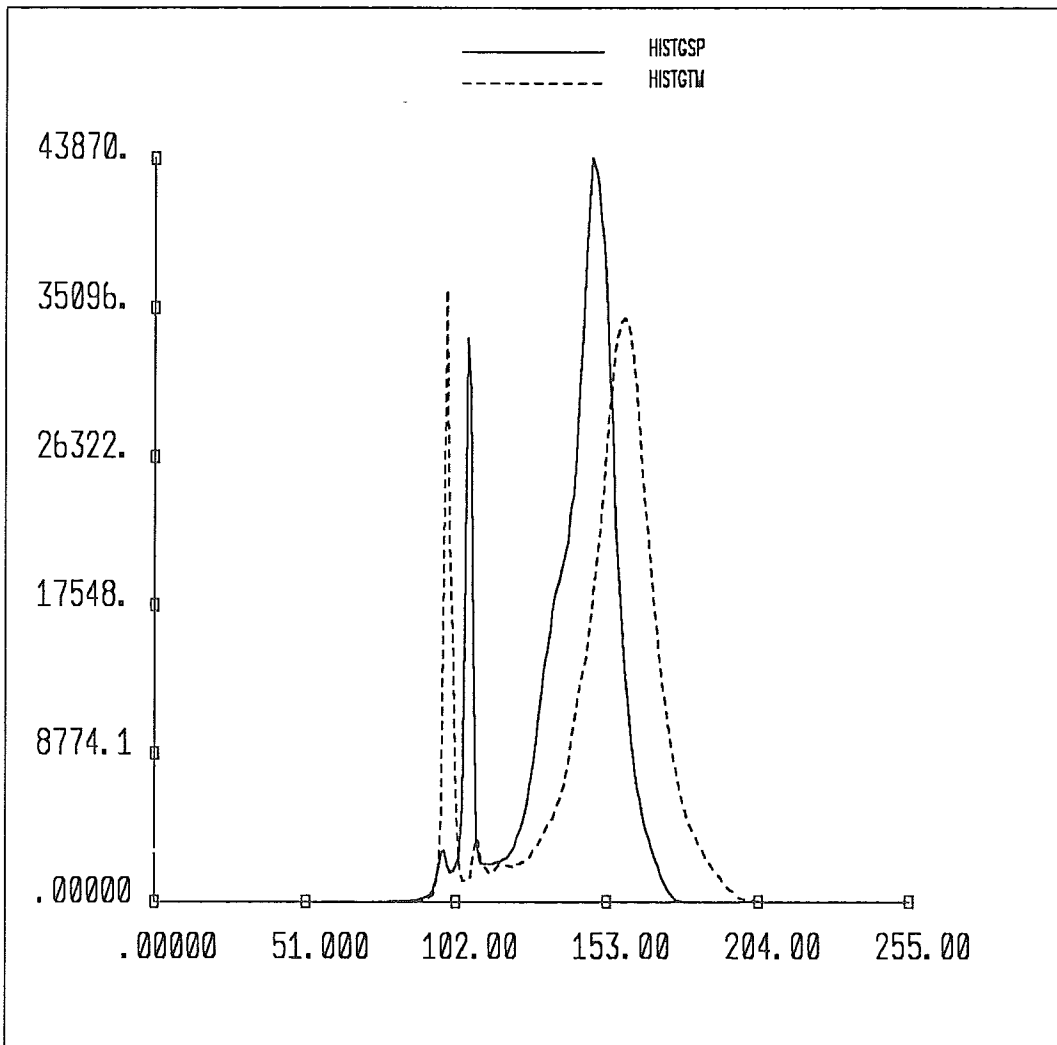


Figura 34. Histogramas comparados das imagens "GREENNESS". Histograma de "greenness" do sensor HRV do SPOT (linha cheia). Histograma de "greenness" do sensor TM do LANDSAT (linha tracejada).

No caso da transformação "Tasseled Cap", um efeito notável é o da névoa, que desloca os valores de "yellowness" e "brightness".

Outro fator de grande importância é a geometria de iluminação, pois as sombras das plantas em sua etapa de crescimento e maturidade exercem uma influência na variação da resposta espectral observada. Além disto, à medida que variam os ângulos de vista e iluminação, a quantidade de sombra que a plantação projeta varia também, e a reflectância total pode ser mais clara ou escura do que na realidade é. Portanto, é aconselhável usar um método de correção de efeitos

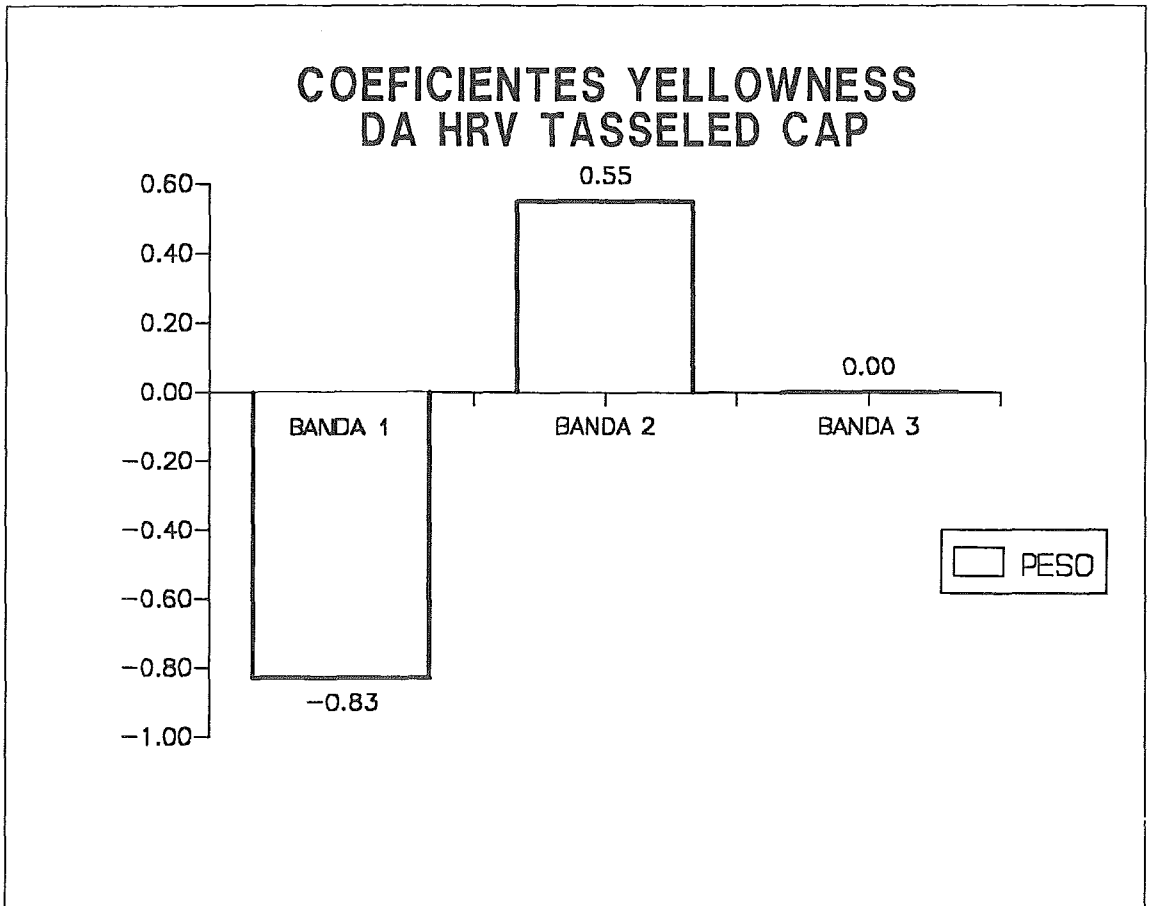


Figura 32. Coeficientes YELLOWNESS da HRV Tasseled Cap.

atmosféricos e variações de iluminação antes de se aplicar a transformação "Tasseled Cap".

Neste trabalho, as imagens adquiridas vieram corrigidas pelo INPE, que oferece a opção de correção radiométrica da imagem, utilizando modelos fornecidos pela firma SPOT Image [17].

A correção radiométrica envolve os processos de calibração dos detectores e restauração dos dados de imagem. As correções devem ser realizadas para cada instrumento HRV (HRV1 e HRV2), para cada banda espectral (pancromática e bandas 1, 2 e 3) e para cada direção (linha e coluna).

## **Calibração dos Detectores**

O uso de barras de detectores CCD (dispositivos eletro-ópticos digitais), têm a vantagem de evitar os problemas mecânicos, detectados nos sistemas de varredura. No entanto, existe um sério problema de calibração, devido ao fato de detectores adjacentes terem características radiométricas diferentes, resultando em uma imagem alinhada na direção das colunas.

O objetivo desta calibração é garantir que alvos de mesma radiância produzam níveis de cinza idênticos sob mesmas condições de iluminação e observação.

## **Restauração da Imagem**

As imagens obtidas por sistemas eletro-ópticos são caracterizadas por degradações produzidas pelo sensor e por ruídos aleatórios. Estas degradações são vistas na imagem como um barramento de pequenos detalhes, tornando as informações não observáveis diretamente. O processo de restauração tem como objetivo compensar estes efeitos de degradação.

Os principais fatores de degradação de imagem corrigidos por este método são:

- ângulo de incidência solar
- névoa atmosférica
- degradações devido à óptica
- não-uniformidade dos detectores CCD
- difusão de carga entre detectores



## VI. Conclusões

Ao se analisar a Figura 3 observa-se todo o processo: do solo nu (claro ou escuro), representado pelo plano de solos (aba do boné), nasce a planta, desenvolve-se no plano de vegetação (boné) até um ponto máximo (representado pelo ponto de onde saem as borlas), e, à partir daí, começa o processo de envelhecimento no plano de senescência, onde a planta se torna amarelecida, e se deteriora até chegarmos ao solo nu outra vez (representado pelas borlas retornando para o plano de solos), de onde tudo começou.

Sabendo-se que qualquer espécie vegetal tem um ciclo de nascimento, maturidade e senescência, similar ao descrito acima, é possível afirmar que a Transformação "Tasseled Cap" é na verdade um realce para qualquer cobertura vegetal ou tipo de solo, podendo ser utilizada em qualquer tipo de cena.

A transformação "Tasseled Cap" é um dos mais importantes índices de vegetação e tem sido rigorosamente testada e extensivamente usada, principalmente na pesquisa em agricultura, como uma pré-classificação de uma ou várias classes de objetos, empregada como dados de entrada para um classificador espectral convencional, com redução de custo de computação, já que a dimensionalidade da imagem original sempre se reduz.

Este trabalho provou a grande correlação existente entre os dados do sensor MSS e os do sensor HRV, gerando imagens que respondem às mesmas características físicas para os dois sensores.

Na transformação "HRV Tasseled Cap", portanto, há uma redução do volume de dados de três imagens (bandas 1, 2 e 3) para uma imagem apenas, com ênfase na característica desejada ("brightness", "greenness" ou "yellowness").

Este trabalho também provou uma grande correlação entre as imagens geradas pelo "TM Tasseled Cap" e as imagens geradas pelo "HRV Tasseled Cap", embora as faixas de operação dos dois sensores sejam diferentes.

Isto se deve à associação direta de características espectrais com características físicas da imagem, permite a integração de dados de múltiplos sensores, isto é, realça a probabilidade de similaridade entre os sensores com faixas espectrais de operação semelhantes porém não necessariamente idênticas. Esta integração possibilita explorar a mesma cena, sem re-definição ou ajuste, utilizando as características desejáveis de cada sensor e avaliar o seu desempenho.

O método de abordagem escolhido para a determinação da transformação "HRV Tasseled Cap" obteve sucesso pois as nuvens de dados formadas pelas plotagens "brightness" x "greenness", "brightness" x "yellowness" e "greenness" x "yellowness" têm exatamente a mesma forma das encontradas por Kauth e Thomas em seu trabalho inicial em 1976 [1], comprovando também uma escolha correta da imagem que deu origem às plotagens iniciais.

A alta resolução do sensor HRV, sua excelente precisão radiométrica e geométrica, aliada ao grande raio de ação e alta periodicidade do satélite SPOT, tornam a transformação "HRV Tasseled Cap" um aperfeiçoamento eficiente das demais existentes, sendo útil na discriminação de tipos de plantação e na verificação do estágio de desenvolvimento da plantação, possibilitando, inclusive, uma estimativa de safra, na classificação e acompanhamento do desenvolvimento das áreas urbanas, na correção de névoa atmosférica, na determinação de áreas verdes e desmatadas, etc.

O conjunto de informações precisas sobre a alimentação do mundo continua a ser importante. A terrível escassez de alimentos e fome na Etiópia em 1984-1985 é um exemplo suficiente. A aquisição de tal informação usando técnicas no campo é geralmente cara, consumindo tempo, e ocasionalmente impossível. Uma alternativa é a medição da quantidade e o monitoramento da condição da vegetação, baseada em análises de medidas espectrais de sensoriamento remoto.

Recomenda-se, como pesquisa posterior, a superposição das imagens geradas pela transformação "HRV Tasseled Cap" com a imagem pancromática da mesma área, a qual possui uma resolução de 10m x 10m, sendo possível assim, identificar com clareza objetos de 100 m<sup>2</sup>. Esta alta resolução, aliada ao realce das características do solo e

rugosidade do terreno ("brightness"), vegetação, água e zona urbana ("greenness"), névoa atmosférica e objetos de cor amarela ("yellowness"), serão, sem dúvida alguma, muito úteis no desenvolvimento de vários projetos. Como exemplo, podemos citar:

- estudos de ocupação do solo: influência de estradas, crescimento demográfico, expansão de cidades, desmatamentos, etc.
- traçado de estradas: morfologia, consumo de espaço, terraplanagem, iluminação, etc.
- superfícies com água: piscicultura, irrigação, disponibilidade, acompanhamento durante as diferentes estações do ano, etc.
- utilização agrícola e potencial das terras: o que, quando e como plantar e previsão de colheita
- inventário de cultivos
- detalhes geológicos para prospecção mineral
- acompanhamento de incêndios de bosque
- controle do meio ambiente

Outra pesquisa a ser desenvolvida seria o aproveitamento de imagens estereoscópicas; par de imagens de uma mesma região, obtidas com ângulos de inclinação opostos à linha vertical, usadas para gerar medidas de relevo do terreno. Seria interessante unir a estas imagens, a informação de solo e rugosidade do terreno contida na imagem "brightness".

Como o satélite SPOT permite ao usuário adquirir imagens da mesma área, com diferentes ângulos de inclinação do sensor, seria objeto de pesquisa futura também, determinar qual o ângulo mais adequado para realce de uma característica desejada, seguindo o princípio de melhor visualização da transformação "Tasseled Cap".

## VII. Referências Bibliográficas

- [1] KAUTH, R. J. and THOMAS, G. S.  
*"The Tasseled Cap - A Graphic Description of the Spectral-Temporal Development of Agricultural Crops as seen by Landsat"*, pages 4B-41/4B-51.  
 Volume 1 in *Proceedings of the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data*. Purdue University, West Lafayette, 1976.
- [2] THOMPSON, D. R. and WEHMANEN, O. A.  
*"Using Landsat Digital Data to Detect Moisture Stress in Corn-Soybean Growing Regions"*.  
*Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 8(8):1087-1093, Agosto 1980.
- [3] JACKSON, R. D., SLATER, P. N., and PINTER Jr., P. J.  
*"Adjusting the Tasseled-Cap Brightness and Greenness Factors for Atmospheric Path Radiance and Absorption on a Pixel by Pixel Basis"*.  
*International Journal of Remote Sensing*, 4(2):313-323, 1983.
- [4] PERRY Jr., C. R. and LAUTENSCHLAGER, L. F.  
*"Functional Equivalence of Spectral Vegetation Indices"*.  
*Remote Sensing of Environment*, 14:169-182, 1984.
- [5] CRIST, E. P. and CICONE, R. C.  
*"Application of the Tasseled Cap Concept to Simulated Thematic Mapper Data"*.  
*Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, (50):343-352, Março 1984.
- [6] CRIST, E. P.  
*"A TM Tasseled Cap Equivalent Transformation for Reflectance Factor Data"*.  
*Remote Sensing of Environment*, 17:301-306, 1985.

- [7] MUSICK, H. B. and PELLETIER, R. E.  
 "Response to Soil Moisture of Spectral Indexes Derived from Bidirectional Reflectance in Thematic Mapper Wavebands".  
*Remote Sensing of Environment*, (25):167-184, 1988.
- [8] daSILVA, M. R. L. F. and MENDONÇA, G. V.  
 "Aplicação das Transformações "TM Tasseled Cap" na Determinação da Umidade do Solo".  
 Volume 3 (a ser publicado) in *Anais do IV Simpósio Latinoamericano en Percepcion Remota*. SELPER, Bariloche, Argentina, 1989.
- [9] daSILVA, M. R. L. F. and BRAGA, R. E. G.  
 "Determinação de Áreas Verdes usando "Tasseled Cap" - uma Aplicação na Área de Tucuruí", pages 110-116.  
 Volume 1 in *Anais do VI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. INPE/SELP/ISPRS/SBC, Manaus, Brasil, 1990.
- [10] DAVE, J. V.  
 "Extensive Datasets of the Diffuse Radiation in Realistic Atmospheric Models with Aerosols and Common Absorbing Gases".  
*Solar Energy*, 21:361-369, 1978.
- [11] BAUER, M. E., BIEHL, L. L., and ROBINSON, B. F.  
 "Field Research on the Spectral Properties of Crops and Soils".  
 Volume 1 in *NASA Report SR-PO-04022*. , Purdue University, West Lafayette, IN, 1980.
- [12] RIVEREAU, J. C.  
 "SPOT, A Permanent Source of Information for Environmental Studies".  
 in *International Symposium on Primary Data Acquisition*. SPOT Workshop, Manaus, Amazonas, Brasil, 1990.
- [13] CRIST, E. P. and KAUTH, R. J.  
 "The Tasseled Cap De-Mystified".  
*Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 52(1):81-86, Janeiro 1986.

- [14] LAWLEY, D. N. and MAXWELL, A. E.  
*"Factor Analysis as a Statistical Method"*.  
Butterworth & Co., Ltd., London, England, 1963.
- [15] COLWELL, J. E. and SUITS, G. H.  
*"Yield Prediction by Analysis of Multispectral Scanner Data"*.  
in *Report 109600-17-F*. Environmental Research Institute of  
Michigan, Ann Arbor, 1975.
- [16] ERICKSON, J. D. and RICHARD, F. N.  
*"PROCAMS: A Second Generating Multispectral-Multitemporal  
Data Processing System for Agricultural Mensuration"*.  
in *Proceedings of the Symposium on Machine Processing of  
Remotely Sensed Data*. Symposium on Machine Processing of  
Remotely Sensed Data, West Lafayette, Indiana, 1976.
- [17] SOCIÉTÉ EUROPÉENNE DE PROPULSION (SEP).  
*"Correções Radiométricas SPOT"*.  
in *Estação Terrena de Processamento de Imagem SPOT no Brasil*.  
Société Européenne de Propulsion (SEP), 1987.

## Apêndice A. Bandas Espectrais dos Satélites Citados

Tabela 4. Bandas Espectrais do Multispectral Scanner System (MSS) / Landsat

Banda	Comprimento de Onda ( $\mu\text{m}$ )	Nome da banda	Resolução (m)
1/4	0,5 - 0,6	verde	79/82
2/5	0,6 - 0,7	vermelha	79/82
3/6	0,7 - 0,8	infraverm. prox.	79/82
4/7	0,8 - 1,1	infraverm. prox.	79/82

Tabela 5. Bandas Espectrais do Thematic Mapper (TM) / Landsat

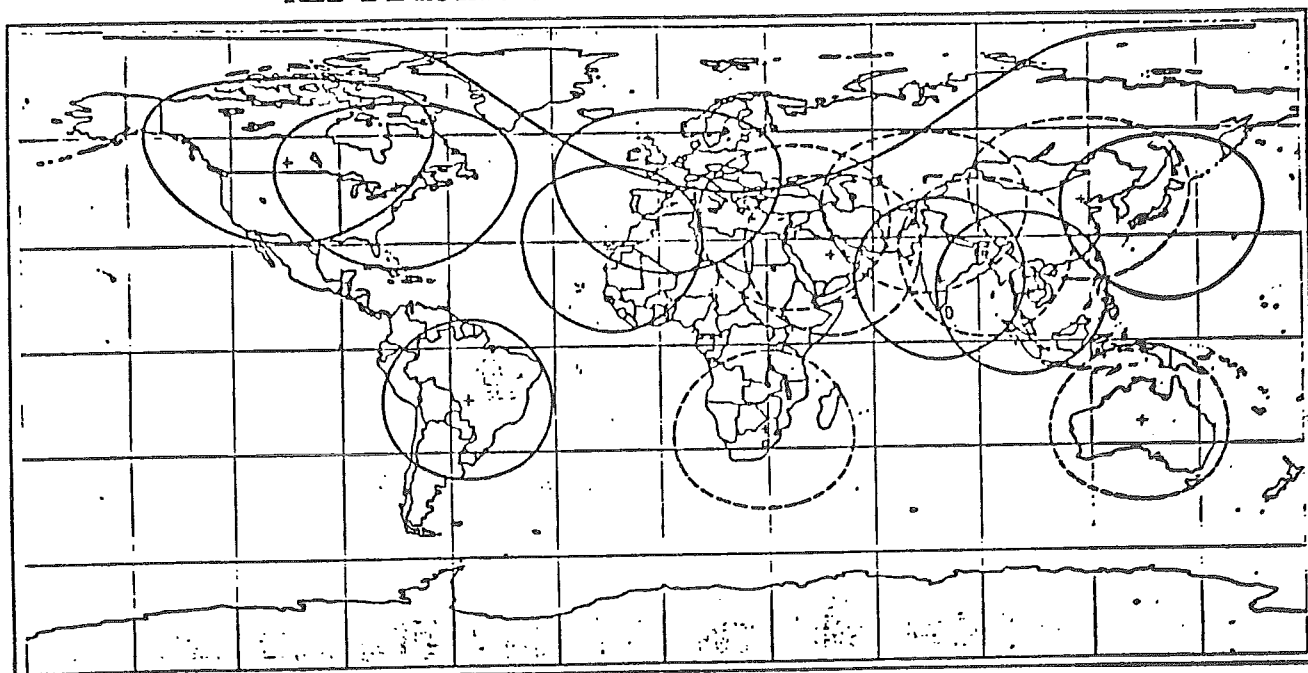
Banda	Comprimento de Onda ( $\mu\text{m}$ )	Nome da banda	Resolução (m)
1	0,45 - 0,52	azul	30
2	0,52 - 0,60	verde	30
3	0,63 - 0,69	vermelha	30
4	0,76 - 0,90	infraverm. prox.	30
5	1,55 - 1,75	infraverm. médio	30
6	10,4 - 12,5	infraverm. termal	120
7	2,08 - 2,35	infraverm. médio	30

Tabela 6. Bandas Espectrais do High Resolution Visible scanner (HRV) / SPOT			
<b>Banda</b>	<b>Comprimento de Onda (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Nome da banda</b>	<b>Resolução (m)</b>
pancromática	0,51 - 0,73	visível	10
1	0,50 - 0,59	verde	20
2	0,61 - 0,68	vermelha	20
3	0,79 - 0,89	infraverm. prox.	20



## Apêndice B. Rede de Estações de Recepção de Dados do Satélite SPOT

### RED DE ESTACIONES DE RECEPCION DE DATOS

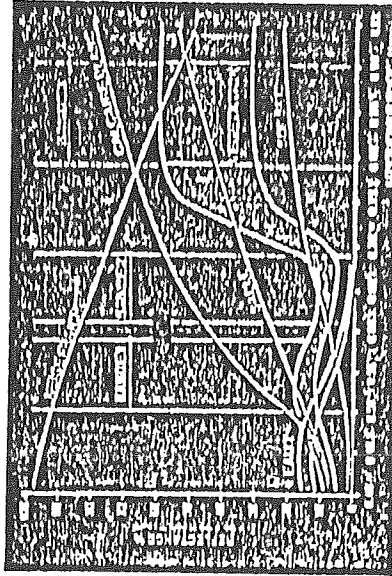


En rojo las estaciones en operación - En azul las estaciones previstas.

ESTACIONES QUE OPERAN		
LUGAR	PAIS	ORGANISMO
Prince-Albert	Canadá	CCRS
Gatineau	Canadá	
Hyderabad	India	NRSA ...
Maspalomas	España	ESA
Cuiaba	Brasil	INPE
Lad Krabang	Thailandia	NRCT
Hatoyama	Japón	NASDA

ESTACIONES CUYO FUNCIONAMIENTO ESTÁ PREVISTO A PARTIR DE 1989		
LUGAR	PAIS	ORGANISMO
Islamabad	Pakistán	SUPARCO
Pretonia	Africa del Sur	CSIR
Riyadh	Arabia Saudita	KACST
Beijing	China	SSTC
Alice Springs	Australia	NATMAP

## Apêndice C. Poder de Discriminação das Bandas do Satélite SPOT



### Poder discriminatório

Para cada uno de los instrumentos de tomas de vista, se eligieron dos bandas en el campo visible (verde y rojo) y una en el cercano infrarrojo, especialmente para permitir el reconocimiento de las especies vegetales.