



Ministério da
Ciência e Tecnologia



INPE-15780-TDI/1523

ESTUDO DE FITOFISIONOMIAS DE CERRADO COM DADOS DE SENSOR HYPERION/EO-1

Alana Almeida de Souza

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelos Drs. Lênio Soares Galvão e João Roberto dos Santos, aprovada em
20 de maio de 2009.

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/03.24.13.43>>

INPE
São José dos Campos
2009

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3945-6911/6923

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO:

Presidente:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Membros:

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Haroldo Fraga de Campos Velho - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Jefferson Andrade Ancelmo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Simone A. Del-Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Marilúcia Santos Melo Cid - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Viveca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
Ciência e Tecnologia



INPE-15780-TDI/1523

ESTUDO DE FITOFISIONOMIAS DE CERRADO COM DADOS DE SENSOR HYPERION/EO-1

Alana Almeida de Souza

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelos Drs. Lênio Soares Galvão e João Roberto dos Santos, aprovada em
20 de maio de 2009.

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/03.24.13.43>>

INPE
São José dos Campos
2009

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

S89e Souza, Alana Almeida de.
Estudo de fitofisionomias de cerrado com dados de sensor Hyperion/EO-1 / Alana Almeida de Souza. – São José dos Campos : INPE, 2009.
117p. ; (INPE-15780-TDI/1523)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009.

Orientadores : Drs. Lênio Soares Galvão e João Roberto dos Santos.

1. Cerrado. 2. Hyperion/EO-1. 3. Sensoriamento remoto hiperespectral. 4. Support Vector Machine (SVM). I.Título.

CDU 528.8:581.5

Copyright © 2009 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita da Editora, com exceção de qualquer material fornecido especificamente no propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2009 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming or otherwise, without written permission from the Publisher, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

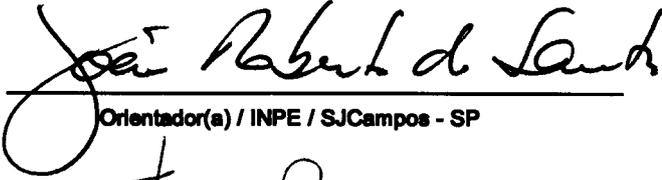
Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de Mestre em
Sensoriamento Remoto

Dr. Lênio Soares Galvão



Presidente / Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. João Roberto dos Santos



Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Flávio Jorge Ponzoni



Membro da Banca / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Edson Eyji Sano



Convidado(a) / EMBRAPA / CRAC / Brasília - DF

Dr. Alvaro Penteado Crósta



Convidado(a) / UNICAMP / Campinas - SP

Aluno (a): Alana Almeida de Souza

São José dos Campos, 20 de maio de 2009

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores, Dr. Lênio Soares Galvão e Dr. João Roberto dos Santos, pela impecável orientação, apoio e incentivo em todas as etapas dessa pesquisa, pelo crescimento profissional proporcionado, pela amizade e confiança em meu trabalho;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos concedida;

Ao INPE pelo apoio logístico;

Ao Sr. José Ferreira Paixão, da Embrapa Cerrados, pelo apoio na fase de campo e identificação das espécies no levantamento florístico realizado;

Ao Msc. Alejandro Alvarado Peccinini, da Agência Ambiental de Goiás, e ao “Bugre”, também pelo apoio na fase de campo;

À Dra. Lorryne de Barros Bosquetti, da Faculdade de Ciências e Tecnologia de Unaí (FACTU), pela troca de informações a respeito da área de estudo e sobre possíveis colaboradores na fase de campo;

Ao Dr. Edson Eyji Sano, da Embrapa Cerrados, por ter disponibilizado o mapeamento da vegetação do Cerrado realizado pelo PROBIO referente à minha área de estudo;

À Dra. Maria Silvia Pardi Lacruz, do Centro Regional Sul do INPE (Santa Maria), pela contribuição na utilização do programa SVS;

Ao Dr. Márcio de Morisson Valeriano por ter disponibilizado os dados do projeto TOPODATA da área de estudo e a doutoranda Polyanna da Conceição Bispo pela ajuda na manipulação desses dados;

Ao corpo docente do curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto do INPE por todos os ensinamentos e troca de experiências na área;

À Dra. Luciana Spinelli Araújo pelas conversas e discussões acerca dos resultados;

A todos da minha família, em especial aos meus pais, que sempre me apoiaram e sem os quais eu não teria chegado até aqui;

Ao meu namorado, Fabinho, que sempre me incentiva, quer com suas palavras quer com suas atitudes perante o trabalho;

À Izabel Cristina, Tereza Satiko e Camila dos Anjos, pela amizade e harmonioso lar em São José dos Campos;

Muito obrigada!

RESUMO

O estudo das fitofisionomias de Cerrado via sensoriamento remoto constitui-se de um constante desafio investigativo em razão da diversidade florística e estrutural existente, das variações fenológicas perante o regime de chuvas, de sua inter-relação com outros biomas nos contatos sutis e, ainda, pela ocorrência de queimadas e seus efeitos. Essas características tornam as tipologias muitas vezes indistinguíveis em imagens multiespectrais. Nesse sentido, o advento de sensores imageadores hiperespectrais, por adquirirem imagens em um grande número de bandas estreitas e contíguas no espectro eletromagnético, constitui uma nova possibilidade para o estudo desse bioma. Assim, o presente estudo objetivou a utilização de dados hiperespectrais do sensor Hyperion/ EO-1 para a análise espectral, estimativa de parâmetros biofísicos e para a discriminação de fitofisionomias do bioma Cerrado na região de Pirenópolis (GO). As fitofisionomias estudadas foram: Mata Seca Semidecídua, Cerradão, Cerrado denso, Cerrado típico, Cerrado ralo, Cerrado rupestre, Campo Sujo e Campo Limpo. Inicialmente, as fitofisionomias foram caracterizadas florística e estruturalmente em campo. A análise espectral das fitofisionomias foi feita com base na técnica por componentes principais e na inspeção visual de espectros. A estimativa dos parâmetros biofísicos (porcentagem de cobertura do dossel e área basal) se baseou na reflectância das bandas, nos índices de vegetação e em todas as possíveis razões de bandas calculadas dos dados do Hyperion como variáveis independentes em modelos de regressão simples. Para a discriminação das fitofisionomias foram testados três classificadores: *Support Vector Machine* (SVM), Máxima Verossimilhança (MAXVER) e *Spectral Angle Mapper* (SAM). Os resultados obtidos permitiram concluir que a similaridade estrutural das fitofisionomias se refletiu na similaridade espectral das mesmas e na confusão das classes nas classificações. A banda em 680 nm, associada com a absorção pela clorofila, foi a que apresentou melhores correlações com a área basal ($R^2 = 0,63$) e com a porcentagem de cobertura do dossel ($R^2 = 0,91$). Contudo, as transformações espectrais (índices de vegetação e razões de bandas) apresentaram melhores resultados ($R^2 \geq 0,75$). Dentre as transformações espectrais que se mostraram importantes na estimativa dos parâmetros biofísicos analisados, estão as relacionadas à borda vermelha, aos pigmentos foliares e ao teor de água das folhas. A classificação SVM linear foi a que apresentou melhores resultados na discriminação das fitofisionomias, com 59,90% dos pixels corretamente classificados. As classes que foram mais bem discriminadas foram Mata Seca, Cerradão, Cerrado denso e Cerrado rupestre. As classes Campo Sujo, Campo Limpo e Cerrado ralo não tiveram boa separabilidade entre elas com nenhuma das técnicas de classificação testadas.

STUDY OF CERRADO PHYSIOGNOMIES WITH HYPERION/EO-1 DATA

ABSTRACT

The study of the Brazilian savanna physiognomies (*Cerrado*) using remote sensing data is still a challenge due to floristic and structural diversity, variation in phenological response to precipitation, relationships with other biomes in the transition zones, and to fire and resultant effects. Because of these factors, some physiognomies are not separable in multispectral images. In this context, the advent of hyperspectral remote sensing, with imaging spectrometers that acquire images in a great number of contiguous and narrow bands in the electromagnetic spectrum, provides new possibilities for the study of this biome. The objective of this investigation was to use hyperspectral Hyperion/EO-1 data for spectral analysis, biophysical parameter estimates and for the discrimination of the *Cerrado* physiognomies in a study area located in the vicinity of Pirenópolis (GO). The studied physiognomies were: *Mata Seca Semidecídua*, *Cerradão*, *Cerrado denso*, *Cerrado típico*, *Cerrado ralo*, *Cerrado rupestre*, *Campo Sujo* and *Campo Limpo*. Field survey for floristic and structural characterization was performed. Spectral analysis included principal components and inspection of pixel spectra. Simple linear regression was applied to band reflectance values, vegetation indices and all possible Hyperion reflectance ratios to estimate biophysical parameters (% canopy cover and basal area). Support Vector Machine (SVM), Maximum Likelihood and the Spectral Angle Mapper (SAM) classification techniques were tested for the discrimination of the physiognomies. Results showed that the structural similarity of the physiognomies produced an equivalent spectral pattern, which explained misclassification of some classes. The chlorophyll red band at 680 nm presented the best correlations with basal area ($R^2 = 0.63$) and with % canopy cover ($R^2 = 0.91$). However, spectral transformations (narrow band vegetation indices and reflectance ratios) showed better results ($R^2 \geq 0.75$). Among the most important spectral transformations for biophysical parameters estimates, vegetation indices associated with the red edge, leaf pigments and leaf water content presented the best results. Linear SVM was the best classification technique with overall classification accuracy of 59.90%. *Mata Seca*, *Cerradão*, *Cerrado denso* and *Cerrado rupestre* were discriminated. On the other hand, *Campo Sujo*, *Campo Limpo* and *Cerrado ralo* did not present good discrimination to each other with the three tested classification techniques.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1. INTRODUÇÃO	20
1.1 Contexto e justificativa.....	20
1.2. Hipóteses de trabalho	22
1.3 Objetivo geral	23
1.4 Objetivos específicos.....	23
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	24
2.1 Reflectância espectral da vegetação	24
2.2 Sensoriamento remoto hiperespectral.....	27
2.2.1 O sensor Hyperion/EO-1	28
2.2.2 Sensoriamento remoto hiperespectral no estudo de parâmetros bioquímicos e biofísicos da vegetação.....	29
2.3 Análise por componentes principais (ACP)	30
2.4 Classificação <i>support vector machine</i> (SVM).....	31
2.4.1 Formulação matemática.....	33
2.4.2 SVM multiclases	36
2.5 Classificação por máxima verossimilhança (MAXVER).....	36
2.6 Classificação <i>spectral angle mapper</i> (SAM).....	37
3. ÁREA DE ESTUDO.....	40
4. MATERIAIS E MÉTODOS	42
4.1. Seleção da área de estudo	42
4.2 Aquisição da imagem Hyperion/EO-1	43
4.3 Pré-processamento.....	44
4.3.1 Remoção dos <i>stripes</i>	44
4.3.2 Correção Atmosférica.....	44
4.3.3 Suavização do Ruído na Imagem Reflectância de Superfície	45
4.3.4 Correção Geométrica.....	45
4.4 Caracterização florística e estrutural das fitofisionomias.....	46
4.4.1 Inventário.....	46
4.4.2 Estimativa da porcentagem de cobertura do estrato arbóreo e arbustivo-herbáceo das fitofisionomias.....	47
4.4.3 Análise da estrutura e similaridade florística das fitofisionomias.....	48
4.5 Caracterização espectral das fitofisionomias.....	50
4.6 Relações entre parâmetros biofísicos e espectrais.....	50
4.7 Classificação das imagens	53
4.8 Análise integrada dos resultados com o MDE.....	55
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	56

5.1 Caracterização florística e estrutural das fitofisionomias.....	56
5.1.1 Formações Florestais	57
5.1.2 Formações Savânicas.....	60
5.1.3 Formações Campestres	64
5.1.4 Similaridade florística entre as parcelas	66
5.2 Caracterização espectral das fitofisionomias.....	69
5.3 Relações entre parâmetros biofísicos e espectrais.....	75
5.3.1 Bandas isoladas	75
5.3.2 Razões de bandas.....	77
5.3.3 Índices de vegetação.....	81
5.4 Classificações das imagens.....	86
5.5 Análise integrada dos resultados com o MDE.....	92
6. CONCLUSÕES.....	96
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100
APÊNDICE A - Famílias e espécies identificadas no levantamento florístico das fitofisionomias	110
APÊNDICE B - Fotografias de campo.....	107

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 – Curva de absorção de pigmentos vegetais.....	25
2.2 – Reflectância de constituintes das plantas.....	27
2.3 - Hiperplano para dados linearmente separáveis. A linha pontilhada passa.....	34
2.4 – Hiperplano para dados não separáveis linearmente.....	35
2.5 – SVM não linear.....	35
2.6 - Distância angular entre um espectro de referência e espectros de teste em um espaço de atributos bidimensional. O ângulo α entre o espectro de referência e o espectro de teste (a) define a semelhança espectral no conceito <i>SAM</i> . O ângulo máximo $\alpha_{\text{máx}}$ que separa os espectros de teste de um ou mais espectros de referência é estabelecido como critério para inclusão ou exclusão de classe (b)...	38
4.1 - Fluxograma da metodologia de trabalho.....	42
4.2 – Localização da área de estudo e composição colorida cor-verdadeira com as bandas do Hyperion/EO-1 centradas em 640 nm (R), 548 nm (G) e 457 nm (B)..	43
4.3 – Exemplo de remoção dos <i>stripes</i> . Banda em 457 nm: original (a) e após a remoção dos <i>stripes</i> (b).	44
5.1 - % Índice de valor de importância (IVI) das principais famílias encontradas na Mata Seca Semidecídua.....	58
5.2 - Parâmetros fitossociológicos das dez espécies de maior Índice de valor de importância (IVI) da Mata Seca Semidecídua.....	58
5.3- % Índice de valor de importância (IVI) das principais famílias encontradas no Cerradão.	59
5.4 - Parâmetros fitossociológicos das dez espécies de maior Índice de valor de importância (IVI) do Cerradão.	60
5.5 - % Índice de valor de importância (IVI) das principais famílias encontradas no Cerrado sentido restrito.	62
5.6 - Parâmetros fitossociológicos das dez espécies de maior Índice de valor de importância (IVI) do Cerrado sentido restrito.	63

5.7 - % Índice de valor de importância (IVI) das principais famílias encontradas no Campo Sujo.	65
5.8 - Parâmetros fitossociológicos das dez espécies de maior Índice de valor de importância (IVI) do Campo Sujo.....	65
5.9 - Dendrograma obtido a partir do índice de Morisita. Método de ligação: UPGMA. (MS- Mata Seca; Cdão- Cerradão; Cds- Cerrado denso; Ct- Cerrado típico; Crl- Cerrado ralo; CaS- Campo Sujo).....	68
5.10 - Curva dos autovetores E1 e E2 obtidas a partir da ACP de espectros Hyperion.	69
5.11 - Diagrama de espalhamento dos escores CP1 e CP2 correspondentes às fitofisionomias de cerrado estudadas.....	70
5.12 – Diagramas-perfil e espectros de reflectância das fitofisionomias florestais (a) Mata Seca Semidecídua e (b) Cerradão.....	71
5.13- Diagramas-perfil e espectros de reflectância das fitofisionomias savânicas (a) Cerrado Denso; (b) Cerrado Típico; (c) Cerrado Ralo; e (d) Cerrado Rupestre. ...	72
5.14 – Diagrama-perfil e espectros de reflectância das fitofisionomias campestres (a) Campo Sujo e (b) Campo Limpo. O diagrama-perfil não foi apresentado em (b), pois essa fitofisionomia não teve indivíduos amostrados pelo critério de inclusão estabelecido.	73
5.15 - Coeficientes de correlação para a relação da reflectância das bandas Hyperion com a porcentagem de cobertura do dossel e a área basal das fitofisionomias.	75
5.16- Relações entre área basal, expressa em m ² /parcela, e reflectância em 680 nm, expressa em %.	76
5.17 - Relações entre a porcentagem de cobertura do dossel e a reflectância em 680 nm.	77
5.18 - Correlações entre as razões de bandas do sensor Hyperion e a área basal das fitofisionomias.	78
5.19 – Relações entre valores de área basal (m ² /parcela) e diferentes razões de bandas.	79
5.20 - Correlações entre as razões de bandas do sensor Hyperion e a porcentagem de cobertura do dossel das fitofisionomias.	80

5.21- Relações entre valores de porcentagem de cobertura do dossel e diferentes razões de bandas.	81
5.22 – Relações da área basal (m ² /parcela) com os índices de vegetação (a) VOG; (b) VIG; (c) SR; (d) VARI.	83
5.23 - Relações da porcentagem de cobertura do dossel com os índices de vegetação (a) NDWI; (b)NDVI; (c) ARVI; (d) VARI.....	85
5.24 – (a) Composição falsa-cor com as bandas do Hyperion posicionadas em 864 nm (R), 1648 nm (G) e 640 nm (B). Os resultados das classificações SVM linear, MaxVer e SAM são mostrados em (b), (c) e (d), respectivamente. As classes que não foram objeto do presente estudo foram mascaradas em branco.	90
5.25 – Acurácia total da classificação SVM aplicada nos dados do Hyperion e nos dados simulados dos sensores a bordo dos satélites Quickbird (câmera multiespectral), SPOT 5 (HRVIR) e Landsat 7 (ETM ⁺).	91
5.26 – (a) Composição falsa-cor da região central da área de estudo com as bandas do Hyperion posicionadas em 864 nm (R), 1648 nm (G) e 640 nm (B); (b) classificação SVM; (c) estimativa da porcentagem de cobertura do dossel estimada a partir dos dados de NDVI projetados no MDE com exagero vertical de 5.	93
5.27 – (a) Imagem Hyperion demonstrando a localização dos transectos AB e CD; (b) Porcentagem de cobertura do dossel e altitude correspondente ao transecto CD; (c) Porcentagem de cobertura do dossel e altitude correspondente ao transecto AB. .	94
5.28 – Diagrama de espalhamento da porcentagem de cobertura do dossel e elevação de amostras da vegetação na área de estudo.....	89

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Pigmentos foliares e suas absorções máximas.....	25
4.1 - Índices de vegetação utilizados no presente estudo.....	52
4.2 - Parâmetros utilizados na classificação SVM.....	53
4.3 - Número de amostras de treinamento e validação utilizadas.....	53
4.4 - Bandas simuladas (nm) da câmera multiespectral do satélite Quickbird e dos sensores HRVIR/SPOT 5 e ETM ⁺ /Landsat 7.....	55
5.1 - Parâmetros estruturais e florísticos da Mata Seca Semidecídua (MS), Cerradão (Cdão), Cerrado sentido restrito (Csr) e Campo Sujo (CaS).....	
5.2 - Tabela comparativa entre áreas de Cerrado sentido restrito estudadas com o mesmo método do presente estudo, com respectivos números de espécies, densidade e área basal por hectare, índice de diversidade de Shannon (H') e equabilidade (J').....	63
5.3 - Coeficiente de correlação de Pearson (<i>r</i>) para as relações entre os índices de vegetação e a área basal das fitofisionomias.....	82
5.4 - Coeficiente de correlação de Pearson (<i>r</i>) para a relação entre os índices de vegetação e a porcentagem de cobertura do dossel das fitofisionomias.....	84
5.5 - Acurácia total e índice Kappa obtidos com os diferentes kernels.....	86
5.6 - Matriz de confusão do SVM linear (expressa em porcentagem).....	87
5.7 - Acurácia total da classificação SVM Linear com diferentes valores de C.....	88
5.8 - Matriz de confusão do MaxVer (expressa em porcentagem).....	89
5.9 - Matriz de confusão do SAM (expressa em porcentagem).....	89

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

- ACP - Análise por Componentes Principais
- APA - Área de Proteção Ambiental
- ARI - *Anthocyanin Reflectance Index*
- ARVI - *Atmospherically Resistant Vegetation Index*
- AVIRIS - *Airborne Visible/InfraRed Imaging Spectrometer*
- CaL – Campo limpo
- CAP - Circunferência à altura do peito
- CAS – Circunferência a 30 cm de altura do solo
- CaS – Campo sujo
- Cds – Cerrado denso
- CP – Componentes Principais
- CRI - *Carotenoid Reflectance Index*
- CrI – Cerrado ralo
- Crr – Cerrado rupestre
- Csr – Cerrado sentido restrito
- Ct – Cerrado típico
- D - Índice de Simpson (D)
- DA - Densidade absoluta
- DoA - Dominância absoluta
- DoR - Dominância relativa
- DR - Densidade relativa
- EO-1 – *Earth Observing One*
- EVI - *Enhanced Vegetation Index*
- FA - Frequência absoluta
- FLAASH - *Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*
- FR - Frequência relativa
- GPS – *Global Position Satellite*
- H' - Índices de Shannon
- IVI - Índice de valor de importância

J' - Equabilidade de Pielou
MAXVER - Máxima Verossimilhança
MDE - Modelo Digital de Elevação
MNF - *Minimum Noise Fraction*
MODTRAN - *Moderate Resolution Transmittance Code*
MS – Mata Seca Semidecídua
MSI - *Moisture Stress Index*
NASA - *National Aeronautics and Space Administration*
NDII - *Normalized Difference Infrared Index*
NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index*
NDWI - *Normalized Difference Water Index*
PRI - *Photochemical Reflectance Index*
PSRI - *Plant Senescence Reflectance Index*
RENDVI - *Red Edge Normalized Difference Vegetation Index*
REPI - *Red Edge Position Index*
SAM – *Spectral Angle Mapper*
SNR – relação sinal-ruído
SIPI - *Structure Insensitive Pigment Index*
SR - *Simple Ratio*
SVM – *Support Vector Machine*
SVS - *Stand Visualization System*
SWIR - *shortwave infrared*
UPGMA – *Unweighted Pair Groups Method using Arithmetic Averages*
VARI - *Visible Atmospherically Resistant Index*
VIG - *Visible Green Index*
VNIR - visível e infravermelho próximo
VOG - *Vogelmann Red Edge Index*
WBI - *Water Band Index*

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contexto e justificativa

O bioma Cerrado ocupa cerca de 25% do território brasileiro e constitui um dos maiores e mais ricos ambientes de savana do mundo. Devido à alta diversidade biológica e à forte ameaça pelas pressões antrópicas, o bioma é considerado um dos 25 “*hotspots*” do mundo (MYERS et al., 2000). Os tipos fisionômicos existentes incluem formações florestais, savânicas e campestres, as quais se distribuem em forma de mosaicos, influenciadas por variações ambientais. Cada uma dessas formações inclui ainda diversas fitofisionomias. No presente estudo, as formações florestais incluem o Cerradão e a Mata Seca Semidecídua; as formações savânicas incluem o Cerrado sentido restrito, o qual se diferencia em Cerrado ralo, Cerrado denso, Cerrado típico e Cerrado rupestre; e as formações campestres incluem o Campo Limpo e o Campo Sujo. Há diferenciações florísticas e estruturais entre as fitofisionomias do bioma. No entanto, há também diferenciações florísticas em uma mesma fitofisionomia. Em geral, essas diferenças estão vinculadas às características fisiográficas, tais como a topografia, disponibilidade hídrica, profundidade, textura e disponibilidade de nutrientes do solo. Outros fatores, tais como a estacionalidade climática e o fogo, também estão entre os principais responsáveis pelos padrões e processos nas comunidades do Cerrado (FELFILI e SILVA JÚNIOR, 2005; FELFILI et al., 2005).

O estudo dos cerrados com o uso de dados de sensoriamento remoto constitui um constante desafio investigativo em razão da variabilidade fisionômico-estrutural existente, de suas características fenológicas perante o regime de chuvas, de sua inter-relação com outros biomas nos contatos sutis, e, ainda, pela ocorrência de queimadas e de seus efeitos subsequentes. Isso torna difícil a discriminação das tipologias (MANTOVANI e PEREIRA, 1998; FERREIRA et al., 2003; FERREIRA et al., 2004; SANO e FERREIRA, 2005). Essa dificuldade muitas vezes pode ocorrer devido ao limitado número de bandas e amplos intervalos espectrais em que operam os sensores multiespectrais, o que faz com que parte da informação sobre a reflectância espectral da vegetação deixe de ser registrada.

O conhecimento sobre a reflectância espectral das fitofisionomias de Cerrado é de fundamental importância na caracterização e na discriminação das mesmas por meio de imagens de sensoriamento remoto. Neste sentido, o advento de sensores hiperespectrais constitui um grande avanço para o entendimento sobre o processo de interação entre a radiação eletromagnética e a cobertura vegetal. Contudo, dados de alta resolução espectral (hiperespectrais) têm sido pouco testados em ambientes de savanas.

As principais aplicações do sensoriamento remoto hiperespectral em estudos de vegetação focalizam a identificação de espécies ou tipos de vegetação e a estimativa de seus constituintes bioquímicos (e.g., conteúdo de clorofila, teor de água) e biofísicos (e.g., índice de área foliar, porcentagem de cobertura), conforme visto nos trabalhos de Gao e Goetz (1995), Treitz e Howarth (1999), Huete et al. (2002), Clark et al. (2005), Kalacska et al. (2007), dentre outros.

A estimativa de parâmetros bioquímicos e biofísicos constitui um elemento chave para o monitoramento da vegetação, pois permite determinar seu estado fenológico e sua fitossanidade, servindo como bioindicadores de estresse. Além disso, Houborg et al. (2007) destacaram que essas estimativas, ao definirem o *status* da vegetação, constituem importantes *inputs* em modelos que quantificam a troca de energia e matéria entre a superfície terrestre e a atmosfera.

A identificação/ mapeamento de fitofisionomias tem sido feita principalmente por meio da utilização de técnicas de classificação supervisionada e não-supervisionada. Contudo, em dados hiperespectrais, muitos dos classificadores são afetados pelo efeito Hughes, ou seja, para uma quantidade de amostras de treinamento fixa, a acurácia da classificação em função do número de bandas atinge um máximo e depois declina. A fim de minimizar esse problema, normalmente é realizada uma etapa de seleção/extração de atributos antes do treinamento do classificador com o objetivo de diminuir a dimensionalidade dos dados. A técnica *Support Vector Machine* (SVM) foi proposta recentemente como um método eficiente de classificação supervisionada que apresenta baixa sensibilidade ao efeito Hughes, apresentando excelentes resultados na classificação de imagens hiperespectrais em termos de acurácia e robustez (HUANG et

al, 2002; PAL e MATHER, 2004; 2006). Na classificação SVM, a razão entre o número de amostras de treinamento e a dimensionalidade dos dados não representa um problema, pois sua estratégia de classificação não requer a estimativa da distribuição estatística das classes a serem discriminadas.

Nesse contexto, os dados hiperespectrais e as técnicas disponíveis para sua análise constituem uma nova possibilidade como ferramenta para o estudo do Cerrado, podendo contribuir para uma melhor caracterização e discriminação das fitofisionomias do bioma quando comparado com os dados multiespectrais. Segundo Almeida e Souza Filho (2004), ao utilizarem dados do sensor aerotransportado AVIRIS (*Airborne Visible/InfraRed Imaging Spectrometer*), dados hiperespectrais fornecem índices espectrais específicos que são úteis no estudo do cerrado brasileiro. Apesar do sensor Hyperion/EO-1 possuir uma relação sinal/ruído muito inferior a de sensores aerotransportados como o AVIRIS, o que tem implicações para a correta identificação de materiais na cena e para classificação de tipos de vegetação, este sensor tem sido bastante utilizado para testar a tecnologia hiperespectral para diferentes aplicações no mundo. Portanto, estudos no cerrado com este sensor são necessários.

1.2. Hipóteses de trabalho

- 1) As fitofisionomias de Cerrado podem ser discriminadas com dados hiperespectrais do sensor Hyperion/EO-1 e com a técnica de classificação SVM.
- 2) Existem relações empíricas entre índices de vegetação de bandas estreitas e parâmetros biofísicos das fitofisionomias de Cerrado.
- 3) A distribuição espacial de algumas fitofisionomias de Cerrado está condicionada a determinadas características fisiográficas, as quais podem ser indiretamente relacionadas com a altitude do terreno.

1.3 Objetivo geral

Utilizar os dados do sensor Hyperion/EO-1 para estudar as seguintes fitofisionomias de Cerrado: Mata Seca Semidecídua, Cerradão, Cerrado denso, Cerrado típico, Cerrado ralo, Cerrado rupestre, Campo Sujo e Campo Limpo.

1.4 Objetivos específicos

- a) Caracterizar florística e estruturalmente as fitofisionomias de Cerrado existentes na região de Pirenópolis a partir de informações de campo;
- b) Avaliar o desempenho dos dados do Hyperion e do classificador SVM para discriminar as fitofisionomias do Cerrado;
- c) Analisar a relação entre parâmetros biofísicos da vegetação (porcentagem de cobertura do dossel e área basal), estimados a partir de informações de campo, com parâmetros espectrais (bandas, razões de bandas e índices de vegetação de bandas estreitas) extraídos da imagem Hyperion;
- e) Analisar a influência da topografia sobre a distribuição espacial das fitofisionomias e seus parâmetros biofísicos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Reflectância espectral da vegetação

O conhecimento sobre o comportamento espectral da vegetação, mais especificamente sua reflectância espectral, assim como aspectos relacionados aos tipos de produtos de sensoriamento remoto (e.g., escala, resolução espacial, espectral), é fundamental para a correta extração de informação de imagens. O termo comportamento espectral da vegetação é frequentemente utilizado para representar as características de reflectância da radiação eletromagnética pelas folhas, plantas individuais e conjunto de plantas, embora a caracterização do comportamento espectral de um alvo esteja associada aos processos de reflexão, transmissão e absorção (PONZONI, 2001).

Os estudos envolvendo a reflectância espectral de dosséis têm sido, na sua maioria, motivados pela necessidade de se relacionar os níveis de cinza das imagens às diferentes tipologias vegetais e seus parâmetros biofísicos e bioquímicos. Isto pode ser feito desde que a natureza da alteração da radiação por parâmetros da vegetação e fatores ambientais seja entendida e especificada (GOEL, 1988).

Segundo Goel (1988), a radiação detectada pelos sensores é função de parâmetros da fonte de radiação, atmosfera, dossel, solo e parâmetros do próprio sensor. Assim, o que é medido efetivamente por um sensor remoto oriundo de um dossel vegetal não pode ser explicado somente pelas características intrínsecas desse dossel.

Na região do visível (400-700 nm), os espectros de reflectância da vegetação são caracterizados pela baixa reflectância devido à forte absorção por pigmentos foliares (Figura 2.1). A Tabela 2.1 mostra os comprimentos de onda onde a absorção pelos principais pigmentos encontrados nas plantas superiores é máxima. Embora todos os pigmentos apresentem forte absorção no azul, a clorofila tende a dominar a resposta espectral nessa região do espectro por ser o pigmento mais abundante (BELWARD, 1991).

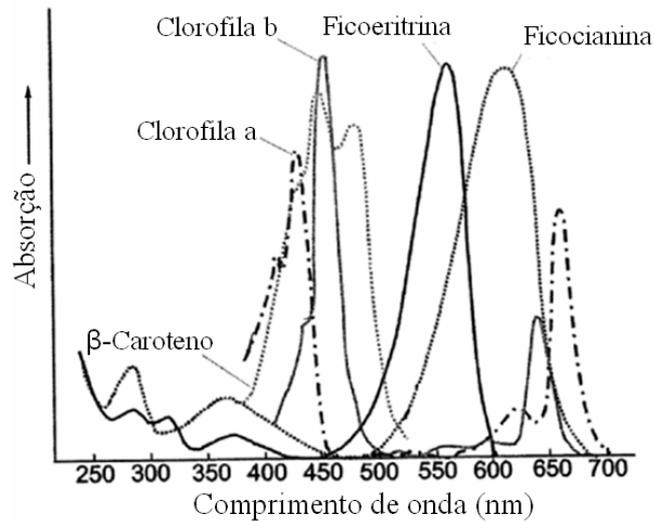


Figura 2.1 – Curva de absorção de pigmentos vegetais.
 Fonte: Adaptada de Kumar et al. (2001).

Tabela 2. 1- Pigmentos foliares e suas absorções máximas.

Tipo de pigmento	Absorção máxima (nm)
clorofila a	420, 490, 660
clorofila b	435, 643,
β caroteno	425, 450, 480
α caroteno	420, 440, 470
xantófila	425, 450, 475

Fonte: Adaptada de Kumar et al. (2001).

Durante a senescência foliar, a clorofila se degrada mais rapidamente do que os carotenóides (SANGER, 1971 apud KUMAR, 2001). Assim, carotenos e xantofilas se tornam os pigmentos dominantes e as folhas ficam amareladas, pois esses pigmentos absorvem a luz azul e refletem a luz verde e vermelha. A combinação das cores verde e vermelha resulta na cor amarela.

A borda vermelha (*red edge*) é talvez a feição espectral mais estudada na curva da resposta espectral da vegetação e com maior sensibilidade ao estresse. Ela é o ponto de máxima inflexão entre a baixa reflectância no vermelho devido à absorção pela clorofila e a alta reflectância em torno de 800 nm associada com a estrutura interna das folhas e teor de água (KUMAR et al., 2001).

Na região do infravermelho próximo (700 a 1300 nm), as plantas apresentam alta reflectância e transmitância. Ao contrário do que ocorre nos comprimentos de onda do visível, no infravermelho próximo a radiação não possui energia suficiente para os processos fotoquímicos. A estrutura interna das folhas é o principal fator que controla a resposta espectral das plantas nessa região do espectro. A distribuição de espaços com ar e água, assim como o arranjo, o tamanho e a forma das células do mesófilo, influenciam a passagem da luz pelas folhas. Folhas com mesófilo compacto irão apresentar maior transmissão e menor espalhamento da radiação do que folhas com mesófilo mais lacunoso (GATES et al., 1965). E quanto maior a quantidade de folhas presentes no dossel, maior a reflectância da vegetação devido ao efeito de espalhamento múltiplo entre as camadas de folhas que compõem o dossel (BELWARD, 1991). Nessa região do espectro ocorrem feições de absorção associadas ao teor de água presente nas folhas em 970 e 1200 nm.

O infravermelho de ondas curtas (*shortwave infrared* – SWIR) é caracterizado pela presença de bandas de absorção de água e feições menos pronunciadas associadas a outros constituintes foliares, como celulose e lignina. A absorção pela água presente nas folhas ocorre em 1400, 1770 e 1900 nm. A celulose apresenta feições de absorção em 1220, 1480, 1930, 2280, 2340 e 2480 nm, enquanto a lignina absorve em 1450, 1680, 1930, 2050-2140, 2270, 2330, 2380 e 2500 nm (Figura 2.2). A vegetação seca apresenta feições diagnósticas de lignina-celulose em 2090 e 2300 nm (ELVIDGE, 1990).

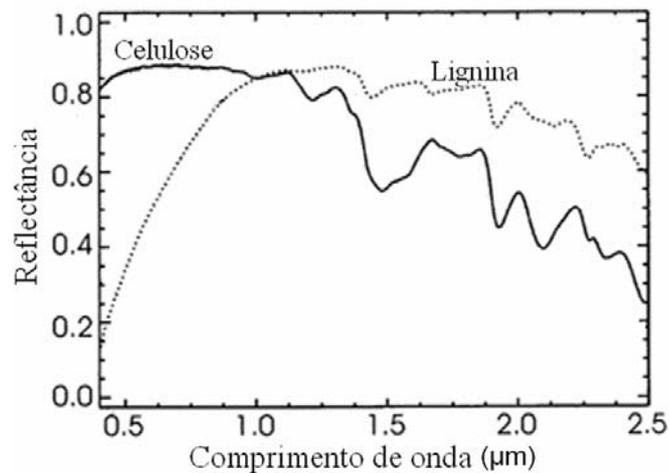


Figura 2.2 – Reflectância de constituintes das plantas.
 Fonte: Adaptada de Van der Meer (2001).

2.2 Sensoriamento remoto hiperespectral

Os sensores hiperespectrais medem a radiação refletida pelos alvos terrestres utilizando espectrômetros imageadores a bordo de plataformas aéreas ou orbitais. Em contraste com os sensores multiespectrais, a quantidade de informação registrada pelos espectrômetros hiperespectrais excede o requerido para diagnosticar muitas feições. Esse “excesso” de informação resulta da alta resolução espectral e ampla faixa do espectro em que operam esses instrumentos, o que permite identificar diferenças sutis entre as respostas espectrais dos alvos.

Não existe uma definição sobre quantas bandas são necessárias ou quão estreitas elas devem ser para que um sensor seja considerado hiperespectral, embora a maioria tenha dezenas a centenas de bandas contíguas com resolução espectral de 20 nm ou superior. Sendo assim, esses instrumentos fornecem informações de alta qualidade sobre a reflectância espectral de alvos, constituindo uma fonte de dados relativamente recente a ser utilizada em questões ambientais e de ciências da terra.

Embora os princípios de espectroscopia sejam bem conhecidos e os métodos de análise bem desenvolvidos, particularmente para espectros coletados em laboratório, a heterogeneidade de paisagens em estudos ambientais representa um grande desafio e oportunidade para a análise de imagens hiperespectrais (ASPINALL et al., 2002). Além

disso, o grande volume de dados gerado constitui um incentivo para o desenvolvimento de novas metodologias e algoritmos de análise.

No Brasil, diversos estudos utilizaram dados hiperespectrais gerados por diferentes sensores nas mais diversas aplicações. Exemplos incluem os trabalhos de Haertel e Landgrebe (1999), Ferri et al. (2004), Galvão et al. (2005; 2009), Numata et al. (2008) e, aplicados à agricultura; Shimabukuro et al. (2003) Ferreira et al. (2004) e Carvalho Jr. et al. (2005, 2003), Schramm e Vibrans (2007), em ambiente florestal; Crósta et al. (1998), Crósta e Souza Filho (2000) e Carvalho Jr. et al. (2007), aplicados à geologia e pedologia.

2.2.1 O sensor Hyperion/EO-1

O sensor Hyperion está a bordo do satélite *Earth Observing One* (EO-1) em uma órbita de 705 Km de altitude. A plataforma EO-1 foi lançada em 21 de novembro de 2000 e faz parte do “*New Millennium Program*” da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) para avaliar o desempenho das novas tecnologias e estratégias que visam melhorar a observação da Terra. O sensor continua adquirindo imagens sobre o Brasil até a presente data.

O Hyperion/ EO-1 é o primeiro sensor hiperespectral em nível orbital, adquirindo dados de 400 a 2500 nm em bandas estreitas e contíguas de 10 nm de resolução espectral e 30 m de resolução espacial. O sistema opera por varredura “*pushbroom*” e contém um único telescópio e dois espectrorradiômetros imageadores: um operando no visível e infravermelho próximo (VNIR) e o outro no SWIR. Um filtro dicróico direciona as bandas de 400 a 1000 nm para um espectrorradiômetro e as bandas de 900 a 2500 nm, para o outro. Os espectrorradiômetros se sobrepõem de 900 a 1000 nm, permitindo a intercalibração entre eles. A largura da faixa imageada é de 7,7 Km. Cada cena possui 242 bandas, das quais 196 são radiometricamente calibradas. Os dados são quantificados em 16 bits (UNGAR et al., 2003).

Segundo Galvão et al. (2005), o uso do sensor Hyperion possibilita a aquisição de dados com resolução espectral suficiente para reconstruir bandas de absorção nos espectros

dos pixels relacionadas com o conteúdo de clorofila, teor de água nas folhas e feições de lignina e celulose, as quais podem ser parâmetros importantes na diferenciação de tipologias vegetais. Por outro lado, a pobre relação sinal-ruído (SNR) do sensor, especialmente no SWIR, é um obstáculo para a medição adequada dessas feições sem a interferência de ruídos.

2.2.2 Sensoriamento remoto hiperespectral no estudo de parâmetros bioquímicos e biofísicos da vegetação

Atualmente, tem havido um crescente interesse em medidas de parâmetros biofísicos e bioquímicos da vegetação via sensoriamento remoto, a fim de diagnosticar e estimar a fitossanidade dos diversos ecossistemas. Dentre as aplicações dessas estimativas podemos citar a avaliação do estágio sucessional, estado fenológico, condição hídrica, fitossanidade e suscetibilidade ao fogo da vegetação (GAO e GOETZ, 1995; TREITZ e HOWARTH, 1999; HUETE et al, 2002; KALACSKA et al., 2007).

As imagens hiperespectrais, em conjunto com as técnicas disponíveis de análise, podem fornecer dados para quantitativamente estimar características fenológicas e estruturais da vegetação. A abordagem mais comum para esse fim é a abordagem estatística. Técnicas estatísticas são utilizadas para encontrar uma relação entre parâmetros do alvo (parâmetros medidos *in situ*, tais como área basal, por exemplo) e sua reflectância espectral ou transformações de reflectância (e.g., índices de vegetação).

Os índices de vegetação são um dos dados mais utilizados no monitoramento sazonal e inter-anual de parâmetros fisiológicos e estruturais dos diferentes ecossistemas. Eles consistem em transformações, lineares ou não, de bandas espectrais designadas para realçar a contribuição de propriedades de interesse da vegetação.

Além de realçarem propriedades de interesse da vegetação, os índices de vegetação minimizam a variabilidade espectral devido a fatores como iluminação, condições atmosféricas, influência do solo e distribuição do ângulo das folhas que compõem o dossel (PONZONI e SHIMABUKURO, 2007). Existem diversos índices de vegetação

publicados na literatura, mas somente uma parte deles têm significado físico ou foram sistematicamente testados.

Com o advento dos sensores hiperespectrais surgiu um novo grupo de índices espectrais que incluem bandas estreitas, permitindo a detecção de propriedades específicas da vegetação com maior acurácia. A importância desses índices e sua superioridade em quantificar propriedades bioquímicas e biofísicas da vegetação, quando comparados com índices espectrais utilizando bandas largas, têm sido demonstradas em muitos estudos (BLACKBURN, 1998; LEE et al., 2004; THENKABAIL et al., 2004; PU et al., 2005; TISOT et al., 2005; SCHLERF et al., 2005). Contudo, a maioria desses trabalhos foi conduzida em locais com vegetação homogênea, tais como florestas de coníferas e culturas agrícolas. Sendo assim, torna-se necessário a realização de estudos que verifiquem a aplicabilidade desses índices na estimativa de parâmetros estruturais da vegetação em dosséis heterogêneos, tais como os que ocorrem no Cerrado.

Exemplos de índices de vegetação que podem ser calculados a partir de dados hiperespectrais incluem: *Simple Ratio (SR)*, *Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI)*, *Red Edge Normalized Difference Vegetation Index (RENDVI)*, *Vogelmann Red Edge Index (VOG)*, *Red Edge Position Index (REPI)*, *Photochemical Reflectance Index (PRI)*, *Structure Insensitive Pigment Index (SIPI)*, *Plant Senescence Reflectance Index (PSRI)*, *Carotenoid Reflectance Index (CRI)*, *Anthocyanin Reflectance Index (ARI)*, *Water Band Index (WBI)*, *Normalized Difference Water Index (NDWI)*, *Moisture Stress Index (MSI)*, *Normalized Difference Infrared Index (NDII)*, *Enhanced Vegetation Index (EVI)*, *Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)*, *Visible Atmospherically Resistant Index (VARI)* e *Visible Green Index (VIG)*. Uma discussão resumida sobre esses índices, que podem ser calculados a partir do Hyperion, pode ser vista em Galvão et al. (2009).

2.3 Análise por componentes principais (ACP)

A ACP é uma técnica que vem sendo utilizada para reduzir a dimensionalidade dos dados e facilitar a interpretação de um grande número de espectros com um número

elevado de bandas (PALÁCIOS-ORUETA e USTIN, 1996; GALVÃO et al., 1997; FERREIRA et al., 2004).

O fundamento da ACP se baseia no fato de que, geralmente, as bandas em uma imagem hiperespectral (ou multiespectral) são altamente correlacionadas. Duas imagens são ditas correlacionadas quando, dada a intensidade de um pixel em uma delas, pode-se deduzir, com razoável aproximação, a intensidade do pixel correspondente na outra imagem, o que resulta em uma grande quantidade de informação redundante. Assim, a idéia da ACP é, a partir das bandas originais de uma imagem, gerar novas bandas descorrelacionadas entre si, chamadas componentes principais (CP), a partir de uma transformação de rotação dos eixos dos atributos.

O resultado da ACP é a transformação de p bandas espectrais correlacionadas em m variáveis descorrelacionadas, onde $m < p$. A definição dos novos eixos de atributos é obtida por meio da matriz de correlação entre as variáveis, a partir da qual os autovalores e autovetores são obtidos. Os autovalores representam o comprimento dos eixos das CP medidos em unidades de variância. Os autovetores definem a direção dos eixos das CP em relação ao sistema de coordenadas das imagens originais e representam a contribuição de cada banda original para as CP. Para uma descrição mais detalhada da ACP recomenda-se consultar Richards e Jia (2006).

2.4 Classificação *support vector machine* (SVM)

Conforme já citado anteriormente, dentre as dificuldades encontradas para o mapeamento do Cerrado com dados de sensoriamento remoto pode-se citar a variabilidade de fitofisionomias existentes, a sazonalidade da vegetação, a confusão espectral entre alguns alvos que compõem o Cerrado etc. Outro fator relevante a ser considerado no mapeamento do Cerrado é a escolha da abordagem metodológica adotada para o processamento das imagens. A escolha de métodos tradicionais de classificação de imagens, tais como MAXVER, distância média, K-médias ou Isodata, não funciona a contento para o caso específico desse bioma (SANO e FERREIRA, 2005). Para dados hiperespectrais, esses classificadores ainda apresentam o inconveniente de ser muito sensível ao efeito Hughes.

Uma abordagem relativamente recente e que tem se mostrado promissora para fins de classificação de imagens hiperespectrais é a técnica *Support Vector Machine* (SVM), a qual vem sendo utilizada em outros tipos de cobertura vegetal (HUANG et al., 2002; PAL, 2006; DASH et al., 2007). A abordagem SVM, proposta por Vapnik (1995), visa minimizar o risco estrutural ao invés de minimizar o risco empírico. O risco empírico minimiza o erro de classificação das amostras de treinamento, enquanto o erro estrutural minimiza a probabilidade de classificação errônea de um dado ponto, não visto previamente e escolhido aleatoriamente, com uma fixa, porém desconhecida, distribuição de probabilidade (PAL, 2006). A estratégia de classificação SVM explora o critério de margem “geométrica” entre classes, ou seja, não requer a estimativa da distribuição estatística das classes, e sim define o modelo de classificação explorando o conceito de maximização de margens.

O princípio básico da técnica é o de encontrar um hiperplano linear que melhor discrimina duas classes de interesse. Esse hiperplano está localizado no espaço de atributos n -dimensional entre as duas classes, de modo que uma dada classe fique localizada em um lado do hiperplano, e a outra classe, no outro. A distância entre cada classe e o hiperplano deve ser máxima. A definição do hiperplano se dá a partir da identificação das amostras de treinamento mais representativas de cada classe, chamadas vetores suporte. Esses vetores-suporte são os que estão mais próximos da superfície separadora entre as classes, constituindo um subconjunto das amostras de treinamento. Para os casos em que as amostras de treinamento não são linearmente separáveis, o método kernel é utilizado para simular uma projeção não-linear dos dados em um espaço de maior dimensionalidade (possivelmente infinito) onde as classes são separáveis.

Inicialmente, a técnica SVM foi elaborada para casos binários, ou seja, para discriminação entre duas classes. Existem diferentes estratégias para classificação multiclass utilizando combinações de classificadores binários. Dentre elas, destacam-se a abordagem “um contra um” e “um contra todos”. Uma descrição mais detalhada sobre a técnica será feita adiante.

A classificação SVM não sofre do efeito Hughes (ZHANG et al., 2001; MELGANI, 2004, PAL e MATHER, 2006) por explorar o critério de maximização de margens. Portanto, a razão entre o número de amostras de treinamento e a dimensionalidade dos dados não representa um problema. Esta é uma propriedade particularmente interessante para dados hiperespectrais, uma vez que o subconjunto de dados selecionado para redução da dimensionalidade pode não ser o mais adequado para a separação de pares de classes. Além disso, nos casos em que há mais do que duas classes a discriminar, a classificação multiestágio permite maior flexibilidade de utilização de variáveis e regras de decisão em cada etapa do classificador (JIA, 2005).

2.4.1 Formulação matemática

2.4.1.1 Dados linearmente separáveis

Classes linearmente separáveis constituem o caso mais simples de treinamento. Assumindo que k amostras de treinamento sejam representadas por $\{x_i, y_j\}$, $i = 1, \dots, k$, onde $x \in \mathbb{R}^n$ é um vetor n -dimensional e $y \in \{+1, -1\}$ são as classes, essas amostras de treinamento serão ditas linearmente separáveis se existir um vetor w (perpendicular ao hiperplano) e um escalar b (offset do plano discriminante a partir da origem) de forma que (PAL e MATHER, 2004):

$$w \cdot x_i + b \geq +1, \quad \text{para todo } y = +1 \quad (2.1)$$

$$w \cdot x_i + b \leq -1 \quad \text{para todo } y = -1 \quad (2.2)$$

Sendo as classes linearmente separáveis, existem muitas soluções para esse problema. Contudo, a técnica SVM objetiva encontrar um hiperplano ótimo no sentido de que a distância até as amostras mais próximas seja máxima (Figura 2.3). Essas amostras são chamadas vetor-suporte e estão localizadas em dois hiperplanos paralelos ao hiperplano ótimo e satisfazem à equação $w \cdot x_i + b = \pm 1$. A distância entre os vetores-suporte e o hiperplano é igual a $1/ \|w\|$. Desta forma, a maximização das margens é dada por (GUALTIERI e CROMP, 1998):

$$\min_{w, b} \frac{1}{2} \|w\|^2, \quad (2.3)$$

$$\text{sujeito a } y_i (w \cdot x_i + b) \geq 1 \text{ para } \forall_i = 1, \dots, k \quad (2.4)$$

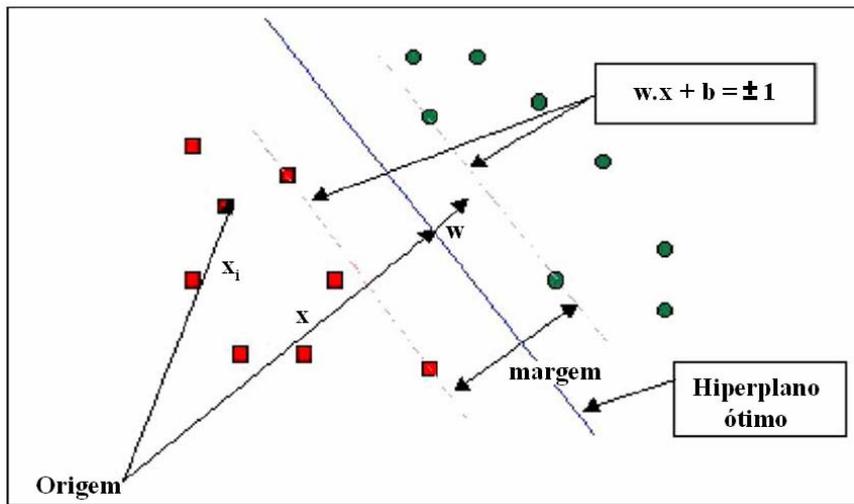


Figura 2.3 - Hiperplano para dados linearmente separáveis. A linha pontilhada passa pelos vetores-suporte.
 Fonte: Adaptada de Pal e Mather (2004).

2.4.1.2 Dados não separáveis linearmente

Para dados não separáveis linearmente, Cortes e Vapnik (1995) sugeriram que a premissa de que toda amostra de treinamento de uma dada classe esteja localizada em um mesmo lado do hiperplano fosse “relaxada” por meio da introdução de uma variável ξ_i que assume valores nulos ou positivos. Neste caso, o algoritmo SVM procura por um hiperplano que maximiza as margens e que, ao mesmo tempo, minimiza a quantidade total de erros de classificação (Figura 2.4). Esse compromisso entre margem e erro de classificação é controlado por um valor de penalidade C , definido pelo usuário e aplicado ao erro de classificação. Assim a Equação 2.4 pode ser escrita como:

$$y_i (w \cdot x_i + b) \geq 1 - \xi_i \quad (2.5)$$

e a solução para encontrar um hiperplano separador ótimo generalizado é obtida com a seguinte condição (PAL e MATHER, 2004):

$$\min_{w, b, \xi_1, \dots, \xi_k} \left[\frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^k \xi_i \right], \quad (2.6)$$

$$y_i (w \cdot x_i + b) - 1 + \xi_i \geq 0, \quad (2.7)$$

$$\xi_i \geq 0, i = 1, \dots, k. \quad (2.8)$$

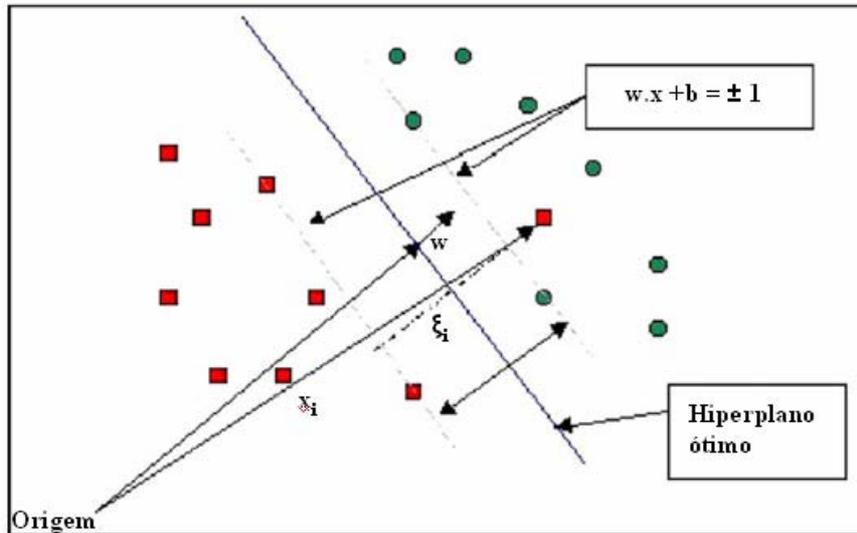


Figura 2.4 – Hiperplano para dados não separáveis linearmente.
Fonte: Adaptada de Pal e Mather (2004).

2.4.1.3 Superfícies de decisão não lineares: método kernel

Quando não é possível obter um hiperplano linear definido com base nos dados de treinamento, a estratégia SVM pode ser generalizada para o cálculo de uma superfície de decisão não linear em \mathbb{R}^n . Neste caso, os dados de entrada ($x \in \mathbb{R}^n$) são projetados em um espaço de maior dimensionalidade, H , de modo que, nesse espaço, os dados sejam linearmente separáveis (Figura 2.5).

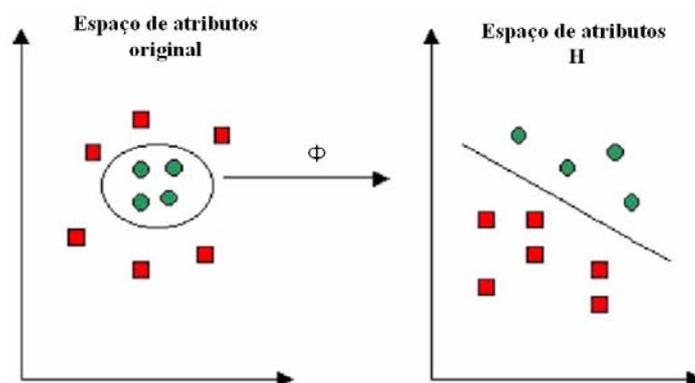


Figura 2.5 – SVM não linear.
Fonte: Adaptada de Pal e Mather (2004).

Os dados são projetados no espaço H por meio da função de mapeamento não linear Φ :

$$\Phi : \mathbb{R}^n \rightarrow H \quad (2.9)$$

Dessa forma, um vetor x pode ser representado no espaço H como $\Phi(x)$. O algoritmo de treinamento no espaço de atributos H irá depender somente do produto $\Phi(x_i) \cdot \Phi(x_j)$. Agora, se existir uma função kernel de forma que:

$$K(x_i, x_j) = \Phi(x_i) \cdot \Phi(x_j) \quad (2.10)$$

será necessário somente utilizar K no programa de treinamento, sem conhecer a forma explícita de Φ , o que pode ser computacionalmente muito custoso.

De acordo com Jia (2005), as funções kernel mais utilizadas são:

Linear: $K(x_i, y_i) = x_i^t \cdot x_j$

Polinomial: $K(x_i, y_i) = (\gamma x_i^t \cdot x_j + r)^d, \gamma > 0$

Função de base radial (RBF): $K(x_i, y_i) = \exp(-\gamma \|x_i - y_i\|^2), \gamma > 0$

Sigmóide: $K(x_i, y_i) = \tanh(\gamma x_i^t \cdot x_j + r)$

2.4.2 SVM multiclass

Conforme dito anteriormente, a classificação SVM foi inicialmente desenvolvida para casos binários. Gualtieri e Cromp (1998) propuseram duas estratégias para adaptação da técnica para discriminação multiclass: a abordagem “um contra todos” e a “um contra um”. A estratégia “um contra todos” compara uma dada classe com todas as outras tomadas juntas, gerando então N classificadores, onde N é o número de classes. Já na estratégia “um contra um” são treinados $N \cdot (N-1) / 2$ classificadores binários. Aplicando todos os $N \cdot (N-1) / 2$ classificadores binários em cada vetor de dados teste e dando um voto para a classe vencedora de cada estágio do classificador, o resultado final da classificação será a classe com maior número de votos.

2.5 Classificação por máxima verossimilhança (MAXVER)

A classificação MAXVER é um dos métodos de classificação mais utilizados em dados de sensoriamento remoto. O MAXVER é um classificador paramétrico, pois assume

distribuição normal para cada uma das classes em cada uma das bandas. Por meio do cálculo da média e da matriz de covariância das classes são obtidas as probabilidades de um determinado pixel pertencer a cada uma das classes determinadas na fase de treinamento, associando-o, em seguida, à classe a qual ele apresenta a maior probabilidade. O classificador assume que todas as classes ocorrem em proporções semelhantes, ou seja, em uma classificação hipotética na qual cada pixel fosse associado a uma classe por um processo aleatório, a probabilidade de este ser associado a uma ou outra classe seria a mesma (JENSEN, 2005).

Esse classificador está implementado em vários programas que lidam com o processamento de imagens. Contudo, ele apresenta algumas dificuldades na estimativa de seus parâmetros, em especial a matriz de covariância. Em dados de alta dimensionalidade esta estimativa torna-se extremamente problemática, devido ao fato de que, em situações reais, o tamanho das amostras disponíveis quase sempre não é adequado. Sendo assim, este classificador é muito sensível ao efeito Hughes. Portanto, com dados hiperespectrais, esse classificador necessita de uma etapa de seleção/extração de atributos antes do treinamento do classificador.

2.6 Classificação *spectral angle mapper* (SAM)

O SAM (KRUSE et al., 2003) é uma técnica de processamento que visa identificar um ou mais espectros em um conjunto de dados n -dimensional com base na separação angular entre os vetores que representam esses espectros no espaço de atributos e o vetor que representa um ou mais espectros de referência. O espectro de referência pode ser oriundo de dados de laboratório, campo ou extraídos da própria imagem. A similaridade espectral é feita pelo cálculo do ângulo entre os dois espectros, tratando-os como vetores em um espaço n -dimensional. A visualização desse conceito é simplificada com a observação da Figura 2.6, que considera o caso de um único espectro a ser identificado (teste) e um único espectro de referência (referência), em um espaço bidimensional. A separação angular é indicada pelo ângulo α (Figura 2.6a). Pequenos ângulos entre os dois espectros indicam alta similaridade e grandes ângulos indicam baixa similaridade. Assim, o pixel é classificado como a classe com a qual ele

tem maior similaridade espectral. Como exemplo, tomando-se a Figura 2.6b, pode-se afirmar que o espectro “teste 1” é mais similar ao espectro de referência do que o espectro “teste 2”, cuja distância angular α_2 é maior.

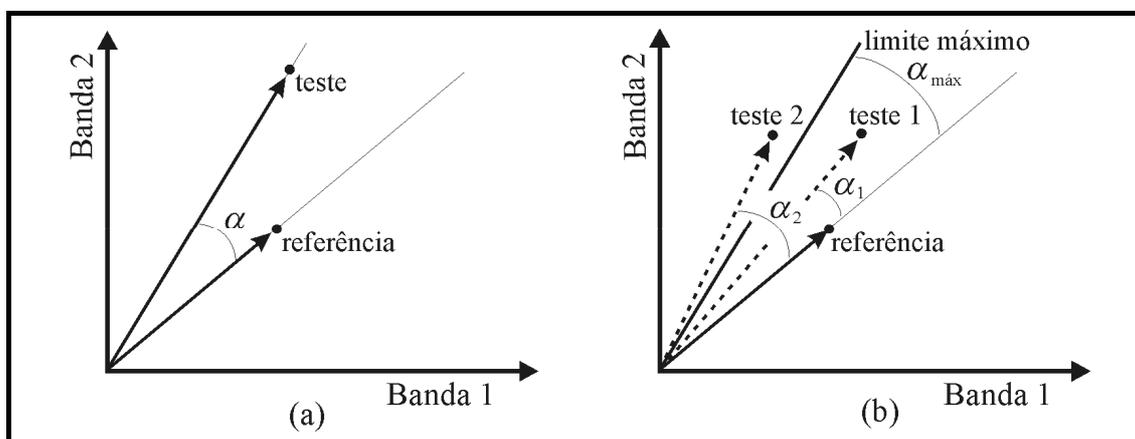


Figura 2.6 - Distância angular entre um espectro de referência e espectros de teste em um espaço de atributos bidimensional. O ângulo α entre o espectro de referência e o espectro de teste (a) define a semelhança espectral no conceito SAM. O ângulo máximo $\alpha_{\text{máx}}$ que separa os espectros de teste de um ou mais espectros de referência é estabelecido como critério para inclusão ou exclusão de classe (b).
 FONTE: Adaptada de Kruse et al. (1993).

Dependendo da implementação no sistema, é possível, ainda, estabelecer uma distância angular de tolerância, como regra de decisão, a fim de refinar a visualização da identificação espectral. Nesse caso, pode ser definido um limite superior e um limite inferior que representem a separação angular máxima e mínima, em radianos, que se deseja aceitar em relação ao espectro de referência. Os espectros cujos vetores estiverem fora do intervalo angular estabelecido não serão classificados, aparecendo em preto na imagem classificada. É o caso exemplificado para o espectro “teste 2” na Figura 2.6b. Enquanto o espectro “teste 1” é aceito como similar ao espectro de referência, o “teste 2” é rejeitado por estar a uma distância angular superior ao limite estabelecido pelo ângulo de “limite máximo”, o $\alpha_{\text{máx}}$ (KRUSE et al., 1993).

É importante destacar que o SAM utiliza somente a direção e não o comprimento dos vetores, ou seja, combinações lineares de um espectro que não alterem o ângulo do vetor apresentarão o mesmo valor angular. Assim, o espectro representado pelo vetor E

= (B_1, B_2, \dots, B_n) , onde B_i representa o valor digital no canal (ou banda) i , com $1 \leq i \leq n$, terá o mesmo valor *SAM* que o espectros $F = (a.B_1, a.B_2, \dots, a.B_n)$, ou que o espectro $G = (b.B_1, b.B_2, \dots, b.B_n)$, sendo a e b constantes de valores diferentes, quando comparado com um espectro de referência qualquer. Por esse motivo, esse método é pouco afetado por fatores de iluminação (KRUSE et al., 1993; VAN DER MEER e JONG, 2001).

3. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada no município de Pirenópolis, Estado de Goiás, entre as coordenadas geográficas 15° 32'S a 15° 55'S e 48° 46' W a 48° 55' W, englobando a cidade de Pirenópolis e parte da Serra dos Pireneus, importante divisor de águas das bacias do Tocantins e do Paraná. Parte da área está inserida na Área de Proteção Ambiental (APA) dos Pireneus, criada pelo Decreto Estadual 5.174/00, que, dentre outros objetivos, visa proteger a região serrana e entorno do Parque Estadual dos Pireneus, os remanescentes de cerrado e os recursos hídricos da região.

A temperatura média anual é de 23,3° C (Normais Climatológicas de 1961/90), com variação anual entre 24,4° C, no mês de outubro, e 21,7° C, no mês de junho, correspondendo a uma amplitude anual inferior a 3° C. A média anual pluviométrica é de 1600 mm. O período úmido (precipitação acima de 100 mm mensais) corresponde aos meses de outubro a abril e o período seco corresponde aos meses de maio a agosto. O período úmido representa 87,13% do total pluviométrico anual, com destaque para os meses de novembro a janeiro, com índices pluviométricos acima dos 200 mm. Os meses de junho e julho são os mais secos, com precipitação em torno de 5 mm. Segundo a classificação climática de Köppen, o clima é do tipo Aw: “A” por apresentar todos os meses temperatura média mensal superior a 18° C, “w” por ter estação seca no inverno e “i” por se caracterizar como isotermal, com amplitude anual inferior a 5° C (AGETOP, 2005).

A região compreende terrenos metamórficos de idade Pré-Cambriana formados por extensas faixas de xistos diversos e lentes subordinadas de quartzitos pertencentes ao Grupo Araxá. A lavra do quartzito é uma importante fonte de divisas para o município de Pirenópolis, juntamente com o turismo. Contudo, essa atividade tem ocorrido com baixa recuperação e gerando um percentual elevado de rejeitos e, conseqüentemente, muitos impactos ambientais negativos, como assoreamento do Rio das Almas, importante curso d'água da região. Diques de diabásio relacionados ao magmatismo Juro-Cretáceo também são encontrados na região, encaixados preferencialmente em zonas de falhas ou cisalhamento. Ao longo do Rio das Almas há depósitos aluvionares

quaternários constituídos, predominantemente, por areias quartzosas, brancas, finas e bem selecionadas. Áreas aluviais de pequenas dimensões associadas ao afloramento do lençol freático superficial também são comuns. Essas áreas alagadiças, conhecidas como veredas, apresentam sedimentos finos e areias orgânicas e têm grande importância ecológica e fragilidade ambiental (AGETOP, 2005).

A região está inserida no Planalto Central Goiano e é formada por duas unidades: o Planalto do Alto Tocantins-Paranaíba e as Depressões Intermontanas. O Planalto do Alto Tocantins-Paranaíba corresponde às escarpas erosivas da Serra dos Pireneus. As depressões intermontanas adquirem aspecto de estreitos corredores interrompidos pelos relevos mais elevados do Planalto, apresentando formas amplas e tabulares onde a incisão da drenagem é incipiente (RADAMBRASIL, 1981).

Predominam os latossolos vermelho-escuros quase sempre em áreas de relevo plano a suavemente ondulado em diferentes altitudes. Neossolos ocupam preferencialmente locais de maior declividade, geralmente as encostas de morros (AGETOP, 2005).

A vegetação é composta por diversas fitofisionomias de Cerrado, destacando-se a Mata Seca Semidecídua, o Cerradão, o Cerrado sentido restrito, o Campo Sujo e o Campo Limpo. No Cerrado sentido restrito encontramos ainda as seguintes subdivisões fitofisionômicas: Cerrado ralo, Cerrado típico, Cerrado denso e Cerrado rupestre.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 4.1 sintetiza a seqüência metodológica adotada no presente trabalho. As etapas indicadas serão descritas a seguir.

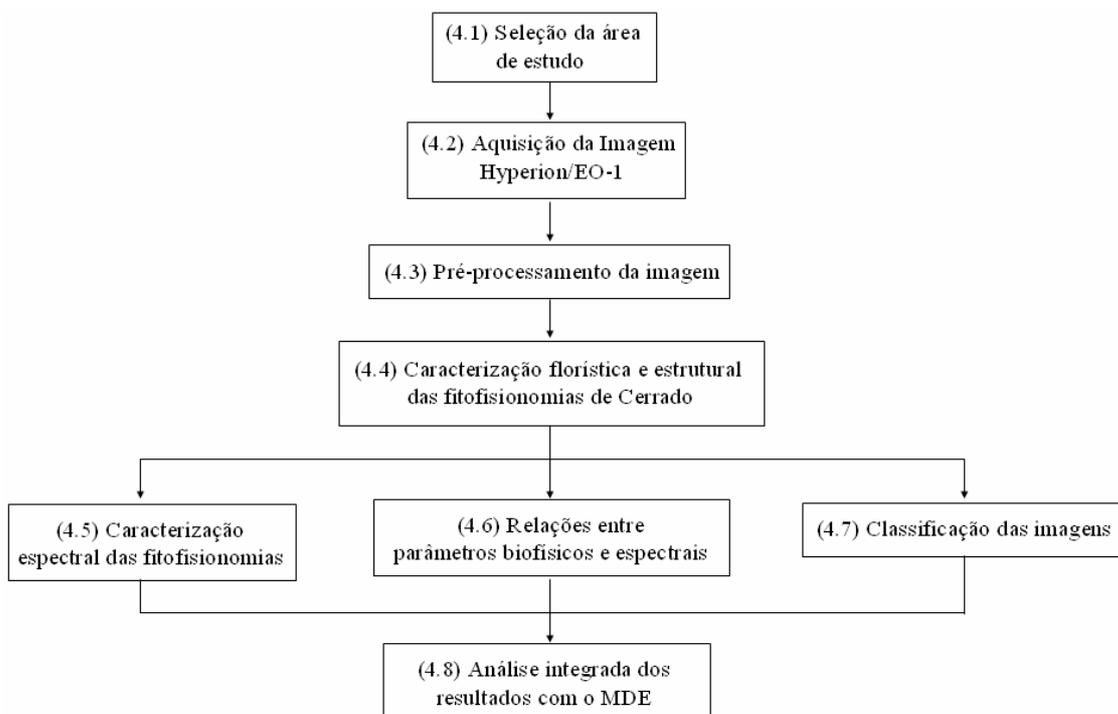


Figura 4.7 - Fluxograma da metodologia de trabalho.

4.1. Seleção da área de estudo

A seleção da área de estudo foi baseada na disponibilidade de imagens Hyperion/EO-1, previamente adquiridas, e que apresentassem diferentes fitofisionomias de Cerrado. Outro critério de seleção foi a porcentagem de cobertura de nuvens, que deveria estar entre 0-9%. Após uma consulta ao banco de dados do EROS *Data Center*, foi constatada a existência de uma imagem Hyperion/EO-1 (EO1H2220712006164110PF_SGS_01) que atendia a tais critérios e, portanto, foi selecionada como área de estudo (Figura 4.2).

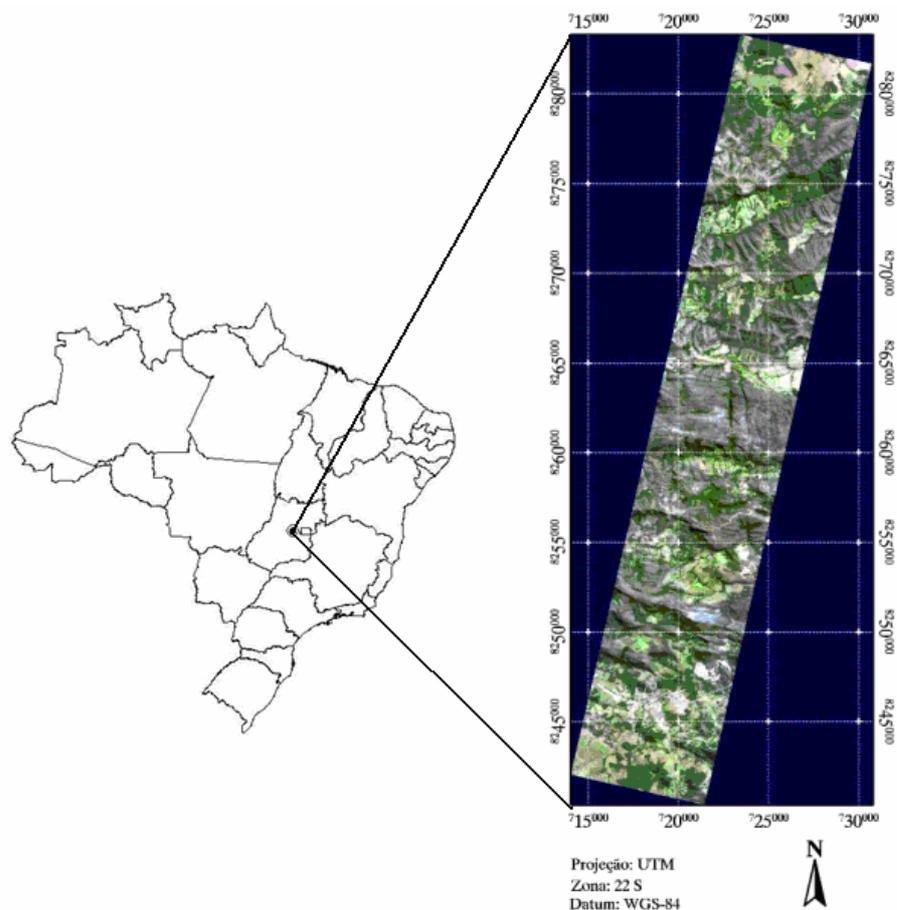


Figura 4.8 – Localização da área de estudo e composição colorida cor-verdadeira com as bandas do Hyperion/EO-1 centradas em 640 nm (R), 548 nm (G) e 457 nm (B).

4.2 Aquisição da imagem Hyperion/EO-1

A cena Hyperion utilizada foi imageada em 13 de junho de 2006. A aquisição foi feita com ângulos de azimute e elevação solar de 39,39° e 39,88°, respectivamente. O ângulo de apontamento utilizado foi de -16,42°, o que caracteriza uma visada fora do nadir na direção de retro-espalhamento.

Os dados Hyperion foram fornecidos em 242 bandas, mas apenas 196 são radiometricamente calibradas para valores de radiância aparente no sensor.

Devido à cobertura de nuvens, apenas dados Hyperion de uma única data (13 de junho de 2006; estação seca) foram utilizados no trabalho. Uma abordagem multitemporal, a condição ideal inicialmente prevista para facilitar a discriminação das fitofisionomias

com a análise integrada de imagens Hyperion do período seco e chuvoso, não pôde ser efetivada.

4.3 Pré-processamento

4.3.1 Remoção dos *stripes*

As imagens Hyperion/EO-1 apresentam pixels ruidosos que formam “faixas escuras” perpendiculares à linha de varredura conhecidas como “*stripes*”. Esses pixels ruidosos foram substituídos pela média de seus vizinhos na direção horizontal por meio da utilização de um algoritmo que automaticamente identifica e corrige as colunas (*stripes*) e pixels defeituosos (Figura 4.3). Deve-se destacar que a informação destes pixels já foi perdida durante a aquisição dos dados e que este procedimento não agrega informação às imagens, somente melhora seu aspecto visual.

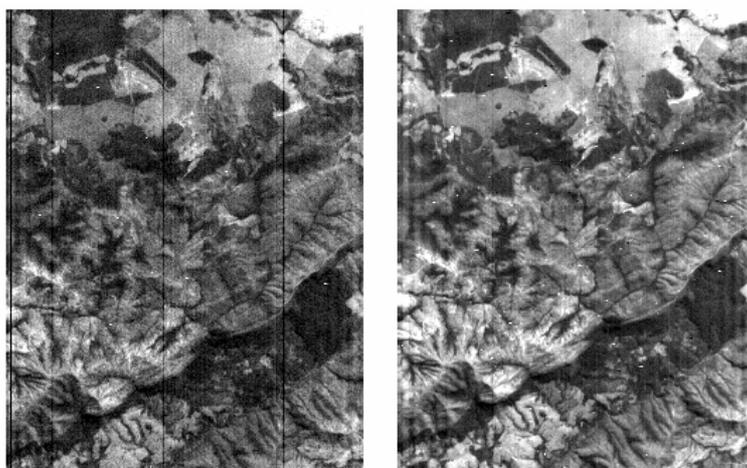


Figura 4.9 – Exemplo de remoção dos *stripes*. Banda em 457 nm: original (a) e após a remoção dos *stripes* (b).

4.3.2 Correção Atmosférica

Os dados de radiância foram convertidos para reflectância de superfície utilizando o *Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes* (FLAASH). O FLAASH é um programa baseado no modelo de transferência radiativa MODTRAN-4 (*Moderate Resolution Transmittance Code*) (FELDE et al., 2003). O principal objetivo do FLAASH é eliminar os efeitos de espalhamento e absorção da radiação devido aos

constituintes da atmosfera. O programa requer parâmetros de entrada como data e horário da aquisição das imagens, latitude e longitude do centro da cena, elevação média, visibilidade e banda de absorção de água a ser utilizada para estimar, pixel a pixel, a quantidade de vapor de água presente na atmosfera.

O modelo atmosférico utilizado foi o tropical/ rural, com 70 km de visibilidade. A banda de absorção de água utilizada foi a de 1135 nm.

4.3.3 Suavização do Ruído na Imagem Reflectância de Superfície

A técnica Fração Mínima de Ruído (*Minimum Noise Fraction* – MNF) (GREEN et al., 1988; APAN et al., 2004) foi aplicada sobre a imagem reflectância de superfície e invertida para o espaço original dos dados para minimização do ruído e remoção de feições espúrias nos espectros dos pixels, decorrentes da correção atmosférica e da baixa relação sinal-ruído do Hyperion.

A técnica foi aplicada sobre os seguintes intervalos espectrais, separadamente, em função da degradação da relação sinal/ruído da faixa do VIS para a do SWIR: 426 a 752 nm (VIS), 762 a 1316 nm (NIR), 1507 a 1790 nm (SWIR), 2002 a 2395 nm (SWIR). Para cada intervalo, o processo de inversão dos dados foi feito utilizando-se as primeiras imagens MNF, responsáveis por mais de 95% da variância dos dados.

4.3.4 Correção Geométrica

A correção geométrica da imagem Hyperion teve como referência uma imagem TM/Landsat 5 ortorretificada. Aplicou-se sobre o conjunto de pontos de controle utilizados um ajuste polinomial de primeira ordem, seguida pela reamostragem dos pixels da cena pelo método do vizinho mais próximo. O erro quadrático médio obtido nesse processo foi de 0,28 pixel.

4.4 Caracterização florística e estrutural das fitofisionomias

4.4.1 Inventário

Para a caracterização florística e estrutural das fitofisionomias do Cerrado foram estabelecidas 30 parcelas de 50 m x 20 m, totalizando uma área amostral de 3 ha. As fitofisionomias foram classificadas segundo Ribeiro e Walter (1998). A amostragem foi realizada no período de 2 a 13 de junho de 2008. Todas as parcelas tiveram seu posicionamento registrado por meio da utilização de GPS. Como critério de inclusão foi amostrado todos os indivíduos vivos com circunferência à altura do peito (CAP) igual ou superior a 15 cm, para as formações florestais; e 15 cm de circunferência a 30 cm de altura do solo (CAS) e altura igual ou superior a 0,5 m para as formações savânicas e campestres.

Os dados adquiridos em campo foram: identificação botânica das espécies, circunferência à altura do peito (nas formações florestais), circunferência a 30 cm de altura do solo (nas formações savânicas e campestres), altura total, diâmetro de copa (na direção paralela e perpendicular à linha central da parcela) e posição dos indivíduos na parcela. No caso de indivíduos com troncos múltiplos, mediu-se o diâmetro de cada um dos troncos separadamente. O posicionamento dos indivíduos na parcela foi realizado por meio do registro de coordenadas cartesianas X e Y, onde X corresponde a uma distância que vai de 0 a 50 m contados a partir do início da parcela e Y representa a distância perpendicular de cada árvore até a linha de caminhamento no centro da parcela, variando de 0 a 10 m do lado esquerdo e 0 a 10 m do lado direito. A identificação taxonômica foi feita sem coleta de material botânico, baseando-se na experiência de um técnico de campo funcionalmente ligado ao Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados (Embrapa Cerrados). A grafia dos nomes das espécies e suas respectivas famílias foram conferidas na página da internet do *Missouri Botanical Garden* (www.mobot.org). A altura dos indivíduos foi obtida subjetivamente, considerando a distância da base do indivíduo até o seu ápice. As medidas de CAP e CAS foram obtidas com o uso de uma fita métrica.

4.4.2 Estimativa da porcentagem de cobertura do estrato arbóreo e arbustivo-herbáceo das fitofisionomias

Como já dito anteriormente, as fitofisionomias do Cerrado são constituídas por formações florestais, savânicas e campestres, as quais apresentam diferentes proporções entre os estratos herbáceo, arbustivo e arbóreo. As formações florestais são constituídas por áreas com predomínio de espécies arbóreas, onde há formação de dossel, contínuo ou descontínuo. As formações savânicas referem-se a áreas com árvores e arbustos espalhados sobre um estrato gramíneo, sem a formação de um dossel contínuo. Já as formações campestres designam áreas com o predomínio de espécies herbáceas e algumas arbustivas, sem a presença de árvores na paisagem. Essa variabilidade na estrutura, tanto em altura (estrutura vertical) quanto em densidade de indivíduos (estrutura horizontal), bem como as mudanças estacionais das espécies que compõem as diferentes fitofisionomias, influencia a resposta espectral das mesmas. No caso das fitofisionomias florestais, um dos principais parâmetros que exercem influência na resposta espectral da vegetação é a porcentagem de cobertura do dossel. A porcentagem de cobertura do dossel é definida como a proporção da superfície da floresta coberto pela projeção vertical das copas das árvores (JENNINGS, 1999).

Estimativas da porcentagem de cobertura do dossel vêm se tornando parte importante dos inventários florestais, servindo como indicadores ecológicos para distinção entre habitats, avaliação do microclima florestal, condições de iluminação, estimativas de índice de área foliar, entre outros.

Nas fitofisionomias savânicas e campestres a composição do estrato herbáceo e arbustivo, bem como suas mudanças estacionais, constituem um dos principais fatores condicionantes de sua resposta espectral. Sendo assim, a porcentagem de cobertura do dossel e a composição do estrato arbustivo-herbáceo foram dois dos parâmetros analisados. Essas estimativas foram feitas por meio da utilização de um densitômetro, segundo metodologia proposta por Stumpf (1993). A leitura do densitômetro foi feita a cada metro do centro da parcela, totalizando 50 pontos por parcela. No caso das formações florestais, a leitura do densitômetro foi realizada “para cima”, sendo anotado

se o ponto amostral interceptava a copa ou não. No caso das formações savânicas e campestres, a leitura foi realizada “para baixo” e cada ponto amostral correspondia a uma das seguintes classes: vegetação fotossinteticamente ativa, vegetação não-fotossinteticamente ativa ou solo (ou rocha) exposto. Por exemplo: se em uma parcela de uma formação florestal 25 pontos amostrais correspondessem à copa e 25 à não-copa (céu), então a porcentagem de cobertura do dossel seria de 50%.

4.4.3 Análise da estrutura e similaridade florística das fitofisionomias

Para descrever a estrutura de cada fitofisionomia, foram analisados os seguintes parâmetros: área basal, densidade absoluta (DA), densidade relativa (DR), frequência absoluta (FA), frequência relativa (FR), dominância absoluta (DoA), dominância relativa (DoR) e índice de valor de importância (IVI) das espécies. A diversidade florística foi analisada pelos índices de Shannon (H') e de Simpson (D), e a equabilidade, pelo índice de Pielou (J'). Essas estimativas foram calculadas com o auxílio do programa FITOPAC 1.6.4 (SHEPHERD, 2006). A descrição dos parâmetros será descrita a seguir.

A área basal é a soma das áreas seccionais dos indivíduos amostrados obtidas a partir dos dados de CAP e CAB por unidade de área, expressa, geralmente, em $m^2 \cdot ha^{-1}$.

A densidade absoluta indica o número de indivíduos de uma determinada espécie por unidade de área. A densidade relativa refere-se ao número de indivíduos de uma determinada espécie em relação ao total de indivíduos de todas as espécies identificadas no levantamento da fitofisionomia analisada.

A frequência absoluta expressa a porcentagem de parcelas em que cada espécie ocorre, e a frequência relativa é a porcentagem de ocorrência de uma espécie em relação à soma das frequências absolutas de todas as espécies.

A dominância é um parâmetro relacionado à área basal dos indivíduos das espécies. A dominância absoluta é a soma das áreas basais dos indivíduos pertencentes a uma espécie, por unidade de área. A dominância relativa indica a porcentagem da área basal

de cada espécie que compõe a área basal total de todos os indivíduos de todas as espécies, por unidade de área.

O índice de valor de importância é a soma dos valores relativos de densidade, dominância e frequência relativa de cada espécie, permitindo uma visão mais ampla de sua importância no total do povoamento (SCOLFORO e MELLO, 2006).

O índice de diversidade de Shannon mede o grau de incerteza em prever a que espécie pertencerá um indivíduo, escolhido ao acaso, de uma amostra com S espécies e N indivíduos. Quanto menor o valor do índice de Shannon, menor o grau de incerteza e, portanto, a diversidade da amostra é baixa.

O índice de Simpson reflete a probabilidade de dois indivíduos escolhidos ao acaso na comunidade pertencerem à mesma espécie. Seu valor varia de 0 a 1 e, quanto mais alto for, maior a probabilidade de os indivíduos serem da mesma espécie, ou seja, menor a diversidade.

A equabilidade é uma medida da uniformidade da distribuição de abundância entre as espécies de uma comunidade. Esse índice pertence ao intervalo de 0 a 1, onde 1 representa a máxima diversidade, ou seja, todas as espécies são igualmente abundantes (MAGURRAN, 1988).

A similaridade florística entre as parcelas foi avaliada através da análise de agrupamento por média de grupo (UPGMA – *Unweighted Pair Groups Method using Arithmetic Averages*) a partir do índice de Morisita, também com o auxílio do programa FITOPAC 1.6.4. O índice de Morisita considera o número de indivíduos por espécies nas parcelas e varia de 0 a 1, onde 1 significa duas parcelas totalmente similares e 0 significa que não há espécies em comum entre as parcelas comparadas. A classificação por UPGMA resulta em um dendrograma baseado na média aritmética dos índices de similaridade, onde se observam as hierarquias entre os grupos formados. Em geral, índices de similaridade maiores do que 0,5 são considerados altos.

Para uma melhor visualização da estrutura das diferentes fisionomias, foi elaborado um diagrama-perfil representativo de cada fisionomia existente na área. Os diagramas-perfil são figuras que representam uma faixa de vegetação de largura conhecida. No caso, optou-se por representar a totalidade da parcela, ou seja, adotou-se uma largura de 20m e extensão de 50m. Essa representação foi elaborada com o uso do programa *Stand Visualization System* (SVS) (McGAUGHEY, 2002).

4.5 Caracterização espectral das fitofisionomias

A caracterização espectral das fitofisionomias foi feita com base na técnica de Análise por Componentes Principais (ACP) e análise visual de espectros representativos de cada fitofisionomia. No presente estudo, o principal objetivo da ACP foi avaliar os fatores de ponderação que definem a contribuição de cada banda original nas componentes que contém a maior variância do conjunto de dados. A similaridade espectral entre as fitofisionomias foi analisada através da projeção dos escores componentes principais.

A ACP foi realizada a partir dos valores de reflectância de 2022 pixels representativos das fitofisionomias, os quais foram obtidos das imagens a partir das observações de campo. Intervalos espectrais de forte absorção atmosférica, em torno de 1400 nm e 1900 nm, não foram considerados na análise. A representação e análise dos espectros de reflectância representativos de cada fitofisionomia foram feitas a partir dos valores de reflectância médios obtidos de uma janela de 3x3 pixels em áreas correspondentes às parcelas inventariadas em campo.

4.6 Relações entre parâmetros biofísicos e espectrais

Foram analisadas as relações existentes dos parâmetros biofísicos área basal e porcentagem de cobertura do dossel com a reflectância das bandas, razões de bandas e índices de vegetação de bandas estreitas oriundos dos dados de reflectância do Hyperion. As razões de bandas incluíram todas as possíveis razões de bandas simples (numerador/denominador) derivadas das 157 bandas utilizadas no presente estudo, totalizando 12.246 razões. Como vários índices de vegetação são compostos por razões

de bandas, essa etapa é uma forma indireta de considerar na análise outros índices além dos relacionados abaixo.

Os 18 índices de vegetação analisados foram: *Simple Ratio (SR)*, *Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI)*, *Red Edge Normalized Difference Vegetation Index (RENDVI)*, *Vogelmann Red Edge Index (VOG)*, *Red Edge Position Index (REPI)*, *Photochemical Reflectance Index (PRI)*, *Structure Insensitive Pigment Index (SIPI)*, *Plant Senescence Reflectance Index (PSRI)*, *Carotenoid Reflectance Index (CRI)*, *Anthocyanin Reflectance Index (ARI)*, *Water Band Index (WBI)*, *Normalized Difference Water Index (NDWI)*, *Moisture Stress Index (MSI)*, *Normalized Difference Infrared Index (NDII)*, *Enhanced Vegetation Index (EVI)*, *Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)*, *Visible Atmospherically Resistant Index (VARI)* e *Visible Green Index (VIG)*. A formulação matemática desses índices e as referências encontram-se na Tabela 4.1.

Conforme destacado por Galvão et al. (2009), em sentido amplo, ARVI, ARI, EVI, NDVI, SR, CRI, VARI e VIG são índices relacionados aos pigmentos foliares (e.g., clorofila e carotenóides). MSI, NDII, NDWI e WBI estão associados ao teor de água nas folhas. PSRI pode indicar condições de estresse na vegetação, enquanto o PRI e SIPI estão relacionados com a eficiência no uso da luz. RENDVI, REPI e VOG são índices designados para caracterizar variações espectrais associadas com a posição da borda vermelha, a qual pode ser afetada por variações no conteúdo de clorofila e água nas folhas.

A análise relacionada à área basal das fitofisionomias foi realizada a partir de dados inventariados em 28 parcelas. Duas das parcelas adicionalmente amostradas em campo não estavam contidas na imagem utilizada no presente estudo e, portanto, foram utilizadas somente para caracterização florística e estrutural das fitofisionomias da região. A análise da porcentagem de cobertura do dossel foi realizada com os dados inventariados em 10 parcelas de formações florestais e savânicas cuja estrutura tem o componente arbóreo-arbustivo.

Para essa análise foram extraídos os espectros de reflectância médios das bandas do Hyperion e suas transformações nas áreas correspondentes às parcelas amostradas em campo, a partir de uma janela de 3x3 pixels. Posteriormente, foi obtida uma matriz dos coeficientes de correlação de Pearson entre os parâmetros espectrais e biofísicos. Os melhores resultados foram então utilizados na construção de modelos de regressão linear simples e na determinação dos parâmetros espectrais mais sensíveis às variações estruturais da vegetação. Os coeficientes dos modelos foram estimados pelo método dos mínimos quadrados e para testar a significância dos mesmos foi usado o teste t. A seleção dos melhores modelos foi baseada no coeficiente de determinação (R^2). Para validar o pressuposto da normalidade dos resíduos foi utilizado o teste de Kolmogorov-Smirnov e de Shapiro-Wilk. Para avaliação do pressuposto de que os resíduos são aleatórios e com variância constante foram avaliados os gráficos de resíduos versus valores previstos, além do teste de Levene.

Tabela 4.1 – Índices de vegetação utilizados no presente estudo.

Índice de Vegetação	Fórmula*	Referência
SR	R_{864}/R_{671}	Rouse et al., 1973
ARVI	$(R_{864} - (2 \cdot R_{671} - R_{467})) / (R_{864} + (2 \cdot R_{671} - R_{467}))$	Kaufman e Tanré, 1992
RENDVI	$(R_{752} - R_{701}) / (R_{752} + R_{701})$	Gitelson et al., 1996
VOG1	R_{742}/R_{722}	Vogelmann et al., 1993
REPI	$(R_{\lambda} + 1 - R_{\lambda}) / 10$, no intervalo de 690 a 750nm	Curran et al., 1995
PRI	$(R_{529} - R_{569}) / (R_{529} + R_{569})$	Gamon et al., 1997
SIPI	$(R_{803} - R_{467}) / (R_{803} + R_{681})$	Peñuelas et al., 1995
PSRI	$(R_{681} - R_{498}) / R_{752}$	Merzlyak et al., 1999
CRI	$(1/R_{508}) - (1/R_{701})$	Gitelson et al., 2002a
ARI1	$(1/R_{550}) / (1/R_{700})$	Gitelson et al., 2001
WBI	R_{905}/R_{973}	Peñuelas et al., 1997
NDWI	$(R_{854} - R_{1245}) / (R_{854} + R_{1245})$	Gao, 1996
MSI	R_{1598}/R_{823}	Hunt e Rock, 1989
NDII	$(R_{823} - R_{1649}) / (R_{823} + R_{1649})$	Hunt e Rock, 1989
EVI	$2,5 \cdot ((R_{864} - R_{671}) / (R_{864} + 6 \cdot R_{671} - 7,5 \cdot R_{467} + 1))$	Huete et al., 2002
NDVI	$(R_{864} - R_{671}) / (R_{864} + R_{671})$	Rouse et al., 1973
VARI	$(R_{559} - R_{640}) / (R_{559} + R_{640} - R_{467})$	Gitelson et al., 2002b
VIG	$(R_{559} - R_{640}) / (R_{559} + R_{640})$	Gitelson et al., 2002b

*R representa a reflectância da banda mais próxima do sensor Hyperion ao comprimento de onda original das formulações.

4.7 Classificação das imagens

Essa etapa teve como objetivo avaliar o desempenho da classificação SVM na discriminação das oito fitofisionomias de Cerrado analisadas: Campo Limpo, Campo Sujo, Cerrado ralo, Cerrado típico, Cerrado rupestre, Cerrado denso, Cerradão e Mata Seca Semidecídua. A estratégia multi-classes utilizada no presente estudo foi a “um contra um”. Foram analisados diferentes funções kernel e diferentes valores para o parâmetro de penalidade C, de modo semelhante à metodologia adotada por Zhang et al. (2001). Os parâmetros utilizados nas classificações podem ser visualizados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Parâmetros utilizados na classificação SVM.

Função kernel	Parâmetros
Linear	$C = \{100, 1000, 10000\}$
Polinomial	$C = \{100, 1000, 10000\}, d = \{2,3,4,5\}$
RBF	$C = \{100, 1000, 10000\}$
Sigmóide	$C = \{100, 1000, 10000\}$

*C é o parâmetro de penalidade e d é o grau do polinômio.

As amostras de treinamento e de validação foram selecionadas com base na distribuição das fitofisionomias observadas em campo. Cerca de 70% do total de amostras foram utilizadas no treinamento do classificador e 30% na validação. A quantidade de amostras de treinamento e validação por fitofisionomia está indicada na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Número de amostras de treinamento e validação utilizadas.

Classe	n. pixels treinamento	n. pixels validação
Campo Limpo	200	86
Campo Sujo	201	87
Cerradão	200	86
Cerrado denso	150	65
Cerrado ralo	200	86
Cerrado rupestre	110	50
Cerrado típico	150	65
Mata Seca	200	86
Total	1411	611

Primeiramente as classificações foram feitas utilizando-se de todas as 157 bandas do Hyperion. Em um segundo experimento foi feita uma seleção de atributos antes do treinamento do classificador a fim de diminuir a dimensionalidade dos dados e comparar os diferentes resultados obtidos, verificando se, de fato, a classificação SVM não é afetada pelo efeito Hughes. A seleção de atributos foi feita por meio de um procedimento passo a passo que busca maximizar a distância de Mahalanobis entre os grupos mais similares, conforme a metodologia utilizada por Apan et al.(2004), Galvão et al. (2005), Galvão et al. (2009). Valores de probabilidade de F foram usados como critério para a inclusão (0,05) e remoção (0,10) das variáveis.

As classificações foram avaliadas por meio da matriz de confusão, acurácia total e índice Kappa. A título de comparação, o melhor resultado dentre as classificações SVM foi comparado com os resultados de outros dois classificadores: um classificador estatístico tradicionalmente utilizado na classificação de imagens e outro específico para a classificação de dados hiperespectrais: Máxima Verossimilhança (MAXVER) e *Spectral Angle Mapper* (SAM), respectivamente.

A classificação MAXVER teve como dado de entrada as bandas selecionadas pelo método de seleção de atributos anteriormente citado, pois esse método requer como dados de treinamento, pelo menos, um número de pixels igual ao número de bandas mais um, o que não foi possível para algumas das classes. Assim, para a utilização desse classificador em dados hiperespectrais a etapa de seleção de atributos é uma fase crucial.

Para a classificação SAM, os espectros de referência foram extraídos da própria imagem, usando a resposta espectral média das amostras de treinamento em cada uma das 157 bandas do Hyperion.

A fim de quantificar o ganho na utilização de dados hiperespectrais em relação aos dados multiespectrais na discriminação das fitofisionomias, a resolução espectral dos sensores a bordo dos satélites Landsat 7 (*Enhanced Thematic Mapper plus* – ETM⁺), SPOT 5 (*High Resolution Visible and Infrared*) e Quickbird (câmera multiespectral) foram simulados a partir dos dados do Hyperion usando a função de resposta dos filtros

e submetidos à classificação que apresentou melhor resultado. As bandas espectrais em que operam esses sensores simulados estão apresentadas na Tabela 4.4. Esses sensores foram selecionados porque representam a gradual transição de aquisição de dados das faixas do visível e infravermelho próximo (Quickbird) para as do SWIR1 (HRVIR) e SWIR2 (ETM+).

Tabela 4.4 – Bandas simuladas (nm) da câmera multiespectral do satélite Quickbird e dos sensores HRVIR/SPOT 5 e ETM⁺/Landsat 7.

Quickbird	450 - 520	SPOT 5	500 - 590	Landsat 7	450 - 520
	520 - 600		610 - 680		520 - 600
	630 - 690		790 - 890		630 - 690
	760 - 900		1580 - 1750		760 - 900
					1550 - 1750
					2080 - 2350

4.8 Análise integrada dos resultados com o MDE

Esta etapa teve como principal objetivo analisar a distribuição espacial das fitofisionomias e de seus parâmetros biofísicos em função da altitude do terreno. Como a porcentagem de cobertura do dossel e a área basal são parâmetros correlacionados, a avaliação se concentrou sobre o primeiro parâmetro biofísico.

Os dados de altitude foram obtidos a partir do modelo digital de elevação (MDE) do projeto TOPODATA (VALERIANO, 2004), o qual foi elaborado a partir dos dados do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*). A distribuição espacial das fitofisionomias foi obtida a partir da classificação que apresentou melhor acurácia total. A distribuição da porcentagem de cobertura do dossel foi obtida a partir da inversão do modelo de regressão que utiliza os dados de NDVI para a estimativa desse parâmetro biofísico.

Para essa análise, a classificação das fitofisionomias e a porcentagem de cobertura do dossel foram projetadas sobre o MDE para visualização de sua relação com a altitude do terreno. Por meio da projeção dos dados no MDE e do diagrama de espalhamento relacionando a porcentagem de cobertura do dossel das diversas fitofisionomias e a altitude onde as mesmas ocorrem, verificou-se a influência da topografia da área de estudo sobre a distribuição espacial das fitofisionomias e de seus parâmetros biofísicos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização florística e estrutural das fitofisionomias

No total foram amostrados 2574 indivíduos distribuídos em 149 espécies e 49 famílias, os quais estão listados no Apêndice A. 27 indivíduos pertencentes a 3 espécies não foram identificados. As fitofisionomias estudadas apresentaram composição florística e estrutural características. A área basal, altura média dos indivíduos e porcentagem de cobertura do dossel foi decrescente das fitofisionomias de formações florestais para as savânicas e campestres. A família com maior representatividade nas fitofisionomias florestais e savânicas foi a Fabaceae. Esse resultado já era esperado, visto que essa é uma das famílias botânicas mais diversificadas em todas as províncias fitogeográficas do Brasil e frequentemente registrada dentre as famílias mais importantes em áreas de Cerrado no Brasil Central (FELFILI et al., 1992; FELFILI e SILVA-JÚNIOR, 1993; FELFILI et al., 1994; FELFILI et al., 2004; FONSECA e SILVA-JÚNIOR, 2004). As espécies mais frequentes encontradas no levantamento florístico realizado se assemelham às descritas por Ribeiro e Walter (1998).

A Tabela 5.1 sintetiza alguns dos parâmetros estruturais, florísticos e de diversidade das fitofisionomias da região.

Tabela 5.1 - Parâmetros estruturais e florísticos da Mata Seca Semidecídua (MS), Cerradão (Cdão), Cerrado sentido restrito (Csr) e Campo Sujo (CaS).

Parâmetros	MS	Cdão	Csr	CaS
n. espécies	83	85	90	39
n. famílias	38	38	37	21
área basal/ha	17,595	17,23	6,297	2,689
altura ± desvio padrão	10,63±5,47	8,69 ± 3,65	3,46 ± 2,49	1,18 ± 0,77
índice de Shannon	3,961	3,781	3,976	2,713
índice de Simpson	0,024	0,035	0,026	0,129
equabilidade	0,896	0,851	0,884	0,741

A seguir são apresentados os resultados obtidos por fitofisionomia. Fotografias de campo das fitofisionomias podem ser vistas no Apêndice B.

5.1.1 Formações Florestais

5.1.1.1 Mata Seca Semidecídua

A Mata Seca Semidecídua é uma formação florestal caracterizada por diversos níveis de caducifolia durante a estação seca. Esse tipo de vegetação não possui associação com os cursos de água, ocorrendo nos interflúvios em solos geralmente mais ricos em nutrientes (RIBEIRO e WALTER, 1998). Às vezes ocorre associada às matas de galeria e se estende pelas encostas, fazendo contato com as formações savânicas e campestres do compartimento intermediário e superior do relevo.

Foram amostrados 468 indivíduos pertencentes a 83 espécies e 38 famílias. O índice de diversidade de Shannon para as espécies foi de 3,961, sendo comparável com valores encontrados em outras áreas de Mata Seca Semidecídua (IVANAUSKAS, 1999; LOPES et al., 2002; SILVA et al., 2004). Segundo Leitão Filho (1987), o índice de diversidade de Shannon dessa fitofisionomia varia de 3,16 a 4,29. A equabilidade foi 0,896 e o índice de diversidade de Simpson foi 0,024, o que indica a elevada diversidade da fitofisionomia. A família Fabaceae apresentou maior número de espécies (19), seguida pela Rubiaceae (6), Myrtaceae (5), Sapindaceae (4), Anacardiaceae e Bignoniaceae (3). As demais famílias foram representadas por 1 ou 2 espécies. As famílias Fabaceae, Sapindaceae, Anacardiaceae, Rubiaceae, Burseraceae e Apocynaceae detêm mais de 50% do IVI (Figura 5.1). As dez espécies com maior IVI foram: *Magonia pubescens* (tingui), *Myracrodruon urundeuva* (aroeira), *Dilodendron bipinnatum* (maria pobre), *Copaifera langsdorffi*, *Protium pallidum*, *Dipterix alata* (baru), *Hirtella glandulosa* (oiti), *Alibertia edulis* (marmelada de cachorro), *Aspidosperma nobile* e *Guazuma ulmifolia* (mutamba) (Figura 5.2).

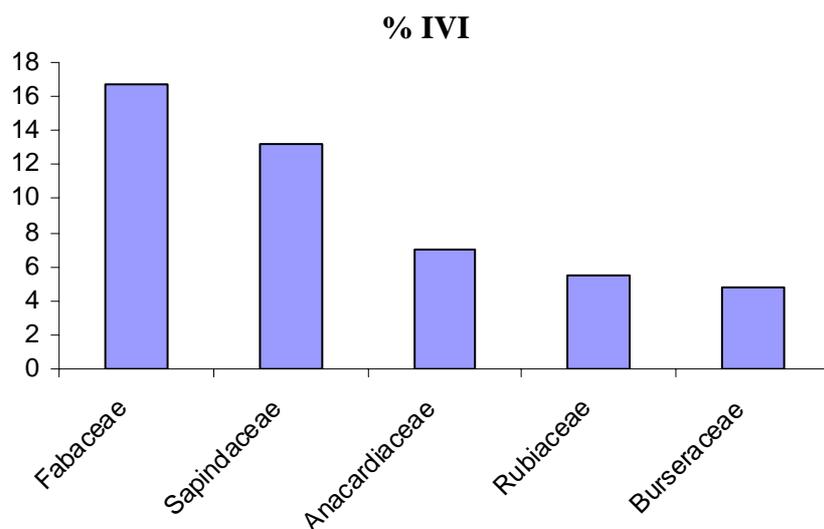


Figura 5.10 - % Índice de valor de importância (IVI) das principais famílias encontradas na Mata Seca Semidecídua.

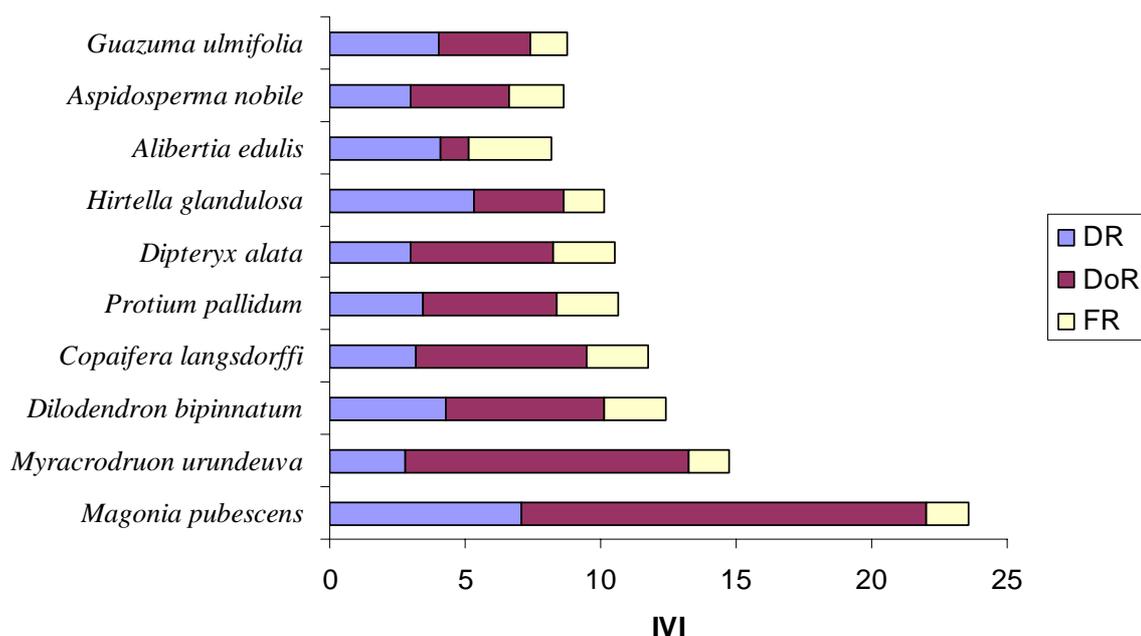


Figura 5.11 - Parâmetros fitossociológicos das dez espécies de maior Índice de valor de importância (IVI) da Mata Seca Semidecídua.

A altura média do estrato arbóreo foi de $10,63 \pm 5,473$ m. O elevado desvio padrão dessa estimativa é devido à presença de espécies emergentes. A área basal foi de $17,595 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$. A porcentagem de cobertura do dossel ficou entre 78 e 93%.

5.1.1.2 Cerradão

O Cerradão é uma formação florestal com aspectos xeromórficos. Apresenta espécies que ocorrem no Cerrado sentido restrito e matas. Do ponto de vista fisionômico, é uma floresta, mas floristicamente é mais similar a um cerrado (RIBEIRO e WALTER, 1998).

No Cerradão, foram amostrados 536 indivíduos pertencentes a 85 espécies e 38 famílias. O índice de Shannon foi de 3,781, o índice de Simpson foi 0,035 e a equabilidade, 0,851. Fabaceae foi a família com maior número de espécies (16) , detendo 14,26% do IVI. As famílias de maior % IVI estão mostradas na Figura 5.3. As espécies com maior IVI, foram: *Emmotum nitens* (sobre), *Sclerolobium paniculatum*, *Xylopia aromatica* (pimenta de macaco), *Ficus* sp., *Tapirira guianensis* (pau pombo), *Physocalymma scaberrimum* (cega machado) (Figura 5.4).

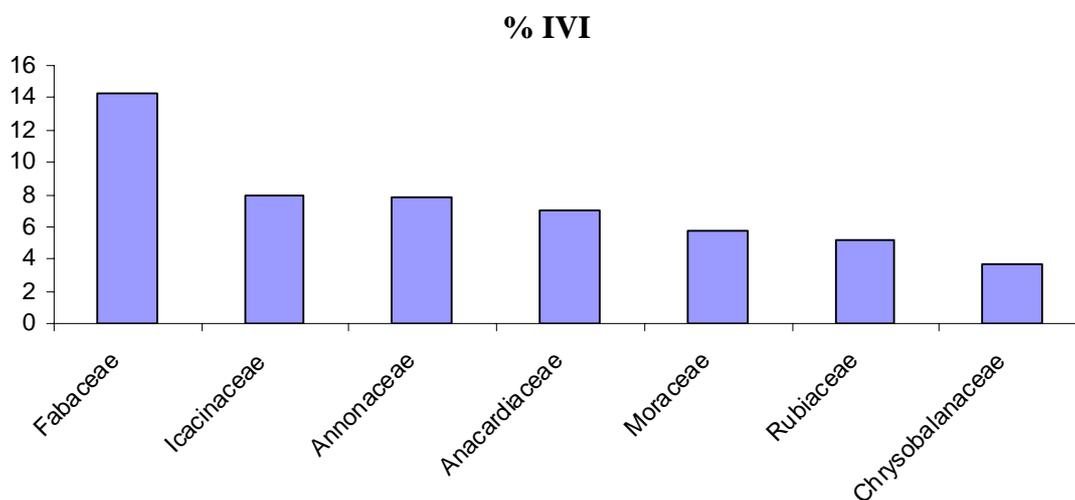


Figura 5.12 - % Índice de valor de importância (IVI) das principais famílias encontradas no Cerradão.

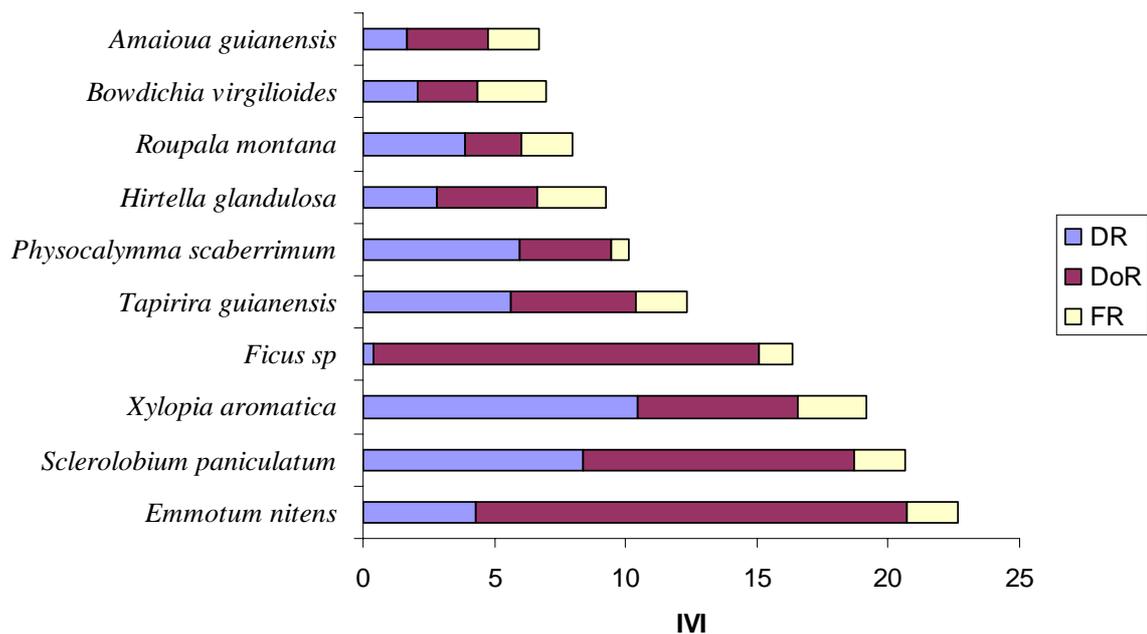


Figura 5.13 - Parâmetros fitossociológicos das dez espécies de maior Índice de valor de importância (IVI) do Cerradão.

A altura média do estrato arbóreo foi de $8,68 \pm 3,64$ m e a área basal de $17,23 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$. A porcentagem de cobertura do dossel variou de 68 a 86%. Os resultados obtidos no presente estudo foram semelhantes aos obtidos para outras áreas de Cerradão (COSTA e ARAÚJO 2001; MIRANDA et al., 2006; PINHEIRO, 2008).

5.1.2 Formações Savânicas

5.1.2.1 Cerrado sentido restrito

O Cerrado sentido restrito, ou Cerrado *stricto sensu*, é uma vegetação xeromórfica caracterizada pela presença de árvores baixas e tortuosas, com ramificações irregulares e retorcidas, e, geralmente, com evidências de queimadas. Os arbustos e subarbustos encontram-se dispersos. As plantas lenhosas apresentam adaptações às condições de seca, como casca com cortiça grossa, fendida ou sulcada e folhas rígidas e coriáceas, embora muitas delas não sofram restrição hídrica durante a estação seca devido às suas raízes profundas.

A densidade arbórea do Cerrado sentido restrito é muito variável em função das condições edáficas, pH, saturação de alumínio, fertilidade, condições hídricas e

profundidade do solo, além da frequência de queimadas. Esses fatores influenciam na estrutura desse tipo de vegetação, originando subdivisões fisionômicas como: Cerrado denso, Cerrado típico e Cerrado ralo, constituindo um gradiente decrescente de densidade de indivíduos do Cerrado denso para o ralo. Além disso, distingue-se ainda o Cerrado rupestre, que se diferencia dos demais pelo substrato tipicamente raso e com presença de afloramentos de rocha (RIBEIRO e WALTER, 1998).

Na área de estudo, o Cerrado ralo ocupa os modelados ondulados a planos do compartimento superior e intermediário do relevo, em especial os das encostas do complexo serrano local. Na porção plana do compartimento superior do relevo, o Cerrado ralo ocorre em alternância com outras fitofisionomias predominantemente abertas, em especial com o Cerrado rupestre. O Cerrado rupestre desenvolve-se em solos litólicos, principalmente em locais onde há afloramentos de quartzito. O Cerrado típico e o denso ocorrem em áreas restritas nas encostas da serra.

No Cerrado sentido restrito, foram amostrados 1155 indivíduos pertencentes a 90 espécies e 37 famílias. O índice de diversidade de Shannon foi de 3,976 e o de Simpson, 0,02565. A equabilidade foi de 0,8836. Os valores dos índices de diversidade e equabilidade obtidos foram superiores àqueles encontrados em outras áreas de Cerrado sentido restrito de GO, DF, MG, BA e MT, estudadas com o mesmo método (FELFILI et al., 1992; FELFILI et al., 1994; FELFILI et al., 2001; NOGUEIRA et al., 2001; FELFILI et al., 2002; FONSECA e SILVA-JÚNIOR, 2004) (Tabela 5.2), evidenciando a importância da região de Pirenópolis como área prioritária para conservação dos remanescentes de cerrado. Esse resultado é concordante com o trabalho de Felfili et al. (2004), que já havia constatado a elevada riqueza de espécies da região, o que a coloca entre os cerrados mais ricos do Brasil.

As famílias com maior IVI foram Fabaceae e Vochysiaceae (Figura 5.5). As espécies mais frequentes foram *Qualea parviflora* (pau terra roxo), *Psidium myrsinoides*, *Pouteria ramiflora* (grão de galo), *Davilla elliptica* (lixerinha), *Mimosa regina*, *Kielmeyera speciosa*, *Xylopia aromatica*, *Anacardium occidentale* (cajueiro), *Hancornia speciosa* (mangaba) e *Kielmeyera coriacea* (Figura 5.6).

A altura média dos indivíduos foi de $3,46 \pm 2,493$ m e a área basal de $6,297 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$. Ao contrário dos índices de diversidade de Shannon e equabilidade, a área basal obtida foi inferior às encontradas nos trabalhos anteriormente citados de Felfili et al. (1992, 1994, 2001 e 2002), Nogueira et al. (2001), Fonseca e Silva-Júnior (2004), provavelmente devido ao predomínio do Cerrado ralo na região. A porcentagem de cobertura do dossel variou de 12 a 60%, evidenciando o gradiente de densidade arbórea entre o Cerrado ralo e o Cerrado denso. O estrato arbustivo-herbáceo apresentou diferentes proporções de vegetação fotossinteticamente ativa, palha e solo/rocha exposto, com predomínio dos dois últimos no período analisado.

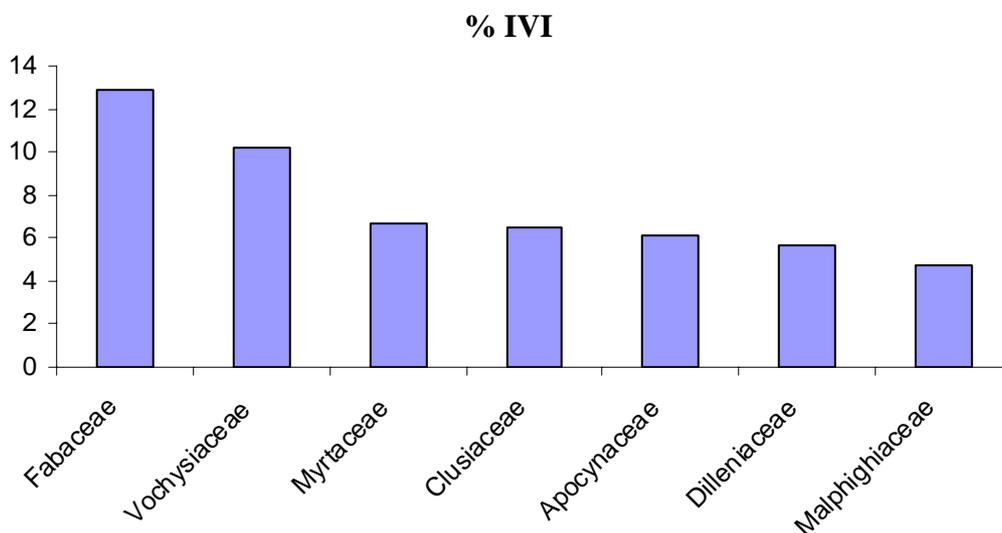


Figura 14.5 - % Índice de valor de importância (IVI) das principais famílias encontradas no Cerrado sentido restrito.

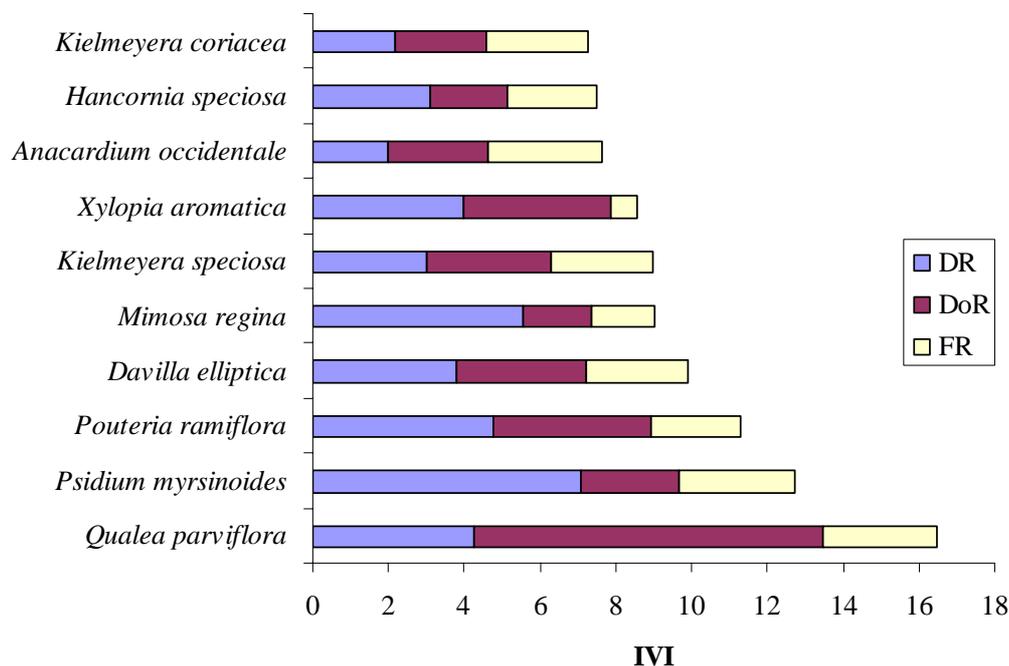


Figura 5.15 - Parâmetros fitossociológicos das dez espécies de maior Índice de valor de importância (IVI) do Cerrado sentido restrito.

Tabela 5.2 - Tabela comparativa entre áreas de Cerrado sentido restrito estudadas com o mesmo método do presente estudo, com respectivos números de espécies, densidade e área basal por hectare, índice de diversidade de Shannon (H') e equabilidade (J').

Áreas	Espécies	Densidade n.ha ⁻¹	Área basal m ² .ha ⁻¹	H'	J'	Fonte	
Chapada dos Veadeiros	Pirenópolis (GO)	90	962	6,30	3,98	0,884	presente estudo
	Serra da Mesa (GO)	92	1019	9,73	3,56	0,791	Felfili et al. 1992 e 1994
	Serra Negra (GO)	92	1271	9,55	3,57	0,781	Felfili et al. 1992 e 1994
	Alto Paraíso (GO)	88	944	8,05	3,43	0,765	Felfili et al. 1992 e 1994
	Vila Propício (GO)	81	831	7,26	3,71	0,843	Felfili et al. 1992 e 1994
Chapada Pratinha	PN Chapada dos Veadeiros (GO)	81	1109	8,82	3,56	0,786	Felfili et al. 1992 e 1994
	Est. Ecol. Águas Emendadas (G)	72	1396	10,76	3,62	0,846	Felfili et al. 1992 e 1994
	Patrocínio (MG)	68	981	5,79	3,53	0,825	Felfili et al. 1992 e 1994
	Silvânia (GO)	68	1348	11,30	3,31	0,774	Felfili et al. 1992 e 1994
	APA Gama Cabeça-de-Veados (L)	66	1394	10,64	3,56	0,866	Felfili et al. 1992 e 1994
	Paracatu (MG)	60	664	5,89	3,11	0,753	Felfili et al. 1992 e 1994
	Parque Burle Marx (DF)	52	552	7,90	3,24	-	Felfili et al. 1992 e 1994
Chapada do São Francisco	PN Brasília (DF)	55	1036	8,32	3,34	0,853	Felfili et al. 1992 e 1994
	Formosa do Rio Preto (BA)	68	628	7,65	3,73	0,844	Felfili et al. 2001
	São Desidério (BA)	67	835	8,33	3,55	0,845	Felfili et al. 2001
	Correntina (BA)	66	686	6,19	3,56	0,850	Felfili et al. 2001
Complexo Nova Xavantina	PN Grande Sertão Veredas (MG)	67	825	8,89	3,44	0,819	Felfili et al. 2001
	Água Boa (MT)	78	995	7,45	3,69	0,837	Felfili et al. 2002
	Canarana (MT)	88	1285	9,60	3,78	0,840	Nogueira et al. 2001
	Nova Xavantina (MT)	95	1212	9,44	3,80	0,827	Nogueira et al. 2001

5.1.3 Formações Campestres

5.1.3.1 Campo Sujo

O Campo Sujo é um tipo fisionômico exclusivamente herbáceo-arbustivo, com arbustos e subarbustos esparsos. Muitas vezes é constituído por indivíduos menos desenvolvidos das espécies arbóreas do Cerrado sentido restrito (RIBEIRO e WALTER, 1998).

Foram amostrados 415 indivíduos pertencentes a 39 espécies e 21 famílias. O índice de Shannon foi de 2,713 e o de Simpson foi de 0,129. A equabilidade foi de 0,741. A altura média dos indivíduos foi de $1,18 \pm 0,773$ m e a área basal, $2,689 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$. As famílias que apresentaram maior IVI foram Vochysiaceae, Malpighiaceae e Erythroxylaceae, as quais detiveram mais de 50% do IVI (Figura 4.7). A maior representatividade da família Vochysiaceae se deve, principalmente, a grande abundância da espécie *Qualea parviflora*.

As principais espécies amostradas foram *Qualea parviflora*, *Byrsonima coccolobifolia* (murici), *Palicourea rigida* (bate-caixa), *Erythroxylum deciduum*, *Erythroxylum tortuosum*, *Mimosa regina*, *Rapanea* sp., *Hancornia speciosa*, *Anacardium occidentale* e *Psidium myrsinoides* (Figura 5.8).

O estrato gramíneo encontrava-se predominantemente seco e apresentava grande proporção de solo/rocha exposto.

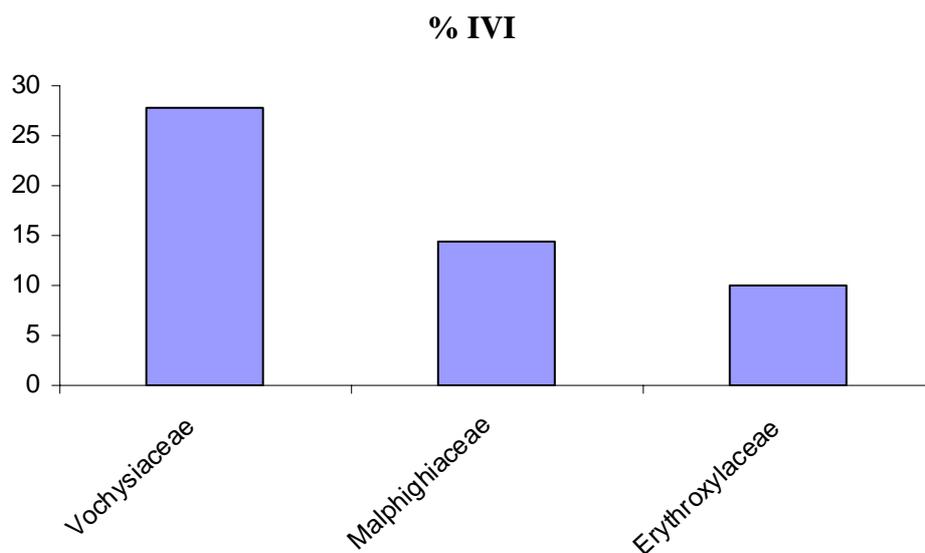


Figura 5.16 - % Índice de valor de importância (IVI) das principais famílias encontradas no Campo Sujo.

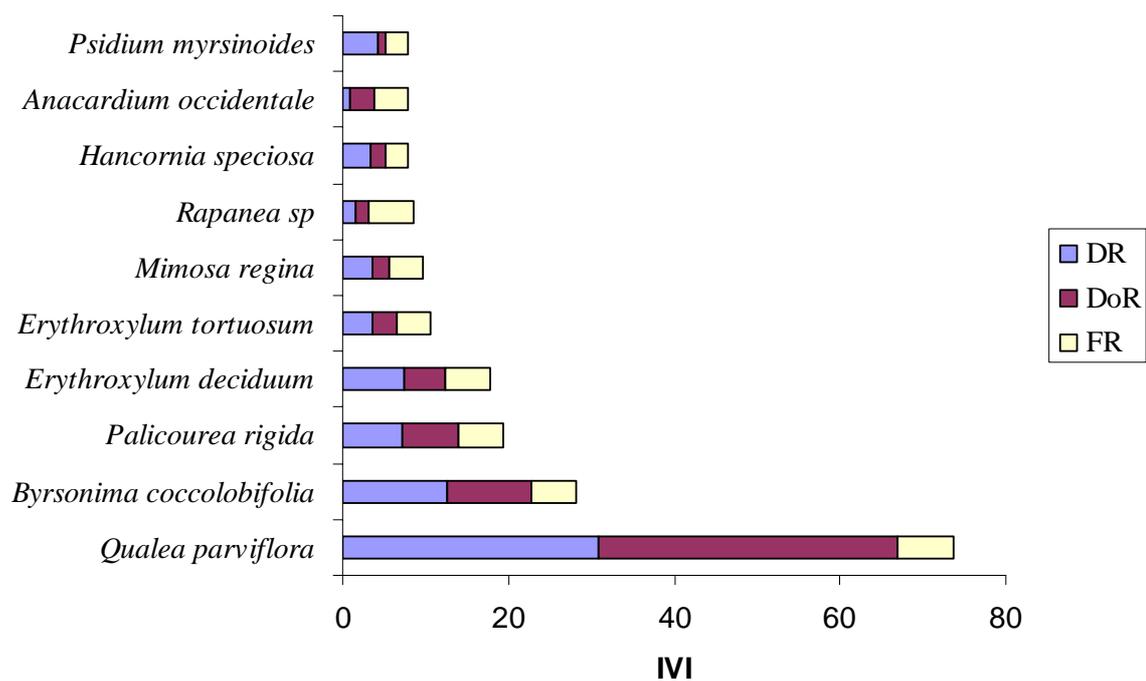


Figura 5.17 - Parâmetros fitossociológicos das dez espécies de maior Índice de valor de importância (IVI) do Campo Sujo.

5.1.3.2 Campo Limpo

O Campo Limpo é uma fitofisionomia predominantemente herbácea, com raros arbustos e ausência completa de árvores. O Campo Limpo também apresenta variações dependentes de particularidades ambientais determinadas pela umidade do solo e topografia. Na presença de lençol freático profundo ocorre o Campo Limpo seco. Nos locais onde o lençol freático aflora, ocorre o Campo Limpo úmido (RIBEIRO e WALTER, 1998). As principais espécies encontradas foram *Vochysia elliptica* (pau doce), *Palicourea rigida* (bate-caixa), *Byrsonima coccolobifolia*, *Rapanea* sp., *Mimosa Regina*, *Vellozia squamata* (canela-de-ema), *Erythroxylum tortuosum*, *Erythroxylum campestre* e *Qualea parviflora*. As áreas de Campo Limpo úmido apresentaram maiores proporções de vegetação fotossinteticamente ativa do que as de Campo Limpo seco, as quais apresentaram grande parte da vegetação não fotossinteticamente ativa (palha). Em ambos os casos houve o predomínio de solo exposto.

5.1.4 Similaridade florística entre as parcelas

A avaliação da similaridade florística entre as parcelas por meio da análise de agrupamento UPGMA, utilizando o índice de Morisita, evidenciou a existência de dois grupos principais: um formado predominantemente pelas fitofisionomias florestais e o outro formado pelas fitofisionomias savânicas e campestres (Figura 5.9). Quanto ao primeiro grupo, as parcelas mais similares foram T3 e T4, de Mata Seca, com índice de similaridade de 0,86, seguidas pelas parcelas T2 e T17, de Cerradão e Cerrado denso, respectivamente, as quais apresentaram índice de similaridade de 0,82. As parcelas de Cerradão e Mata Seca mais similares entre si tiveram índice de Morisita igual a 0,51, que é considerado alto. A afinidade florística entre o Cerradão e a Mata Seca já foi verificada em diversos estudos, como os de Oliveira-Filho e Ratter (1995) e Moreno et al. (2003), corroborando os resultados do presente estudo.

No segundo grupo, as parcelas mais similares foram as de Campo Sujo T8 e T5, e T9 e T6, ambas com índices de similaridade de 0,75. Nesse segundo grupo, observa-se a formação de um subgrupo formado pelas parcelas de Cerrado ralo e rupestre cuja

similaridade florística é justificada pelo fato de que essas fitofisionomias se intercalam na paisagem formando grandes mosaicos. É interessante também destacar que o Cerrado ralo ora é agrupado com Cerrado rupestre, ora com Cerrado denso e ainda com o Campo Sujo, evidenciando seu caráter de transição entre fitofisionomias campestres e savânicas, o que justifica sua associação com os “Campos Cerrados” das classificações de Coutinho (1978) e IBGE (1992), cuja nomenclatura evidencia seu caráter dúbio.

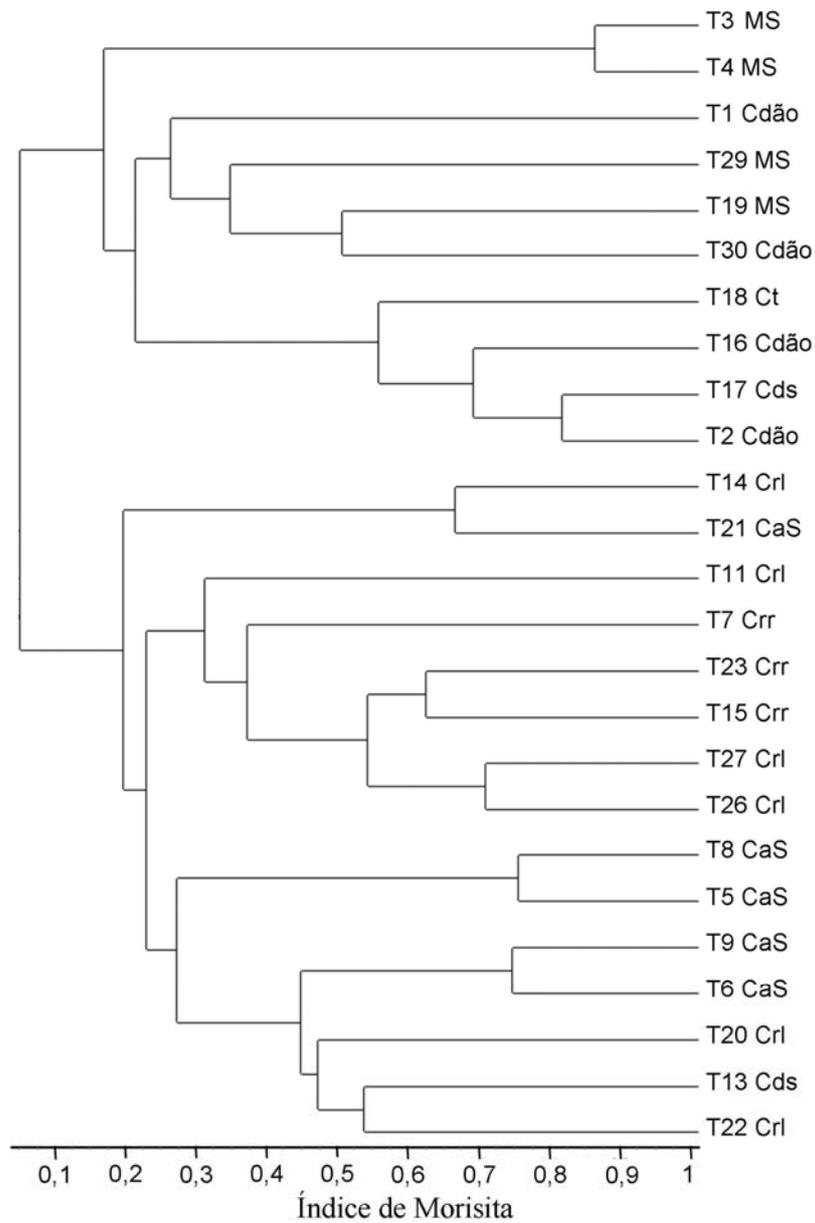


Figura 5.18 - Dendrograma obtido a partir do índice de Morisita. Método de ligação: UPGMA. (MS- Mata Seca; Cdão- Cerradão; Cds- Cerrado denso; Ct- Cerrado típico; Crl- Cerrado ralo; CaS- Campo Sujo).

5.2 Caracterização espectral das fitofisionomias

A Figura 5.10 ilustra os fatores de peso associados aos dois primeiros autovetores (E1 e E2) resultantes da aplicação da ACP sobre os 2022 espectros de reflectância oriundos das 157 bandas Hyperion.

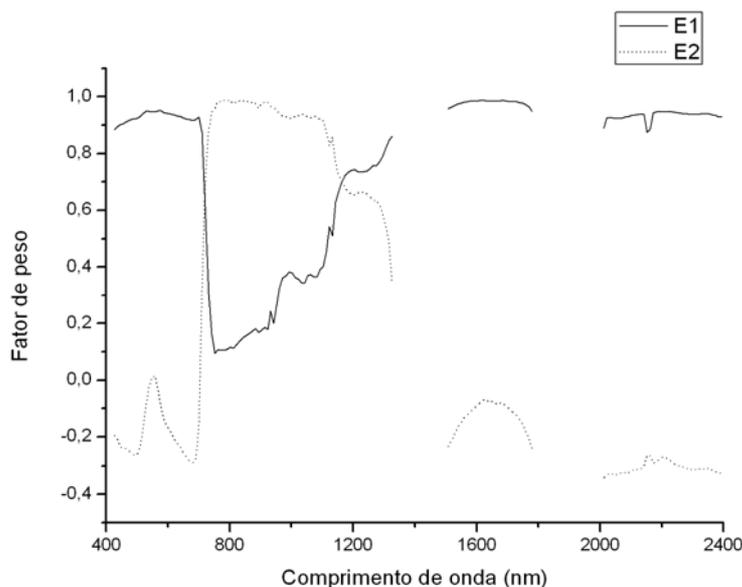


Figura 5.19 - Curva dos autovetores E1 e E2 obtidas a partir da ACP de espectros Hyperion.

A análise dos fatores de peso em função do comprimento de onda fornece uma indicação de como as características espectrais são responsáveis pela variância estatística dos dados em cada CP. A CP1 descreveu a maior parte da variabilidade dos dados, respondendo por 63,8% da variância total. Os fatores de peso associados a essa componente indicam que a variabilidade espectral da CP1 está associada ao contraste da reflectância espectral no visível e SWIR com a reflectância no infravermelho próximo (em torno de 800 nm) das fitofisionomias. A CP2 foi responsável por 32,2% da variância total dos dados. Assim, as duas primeiras CP responderam por 96% da variância. Os fatores de ponderação associados ao autovetor E2 reproduz aproximadamente o espectro da vegetação verde. Os fatores de peso positivo no infravermelho próximo e negativos no visível e SWIR refletem a covariância negativa entre esses intervalos espectrais.

A Figura 5.11 mostra o diagrama de espalhamento dos pixels nas CP1 e CP2. Observam-se dois grandes agrupamentos de dados: um composto pelas formações florestais e outro pelas formações savânicas e campestres. Esse agrupamento no espaço CP é concordante com a análise de agrupamento com o índice de Morisita (Figura 5.9), ou seja, a similaridade florística e estrutural das fitofisionomias observadas em campo se refletiram na similaridade espectral das mesmas nos espectros do Hyperion.

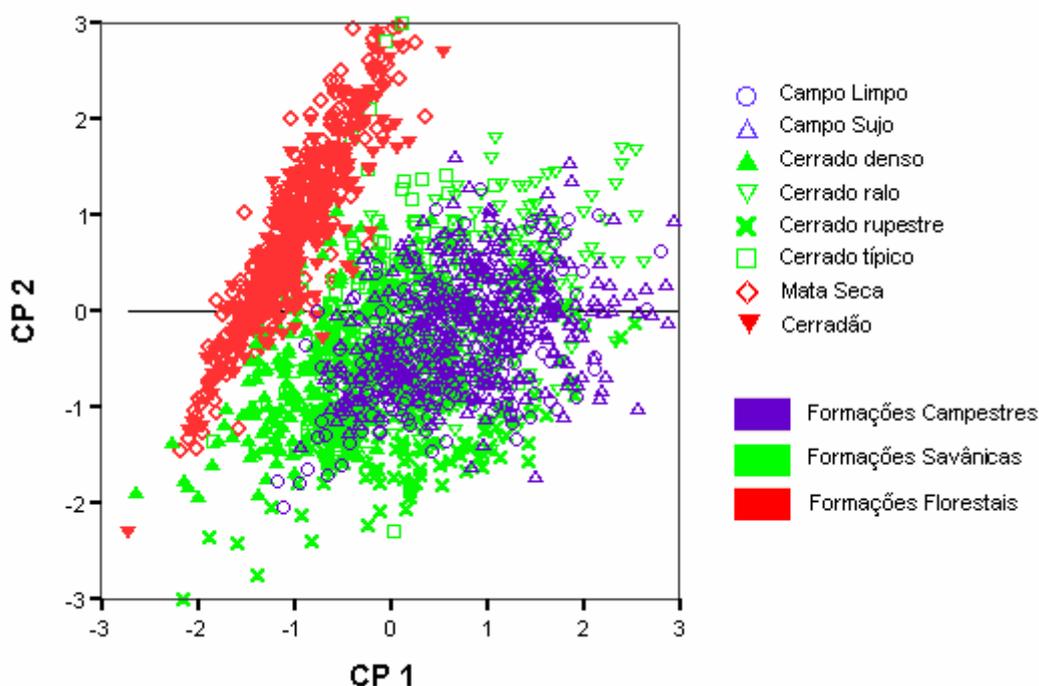
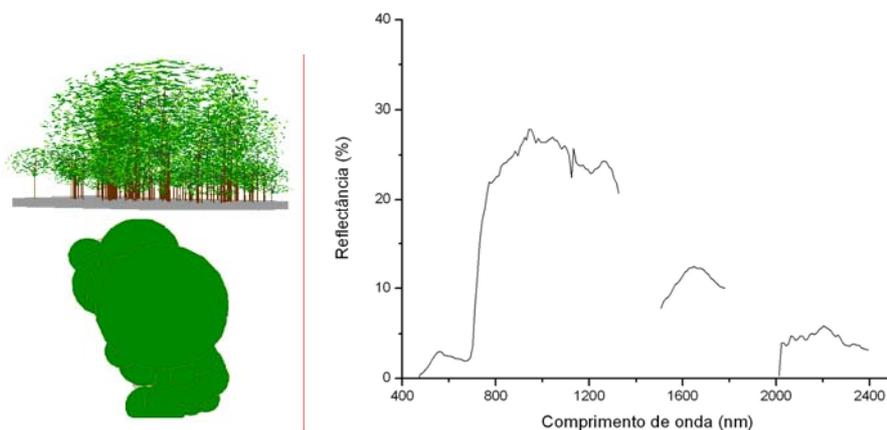


Figura 5.20 - Diagrama de espalhamento dos escores CP1 e CP2 correspondentes às fitofisionomias de cerrado estudadas.

Ainda na Figura 5.11, é possível verificar a similaridade espectral das fitofisionomias: quanto menor a distância entre as amostras, maior a similaridade espectral. O grupo formado pelas formações florestais é separável dos demais no espaço de atributos formados pelas CP1 e CP2. Contudo, a similaridade espectral intra-grupo, ou seja, entre o Cerradão e a Mata Seca, é muito grande, não sendo possível a sua separação nessa análise. As formações savânicas e campestres, bem como suas fitofisionomias associadas, são muito similares entre si. Somente o Cerrado denso mostrou-se mais distinto dos demais.

As Figuras 5.12, 5.13 e 5.14 mostram espectros de reflectância representativos das fitofisionomias da área de estudo, bem como a representação das parcelas correspondentes a esses espectros por meio de diagramas-perfil.

a)



b)

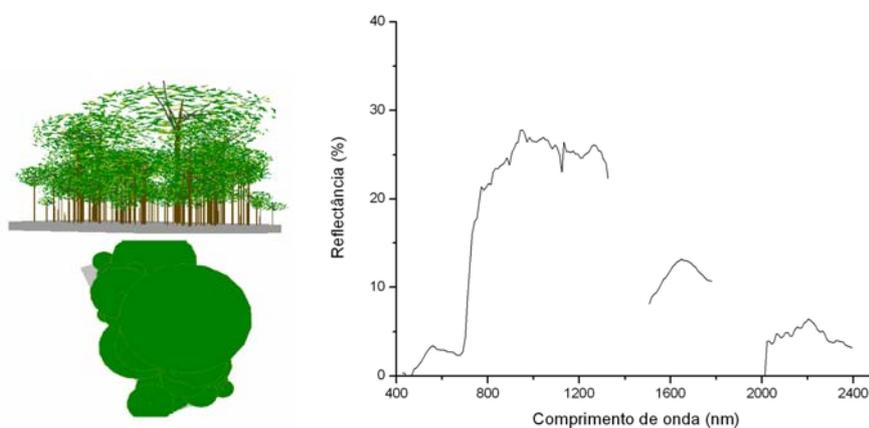
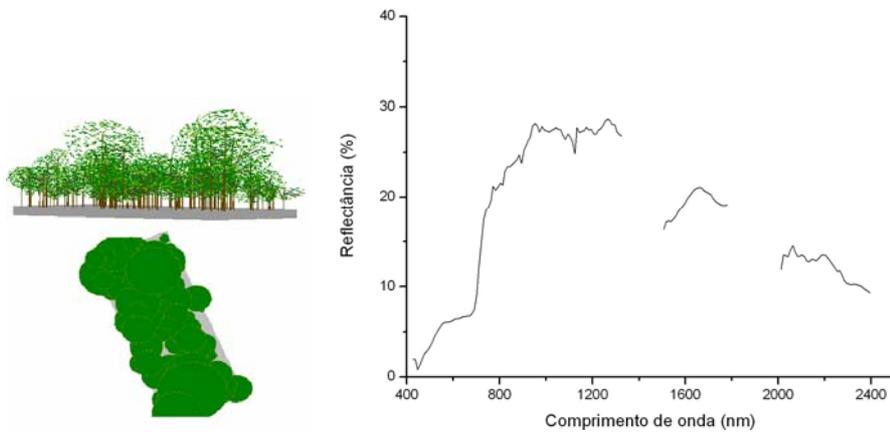
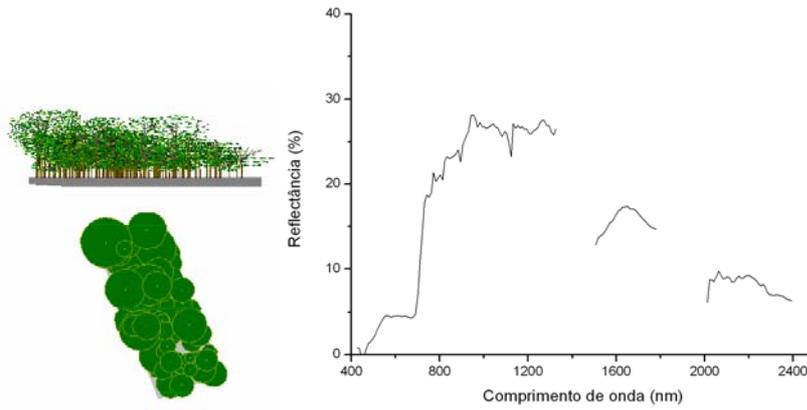


Figura 5.21 - Diagramas-perfil e espectros de reflectância das fitofisionomias florestais (a) Mata Seca Semidecídua e (b) Cerradão.

a)



b)



c)

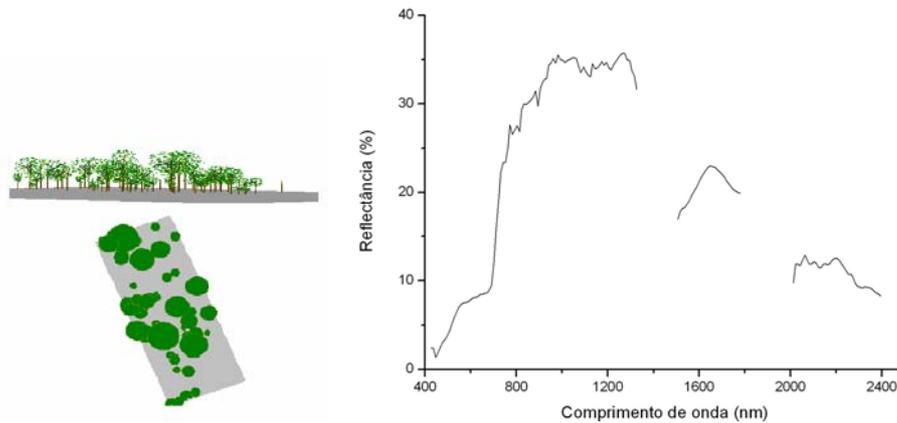


Figura 5.22 - Diagramas-perfil e espectros de reflectância das fitofisionomias savânicas (a) Cerrado Denso; (b) Cerrado Típico; (c) Cerrado Ralo; e (d) Cerrado Rupestre.

(continua)

d)

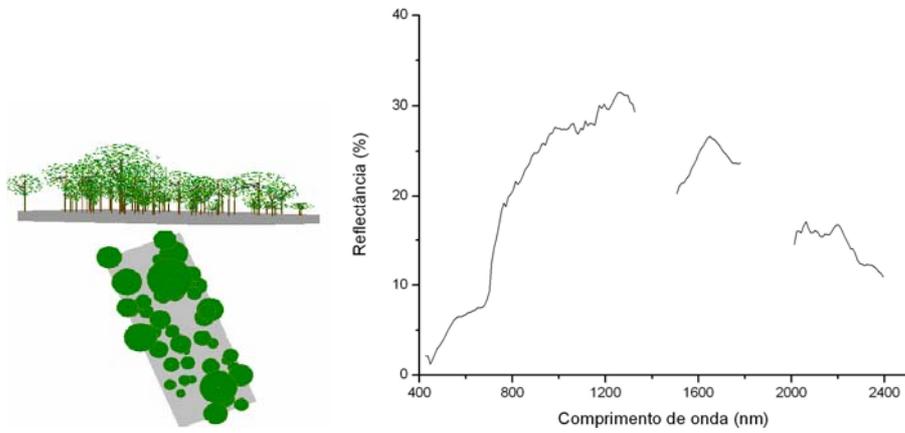


Figura 5.13 – Conclusão.

a)

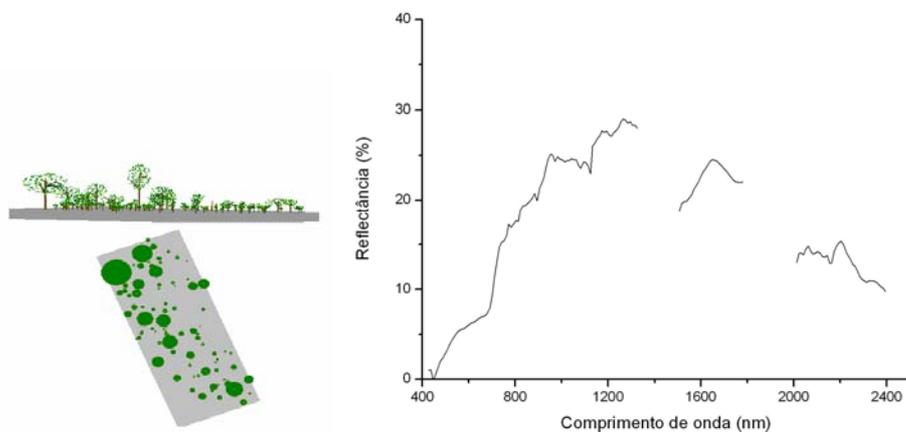


Figura 5.23 – Diagrama-perfil e espectros de reflectância das fitofisionomias campestres (a) Campo Sujo e (b) Campo Limpo. O diagrama-perfil não foi apresentado em (b), pois essa fitofisionomia não teve indivíduos amostrados pelo critério de inclusão estabelecido. (continua)

b)

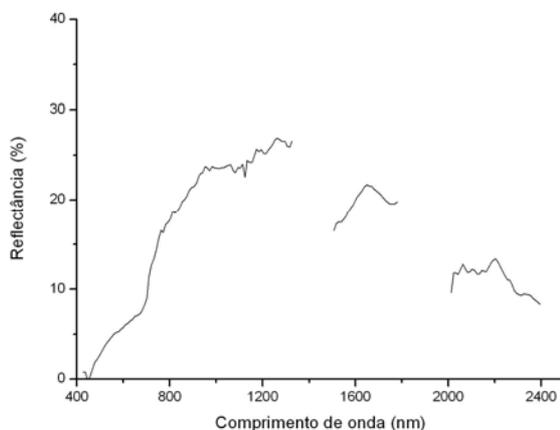


Figura 5.14 – Conclusão.

Por meio da inspeção dos espectros das fitofisionomias (Figuras 5.12 a 5.14), pode-se observar que a reflectância média dos intervalos do visível, SWIR 1 e do SWIR 2 aumenta à medida que passamos das fitofisionomias florestais para as savânicas e campestres. No visível, a maior reflectância média das fitofisionomias mais abertas ocorre devido à maior contribuição do estrato arbustivo/herbáceo que, no presente caso, apresentava-se senescente face à aquisição da imagem no período seco e, também, pela contribuição do solo/rocha em sua resposta espectral. No infravermelho próximo a reflectância das fitofisionomias variou entre 20 e 30%, exceto para o Cerrado ralo e Cerrado rupestre, em que a reflectância foi superior a 30% devido à influência do solo e rochas na sua resposta espectral. Nos intervalos do SWIR, a menor reflectância média das fitofisionomias de maior porte está associada com o teor de umidade da vegetação.

As fitofisionomias florestais mostraram feições de absorção melhor definidas em 680 nm (teor de clorofila) e em 1200 nm (conteúdo de água das folhas) do que as fitofisionomias savânicas e campestres, devido à predominância de vegetação verde contida na massa foliar mais densa. As fitofisionomias savânicas e campestres, com dossel mais esparsos (e.g. Cerrado Ralo, Campo Limpo e Campo Sujo), apresentaram bandas de absorção em 2100 nm e 2300 nm (lignina-celulose) melhor definidas do que as formações florestais. Isso ocorreu devido à maior influência de vegetação não

fotossinteticamente ativa sobre sua resposta espectral no período seco de aquisição da imagem.

5.3 Relações entre parâmetros biofísicos e espectrais

A análise da relação entre os parâmetros biofísicos e espectrais das fitofisionomias foi realizada em três etapas. Primeiramente serão apresentados os resultados obtidos a partir das bandas isoladas do Hyperion e depois os de suas transformações espectrais, que incluem razões de bandas e índices de vegetação.

5.3.1 Bandas isoladas

A Figura 5.15 ilustra a variação dos coeficientes de correlação de Pearson (r) para a relação da reflectância das bandas Hyperion com a porcentagem de cobertura do dossel e com a área basal das fitofisionomias.

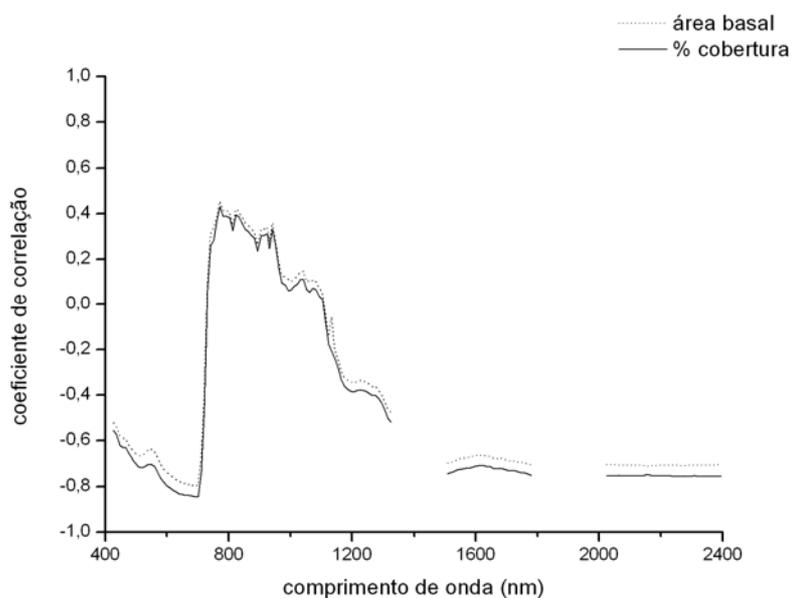


Figura 5.24 - Coeficientes de correlação para a relação da reflectância das bandas Hyperion com a porcentagem de cobertura do dossel e a área basal das fitofisionomias.

Ambos os parâmetros biofísicos apresentaram a mesma tendência por serem altamente correlacionados entre si ($r = +0,78$). As maiores correlações foram obtidas em 680 nm, com valores de r de -0,80 para área basal e de -0,84 para a porcentagem de cobertura do

dossel. A correlação negativa indica que quanto maior for a profundidade da banda de absorção em 680 nm, associada ao teor de clorofila, maior será a porcentagem de cobertura e a área basal das fitofisionomias.

As Figuras 5.16 e 5.17 apresentam os gráficos de dispersão e os modelos de regressão linear obtidos para estimativa da área basal e da porcentagem de cobertura do dossel a partir da reflectância da banda em 680 nm. No caso da área basal (Figura 5.16), o coeficiente de determinação (R^2) foi de 0,63, ou seja, 63% da variação total da área basal foi explicada pelo modelo linear obtido ($\text{area_bas} = 2,17 - 0,23 \cdot R680$). Para porcentagem de cobertura do dossel (Figura 5.17), o modelo linear apresentou coeficiente de determinação (R^2) de 0,91.

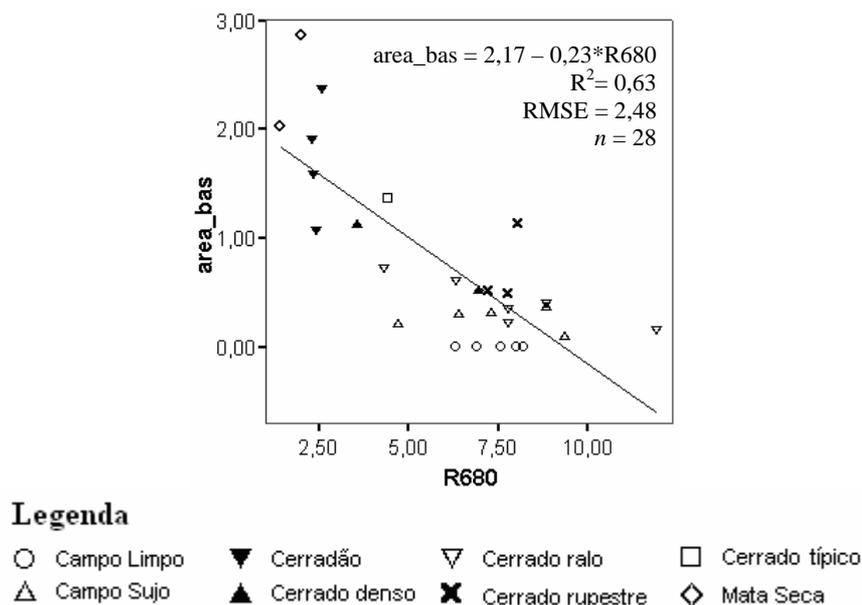


Figura 5.25 - Relações entre área basal, expressa em $\text{m}^2/\text{parcela}$, e reflectância em 680 nm, expressa em %.

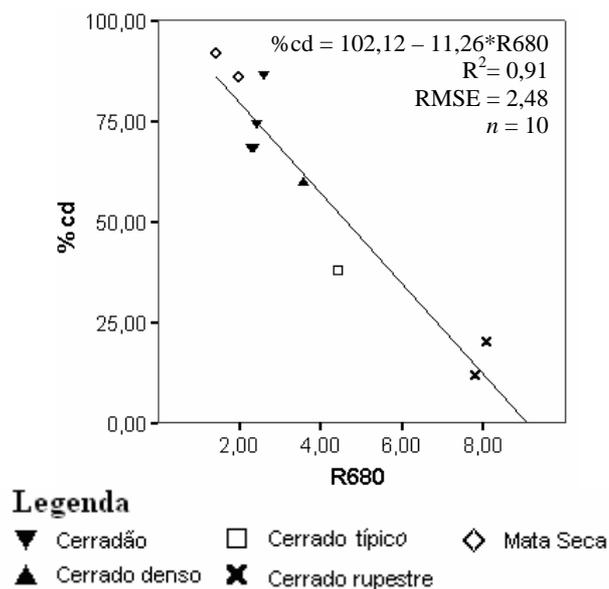


Figura 5.26 - Relações entre a porcentagem de cobertura do dossel e a reflectância em 680 nm.

5.3.2 Razões de bandas

As correlações entre todas as possíveis razões de bandas do sensor Hyperion e a área basal das fitofisionomias estão apresentadas na Figura 5.18. As melhores correlações foram obtidas com razões de bandas que exploram os intervalos do infravermelho próximo e vermelho ($r \geq 0,91$; cor vermelha na Figura 5.18).

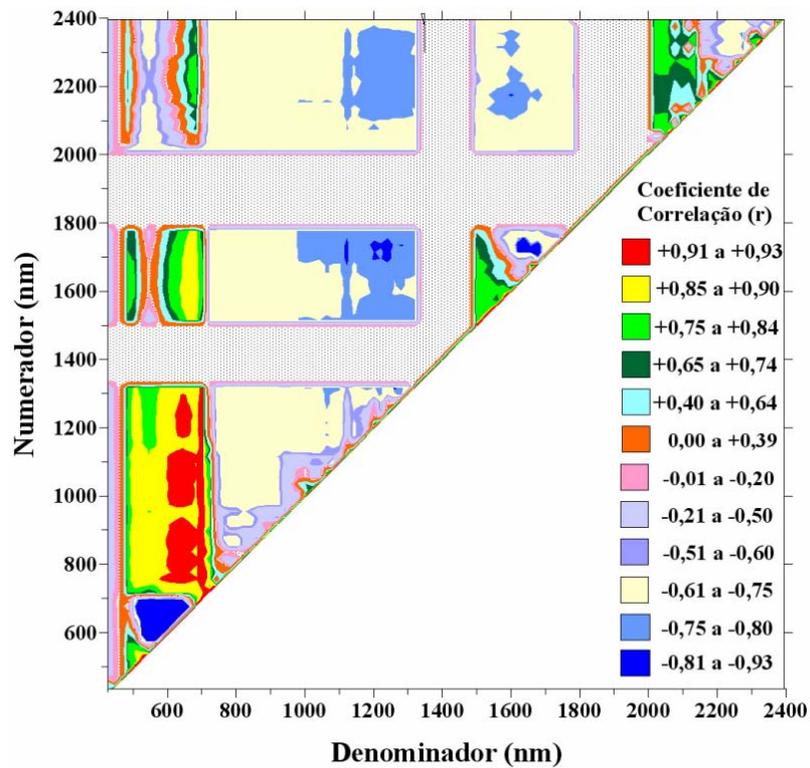


Figura 5.27 - Correlações entre as razões de bandas do sensor Hyperion e a área basal das fitofisionomias.

Razões que exploram o intervalo do verde/vermelho e a borda vermelha também apresentaram altas correlações com a área basal ($r \geq -0,81$). Alguns gráficos de dispersão e modelos de regressão que exploram diferentes intervalos espectrais e que apresentaram bons resultados na estimativa da área basal das fitofisionomias são apresentados na Figura 5.19.

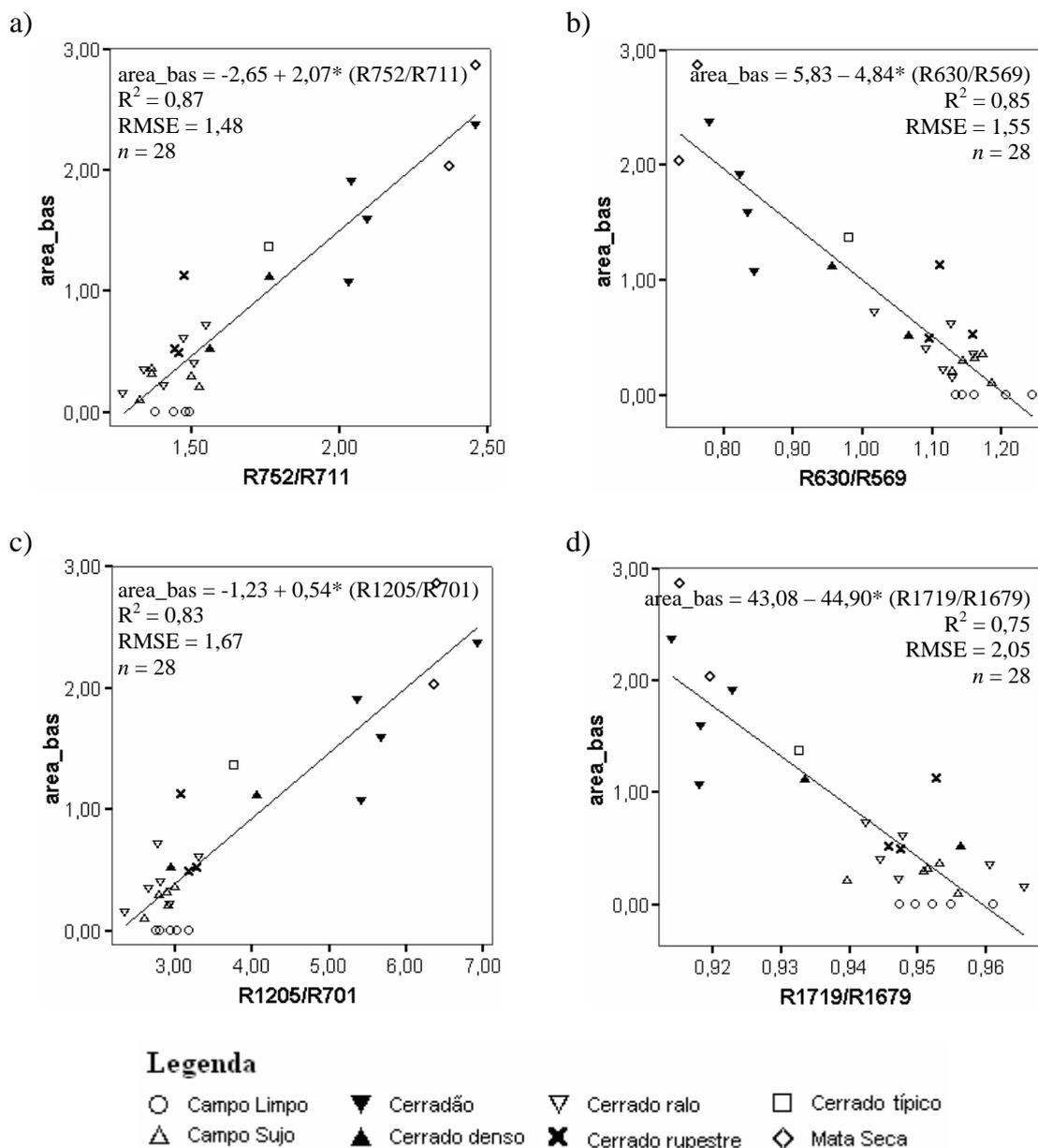


Figura 5.28 – Relações entre valores de área basal ($\text{m}^2/\text{parcela}$) e diferentes razões de bandas.

O modelo de regressão que apresentou melhor resultado para estimativa da área basal das fitofisionomias foi o que explorou a borda vermelha, por meio da razão R752/R711, com coeficiente de determinação 0,87. Os modelos de regressão que se utilizaram das razões de bandas do vermelho/verde (R630/R569) e infravermelho próximo/vermelho (R1205/R701) também apresentaram bons resultados, com coeficiente de determinação

de 0,85 e 0,83, respectivamente. Contudo, ambos apresentaram valor $p = 0,006$ no teste de Levene, ou seja, a variância dos resíduos não foi constante.

A Figura 5.20 mostra as correlações entre as razões de bandas e a porcentagem de cobertura do dossel das fitofisionomias. As melhores correlações foram obtidas com as razões de bandas SWIR2/SWIR1, infravermelho próximo/verde, infravermelho próximo/vermelho, verde/vermelho ($r \geq \pm 0,96$).

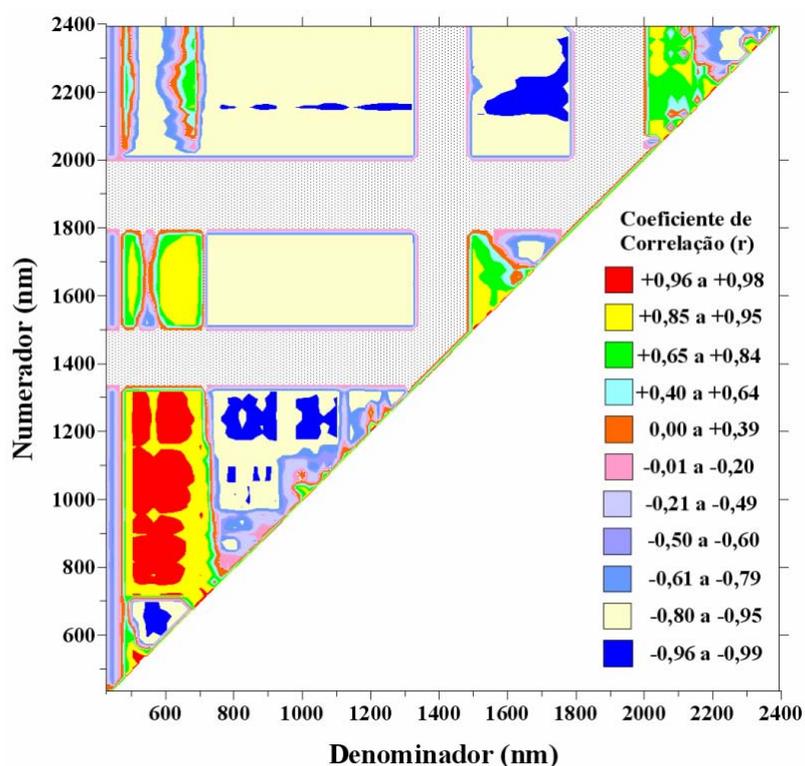


Figura 5.29 - Correlações entre as razões de bandas do sensor Hyperion e a porcentagem de cobertura do dossel das fitofisionomias.

Na Figura 5.21 são apresentados os gráficos de dispersão e os modelos de regressão obtidos com algumas das razões de bandas que apresentaram melhores resultados na estimativa da porcentagem de cobertura do dossel das fitofisionomias. A utilização da razão R2153/R1598 (SWIR2/SWIR1) apresentou coeficiente de determinação de 0,99. As razões R1205/R518 e R1205/R620 (infravermelho próximo/verde e infravermelho próximo/vermelho), apresentaram valores de R^2 de 0,96 e 0,95, respectivamente. A razão R650/R579 apresentou R^2 de 0,95.

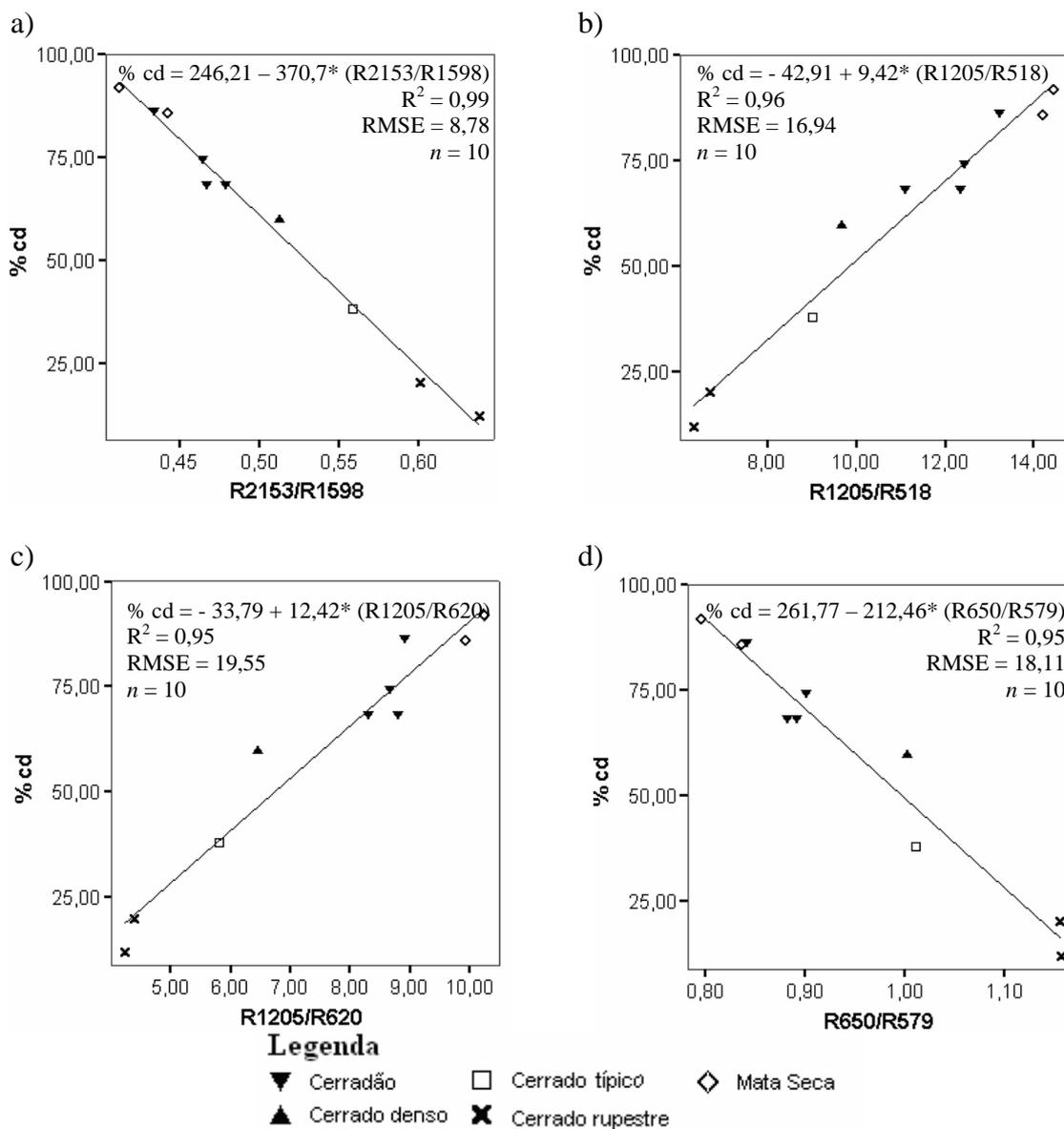


Figura 5.30- Relações entre valores de porcentagem de cobertura do dossel e diferentes razões de bandas.

5.3.3 Índices de vegetação

A Tabela 5.3 apresenta os resultados de correlação para as relações entre os índices de vegetação de bandas estreitas do Hyperion e a área basal das fitofisnomias de Cerrado. Todos os coeficientes de correlação foram significativos a 1% de probabilidade, exceto os índices REPI e ARI. Destacam-se os bons resultados dos índices SR, VIG, VARI, VOG ($r = 0,92$), ARVI ($r = 0,91$), RENDVI e EVI ($r = 0,90$).

A Tabela 5.3 também mostra que os índices de vegetação utilizados são altamente correlacionados entre si.

Tabela 5.3 - Coeficiente de correlação de Pearson (r) para as relações entre os índices de vegetação e a área basal das fitofisionomias.

área basal	SR	ARVI	RENDVI	VOG	REPI	PRI	SIPI	PSRI	CRI	ARI	WBI	NDWI	MSI	NDII	EVI	NDVI	VARI	VIG
área basal	0,92	0,91	0,90	0,92	-0,03	-0,48	-0,86	-0,89	0,76	-0,27	0,68	0,76	-0,74	0,78	0,90	0,87	0,92	0,92
SR	1,00	0,93	0,95	0,96	-0,02	-0,55	-0,85	-0,90	0,89	-0,15	0,79	0,83	-0,82	0,85	0,93	0,92	0,95	0,95
ARVI		1,00	0,98	0,98	-0,16	-0,50	-0,97	-0,98	0,83	-0,16	0,78	0,88	-0,90	0,92	0,99	0,98	0,98	0,97
RENDVI			1,00	0,97	-0,11	-0,60	-0,93	-0,97	0,87	-0,12	0,85	0,88	-0,89	0,91	0,98	0,98	0,98	0,97
VOG				1,00	0,59	-0,52	-0,93	-0,97	0,89	-0,11	0,77	-0,91	-0,90	0,93	0,98	0,97	0,98	0,97
REPI					1,00	0,13	-0,03	0,06	0,01	0,07	-0,21	0,10	-0,12	0,10	-0,05	-0,03	-0,06	-0,05
PRI						1,00	0,47	0,46	-0,61	-0,14	-0,77	-0,59	0,58	-0,58	-0,49	-0,57	-0,45	-0,44
SIPI							1,00	0,97	-0,76	0,15	-0,74	-0,88	0,89	-0,91	-0,96	-0,95	-0,93	-0,91
PSRI								1,00	-0,82	0,15	-0,77	-0,89	0,90	-0,92	-0,98	-0,97	-0,98	-0,97
CRI									1,00	0,27	0,76	0,85	-0,84	0,86	0,83	0,89	0,84	0,84
ARI										1,00	-0,50	0,06	-0,08	0,04	-0,17	0,00	-0,20	-0,23
WBI											1,00	-0,85	-0,84	0,84	0,78	0,81	0,77	0,76
NDWI												1,00	-0,98	-0,98	0,87	0,91	0,87	0,85
MSI													1,00	-0,99	-0,88	-0,93	-0,86	-0,84
NDII														1,00	0,91	0,94	0,90	0,88
EVI															1,00	0,98	0,98	0,98
NDVI																1,00	0,96	0,95
VARI																	1,00	0,99
VIG																		1,00

* valores sombreados indicam correlações significativas a 1% de probabilidade.

Existe uma relação linear entre os índices de vegetação analisados e a área basal das fitofisionomias de Cerrado. Essa relação é positiva para os índices VOG, VIG, SR, VARI, RENDVI, EVI e NDVI, e negativa para os índices PSRI e SIPI. Alguns gráficos de dispersão e modelos de regressão ilustrando a relação entre os índices de vegetação e a área basal das fitofisionomias estão ilustrados na Figura 5.22.

De uma forma geral, os índices que apresentaram melhores resultados na estimativa da área basal das fitofisionomias de Cerrado foram os relacionados aos pigmentos foliares (VIG, SR, VARI, EVI) e à borda vermelha (VOG, RENDVI).

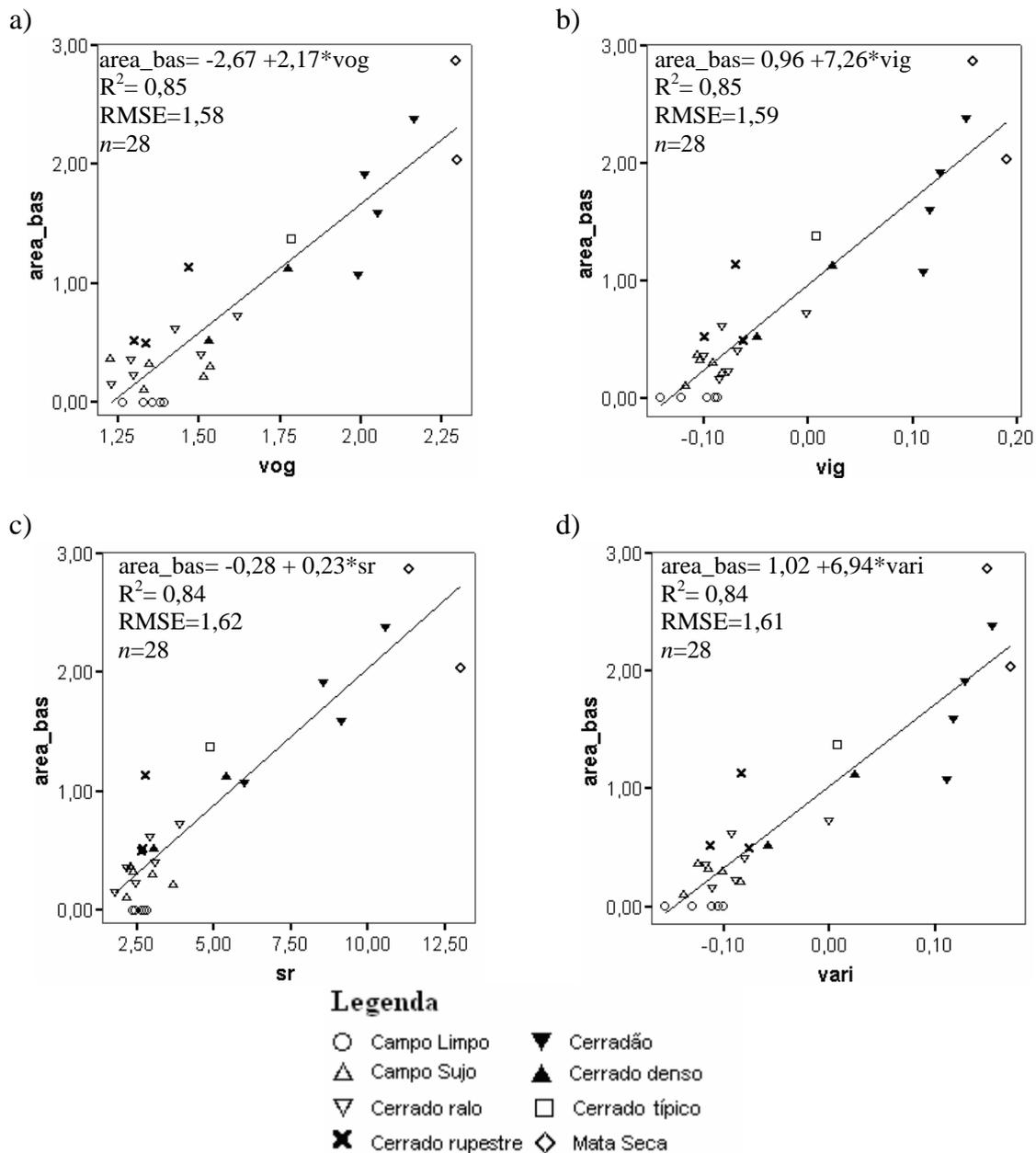


Figura 5.31 – Relações da área basal ($\text{m}^2/\text{parcela}$) com os índices de vegetação (a) VOG; (b) VIG; (c) SR; (d) VARI.

Assim como para a área basal, a maioria dos coeficientes de correlação entre os índices e a porcentagem de cobertura do dossel foi significativa a 1% de probabilidade, exceto para os índices REPI, PRI e ARI (Tabela 5.4). As maiores correlações foram obtidas com os índices NDWI, NDVI, VARI, ARVI, VOG, VIG, NDVI, RENDVI ($r = +0,97$).

Tabela 5.4 - Coeficiente de correlação de Pearson (r) para a relação entre os índices de vegetação e a porcentagem de cobertura do dossel das fitofisionomias.

% cobertura	SR	ARVI	RENDVI	VOG	REPI	PRI	SIPI	PSRI	CRI	ARI	WBI	NDWI	MSI	NDII	EVI	NDVI	VARI	VIG
% cobertura	0,96	0,97	0,97	0,97	-0,14	-0,69	-0,95	-0,96	0,89	0,00	0,88	0,97	-0,95	0,96	0,96	0,97	0,97	0,97
SR	1,00	0,95	0,97	0,97	-0,15	-0,68	-0,90	-0,93	0,92	-0,06	0,90	0,92	-0,91	0,93	0,94	0,94	0,97	0,99
ARVI		1,00	0,99	0,97	-0,22	-0,68	-0,99	-0,98	0,83	-0,06	0,89	0,95	-0,98	0,99	0,99	0,98	0,98	0,97
RENDVI			1,00	0,97	-0,24	-0,73	-0,96	-0,97	0,84	-0,14	0,94	0,94	-0,95	0,97	0,99	0,97	0,99	0,99
VOG				1,00	-0,05	-0,70	-0,95	-0,96	-0,91	0,00	0,88	0,96	-0,96	0,97	0,95	0,97	0,97	0,98
REPI					1,00	0,05	0,17	0,20	0,14	0,49	-0,36	-0,03	0,09	-0,12	-0,29	-0,15	-0,23	-0,21
PRI						1,00	0,66	0,59	-0,51	0,51	-0,85	-0,70	0,61	-0,65	-0,65	-0,61	-0,64	-0,65
SIPI							1,00	0,98	-0,79	0,01	-0,85	-0,95	0,99	-0,99	-0,98	-0,98	-0,96	-0,94
PSRI								1,00	-0,85	-0,04	-0,86	-0,95	0,98	-0,98	-0,99	-0,99	-0,99	-0,97
CRI									1,00	0,28	0,71	0,88	-0,85	0,86	0,81	0,87	0,87	0,89
ARI										1,00	-0,38	0,08	-0,10	0,06	-0,07	0,07	-0,05	-0,05
WBI											1,00	0,86	0,82	0,85	0,90	0,86	0,91	0,91
NDWI												1,00	-0,96	0,96	0,94	0,97	0,94	0,93
MSI													1,00	1,00	-0,97	-0,99	-0,96	-0,95
NDII														1,00	0,98	0,99	0,97	0,96
EVI															1,00	0,99	0,99	0,97
NDVI																1,00	0,98	0,97
VARI																	1,00	1,00
VIG																		1,00

* valores sombreados indicam correlações significativas a 1% de probabilidade.

Quatorze índices de vegetação, dos dezoito analisados, apresentaram valores de R^2 maiores que 0,75 nas estimativas da porcentagem de cobertura. Os gráficos de dispersão e modelos de regressão obtidos com os índices NDWI, NDVI, ARVI e VARI estão ilustrados na Figura 5.23. Esses resultados demonstram a importância dos índices de vegetação relacionados com o teor de água e pigmentos das folhas para estimativa desse parâmetro.

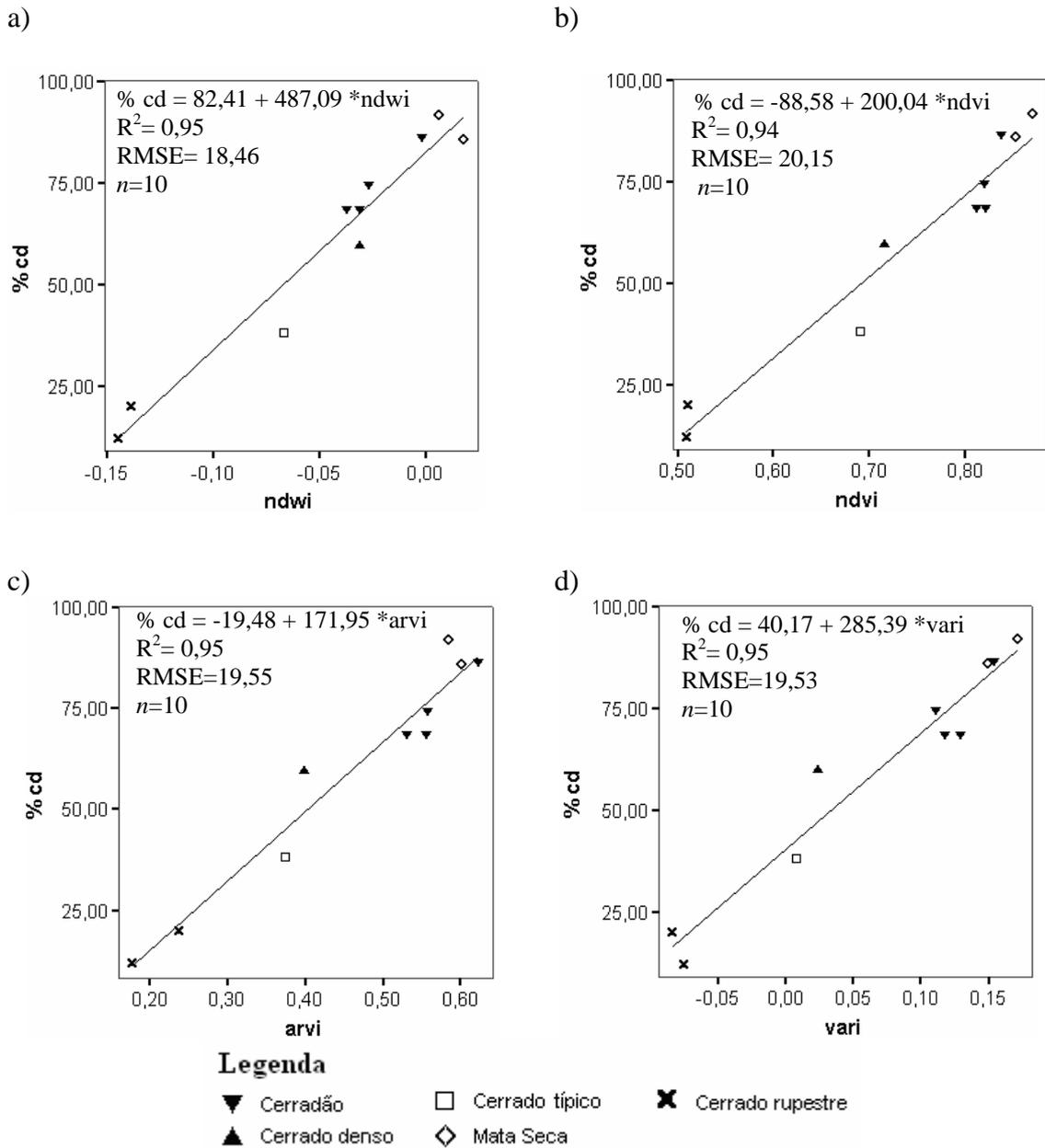


Figura 5.32 - Relações da porcentagem de cobertura do dossel com os índices de vegetação (a) NDWI; (b) NDVI; (c) ARVI; (d) VARI.

Por meio dos resultados obtidos com a análise da relação entre a porcentagem de cobertura do dossel e os dados espectrais do Hyperion, pode-se concluir que a utilização do densitômetro mostrou-se uma interessante alternativa para a estimativa da cobertura do dossel, por ser um método rápido e de baixo custo e que apresentou altas correlações com os dados de sensoriamento remoto. Outra vantagem na utilização do densitômetro para validação dos dados obtidos por sensoriamento remoto está no fato de que ele é um

estimador não viesado da porcentagem de cobertura do dossel uma vez que a visada do instrumento é feita exatamente na direção vertical. Já instrumentos cuja medição envolve um ângulo de visada (tal como fotografias hemisféricas, por exemplo) tendem a ser influenciados pela altura das árvores e área amostrada (JENNINGS et al., 1999). Além disso, o densitômetro considera os espaços abertos existentes nas copas das árvores, o que dá uma estimativa mais realista da cobertura dada pela copa das árvores, principalmente em áreas de vegetação semidecídua.

5.4 Classificações das imagens

Em um primeiro experimento, quatro funções kernel foram utilizadas a fim de comparar seus efeitos nos resultados das classificações SVM das fitofisionomias: linear, polinomial, função de base radial (RBF) e sigmóide. Para a função polinomial, foram testados diferentes graus do polinômio: 2º, 3º, 4º e 5º graus. Dentre as possibilidades de kernel disponíveis, a que apresentou melhor resultado foi o linear, com acurácia total de 59,90% e índice Kappa 0,5402. A Tabela 5.5 sintetiza os resultados obtidos com cada uma das funções kernel. Para o kernel polinomial, observa-se que a acurácia total aumenta com o aumento do grau do polinômio. Contudo, a complexidade do algoritmo também aumenta, assim como o tempo de processamento. Em todo caso, o SVM linear requereu maior tempo de processamento.

Tabela 5.5 – Acurácia total e índice Kappa obtidos com os diferentes kernels.

	Linear	Polinomial			RBF	Sigmóide	
		2º grau	3º grau	4º grau			5º grau
Acurácia total	59,90%	47,62%	49,92%	51,06%	52,21%	48,28%	43,86%
índice Kappa	0,5402	0,3995	0,4252	0,4383	0,4516	0,4071	0,3574

*Neste caso, o parâmetro de penalidade C foi fixado em 100.

A matriz de confusão obtida com o SVM linear está ilustrada na Tabela 5.6 e sintetiza a confusão espectral obtida com as demais classificações SVM. Por meio da análise dessa matriz de confusão, pode-se observar que a classe Mata Seca foi melhor discriminada, tendo 79,07% dos pixels corretamente classificados. A Mata Seca foi confundida somente com o Cerradão e vice-versa.

Dentre as fitofisionomias savânicas, o Cerrado denso foi a classe melhor discriminada, com 72,31% dos pixels corretamente classificados. O Cerrado rupestre obteve uma boa precisão de classificação (72%), mas foi confundido com as fitofisionomias nas quais a influência do substrato também determina fortemente sua reflectância espectral: Cerrado ralo, Campo Sujo e Campo Limpo.

As fitofisionomias mais abertas (Campo Limpo, Campo Sujo e Cerrado ralo) foram as que apresentaram menor precisão de classificação, pois foram muito confundidas entre si. A dificuldade na discriminação entre essas classes reside no fato de que as mesmas apresentam um tapete graminóide contínuo, constituído predominantemente de material senescente no período analisado. Além disso, os indivíduos arbustivo-arbóreos são muito esparsos, apresentando pouca contribuição na resposta espectral dessas classes.

Tabela 5.6 - Matriz de confusão do SVM linear (expressa em porcentagem).

SVM Linear										
Acurácia total = 59,90%										
índice Kappa = 0,5402										
Classe	Referência									
	CaL	CaS	Cdao	Cds	CrI	CrR	Ct	MS	Comissão	Omissão
CaL	47,67	12,64	0,00	0,00	25,58	8,00	6,15	0,00	50,00	52,33
CaS	18,60	47,13	0,00	1,54	24,42	12,00	10,77	0,00	55,43	52,87
Cdao	0,00	0,00	72,09	1,54	0,00	0,00	1,54	20,93	24,39	27,91
Cds	3,49	3,45	0,00	72,31	2,33	0,00	12,31	0,00	25,40	27,69
CrI	11,63	20,69	0,00	0,00	34,88	8,00	4,62	0,00	53,85	65,12
CrR	8,14	4,60	0,00	0,00	2,33	72,00	0,00	0,00	26,53	28,00
Ct	10,47	11,49	0,00	24,62	10,47	0,00	63,08	0,00	51,76	36,92
MS	0,00	0,00	27,91	0,00	0,00	0,00	1,54	79,07	26,88	20,93
Total	100	100	100	100	100	100	100	100		

Estabelecida a função kernel que apresentou melhor resultado na classificação das fitofisionomias, foram testados diferentes valores para o parâmetro de penalidade C. A acurácia total das classificações utilizando o modelo linear, com os valores de C iguais a 100, 1000 e 10000 estão apresentados na Tabela 5.7, que indica que o parâmetro de penalidade que se mostrou mais adequado foi 100.

Tabela 5. 7 – Acurácia total da classificação SVM Linear com diferentes valores de C.

SVM Linear	
C = 100	59,90%
C = 1000	53,52%
C = 10000	48,12%

A fim de verificar a influência da seleção de atributos nos resultados da classificação, o mesmo valor de C e tipo de kernel utilizados na classificação que apresentou melhor resultado com todas as bandas do Hyperion foram então utilizados nas bandas selecionadas por meio procedimento passo a passo (Estatística F), que maximiza a distância de Mahalanobis entre as classes mais semelhantes. Nessa etapa de seleção de atributos, 15 bandas foram selecionadas: B467, B569, B691, B711, B721, B752, B813, B884, B1316, B1326, B1598, B1618, B1749, B2244, B2355. A acurácia total da classificação SVM utilizando o kernel linear com parâmetro C igual a 100 aplicada nessas 15 bandas foi de 51,72%, inferior a obtida sem a etapa de seleção de atributos. Portanto, esse resultado demonstra a baixa sensibilidade da classificação SVM ao fenômeno Hughes e que, muitas vezes, o subconjunto de dados selecionado para redução da dimensionalidade não é o mais adequado para a separação das classes de interesse. A etapa de seleção de atributos, então, pode ser vantajosa quando se sabe previamente as bandas importantes na discriminação do alvo de interesse ou a estratégia de busca aplicável para o caso em questão. No caso do presente estudo, a estratégia de seleção de atributos utilizada não se mostrou adequada, pois piorou os resultados da classificação.

As 15 bandas selecionadas também serviram como dados de entrada na classificação MAXVER, que teve acurácia total de 53, 68% e índice Kappa 0,4694 (Tabela 5.8). Os resultados da classificação MAXVER e SVM linear foram estatisticamente diferentes, mostrando a superioridade da classificação SVM. Na classificação MAXVER, a classe melhor discriminada foi o Cerrado rupestre (78% dos pixels corretamente classificados), seguida pelo Cerradão (69,77%) e Mata Seca (66,28%).

Tabela 5.8 - Matriz de confusão do MAXVER (expressa em porcentagem).

MAXVER										
Acurácia total = 53,68%										
índice Kappa = 0,4694										
Classe	Referência									
	CaL	CaS	Cdao	Cds	CrI	Crr	Ct	MS	Comissão	Omissão
CaL	50,00	24,14	0,00	3,08	26,74	8,00	9,23	0,00	56,57	50,00
CaS	15,12	32,18	0,00	6,15	13,95	6,00	7,69	0,00	56,92	67,82
Cdao	0,00	0,00	69,77	4,62	0,00	0,00	0,00	29,07	31,82	30,23
Cds	5,81	4,60	0,00	55,38	6,98	0,00	20,00	4,65	47,06	44,62
CrI	15,12	19,54	1,16	1,54	36,05	6,00	6,15	0,00	55,71	63,95
Crr	4,65	6,90	0,00	3,08	6,98	78,00	1,54	0,00	32,76	22,00
Ct	9,30	12,64	1,16	26,15	9,30	2,00	52,31	0,00	57,50	47,69
MS	0,00	0,00	27,91	0,00	0,00	0,00	3,08	66,28	31,33	33,72
Total	100	100	100	100	100	100	100	100		

O resultado da classificação pelo método SAM foi muito inferior aos demais métodos, com acurácia total de 38,79 % e Kappa de 0,30 (Tabela 5.9). A classificação SAM superestimou a classe Cerrado rupestre, a qual foi confundida, principalmente, com o Campo Sujo e Campo Limpo. A Mata Seca foi a classe melhor discriminada (74,42%). A inferioridade da classificação SAM quando comparada com a classificação SVM e MAXVER demonstra que os valores de reflectância das bandas do Hyperion é mais importante do que a forma dos espectros das fitofisionomias para discriminação das classes de vegetação do Cerrado.

Tabela 5.9 - Matriz de confusão do SAM (expressa em porcentagem).

SAM										
Acurácia total = 38,79%										
índice Kappa = 0,30										
Classe	Referência									
	CaL	CaS	Cdao	Cds	CrI	Crr	Ct	MS	Comissão	Omissão
CaL	13,95	4,60	0,00	1,54	8,14	14,00	0,00	0,00	61,29	86,05
CaS	12,79	19,54	0,00	0,00	37,21	12,00	3,08	0,00	75,00	80,46
Cdao	0,00	0,00	50,00	13,85	0,00	0,00	1,54	25,58	42,67	50,00
Cds	3,49	8,05	2,33	47,69	3,49	0,00	38,46	0,00	56,34	52,31
CrI	27,91	26,44	0,00	13,85	19,77	6,00	16,92	0,00	80,46	80,23
Crr	32,56	28,74	0,00	0,00	18,60	62,00	4,62	0,00	69,90	38,00
Ct	9,30	12,64	0,00	23,08	12,79	6,00	33,85	0,00	68,57	66,15
MS	0,00	0,00	47,67	0,00	0,00	0,00	1,54	74,42	39,62	25,58
Total	100	100	100	100	100	100	100	100		

Os resultados das classificações SVM linear, MAXVER e SAM estão ilustrados na Figura 5.24.

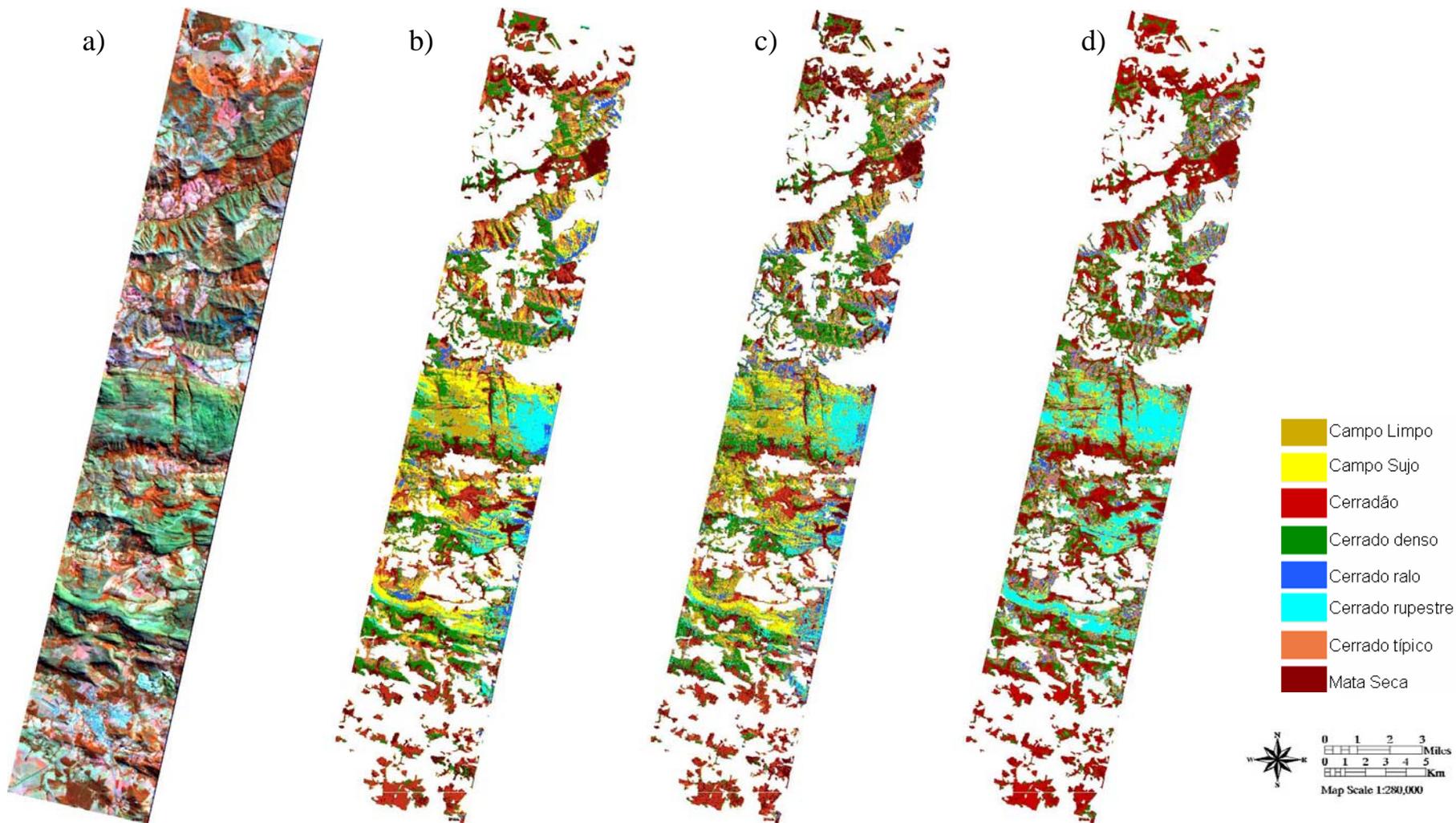


Figura 5.33 – (a) Composição falsa-cor com as bandas do Hyperion posicionadas em 864 nm (R), 1648 nm (G) e 640 nm (B). Os resultados das classificações SVM linear, MaxVer e SAM são mostrados em (b), (c) e (d), respectivamente. As classes que não foram objeto do presente estudo foram mascaradas em branco.

As simulações de sensores multiespectrais a partir dos dados Hyperion permitiram quantificar o ganho na utilização dos dados de alta resolução espectral do Hyperion em relação aos dados multiespectrais dos sensores a bordo dos satélites Quickbird, SPOT 5 e Landsat 7 na classificação das fitofisionomias. A acurácia das classificações SVM aplicadas nos dados simulados e nos dados do Hyperion é mostrada na Figura 5.25. A acurácia da classificação SVM aplicada nos dados hiperespectrais do Hyperion foi cerca de 6 a 13% superior aos da classificação SVM aplicada aos dados multiespectrais simulados. Deve-se destacar, contudo, que essa análise não considerou a relação sinal-ruído dos sensores simulados, a qual é superior a do sensor Hyperion.

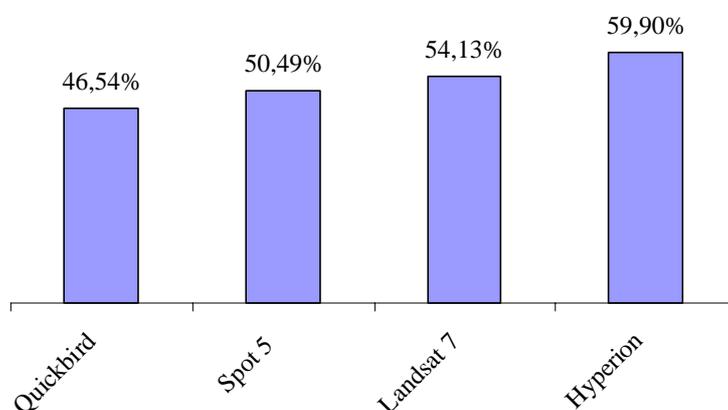


Figura 5.34 – Acurácia total da classificação SVM aplicada nos dados do Hyperion e nos dados simulados dos sensores a bordo dos satélites Quickbird (câmera multiespectral), SPOT 5 (HRVIR) e Landsat 7 (ETM⁺).

Dentre as dificuldades encontradas na classificação das imagens para discriminação das fitofisionomias de Cerrado, por qualquer um dos três procedimentos, pode-se citar: (1) a elevada diversidade de tipos fisionômicos; (2) a distribuição das fitofisionomias em mosaicos formados por pequenas “manchas” ou em gradiente, o que faz com que, dada a resolução espacial da imagem Hyperion, essa variabilidade seja perdida; (3) diferenças no grau de conservação entre fragmentos de mesma fitofisionomia e mesmo no interior de um único fragmento e (4) influência do substrato nos espectros de reflectância das fitofisionomias cujo estrato arbóreo é pouco expressivo ou inexistente.

5.5 Análise integrada dos resultados com o MDE

A integração dos resultados da classificação SVM Linear (melhor desempenho) e das estimativas de porcentagem de cobertura do dossel a partir do NDVI (alta correlação e uso freqüente na literatura) com o MDE permitiu ilustrar a distribuição espacial das fitofisionomias e de seus parâmetros biofísicos em função da altitude do terreno. A Figura 5.26 ilustra a imagem Hyperion (Figura 5.26a), a classificação SVM (Figura 5.26b) e a porcentagem de cobertura do dossel (Figura 5.26c) de uma porção central da área de estudo, projetados sobre o MDE.

Na Figura 5.26, é possível verificar que as fitofisionomias com dominância do estrato arbóreo ocupam, preferencialmente, locais de menor altitude e vertentes das escarpas da serra, bem como áreas encaixadas no relevo. Essas áreas, por terem solos mais profundos e terem maior umidade, permitem o estabelecimento desse tipo de vegetação, tal como matas, cerradões e cerrados mais densos. As áreas de maior altitude correspondem ao topo da serra, onde, em muitos locais, o quartzito aflora. Essas áreas apresentam solos mais rasos e pobres, favorecendo o estabelecimento das fitofisionomias campestres e savânicas, que geralmente se alternam num gradiente, tais como o Campo Limpo, o Campo Sujo, o Cerrado ralo e o Cerrado rupestre.

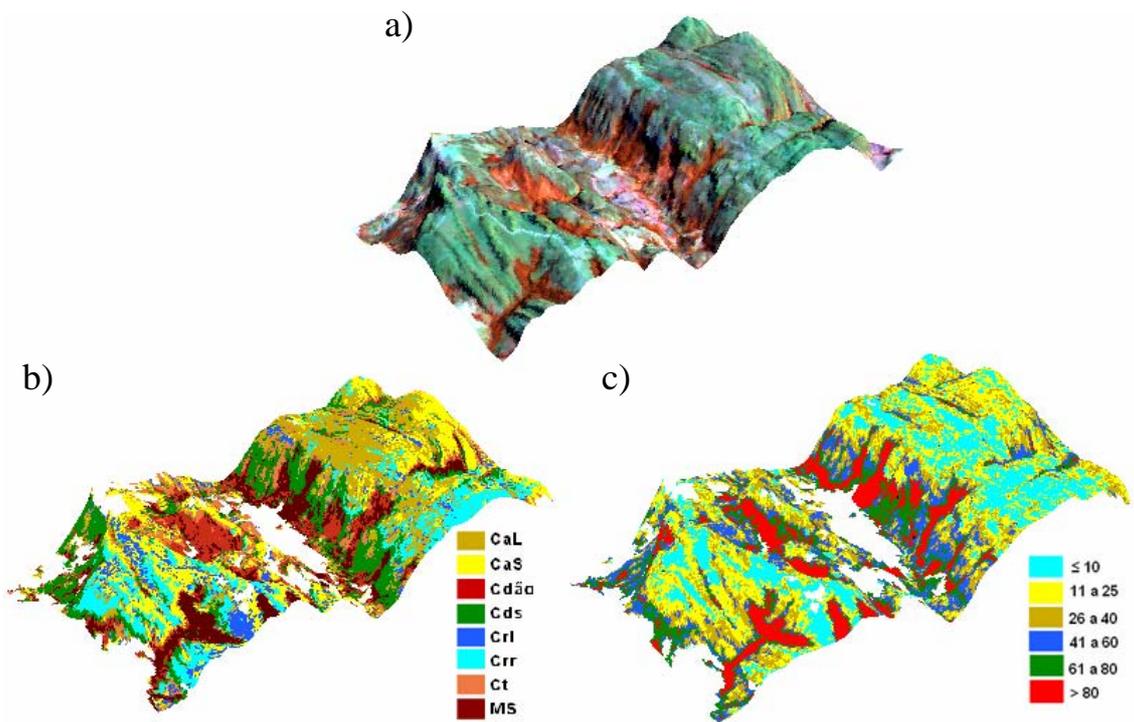


Figura 5.35– (a) Composição falsa-cor da porção central da área de estudo com as bandas do Hyperion posicionadas em 864 nm (R), 1648 nm (G) e 640 nm (B); (b) classificação SVM; (c) estimativa da porcentagem de cobertura do dossel a partir dos dados de NDVI . Todos projetados no MDE com exagero vertical de 5.

A Figura 5.27 apresenta a variabilidade da porcentagem de cobertura do dossel em função da altitude em dois transectos estabelecidos na imagem, ilustrando o fato de que a porcentagem de cobertura das fitofisionomias é maior nas áreas de menor altitude e vai decrescendo à medida que a altitude aumenta.

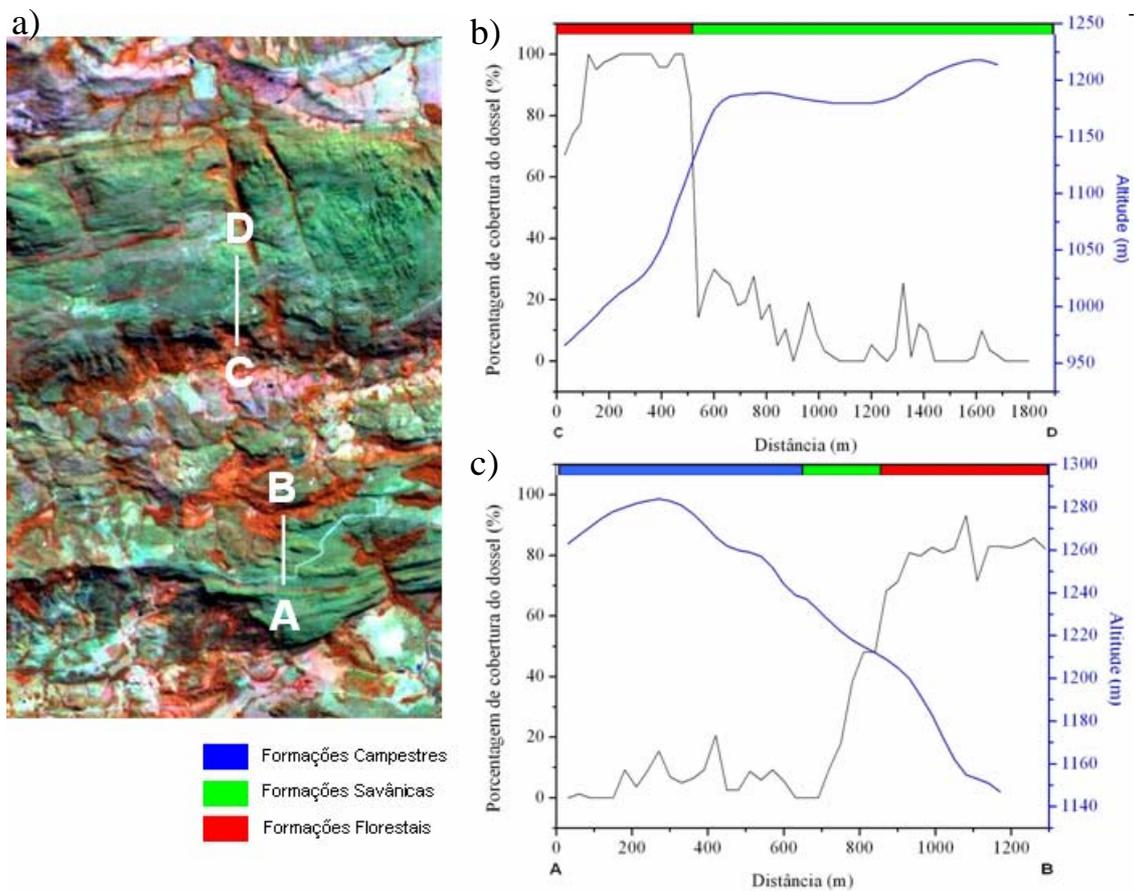


Figura 5.36 – (a) Imagem Hyperion indicando a localização dos transectos AB e CD; (b) Porcentagem de cobertura do dossel e altitude correspondente ao transecto CD; (c) Porcentagem de cobertura do dossel e altitude correspondente ao transecto AB.

O diagrama de espalhamento da porcentagem de cobertura do dossel e dos dados de elevação correspondentes a 495 pixels escolhidos aleatoriamente em toda área de estudo está ilustrado na Figura 5.28.

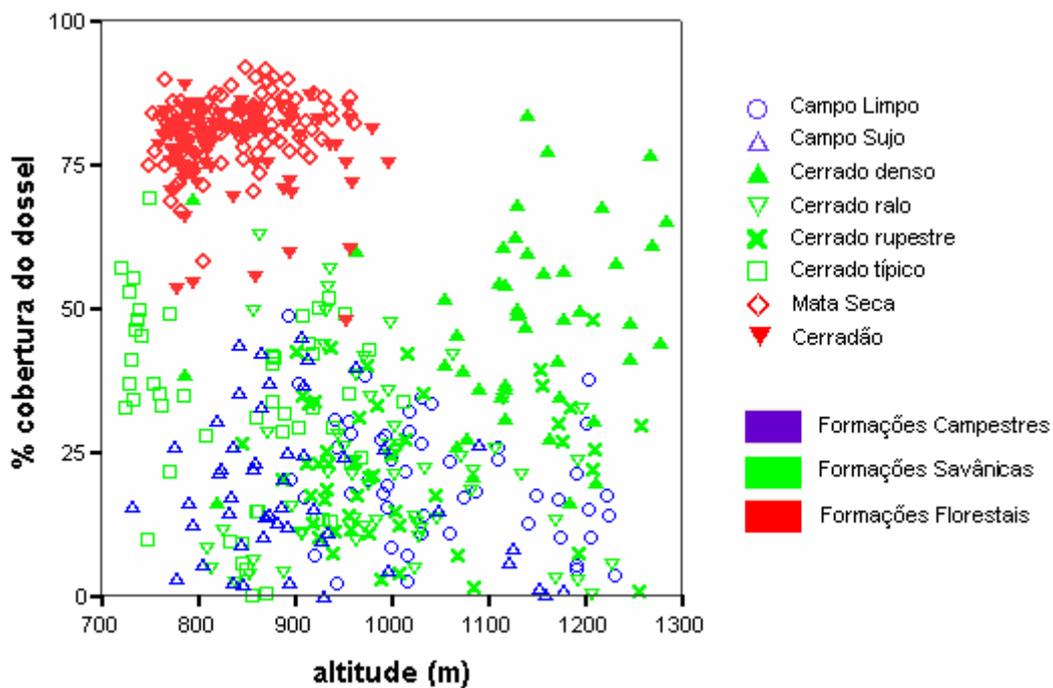


Figura 5. 37 – Diagrama de espalhamento da porcentagem de cobertura do dossel e elevação de amostras da vegetação na área de estudo.

A Figura 5.28 demonstra que algumas das fitofisionomias ocorrem, preferencialmente, em determinadas altitudes. O Cerradão e a Mata Seca Semidecídua ocorrem em altitudes inferiores a 1000 m. O Cerrado rupestre ocorre em cotas acima de 900 m por estarem associados aos quartzitos, rochas mais resistentes ao intemperismo e erosão, resultando, no processo de formação edáfica, em solos pouco desenvolvidos.

6. CONCLUSÕES

Os resultados deste trabalho demonstram que dados hiperespectrais podem melhorar a classificação e o mapeamento das fitofisionomias de Cerrado, em relação aos dados multiespectrais tradicionais, possibilitando o cálculo de índices de vegetação de bandas estreitas que são altamente correlacionados com parâmetros biofísicos, como porcentagem de cobertura do dossel e área basal. No entanto, o uso de dados do sensor Hyperion/EO-1 não possibilitou uma adequada discriminação entre si das classes Campo Sujo, Campo Limpo e Cerrado ralo com nenhuma das técnicas de classificação testadas. É possível que tal diferenciação na faixa óptica só possa ser feita usando uma abordagem multitemporal para explorar as diferentes respostas espectrais das fitofisionomias com a sazonalidade.

Considerando os objetivos específicos definidos na Introdução (Capítulo 1), chegou-se às seguintes conclusões:

(1) As fitofisionomias de Cerrado da região de Pirenópolis apresentaram diversidade e parâmetros estruturais próximos aos descritos na literatura para áreas de Cerrado do Brasil Central. Contudo, o Cerrado sentido restrito teve valores de diversidade superiores, demonstrando a importância da região como área prioritária para conservação dos remanescentes de Cerrado;

(2) A análise espectral das fitofisionomias por meio da ACP refletiu a similaridade florística e estrutural observada em campo e pela análise de agrupamento das fitofisionomias com o método UPGMA utilizando o índice de Morisita. Os espectros das formações florestais apresentaram bandas de absorção melhor definidas em 680 nm (conteúdo de clorofila) e 1200 nm (conteúdo de água das folhas) do que as fitofisionomias savânicas e campestres, devido ao predomínio da vegetação verde contida na massa foliar mais densa. Já as formações savânicas e campestres apresentaram bandas de absorção em 2100 nm e 2300 nm (lignina-celulose) melhor definidas do que as formações florestais. Isso ocorreu devido à maior influência de

vegetação não fotossinteticamente ativa sobre sua resposta espectral no período seco de aquisição da imagem;

(3) Quanto à estimativa dos parâmetros biofísicos, verificou-se que as transformações espectrais (razões de bandas e índices de vegetação) apresentaram melhores resultados nas estimativas da área basal e porcentagem de cobertura do dossel das fitofisionomias do que as bandas isoladas do Hyperion. Dentre as razões de bandas que apresentaram melhores resultados estão as que exploraram comprimentos de onda relacionados à borda vermelha, pigmentos foliares e teor de água das folhas. De forma concordante, os melhores índices de vegetação para tais estimativas foram VOG, VIG, NDVI, NDWI e VARI;

(4) A classificação que apresentou melhor desempenho na discriminação das fitofisionomias foi a SVM linear, com parâmetro de penalidade C igual a 100, sendo superior a MAXVER e a SAM. No presente caso, a utilização de valores superiores de C fez com que o classificador perdesse sua capacidade de generalização. A classificação SVM demonstrou não ser sensível ao efeito Hughes. A etapa de seleção de atributos, então, pode ser vantajosa quando se sabe previamente as bandas importantes na discriminação do alvo de interesse ou a estratégia de busca aplicável para o caso em questão. No presente estudo, a estratégia de seleção de atributos piorou os resultados da classificação quando comparado com a classificação SVM com todas as bandas;

(5) As classes melhor discriminadas foram as de maior porte (Mata Seca Semidecídua, Cerradão e Cerrado denso). É interessante destacar que os dados hiperespectrais do Hyperion permitiram a discriminação das subdivisões fisionômicas do Cerrado sentido restrito (Cerrado denso, Cerrado ralo, Cerrado típico, Cerrado rupestre) com acurácia superior a 60%, exceto para o Cerrado ralo, na classificação SVM linear e MAXVER. As fitofisionomias campestres e o Cerrado ralo não tiveram boa precisão quanto à separabilidade entre elas, apresentando erros de omissão e comissão superiores a 50% em todas as classificações utilizadas;

(6) As simulações de sensores permitiram quantificar o ganho na utilização dos dados de alta resolução espectral do Hyperion em relação aos dados multiespectrais dos

sensores a bordo dos satélites Quickbird, SPOT 5 e Landsat 7 na classificação das fitofisionomias. A acurácia da classificação SVM aplicada nos dados do Hyperion foi cerca de 6 a 13% superior aos dados multiespectrais simulados. Contudo, é importante destacar que esses resultados não levam em conta as diferenças entre a relação sinal-ruído desses sensores;

(7) A análise integrada dos resultados de classificação SVM e das estimativas de porcentagem de cobertura do dossel a partir do NDVI do Hyperion com os dados de elevação do MDE mostrou que algumas fitofisionomias ocorrem preferencialmente em determinadas altitudes. Esse é o caso do Cerrado rupestre, que ocupa cotas normalmente superiores a 900 metros, e o caso da Mata Seca e Cerradão, que ocupam cotas inferiores a 1000 m na área de estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA GOIÂNIA DE TRANSPORTES E CARGAS – AGETOP/Governo do Estado de Goiás. **Estudo de Impacto Ambiental (EIA) da “Estrada Parque: Acesso Pirenópolis – Parque dos Pireneus e Acesso Cocalzinho de Goiás – Parque dos Pireneus”**. Goiânia, 2005. 308 p.

ALMEIDA, T.I.R.; SOUZA FILHO, C.R. Principal components analysis applied to feature-oriented band ratios of hyperspectral data: a tool for vegetation studies. **International Journal of Remote Sensing**, v.25, n. 22, p. 5005-5023, 2004.

APAN, A.; HELD, A.; PHINN, S.; MARKLEY, J. Detecting sugarcane ‘orange rust’ disease using EO-1 Hyperion hyperspectral imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v.25, n. 2, p. 489-498, 2004.

ASPINALL, R.J.; MARCUS, W.A.; BOARDMAN, J.W. Considerations in collecting, processing, and analyzing high spatial resolution hyperspectral data for environmental investigations. **J. Geograph. Syst.**, v.4, n.1, p.15-29, 2002.

BELWARD, A.S. Spectral characteristics of vegetation, soil and water in the visible, near-infrared and middle-infrared wavelengths. In: Belward. A.S.; Valenzuela, C.R. (Ed). **Remote sensing and geographical information systems for resource management in developing countries**. Netherlands: Kluwer, p.31-54, 1991.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Edital Probio 02/2004. Projeto executivo B.02.02.109. **Mapeamento de cobertura vegetal do bioma Cerrado: relatório final**. Brasília, DF, 2007. 93 p. Projeto concluído. Coordenador técnico: Edson Eyji Sano. Unidades executoras: Embrapa Cerrados, Universidade Federal de Uberlândia, Universidade Federal de Goiás. Disponível em: <http://mapas.mma.gov.br/geodados/brasil/vegetacao/vegetacao2002/cerrado/documentos/relatorio_final.pdf>. Acesso em: 13 ago. 2007.

CARVALHO JR., O.A.; GUIMARÃES, R.F.; MARTINS, E.S.; CARVALHO, A.P.F.; GOMES, R.A.T. Análise comparativa do processo de identificação automatizada de membros finais a partir de imagens com diferentes resoluções espectrais para a região de Niquelândia (AVIRIS, ETM+ e ASTER). **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 23, n. 1, p. 39-50, 2005.

CARVALHO JR., O.A.C.; RIBEIRO, M.N.C.; MARTINS, E.S.; GUIMARÃES, MENESES, P.R.; GUIMARÃES, R.F. Análise de dados hiperespectrais em minas de manganês laterítico, São João da Aliança (GO). **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 25, n. 2, p. 199-212, 2007.

CARVALHO JR., O.A.C.; LOPES, R.A.S.; GUIMARÃES, P.H.; GUIMARÃES, R.F.; CARVALHO, A.P.F.; MARTINS, E.S.; PEDREÑO, J.N. Processamento digital de imagens hiperespectrais pelo método multiple endmember spectral mixture models (MESMA) para análise da vegetação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE

SENSORIAMENTO REMOTO, 11. (SBSR), 2003, Belo Horizonte. **Anais...São José dos Campos: INPE, 2003. p.1053-1060. CD-ROM ISBN 85-17- 00017-X. Disponível em: <<http://urlib.net/ltid.inpe.br/sbsr/2002/11.19.10.54>> Acesso em: 23 jan 2009.**

CLARK, L.C.; ROBERTS, D.A.; CLARK, D.B. Hyperspectral discrimination of tropical rain forest tree species at leaf to crown scales. **Remote Sensing of Environment**, v. 96, n. 3-4, p. 375-398, 2005.

CLARK, R.N.; ROUSH, T.L. Reflectance spectroscopy: Quantitative analysis techniques for remote sensing applications. **Journal of Geophysical Research**, v. 89, n. 7, p. 6329-6340, 1984.

CORTES, C.; VAPNIK, V.N. Support vectors network. **Machine Learning**, v.20 , n.1 , p. 1-25, 1995.

COSTA, A.A.; ARAÚJO, G.M. Comparação da vegetação arbórea de cerrado e de cerrado na Reserva do Panga, Uberlândia, Minas Gerais. **Acta Bot. Bras.** , v. 15, n.1, p. 63-72 p., 2001.

COUTINHO, L.M. O conceito de Cerrado. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 1, n.1, p. 17-23, 1978.

CRÓSTA, A.P.; SOUZA FILHO, C.R. Hyperspectral remote sensing for mineral mapping: a case study at Alto Paraíso de Goiás, Central Brazil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 30, n. 3, p. 547-550, 2000.

CRÓSTA, A.P.; SABINE, C.; TARANIK, J.V. Hydrothermal alteration mapping at Bodie, California, using Aviris hyperspectral data. **Remote Sensing of Environment**, v. 65, n. 3, p.309-319, 1998.

CURRAN, P.J.; WINDHAM, W.R.; GHOLZ, H.L. Exploring the relationship between reflectance red edge and chlorophyll concentration in slash pine leaves. **Tree Physiology**, v.15, n. 3, p. 203-206, 1995.

DASH, J.; MATHUR, A.; FOODY, G.M.; CURRAN, P.J.; CHIPMAN, J.W.; LILLESAND, T.M. Land cover classification using multi-temporal MERIS vegetation indices. **International Journal of Remote Sensing**, v. 28, n.6, p. 1137-1159, 2007.

DATT, B. A new reflectance index for remote sensing of chlorophyll content in higher plants: tests using eucalyptus leaves. **Journal of Plant Physiology**, v. 154, n.1, p. 30-36, 1999.

DAUGHTRY, C.S.T. Discriminating crop residues from soil by short-wave infrared reflectance. **Agronomy Journal**, v. 93, n.1, p. 125-131, 2001.

DURIGAN, G.; RATTER, J.A.; BRIDGEWATER, S.; SIQUEIRA, M.F.; FRANCO, G.A.D.C. Padrões fitogeográficos do cerrado paulista sob uma perspectiva regional. **Hoehnea**, v. 30, n.1, p. 39-51, 2003.

ELVIDGE, C.D. Visible and near infrared reflectance characteristics of dry plant materials. **International Journal of Remote Sensing**, v.11, n.10, p. 1775-1795, 1990.

FELDE, G.W.; ANDERSON, G.P.; COOLEY, T.W.; MATTHEW, M.W.; ADLER-GOLDEN, S.M.; BERK, A.; LEE, J. Analysis of Hyperion data with the FLAASH atmospheric correction algorithm. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, n.3, 21-25 jul. 2003, [S.l.]. **Proceedings...** v. 1, p.90-92. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/iel5/9010/28601/01293688.pdf>>. Acesso em: 15 nov. 2007.

FELFILI, J.M.; SILVA-JÚNIOR, M.C.; REZENDE, A.V.; MACHADO, J.W.B.; WALTER, B.M.T., SILVA, P.E.N.; HAY, J.D. Análise comparativa da florística e fitossociologia da vegetação arbórea do Cerrado sentido restrito na Chapada Pratinha, DF- Brasil. **Acta Botânica Brasílica**, n. 6, v.2, p. 27-46, 1992.

FELFILI, J.M.; FILGUEIRAS, T.S.; HARIDASAN, M.; SILVA-JÚNIOR, M.C.; MENDONÇA, R.; REZENDE, A.V. Projeto biogeografia do bioma Cerrado: vegetação e solos. **Caderno de Geociências do IBGE**, n. 12, p. 75-166, 1994.

FELFILI, J.M.; SEVILHA, A.C.; SILVA-JÚNIOR, M.C. Comparação entre as unidades fisiográficas da Chapada Pratinha, Veadeiros e Espigão Mestre do São Francisco. In: Felfili, J.M.; Silva-Júnior (Org.). **Biogeografia do bioma Cerrado: estudo fitofisionômico na Chapada do Espigão Mestre do São Francisco**. Brasília: UnB, 2001, 80-94 p.

FELFILI, J.M.; SILVA JÚNIOR, M.C. Diversidade alfa e beta no cerrado *sensu stricto*, Distrito Federal, Goiás, Minas Gerais e Bahia. In: Scariot, A.; Sousa-Silva, J.C.; Felfili, J.M. (Org). **Cerrado: Ecologia, biodiversidade e conservação**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2005. 439 p.

FELFILI, J.M.; SOUSA-SILVA, J.C.; SCARIOT, A. Biodiversidade, ecologia e conservação do Cerrado: avanços no conhecimento. In: Scariot, A.; Sousa-Silva, J.C.; Felfili, J.M. (Org). **Cerrado: Ecologia, biodiversidade e conservação**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2005. 439 p.

FELFILI, J.M., SILVA-JÚNIOR, M.C.; SEVILHA, A.C.; FAGG, C.W.; WALTER, B.M.T.; NOGUEIRA, P.E.; REZENDE, A.V. Diversity, floristic and structural patterns of cerrado vegetation in Central Brazil. **Plant Ecology**, v. 175, n.1, p. 37-46, 2004.

FELFILI, J.M.; SILVA-JÚNIOR, M.C. A comparative study of cerrado (*sensu stricto*) vegetation in Central Brazil. **Journal of Tropical Ecology**, v.9, n.3, p.277-289, 1993.

FERREIRA, L.G.; YOSHIOKA, H.; HUETE, A.; SANO, E.E. Optical characterization of the Brazilian savanna physiognomies for improved land cover monitoring of the Cerrado biome: preliminary assessments from an airborne campaign over an LBA core site. **Journal of Arid Environments**, v. 56, n. 3, p. 425-447, 2004.

- FERREIRA, M.E.; FERREIRA, L.G.; SANO, E.E.; SHIMABUKURO, Y.E. Uso do modelo linear de mistura espectral para o mapeamento sistemático e operacional do bioma Cerrado: Possibilidades, implicações e procedimentos metodológicos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2003, Belo Horizonte, Brasil. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003. p.657-664.
- FERRI, C.P.; FORMAGGIO, A.R.; SCHIAVINATO, M.A. Narrow band spectral indexes for chlorophyll determination in soybeans canopies [Glycine max. (L.) Merrill]. **Braz. J. Plant Physiol.** , v. 16, n.3, p. 131-136, 2004.
- FONSECA, M.S.; SILVA-JÚNIOR, M.C. Fitossociologia e similaridade florística entre trechos de Cerrado sentido restrito em interflúvio e em vale no Jardim Botânico de Brasília, DF. **Acta Botânica Brasílica**, n. 18, v. 1, p.19-29, 2004.
- FOODY, G.M. Thematic map comparison: Evaluating the statistical significance of differences in classification accuracy. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 70, n. 5, p. 627-633, 2004.
- GALVÃO, L.S.; ROBERTS, D.A.; FORMAGGIO, A.R.; NUMATA, I.; BREUNIG, F.M. View angle effects on the discrimination of soybean varieties and on the relationships between vegetation indices and yield using off-nadir Hyperion data. **Remote Sensing of Environment**, n. 113, n. 4, p. 846-856, 2009.
- GALVÃO, L.S.; FORMAGGIO, A.R.; TISOT, D.A. Discrimination of sugarcane varieties in Southeastern Brazil with EO-1 Hyperion data. **Remote Sensing of Environment**, v. 94, n.4, p. 523-534, 2005.
- GAMON, J.A.; PENUELAS, J.; FIELD, C.B. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. **Remote Sensing of Environment**, v. 41, n.1, p. 35-44, 1992.
- GAO, B. A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, n. 3, p. 257-266, 1996.
- GAO, B; GOETZ, A.F.H. Retrieval of equivalent water thickness and information related to biochemical components of vegetation canopies from AVIRIS data. **Remote Sensing of Environment**, v. 52, n.3, p. 155-162, 1995.
- GATES, D.M.; KEEGAN, H.J.; SCHLETER, V.R.; WEIDNER, V.R. Spectral properties of plants. **Applied Optics**, v. 4, n.1, p. 11-20, 1965.
- GITELSON, A.A; MERZLYAK, M.N.; CHIVKUNOVA, O.B. Optical properties and nondestructive estimation of anthocyanin content in plant leaves. **Photochemistry and Photobiology**, v. 74, n.1, p. 38-45, 2001.
- GITELSON, A.A.; ZUR, Y.; CHIVKUNOVA, O.B.; MERZLYAK, M.N. Assessing carotenoid content in plant leaves with reflectance spectroscopy. **Photochemistry and Photobiology**, v.75, n.3, p. 272-281, 2002.

GOEL, N.S. Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data. **Remote Sensing Reviews**, v.4, p. 1-24, 1988.

GREEN, A. A.; BERMAN, M.; SWITZER, P.; CRAIG, M. D. A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.26, n. 1, p. 65-74, 1988.

GUALTIERI, J.A.; CROMP, R.F. Support vector machine for hyperspectral remote sensing classification. In: AIPR WORKSHOP: ADVANCES IN COMPUTER ASSISTED RECOGNITION, 27., 1998. **Proceedings...** Washington: SPIE, 1998, 221-232 p.

HAERTEL, V.; LANDGREBE, D.A. On classification of classes with nearly equal spectral response in remote sensing hyperspectral image data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 37, n. 5, p.2374-2386, 1999.

HENRIQUES, R.P.B. Influência da história, solo e fogo na distribuição e dinâmica das fitofisionomias no bioma do Cerrado. In: SCARIOT, A.; SOUSA-SILVA, J.C.; FELFILI, J.M. (Org). **Cerrado: ecologia, biodiversidade e conservação**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2005. 439 p.

HOUBORG, R. SOEGAARD, H.; BOEGH; E. Combining vegetation index and model inversion methods for the extraction of key vegetation biophysical parameters using Terra and Aqua MODIS reflectance data. **Remote Sensing of Environment**, v.106, n.1, p.39-58, 2007.

HUANG, C.; DAVIS, L.S.; TOWNSHEND, J.R.G. An assessment of support vector machines for land cover classification. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, n. 4, p. 725-749, 2002.

HUETE, A. R.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E.P.; GAO, X; FERREIRA, L.G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v.83, p. 195-213, 2002.

HUETE, A.R.; LIU, H.Q.; BATCHILY, K.; VAN LEEUWEN, W. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 59, n.3, p. 440-451, 1997.

HUNT JR., E.R.; ROCK, B.N. Detection of changes in leaf water content using near- and middle-infrared reflectances. **Remote Sensing of Environment**, v. 30, n.1, p. 43-54, 1989.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). 2004. **Mapa de Biomas do Brasil**. Escala 1:5.000.000. Disponível em: <<http://mapas.ibge.gov.br/biomas2/viewer.htm>>.

_____ **Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal.** Rio de Janeiro: IBGE, 1991. 123 p.

_____ **Manual técnico da vegetação brasileira.** Rio de Janeiro: IBGE, 1992. 92 p.

JACKSON, T.L.; CHEN, D.; COSH, M.; LI, F.; ANDERSON, M.; WALTHALL, C.; DORIASWAMY, P.; HUNT, E.R. Vegetation water content mapping using landsat data derived normalized difference water index for corn and soybeans. **Remote Sensing of Environment**, v. 92, n.4, p. 475-482, 2004.

JENNINGS, S.B.; BROWN, N.D.; SHEIL, D. Assessing forest canopies and understorey illumination: canopy closure, canopy cover and other measures. **Forestry**, v. 72, n. 2, p. 59-74, 1999.

JENSEN, J.R. **Introductory digital image processing: A remote sensing perspective.** 3^a ed. USA: Prentice Hall, 2005. 526 p.

JIA, X. Multi-class support vector machine classification for hyperspectral data. In: EARSEL WORKSHOP ON IMAGING SPECTROSCOPY, n.4, 2005, Warsaw. **Proceedings...** Warsaw: EARSEL and Warsaw University, 2005. Disponível em: <http://www.enge.ucl.ac.be/EARSEL/workshops/IS_Warsaw_2005/papers/Methods_Data_Processing/47_Jia_449_454.pdf>

KALACSKA, M.; SANCHEZ-AZOFEIFA, G.A.; RIVARD, B.; CAELLI, T.; WHITE, H.P.; CALVO-ALVARADO, J.C. Ecological fingerprinting of ecosystem succession: Estimating secondary tropical dry forest structure and diversity using imaging spectroscopy. **Remote Sensing of Environment**, v. 108, n.1, p. 82-96, 2007.

KLINK, C.A.; MACHADO, R.B. A conservação do cerrado Brasileiro. **Megadiversidade**, v.1, n.1, p. 147-155, 2005.

KRUSE, F.A.; BOARDMAN, J.W.; LEFKOFF, A.B.; HEIDEBRECHT, K.B.; SHAPIRO, A.T.; BARLOON, P.J.; GOETZ, A.F.H. The spectral image processing system (SIPS) – The interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. **Remote Sensing of Environment**, v. 44, n.2, p. 45-163, 1993.

KUMAR, L., SCHMIDT, K., DURY, S., SKIDMORE, A. Imaging spectrometry and vegetation science. In: van der Meer, F.D., de Jong, S. (Ed). **Imaging Spectrometry.** Basic principles and prospective applications. Netherlands: Kluwer, 2001. 403 p.

LEITÃO FILHO, H.F. Considerações sobre a florística de florestas tropicais e subtropicais do Brasil. **IPEF**, v. 35, n.1, p. 41-46, 1987.

MAGURRAN, A.E. **Ecological diversity and its measurement.** Princeton: Princeton University Press, 1988. 179 p.

MANTOVANI, J.E.; PEREIRA, A. Estimativa da integridade da cobertura vegetal de Cerrado através de dados TM/Landsat. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE

- SENSORIAMENTO REMOTO, n.9, 1998, Santos, Brasil. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1998. p.1455-1466.
- McGAUGHEY, R.J. **Stand Visualization System 3.30**. United States of America: USDA Forest Service. Disponível em: <<http://forsys.cfr.washington.edu/winsvs/winsvslatest.exe>>. Acesso em: 03 ago 2008.
- MELGANI, F. Classification of hyperspectral remote sensing with support vector machines. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 42, n. 8, p. 1778-1790, 2004.
- MENESES, P.R. Fundamentos de radiometria óptica espectral. In: Meneses, P.R.; Madeira Netto, J.S (Org). **Sensoriamento remoto: reflectância de alvos naturais**. Brasília: Universidade de Brasília, Embrapa cerrados, 2001. 262 p.
- MERZLYAK, J.R.; GITELSON, A.A.; CHIVKUNOVA, O.B.; RAKITIN, V.Y. Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening. **Physiologia Plantarum**, v. 106, n.1, p. 135-141, 1999.
- MIRANDA, I.S.; ALMEIDA, S.S.; DANTAS, P.J. Florística e estrutura de comunidades arbóreas em cerrados de Rondônia, Brasil. **Acta Amazônica**, v. 36, n. 4, p. 419-430, 2006.
- MIURA, T.; HUETE, A.R.; FERREIRA, L.G.; SANO, E.E. Discrimination and biophysical characterization of cerrado physiognomies with EO-1 hyperspectral Hyperion. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, n.11, 05-10 abr 2002, Belo Horizonte, Brasil. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2002. p.1077-1082.
- MORENO, M.I.C.; SCHIAVINI, I.; HARIDASAN, M. A estrutura de comunidade arbórea em diferentes fisionomias de vegetação em solos distróficos e mesotrófico na Estação Ecológica do Panga em Uberlândia, MG. In: CONGRESSO DE ECOLOGIA DO BRASIL, n. 6, 9-14 nov 2003, Fortaleza, Brasil. **Anais...** Ceará: Universidade Federal do Ceará, 2003. p. 543-544.
- MUELLER-DOMBOIS, D.; ELLENBERG, H. **Aims and methods of vegetation ecology**. New York: John Wiley & Sons, 1974. 547 p.
- MYERS, N.; MITTERMAYER, R.A.; MITTERMAYER, C.G.; FONSECA, G.A.; KENT, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v. 403, n. 6772, p. 853-858, 2000.
- OLIVEIRA-FILHO, A.T.; RATTER, J.A. A study of the origin of central Brazilian forests by the analysis of plant species distribution patterns. **Edinburgh Journal of Botany**, v. 52, p. 141-194, 1995.
- PAL, M. Support vector machine-based feature selection for land cover classification: a case study with DAIS hyperspectral data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, n. 14, p. 2877-2894, 2006.

PAL, M.; MATHER, P.M. Assessment of the effectiveness of support vector machines for hyperspectral data. **Future Generation Computer Systems**, v.20, n.7, p. 1215-1225, 2004.

PAL, M.; MATHER, P.M. Some issues in the classification of DAIS hyperspectral data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, n.14, p. 2895-2916, 2006.

PEÑUELAS, J.; BARET, F.; FILELLA, I. Semi-Empirical Indices to Assess Carotenoids/Chlorophyll-a Ratio from Leaf Spectral Reflectance. **Photosynthetica**, v. 31, n.2, p. 221-230, 1995.

PINHEIRO, E. S. **Análises ecológicas e sensoriamento remoto aplicados à estimativa de fitomassa de cerrado na Estação Ecológica de Assis, SP**. 2008. 200 p. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, 2008.

PIVELLO, V.R.; COUTINHO, L.M.; A qualitative successional model to assist in the management of Brazilian cerrados. **Forest Ecology and Management**, v.87, n. 1-3, p. 223-230, 1996.

PIZARRO, M.A.; GALVÃO, L.S.; EPIPHANIO, J.C.N. Caracterização de solos tropicais através de componentes principais e da correlação entre reflectância e análises químicas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, n.10, 2001, Foz do Iguaçu, Brasil. **Anais...**; São José dos Campos: INPE. p.1451-1460.

PONZONI, F.J. Comportamento espectral da vegetação. In: Meneses, P.R.; Madeira Netto, J.S (Org). **Sensoriamento Remoto: Reflectância de alvos naturais**. Brasília: Universidade de Brasília, Embrapa Cerrados, 2001. 262 p.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURU, Y. E. **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação**. São José dos Campos, SP: Parêntese, 2007. 135 ISBN 978-85-60507-02-3

PROJETO RADAMBRASIL. **Folha SD 22 Goiás**: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, e uso potencial da terra. Rio de Janeiro: DNPM, 1981. 635 p. (Levantamento dos Recursos Naturais, 25).

RIBEIRO, J.F.; WALTER, T.M.B. Fitofisionomias do bioma Cerrado. In: Sano, S.M; Almeida, S.P. (Eds.). **Cerrado: ambiente e flora**. Brasília: Embrapa, 89-152 p., 1998.

RICHARDS, J. A.; JIA, X. **Remote sensing digital image analysis - an introduction**. 4.ed. Berlin, Germany: SPRINGER, 2006 439 ISBN 3-540-25128-6.

ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. In: ERTS-1 SYMPOSIUM, n. 3, [1973], Washington, DC. **Proceedings...** Washington: NASA. p. 309-317.

SANO, E. E.; BARCELLOS, A. O.; BEZERRA, H. S. Assessing the spatial distribution of cultivated pastures in the Brazilian savanna. **Pasturas Tropicales**, v.22, n.3, p. 2-15, 2002.

SANO, E.E.; FERREIRA, L.G. Monitoramento semidetalhado (escala de 1: 250 000) de ocupação de solos do cerrado: considerações e proposta metodológica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, n.12, 2005, Goiânia, Brasil. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 3309-3313.

SCOLFORO, J.R.S.; MELLO, J.M. **Inventário florestal**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2006. 561 p.

SERRANO, L.; PENUELAS, J.; USTIN, S.L. Remote sensing of nitrogen and lignin in mediterranean vegetation from AVIRIS data: decomposing biochemical from structural signals. **Remote Sensing of Environment**, v. 81, n.2, p. 355-364, 2002.

SHEPHERD, G.J. **Fitopac 1.6.4.29**. Campinas: UNICAMP. Disponível em: <<http://www.taxodata.org/forum/attachments/fitopac.zip>> Acesso em: 10 jul 2008.

SHIMABUKURO, Y.E.; MIURA, T.; HUETE, A.; ARAI, E.; ESPÍRITO-SANTO, F.D.B.; LATORRE, M.L. Análise dos dados hiperespectrais do EO-1 obtidos sobre a Floresta Nacional de Tapajós no estado do Pará. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11. (SBSR), 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003. p.1099-1106. CD-ROM ISBN 85-17- 00017-X. Disponível em: <<http://urlib.net/ltid.inpe.br/sbsr/2002/11.13.39>> Acesso em: 12 set 2008.

SCHRAMM, V.F.; VIBRANS, A.C. Uso de imagens hiperespectrais (EO-1 Hyperion) para detalhamento da detecção das formações florestais na bacia do Itajaí. **Dynamis Revista Técnico-científica**, v, 13, n. 1, p. 59-69, 2007.

STUMPF, K.A. The estimation of forest vegetation cover descriptions using a vertical densitometer. In: POINT INVENTORY AND BIOMETRICS WORKING GROUPS SESSION AT THE SAF NATIONAL CONVENTION, 1993, Indianapolis. Disponível em: <www.grsis.com/publications/index.htm> Acesso em: 26 mai. 2008.

TREITZ, P. M.; HOWARTH, P.J. Hyperspectral remote sensing for estimating biophysical parameters of forest ecosystems. **Progress in Physical Geography**, v. 23, n.3, p. 359-390, 1999.

UNGAR, S.G.; PEARLMAN, J.S.; MENDENHALL, J.A.; REUTER, D. Overview of the Earth Observing One (EO-1) mission. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n.6, p. 1149-1159, 2003.

VALERIANO, M. M. **Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul**. São José dos Campos: INPE, 2004. 72 p. (INPE-10550-RPQ/756). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/sergio/2004/06.30.10.57>>. Acesso em: 04 mar. 2009.

VAN DER MEER, F.D.; DE JONG, S. Imaging spectrometry: basic analytical techniques. In: Van der Meer, F.D.; de Jong, S. (Eds.). **Imaging spectrometry**: basics principles and prospective applications. Dordrecht, Netherlands: Kluwer, 17-60 p., 2001.

VAPNIK, V.N. **The nature of statistical learning theory**. NY: Springer, 1995. 314p.

ZHANG, J.; ZHANG, Y.; ZHOU, T. Classification of hyperspectral data using support vector machine. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON IMAGE PROCESSING, [s.n.], 2001, [S.l.] **Proceedings...** p. 882-885. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/iel5/7594/20726/00959187.pdf?isnumber=20726&prod=STD&arnumber=959187&arnumber=959187&arSt=882&ared=885+vol.1&arAuthor=Junping+Zhang%3B+Ye+Zhang%3B+Tingxian+Zhou>> Acesso em: 12 jan. 2008.

APÊNDICE A

Tabela A 1 - Famílias e espécies identificadas no levantamento florístico das fitofisionomias (Continua)

	MS	Cdão	Csr	CaS
ANACARDIACEAE				
<i>Anacardium occidentale</i>		X	X	X
<i>Astronium fraxinifolium</i>	X	X	X	
<i>Myracrodruon urundeuva</i>	X	X		
<i>Tapirira guianensis</i>	X	X		
ANNONACEAE				
<i>Annona crassiflora</i>		X		
<i>Xylopia aromatica</i>	X	X	X	
<i>Xylopia brasiliensis</i>		X		
APOCYNACEAE				
<i>Aspidosperma macrocarpon</i>		X	X	
<i>Aspidosperma nobile</i>	X			
<i>Aspidosperma spruceanum</i>	X			
<i>Aspidosperma tomentosum</i>		X	X	
<i>Hancornia speciosa</i>				X
<i>Himatanthus obovatus</i>	X	X		
ARALIACEAE				
<i>Dendropanax cuneatus</i>	X		X	
<i>Didymopanax morototoni</i>	X	X	X	
<i>Schefflera macrocarpa</i>		X		X
ASTERACEAE				
<i>Gochnatia polymorpha</i>	X	X		
<i>Piptocarpha macropoda</i>		X		
<i>Piptocarpha rotundifolia</i>				
<i>Piptocarpha sp.</i>			X	X
<i>Vernonia ferruginea</i>	X			
BIGNONIACEAE				
<i>Jacaranda mimosifolia</i>		X		
<i>Tabebuia aurea</i>	X	X		
<i>Tabebuia caraiba</i>	X	X		
<i>Tabebuia ochracea</i>				
<i>Tabebuia roseoalba</i>	X			
<i>Tabebuia serratifolia</i>		X		
BOMBACACEAE				
<i>Eriotheca pubescens</i>		X		

Tabela A1 – Continuação (Continua)

<i>Pseudobombax sp.</i>				
<i>Pseudobombax tomentosum</i>	X			
BORAGINACEAE				
<i>Cordia alliodora</i>	X			
BURSERACEAE				
<i>Protium heptaphyllum</i>	X			
<i>Protium pallidum</i>	X	X		
CARYOCARACEAE				
<i>Caryocar brasiliense</i>	X	X		X
CECROPIACEAE				
<i>Cecropia hololeuca</i>		X		
CHRYSOBALANACEAE				
<i>Hirtella glandulosa</i>	X	X		
CLUSIACEAE				
<i>Clusia sp.</i>	X			
<i>Kielmeyera coriacea</i>	X	X	X	X
<i>Kielmeyera rubriflora</i>				X
<i>Kielmeyera speciosa</i>				
COMBRETACEAE				
<i>Blepharocalyx salicifolius</i>	X	X		
<i>Terminalia argentea</i>	X		X	
<i>Terminalia fagifolia</i>	X			
CONNARACEAE				
<i>Connarus suberosus</i>		X		X
DILLENACEAE				
<i>Curatella americana</i>	X	X	X	X
<i>Davilla elliptica</i>		X	X	X
EBENACEAE				
<i>Diospyros hispida</i>	X	X		
<i>Diospyros sericea</i>		X		X
ERYTHROXYLACEAE				
<i>Erythroxylum campestre</i>				
<i>Erythroxylum deciduum</i>	X			X
<i>Erythroxylum sp.</i>	X	X	X	
<i>Erythroxylum suberosum</i>		X		X
<i>Erythroxylum tortuosum</i>				X
EUPHORBIACEAE				
<i>Sebastiania brasiliensis</i>		X		
FABACEAE				
<i>Acosmium dasycarpum</i>		X		X

Tabela A1 – Continuação (Continua)

<i>Acacia polyphylla</i>	X			
<i>Anadenanthera falcata</i>	X			
<i>Anadenanthera macrocarpa</i>	X			
<i>Andira fraxinifolia</i>	X			
<i>Andira humilis</i>		X		X
<i>Apuleia leiocarpa</i>	X			
<i>Bowdichia virgilioides</i>	X	X	X	X
<i>Copaifera langsdorffi</i>	X	X		
<i>Dalbergia nigra</i>	X			
<i>Dalbergia sp.</i>	X			
<i>Dimorphandra mollis</i>		X	X	X
<i>Dipteryx alata</i>	X	X		
<i>Enterolobium gummiferum</i>				
<i>Hymenaea courbaril</i>	X			
<i>Hymenaea stigonocarpa</i>		X	X	X
<i>Machaerium opacum</i>	X			
<i>Machaerium sp.</i>		X	X	
<i>Machaerium villosum</i>	X	X		
<i>Mimosa regina</i>				X
<i>Ormosia arborea</i>		X		
<i>Plathymenia reticulata</i>		X	X	
<i>Platycyamus regnellii</i>	X			
<i>Platypodium elegans</i>	X	X		
<i>Sclerolobium aureum</i>	X	X		
<i>Sclerolobium paniculatum</i>	X	X	X	
<i>Stryphnodendron adstringens</i>		X	X	X
<i>Vatairea macrocarpa</i>	X		X	
<i>Inga marginata</i>	X	X		
HIPPOCRETEACEAE				
<i>Salacia crassifolia</i>				
<i>Salacia elliptica</i>	X			
<i>Salacia sp.</i>				
ICACINACEAE				
<i>Emmotum nitens</i>	X	X	X	
LAURACEAE				
<i>Ocotea sp.</i>	X			
LYTHRACEAE				
<i>Lafoensia pacari</i>			X	
<i>Physocalymma scaberrimum</i>	X	X		
MALPIGHIACEAE				

Tabela A1 – Continuação (Continua)

<i>Banisteriopsis sp.</i>	X			X
<i>Banisteriopsis stellaris</i>				
<i>Byrsonima coccolobifolia</i>				X
<i>Byrsonima crassa</i>			X	X
<i>Byrsonima intermedia</i>		X		X
<i>Byrsonima pachyphylla</i>	X	X		
<i>Byrsonima verbascifolia</i>			X	X
MELASTOMATACEAE				
<i>Miconia burchellii</i>				X
<i>Miconia ferruginata</i>		X		
MONIMIACEAE				
<i>Siparuna guianensis</i>	X	X		
MORACEAE				
<i>Ficus sp.</i>		X		
MYRISTICACEAE				
<i>Virola sebifera</i>	X	X		
MYRSINACEAE				
<i>Rapanea sp.</i>		X	X	X
MYRTACEAE				
<i>Campomanesia adamantium</i>		X		
<i>Campomanesia xanthocarpa</i>	X	X		
<i>Eugenia dysenterica</i>	X	X		
<i>Myrcia glabra</i>	X			
<i>Myrcia mutabilis</i>	X	X		X
<i>Myrcia sp.</i>		X		
<i>Myrciaria sellowiana</i>		X		
<i>Psidium myrsinoides</i>			X	X
<i>Psidium pohlianum</i>	X	X		X
NYCTAGINACEAE				
<i>Guapira graciliflora</i>			X	
OCHNACEAE				
<i>Ouratea acuminata</i>	X			X
OPILIACEAE				
<i>Agonandra brasiliensis</i>		X		
PHYTOLACCACEAE				
<i>Gallesia integrifolia</i>			X	
PIPERACEAE				
<i>Piper amalago</i>	X			
PROTEACEAE				
<i>Roupala montana</i>	X	X	X	

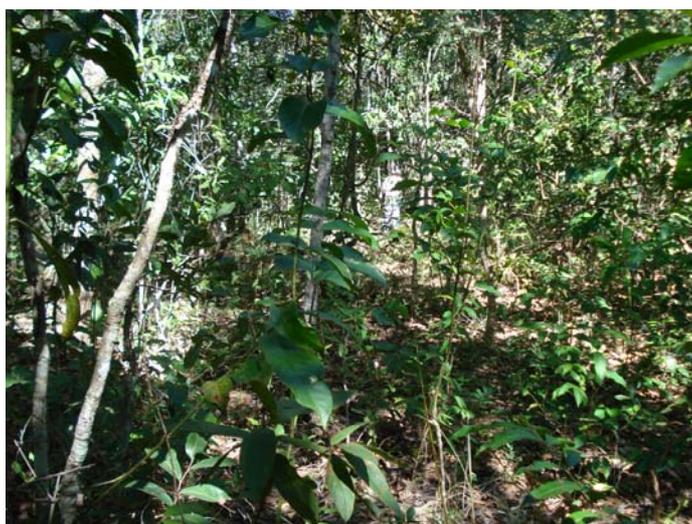
Tabela A1- Conclusão.

ROSACEAE				
<i>Cydonia oblonga</i>	X			
RUBIACEAE				
<i>Alibertia edulis</i>	X	X		
<i>Alibertia sp.</i>	X	X		
<i>Amaioua guianensis</i>	X	X		
<i>Palicourea rigida</i>				X
<i>Psychotria capitata</i>	X			
<i>Rudgea viburnoides</i>	X	X		
<i>Tocoyena formosa</i>	X	X		
RUTACEAE				
<i>Zanthoxylum cinerum</i>	X	X		
SAPINDACEAE				
<i>Dilodendron bipinnatum</i>	X			
<i>Magonia pubescens</i>	X	X	X	
<i>Matayba sp.</i>	X	X		
<i>Talisia esculenta</i>	X			
SAPOTACEAE				
<i>Pouteria ramiflora</i>	X	X		
<i>Pouteria torta</i>				
SIMAROUBACEAE				
<i>Simarouba versicolor</i>	X	X	X	
STERCULIACEAE				
<i>Guazuma ulmifolia</i>	X	X		
STYRACACEAE				
<i>Styrax ferrugineus</i>			X	X
TILIACEAE				
<i>Luehea paniculata</i>	X	X	X	
VERBENACEAE				
<i>Aegiphila lhotskiana</i>				X
VOCHYSIACEAE				
<i>Qualea grandiflora</i>	X	X	X	
<i>Qualea multiflora</i>	X	X	X	
<i>Qualea parviflora</i>		X	X	X
<i>Salvertia convallariodora</i>				X
<i>Vochysia elliptica</i>		X	X	X
<i>Vochysia haenkeana</i>		X		

APÊNDICE B – FOTOGRAFIAS DE CAMPO



Mata Seca Semidecídua



Cerradão



Cerrado denso



Cerrado típico



Cerrado ralo



Cerrado rupestre



Campo Sujo



Campo Limpo