



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**MAPEAMENTO E QUANTIFICAÇÃO DA RELAÇÃO MINERALÓGICA
CAULINITA/(CAULINITA+GIBBSITA) DE SOLOS TROPICAIS, POR MEIO DOS DADOS
DO SENSOR HIPERESPECTRAL AVIRIS (JPL/NASA)**

TESE DE DOUTORADO

N.º 41

GUSTAVO MACEDO DE MELLO BAPTISTA

ORIENTADOR: DR. JOSÉ DA SILVA MADEIRA NETTO

**TESE DE DOUTORADO EM PROCESSAMENTO DE DADOS EM GEOLOGIA
E ANÁLISE AMBIENTAL**

BRASÍLIA / DF

MAIO DE 2001

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**MAPEAMENTO E QUANTIFICAÇÃO DA RELAÇÃO MINERALÓGICA
CAULINITA/(CAULINITA+GIBBSITA) DE SOLOS TROPICAIS, POR MEIO DOS DADOS
DO SENSOR HIPERESPECTRAL AVIRIS (JPL/NASA)**

GUSTAVO MACEDO DE MELLO BAPTISTA

**TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR.**

APROVADO POR:

José Da Silva Madeira Netto,
Dsc (Universidade De Paris Vi)
(Orientador)

Paulo Roberto Meneses,
Dsc (Usp) (Examinador Interno)

José Wilson Corrêa Rosa, Phd (Mit)
(Examinador Interno)

Antônio Roberto Formaggio,
Dsc (Esalq/Usp)
(Examinador Externo)

José Alexandre Melo Demattê,
Dsc (Esalq/Usp)
(Examinador Externo)

BRASÍLIA / DF, 11 DE MAIO DE 2001.

FICHA CATALOGRÁFICA

BAPTISTA, GUSTAVO MACEDO DE MELLO

Mapeamento e Quantificação da Relação Mineralógica Caulinita / (Caulinita + Gibbsita) de Solos Tropicais, por meio dos Dados do Sensor Hiperespectral AVIRIS (JPL/NASA). [Distrito Federal] 2001.

xv, 139p., 210 x 297 mm (IG/UnB, Doutor, Processamento de Dados em Geologia e Análise Ambiental, 1997)

Tese de Doutorado - Universidade de Brasília. Instituto de Geociências.

1. AVIRIS

2. espectroscopia de imageamento

3. mineralogia de solos

4. análise espectral

I. IG/UnB

II. Título (Série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BAPTISTA, G.M.M. (2001). **Mapeamento e Quantificação da Relação Mineralógica Caulinita/(Caulinita+Gibbsita) de Solos Tropicais, por meio dos Dados do Sensor Hiperespectral AVIRIS (JPL/NASA)**. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 139p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Gustavo Macedo de Mello Baptista

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Mapeamento e Quantificação da Relação Mineralógica Caulinita/(Caulinita+Gibbsita) de Solos Tropicais, por meio dos Dados do Sensor Hiperespectral AVIRIS (JPL/NASA).

GRAU: Doutor em Ciências

ANO: 2001

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta Tese de Doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta Tese de Doutorado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Gustavo Macedo de Mello Baptista
E-mail: gmbaptista@uol.com.br

DEDICATÓRIA

Dedico esta Tese à minha esposa *Luciene*,
aos meus filhos *Alberto, Rafaela e Bernardo*,
por todo carinho, apoio e compreensão
durante minha *presença ausente*,
necessária para a realização
deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao Doutor José da Silva Madeira Netto pela amizade, orientação e incentivo durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Paulo Roberto Meneses pela amizade, pela transmissão de conhecimentos e convivência acadêmica.

Ao Professor José Wilson pela amizade, incentivo e discussões proveitosas.

Aos Doutores Antônio Roberto Formaggio e José Alexandre Melo Demattê, pelo aceite imediato de participação na Banca de Defesa de Tese.

Aos familiares Edmundo, Marília, e Creusa pelo apoio e carinho durante a jornada.

Aos amigos Éder de Souza Martins, Osmar Abílio de Carvalho Júnior pelas discussões fundamentais e pelos trabalhos de campo para a realização deste estudo.

Aos demais Professores do Doutorado no Instituto de Geociências, em especial, os Professores Paulo Fortes, Claudinei, Alain Potrel e Carlão pela amizade e companheirismo durante esta jornada.

Aos amigos da Embrapa Cerrados pelo apoio e pelas conversas descontraídas sempre importantes.

Ao INPE, pela cessão dos dados AVIRIS e principalmente ao amigo Moacyr Godoy Júnior e ao Pesquisador Lênio Soares Galvão da Divisão de Sensoriamento Remoto (DSR).

Ao JPL/NASA, pela cessão de dados, de informações e pelas discussões nos AVIRIS workshops e principalmente ao Pesquisador Robert O. Green pela confiança no trabalho e pelo apoio.

À Embrapa Cerrados pelo apoio institucional e por todo o suporte laboratorial e financeiro para as análises e saídas de campo.

Ao CNPq pelo fomento da pesquisa por meio da bolsa de Doutorado.

RESUMO

Este trabalho teve por objetivo determinar a potencialidade das imagens hiperespectrais AVIRIS (*Airborne Visible/InfraRed Imaging Spectrometer*), obtidas no ano de 1995 na região dos Cerrados, para a espacialização e quantificação de características espectrais de alguns componentes mineralógicos de manchas de solos imageadas por meio dos dados disponíveis.

A espacialização e a quantificação dessas relações só foi possível a partir da aplicação do índice espectral IKi e do desenvolvimento de índices espectrais - IText (quantificação do teor de argila dos solos), RCGb_{scale} (relação caulinita/(caulinita+gibbsita) por meio do algoritmo *Spectral Feature Fitting*) e RCGb (relação caulinita/(caulinita+gibbsita) baseada em pontos específicos dos espectros) - tendo como princípio as feições espectrais dos minerais estudados. Os modelos foram validados por amostras de solos obtidas nas áreas imageadas pelo AVIRIS e seus respectivos espectros, e pela quantificação mineralógica determinada em laboratório.

O trabalho mostrou que se pode minimizar tempo e otimizar recursos no processo de reconhecimento e mapeamento de solos. Para tal, foram utilizadas cenas de dois contextos geológicos distintos. Os solos da imagem de São João D'Aliança, Goiás, são derivados de rochas metassedimentares detríticas sem a presença de minerais opacos, enquanto os solos da imagem de Niquelândia têm como rocha matriz os anfibolitos do complexo máfico e ultramáfico ricos em opacos. Para se compreender a variabilidade espacial dos minerais nessas duas áreas seria necessária a adoção de uma grade de amostragem com espaçamento regular cobrindo toda a superfície, o que encareceria o projeto devido aos custos de coleta e principalmente os laboratoriais.

Alguns aspectos foram observados no decorrer desta pesquisa: quando são utilizados índices espectrais que se baseiam em pontos específicos dos espectros, pode-se trabalhar com dados hiperespectrais não normalizados, ou seja, sem remoção do contínuo espectral; quando as imagens apresentam solos provenientes de contextos ricos em minerais opacos, pode-se trabalhar com os índices desenvolvidos no âmbito desta Tese, pois o aplainamento ocorrido nas feições espectrais da caulinita e da gibbsita é proporcional e, portanto, a relação entre esses minerais é preservada; quando são utilizados dados de mesma data ou mesmo sem grandes interferência de efeitos atmosféricos, pode-se trabalhar com os dados brutos, ou de radiância, sem a necessidade da correção atmosférica, pois esse tipo de pré-processamento pode deteriorar os dados.

A Tese mostrou ser possível mapear e quantificar a relação mineralógica caulinita/(caulinita+gibbsita) para os solos estudados, com um nível de detalhe bastante fino.

Novas pesquisas devem ser incentivadas para melhor compreensão dos fatores que influenciam as feições espectrais, além da descoberta de novas relações minerais, a fim de aprimorar a espectroscopia como método de identificação e quantificação mineralógica para solos tropicais.

ABSTRACT

This work had the purpose of determining the potentiality of the AVIRIS (Airborne Visible/InfraRed Imaging Spectrometer) hyperspectral images for the mapping and the quantification of spectral characteristics of mineralogical components of some soils spots imaged in 1995 in the Cerrado region.

The mineralogical mapping and the quantification of those relationships were only possible starting from the application of the spectral index IKi (Madeira Netto et al., 1995) and the spectral indexes development - IText (quantification of the soils clay contents), $RCGb_{scale}$ (kaolinite/(kaolinite+gibbsite) relationship by means of the Spectral Feature Fitting algorithm) and RCGb (kaolinite/(kaolinite+gibbsite) relationship based on specific points of the spectra) - based on the spectral absorption features of the studied minerals. The models were validated with soil samples obtained in the same imaged areas by AVIRIS and their respective spectra, besides the mineralogical quantification processed in laboratory.

This work showed that time and resources can be minimized in the recognition and mapping it soils process. For such, scenes of two different geologic contexts were used. The São João D'Aliança, Goiás, image's soils are derived of metamorphic rocks with no opaque minerals presence, while Niquelândia image's soils has the mafic and ultramafic complex amphibolit, rich in opaque, as its main rock. To understand the space variability of the minerals in those two areas, it would be necessary the adoption of sampling grid with regular spacing covering the whole surface, which makes the project much more expensive.

Some aspects were observed along this research: when spectral indexes that based on specific points of the spectra were used, it's possible to work with not normalized hiperspectrals data, that is to say, without continuum removal; when the images present soils derived of opaque minerals rich contexts, it's possible to work with the indexes developed in the ambit of this Thesis, because the leveling happened in the spectral features of the caulinita and of the gibbsita is proportional and so the relationship among those minerals is preserved; when same date or with no great interference of atmospheric effects data are used, it's possible to work with the original data, or of radiance, and no atmospheric correction, because it can deteriorate the data.

The Thesis showed that is possible mapping and quantifying the mineralogical relationship kaolinite/(kaolinite+gibbsite) for the studied soils, with a quite fine detail level.

More research should be motivated for a better understanding of the factors that influence the spectral features and for the discovery of new mineral relationships, in order to improve the spectroscopy as identification method and mineralogical quantification for tropical soils.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1		
INTRODUÇÃO		1
CAPÍTULO 2		
DESCRIÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDOS		5
2.1	Introdução	5
2.2	Caracterização das áreas de estudo	7
2.2.1	Geologia	7
2.2.2	Solos	9
2.2.3	Geomorfologia	13
2.2.4	Clima	14
2.2.5	Balanço Hídrico	16
2.2.6	Hidrografia	19
CAPÍTULO 3		
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA		21
3.1	O Conceito de Sensoriamento Remoto	21
3.2	Teoria de Espectroscopia de Reflectância	21
3.2.1	Processos eletrônicos	22
3.2.1.1	<i>Efeito de Campo Cristalino</i>	23
3.2.1.2	<i>Transferência de Carga</i>	24
3.2.1.3	<i>Bandas de Condução</i>	25
3.2.1.4	<i>Centros de Cores</i>	26
3.2.2	Processos vibracionais	27
3.3	Propriedades de Reflectância Espectral de Solos	31
3.3.1	Componentes minerais	32
3.3.1.1	<i>Caulinita ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$)</i>	32
3.3.1.2	<i>Gibbsita ($Al_2O_3 \cdot 3H_2O$)</i>	34
3.3.1.3	<i>Relação Caulinita/Gibbsita</i>	35
3.3.1.4	<i>Goethita ($FeOOH$) e Hematita (Fe_2O_3)</i>	37
3.3.1.5	<i>Quantificação da hematita por meio de dados espectrais</i>	38
3.3.1.6	<i>Ilmenita ($FeTiO_3$) e Magnetita (Fe_3O_4)</i>	39
3.3.2	Umidade do solo	40
3.3.3	Matéria orgânica	41
3.3.4	Tamanho de partículas	43
3.4	Resolução de Bandas Espectrais	45
3.5	Espectroscopia de Imageamento: AVIRIS (Airborne Visible/InfraRed Imaging Spectrometer)	48
3.6	Efeitos atmosféricos sobre dados de sensoriamento remoto	52

3.7	Teoria de espalhamento atmosférico	55
3.8	Teoria de absorção de gases na atmosfera	58
3.9	Transferência radiativa	60
3.10	Métodos de correção atmosférica e de redução dos dados de radiância para reflectância de superfície	61
3.10.1	ATmospheric REMoval Program (ATREM)	61
3.10.2	Método Green	64
3.11	Utilização dos dados AVIRIS para identificação de minerais	66

CAPÍTULO 4

	METODOLOGIA	73
4.1	Introdução	73
4.2	Trabalho de campo	73
4.3	Determinação da composição, da quantificação e das relações entre os minerais existentes nas amostras	73
4.4	Correção atmosférica e redução dos dados de radiância para reflectância medida na superfície	74
4.5	Obtenção dos espectros eletromagnéticos de reflectância em campo/laboratório	74
4.6	Determinação de índices espectrais que representam relações entre os componentes mineralógicos	75
4.7	Aplicação dos algoritmos nas imagens hiperespectrais e comparação com os dados obtidos no campo	75
4.8	Materiais e Métodos	75
4.8.1	Similaridade entre os espectros de reflectância obtidos em laboratório e por meio dos dados AVIRIS	75
4.8.1.1	<i>Amostragem de solos</i>	75
4.8.1.2	<i>Experimentos de espectrorradiometria de reflectância e de difratometria de raio X</i>	76
4.8.1.3	<i>Convolução dos espectros de laboratório para a resolução espectral do AVIRIS e regressão linear entre os espectros</i>	77
4.8.2	Aplicação do índice espectral IKi (Madeira Netto et al., 1995) e desenvolvimento dos índices espectrais RCGb _{scale} e RCGb para espacialização da relação caulinita/(caulinita+gibbsita)	77
4.8.2.1	<i>Utilização do índice espectral IKi para os dados AVIRIS</i>	78
4.8.2.2	<i>Utilização do módulo de classificação SFF para o desenvolvimento do índice espectral RCGb_{scale}</i>	78
4.8.2.3	<i>Desenvolvimento do índice espectral RCGb</i>	79
4.8.3	Mapeamento dos teores de argila de solos tropicais por meio de dados de sensoriamento remoto multiespectral e hiperespectral	83
4.8.3.1	<i>Convolução dos dados hiperespectrais para multiespectrais</i>	85
4.8.3.2	<i>Determinação dos teores de argila em laboratório</i>	85
4.8.3.3	<i>Convolução dos dados espectrais de laboratório em dados do sensor TM5</i>	85
4.8.3.3	<i>Desenvolvimento do índice espectral IText</i>	85

4.8.4	Influência de minerais opacos na determinação do índice espectral RCGb em solos tropicais dos cerrados	86
4.8.5	Influência no índice espectral RCGb dos métodos de correção atmosférica e de redução dos dados de radiância a reflectância de superfície	87
4.8.5.1	<i>Método Green</i>	88
4.8.5.2	<i>Método ATREM</i>	88
4.8.5.3	<i>Influência no índice espectral RCGb dos métodos de correção atmosférica e de redução dos dados de radiância para reflectância de superfície</i>	88
4.8.6	Mapeamento e quantificação mineralógica por meio do índice espectral RCGb nas imagens AVIRIS	88

CAPÍTULO 5

	RESULTADOS E DISCUSSÃO	90
5.1	Similaridade entre os espectros de reflectância obtidos em laboratório e os obtidos pelo sensor AVIRIS	90
5.2	Aplicação do índice espectral IKi (Madeira Netto et al., 1995) e desenvolvimento dos índices espectrais RCGbscale e RCGb para espacialização da relação caulinita/(caulinita+gibbsita)	94
5.3	Mapeamento dos teores de argila de solos tropicais, por meio de dados de sensoriamento remoto multiespectral e hiperespectral	102
5.4	Influência de minerais opacos na determinação do índice espectral RCGb em solos tropicais dos cerrados	104
5.5	Influência no índice espectral RCGb dos métodos de correção atmosférica e de redução dos dados de radiância a reflectância de superfície	111
5.6	Mapeamento e quantificação mineralógica por meio do índice espectral RCGb nas imagens AVIRIS	118

CAPÍTULO 6

	CONCLUSÕES	125
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	128
	ANEXOS	136

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Mapa de localização das áreas de estudo.	5
Figura 2.2	Áreas de estudo de São João D'Aliança em destaque (95081612-03) nos dados AVIRIS. Composição colorida R (0,65 μm), G (0,92 μm) e B (1,21 μm).	6
Figura 2.3	Área de estudo na borda do complexo máfico-ultramáfico de Niquelândia em destaque nos dados AVIRIS. Composição colorida R (0,65 μm), G (0,92 μm) e B (1,21 μm).	7
Figura 2.4	Esboço geológico preliminar do município de São João D'Aliança, realizado por José Eloi G. Campos (inédito).	8
Figura 2.5	Esboço geológico do complexo de Niquelândia (Ferreira Filho et al., 1992)	9
Figura 2.6	Localização das principais classes de solo, São João D'Aliança, GO.	10
Figura 2.7	Localização das principais classes de solos, Niquelândia, GO. A – terra roxa estruturada. B – latossolo roxo.	12
Figura 2.8	Imagens AVIRIS das áreas de estudo concatenadas mostrando a diferença de cores dos solos devido à ausência e à presença de minerais opacos respectivamente.	13
Figura 2.9	Macrounidades de relevo do Brasil, Ross (1998).	14
Figura 2.10	Classificação climática de Köppen para o Brasil.	15
Figura 2.11	Balanço hídrico da estação Posse, GO.	19
Figura 2.12	Detalhe da carta de 1:250.000 (escala original) mostrando em detalhe a área da subcena AVIRIS em estudo de São João D'Aliança e sua drenagem.	20
Figura 2.13	Detalhe da carta de 1:250.000 (escala original) mostrando em detalhe a área da subcena AVIRIS em estudo de Niquelândia e sua drenagem.	20
Figura 3.1	Espectro eletromagnético.	22
Figura 3.2	Distribuição dos elétrons no orbital 3d do Fe^{2+} durante a formação de complexos com a H_2O .	23
Figura 3.3	Posicionamento das transições eletrônicas nos espectros de hematita e goethita, determinante das cores dos minerais (adaptado de Sherman e Waite, 1985).	24
Figura 3.4	Espectros de hematita, goethita e limonita, da biblioteca espectral do USGS (Clark et al., 1993), apresentando feições espectrais resultantes do processo de transferência de carga, que, por meio da ligação Fe-O, apresentam caimento significativo da intensidade na faixa do azul (0,4 a 0,5 μm).	25
Figura 3.5	Espectros de reflectância do enxofre (S) e do cinábrio (HgS) apresentando as bandas de condução no visível (adaptado de Clark, 1999).	26
Figura 3.6	Retículo cristalino defeituoso da fluorita (CaF_2), apresentando o aprisionamento de um elétron que seria responsável pela feição espectral associada a centros de cores (adaptado de Meneses e Ferreira Júnior, 1995).	26
Figura 3.7	Espectro de reflectância da fluorita (CaF_2) púrpura, apresentando feição espectral associada a centros de cores (adaptado de Hunt, 1980).	27
Figura 3.8	Espectro de reflectância da caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), apresentando as feições espectrais associadas à água a 1,4 μm ($2\nu_3$) e a 1,9 μm ($\nu_2 + \nu_3$).	29
Figura 3.9	Espectro de reflectância da caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) e brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), apresentando as feições espectrais associadas a combinações fundamentais de dobramento X-OH, (X é Al ou Mg), próximas a 2,2 ou 2,3 μm , respectivamente (Clark, 1999).	30
Figura 3.10	Espectro de reflectância da rodocrosita (Mn CO_3), apresentando as feições espectrais associadas a combinações e harmônicas do grupo dos carbonatos na faixa do infravermelho próximo (Clark, 1999).	31
Figura 3.11	Imagem de Microscópio de Varredura Eletrônica (MEV) da caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$). Adaptado de Martins (1999).	32
Figura 3.12	Espectros de reflectância da caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) e da montmorillonita ($(\text{Al}, \text{Mg})_{2-3} \text{Si}_4\text{O}_{10} (\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), ambos apresentando a feição espectral a 1,9 μm não associada e associada à presença da água constitucional na faixa do infravermelho próximo, respectivamente.	33
Figura 3.13	Espectro de reflectância difusa de uma amostra de caulinita, intitulada KL502, da biblioteca espectral do USGS (Clark et al., 1993), proveniente de Cripple Creek, Colorado, apresentando as feições espectrais.	34

Figura 3.14	Imagem de microscopia ótica da gibbsita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$). Adaptado de Martins (1999).	34
Figura 3.15	Feições de absorção de uma amostra de gibbsita (WS214 da biblioteca do USGS - Clark et al., 1993) proveniente de Minas Gerais, Brasil.	35
Figura 3.16	Espectro de reflectância (2000 a 2400 nm) de uma amostra de solo com 38% de caulinita e 30% de gibbsita. Adaptado de Madeira Netto et al. (1995).	36
Figura 3.17	Imagem de Microscópio de Varredura Eletrônica (MEV) da goethita (FeOOH). Adaptado de Martins (1999).	37
Figura 3.18	Imagem de Microscópio de Varredura Eletrônica (MEV) da hematita (Fe_2O_3). Adaptado de Martins (1999).	37
Figura 3.19	Espectros de reflectância difusa de goethita (a) (WS222 – da biblioteca espectral do USGS, Clark et al., 1993) e de hematita (b) (GDS27 – USGS, Clark et al., 1993).	38
Figura 3.20	Imagem de microscópio de varredura eletrônica (mev) da magnetita (Fe_3O_4) (http://www.eng-h.gov.uk/sem/dec97.jpg em 12/12/98).	39
Figura 3.21	Espectros de reflectância da ilmenita (FeTiO_3) e da magnetita (Fe_3O_4). (Clark et al., 1993)	40
Figura 3.22	Espectros de reflectância da hematita sintética (Fe_2O_3) seca ao ar-livre e úmida, adaptado de Bedidi et al. (1992).	40
Figura 3.23	Efeito da eliminação da matéria orgânica nos espectros de reflectância de três latossolos. As linhas mais escuras representam os espectros das amostras com matéria orgânica e as linhas mais finas representam os espectros de amostras após a remoção da matéria orgânica. Adaptado de Madeira Netto (1993).	43
Figura 3.24	Variação da intensidade de reflectância da hematita em função do tamanho dos grãos.	44
Figura 3.25	Comparação entre espectros de reflectância de solos com variação de teor de argila (Baptista, 1998; Baptista et al. 2000a).	45
Figura 3.26	Espectro de reflectância da mistura de três minerais pelo sensor TM5 do Landsat. Adaptado de http://makalu.jpl.nasa.gov em 15/06/1997.	46
Figura 3.27	Comparação dos espectros de reflectância obtidos para uma mesma mancha de solo exposto, por meio do sensor Landsat TM5 e do AVIRIS.	47
Figura 3.28	Um perfil gaussiano com a largura a meia altura (FWHM) de 10 nm. Esse perfil é típico de espectrômetros como AVIRIS, que têm 224 perfis com espaçamento aproximado de 10 nm (Modificado de Clark, 1999).	47
Figura 3.29	Relação entre o valor da razão sinal/ruído e o espectro de reflectância de uma amostra de caulinita (Swayze et al., 1997).	48
Figura 3.30	Conceito de espectroscopia de imageamento. Para cada alvo componente do terreno, são obtidos espectros (modificado de Green et al., 1998).	49
Figura 3.31	Sensor AVIRIS. (http://makalu.jpl.nasa.gov em 15/06/1997).	50
Figura 3.32	Arranjo linear de 64 detetores de antimoneto de índio (InSb) do AVIRIS (Bailey, 1987).	51
Figura 3.33	ER-2 (http://makalu.jpl.nasa.gov em 15/06/1997).	51
Figura 3.34	Processos de interferência da atmosfera no sinal que chega ao sensor (Vermote et al., 1995 e 1997).	53
Figura 3.35	Parte da radiação solar espalhada que não leva informação dos alvos de superfície para o sensor (Vermote et al., 1995 e 1997).	53
Figura 3.36	Parte da radiação solar espalhada que leva informação dos alvos de superfície para o sensor (Vermote et al., 1995 e 1997).	54
Figura 3.37	Radiação refletida pela superfície e espalhada no caminho superfície-sensor (Vermote et al., 1995 e 1997).	54
Figura 3.38	Efeito armadilha (Vermote et al., 1995 e 1997).	55
Figura 3.39	Principais interações da radiação solar com a atmosfera e com a superfície e principais efeitos sobre a radiação medidos nos diversos sistemas sensores (Vermote et al., 1995 e 1997).	55
Figura 3.40	Distribuição de h em função da altitude para uma atmosfera limpa. Adaptado de Slater (1980).	56
Figura 3.41	Espectros de transmitância do vapor d'água (H_2O), do dióxido de carbono (CO_2), do ozônio (O_3), do óxido nitroso (N_2O), do monóxido de carbono (CO), do metano (CH_4) e do oxigênio (O_2) (Gao et al., 1993).	58

Figura 3.42	Comparação dos espectros de transmitância dos gases com as bandas dos sensores AVIRIS e TM5. Adaptado de Green (AVIRIS Website).	59
Figura 3.43	Série temporal de vapor d'água, obtida por meio de dados AVIRIS, sobre o lago Roger Dry, com variação média de 15 minutos, apresentando variações significativas nos teores de vapor d'água. Adaptado de Green et al.(1991).	61
Figura 3.44	Espectro de reflectância apresentando as posições relevantes utilizadas na razão de três bandas, pelo método ATREM, visando à determinação dos valores de transmitância do vapor d'água na trajetória sol => superfície => sensor. Adaptado de Gao et al. (1993).	62
Figura 3.45	Imagem cubo de reflectância de superfície de São João D'Aliança.	64
Figura 3.46	Espectro normalizado de absorção da água da folha (Green et al., 1991).	65
Figura 3.47	Espectros obtidos a partir dos dados do AVIRIS. a) Radiância ($\mu W/cm^2/nm/sr$). b) Reflectância de superfície obtida pelo método Green, mostrando a remoção das bandas de absorção da água em 1,4 e 1,9 μm .	66
Figura 4.1	Localização das amostras de solo da área de São João D'Aliança.	76
Figura 4.2	Conceito da remoção do contínuo espectral (Clark et al., 1990).	79
Figura 4.3	Toposseqüência escolhida para a coleta de amostras no campo sobre a imagem IKi.	80
Figura 4.4	Espectros <i>Kaolinite Well Ordered PS-1A</i> (caulinita), <i>Gibbsite Synthetic OH-3A</i> (gibbsita) (Grove et al., 1992) e a integração de 50% de cada um gerando o espectro caul+gibb.	81
Figura 4.5	As seis bandas utilizadas no índice espectral RCGb.	83
Figura 4.6	Peso das funções de resposta espectral utilizadas no algoritmo de convolução para simulação de dados do ASTER a partir dos dados obtidos pelo AVIRIS.	84
Figura 4.7	Localização das toposseqüências A, B e C de amostragem de solos.	86
Figura 4.8	Espectros de solo sem opaco e de ilmenita da biblioteca espectral do USGS (Clark et al., 1993).	87
Figura 5.1	Espectro da amostra de solo 1 na faixa do infravermelho de ondas curtas e seu respectivo difratograma.	91
Figura 5.2	Espectro da amostra de solo 2 na faixa do infravermelho de ondas curtas e seu respectivo difratograma.	92
Figura 5.3	Espectro da amostra de solo 3 na faixa do infravermelho de ondas curtas e seu respectivo difratograma.	92
Figura 5.4	Curvas espectrais das amostras 1 (a), 2 (b) e 3 (c) na região do visível e infravermelho próximo.	93
Figura 5.5	Diferença entre os espectros de reflectância de laboratório e do AVIRIS para os pontos 4 e 5, na faixa de 2,0 a 2,4 μm .	94
Figura 5.6	Variação de IKi para os dados AVIRIS.	95
Figura 5.7	Vista geral da área de estudo.	95
Figura 5.8	Espacialização de IKi por meio de fatiamento.	96
Figura 5.9	Espectros obtidos nos dados do AVIRIS, representativos das classes de IKi apresentadas na figura 5.8. a) intervalo de $0,10 < IKi < 0,30$; b) intervalo $0,30 < IKi < 0,50$; c) intervalo $0,50 < IKi < 0,75$.	97
Figura 5.10	Fit images de caulinita (a) e gibbsita (b).	97
Figura 5.11	Mapeamento da relação molecular sílica-alumina. a) $RCGb_{scale}$. b) IKi.	98
Figura 5.12	Regressão linear entre $RCGb_{scale}$ e IKi.	98
Figura 5.13	Regressão linear entre o conteúdo de gibbsita (gibb%) e Igibb para as 52 amostras de Madeira Netto (1993).	100
Figura 5.14	Resultado das regressões lineares entre IKi e Ki (a) e entre RCGb e Ki (b).	102
Figura 5.15	Regressão linear entre os teores de argila (%) com o índice IT X (STM) para cada ponto amostrado no campo.	102
Figura 5.16	Mapeamento dos teores de argila utilizando-se dados AVIRIS.	103
Figura 5.17	Mapeamento dos teores de argila utilizando-se dados ASTER.	104
Figura 5.18	Espectros de reflectância dos solos da toposseqüência A.	105
Figura 5.19	Espectros de reflectância dos solos da toposseqüência B.	105
Figura 5.20	Espectros de reflectância dos solos da toposseqüência C.	105

Figura 5.21	Espectro de reflectância do ponto 1 da toposseqüência a. a) espectro normal; b) espectro com remoção do contínuo espectral, apresentando a feição da caulinita a 2,2 μm e a feição da gibbsita em torno de 2,265 μm .	106
Figura 5.22	Regressão linear entre os valores da relação caulinita/(caulinita+gibbsita) obtida por meio do ATG e RCGb por meio dos espectros (a) e por meio dos dados AVIRIS (b).	107
Figura 5.23	Espectros resultantes da modelagem matemática.	108
Figura 5.24	Espectros resultantes da modelagem matemática na faixa de 2,1 a 2,4 μm . a) espectros normais; b) espectros com remoção do contínuo espectral.	109
Figura 5.25	Valores de Ikaol e de Igibb obtidos por meio dos espectros resultantes da modelagem matemática.	110
Figura 5.26	Valores de RCGb obtidos por meio dos espectros resultantes da modelagem matemática.	110
Figura 5.27	Composição colorida com a área teste, 950816L02 subcena 03.	111
Figura 5.28	Imagem vapor d'água obtida com o método Green.	112
Figura 5.29	Imagem vapor d'água obtida com o método ATREM.	112
Figura 5.30	Diferença entre os dois métodos	113
Figura 5.31	Imagem água das folhas obtida pelo método Green.	113
Figura 5.32	Espectros obtidos nas imagens AVIRIS corrigidas pelos métodos ATREM e Green, para um mesmo ponto.	114
Figura 5.33	Diferença entre os espectros obtidos nas imagens AVIRIS corrigidas pelos métodos ATREM e Green, para um mesmo ponto.	114
Figura 5.34	Toposseqüência de valores de RCGb obtidos para as imagens corrigidas pelos métodos Green e ATREM e para a imagem radiância.	116
Figura 5.35	Valores de RCGb obtidos por meio do ATG, da imagem radiância, da imagem corrigida pelo método Green e pelo ATREM.	117
Figura 5.36	Resultado do reagrupamento de valores de RCGb.	117
Figura 5.37	Espectros de um mesmo ponto apresentando as feições de caulinita e de gibbsita. Radiância (a) e reflectância pelo método Green (b).	118
Figura 5.38	Imagens AVIRIS das áreas de estudo concatenadas, mostrando a diferença de cor dos solos devido à ausência e à presença de minerais opacos respectivamente.	119
Figura 5.39	Espacialização de RCGb para as duas áreas.	119
Figura 5.40	Diferença altimétrica entre a unidade ultramáfica e a área de estudos inserida na unidade máfica do leste.	120
Figura 5.41	Reclassificação da imagem de RCGb.	121
Figura 5.42	Resultado da regressão linear entre os dados de RCGb obtidos por ATG e pelo AVIRIS.	122
Figura 5.43	Mapeamento quantitativo da relação caulinita/(caulinita+gibbsita).	123
Figura 5.44	Valores de RCGb obtidos por ATG e pelo AVIRIS plotados para São João D'Aliança.	124
Figura 5.45	Valores de RCGb obtidos por ATG e pelo AVIRIS plotados para toposseqüência a de Niquelândia.	124

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1	Sistema Brasileiro de Classificação (Embrapa, 1999).	11
Tabela 2.2	Dados climatológicos para balanço hídrico - Posse, GO.	17
Tabela 2.3	Classificação climática de Thornthwaite e Mather (1955).	18
Tabela 2.4	Continuação da classificação de Thornthwaite e Mather (1955).	18
Tabela 3.1	Atribuição e localização das transições eletrônicas de hematita e goethita. Adaptado de Sherman e Waite, 1985.	38
Tabela 4.1	Descrição dos subsistemas sensores componentes do ASTER.	84
Tabela 5.1	Composição mineral da camada superficial das amostras de solos em São João D'Aliança.	90
Tabela 5.2	Coefficientes de determinação das regressões lineares entre os espectros de laboratório e os do AVIRIS.	93
Tabela 5.3	Valores de RCGb e Ki para as 52 amostras de Madeira Netto (1993).	101
Tabela 5.4	Resultado de RCGb obtidos por meio de ATG, do AVIRIS e dos espectros.	107
Tabela 5.5	Valores de RCGb para cada espectro obtido por modelagem espectral.	109
Tabela 5.6	Resultado do ATG para quantificação dos teores de caulinita e de gibbsita.	115
Tabela 5.7	Matriz de correlação de Pearson.	115
Tabela 5.8	RCGb obtido por meio dos dados ATG e por meio do AVIRIS para as amostras coletadas em São João D'Aliança (SJA) e em Niquelândia (NIQ).	121