

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Guilherme Lucio Abelha Mota

**Interpretação baseada em conhecimento aplicada
a imagens multitemporais de satélite de baixa resolução**

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Ciências da Engenharia Elétrica

Orientador: Raul Queiroz Feitosa
Co-orientadores: Heitor Luiz da Costa Coutinho
Claus-Eberhard Liedtke

Rio de Janeiro, 23 de março de 2004



Guilherme Lucio Abelha Mota

**Interpretação baseada em conhecimento aplicada
a imagens multitemporais de satélite de baixa resolução**

Tese de Doutorado apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Dr. Raul Queiroz Feitosa

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica - PUC-Rio

Dr. Heitor Luiz da Costa Coutinho

Co-orientador

EMBRAPA

Dr. Claus-Eberhard Liedtke

Co-orientador

Institut für Theoretische Nachrichtentechnik und Informationsverarbeitung

Dr. Kian Pakzad

Institut für Photogrammetrie und GeoInformation

Dr. Jorge Luis Nunes e Silva Brito

Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Dr. Sidnei Paciornik

Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia - PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico da PUC-Rio

Rio de Janeiro, 23 de março de 2004

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Guilherme Lucio Abelha Mota

Graduou-se em Engenharia Elétrica ênfase em Sistemas de Computação na UERJ em 1997, se especializando desde 1996 em processamento digital de imagem. Em 2001, completou o mestrado no Programa de Pós-Graduação Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio. Toma parte no projeto de cooperação internacional ECOWATCH que envolve instituições brasileiras e alemãs e é gerido pelo programa PROBRAL.

Ficha Catalográfica

Mota, Guilherme Lucio Abelha

Interpretação baseada em conhecimento aplicada a imagens multitemporais de satélite de baixa resolução / Guilherme Lucio Abelha Mota; orientador: Raul Queiroz Feitosa; co-orientador: Heitor Luiz da Costa Coutinho, Claus-Eberhard Liedtke. – Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia Elétrica, 2004.

210 f. : il. ; 30 cm

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica.

Inclui referências bibliográficas

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Processamento digital de imagens. 3. Interpretação baseada em conhecimento. 4. Imagens temporais de satélite de baixa resolução. 5. Satélite LANDSAT 7 ETM. 6. Lógica nebulosa. I. Feitosa, Raul Queiroz. II. Coutinho, Heitor Luiz da Costa. III. Liedtke, Claus-Eberhard. IV. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia elétrica. V. Título.

Agradecimentos

Ao meu orientador Prof. Raul Queiroz Feitosa.

Ao meu co-orientador estrangeiro Prof. Claus-Eberhard Liedtke

Ao meu co-orientador Heitor Luiz da Costa Coutinho

À toda equipe do projeto ECOWATCH

À CAPES, ao DAAD e ao CNPQ pelo apoio financeiro.

Aos meus pais e familiares.

Aos meus amigos.

Aos capoeiristas de Hannover.

Aos meus colegas da PUC e da Universidade de Hannover.

Resumo

Mota, Guilherme Lucio Abelha; Feitosa, Raul Queiroz. **Interpretação baseada em conhecimento aplicada a imagens multitemporais de satélite de baixa resolução** Rio de Janeiro, 2004, 210 p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A presente tese investiga a representação explícita de conhecimento específico na interpretação de imagens de baixa resolução multitemporais adquiridas por satélite. Neste contexto, o termo *conhecimento específico*, se refere a todo e qualquer tipo de conhecimento que torna um indivíduo capaz de ou mais apto para realizar uma determinada tarefa. Dentro do escopo desta tese, conhecimento específico compreende o conjunto das informações necessárias para a interpretação de imagens de satélite de baixa resolução, como por exemplo: as características das classes presentes, o manejo agrônômico e a ecologia da região de interesse. Assim sendo, a presente tese propõe um modelo para a interpretação baseada em conhecimento de imagens de satélite de baixa resolução visando reproduzir o raciocínio empregado pelo foto-intérprete ao realizar a interpretação visual. Neste modelo são empregadas diferentes formas de conhecimento específico: **1)** Conhecimento espectral que associa as diversas assinaturas espectrais observadas na imagem de entrada às classes da legenda, agrupando em uma única classe espectral as classes da legenda cujas assinaturas espectrais sejam de difícil discriminação. **2)** Conhecimento contextual que indica os diversos contextos relevantes para a discriminação de classes da legenda com assinaturas espectrais semelhantes. **3)** Conhecimento multitemporal que relaciona, considerando a classificação anterior, as classificações possíveis no presente momento e a possibilidade de ocorrência de cada uma delas. A potencialidade desta abordagem foi avaliada através de uma série de experimentos, onde, como base de dados, são utilizadas imagens de duas regiões inseridas na Alta Bacia do Rio Taquari ao leste do pantanal mato-grossense. O objetivo primordial destes experimentos foi explicitar a contribuição de cada forma de conhecimento. Os

resultados obtidos foram animadores e indicam que o uso de abordagens baseadas em conhecimento pode automatizar grande parte do processo de foto-interpretação, aumentando a produtividade dos foto-intérpretes. No futuro, os resultados da presente pesquisa contribuirão para a construção de sistemas capazes de realizar uma estratégia de interpretação qualquer a ser definida pelo próprio foto-intérprete, acelerando o monitoramento do uso do solo com base em imagens de baixa resolução adquiridas por satélite.

Palavras-chave

Processamento digital de imagens; interpretação baseada em conhecimento; interpretação de imagens multitemporais de satélite de baixa resolução; satélite LANDSAT 7 ETM; lógica nebulosa.

Abstract

Mota, Guilherme Lucio Abelha; Feitosa, Raul Queiroz (Advisor). **Knowledge based interpretation applied to multitemporal low resolution satellite images** Rio de Janeiro, 2004, 210 p. PhD. Thesis – Department of Electrical Engineering, Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro.

The present thesis investigates the explicit representation of specific knowledge for the automatic interpretation of multitemporal low resolution satellite images. In this context, the term specific knowledge refers to all and any type of knowledge that makes an individual capable or more competent to carry out one determined task. In the scope of this thesis, specific knowledge comprehends the necessary information for the interpretation of low resolution satellite images, for instance: the characteristics of the classes in the legend, the agronomic management, and the ecology of the region under interest. Thus, the present thesis proposes a framework for the knowledge based interpretation of low-resolution satellite images which concerns at reproducing the reasoning used by the photo-interpreter while performing the visual interpretation. This model employs three different kinds of specific knowledge: *1)* Spectral knowledge, that associates the diverse observed spectral signatures in the input image to the correspondent classes in the legend, grouping under a single spectral class the classes of the legend whose spectral signatures are difficult to be discriminated. *2)* Contextual knowledge, which indicates the diverse contexts for the discrimination of the classes in the legend with similar spectral signatures. *3)* Multitemporal knowledge, which relates, considering the previous classification, the possible classifications at the present moment and their respective possibility of occurrence. The potentiality of this methodology was evaluated through a series of experiments. The dataset consisted of images of two regions inserted in the Upper Watershed of the Taquari River, situated at the east of the Brazilian Pantanal, a lowlands ecological sanctuary located in the States of Mato Grosso and Mato Grosso do Sul. The main objective of the experiments was to evaluate the contribution of each sort of knowledge. The results indicate that

the use of knowledge based methods can automate great part of the interpretation process, increasing the productivity of the photointerpreters. In the future, the results of the present research can guide the development of systems capable to automatically perform any interpretation strategy, defined by the proper photointerpreter, speeding up the monitoring of land use based on low resolution satellite images.

Keywords

Digital image processing; knowledge based interpretation; interpretation of multitemporal low resolution satellite images; satellite LANDSAT 7 ETM; fuzzy logic.

Sumário

1	Introdução e justificativa	29
1.1.	Contexto e relevância da tese	29
1.2.	Objetivo desta tese	33
1.3.	Organização do restante deste documento	34
2	Trabalhos anteriores	35
2.1.	Estado da arte da interpretação de imagens de sensores remotos com uso de conhecimento prévio	35
2.2.	Aplicação de métodos baseados em conhecimento para a interpretação de imagens de baixa resolução obtidas por satélite	38
2.2.1.	Publicações produzidas ao longo desta tese	40
3	Fundamentos de sensoriamento remoto	41
3.1.	Caracterização da radiação eletromagnética	42
3.2.	Interação da energia eletromagnética na atmosfera	43
3.2.1.	Dispersão	43
3.2.2.	Absorção	44
3.3.	Interação da energia eletromagnética com a superfície da Terra	44
3.4.	Aquisição das imagens	45
3.5.	Interpretação de imagens de sensores remotos	46
4	Modelo proposto	48
4.1.	Descrição geral do modelo	48
4.2.	Conhecimento específico	49
4.2.1.	Modalidades de conhecimento	49
4.2.2.	Extração automática do conhecimento espectral	50
4.3.	Classificador dos segmentos	54

4.3.1. Máquina de Inferência	55
4.3.2. Representação do conhecimento no classificador dos segmentos	58
5 Implementação	59
5.1. Procedimento de segmentação	59
5.2. Seleção automática dos conjuntos de treinamento	62
5.3. Procedimento automático de aprendizado das assinaturas	64
5.4. Fuzzyficação das assinaturas espectrais	65
5.5. Representação do conhecimento multitemporal	66
6 Procedimento experimental	68
6.1. Município de Alcinópolis – Mato Grosso do Sul	69
6.2. Resultado de referência	72
6.3. Conhecimento específico	78
6.3.1. Classes da legenda	79
6.3.2. Vetor de Atributos	80
6.3.3. Conhecimento espectral	81
6.3.4. Conhecimento estrutural	81
6.3.5. Conhecimento multitemporal	84
6.3.6. Regras de inferência	89
6.4. Experimentos	91
6.4.1. Avaliação da seleção automática do conjunto de treinamento	91
6.4.2. Classificação espectral	99
6.4.3. Classificação empregando conhecimentos espectral e estrutural	114
6.4.4. Classificação agregando o conhecimento multitemporal	132
6.4.5. Avaliação final dos resultados	191
7 Conclusões e trabalhos futuros	199
8 Referências Bibliográficas	203

Lista de figuras

Figura 1 – Processo de sensoriamento remoto (Lillesand, 1999)	41
Figura 2 – Curvas de reflectância espectral de diferentes classes de uso do solo (Richards, 1999).	45
Figura 3 – Procedimento para a interpretação automática de imagens de satélite de baixa resolução	48
Figura 4 – Detecção automática de mudanças	52
Figura 5 – Procedimento de interpretação automática de imagens de sensores remotos de baixa resolução, incluindo o método automático de seleção de amostras de treinamento.	53
Figura 6 – Classificador dos segmentos	54
Figura 7 - Resultado obtido após a aplicação do algoritmo watershed, etapa e).	61
Figura 8 – Resultado do procedimento de segmentação	62
Figura 9 – Exemplo de diagrama de transição de estados.	66
Figura 10 – Exemplo do ambiente utilizado na interpretação visual.	73
Figura 11 – Resultado de referência para área 1, agosto de 1999.	73
Figura 12 – Resultado de referência para área 1, agosto de 2000.	74
Figura 13 – Resultado de referência para área 1, agosto de 2001.	74
Figura 14 – Resultado de referência para área 2, agosto de 1999.	75
Figura 15 – Resultado de referência para área 2, agosto de 2000.	76
Figura 16 – Resultado de referência para área 2, agosto de 2001.	77
Figura 17 – Funções de pertinência dos rótulos. $A_{2,1}$ e $A_{2,2}$.	83
Figura 18 – Diagrama de transição de estados que define o conhecimento multitemporal binário.	85
Figura 19 – Diagrama de transição de estados que define o conhecimento multitemporal ponderado.	87
Figura 20 – Número de exemplos estáveis e alterados da classe solo	

exposto, em função de α , presentes no conjunto de treinamento produzido pelo método automático de seleção.	93
Figura 21 – Número de exemplos estáveis e alterados da classe mata ciliar, em função de α , presentes no conjunto de treinamento produzido pelo método automático de seleção.	93
Figura 22 – Número de exemplos estáveis e alterados da classe pasto, em função de α , presentes no conjunto de treinamento produzido pelo método automático de seleção.	94
Figura 23 – Número de exemplos estáveis e alterados da classe corpos d'água, em função de α , presentes no conjunto de treinamento produzido pelo método automático de seleção.	94
Figura 24 – Número de exemplos estáveis e alterados da classe cerradão, em função de α , presentes no conjunto de treinamento produzido pelo método automático de seleção.	95
Figura 25 – Número de exemplos estáveis e alterados da classe cerradão em regeneração, em função de α , presentes no conjunto de treinamento produzido pelo método automático de seleção.	95
Figura 26 – Número de exemplos estáveis e alterados de todas as classes simultaneamente, em função de α , presentes no conjunto de treinamento produzido pelo método automático de seleção.	96
Figura 27 – Resultado da classificação espectral da área 1 em 2000 empregando conjunto de treinamento selecionado manualmente.	99
Figura 28 – Resultado da classificação espectral da área 1 em 2001 empregando conjunto de treinamento selecionado manualmente.	100
Figura 29 – Resultado da classificação espectral da área 2 em 2000 empregando conjunto de treinamento selecionado manualmente.	101
Figura 30 – Resultado da classificação espectral da área 2 em 2001 empregando conjunto de treinamento selecionado	

manualmente.	102
Figura 31 – Resultado da classificação espectral da área 1 em 2000 empregando conjunto de treinamento produzido pelo método de seleção automática.	105
Figura 32 – Resultado da classificação espectral da área 1 em 2001 empregando conjunto de treinamento produzido pelo método de seleção automática.	106
Figura 33 – Resultado da classificação espectral da área 2 em 2000 empregando conjunto de treinamento produzido pelo método de seleção automática.	107
Figura 34 – Resultado da classificação espectral da área 2 em 2001 empregando conjunto de treinamento produzido pelo método de seleção automática.	108
Figura 35 – Taxa de reconhecimento global produzida pela classificação espectral com seleção manual e automática do conjunto de treinamento para as imagens das áreas 1 e 2 em 2000.	111
Figura 36 – Taxa de reconhecimento global produzida pela classificação espectral com seleção manual e automática do conjunto de treinamento para as imagens das áreas 1 e 2 em 2001.	111
Figura 37 – Taxa de reconhecimento classe a classe produzida pela classificação espectral com seleção manual e automática do conjunto de treinamento para as imagens das áreas 1 e 2 em 2000.	112
Figura 38 – Taxa de reconhecimento classe a classe produzida pela classificação espectral com seleção manual e automática do conjunto de treinamento para as imagens das áreas 1 e 2 em 2001.	113
Figura 39 – Resultado da classificação da área 1 em 2000 empregando conhecimento espectral e contextual e o conjunto de treinamento selecionado de forma manual.	115
Figura 40 – Resultado da classificação da área 1 em 2001	

- empregando conhecimento espectral e contextual e o conjunto de treinamento selecionado de forma manual. 116
- Figura 41 – Resultado da classificação da área 2 em 2000 empregando conhecimento espectral e contextual e o conjunto de treinamento selecionado de forma manual. 117
- Figura 42 – Resultado da classificação da área 2 em 2001 empregando conhecimento espectral e contextual e o conjunto de treinamento selecionado de forma manual. 118
- Figura 43 – Resultado da classificação da área 1 em 2000 empregando conhecimento espectral e contextual e o conjunto de treinamento produzido pelo método de seleção automática. 121
- Figura 44 – Resultado da classificação da área 1 em 2001 empregando conhecimento espectral e contextual e o conjunto de treinamento produzido pelo método de seleção automática. 122
- Figura 45 – Resultado da classificação da área 2 em 2000 empregando conhecimento espectral e contextual e o conjunto de treinamento produzido pelo método de seleção automática. 123
- Figura 46 – Resultado da classificação da área 2 em 2001 empregando conhecimento espectral e contextual e o conjunto de treinamento produzido pelo método de seleção automática. 124
- Figura 47 – Taxa de reconhecimento global produzida pela classificação espectral e pela classificação empregando conhecimentos espectral e contextual com seleção manual e automática do conjunto de treinamento para as imagens das áreas 1 e 2 em 2000. 127
- Figura 48 – Taxa de reconhecimento global produzida pela classificação espectral e pela classificação empregando conhecimentos espectral e contextual com seleção manual e automática do conjunto de treinamento para as imagens das áreas 1 e 2 em 2001. 128
- Figura 49 – Taxas de reconhecimento classe a classe produzidas pela classificação espectral e pela classificação empregando conhecimentos espectral e contextual com seleção manual e

- automática do conjunto de treinamento para as imagens das áreas 1 e 2 em 2000. 129
- Figura 50 - Taxas de reconhecimento classe a classe produzidas pela classificação espectral e pela classificação empregando conhecimentos espectral e contextual com seleção manual e automática do conjunto de treinamento para as imagens das áreas 1 e 2 em 2001. 130
- Figura 51 – Resultado para a área 1 em 2000 da classificação espectral associada ao conhecimento multitemporal binário empregando o conjunto de treinamento selecionado de forma manual. 133
- Figura 52 – Resultado para a área 1 em 2001 da classificação espectral associada ao conhecimento multitemporal binário empregando o conjunto de treinamento produzido de forma manual. 134
- Figura 53 – Resultado para a área 2 em 2000 da classificação espectral associada ao conhecimento multitemporal binário empregando o conjunto de treinamento produzido de forma manual. 135
- Figura 54 – Resultado para a área 2 em 2001 da classificação espectral associada ao conhecimento multitemporal binário empregando o conjunto de treinamento produzido de forma manual. 136
- Figura 55 – Resultado para a área 1 em 2000 da classificação espectral associada ao conhecimento multitemporal binário empregando o conjunto de treinamento produzido pelo método de seleção automática. 139
- Figura 56 – Resultado para a área 1 em 2001 da classificação espectral associada ao conhecimento multitemporal binário empregando o conjunto de treinamento produzido pelo método de seleção automática. 140
- Figura 57 – Resultado para a área 2 em 2000 da classificação espectral associada ao conhecimento multitemporal binário

- empregando o conjunto de treinamento produzido pelo método de seleção automática. 141
- Figura 58 – Resultado para a área 2 em 2001 da classificação espectral associada ao conhecimento multitemporal binário empregando o conjunto de treinamento produzido pelo método de seleção automática. 142
- Figura 59 – Resultado para a área 1 em 2000 da classificação empregando conhecimentos espectral, contextual e multitemporal binário e o conjunto de treinamento selecionado de forma manual. 145
- Figura 60 – Resultado para a área 1 em 2001 da classificação empregando conhecimentos espectral, contextual e multitemporal binário e o conjunto de treinamento selecionado de forma manual. 146
- Figura 61 – Resultado para a área 2 em 2000 da classificação empregando conhecimentos espectral, contextual e multitemporal binário e o conjunto de treinamento selecionado de forma manual. 147
- Figura 62 – Resultado para a área 2 em 2001 da classificação empregando conhecimentos espectral, contextual e multitemporal binário e o conjunto de treinamento selecionado de forma manual. 148
- Figura 63 – Resultado para a área 1 em 2000 da classificação empregando conhecimentos espectral, contextual e multitemporal binário e o conjunto de treinamento produzido pelo método de seleção automática. 151
- Figura 64 – Resultado para a área 1 em 2001 da classificação empregando conhecimentos espectral, contextual e multitemporal binário e o conjunto de treinamento produzido pelo método de seleção automática. 152
- Figura 65 – Resultado para a área 2 em 2000 da classificação empregando conhecimentos espectral, contextual e multitemporal binário e o conjunto de treinamento produzido

pelo método de seleção automática. 153

Figura 66 – Resultado para a área 1 em 2001 da classificação empregando conhecimentos espectral, contextual e multitemporal binário e o conjunto de treinamento produzido pelo método de seleção automática. 154

Figura 67 - Taxas de reconhecimento, com seleção manual e automática do conjunto de treinamento para a imagem de 2000, produzidas pela classificação empregando conhecimentos espectral e contextual, pela classificação espectral associada ao conhecimento multitemporal binário e pela classificação empregando conhecimentos espectral, contextual e multitemporal binário. 157

Figura 68 – Taxas de reconhecimento, com seleção manual e automática do conjunto de treinamento para a imagem de 2001, produzidas pela classificação empregando conhecimentos espectral e contextual, pela classificação espectral associada ao conhecimento multitemporal binário e pela classificação empregando conhecimentos espectral, contextual e multitemporal binário. 158

Figura 69 – Comparação das taxas de reconhecimento classe a classe, para a imagem de 2000 com seleção manual e automática do conjunto de treinamento, produzidas pela classificação considerando conhecimentos espectral e contextual, pela classificação espectral combinada com o conhecimento multitemporal binário e a classificação considerando conhecimentos espectral, contextual e multitemporal binário. 159

Figura 70 – Comparação das taxas de reconhecimento classe a classe, para a imagem de 2001 com seleção manual e automática do conjunto de treinamento, produzidas pela classificação considerando conhecimentos espectral e contextual, pela classificação espectral combinada com o conhecimento multitemporal binário e a classificação

considerando conhecimentos espectral, contextual e multitemporal binário. 160

Figura 71 – Resultado para a área 1 em 2000 da classificação espectral associada ao conhecimento multitemporal ponderado empregando o conjunto de treinamento selecionado de forma manual. 162

Figura 72 – Resultado para a área 1 em 2001 da classificação espectral associada ao conhecimento multitemporal ponderado empregando o conjunto de treinamento produzido de forma manual. 163

Figura 73 – Resultado para a área 2 em 2000 da classificação espectral associada ao conhecimento multitemporal ponderado empregando o conjunto de treinamento produzido de forma manual. 164

Figura 74 – Resultado para a área 2 em 2001 da classificação espectral associada ao conhecimento multitemporal ponderado empregando o conjunto de treinamento produzido de forma manual. 165

Figura 75 – Resultado para a área 1 em 2000 da classificação espectral associada ao conhecimento multitemporal ponderado empregando o conjunto de treinamento produzido pelo método de seleção automática. 168

Figura 76 – Resultado para a área 1 em 2001 da classificação espectral associada ao conhecimento multitemporal ponderado empregando o conjunto de treinamento produzido pelo método de seleção automática. 169

Figura 77 – Resultado para a área 2 em 2000 da classificação espectral associada ao conhecimento multitemporal ponderado empregando o conjunto de treinamento produzido pelo método de seleção automática. 170

Figura 78 – Resultado para a área 2 em 2001 da classificação espectral associada ao conhecimento multitemporal ponderado empregando o conjunto de treinamento produzido pelo método

de seleção automática.	171
Figura 79 – Resultado para a área 1 em 2000 da classificação empregando conhecimentos espectral, contextual e multitemporal ponderado e utilizando o conjunto de treinamento selecionado de forma manual.	174
Figura 80 – Resultado para a área 1 em 2001 da classificação empregando conhecimentos espectral, contextual e multitemporal ponderado e utilizando o conjunto de treinamento selecionado de forma manual.	175
Figura 81 – Resultado para a área 2 em 2000 da classificação empregando conhecimentos espectral, contextual e multitemporal ponderado e utilizando o conjunto de treinamento selecionado de forma manual.	176
Figura 82 – Resultado para a área 2 em 2001 da classificação empregando conhecimentos espectral, contextual e multitemporal ponderado e utilizando o conjunto de treinamento selecionado de forma manual.	177
Figura 83 – Resultado para a área 1 em 2000 da classificação empregando conhecimentos espectral, contextual e multitemporal ponderado e utilizando o conjunto de treinamento produzido pelo método de seleção automática.	180
Figura 84 – Resultado para a área 1 em 2001 da classificação empregando conhecimentos espectral, contextual e multitemporal ponderado e utilizando o conjunto de treinamento produzido pelo método de seleção automática.	181
Figura 85 – Resultado para a área 2 em 2000 da classificação empregando conhecimentos espectral, contextual e multitemporal ponderado e utilizando o conjunto de treinamento produzido pelo método de seleção automática.	182
Figura 86 – Resultado para a área 2 em 2001 da classificação empregando conhecimentos espectral, contextual e multitemporal ponderado e utilizando o conjunto de treinamento produzido pelo método de seleção automática.	183

- Figura 87 – Taxa de reconhecimento, para a imagem de 2000 empregando os conjuntos de treinamento produzidos de forma manual e automática, possibilitada pela classificação empregando conhecimentos espectral, contextual e multitemporal binário, pela classificação espectral associada ao conhecimento multitemporal ponderado e pela classificação empregando conhecimentos espectral, contextual e multitemporal ponderado. 186
- Figura 88 – Taxa de reconhecimento, para a imagem de 2001 empregando os conjuntos de treinamento produzidos de forma manual e automática, possibilitada pela classificação empregando conhecimentos espectral, contextual e multitemporal binário, pela classificação espectral associada ao conhecimento multitemporal ponderado e pela classificação empregando conhecimentos espectral, contextual e multitemporal ponderado. 187
- Figura 89 – Taxa de reconhecimento classe a classe, para a imagem de 2000, possibilitada pela classificação empregando conhecimentos espectral, contextual e multitemporal binário, pela classificação espectral associada ao conhecimento multitemporal ponderado e pela classificação empregando conhecimentos espectral, contextual e multitemporal ponderado. 188
- Figura 90 – Taxa de reconhecimento classe a classe, para a imagem de 2001 possibilitada pela classificação empregando conhecimentos espectral, contextual e multitemporal binário, pela classificação espectral associada ao conhecimento multitemporal ponderado e pela classificação empregando conhecimentos espectral, contextual e multitemporal ponderado 189
- Figura 91 – Taxa de reconhecimento, para a imagem de 2000 com os conjuntos de treinamento produzidos de forma manual e automática, fornecida pela classificação espectral, classificação empregando os conhecimentos espectral e contextual, classificação espectral associada ao conhecimento

multitemporal binário, classificação considerando conhecimentos espectral, contextual e multitemporal binário, classificação espectral associada ao conhecimento multitemporal ponderado, classificação considerando conhecimentos espectral, contextual e multitemporal ponderado. 191

Figura 92 – Taxa de reconhecimento, para a imagem de 2001 com os conjuntos de treinamento produzidos de forma manual e automática, fornecida pela classificação espectral, classificação empregando os conhecimentos espectral e contextual, classificação espectral associada ao conhecimento multitemporal binário, classificação considerando conhecimentos espectral, contextual e multitemporal binário, classificação espectral associada ao conhecimento multitemporal ponderado, classificação considerando conhecimentos espectral, contextual e multitemporal ponderado. 192

Figura 93 – Taxa de reconhecimento classe a classe, para a imagem de 2000 com o conjunto de treinamento selecionado de forma manual, produzida pela classificação espectral; classificação empregando os conhecimentos espectral e contextual; classificação espectral associada ao conhecimento multitemporal binário; classificação considerando conhecimentos espectral, contextual e multitemporal binário; classificação espectral associada ao conhecimento multitemporal ponderado; classificação considerando conhecimentos espectral, contextual e multitemporal ponderado. 194

Figura 94 – Taxa de reconhecimento classe a classe, para a imagem de 2000 com o conjunto de treinamento selecionado de forma automática, produzida pela classificação espectral; classificação empregando os conhecimentos espectral e contextual; classificação espectral associada ao conhecimento multitemporal binário; classificação considerando conhecimentos espectral, contextual e multitemporal binário; classificação espectral associada ao conhecimento

multitemporal ponderado; classificação considerando conhecimentos espectral, contextual e multitemporal ponderado. 195

Figura 95 – Taxa de reconhecimento classe a classe, para a imagem de 2001 com o conjunto de treinamento selecionado de forma manual, produzida pela classificação espectral; classificação empregando os conhecimentos espectral e contextual; classificação espectral associada ao conhecimento multitemporal binário; classificação considerando conhecimentos espectral, contextual e multitemporal binário; classificação espectral associada ao conhecimento multitemporal ponderado; classificação considerando conhecimentos espectral, contextual e multitemporal ponderado. 196

Figura 96 – Taxa de reconhecimento classe a classe, para a imagem de 2001 com o conjunto de treinamento selecionado de forma automática, produzida pela classificação espectral; classificação empregando os conhecimentos espectral e contextual; classificação espectral associada ao conhecimento multitemporal binário; classificação considerando conhecimentos espectral, contextual e multitemporal binário; classificação espectral associada ao conhecimento multitemporal ponderado; classificação considerando conhecimentos espectral, contextual e multitemporal ponderado.. 197

Lista de tabelas

Tabela 1 – Estados anteriores que podem ocasionar cada um dos estados atuais.	66
Tabela 2 – Conjuntos nebulosos que representam o diagrama de transição de estados apresentado na figura 9.	67
Tabela 3 – Coordenadas e dimensões das áreas 1 e 2.	69
Tabela 4– Atividades econômicas com maior potencial	70
Tabela 5 – Tipos de pastagem, população de bovinos, ocupação média (1985/1995)	71
Tabela 6 – Regiões atribuídas, no resultado de referência (interpretação visual), à cada uma das classes de interesse e evolução do uso do solo nos intervalos 1999-2000 e 2000-2001.	78
Tabela 7 – Classes de uso da terra e cobertura vegetal presentes nas áreas 1 e 2.	79
Tabela 8 – Rótulos da variável resposta espectral	81
Tabela 9 – Rótulos lingüísticos da variável localização do segmento	82
Tabela 10 – Transições possíveis para $\Delta t = 1$ ano.	84
Tabela 11 – Conjuntos nebulosos que definem a base de conhecimento multitemporal binário, funções de pertinência dos rótulos associados a v_3 , classificação anterior (legenda: ω_1 - solo exposto, ω_2 - mata ciliar, ω_3 - pasto, ω_4 - corpos d'água, ω_5 - cerradão e ω_6 - cerradão em regeneração).	86
Tabela 12 – Conjuntos nebulosos que definem a base de conhecimento multitemporal ponderado, funções de pertinência dos rótulos associados a v_3 , classificação anterior (legenda: ω_1 - solo exposto, ω_2 - mata ciliar, ω_3 - pasto, ω_4 - corpos d'água, ω_5 - cerradão e ω_6 - cerradão em regeneração).	88
Tabela 13 – Estratégia de classificação	90

Tabela 14 – Conjunto de regras que expressam a estratégia de classificação (legenda: ω_1 - solo exposto, ω_2 - mata ciliar, ω_3 - pasto, ω_4 - corpos d'água, ω_5 - cerradão e ω_6 - cerradão em regeneração).	90
Tabela 15 – Resposta espectral média das classes mais confundidas pela classificação espectral.	92
Tabela 17 – Avaliação da classificação espectral, empregando o classificador de distância de Mahalanobis, da imagem de 2000 (matriz de confusão, taxa de reconhecimento erros de omissão e comissão) utilizando a seleção manual do conjunto de treinamento intervalo 1999-2000.	103
Tabela 18 – Avaliação da classificação espectral, empregando o classificador de distância de Mahalanobis, da imagem de 2001 (matriz de confusão, taxa de reconhecimento erros de omissão e comissão) utilizando a seleção manual do conjunto de treinamento intervalo 2000-2001.	104
Tabela 19 – Avaliação da classificação espectral da imagem de 2000 (matriz de confusão, taxa de reconhecimento erros de omissão e comissão) utilizando a seleção automática do conjunto de treinamento intervalo 1999-2000.	109
Tabela 20 – Avaliação da classificação espectral da imagem de 2001 (matriz de confusão, taxa de reconhecimento erros de omissão e comissão) utilizando a seleção automática do conjunto de treinamento intervalo 2000-2001.	110
Tabela 21 – Avaliação da classificação empregando conhecimento espectral e contextual da imagem de 2000 (matriz de confusão, taxa de reconhecimento erros de omissão e comissão) utilizando a seleção manual do conjunto de treinamento intervalo 1999-2000.	119
Tabela 22 – Avaliação da classificação empregando conhecimento espectral e contextual da imagem de 2001 (matriz de confusão, taxa de reconhecimento erros de omissão e comissão) utilizando a seleção manual do conjunto de treinamento	

intervalo 2000-2001.	120
Tabela 23 – Avaliação da classificação empregando conhecimento espectral e contextual da imagem de 2000 (matriz de confusão, taxa de reconhecimento erros de omissão e comissão) utilizando a seleção automática do conjunto de treinamento intervalo 1999-2000.	125
Tabela 24 – Avaliação da classificação empregando conhecimento espectral e contextual da imagem de 2001 (matriz de confusão, taxa de reconhecimento erros de omissão e comissão) utilizando a seleção automática do conjunto de treinamento intervalo 2000-2001.	126
Tabela 28 – Avaliação da classificação da imagem de 2000 empregando a classificação espectral e conhecimento multitemporal binário (matriz de confusão, taxa de reconhecimento erros de omissão e comissão) utilizando a seleção manual do conjunto de treinamento intervalo 1999-2000.	137
Tabela 29 – Avaliação da classificação da imagem de 2001 empregando a classificação espectral e conhecimento multitemporal binário (matriz de confusão, taxa de reconhecimento erros de omissão e comissão) utilizando a seleção manual do conjunto de treinamento intervalo 2000-2001.	138
Tabela 30 – Avaliação da classificação da imagem de 2000 empregando a classificação espectral e conhecimento multitemporal binário (matriz de confusão, taxa de reconhecimento erros de omissão e comissão) utilizando a seleção automática do conjunto de treinamento intervalo 1999-2000.	143
Tabela 31 – Avaliação da classificação da imagem de 2001 empregando a classificação espectral e conhecimento multitemporal binário(matriz de confusão, taxa de reconhecimento erros de omissão e comissão) utilizando a	

- seleção automática do conjunto de treinamento intervalo 2000-2001. 144
- Tabela 32 – Avaliação da classificação da imagem de 2000 empregando conhecimento espectral, contextual e multitemporal binário (matriz de confusão, taxa de reconhecimento erros de omissão e comissão) utilizando a seleção manual do conjunto de treinamento intervalo 1999-2000. 149
- Tabela 33 – Avaliação da classificação da imagem de 2001 empregando conhecimento espectral, contextual e multitemporal binário (matriz de confusão, taxa de reconhecimento erros de omissão e comissão) utilizando a seleção manual do conjunto de treinamento intervalo 2000-2001. 150
- Tabela 34 – Avaliação da classificação da imagem de 2000 empregando conhecimento espectral, contextual e multitemporal binário (matriz de confusão, taxa de reconhecimento erros de omissão e comissão) utilizando a seleção automática do conjunto de treinamento intervalo 1999-2000. 155
- Tabela 35 – Avaliação da classificação da imagem de 2001 empregando conhecimento espectral, contextual e multitemporal binário(matriz de confusão, taxa de reconhecimento erros de omissão e comissão) utilizando a seleção automática do conjunto de treinamento intervalo 2000-2001. 156
- Tabela 36 – Avaliação da classificação da imagem de 2000 empregando a classificação espectral e conhecimento multitemporal ponderado (matriz de confusão, taxa de reconhecimento erros de omissão e comissão) utilizando a seleção manual do conjunto de treinamento intervalo 1999-2000. 166
- Tabela 37 – Avaliação da classificação da imagem de 2001

- empregando a classificação espectral e conhecimento multitemporal ponderado (matriz de confusão, taxa de reconhecimento erros de omissão e comissão) utilizando a seleção manual do conjunto de treinamento intervalo 2000-2001. 167
- Tabela 38 – Avaliação da classificação da imagem de 2000 empregando a classificação espectral e conhecimento multitemporal ponderado (matriz de confusão, taxa de reconhecimento erros de omissão e comissão) utilizando a seleção automática do conjunto de treinamento intervalo 1999-2000. 172
- Tabela 39 – Avaliação da classificação da imagem de 2001 empregando a classificação espectral e conhecimento multitemporal ponderado (matriz de confusão, taxa de reconhecimento erros de omissão e comissão) utilizando a seleção automática do conjunto de treinamento intervalo 2000-2001. 173
- Tabela 40 – Avaliação da classificação da imagem de 2000 empregando conhecimento espectral, contextual e multitemporal ponderado (matriz de confusão, taxa de reconhecimento erros de omissão e comissão) utilizando a seleção manual do conjunto de treinamento intervalo 1999-2000. 178
- Tabela 41 – Avaliação da classificação da imagem de 2001 empregando conhecimento espectral, contextual e multitemporal ponderado (matriz de confusão, taxa de reconhecimento erros de omissão e comissão) utilizando a seleção manual do conjunto de treinamento intervalo 2000-2001. 179
- Tabela 42 – Avaliação da classificação da imagem de 2000 empregando conhecimento espectral, contextual e multitemporal ponderado (matriz de confusão, taxa de reconhecimento erros de omissão e comissão) utilizando a

seleção automática do conjunto de treinamento intervalo 1999-2000.

184

Tabela 43 – Avaliação da classificação da imagem de 2001 empregando conhecimento espectral, contextual e multitemporal ponderado (matriz de confusão, taxa de reconhecimento erros de omissão e comissão) utilizando a seleção automática do conjunto de treinamento intervalo 2000-2001.

185