

**MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA**  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

**UMA ARQUITETURA DE SISTEMAS ESPECIALISTAS  
NEBULOSOS PARA CLASSIFICAÇÃO DE  
IMAGENS UTILIZANDO OPERADORES DA  
MORFOLOGIA MATEMÁTICA**

Ronei Marcos de Moraes

**Tese de Doutorado em Computação Aplicada,  
orientada pelo Dr. Gerald Jean Francis Banon e pela  
Dra. Sandra Aparecida Sandri, aprovada em  
fevereiro de 1998.**

INPE  
São José dos Campos - SP  
Fevereiro de 1998

## **RESUMO**

Neste trabalho propomos uma arquitetura de sistemas especialistas nebulosos para classificação de imagens. Nestes sistemas, as regras são construídas através de operadores da Morfologia Matemática invariantes a translação. A tradução das regras em seqüências de operadores da Morfologia Matemática é mostrada detalhadamente. Um sistema especialista com essa arquitetura é aplicado a uma área na Floresta Nacional do Tapajós, no estado brasileiro do Pará. Os resultados da classificação são comparados com uma imagem classificada visualmente.

# **A FUZZY EXPERT SYSTEMS ARCHITETURE FOR IMAGE CLASSIFICATION USING MATHEMATICAL MORPHOLOGY OPERATORS**

## **ABSTRACT**

In this work, we propose a fuzzy expert system architecture for image classification. In these expert systems, the rules are constructed through translation invariant Mathematical Morphology operators. The rule translation into Mathematical Morphology operators sequences is shown in details. An expert system constructed with this architecture is applied to area of Tapajós National Florest, in the Brazilian state of Pará. The classification results are compared with a visually classified image.

# Sumário

	pág
Lista de Figuras .....	xv
Lista de Tabelas .....	xvii
1 Introdução .....	1
2 Aspectos Gerais .....	3
2.1 Teoria dos Conjuntos Nebulosos ("Fuzzy Sets").....	3
2.1.1 O que são "Fuzzy Sets" .....	3
2.1.2 Operações com Conjuntos Nebulosos .....	5
2.2 Sistemas Especialistas .....	8
2.3 Conceitos da Morfologia Matemática .....	14
2.3.1 A Função Distância .....	18
2.3.2 A Limiarização .....	20
2.3.3 A Abertura por Reconstrução .....	21
2.3.4 O Sup-gerador .....	21
2.4 O Sistema Khoros .....	21
2.5 Os Tipos de Classificação de Imagens .....	22
2.5.1 A Classificação Visual de Imagens .....	23
2.5.2 Classificação Assistida por Sistema Especialista .....	24
3 Sistemas especialistas para classificação de imagens .....	27
3.1 O Sistema de Interpretação de Imagens ICARE .....	28
3.2 Considerações Sobre o Sistema ICARE .....	38
4 Proposta de Um Sistema Especialista para Classificação de Imagens ....	41
4.1 A Arquitetura do Sistema .....	42
4.2 Considerações para a Implementação Usando Morfologia Matemática .....	49
4.2.1 A Modelagem das Regras .....	50
5 Utilização da Arquitetura Proposta .....	57
5.1 A Floresta Nacional do Tapajós .....	57
5.2 A Classificação Visual da Área .....	60
5.3 As Tabelas de Conhecimento .....	60
5.4 A Implementação das Regras .....	64
5.4.1 Isolando Atributos da Imagem .....	64
5.4.2 As Áreas Classificadas .....	87
6 Comparação com um mapa de referência .....	89
6.1 Os coeficientes de comparação .....	89
6.1.1 O Coeficiente de Exatidão Global .....	92
6.1.2 O Coeficiente Kappa .....	92

6.1.3 O Coeficiente Tau .....	93
6.2 Resultados .....	94
7 Conclusões Finais e Sugestões .....	97
7.1 Conclusões Finais .....	97
7.2 Sugestões para Trabalhos Futuros .....	99
Referências Bibliográficas .....	101
Apêndice A - As Bandas do Satélite Landsat .....	109
Apêndice B - As Imagens Utilizadas .....	113

## Lista de Figuras

	pág
2.1 Raciocínio nebuloso simplificado com uma regra e com implicação $\nabla = \sim A \vee B$ e $\nabla = \min$ , e com exemplo de 3 fatos precisos $x^* = x_i$ .....	12
2.2 Agregação com $\diamond = \max$ para a função de implicação $\nabla = \min$ .....	13
2.3 Transformação sobre imagens .....	15
2.4 Exemplos de operadores morfológicos elementares .....	16
2.5 Exemplos de alguns operadores morfológicos de dupla função .....	17
2.6 Aplicação da função distância a uma imagem binária com três círculos no Khoros 1.0.5 .....	19
2.7 A função distância em termos de operadores morfológicos .....	20
3.1 Diagrama geral de um sistema de interpretação de imagens .....	29
3.2 As três fases do sistema ICARE .....	39
3.3 Diagrama de cálculo de $\text{appar}(x,y)$ .....	40
4.1 Raciocínio nebuloso quando a implicação é $A \wedge B$ e a agregação é dada pelo $\max$ .....	45
4.2 Seqüência de operações no Khoros representando um sistema especialista, com $\nabla = \min$ e $\diamond = \max$ .....	46
4.3 Seqüência de operações no Khoros 1.0.5 sobre uma imagem .....	48
5.1 Localização do Parque Nacional do Tapajós no Pará (fonte: Projeto RADAMBRASIL, 1983) .....	58
5.2 Composição colorida RGB da imagem da Floresta Nacional do Tapajós sobre a cidade de Aveiro .....	59
5.3 Resultado da classificação visual .....	61
5.4 Legenda da classificação da figura 5.3 .....	61
5.5 “Workspace” que gera a classificação para uma imagem com quatro bandas .....	65
5.6 “Workspace” que extrai o atributo Rio da imagem .....	69
5.7 “Workspace” que obtém a componente Direita do Rio .....	69
5.8 “Workspace” que extrai o atributo Margem Direita do Rio .....	70
5.9 “Workspace” que extrai o atributo Área Antropizada .....	72
5.10 “Workspace” que extrai o atributo Cidade de Aveiro .....	74
5.11 “Workspace” que extrai o sub-atributo Floresta Ombrófila Densa Submontana .....	75
5.12 “Workspace” que extrai o atributo Drenagem Densa (regras $R_8$ e $R_9$ ) .	77
5.13 “Workspace” que implementa a segmentação no Khoros 2.1 .....	78
5.14 Operadores que compõem a “caixinha” Componentes Conexas .....	79
5.15 “Workspace” que isola o atributo Floresta Aluvial .....	82
5.16 “Workspace” que isola o atributo Área de Contato de formações pioneiras com floresta .....	84

5.17 “Workspace” que isola o atributo Áreas de Mistura .....	86
6.1 Resultado final da classificação .....	90
6.2 Legendas da classificação da figura 6.1 .....	91
6.3 Localização espacial dos erros de classificação .....	91
A.1 O satélite LANDSAT .....	109

## Lista de Tabelas

	pág
2.1 T-norams e T-conorams duais .....	6
2.2 Operadores de implicação .....	7
3.1 Exemplo de conhecimento sobre uma determinada zona ecoflorística por dados ecológicos e florísticos .....	30
3.2 Exemplo de conhecimento sobre uma determinada zona ecoflorística por dados de vegetação .....	31
5.1 Conhecimento do especialista sobre uma determinada classe, por dados de vegetação, localização e teledetecção .....	62
6.1 Matriz de erros da imagem classificada em relação à imagem de referência .....	94
6.2 Coeficiente de exatidão para as classes na imagem classificada .....	94
6.3 Valores percentuais dos coeficientes e respectivas variâncias por coeficiente .....	95
A.1 Características das bandas espectrais do satélite Landsat 5 e suas aplicações .....	110