

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS ENERGÉTICAS E  
NUCLEARES

**APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE INTELIGÊNCIA  
ARTIFICIAL NA AVALIAÇÃO DA DOSE DE  
POPULAÇÕES DE REGIÕES DE ALTO  
BACKGROUND NATURAL**

WAGNER EUSTAQUIO DE VASCONCELOS

RECIFE – PERNAMBUCO- BRASIL  
SETEMBRO – 2009

**APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE INTELIGÊNCIA  
ARTIFICIAL NA AVALIAÇÃO DA DOSE DE  
POPULAÇÕES DE REGIÕES DE ALTO  
BACKGROUND NATURAL**

WAGNER EUSTAQUIO DE VASCONCELOS

APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA  
AVALIAÇÃO DA DOSE DE POPULAÇÕES DE REGIÕES DE ALTO  
BACKGROUND NATURAL

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, do Departamento de Energia Nuclear, da Universidade Federal de Pernambuco, para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de concentração: Engenharia de Reatores

ORIENTADOR: Prof. Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira

CO-ORIENTADOR: Dr. Marcello Goulart Teixeira

RECIFE

2009

**V331a**

**Vasconcelos, Wagner Eustaquio de.**

Aplicação de técnicas de inteligência artificial na avaliação da dose de populações de regiões de alto *background* natural / Wagner Eustaquio de Vasconcelos. - Recife: O Autor, 2009.

93 folhas, il : figs., tabs.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2009.

Inclui Bibliografia e Apêndices.

1. Engenharia de Reatores. 2. Lógica *Fuzzy*. 3. Radiação Natural. 4. Mapa *Fuzzy*. 5. Inteligência Artificial. I. Título.

**UFPE**

**621.483**

**CDD (22. ed.)**

**BCTG/2010-003**

**APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL  
NA AVALIAÇÃO DA DOSE DE POPULAÇÕES DE REGIÕES DE  
ALTO BACKGROUND NATURAL**

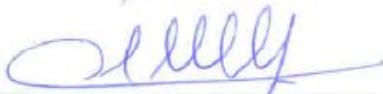
**Wagner Eustaquio de Vasconcelos**

**APROVADO EM: 24.09.2009**

**ORIENTADOR: Prof. Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira  
CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Marcello Goulart Teixeira**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira – DEN/UFPE**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Clovis Abrahão Hazin – CRCN-NE/CNEN**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Ronaldo Ribeiro Barbosa de Aquino – DEEP/UFPE**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Antonio Carlos de Abreu Mól – IEN/UFRJ**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Daniel Carneiro da Silva – DECART/UFPE**

**Visto e permitida a impressão**

  
\_\_\_\_\_  
**Coordenador do PROTEN/DEN/UFPE**

Aos meus pais pela fé, amor, companheirismo e paciência em todas as horas que mais precisei.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, não tenho palavras para descrever a tamanho sentimento de gratidão que tenho por todas as coisas que me foram concebidas ao longo da minha vida, palavras estas que me faltam que muitas vezes são traduzidas em lágrimas de alegria por todas as graças alcançadas.

A nosso senhor Jesus Cristo e Nossa Senhora da Conceição por estarem sempre ao meu lado mostrando o caminho e ajudando a conduzir a minha vida na santa paz e glória do senhor.

A espiritualidade amiga e protetora por estar sempre trazendo boas inspirações e proteção.

A minha mãe, Vera Lúcia, exemplo de fé inabalável em Deus, de vida, sem ela não seria possível a conquista desta etapa da minha vida: Obrigado!!! meu porto seguro!!!

Ao meu pai, Sebastião Eustaquio, por estar sempre torcendo por mim com sua forma peculiar de ser e conduzir vida.

Ao meu irmão, Welber, pelo apoio em todas as horas.

Ao meu orientador Prof. Brayner, pela paciência e confiança que teve em todos os momentos e por mostrar sempre o melhor caminho para atingir o objetivo proposto.

Ao meu co-orientador Prof. Marcello Goulart por ter me aceito como aluno, acreditar no trabalho, ser companheiro e grande amigo nas horas que precisei.

A Amilkar e Sabrina, por serem tão acolhedores o tempo que passei em seu lar no Rio de Janeiro, irmãos e amigos que sempre me apoiaram.

Aos meus amigos do CEFET, especialmente, José Wilson Vieira, Vanildo, Jair, José de Melo, Viriato Leal.

A todos os amigos e professores do IME em especial a Jacy Montenegro, Rex Nazaré, Cabral que me apoiaram desde o início da construção do projeto até sua finalização.

A todos os meus amigos que participaram direta e indiretamente no desenvolvimento da tese.

A todos os funcionários do DEN que colaboram com o trabalho.

“ A disciplina é a ponte que liga nossos sonhos às nossas realizações”

Pat Tillman

“Insista e Persista !!”

Vera Lúcia (minha mãe)

# **APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA AVALIAÇÃO DA DOSE DE POPULAÇÕES DE REGIÕES DE ALTO BACKGROUND NATURAL**

Autor: Wagner Eustaquio de Vasconcelos

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira

Co-orientador: Dr. Marcello Goulart Teixeira

## **RESUMO**

O avanço da ciência e tecnologia tem trazido novas ferramentas para dar suporte na monitoração da radioatividade ambiental, tornando-se importantes na avaliação da exposição à radiação em regiões consideradas de alto background natural. Tais como a região urano-fosfática do nordeste do Brasil que contém teores de urânio associado ao minério de fosfato e está localizada numa região de alta densidade populacional. O objetivo deste trabalho foi aplicar técnicas de inteligência artificial baseadas em lógica fuzzy, associadas ao processamento de imagens e mapa fuzzy para desenvolver um método capaz de avaliar, de forma mais próxima da cognição humana, a exposição a radiação de populações em áreas de alto background. Para isso, este objetivo foi dividido em duas etapas: a primeira etapa foi desenvolver um modelo de exposição fuzzy a radiação e a segunda etapa foi representar e identificar áreas de alta exposição à radiação utilizando um mapa fuzzy, a partir de dados da taxa de dose absorvida no ar da região de estudo e a dose efetiva recebida pela população. Na primeira etapa, o modelo fuzzy foi baseado nos seguintes fatores: peso corporal, taxa de consumo de feijão, idade, duração da exposição, fração da dieta e a concentração da atividade do urânio. O método de Monte Carlo foi usado para gerar distribuição probabilística dos dados de entrada e a ingestão média diária. O modelo fuzzy tipo Mamdani foi criado da opinião de especialistas. A técnica de avaliação sintética fuzzy foi usada e três blocos de inferência foram criados. A ingestão média diária obtida pelo método de Monte Carlo serviu como parâmetro de comparação entre os três modelos. Na segunda etapa, foram realizadas medidas radiométricas em 48 pontos de coleta com o auxílio de um cintilômetro na área de estudo. A técnica de interpolação por krigagem foi utilizada. Foi criada uma imagem digital da distribuição da taxa de dose absorvida no ar. Os resultados da primeira etapa na análise qualitativa, os resultados obtidos foram satisfatórios ao traduzir a opinião dos especialistas. Na análise quantitativa, os valores obtidos fazem parte do mesmo conjunto fuzzy que os valores encontrados na literatura. Na segunda etapa, foi obtido um mapa fuzzy da área de estudo e representado por três variáveis lingüísticas: baixa, média e alta exposição. Na área externa, os valores obtidos da taxa de dose absorvida no ar variaram de 55,7 a 304,5 nGy/h com uma média de 161,7 nGy/h, e na área interna de 93,4 a 356,7 nGy/h com uma média de 170,4 nGy/h. O resultado da estimativa da dose efetiva média anual foi de 1,03 mSv, ficando acima do valor considerado para média mundial. Os resultados globais sugerem que estes tipos de modelos fuzzy são altamente promissores para avaliação de exposição à radiação ionizante. O mapa fuzzy representou bem a região de radiação pela suavidade de seus contornos, que é inerente aos fundamentos da lógica fuzzy e pela utilização de variáveis lingüísticas podendo ser uma ferramenta para dar suporte a especialistas e não especialistas.

**Palavras-chave:** lógica fuzzy, mapa fuzzy, radiação natural, krigagem, dose absorvida.

# **APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNIQUES IN THE DOSE EVALUATION OF POPULATIONS IN HIGH NATURAL BACKGROUND AREAS**

Author: Wagner Eustaquio de Vasconcelos

Adviser: Prof. Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira

Co-adviser: Dr. Marcello Goulart Teixeira

## **ABSTRACT**

The progress in science and technology brought new and important tools to give support in the monitoring of the environmental radioactivity, facilitating the evaluation of radiation exposures in areas considered as having a high natural background. This is the case of the uranium-phosphatic region in northeast Brazil that contains considerable amounts of uranium associated to the phosphate ore and is located in an area of high population density. The objective of this work was to use techniques of artificial intelligence (fuzzy logic) coupled to the image processing and fuzzy map to develop a method to evaluate, in closer way to the human cognition, the radiation exposure of populations in high natural background areas. For that, this objective was divided in two stages: the first stage was to develop an exposure fuzzy model to the ionizing radiation and the second stage was to identify and to represent areas of high dose through the use of a fuzzy map, starting from data of absorbed dose rate in air at the study area and from the effective dose received by the population. In the first stage, the fuzzy model was based on the following factors pertinent to inhabitants and area: corporal weight, bean consumption rate, age, exposure duration, diet fraction and activity concentration of uranium. The Monte Carlo method was used to generate probability distributions of the input data and to calculate the average daily ingestion. The Mamdani-type fuzzy model was created from the expert's opinion. The fuzzy synthetic evaluation technique was also used with three inference blocks. The average daily ingestion obtained by the Monte Carlo method served as comparison between the two fuzzy models. In the second stage, radiometric measurements were carried out in 48 collection points in the study area. The kriging technique was used to obtain an uniform space grid. A digital image was created from the absorbed dose rate distribution in air. The results of the first stage, in a qualitative basis, showed that the results were satisfactory when translating the expert's opinion. In the quantitative analysis, the obtained values belong to the same fuzzy set of values which are found in the literature. In the second stage, it was obtained a fuzzy map of the study area represented by three linguistic variables: low, medium and high exposure. In outdoor measurements, the obtained values of the absorbed dose rate in air varied from 55.7 to 304.5 nGy/h with an average of 161.7 nGy/h, and indoor measurements from 93.4 to 356.7 nGy/h with an average of 170.4 nGy/h. The resulting estimate for the annual average effective dose was 1.03 mSv, falling above that value considered for populational world average. The global results suggest that these kinds of fuzzy models are highly promising for evaluation of the ionizing radiation exposure. The fuzzy map represented well the radiation in the area by reproducing the softness of its borders, what is a characteristic property inherent to the foundations of the fuzzy logic, and by the possibility of using linguistic variables as a tool in giving support to expert and non-experts.

**Keywords:** fuzzy logic, fuzzy map, natural radiation, kriging, absorbed dose.

## LISTAS DE FIGURAS

	Página
Figura 1	Região de Fosfato do Nordeste brasileiro (Fonte: LIMA, 1996) ..... 11
Figura 2	Função de pertinência representando três conjuntos fuzzy para a variável “taxa de consumo”. ..... 19
Figura 3	Representação crisp e conjuntos fuzzy como subconjuntos de um domínio U... 20
Figura 4	Funções de pertinência utilizadas para se avaliar o nível de oxigênio dissolvido no rio Tseng-Wen (Fonte: CHANG et al., 2001) ..... 21
Figura 5	Operações com conjuntos fuzzy A e B..... 23
Figura 6	Medição da similaridade e distância entre conjuntos fuzzy (a) e (b). A área negra representa quantitativamente a medida. .... 25
Figura 7	Representação gráfica de cálculo da similaridade S entre dois conjuntos fuzzy B e A, baseados na possibilidade P e necessidade N medidas (fonte: KASABOV, 1998). ..... 26
Figura 8	Sistema de inferência fuzzy (Fonte: TANSCHKEIT, 2006). ..... 27
Figura 9	Método do centro de massa. .... 30
Figura 10	Efeito de pequenas alterações nos planaltos..... 31
Figura 11	Predominância de termo difuso de saída. .... 32
Figura 12	Representação dos três métodos mais utilizados: (a) método critério dos máximos; (b) média dos máximos; (c) centro de massa..... 32
Figura 13	Exemplo de mapa coroplético do índice de desenvolvimento humano de todos os estados brasileiros em 2000. (Fonte: FJP, 2003). ..... 39
Figura 14	Mapa booleano de aptidão (1) e inaptidão (0) ao desenvolvimento urbano (Fonte: LIOTTE et al., 2006). ..... 42
Figura 15	Mapa fuzzy classificado numa escala contínua que varia de 0 a 1 ao desenvolvimento urbano (Fonte: LIOTTE et al., 2006). ..... 43
Figura 16	Passos do processamento de imagem fuzzy (Fonte: SIVANANDAM, 2007).... 44
Figura 17	Ilustração da representação de informação semântica para contatos (Fonte: MOREIRA, 2001). .... 46
Figura 18	Cubo de cores RGB. .... 47
Figura 19	Área selecionada para o estudo ..... 48
Figura 20	Procedimento do trabalho realizado. .... 50

Figura 21	Distribuição dos pontos de coleta na área de estudo. ....	51
Figura 22	Realização das medidas radiométricas nos pontos de coleta.....	52
Figura 23	O triângulo de cores RGB. ....	54
Figura 24	Imagem resultante do teste 1. ....	56
Figura 25	Imagem resultante do teste 2. ....	57
Figura 26	Imagem resultante do teste 3. ....	57
Figura 27	Imagem resultante do teste 4 utilizando para funções de pertinência “s”, gaussiana, “z” com parâmetros [0,5 0,8], [0,1 0,5] e [0,2 0,5], respectivamente. .....	58
Figura 28	Imagem resultante do teste 5 utilizando para funções de pertinência “s”, gaussiana, “z” com parâmetros [0,45 0,8], [0,1 0,5] e [0,2 0,55], respectivamente. ....	58
Figura 29	Gerador de dados utilizado no trabalho.....	61
Figura 30	Funções de pertinência usadas para representar a variável peso corporal.....	62
Figura 31	A estrutura hierárquica fuzzy para a avaliação do DAI. ....	65
Figura 32	Mapa fuzzy da distribuição da taxa de dose absorvida no ar na região fosfática. .....	67
Figura 33	Os polígonos representam a região de fosfato rico sobreposta em: (a) imagem da distribuição da taxa de dose absorvida no ar na região fosfática; e (b) imagem da região urbanizada.....	68
Figura 34	Mapa das bacias do rio KwaZulu-Natal, os principais rios, e locais de casos relatados de cólera e uma superfície preliminar fuzzy para o crescimento de algas no mês de fevereiro (Fonte: FLEMING et al., 2007).....	92
Figura 35	Representação de favorabilidade à ocorrência de minerais radioativos, obtido segundo inferência por Redes Neurais Artificiais e inferências fuzzy (Fonte: MOREIRA, 2001). ....	93

## LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1	Contribuição relativa para a exposição média (Fonte: JULIÃO, 1998)..... 3
Tabela 2	Exposição interna aos radionuclídeos terrestres das séries do urânio e do tório (Fonte: UNSCEAR, 1993)..... 6
Tabela 3	A concentração atividade (peso-seco) nos alimentos e o resultado da dose comprometida para o $^{238}\text{U}$ (Fonte: AROGUNJO et al., 2009). ..... 8
Tabela 4	Concentração de $^{228}\text{Th}$ em vegetais típicos e em arroz proveniente de Kerala e Bombaim (Fonte: SUNTA et al.,1990). ..... 9
Tabela 5	Estimativa da dose efetiva comprometida para uma região de elevada radioatividade natural para um homem adulto (Fonte: HONGDA, 1997). ..... 9
Tabela 6	Concentrações de urânio nos fosfatos de rocha mundialmente estudadas (Fonte: LIMA, 1996)..... 12
Tabela 7	Estimativa de uma avaliação detalhada da exposição (Fonte: WHO, 2006)..... 15
Tabela 8	Cores dos vértices do cubo de cores ..... 47
Tabela 9	As variáveis de entrada e as faixas de valores usados na construção do modelo fuzzy. .... 60
Tabela 10	Parâmetros e faixa de valores das funções de pertinência utilizadas na construção do modelo fuzzy. .... 63
Tabela 11	Base de regras. .... 64
Tabela 12	Os resultados da ingestão diária do modelo de exposição fuzzy e pelo método de Monte Carlo para 1000 habitantes ( $\mu\text{Bq/kg.dia}$ ). ..... 69

## LISTA DE SIGLAS

ADD	Dose Diária Média
COG	Centro de gravidade
COA	Centro de área
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DAI	Ingestão Média Diária
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
IAEA	International Atomic Energy Agency
ICRP	International Commission on Radiological Protection
MIMO	Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas
MISO	Sistemas com múltiplas entradas e uma saída
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NRC	National Research Council
SAD69	South American 1969
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
UNSCEAR	United Nation Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation
USEPA	United States Environmental Protection Agency
UTM	Universal Transverse Mercator
WGS84	World Geodetic System 1984
WHO	World Health Organization

## SUMÁRIO

	Página
1	INTRODUÇÃO..... 1
2	REVISÃO DE LITERATURA ..... 3
2.1	Radiação Natural ..... 3
2.1.1	Exposição em áreas de radioatividade natural “normal” ..... 3
2.1.1.1	Exposição Externa ..... 4
2.1.1.1.1	Raios cósmicos ..... 4
2.1.1.1.2	Radiação terrestre ..... 5
2.1.1.2	Exposição Interna ..... 5
2.1.1.2.1	Radionuclídeos de origem cósmica ..... 5
2.1.1.2.2	Radionuclídeos Terrestres ..... 5
2.1.2	Exposições em áreas de radioatividade natural elevada..... 7
2.1.2.1	Exposição externa..... 7
2.1.2.1.1	Áreas de altitude elevada..... 7
2.1.2.1.2	Áreas com alta concentração de urânio e tório..... 7
2.1.2.2	Exposição interna ..... 8
2.1.2.2.1	Cadeia alimentar ..... 8
2.1.3	Descrição da região de estudo: Região Urano - Fosfática de Pernambuco-Paraíba. ..... 10
2.1.3.1	Considerações Históricas..... 10
2.2	Avaliação da exposição ..... 13
2.3	Fundamentos da Lógica Fuzzy ..... 16
2.3.1	Um breve histórico ..... 16
2.3.2	Conjuntos Fuzzy ..... 18
2.3.3	Operações com conjuntos fuzzy ..... 22
2.3.4	Sistema de inferência fuzzy ..... 26
2.3.4.1	Base de regras ..... 28
2.3.4.2	Defuzzyficação ..... 29
2.3.5	Modelagem fuzzy ..... 33
2.3.6	Classificadores fuzzy ..... 34

2.3.7	Sistemas fuzzy .....	35
2.4	Krigagem .....	36
2.5	Mapas temáticos .....	38
2.5.1.	Mapas booleanos versus mapas fuzzy .....	40
2.5.2	Processamento de imagens fuzzy .....	44
2.5.3	Espectro de cores .....	46
3.	MATERIAL E MÉTODOS .....	48
3.1	Seleção da Área de Estudo .....	48
3.2.	Construção do mapa fuzzy .....	53
3.3	Modelagem .....	59
3.3.1.	Modelos de exposição fuzzy .....	62
4.	RESULTADOS .....	66
5.	CONCLUSÕES .....	71
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	73
	APÊNDICES .....	80
	ANEXOS .....	89

## 1 INTRODUÇÃO

A Organização Mundial de Saúde (WHO) considera importantes as incertezas e os fatores sócio-ambientais na avaliação da exposição do ser humano, principalmente quando se refere às exposições crônicas (ambientais), ou seja, de característica contínua. Estes fatores podem influenciar de forma direta ou indireta no grau de exposição da população (WHO, 2006).

Hoje em dia, neste tipo de avaliação, muitas vezes esses fatores são considerados constantes como, por exemplo, o peso corporal do modelo do homem de referência adotado pela ICRP (1975), ou muitas vezes desconsiderados, como os costumes de grupos ou indivíduos de uma determinada região (UNSCEAR, 2000). Conseqüentemente, os níveis de exposição à radiação por habitantes de uma região podem ser subestimados ou superestimados por parte de órgãos reguladores. Como os efeitos biológicos causados por radionuclídeos à saúde do ser humano podem levar décadas até apresentarem seus sintomas (por exemplo, câncer), níveis de exposição à radiação mal estimados podem levar a sérios problemas de saúde pública. O estudo desses fatores, no entanto, pode ser considerado bastante complexo, pois envolve uma série de questões como diferenças ambientais, culturais, sociais, diferenças entre as pessoas e a forma de interação com o meio em que vivem, dentre outras. Tais questões podem ser traduzidas em sistemas sócio-ambientais caracterizados pelo alto grau de incerteza, o que dificulta a sua modelagem.

Diante do exposto, a natureza fortemente não linear dos problemas, a incerteza e a subjetividade inerentes aos dados, algumas vezes negligenciados em modelos convencionais (clássicos), mas de extrema importância na correta representação do problema, passam a ser tratados quando da utilização de uma ferramenta matemática adequada, como a Lógica Nebulosa, que também pode ser chamada de lógica difusa ou fuzzy, que possibilita também a inserção de incertezas não probabilísticas. Esta ferramenta foi citada por Scott (2003) como uma das novas alternativas para estudos na integração de modelos no estudo da modelagem da radioatividade ambiental.

A utilização de conjuntos fuzzy tornou-se mais eficiente quando trabalhada conjuntamente com redes neurais, formando redes híbridas. Rajkumar e Guesgen (1997) dando continuidade a sua pesquisa desenvolveram este tipo de rede híbrida para estimar com maior precisão a dose diária média da exposição a benzeno proveniente da emissão veicular na Nova Zelândia. Foi comprovado que esta rede híbrida pode, de forma relativamente

simples, representar problemas complexos e também ser uma importante ferramenta para avaliação da exposição. Apesar desses modelos citados terem apresentado uma boa eficiência na resolução desses problemas, nenhum deles aborda a exposição de seres humanos à radiação. Rajkumar e Guesgen (1996) construíram o primeiro modelo de exposição fuzzy para calcular a dose diária média de seres humanos a um elemento químico contido no peixe consumido, apenas utilizando uma via de exposição (ingestão). Na conclusão deste artigo, os autores sugerem uma pesquisa direcionada para a análise de combinação das vias de exposição e dos efeitos usando lógica fuzzy. Alguns estudos com redes neurais foram realizados nesta área; no entanto, são poucos os trabalhos que utilizam modelos híbridos (COSTA, 1993). Por ser um assunto recente e de grande potencial de contribuição para a pesquisa científica, Rajkumar (2006) cita o início de pesquisas em redes híbridas na análise da exposição à radiação e riscos em missões futuras ao espaço pela NASA (National Aeronautics and Space Administration).

Um fator importante para a avaliação de grupos e subgrupos de uma determinada região é a identificação de áreas de maiores riscos a maiores doses numa determinada região. A identificação destas áreas auxilia na tomada de decisões, por parte dos governos, acerca do planejamento urbano e da ocupação na região estudada (AFFONSECA, 1993).

A identificação das áreas de risco pode atualmente ser analisada a partir do SIG (Sistemas de Informações Geográficas), uma vez que o mesmo possibilita executar operações e cálculos sobre grandes quantidades de dados e criar mapas de risco das áreas de estudo. Várias pesquisas estão sendo realizadas com o objetivo de se aperfeiçoar as técnicas de mapeamento de áreas de alta radiação de fundo, chamadas de áreas de alto background natural (DUBOIS; SHIBLI, 2003). A integração do SIG com as redes híbridas teve contribuições significativas como as realizadas por Felgueiras (1999) para avaliar regiões de alta radioatividade natural no planalto de Poços de Caldas no estado de Minas Gerais.

Diante do exposto, o presente trabalho apresenta uma metodologia capaz de avaliar a exposição à radiação das populações de regiões de alta radioatividade natural, identificando áreas de maior dose recebida pela população, agregando incertezas não-estocásticas e, conseqüentemente, refletindo numa avaliação da exposição mais realística para subgrupos e grupos da população. Desta forma, pretende-se que a metodologia, baseada em técnicas de inteligência artificial, seja uma ferramenta de auxílio na tomada de decisões de governantes no que diz respeito ao planejamento da ocupação urbana nas áreas estudadas. Além disso, este trabalho contribuirá com a inserção de uma nova linha de pesquisa a ser desenvolvida no Departamento de Energia Nuclear (DEN-UFPE).

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Radiação Natural

O  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$ , e seus produtos de decaimento, são os radionuclídeos terrestres de maior importância, que estão presentes no solo, na água, nos alimentos e, conseqüentemente, no corpo humano.

Diversas áreas da crosta terrestre foram identificadas como áreas de alto nível de radiação natural. Essas áreas estão situadas em países como Brasil, Índia, Irã, China, Itália, França, Madagascar e Nigéria. Existe uma considerável variação na exposição às fontes naturais de radiação, seja devido à altitude nos casos de raios cósmicos, ou pelo conteúdo variável de urânio e tório nos solos, rádio e polônio nos alimentos e na água, e radônio no ar. Ao longo dos últimos anos têm sido feitos estudos visando determinar a magnitude e extensão da exposição e avaliar a saúde de populações que habitam essas regiões (UNSCEAR, 2000).

#### 2.1.1 Exposição em áreas de radioatividade natural “normal”

A exposição total à radiação natural em áreas de radioatividade natural “normal” é em média 2,4 mSv/ano, sendo um terço da mesma relativa à exposição externa e dois terços devido à exposição interna. As contribuições relativas à exposição média estão listadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Contribuição relativa para a exposição média (Fonte: JULIÃO, 1998)

Componente da exposição	Dose efetiva anual (mSv)	
	Áreas de radioatividade natural “normal”	Áreas de radioatividade natural elevada
Exp. externa a raios cósmicos	0,38	2,0
Exp. externa a radionuclídeos terrestres	0,46 <sup>a</sup>	4,3
Exp. interna a raios cósmicos	0,01	0,01
Exp. interna a radionuclídeos terrestres	0,23 <sup>b</sup>	0,6
$^{222}\text{Rn}$	0,01	10
$^{220}\text{Rn}$	0,07	0,1
Total	2,4	

<sup>a</sup> na seguinte proporção: 0,12 mSv para o  $^{40}\text{K}$ , 0,21 mSv para os radionuclídeos das séries do  $^{232}\text{Th}$  e 0,13 mSv para os radionuclídeos da série do  $^{238}\text{U}$ .

<sup>b</sup> incluindo 0,17 mSv devido ao  $^{40}\text{K}$  e 0,06 mSv devido aos radionuclídeos das séries do  $^{232}\text{Th}$  e  $^{238}\text{U}$ .

### 2.1.1.1 Exposição Externa

#### 2.1.1.1.1 Raios cósmicos

A terra recebe continuamente a radiação cósmica originada nos corpos celestes. Para todos os efeitos, essa radiação é isotrópica (vem, na mesma proporção de todas as direções do espaço) e constituída de, aproximadamente, 91% de prótons, 8% de partículas alfa e o restante de núcleos atômicos com números de massa que variam de quatro a 26. São radiações extremamente energéticas, mas, em sua quase totalidade, não conseguem ultrapassar as camadas mais altas da atmosfera, situadas acima de 25 quilômetros. Em média, somente 0,05% dos prótons primários alcançam o nível do mar (PEREIRA, 1992).

A interação dessas radiações primárias com os núcleos estáveis dos átomos dos variados elementos que compõem a atmosfera desencadeia uma série de reações nucleares. Tais reações também produzem radiações, chamadas radiações secundárias ou cosmogênicas, constituídas principalmente por elétrons, prótons, nêutrons, mésons e ondas eletromagnéticas, e formam, a partir dos núcleos estáveis envolvidos, uma série de isótopos instáveis (e, portanto, radioativos), conhecidos como isótopos cosmogênicos. Os mais abundantes, entre muitas dezenas de outros, são o  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{26}\text{Al}$  e  $^{14}\text{C}$ .

A característica mais importante da exposição aos raios cósmicos é a variação da exposição com a altura. Nos vôos comerciais com rotas de maior latitude, ou que atingem grandes alturas, a quantidade de radiação cósmica recebida pode ser significativamente superior a média a que a maioria de nós está sujeita no cotidiano. As taxas de dose absorvida no ar, ao nível do mar, são da ordem de 32 nGy/h (UNSCEAR, 1988). Esta taxa varia pouco com a latitude, mas como já foi dito, de forma significativa com a altitude, chegando a cerca de 4  $\mu\text{Gy/h}$ , em aeronaves. .

As taxas de exposição aos raios cósmicos são um pouco menores dentro de casa, devido ao efeito blindagem das construções que depende do material usado na construção. Levando-se em consideração a distribuição da população do mundo, em relação à altitude e a variação da taxa de exposição, a dose efetiva média anual estimada, devido à exposição aos raios cósmicos, é de 0,39 mSv (UNSCEAR, 2000).

#### 2.1.1.1.2 Radiação terrestre

Os radionuclídeos naturais de meia-vida longa das séries do  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$  e o  $^{40}\text{K}$  podem estar presentes no solo e em materiais de construção, contribuindo para as taxas de exposição externa:

- fora de casa: o UNSCEAR (Comitê Científico das Nações Unidas para os efeitos da Radiação Atômica) compilou dados de 70% da população mundial onde a taxa de dose absorvida no ar variou entre 10 e 200 nGy/h e o valor médio ponderado para a população é de 59 nGy/h;
- dentro de casa: para a cerca de 45% da população mundial a taxa de dose absorvida no ar variou de 20 a 200 nGy/h com um valor médio ponderado de 84 nGy/h.

O UNSCEAR assume uma redução média de dose de 20% fora da casa e 80% dentro de casa, resultando nos fatores de ocupação de 0,2 e 0,8, respectivamente. Por causa das incertezas, a esses fatores não foi aplicada a componente não ionizante dos raios cósmicos. Considerando-se estes fatores, a dose efetiva média anual para exposição externa à radiação gama terrestre é de 0,48 mSv (UNSCEAR, 2000).

#### 2.1.1.2 Exposição Interna

##### 2.1.1.2.1 Radionuclídeos de origem cósmica

Nas áreas de radioatividade natural “normal” a exposição interna a radionuclídeos cosmogênicos é muito baixa e praticamente uniforme em toda a superfície terrestre. Sendo que  $^3\text{He}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{14}\text{C}$  e  $^{22}\text{Na}$  são os mais significantes radionuclídeos cosmogênicos do ponto de vista de dose efetiva anual causada por exposição interna, apresentando seus valores de 0,01  $\mu\text{Sv}$ , 0,03  $\mu\text{Sv}$ , 12  $\mu\text{Sv}$  e 0,2  $\mu\text{Sv}$ , respectivamente (JULIÃO, 1998).

##### 2.1.1.2.2 Radionuclídeos Terrestres

O  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{87}\text{Rb}$ ,  $^{238}\text{U}$  são considerados radionuclídeos primordiais por terem meia-vida longa, que existem na Terra desde a sua formação há bilhões de anos e que não decaíram substancialmente. O isótopo radioativo do potássio,  $^{40}\text{K}$ , está presente na razão  $1,18 \times 10^{-4}$  para o potássio estável e tem uma concentração média no corpo humano com cerca de 55 Bq/kg. A dose média efetiva anual da exposição ao  $^{40}\text{K}$  é estimada em 0,17 mSv.

A dieta e a inalação são fatores importantes que interferem amplamente na dose relativa aos radionuclídeos das séries do urânio e tório. A estimativa da dose desses radionuclídeos é realizada a partir de sua concentração nos alimentos, água e ar combinados com os valores de dose por unidade de incorporação (Tabela 2). Os valores de incorporação são, somente, valores médios, uma vez que existem consideráveis variações para localidades diferentes. As estimativas de doses podem não ser definitivas, pois alguns desses valores de dose por unidade de incorporação vêm sendo revistos, implicando em mudanças nas estimativas de dose (ICRP, 1995).

Tabela 2 - Exposição interna aos radionuclídeos terrestres das séries do urânio e do tório (Fonte: UNSCEAR, 1993).

Radionuclídeo	Incorporação anual (Bq)		Dose efetiva anual ( $\mu\text{Sv}$ )	
	Ingestão	Inalação	Ingestão	Inalação
$^{238}\text{U}$	4,9	0,0069	0,12	0,21
$^{234}\text{U}$	4,9	0,0069	0,15	0,21
$^{230}\text{Th}$	2,5	0,0035	0,18	0,18
$^{226}\text{Ra}$	19	0,0035	3,8	0,01
$^{210}\text{Pb}$	32	3,5	32	7,0
$^{210}\text{Po}$	55	0,35	11	0,35
$^{232}\text{Th}$	1,3	0,0069	0,52	1,4
$^{228}\text{Ra}$	1,3	0,0069	3,9	0,01
$^{228}\text{Th}$	1,3	0,0069	0,09	0,69
$^{235}\text{U}$	0,2	0,0004	0,01	0,01
Total			52	10

O  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  e  $^{210}\text{Po}$  são radionuclídeos da série do  $^{238}\text{U}$  que contribuem de forma significativa para a exposição. O caminho preferencial de incorporação varia conforme o radionuclídeo. No caso da transferência de  $^{226}\text{Ra}$  para o corpo o caminho primordial é a ingestão. A incorporação anual em áreas de exposição "normal" às radiações é estimada em 3,5 mBq para inalação e 19 Bq para ingestão. A dose média efetiva é estimada em 0,01 mSv, devido à inalação e 3,8 mSv, devido à ingestão.

A inalação e a ingestão de  $^{232}\text{Th}$  são relativamente baixas, e nesta série somente o  $^{228}\text{Ra}$  é encontrado mais disponível em plantas e animais. Os produtos de decaimento de meia vida curta do  $^{228}\text{Ra}$  ( $t_{1/2} = 5,75$  anos), o  $^{228}\text{Th}$  ( $t_{1/2} = 1,9$  anos) e o  $^{224}\text{Ra}$  ( $t_{1/2} = 3,66$  dias), ambos emissores alfa, são os que mais contribuem para a dose.

Os radionuclídeos da série do  $^{235}\text{U}$  são menos abundantes no meio ambiente e as doses devido à ingestão e à inalação desses radionuclídeos são, portanto, inferiores aos outros radionuclídeos presentes na crosta terrestre.

## 2.1.2 Exposições em áreas de radioatividade natural elevada

Em várias regiões do mundo têm sido identificadas áreas de radioatividade natural elevada. Entretanto, não tem havido avaliações sistemáticas das exposições nessas áreas.

### 2.1.2.1 Exposição externa

#### 2.1.2.1.1 Áreas de altitude elevada

As exposições em algumas cidades situadas em altitudes elevadas, como a cidade do México (17,3 milhões de habitantes, localizada a 2.440 m do nível do mar), Quito, no Equador (11 milhões de habitantes, localizada a 2.840 m do nível do mar) e La Paz, na Bolívia (1 milhão de habitantes, localizada a 3.900 m do nível do mar), são de 3,4 a 7,5 vezes maiores que a exposição ao nível do mar (0,27 mSv/ano).

#### 2.1.2.1.2 Áreas com alta concentração de urânio e tório

Ao longo da costa da província de Kerala na Índia, são encontrados níveis altos de radiação externa, por causa do alto teor de tório nas areias monazíticas da região. As taxas de doses absorvidas no ar apresentam valores 200 a 4000 nGy/h, que correspondem a 3,5 a 70 vezes o valor médio ponderado mundial (59 nGy/h). A costa do Espírito Santo, também uma região de monazita, apresenta taxas de dose no ar na cidade de Guarapari de 130 a 1200 nGy/h e de 220 a 4200 nGy/h no vilarejo de Meaípe. Em Minas Gerais, no planalto de Poços de Caldas, uma região de intrusão vulcânica onde se encontra urânio mineralizado com tório associado, as taxas de dose variam de 100 a 4000 nGy/h (PFEIFFER et al., 1981; PAUL et al., 1994).

Na Índia, estudos sistemáticos do nível de radiação e distribuição de radionuclídeos foram realizados em ambientes próximos aos três principais rios da costa de Karnataka, o Kali, o Sharavathi e o Netravathi. Nas margens desses rios, as taxas de dose absorvida no ar encontradas forem 44 nGy/h, 35 nGy/h a 57 nGy/h, respectivamente (NARAYANA et al., 2007).

Estudos realizados por Alatise et al. (2008) nos estados de Rivers, Akwa-Ibom, Bayelsa, Delta e Ondo, situados na área costeira da Nigéria obtiveram valores de taxa média de dose absorvida no ar de  $33,655 \pm 3,409$  nGy/h, onde os valores mínimos de  $2,229 \pm 0,081$

nGy/h ocorrem no Estado de Akwa-Ibom e um valor máximo de  $61,652 \pm 0,67$  nGy/h no estado de Delta.

No distrito de Kinta, na Malásia, foi realizado de 2003 a 2005 um estudo dos níveis de radiação natural. Um total de 1007 medidas da taxa de dose absorvida a 1 m do solo foram obtidas. A taxa de dose externa variou de 39 a 1039 nGy/h com uma média de  $222 \pm 191$  nGy/h (LEE et al., 2009).

### 2.1.2.2 Exposição interna

#### 2.1.2.2.1 Cadeia alimentar

Na Nigéria, na área mineira de Bisichi situada no planalto de Jos, Arogunjo et al. (2009) determinaram além dos níveis de radiação em terras e areias minerais, um estudo sobre a ingestão e concentração de  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$  em alimentos da região. As amostras foram coletadas em fazendas locais, e alguns desses resultados para  $^{238}\text{U}$  pode ser observados na Tabela 3.

Tabela 3 – A concentração de atividade (peso-seco) nos alimentos e o resultado da dose comprometida para o  $^{238}\text{U}$  (Fonte: AROGUNJO et al., 2009).

Alimentos	$^{238}\text{U}$		
	Concentração (mBq/kg)	Ingestão Anual (Bq/ano)	Dose efetiva comprometida ( $\mu\text{Sv/ano}$ )
Inhame	53	3,98	0,179
Legumes	187	11,2	0,505
Arroz	43,2	1,14	0,051
Milho	4,2	0,087	0,004
Feijão branco	3,4	0,063	0,003
Peixe	272	4,08	0,184
Batata-doce	81	1,17	0,053
Repolho	3,9	0,02	0,00088
Batata	100	0,32	0,014
Pepino	4,2	0,013	0,00057
Vagem	45,5	0,0009	0,000041
Água/bebidas	1,27	0,74	0,033

Na Índia, foram realizados estudos em áreas de alta radioatividade natural (Kerala), visando uma melhor estimativa da exposição interna. Isto porque na transferência de radionuclídeos naturais do solo, para plantas e animais, ocorre um aumento da exposição

interna. Para isso, foram analisadas amostras de dieta total, vegetais, água e ar. A concentração de  $^{228}\text{Th}$  em vegetais típicos e em arroz, provenientes de Kerala e Bombaim, é mostrada na Tabela 4 em Bq/kg de peso úmido (SUNTA et al.,1990).

Tabela 4 – Concentração de  $^{228}\text{Th}$  em vegetais típicos e em arroz provenientes de Kerala e Bombaim (Fonte: SUNTA et al.,1990).

$^{228}\text{Th}$	Kerala (Bq/kg úmido)	Bombaim (controle) (Bq/kg úmido)
Berinjela	0,133	0,011
Abóbora (branca)	0,093- 0,207 <sup>a</sup>	-
Abóbora (vermelha)	-	0,041
Mamão	1,043	0,052
Arroz	0,318	0,259-0,555 <sup>a</sup>

<sup>a</sup>intervalo de concentração.

Um levantamento das concentrações de alguns radionuclídeos em alimentos, incluindo conteúdo de U e Th natural,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ,  $^{227}\text{Ac}$ ,  $^{40}\text{K}$  e  $^{87}\text{Rb}$ , foi realizado na China. Foi estimada a incorporação e a dose efetiva comprometida para adultos em Yangjintang, uma região de elevada radioatividade natural e depois foi feita uma comparação com uma área considerada normal. Os resultados estão apresentados na Tabela 5, onde são mostradas a incorporação anual para os diversos radionuclídeos, a dose efetiva comprometida para a região de elevada radioatividade natural e sua comparação com a dose efetiva comprometida da região de radiação natural “normal” (HONGDA, 1997).

Tabela 5 – Estimativa da dose efetiva comprometida para uma região de elevada radioatividade natural para um indivíduo adulto (Fonte: HONGDA, 1997).

Radionuclídeo	Incorporação Anual (Bq)	Dose efetiva comprometida( $\mu\text{Sv}$ )	Razão <sup>a</sup>
U	10,66	0,294	1,06
$^{226}\text{Ra}$	146,8	41,10	6,64
$^{210}\text{Pb}$	159,5	111,65	2,31
$^{210}\text{Po}$	131,3	157,56	2,20
$^{227}\text{Ac}$	1,84	3,68	6,27
Total	-	314,28	2,47
Th	7,43	2,97	1,40
$^{228}\text{Ra}$	264,3	174,44	8,75
Total	-	177,41	8,04
SOMA	-	491,69	10,51

<sup>a</sup>Razão entre a dose efetiva comprometida numa região considerada de alta radioatividade natural e em uma região considerada de radioatividade natural “normal”.

Na região fosfática do nordeste do Brasil foi realizado um estudo dos níveis de incorporação e concentração de atividade de urânio e  $^{226}\text{Ra}$  em alimentos. Os resultados obtidos das concentrações de atividade para urânio e  $^{226}\text{Ra}$  nos tipos de alimentos analisados variou de 13 a 186 mBq/kg, com um valor médio de 46 mBq/kg e de 43 a 2209 mBq/kg, com um valor médio de 358 mBq/kg, respectivamente. A ingestão anual destes radionuclídeos, para a população residente, foi de 7,45 Bq para urânio e 69,3 Bq para  $^{226}\text{Ra}$  (AMARAL et al., 2005).

### 2.1.3 Descrição da região de estudo: Região Urano - Fosfática de Pernambuco-Paraíba.

#### 2.1.3.1 Considerações Históricas

A existência de fosforita na faixa litorânea do Estado de Pernambuco é conhecida desde o final da década de 1940, quando se constataram teores consideráveis de fosfato em testemunhos de sondagem no Município de Olinda. Desde então foram desencadeadas investigações, tanto por órgãos governamentais, como por empresas privadas, envolvendo, inclusive, a realização de levantamento aerogeofísico e de sondagens, além de plantas de mineração.

Em 1978, já dispondo de um significativo acervo de informações sobre o condicionamento geológico do jazimento fosfático, mas sentindo necessidade de uma integração desses dados e de conhecer com mais segurança os depósitos e seus limites a norte de João Pessoa (PB), bem como visando definir critérios mais precisos a serem usados como guias prospectivos, o DNPM (Departamento Nacional de Produção Mineral) elaborou um programa, executado pela CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais) sob a denominação de Projeto Fosfato na Faixa Sedimentar Costeira Pernambuco-Paraíba.

A CPRM através de interpretações geológicas e paleogeográficas, verificou a existência de condicionamentos metalogenéticos semelhantes àqueles de Olinda e Igarassu, nos segmentos central e norte da Bacia Costeira de Pernambuco-Paraíba, justificando-se plenamente o interesse na pesquisa de fosfato nestas áreas, através do denominado PROJETO MIRIRI. O desenvolvimento deste Projeto resultou na descoberta e cubagem de depósitos de fosfato sedimentar, com reservas da ordem de  $22 \times 10^6$  t de minério fosfatado.

As rochas fosfáticas encontradas no Nordeste do Brasil são de origem sedimentar e localizam-se na faixa sedimentar costeira, estendendo-se do sul da cidade de Olinda, no Estado de Pernambuco, até o extremo norte do Estado da Paraíba. Nestes depósitos, o teor de

$P_2O_5$  é inferior a 10% nas regiões próximas ao mar e cresce lentamente na direção oeste numa região denominada de “fosfato rico”. Esta região tem uma largura média de 4 km, segundo ALMEIDA (1978 apud LIMA, 1996), como é vista na Figura 1.

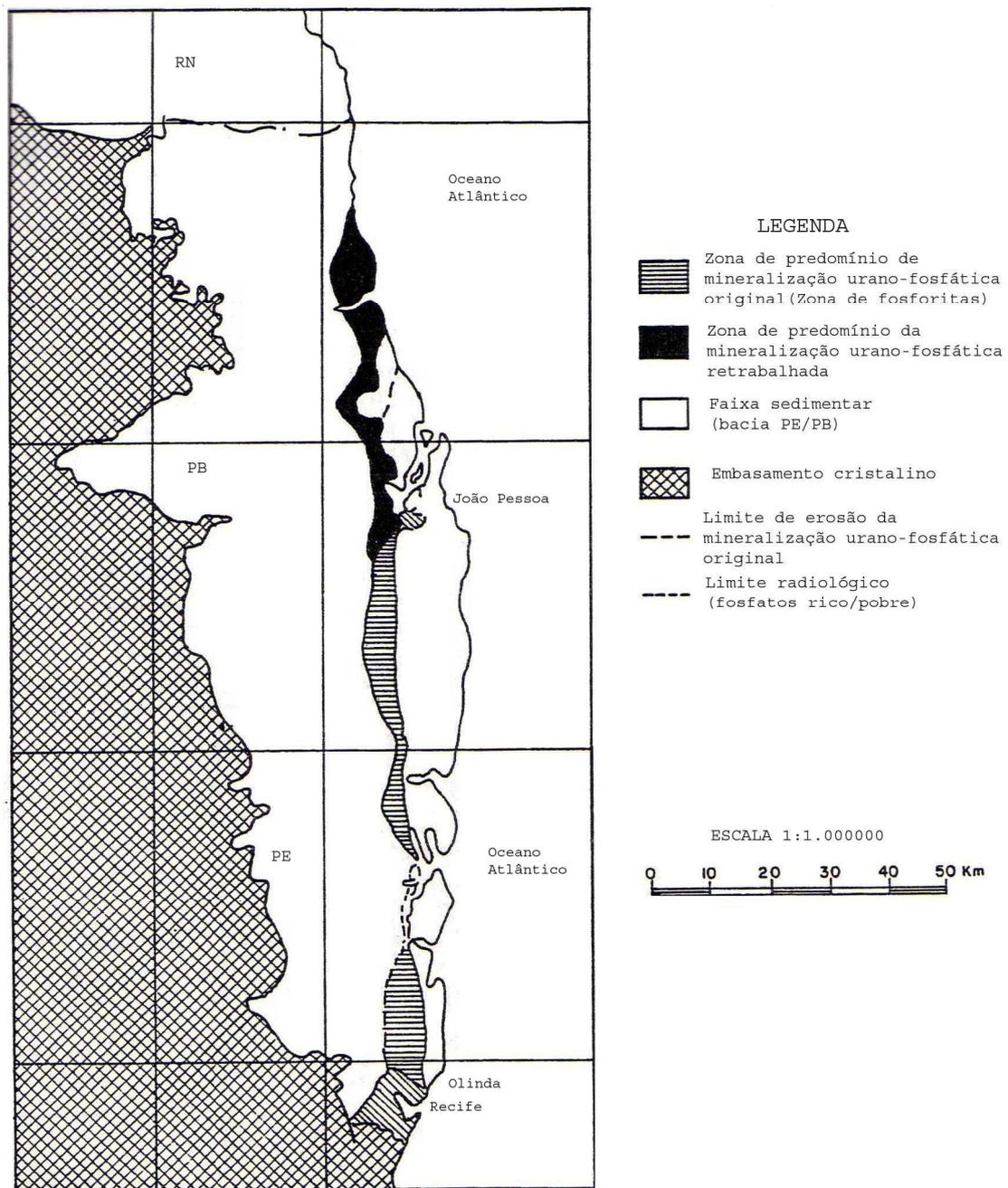


Figura 1 - Região de Fosfato do Nordeste brasileiro (Fonte: LIMA, 1996)

O “fosfato rico” é constituído de um sedimento fosfático do tipo argilo-arenoso, pouco carbonáico ou isento de carbonatos e com coloração variando entre o amarelo e o castanho. Estudos realizados por SAAD e ALMEIDA (1978 apud LIMA, 1996) comprovam que a

fosforita do Nordeste apresenta uma das mais altas concentrações de  $U_3O_8$  (30 a 500ppm), quando comparada com outras ocorrências mundiais (Tabela 6).

Tabela 6 - Concentrações de urânio nos fosfatos de rocha mundialmente estudadas (Fonte: LIMA, 1996).

País	Concentração de Urânio( $\mu g/g$ )
Tunísia	32-47
Argélia	110-132
Jordânia	105-149
Israel	120-140
EUA (Flórida)	150-200
Marrocos	155-160
Brasil (Nordeste)	150-300

Devido ao alto teor de fosfato de  $P_2O_5$ , com um valor médio de 22%, a fosforita do NE tem sido explorada para a produção de fertilizantes (LIMA, 1996), tendo sido inclusive explorados em grande escala até fins de 1963. A extração, primeira fase do processo de produção de fertilizante, é feita a céu aberto, por meio de remoção da camada superior estéril e do descarte do fosfato pobre, cujo teor é inferior a 10%. Após a primeira fase de extração é feita a recomposição do solo, aproveitando-se o material retirado. O teor de  $U_3O_8$  associado a este fosfato, segundo o trabalho de SAAD (1978 apud LIMA, 1996), varia de 150 a 300 ppm. A presença do urânio na fosforita decorre, provavelmente, da sua lixiviação e posterior deposição no mineral, por processo de substituição do  $Ca^{2+}$  pelo  $UO_2^{2+}$ , ambos presentes nos minerais fosfáticos. Esses trabalhos mostraram que a correlação entre os teores de  $P_2O_5$  e de  $U_3O_8$ , presentes na fosforita do nordeste, é positiva, o que comprova a hipótese de substituição do  $Ca^{2+}$  pelo  $UO_2^{2+}$ , indicando que a deposição do urânio obedece ao mesmo ritmo de deposição de fosfato.

A população que habita a região onde estão localizadas as jazidas fosfáticas de Pernambuco utiliza, preferencialmente, os recursos hídricos subterrâneos, em virtude da poluição observada na maioria dos recursos hídricos superficiais. A utilização de água proveniente dos aquíferos semi-confinados é restrita, uma vez que a sua captação só é possível através de poços tubulares. Por outro lado, a captação do aquífero livre pode ser feita através de escavações, bem menos onerosas. Por esta razão, são encontradas diversas unidades de captação de água do aquífero superior, as quais são utilizadas para o

abastecimento de casas e sítios. Conseqüentemente, os moradores desta região estão sujeitos às altas concentrações de urânio e seus produtos de decaimento.

## 2.2 Avaliação da exposição

A avaliação da exposição do ser humano à radiação ionizante é um fator importante para avaliação de riscos sendo, em muitos países, um critério base nas tomadas de decisões em situações de intervenção por parte dos órgãos reguladores. Inicialmente, a avaliação da exposição identifica grupos e subgrupos da população que têm sido expostos a um elemento radioativo e determina as doses reais recebidas pelos indivíduos expostos ou populações. Apesar de alguns parâmetros de exposição à radiação serem bem conhecidos, a absorção do radionuclídeo pode variar devido a sua forma química, aos constituintes presentes nos alimentos e a idade do indivíduo exposto (WHO, 2006).

As principais vias de incorporação de radionuclídeos no corpo humano são inalação e ingestão. Os modelos de incorporação de radionuclídeos podem ser simulados para quatro diferentes situações: incorporação única, várias incorporações, incorporação crônica e incorporação para trabalhador. O modelo de incorporação crônica está relacionado a um contato contínuo e constante com o material radioativo, como por exemplo, o caso de moradores de uma área de alto background natural (DANTAS et al., 2004).

Uma dose não é facilmente calculada até mesmo se a concentração química e o consumo são conhecidos, para substâncias químicas presentes dentro de qualquer meio. A amostragem representativa é complexa e a análise de concentrações muito baixas de substâncias químicas em amostras ambientais é cara e difícil. Uma avaliação de exposição inicial pode estar baseada em dados limitados, como faixas estimadas para entrada de dados de um modelo de predição de exposição. Normalmente a avaliação de exposição é no local específico. Isto quer dizer que, na ausência de dados disponíveis, os valores são expressos dentro de três modos: médias, faixas e distribuições (RAJKUMAR; GUESGEN, 1996).

Alguns dos principais fatores de exposição segundo Wood et al. (1997) são:

- Ingestão de água potável;
- Ingestão de partículas suspensas (poeira);
- Dermicamente (por ferimentos na pele);
- Via inalação;
- Idade do indivíduo;

- Ingestão de frutas e vegetais;
- Ingestão de peixe;
- Ingestão de carne e derivados de leite;
- Ingestão de derivados de grãos;
- Ingestão de leite materno;
- Característica de construção de residências;
- Fatores de atividade.

Os fatores de atividade são aqueles diretamente ligados à ocupação, localização, idade, cultura e preferências pessoais (costumes). Wood et al. (1997) comentam que o nível de educação alcançado e posição socioeconômica também influenciam na escolha de atividades e suas durações.

A análise de incerteza pode ser usada para suprir tomadores de decisões com um completo espectro de informações relativo à avaliação e sua qualidade. A incerteza representa uma falta do conhecimento sobre os fatores que afetam a exposição ou o risco, visto que a variabilidade se eleva pelas verdadeiras heterogeneidades através das pessoas, dos lugares ou do tempo. Por outro lado, a incerteza conduz às estimativas imprecisas ou tendenciosas, embora a variabilidade possa afetar a precisão da estimativa e o grau na qual eles possam ser generalizados (USEPA, 2006).

A causa básica de incerteza é a falta de informação disponível ao analista por causa da inadequação, ou da não existência de dados experimentais e operacionais nos parâmetros e processos. A causa específica da incerteza inclui (RAJKUMAR; GUESGEN, 1996):

- Erro de medição – a incerteza cresce pelo erro sistemático e randômico na técnica de medição;
- Erro de amostragem – a incerteza cresce pela baixa representatividade dos dados da população a ser amostrada;
- Variabilidade - a inconstância natural dos dados;
- Aplicação e qualidade dos dados empíricos indiretos ou genéricos - a incerteza cresce na aplicabilidade dos dados indiretos e do erro de medição ou de amostragem nos dados;
- Julgamento de especialista - freqüentemente, a falta de dados pode ser preenchida baseada em suposições científicas e de engenharia, contendo incerteza inerente.

A Tabela 7 a seguir lista os tipos de estimativa que contribuem em uma avaliação da exposição (WHO, 2006).

Tabela 7 - Estimativa de uma avaliação detalhada da exposição (Fonte: WHO, 2006)

Exposição	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vias, meios e frequências;</li> <li>• Duração de interesse (curta, longa, intermitente ou picos de exposição);</li> <li>• Distribuição (isto é, média, variância, desvio) - população, subpopulações importantes (isto é, muito exposta e/ou mais suscetível);</li> <li>• Individual – média, mais exposta na população.</li> </ul>
Dose	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inter-relacionado com a exposição;</li> <li>• Distribuição (isto é, média, variância, desvio) - população, subpopulações importantes (isto é, altas doses, mais suscetível);</li> <li>• Individuais – média, distribuição, dose alta na população;</li> </ul>
Causas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contribuição relativa de fontes importantes</li> <li>• Contribuição de meios de exposição importantes.</li> <li>• Contribuição relativa de vias de exposição importantes.</li> </ul>
Variabilidade	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No indivíduo (isto é, mudanças na exposição pelo dia a dia para uma mesma pessoa);</li> <li>• Entre indivíduos (isto é, diferenças na exposição no mesmo dia para duas pessoas diferentes);</li> <li>• Entre grupos (isto é, diferentes classes sócio-econômicas e locais de moradia);</li> <li>• Tempo excedente (por exemplo, mudanças na exposição de uma estação para outra)</li> <li>• Através do espaço (isto é, mudanças na exposição/dose para uma região da cidade, país para outro).</li> </ul>
Incerteza	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Falta de dados (isto é, sem identificação de caminhos de riscos e causas, erro estatístico em medidas, parâmetros do modelo, etc.).</li> <li>• Falta de compreensão (isto é, erros nas formas funcionais dos modelos, empregos errados de dados próximos de contextos análogos).</li> </ul>

É impraticável medir a dose individual todos os dias. Por esta razão, o pesquisador pode estimar a dose diária média (ADD) baseada em um número finito de medidas, para se aproximar a variabilidade do cotidiano. O indivíduo tem um ADD verdadeiro, porém desconhecido, que pode ser estimado baseado em uma amostragem de medidas. A variabilidade através das doses diárias foi traduzido na incerteza no ADD. Embora, o ADD verdadeiro individual não tenha nenhuma variabilidade, a estimativa da ADD tem alguma incerteza. Esta discussão pertence à ADD para uma pessoa. Considerando agora uma distribuição de ADD sobre os indivíduos em uma população definida. Neste caso, a variabilidade refere-se à escala e a distribuição do ADD sobre os indivíduos na população. Pela comparação, a incerteza refere-se ao estado de conhecimento do avaliador da exposição

sobre qual distribuição, ou sobre os parâmetros que descrevem a distribuição (por exemplo, média, desvio padrão) (WOOD et al., 1997).

O conselho de pesquisa nacional dos Estados Unidos (NRC, 1994) observou que a variabilidade e a incerteza tinham fundamentalmente ramificações diferentes para a ciência e o julgamento. Por exemplo, a incerteza pode forçar os responsáveis por tomadas de decisões a julgar como provável que exposições tenha sido super-estimadas ou sub-estimadas para todos os membros de uma população exposta, considerando que a variabilidade os força a lidar com a certeza que diferentes indivíduos estão sujeitos a exposições acima e abaixo de alguns dos níveis de exposição escolhidos como um ponto de referência.

A variabilidade inerente em parâmetros ambientais e exposição relacionada é uma fonte principal da incerteza. Por exemplo, padrões de atividades humanas dependem da idade, do sexo e da posição geográfica de indivíduos específicos na população.

## 2.3 Fundamentos da Lógica Fuzzy

### 2.3.1 Um breve histórico

As origens da lógica nebulosa, ou lógica *fuzzy*, como é chamada mais popularmente, remontam a 2500 anos, mas foi a partir da década de 1960 que passou a ser tratada por este nome. No século IV a.C., Aristóteles criou a lógica clássica, chamada de lógica aristotélica ou lógica *crisp*. Baseada na idéia do filósofo grego Pitágoras, Aristóteles estendeu a convicção numérica desse filósofo ao processo que as pessoas utilizam para pensar e tomar decisões, aliando a precisão da matemática com a pesquisa da verdade. No século X d.C., esta lógica serviu de base para o pensamento na Europa e no Oriente Médio. Isso aconteceu por duas razões: ela simplifica a maneira de pensar acerca de problemas e torna a certeza ou verdade mais fácil de provar (KOSKO, 1994; SARAIVA, 2000).

No século XVIII, o filósofo e clérigo irlandês George Berkeley e o escocês David Hume pensavam que todo conceito tem um elemento central concreto, para o qual são atraídos todos os outros que, de alguma maneira, lhe são semelhantes. Hume, em particular, acreditava na lógica do senso comum, cuja razão se baseava no conhecimento, que as pessoas normalmente adquiriam por viverem no mesmo mundo. Na Alemanha, Kant considerava que somente a matemática poderia proporcionar definições nítidas e que muitos princípios contraditórios não poderiam ser conciliados. Como exemplo, citava o fato da matéria poder

ser dividida infinitamente, mas ao mesmo tempo não poder ser infinitamente dividida (SARAIVA, 2000).

No século XIX foi desenvolvida um tipo de aritmética, chamada lógica booleana, resultante da lógica proposicional, baseada muito mais na aritmética binária do que nas relações da aritmética decimal. A maioria das pessoas julgou que isso não tivesse utilidade, motivo pelo qual a Lógica Booleana permaneceu na obscuridade por muitas décadas. Hoje, contudo, ela foi redescoberta e, juntamente com os circuitos integrados, trouxe à luz os microprocessadores e os computadores modernos.

A idéia de que a lógica *crisp* produzia contradições, não passíveis de serem gerenciadas, surgiu e foi popularizada no princípio do século XX pelo filósofo e matemático inglês Bertrand Russell. Ele, também, estudou a incerteza da linguagem, bem como sua precisão, concluindo que a incerteza é objeto de gradação.

A teoria dos conjuntos originais (0 ou 1) foi inventada pelo matemático alemão George Cantor, no século XIX. Mas, este conjunto *crisp* tem as mesmas restrições que a lógica nele baseada. A primeira lógica de incerteza foi desenvolvida em 1920 pelo filósofo polonês Jan Lukasiewicz. Ele criou conjuntos com valores possíveis de pertinência 0,  $\frac{1}{2}$  e 1, estendendo-o, posteriormente, a um conjunto infinito de números entre 0 e 1.

O grande passo seguinte ocorreu em 1937, na Universidade de Cornell, EUA, quando Max Black considerou a ampliação do conceito de quais objetos poderiam pertencer a um conjunto. Ele mediu a pertinência em graus de utilização e defendeu a teoria geral de incerteza.

Os trabalhos destes pensadores propiciaram os fundamentos da lógica fuzzy para o seu fundador, professor da Universidade de Berkeley, Lotfi A. Zadeh, na Califórnia. Em 1965, ele publicou um artigo que apresentava a lógica *fuzzy* no processamento de dados. A teoria de conjuntos *fuzzy* viabiliza analisar com qual grau de pertinência, entre zero e um, um elemento pertence aos conjuntos A e B, em vez de usar o raciocínio clássico da teoria dos conjuntos, proveniente da evolução da filosofia grega, que determina se um elemento pertence ou não aos conjuntos A ou B. Contudo, assim como a lógica booleana no século XIX, não houve um reconhecimento imediato de sua importância. Aceitá-la induz a um conflito de cultura filosófica no mundo ocidental, pois nossa forma de pensar tem origem determinística e estocástica (ZADEH, 1965).

Zadeh percebeu que a modelagem de muitas atividades relacionadas a problemas industriais, biológicos ou químicos seria complexa demais se implementada da forma

convencional. Os sistemas fuzzy foram utilizados, com sucesso, em algumas aplicações que se tornaram exemplos clássicos.

Em 1974, o professor Mamdani, do *Queen Mary College*, da Universidade de Londres, implementou um controle de uma máquina a vapor, baseado em lógica fuzzy. Até então, não se tinha conseguido automatizar essas máquinas com outras técnicas de controle utilizadas.

Apesar dos estudos teóricos terem se desenvolvido na Europa e nos Estados Unidos, as aplicações nunca tiveram lá a mesma ênfase que tiveram no oriente, principalmente no Japão, que investiu muito no desenvolvimento de tecnologias baseadas na teoria fuzzy.

Hoje, empresas como Boeing, General Motors, Allen-Bradley, Chrysler, Eaton e Whirlpool têm procurado soluções diversas na teoria Fuzzy. Controle de refrigeradores de baixa potência, transmissão automotiva e motores elétricos de alta eficácia fazem parte de suas linhas de pesquisa.

Nos Estados Unidos, a Agência de Proteção Ambiental estuda o uso de controle Fuzzy em motores. Simulações mostram que um Sistema Fuzzy pode reduzir significativamente o consumo em motores de combustão. A NASA, por sua vez, tem estudado a aplicação da Teoria Fuzzy na ancoragem automática de suas naves no espaço.

### 2.3.2 Conjuntos Fuzzy

A teoria dos conjuntos fuzzy e a Lógica Fuzzy são generalizações dos conjuntos ordinários e da lógica clássica e proporcionam uma estrutura sistemática para representar conhecimentos qualitativos e com eles raciocinar (SARAIVA, 2000).

O conceito de conjunto fuzzy foi sintetizado com o objetivo de generalizar a idéia representada pelos conjuntos ordinários que podem ser denominados como abruptos (*crisp sets*, na literatura internacional). Pode-se encará-los como uma espécie de predicado lógico cujos valores percorrem o intervalo  $[0,1]$  (OLIVEIRA JUNIOR, 1999).

O grau de pertinência é definido através de uma função característica generalizada chamada de função de pertinência:

$$\mu_A(u) : U \rightarrow [0,1] \tag{1}$$

onde  $u$  é um elemento de  $U$  e  $\mu_A(u)$  é a função de pertinência.  $U$  é o universo e  $A$  é o subconjunto fuzzy de  $U$ .

Essa função associa a cada elemento  $u$  de  $U$  o grau  $\mu_A(u)$ , com o qual  $u$  pertence a  $A$ .

A função de pertinência  $\mu_A(u)$  indica o grau de compatibilidade entre  $u$  e o conceito expresso por  $A$ :

- $\mu_A(u) = 1$  indica que  $u$  é completamente compatível com  $A$ ;
- $\mu_A(u) = 0$  indica que  $u$  é completamente incompatível com  $A$ ;
- $0 < \mu_A(u) < 1$  indica que  $u$  é parcialmente compatível com  $A$ , com grau  $\mu_A(u)$ .

Um conjunto  $A$  da teoria dos conjuntos clássica pode ser visto como um conjunto denominado usualmente de *crisp*, para o qual  $\mu_A(u) : U \rightarrow \{0,1\}$ , ou seja, a pertinência é do tipo “tudo ou nada”, “sim ou não”, e não gradual como para os conjuntos fuzzy (SANDRI ; CORREA, 1999).

Cada valor da função é chamado de grau de pertinência. Na Figura 2 observa-se três funções de pertinência representando três conjuntos fuzzy definidos como “baixo”, “médio”, e “alto”, todos eles referentes à variável “taxa de consumo”. Como pode ser observado, o valor 330 g pertence ao conjunto fuzzy “médio” para um grau de 0,056, para o conjunto “alto” um grau de pertinência de 0,750 e para o conjunto “baixo” um grau correspondente a 0. Com isso, tem-se três valores de graus de pertinência que juntos representam o valor da variável de taxa de consumo.

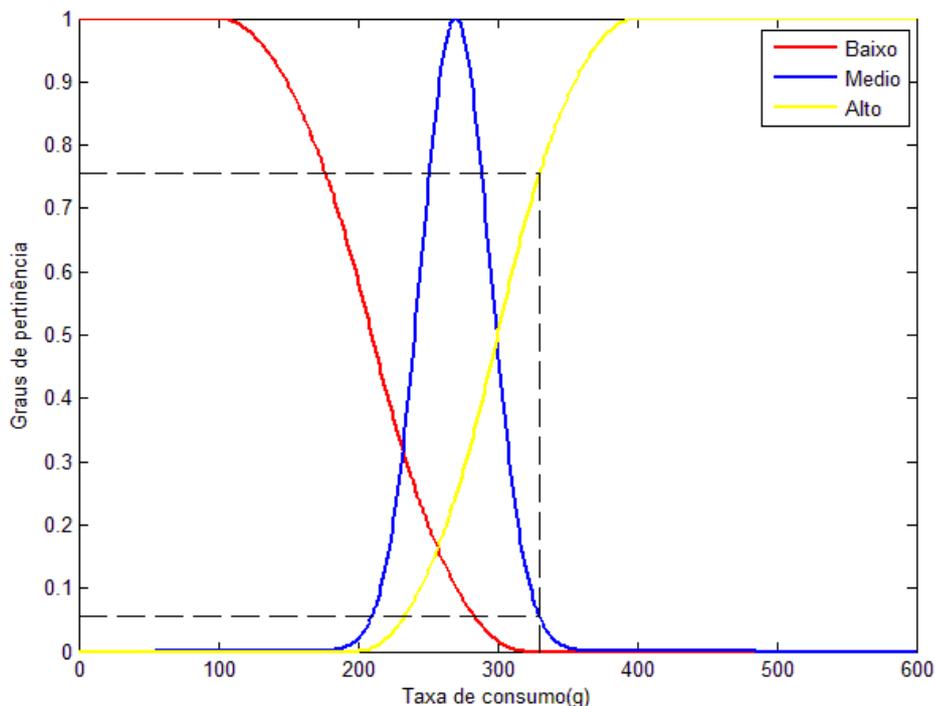


Figura 2 – Função de pertinência representando três conjuntos fuzzy para a variável “taxa de consumo”.

Se o universo é discreto, uma função de pertinência pode ser definida por um conjunto finito da seguinte maneira:

$$A = \mu(u_1)/u_1 + \mu(u_2)/u_2 + \dots + \mu(u_n)/u_n, \quad (2)$$

ou simplesmente

$$A = \frac{\sum \mu_i(u_i)}{u_i}, \quad (3)$$

onde o símbolo “/” separa o grau de pertinência  $\mu(u_i)$  pelos elementos do universo  $u_i \in U$ , e + representa a união. Numa forma mais simples, o conjunto fuzzy é representado como uma seqüência de pares graus de pertinência/valores:  $\{0/150; 0,3/160; 0,68/170; 0,9/180; 1/190, 1/250\}$ .

A diferença entre um conjunto crisp e um conjunto fuzzy pode ser observado na Figura 3. O conjunto *crisp* usa corte abrupto nos seus contornos, ao contrário do conjunto fuzzy. O grau de pertinência a que dois valores, por exemplo 239.9 e 240, pertencem ao conjunto fuzzy “médio” são muito próximos um do outro, que representa suas proximidades no universo. Mas, devido ao limite crisp entre o conjunto “baixo” e “médio”, os dois valores são associados com conjuntos *crisp* diferentes (KASABOV, 1998).

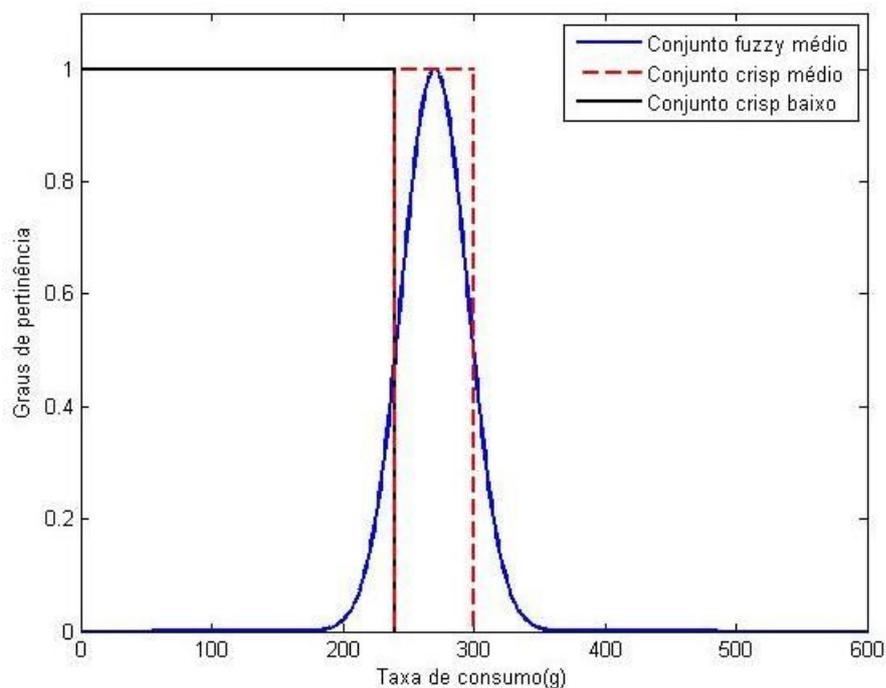


Figura 3 – Representação crisp e conjuntos fuzzy como subconjuntos de um domínio U.

Há duas maneiras de se definir a função de pertinência dos conjuntos difusos (THÉ, 2001):

- Método numérico, se o universo de discurso é discreto. Consiste em se representar a função de pertinência por um vetor cuja dimensão depende do grau de discretização do universo de discurso;
- Método funcional, se o universo de discurso é contínuo. Expressa a função de pertinência por uma função contínua  $\mu(u)$ .

Um outro exemplo de função de pertinência é encontrado no trabalho realizado por CHANG et al. (2001) que utilizaram a teoria dos conjuntos nebulosos para realizar a avaliação da qualidade de água no rio Tseng-Wen, no sudeste de Taiwan. Segundo este trabalho, as funções de pertinência foram divididas em classes: A - Água potável de abastecimento público (nível primário), B - Água potável de abastecimento público (nível secundário), C - Água potável de abastecimento público (nível terciário) e D - Água de abastecimento industrial (Figura 4).

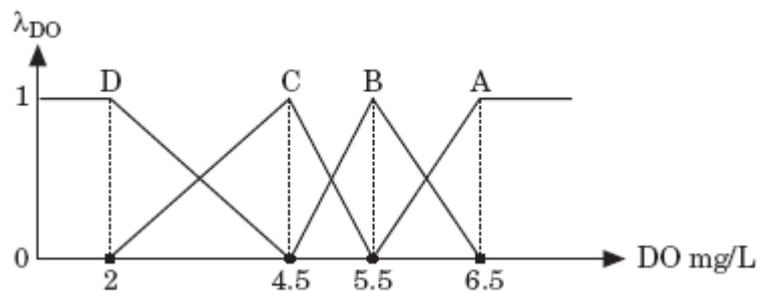


Figura 4 – Funções de pertinência utilizadas para se avaliar o nível de oxigênio dissolvido no rio Tseng-Wen (Fonte: CHANG et al., 2001)

Algumas noções básicas de conjuntos fuzzy são definidas abaixo (BANDEMER ; NATHER, 1992):

- Um suporte de um conjunto fuzzy A é o subconjunto do universo U, cada elemento (u) do qual tem um grau de pertinência ( $\mu_A$ ) diferente de zero:

$$\text{supp}(A) = \{u | u \in U, \mu_A(u) > 0\} \quad (4)$$

Por exemplo, o suporte do conjunto fuzzy “temperatura média” é o intervalo (10,30) na escala Celsius. O conjunto fuzzy A pode ser formulado inteiramente por seu suporte, que é:

$$A = \{\mu_A(u) / u | u \in \text{supp}(A)\} \quad (5)$$

- Cardinalidade de conjunto *crisp* é definida como o número de elementos no conjunto, mas cardinalidade M(A) do conjunto fuzzy discreto A está definida como segue:

$$M(A) = \sum \mu_A(u), u \in U \quad (6)$$

Quando U for um conjunto contínuo, a cardinalidade é definida por

$$M(A) = \int \mu_A(u) du \quad (7)$$

A cardinalidade relativa de A representa a fração de elementos de U que estão em A, ponderados pelo grau de pertinência em A, e é definida por

$$\|A\| = \frac{|A|}{|U|}, \quad (8)$$

onde  $|U| = n(u)$  é a quantidade de elementos do universo U.

- Conjunto *power* de A é o conjunto de todos os subconjuntos de A.
- Um conjunto fuzzy A é chamado um conjunto fuzzy normal se sua função de pertinência tem grau 1 pelo menos para um elemento do universo U.

A teoria de conjunto fuzzy pode ser considerada como uma extensão da teoria do conjunto ordinário. Operações similares para operações de conjuntos ordinários bem-conhecidos têm sido introduzidas por conjuntos fuzzy, como apresentado na próxima seção.

### 2.3.3 Operações com conjuntos fuzzy

Os conjuntos ordinários (crisp) são um caso especial de conjuntos fuzzy, quando apenas dois graus de pertinência, 0 e 1, são usados, e limites crisp entre os conjuntos são definidos. Todas as definições, provas e teoremas definidos para os conjuntos fuzzy devem também ser válidos em casos quando a nebulosidade torna-se zero, ou seja, quando o conjunto fuzzy torna-se um conjunto ordinário (OLIVEIRA JUNIOR, 1999).

Uma representação de uma função análoga da função de pertinência é usada na Figura 5 para representar alguns operadores com conjuntos fuzzy.

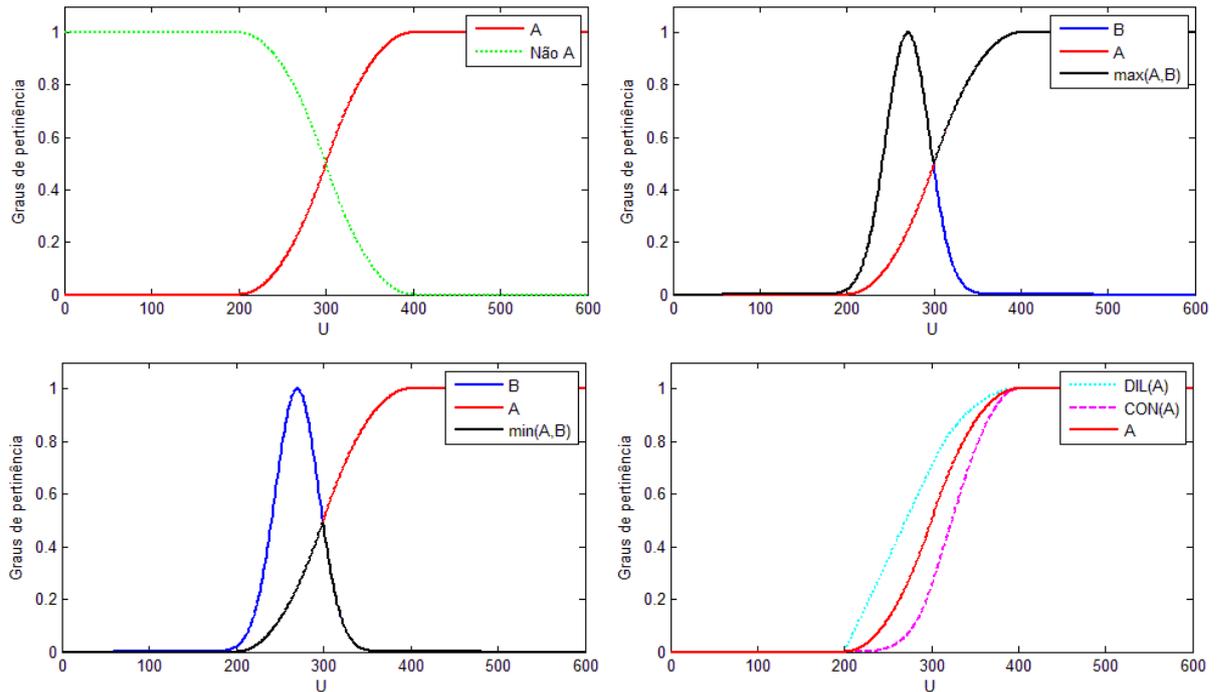


Figura 5 – Operações com conjuntos fuzzy A e B.

As operações seguintes são mais comuns na teoria fuzzy para dois conjuntos fuzzy A e B definidos sob o mesmo universo U (RUTKOWSKI, 2004):

- União,  $A \cup B$

$$\mu_{A \cup B}(u) = \mu_A(u) \vee \mu_B(u), \text{ para todo } u \text{ de } U, \text{ onde } \vee \text{ significa MAX}$$

- Intersecção,  $A \cap B$

$$\mu_{A \cap B}(u) = \mu_A(u) \wedge \mu_B(u), \text{ para todo } u \text{ de } U, \text{ onde } \wedge \text{ significa MIN; as leis de De Morgan são válidas para a intersecção e a união.}$$

- Igualdade,  $A = B$

$$\mu_A(u) = \mu_B(u), \text{ para todo } u \text{ de } U$$

- Conjunto complementar, não A,  $\neg A$ :

$$\mu_{\neg A}(u) = 1 - \mu_A(u), \text{ para todo } u \text{ de } U$$

- Concentração,  $CON(A)$ :

$$\mu_{CON(A)}(u) = (\mu_A(u))^2, \text{ para todo } u \text{ de } U; \text{ em algumas operações é usada como um modificador lingüístico “muito”}.$$

- Dilatação,  $DIL(A)$ :

$$\mu_{DIL(A)}(u) = (\mu_A(u))^{0,5}, \text{ para todo } u \text{ de } U; \text{ em algumas operações é usada como um modificador lingüístico “mais ou menos”}.$$

- Subconjunto,  $A \subseteq B$  :

$$\mu_A(u) \leq \mu_B(u), \text{ para todo } u \text{ de } U$$

- Produto Algébrico,  $A \cdot B$

$$\mu_{AB}(u) = \mu_A(u) \cdot \mu_B(u), \text{ para todo } u \text{ de } U.$$

- Soma delimitada:

$$\max\{1, \mu_A(u) + \mu_B(u)\}, \text{ para todo } u \text{ de } U$$

- Diferença delimitada,  $A|-|B$  :

$$\mu_{A|-|B}(u) = \min\{0, \mu_A(u) - \mu_B(u)\}, \text{ para todo } u \text{ de } U$$

- Produto delimitado

$$\max\{0, \mu_A(u) + \mu_B(u) - 1\}, \text{ para todo } u \text{ de } U$$

- Normalização NORM(A):

$$\mu_{NORM(A)}(u) = \mu_A(u) / MAX\{\mu_A(u)\}, \text{ para todo } u \text{ de } U$$

- Soma Algébrica

$$\mu_{A+B}(u) = \mu_A(u) + \mu_B(u), \text{ para } u \text{ de } U;$$

As operações sobre conjuntos fuzzy têm algumas propriedades, por exemplo, elas são associativas, comutativas e distributivas.

Na teoria dos conjuntos fuzzy, a intersecção é implementada por uma família de operadores denominados de t-normas, e a união é implementada por uma família de operadores denominados de t-conormas ou S-normas.

Uma função  $\nabla : [0,1]^2 \rightarrow [0,1]$  é dita ser comutativa, associativa e monotônica se  $\nabla$  satisfaz as seguintes propriedades, respectivamente, para  $\forall a, b \in [0,1]$  (SANDRI ; CORREA, 1999):

- Comutatividade:  $\nabla(a, b) = \nabla(b, a)$  ;
- Associatividade:  $\nabla(a, \nabla(b, c)) = \nabla(\nabla(a, b), c)$  ;
- Monotonicidade:  $\nabla(a, b) \leq \nabla(c, d)$  se  $a \leq c$  e  $b \leq d$  .

Um operador  $\mathbb{T} : [0,1]^2 \rightarrow [0,1]$  é denominado de t-norma se  $\mathbb{T}$  é comutativo, associativo e monotônico e verifica a seguinte propriedade,  $\forall a \in [0,1]$ :

- $\mathbb{T}(a, 1) = a$  , ou seja, 1 é o elemento neutro para o operador.

Da mesma maneira, uma t-conorma  $\perp$  é uma função  $\perp: [0,1]^2 \rightarrow [0,1]$  que é comutativa, associativa e monotônica e verifica a seguinte propriedade,  $\forall a \in [0,1]$ :

- $\perp(a,0) = a$ , ou seja, 0 é o elemento neutro para o operador.

Uma t-norma  $\top$  e uma conorma  $\perp$  são duas em relação a uma operação de negação  $\neg: [0,1] \rightarrow [0,1]$  se elas satisfazem as relações de De Morgan, dadas por,  $\forall a, b \in [0,1]$ :

- $\neg(\top(a,b)) = \perp(\neg a, \neg b)$ ;
- $\neg(\perp(a,b)) = \top(\neg a, \neg b)$ .

O principal operador de negação é dado por  $\neg a = 1 - a$ , mas outros operadores podem ser encontrados na literatura. É importante notar que as t-normas e t-conormas se reduzem aos operadores clássicos de união e intersecção quando os conjuntos são *crisp* (SANDRI ; CORREA, 1999).

Uma diferença entre conjuntos ordinários e conjuntos fuzzy pode ser vista na união e na intersecção de um conjunto fuzzy A e seu complemento -A, que podem não necessariamente resultar no universo U e no conjunto vazio, respectivamente.

Parâmetros métricos diferentes têm sido introduzidos para medir similaridade e distância entre conjunto fuzzy. Uma aproximação gráfica é mostrada na Figura 6.

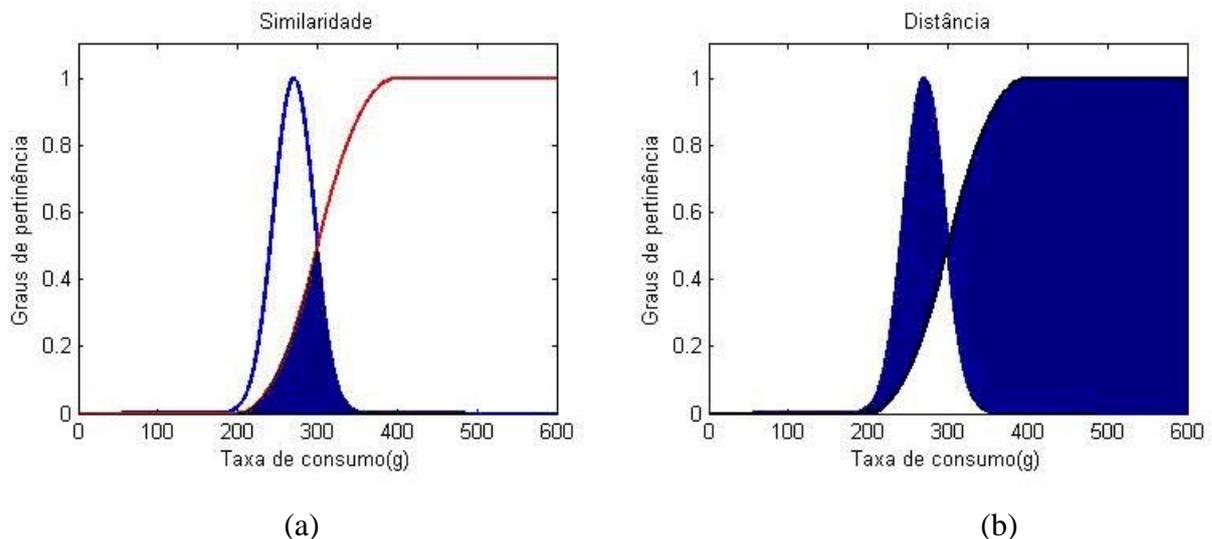


Figura 6 – Medição da similaridade e distância entre conjuntos fuzzy (a) e (b). A área negra representa quantitativamente a medida.

A similaridade S entre dois conjuntos fuzzy A e B (que é também uma medida de quanto B combina com A) pode ser medida pelo cálculo das possibilidades P e necessidades N como mostrado abaixo e ilustrado na Figura 7:

$$S = P(A/B), \quad \text{se } N(A/B) > 0.5$$

$S=(N(A/B)+0.5)*P(A/B)$ , por outro lado

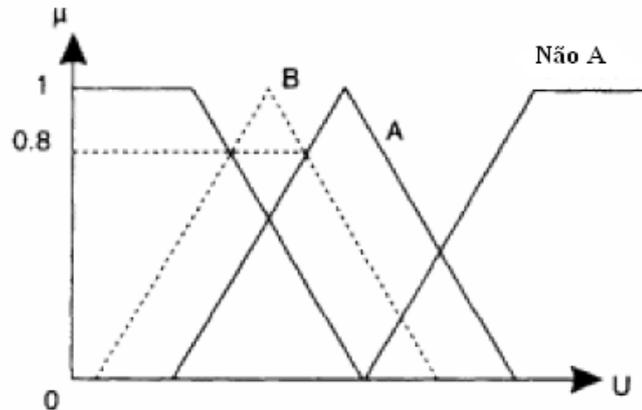


Figura 7 – Representação gráfica de cálculo da similaridade S entre dois conjuntos fuzzy B e A, baseados na possibilidade P e necessidade N medidas (fonte: KASABOV, 1998).

onde  $P(A/B) = \max \{ \min \{ \mu_A(u), \mu_B(u) \} \}$ , para todo  $u \in U$ ;  $N(A/B) = 1 - P(\neg A/B)$ . A fórmula acima parece complicada, mas sua implementação é muito simples, como mostrou a Figura 7. Por exemplo,  $N(A/B) = 0,2$  e  $S = (0,2+0,5) \times 0,8 = 0,56$ . O método acima é largamente usado em sistemas especialista fuzzy para calcular o grau para qual uma observação(B) combina com um elemento (A) em uma regra fuzzy (KASABOV, 1998; SILER ; BUCKLEY, 2005).

#### 2.3.4 Sistema de inferência fuzzy

As inferências fuzzy são compostas por um conjunto de proposições nebulosas, mais comumente conhecidas como base de regras, que descrevem as relações entre variáveis lingüísticas e os conjuntos nebulosos. As inferências fuzzy fornecem conclusões ou saídas de um dado sistema analisando os níveis de compatibilidade das entradas com as condições impostas pela base de regras, ou seja, determinando como as regras serão ativadas e combinadas. Na Figura 8 pode ser observado o esquema de um sistema de inferência fuzzy.

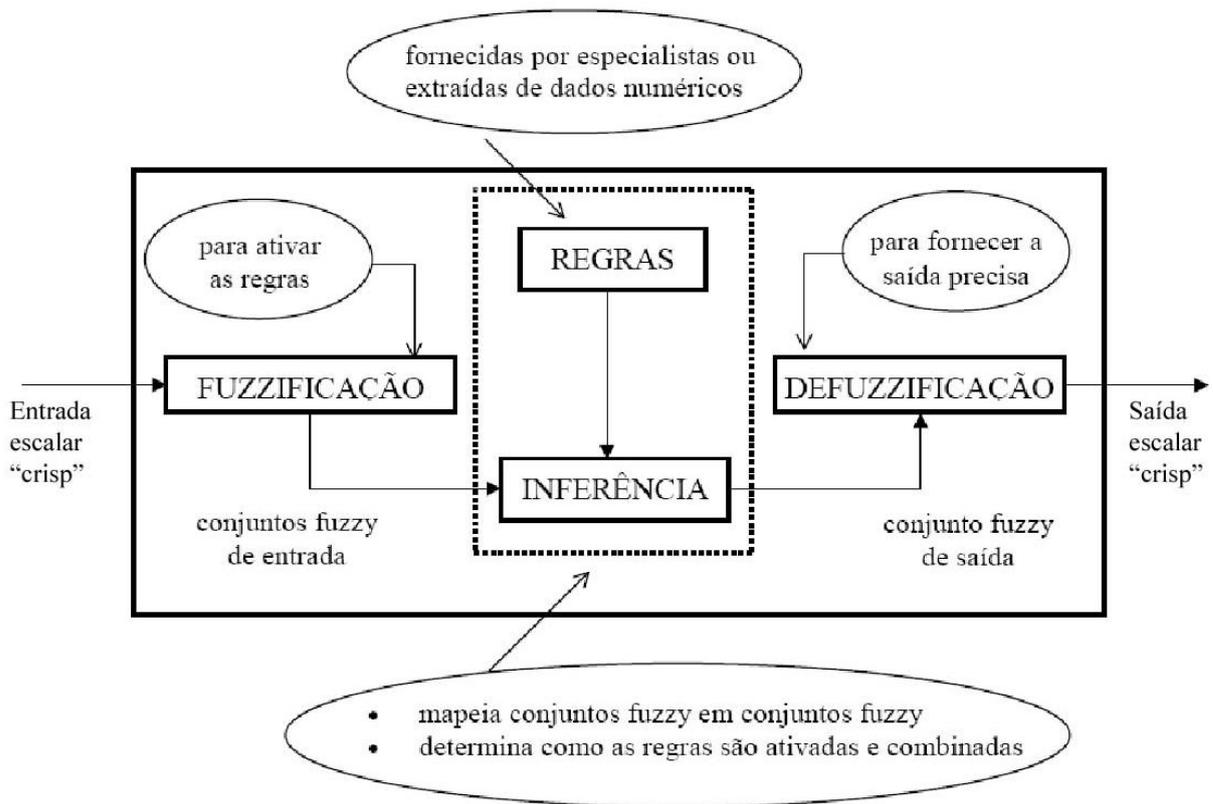


Figura 8 - Sistema de inferência fuzzy (Fonte: TANSCHKEIT, 2006).

No sistema de inferência fuzzy consideram-se entradas precisas, ou seja, entradas resultantes de medições e observações, as quais caracterizam o estado do sistema (variáveis de estado). Após a normalização em um universo de discurso padronizado efetua-se um mapeamento destas medições para os conjuntos fuzzy (de entradas), que é realizado no estágio de fuzzyficação, com a transformação da entrada *crisp* em conjuntos fuzzy para que possam se tornar instâncias de variáveis lingüísticas (MOHAMED; CÔTÉ, 1999; ALTUNKAYNAK et al., 2005; NOVÁK; LEHMKE, 2006).

Após esse estágio, ocorre a ativação de regras relevantes para a situação estudada, utilizando-se operações com conjuntos fuzzy tais como combinação dos antecedentes das regras, implicação e processo de inferência. Uma vez obtido o conjunto fuzzy de saída através do processo de inferência, este resultado é transformado em um valor *crisp* na etapa de defuzzyficação, realizando a interpretação da informação obtida (NOVÁK; LEHMKE, 2006).

A definição prévia dos conjuntos fuzzy de entrada, relativos aos antecedentes das regras, e o de saída, referente ao conseqüente, podem ser gerados automaticamente a partir dos dados ou definidos por especialistas (BANDEMER; NÄTHER, 1992).

As regras utilizadas nos modelos de inferência podem ser extraídas de dados numéricos ou fornecidas por especialistas, na forma de sentenças lingüísticas, que se constituem um aspecto fundamental no desempenho de um sistema de inferência fuzzy.

#### 2.3.4.1 Base de regras

A base de conhecimento consiste de uma base de dados e uma base de regras, de maneira a caracterizar a estratégia de controle e as suas metas. Na base de dados ficam armazenadas as definições sobre discretização e normalização dos universos de discurso, e as definições das funções de pertinência dos termos nebulosos (SANDRI ; CORREA, 1999).

Se os conjuntos fuzzy forem usados para descrever relações entre variáveis obtêm-se regras lingüísticas ou regras fuzzy. Um sistema de diversas bases de regras fuzzy é chamado sistema fuzzy. Uma base de regra fuzzy tem a seguinte estrutura (PERFILIEVA, 2006):

$$R_r: \text{Se } u_1 \text{ é } \mu_r^{(1)} \text{ e } \dots \text{ e } u_n \text{ é } \mu_r^{(n)} \text{ então } y \text{ é } v_r \quad (9)$$

Os conjuntos fuzzy podem ser substituídos por expressões lingüísticas como, por exemplo,

$$R_r: \text{Se } u_1 \text{ é pequeno e } \dots \text{ e } u_n \text{ é grande então } y \text{ é aproximadamente zero.}$$

Uma regra fuzzy pode também ter mais do que uma variável em seu conseqüente. O sistema, então, tem a forma de um sistema de múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO), mas que pode ser transformada em vários sistemas com múltiplas entradas e uma saída (MISO). Em alguns sistemas fuzzy, uma regra fuzzy não deve ser interpretada no sentido de uma implicação, mas como uma parte da definição de uma função conhecida somente em alguns pontos. O antecedente descreve um ambiente vago e o conseqüente fornece uma descrição vaga do valor que é suposto para a variável de saída  $y$ , se o vetor da entrada  $(u_1, \dots, u_n)$  encontra-se dentro do ambiente vago descrito pelo antecedente (OLIVEIRA JUNIOR, 1999).

Um sistema fuzzy usa um conjunto de tais regras fuzzy e fornece um esquema computacional que descreve como as regras devem ser avaliadas e combinadas para computar um valor crisp da saída (vetor no caso de um sistema MIMO) para todo o vetor crisp da entrada. Conseqüentemente, pode-se considerar um sistema fuzzy simplesmente como uma função parametrizada de vetores reais que fornece como saída vetores reais. Assim, um sistema fuzzy  $F_{gr}$  é um mapeamento

$$F_{gr} : U \rightarrow Y ,$$

onde  $U = U_1 \times \dots \times U_n \subseteq \mathbf{R}^n$  é chamado domínio ou espaço de entrada,  $Y = Y_1 \times \dots \times Y_m \subseteq \mathbf{R}^m$  é chamado co-domínio ou espaço de saída e  $u = (u_1, \dots, u_n) \in U$  e  $y = (y_1, \dots, y_m) \in Y$  denotam, respectivamente, um vetor de entrada e um vetor de saída.

$\mathfrak{R}$  é um conjunto de regras fuzzy que determina a estrutura do sistema,  $\mathfrak{R} = \{R_1, \dots, R_r\}$ , onde cada regra  $R_k \in \mathfrak{R}$  é uma t-upla de conjuntos fuzzy

$$R_k = (\mu_k^{(1)}, \dots, \mu_k^{(n)}, \nu_k^{(1)}, \dots, \nu_k^{(m)}), \quad (10)$$

onde  $\mu_k^{(i)}$  é um conjunto fuzzy sobre o domínio da variável da entrada  $u_i$  e  $\nu_k^{(j)}$  é um conjunto fuzzy sobre o domínio da variável de saída  $y_j$ . Define-se

$$F_{\mathfrak{R}}(u) = y = (y_1, \dots, y_m) \quad (11)$$

onde

$$y_i = \text{defuzz} \left( \underset{R_k \in \mathfrak{R}}{\perp} \left\{ \hat{\nu}_k^{(j)} \right\} \right), \text{ com}$$

$$\hat{\nu}_k^{(j)} : Y \rightarrow [0, 1], \quad y_j \mapsto \mathsf{T}_2 \left\{ \tau_k, \nu_k^{(j)} \right\}, \text{ com}$$

$$\tau_k = \mathsf{T}_1 \left\{ \mu_k^{(1)}(u_1), \dots, \mu_k^{(n)}(u_n) \right\}, \quad (12)$$

onde  $\mathsf{T}_1$  e  $\mathsf{T}_2$  são t-normas,  $\perp$  é uma t-conormas,  $\tau_k$  é o grau de ativação de regras fuzzy  $R_k$  e defuzz é também chamado de método de desfuzzificação, que é usado para converter um conjunto fuzzy  $\hat{\nu}_k^{(j)}$  dentro de um valor de saída *crisp*.

#### 2.3.4.2 Defuzzyficação

Como conseqüência da utilização das regras de inferência fuzzy, obtém-se um ou mais conjuntos que representam as conclusões decorrentes do processo de raciocínio aproximado. Logo, tem-se a necessidade de gerar grandezas escalares que representem ou resumam da melhor maneira possível a informação contida nestas conclusões. Isto corresponde ao processo de condensação ou defuzzyficação, que pode ser efetuado de diversas maneiras (OLIVEIRA JUNIOR, 1999).

A defuzzyficação é o processo de calcular um valor numérico simples de saída a partir de uma variável de saída fuzzy da função de pertinência baseada no inferido resultante da função de pertinência para esta variável (KASABOV, 1996).

Existem diversos métodos diferentes para a defuzzyficação, mas os mais usados são o método do centro de gravidade ou centróide, critério dos máximos e o método das médias dos máximos (SILER ; BUCKLEY, 2005).

Um dos métodos mais utilizados é o método do centróide. O COG (Centro de gravidade) ou COA (Centro de área) fornece um valor correspondente à abscissa do baricentro do gráfico da função de pertinência da variável considerada. O resultado obtido pode ser interpretado como uma espécie de valor esperado do conjunto fuzzy, traçando uma analogia com as distribuições de probabilidade. A Figura 9 mostra um exemplo hipotético de utilização do método da centróide.

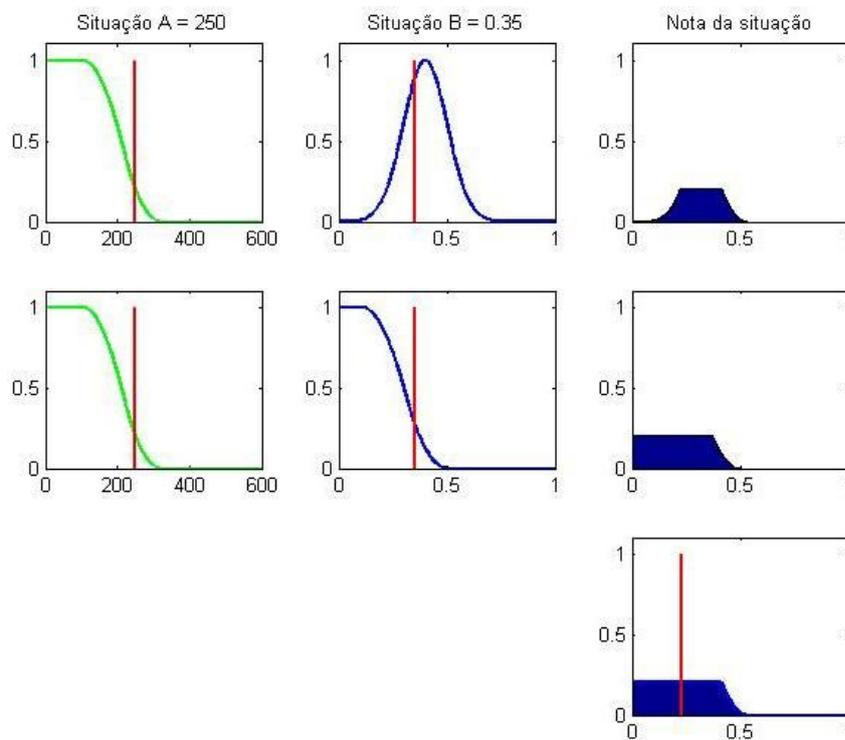


Figura 9 – Método do centro de massa.

Neste exemplo existem apenas duas regras: situação A que assume o valor de 250 e a situação B com valor de 0,35. No processo de inferência, obtém-se uma área final cujo centro de massa forneceu um valor crisp.

Este método tem algumas características (OLIVEIRA JUNIOR, 1999):

- Continuidade em relação à topologia da função de pertinência, significando que a uma “pequena” deformação na configuração do conjunto fuzzy corresponde uma “pequena” mudança no valor condensado;
- Uniformidade de aplicação a conjuntos discretos e contínuos;
- Simplicidade de cálculo.

Para o caso de um conjunto discreto  $\mu = \{ \mu_i | u_i \}$ , define-se:

$$VC_{COG} = \frac{\sum u_i \times \mu_i}{\sum \mu_i} \quad (13)$$

com o valor condensado ou defuzificado associado a  $\mu$ .

Observe que a expressão acima é estruturalmente idêntica à do valor esperado para histogramas de frequência, sendo que as probabilidades ou frequências correspondem, neste caso, às possibilidades ou graus de pertinência  $\mu$ .

Para o subconjunto fuzzy A, imerso em universo contínuo U e possuindo função de pertinência  $\mu(u)$ , define-se como:

$$VC_{COG}(centroide) = \frac{\int u\mu(u)du}{\int \mu(u)du} \quad (14)$$

Caso o conjunto fuzzy esteja imerso em espaço de dimensão superior a 1, pode-se estender a definição anterior utilizando as correspondentes integrais superiores (KECMAN, 2001).

No método da média de máximos, determina-se os pontos onde a função de pertinência alcança seu valor de máximo e computa-se sua média aritmética (caso discreto), ou a abscissa do ponto médio do segmento máximo (caso contínuo com “planaltos”).

Diferentemente do método do centro de gravidade, este método apresenta aspectos inadequados a certos tipos de aplicação (OLIVEIRA JUNIOR, 1999):

- Potencial de descontinuidade em relação à topologia da função de pertinência. Na Figura 10, observa-se que, em decorrência de uma iteração que alternou o “topo” do resultado difuso, o valor condensado se deslocou de modo abrupto.

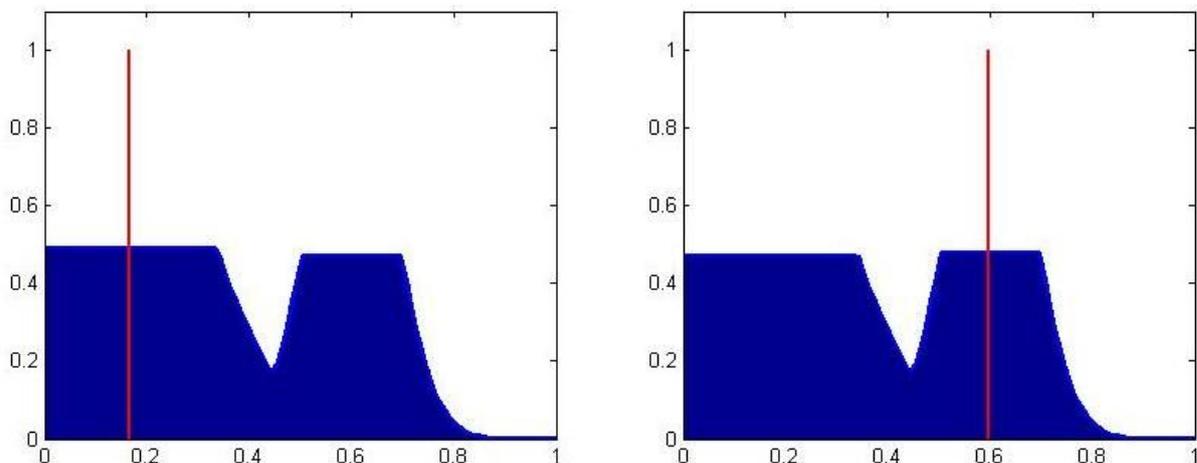


Figura 10 – Efeito de pequenas alterações nos planaltos.

Em alguns sistemas físicos, um controlador com tal comportamento poderia causar problemas.

- Potencial predominância de algumas regras de inferência, o que poderá ocasionar “polarização” em algumas regiões de saída, sem a devida “distribuição de importâncias” (Figura 11).

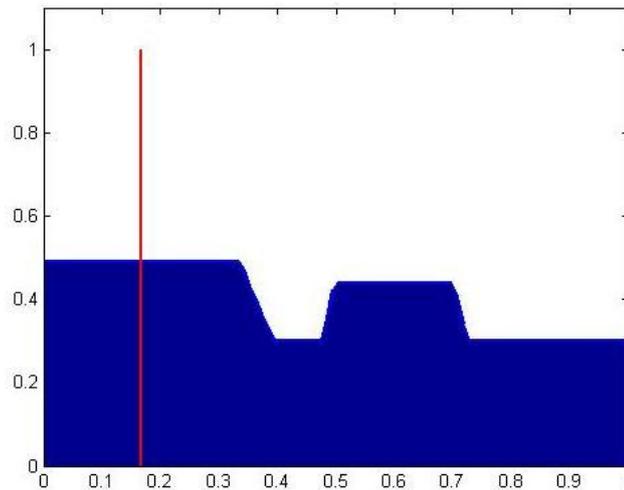


Figura 11 – Predominância de termo difuso de saída.

Mas, em algumas circunstâncias, este comportamento aparentemente anômalo é não só desejável, como essencial. Um exemplo é o da análise de risco, cujo contexto é compatível com os atributos citados anteriormente (OLIVEIRA JUNIOR, 1999).

O método do critério dos máximos resulta em um valor numérico onde a distribuição de possibilidade atinge um valor máximo (KECMAN, 2001). Na Figura 12 é mostrada a representação gráfica dos três métodos citados anteriormente.

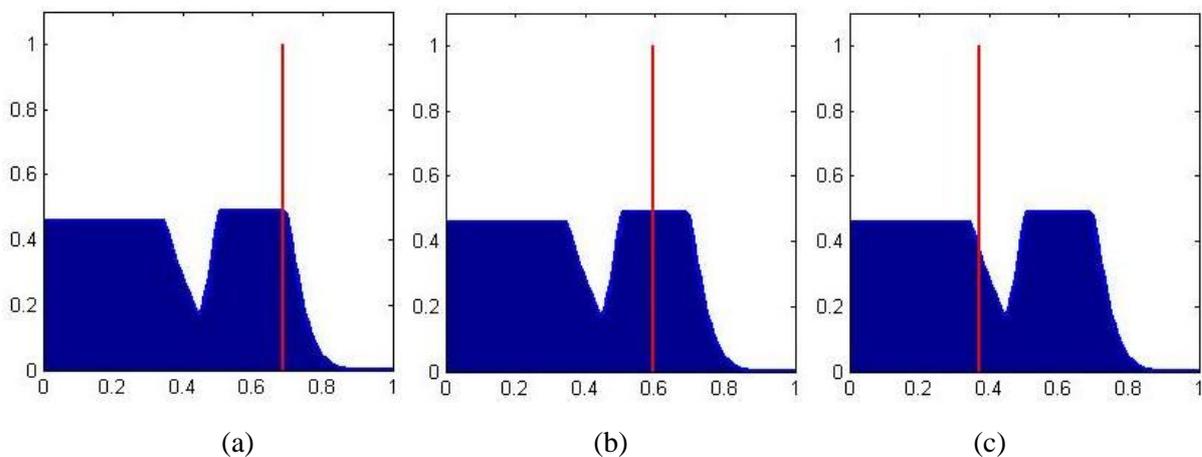


Figura 12 - Representação dos três métodos mais utilizados: (a) método critério dos máximos; (b) média dos máximos; (c) centro de massa.

### 2.3.5 Modelagem fuzzy

Os modelos fuzzy diferem quanto à forma de representação dos termos na premissa, quanto à representação das ações de controle e quanto aos operadores utilizados para a implementação de um sistema especialista. O conseqüente tem forma diferenciada, dependendo do modelo adotado (KECMAN, 2001).

Nos modelos tipo Mamdani ( $MF_{\text{M}}$ ), o conseqüente é também uma proposição nebulosa. As regras do modelo lingüístico apresentam a forma geral mostrada na equação 9, sendo ambos, antecedente e conseqüente, constituídos por variáveis lingüísticas, o que representa a principal vantagem desse modelo, ou seja, expressar o conhecimento qualitativo humano (THÉ, 2001).

Assim,  $u_1, \dots, u_n$  e  $y$  são as variáveis lingüísticas do antecedente e conseqüente, respectivamente,  $\mu_k$  e  $\nu_k$  são os valores lingüísticos definidos por conjuntos fuzzy no universo de discurso das respectivas variáveis do antecedente e conseqüente e o índice  $k$  denota a  $k$ -ésima regra de um total de  $k$  regras.

Os conjuntos fuzzy  $\mu_k$  e  $\nu_k$  definem regiões fuzzy no espaço das respectivas variáveis do antecedente onde é válida a proposição do conseqüente da mesma regra.

Um sistema fuzzy tipo Mamdani  $MF_{\text{M}}$  é um sistema fuzzy propondo que:

$$\begin{aligned} (i) \quad \mathbb{T}_1 \{a, b\} &= \min \{a, b\}; \\ (ii) \quad \mathbb{T}_2 \{a, b\} &= \min \{a, b\}; \\ (iii) \quad \perp \{a, b\} &= \max \{a, b\}. \end{aligned} \tag{15}$$

A t-norma  $\mathbb{T}_1$  determina os graus de pertinência das variáveis de entrada. A t-norma  $\mathbb{T}_2$  é a operação que determina a conclusão da regra, ou grau de ativação da regra. A t-conorma  $\perp$  é a operação de agregação das diversas regras ativadas após a aplicação da t-norma  $\mathbb{T}_2$ .

O procedimento de avaliação de um sistema fuzzy tipo Mamdani é, assim, a inferência min-max. Algumas vezes, o produto é usado para o t-norm  $\mathbb{T}_1$ . Neste caso, o procedimento da avaliação é conhecido como o máximo-ponto-inferência.

Uma desvantagem dos modelos lingüísticos, por exemplo, o modelo de Mamdani, é que os mesmos não contêm uma forma explícita do conhecimento objetivo sobre o sistema (THÉ, 2001). Uma alternativa é o uso do método de raciocínio de Sugeno, que é associado com uma base de regras de formato especial com a parte conseqüente sendo funcional ao

invés de fuzzy, tal como usado nos modelos lingüísticos. Com esse modelo de saída de um número real exato, o conjunto difuso conseqüente será um conjunto fuzzy discreto com um número finito de pontos, simplificando as contas envolvidas no processo computacional, elevando sua eficiência de processamento (NAGAMINE, 2001).

Um sistema fuzzy tipo Sugeno  $SF_{\mathfrak{R}}$  é um sistema fuzzy que usa tipos especiais de regras fuzzy. Cada regra  $R_k$  da base de regras  $\mathfrak{R}$  é uma t-upla

$$R_k = \left( \mu_k^{(1)}, \dots, \mu_k^{(n)}, f_k^{(1)}, \dots, f_k^{(m)} \right), \quad (16)$$

onde  $\mu_k^{(i)}$  é o conjunto fuzzy sobre o domínio da variável de entrada  $u_i$  e  $f_k^{(j)} : U \rightarrow Y_j$  é uma função sobre as variáveis de entrada para determinar o valor da variável de saída  $y_i$ . Com  $u \in U$ ,  $SF_{\mathfrak{R}}(u)$  é dado por

$$SF_{\mathfrak{R}}(u) = y = (y_1, \dots, y_m), \quad (17)$$

com

$$y_i = \frac{\sum_{r \in \mathfrak{R}} \prod_{i=1}^n \mu_r^{(i)}(u_i) \cdot f_r^{(j)}(u)}{\sum_{r \in \mathfrak{R}} \prod_{i=1}^n \mu_r^{(i)}(x_i)}. \quad (18)$$

As funções  $f_r^{(j)}$  usadas nos conseqüentes das regras de um sistema fuzzy tipo Sugeno são modelos locais. A  $f_r^{(j)}(u)$  define a contribuição de  $r$  ao valor total da saída de  $SF_{\mathfrak{R}}(u)$  se  $u$  é de um ambiente fuzzy descrito pelo antecedente de  $r$ . Geralmente, os modelos lineares são usados (KECMAN, 2001):

$$f_r^{(j)}(u) = \left( a_0^{(j,r)} + \sum_{i=1}^n a_i^{(j,r)} x_i \right). \quad (19)$$

A avaliação da base de regras fornece uma estratégia de interpolação em um ambiente fuzzy. As entradas e as saídas são valores *crisp*. Apenas a computação interna é fuzzy.

### 2.3.6 Classificadores fuzzy

Os sistemas fuzzy podem também ser usados para problemas de classificação, que podem ser interpretados como um caso especial de função de aproximação. Em um problema de classificação *crisp* um vetor da entrada (padrão) deve ser atribuído a uma das diversas classes. Uma classe é um subconjunto do espaço padrão. Um problema de classificação fuzzy aceita que um padrão é atribuído a diversas classes com diferentes graus de pertinência.

Um classificador fuzzy é um sistema fuzzy

$$F_{\mathfrak{R}} : U \rightarrow Y, \quad (20)$$

com  $Y = [0,1]^m$ . Sua base de regra  $\mathfrak{R}$  consiste de tipos especiais de regras fuzzy da forma

$$R_k = (\mu_k^{(1)}, \dots, \mu_k^{(n)}, c_{jk}), \quad (21)$$

onde  $c_{jk} \in C = \{c_1, \dots, c_m\}$  é uma classe. Define-se:

$$F_{\mathfrak{R}}(u) = y = (y_1, \dots, y_m), \quad (22)$$

com

$$u_i = \bigoplus_{\substack{R_k \in \mathfrak{R} \\ \text{con}(R_k) = c_j}} \{\tau_k\} \quad (23)$$

onde  $\bigoplus$  é uma t-conorma e  $\text{con}(R_k)$  é o consequente da regra  $R_k$ .

A saída de um classificador denota o grau de pertinência de um padrão processado para uma classe disponível. Em muitas aplicações, um padrão deve ser atribuído para apenas uma única classe. Neste caso, o vetor de saída de um classificador fuzzy deve ser interpretado (ou defuzificado). Geralmente, a classe com o maior grau de pertinência é selecionada (KECMAN, 2001).

### 2.3.7 Sistemas fuzzy

Os sistemas fuzzy são modelos de mapeamento, geralmente não lineares, representados lingüisticamente. O elaborador de um sistema fuzzy especifica pontos característicos de uma suposta função de contorno. Esta função é desconhecida exceto por aqueles pontos característicos. Os conjuntos fuzzy, que são usados para descrever lingüisticamente aqueles pontos, expressam o grau de indistinguibilidade dos pontos. Os sistemas fuzzy podem ser interpretados baseados em relações de igualdade (KRUSE *et al.*, 1994, KLAWONN *et al.*, 1995).

As vantagens da aplicação de um sistema fuzzy são a simplicidade e a interpretação lingüística dos dados. Isto permite um desenvolvimento de soluções, e conseqüentemente sua manutenção, rápido e barato, possibilitando resolver problemas em áreas de aplicação onde a análise formal rigorosa seria cara e exigiria grande tempo.

Os sistemas fuzzy também têm a capacidade de comprimir a informação. O usuário pode decidir que áreas do domínio são menos importantes para resolver o problema considerado e estas podem ser tratadas com uma granularidade inferior, enquanto que as áreas

importantes são processadas com boa granularidade. A aproximação local de sistemas fuzzy também nos permite ignorar completamente áreas do domínio, onde nenhum dado seja relevante para o problema.

Um sistema fuzzy que é construído apenas pela aquisição de conhecimento, geralmente não executará como requerido quando for aplicado. Um processo de ajuste manual deve, geralmente, ser adicionado ao estágio do projeto. Isto se deve ao fato do perito poder estar errado sobre a posição dos pontos característicos, o número das regras ou o grau de indistinguibilidade em determinadas áreas do espaço dos dados. Os resultados do processo de ajuste resultam na modificação das funções de pertinência e/ou base de regras do sistema fuzzy.

## 2.4 Krigagem

O método da krigagem, também conhecido como processo gaussiano de regressão, é uma técnica de interpolação que faz uma estimativa de variáveis regionalizadas, a partir de uma análise variográfica. Segundo a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA) é uma técnica de interpolação adequada para dados de radiação (IAEA, 2003).

Uma variável regionalizada é qualquer função numérica com uma distribuição espacial que varia de um lugar para outro com continuidade aparente, mas cuja variação não pode ser representada por uma função determinística. Em geologia, todas as observações quantitativas feitas em duas ou três dimensões, sejam elas químicas, geofísicas, sedimentológicas, dentre outras podem ser consideradas exemplos de variáveis regionalizadas (YAMAMOTO, 2001).

Esta variação com continuidade aparente é tomada pela decomposição desta variável em três componentes: direção, dependência espacial e componente ruído. As últimas duas componentes são modeladas pela semivariância calculada dos dados para intervalos de distâncias diferentes. A semivariância  $\gamma$  é a medida da correlação de uma variável com ela mesma como função da distância de retardo. Suponha que no local  $j$ , onde cada  $j$  representa um par de coordenadas  $(x(j), y(j))$ , e  $z(j)$  é o valor obtido para um atributo do solo e, para o local  $j + h$ ,  $z(j + h)$  é o valor obtido para o mesmo atributo. Se houver  $N$  pares de observações separadas pela distância  $h$ , tem-se, então, a equação do semivariograma, dada por:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N_h} \sum_{j=1}^{N_h} [z(j+h) - z(j)]^2 \quad (24)$$

em que  $h$  é o passo básico e  $N_h$  o número de pares de pontos separados pela distância  $h$ , o qual deve ser um número grande o suficiente para fornecer um resultado consistente.

Rossi et al. (1994 apud MANZIONE, 2002) distinguiram a krigagem dos outros métodos tradicionais de interpolação, como o método do inverso da distância, triangulação e média das amostras locais, através de três características. Primeiro, a krigagem pode fornecer uma estimativa que é maior ou menor do que os valores da amostra, sendo que as técnicas tradicionais estão restritas a faixa de variação das amostras. Isso se deve ao peso atribuído pela krigagem às amostras, descrito em Wackernagel (1995 apud MANZIONE, 2002) como “screen effect”. Enquanto os métodos tradicionais usam distâncias Euclidianas para avaliar as amostras, a krigagem tem vantagem por usar distância e geometria (relação de anisotropia) entre as amostras. Por último, diferente dos métodos tradicionais, a krigagem leva em conta a minimização da variância do erro esperado, por meio de um modelo empírico da continuidade espacial existente ou grau de dependência espacial com a distância ou direção, isto é, através do semivariograma, covariograma ou correlograma.

Geralmente, o semivariograma é uma função monótona crescente, alcançando um valor-limite, obtido para um valor de  $h$  conhecido como alcance. As observações correspondentes a distâncias maiores que esse alcance possuem correlação nula. Dessa forma, a dependência espacial diminui à medida que a distância  $h$  aumenta e se anula a uma certa distância, após o alcance (BRESSAN et al., 2006).

Os diferentes tipos de krigagem são técnicas de regressão que diferem apenas nos tipos particulares de funções obtidas a partir dos dados, que estão sendo recombinaadas para a obtenção da estimativa, como pode ser visto na equação a seguir

$$A^{-1} \cdot b = \lambda \quad (25)$$

onde:

$A^{-1}$  é a matriz inversa de semivariância entre os pontos de coleta, determinada pelo modelo de semivariograma com base nas distâncias euclidianas entre pontos;

$b$  é a matriz de semivariância entre pontos vizinhos e a variável estimada e o ponto para o qual a variável será interpolada, também determinado pelo modelo de semivariograma (Eq. 24);

$\lambda$  é a matriz de pesos da krigagem.

A variável interpolada é obtida de:

$$x_p = \sum_{i=1}^n \lambda_i x_i \quad (26)$$

$\lambda_i$  é o peso da  $i$ -ésima localidade vizinha;

$x_i$  é o valor da variável para a  $i$ -ésima localidade;

$n$  é o número de localidades vizinhas empregadas para a interpolação de um ponto.

## 2.5 Mapas temáticos

Os mapas são representações geográficas que pode ser classificadas de acordo com a finalidade para a qual foram construídos. Os mapas de propósito gerais são aqueles que são aplicados em diversas situações, nas quais a principal informação adquirida no mapa é a localização geográfica, um exemplo deste tipo de mapa, é o mapa temático. Portanto, estes mapas são construídos para a representação da localização de uma variedade de diferentes feições (UFPR, 2009).

Os mapas temáticos desempenham uma função importante nos processos de tomada de decisão em diversos tipos de aplicações. Segundo a Associação Cartográfica Internacional (ICA) define-se mapa temático como “um mapa projetado para revelar feições ou conceitos particulares, no uso convencional esse termo exclui as cartas topográficas”. O propósito dos mapas temáticos é mostrar as características estruturais de alguma distribuição geográfica particular (DENT, 1999 apud UFPR, 2009).

Segundo Speranza (2008), mapas temáticos são mapas que contém regiões geográficas definidas por um ou mais polígonos, como o de uso do solo e aptidão agrícola de uma região. A criação de mapas temáticos para visualização de dados depende da disponibilidade de medidores (sensores) e/ou dados pré-existentes pontualmente distribuídos no campo em que se deseja representar. Conforme observado na seção anterior, outro fator importante são as técnicas de interpolação utilizadas, que tem a finalidade de gerar dados intermediários entre os pontos de coleta e aproximando aos dados reais. Nesses pontos, as coordenadas geográficas são determinadas utilizando um GPS sendo uma das principais características dos sistemas de informação geográficas (SIG) que é uma das ferramentas mais utilizadas em sistema de tomada de decisões (ANEXO A).

O erro na medição das coordenadas dos pontos de controle com GPS é uma das preocupações do usuário de SIG. Outro ponto importante é a incerteza na atribuição de valores ou classes aos objetos que compõem a base de dados. A exatidão de atributos

questiona a correção com que os atributos são associados aos objetos. No caso de variáveis representadas por campos numéricos, como o relevo, o erro é expresso por um valor numérico. Pode-se dizer que a altitude de um ponto tem um erro de 10 m. Já para variáveis representadas por campos temáticos, como o solo, o erro reduz-se a certo ou errado, ou seja, de forma booleana.

A combinação de variáveis visuais adequadas à representação formará diferentes tipos de mapas temáticos, onde podemos exemplificar os mapas zonais, ou coropléticos. Estes mapas são aqueles onde um valor numérico médio sobre algum aspecto de uma área é apresentado numa escala de cores ou padrões gráficos (Figura 13).

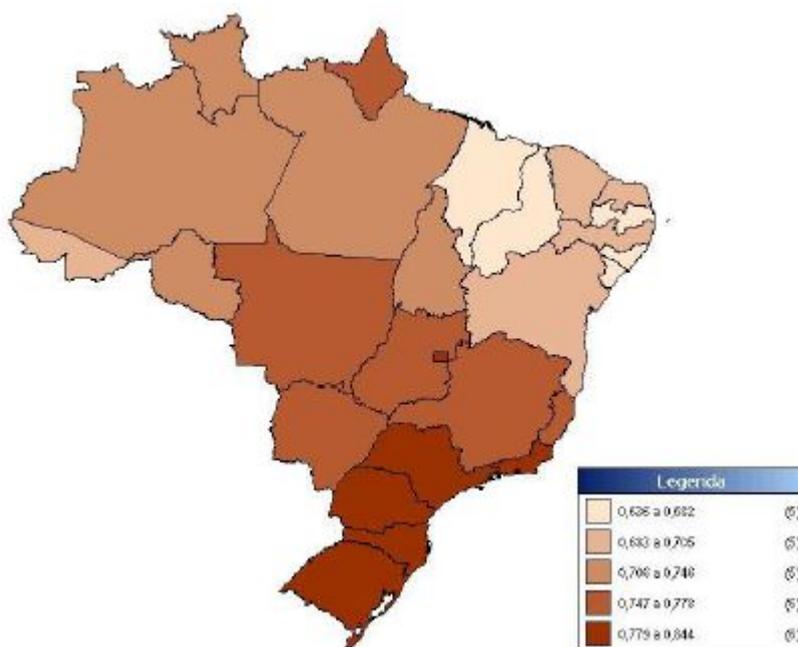


Figura 13 – Exemplo de mapa coroplético do índice de desenvolvimento humano de todos os estados brasileiros em 2000. (Fonte: FJP, 2003).

Os mapas coropléticos são elaborados com dados quantitativos; apresentam a legenda ordenada em classes conforme as regras próprias de utilização da variável visual valor por meio de tonalidades de cores ou uma seqüência ordenada de cores que aumentam de intensidade conforme a seqüência de valores apresentados pelas classes estabelecidas; estes são representados no mapa em implantação zonal (ARCHELA; ARCHELA, 2006)

Estes mapas são os mais utilizados para representar distribuições espaciais de dados que tomando como referências áreas, são indicados para expor a distribuição das densidades demográficas, de rendimentos (exemplo: toneladas de um material por hectare), ou de índices expressos em porcentagens os quais refletem a variação da densidade de um fenômeno

(exemplo: consumo de energia e/ou taxa de natalidade) ou ainda outros valores que sejam relacionados a mais de um elemento. Porém, os limites nesses mapas dificilmente são precisos e limitá-los por linhas muitas vezes não corresponde à situação na qual se quer representar. Por este motivo, talvez um gráfico elegante e localizações exatas não seja uma boa representação do tema estudado. Desta forma, é importante aceitar que limites precisos raramente ocorrem e com isso minimizar os problemas de erros topológicos associados como superposição e interseção de mapas (BURROUGH, 1986).

### 2.5.1. Mapas booleanos versus mapas fuzzy

Na seção anterior, o texto cita alguns aspectos observáveis normalmente utilizados nas fronteiras existentes em mapas temáticos, tais como quebra de encostas, mudança de cores e padrão de textura. Essas fronteiras são definidas por linhas e polígonos que são uma limitação na representação espacial da integração de dados em uma modelagem desenvolvida em SIG. Essa limitação cartográfica, embora simples e eficiente, suprime a informação da natureza da mudança espacial. O intérprete do mapa tem uma idéia dicotômica ou abrupta das fronteiras.

Em mapas bidimensionais delimitados cartograficamente por polígonos, alguns problemas ambientais podem não ser modelados realisticamente devido a passagens abruptas entre os parâmetros representados. Por exemplo, na representação de fenômenos naturais como a distribuição de radionuclídeos, nem sempre é possível obter resultados satisfatórios se utilizada a forma booleana de representação, pois os radionuclídeos estão distribuídos não uniformemente na crosta terrestre existindo variações em suas bordas ou limites. Segundo Lagacherie et al. (1996), as variações nessas bordas são mais representativas do que no interior do polígono de representação. A extração dessas variações pode ser realizada a partir de observações na paisagem, por exemplo, margens de rios e modificações na geologia associadas com variações abruptas de relevo (BURROUGH, 1986). Além dessas situações de exceção, as bordas nos mapas estão associadas a dúvidas, inerentes ao objeto ou fenômeno identificado, e as incertezas causadas por limitações de observações (HADZILACOS, 1996).

Segundo a modelagem booleana (abruptas) e fuzzy (graduais) as incertezas nos valores dos atributos dos mapas causam erros nos resultados das inferências espaciais efetuadas. Os métodos booleanos estão muito mais sujeitos à propagação de erros do que os equivalentes fuzzy e a utilização da técnica fuzzy pode reduzir drasticamente a propagação de erros por meio de modelos lógicos, fornecendo cenários mais confiáveis (BURROUGH; HEUVELINK, 1992).

As classes booleanas utilizadas em modelagem lógica desenvolvida em SIG's podem gerar resultados insatisfatórios porque muitos problemas ambientais não podem ser modelados realisticamente com regras rígidas. A classificação por funções de pertinência fuzzy pode fornecer então uma solução para esse problema, pois relaxa os valores dos membros das classes, permitindo definir funções de membros flexíveis que casem com experiências práticas. Um exemplo disto é o artigo escrito por Mas (2004), no qual foi criado um procedimento para mapear o uso do solo que combina a informação espectral de imagens recentes e de dados sobre a distribuição espacial dos tipos de uso do solo obtidos de cartografia e dados subordinados. Este procedimento permitiu um crescimento estatisticamente significativo da exatidão de classificação de uso de solo (de 67% a 79%).

Na avaliação multicritério realizada por Liotte et al (2006) para determinação de novas áreas para o desenvolvimento urbano, utilizaram-se duas formas de análises: booleana e fuzzy. Estas foram comparadas e foi discutido o tipo de resposta dada por cada uma delas. Na análise booleana (Figura 14), apenas ocorre a sobreposição destes fatores resultando em resposta rígida de sim ou não, ou seja, determinada área é apta (valor atribuído = 1) para o desenvolvimento urbano e determinada área é inapta (valor atribuído = 0) para tal desenvolvimento. Já ao utilizar-se a técnica de análise fuzzy cada fator pode ser descrito por uma função específica que melhor o descreva e, além disso, as combinações entre eles permitem uma variabilidade entre as classes onde não são apenas decisões rígidas de sim ou não, mas uma variabilidade entre as classes de aptidão de favorabilidade ao desenvolvimento. A obtenção deste mapa foi resultante basicamente pela atribuição de pesos a cada fator, indicando a importância relativa de cada fator em relação aos demais, como pode ser visto na Figura 15.

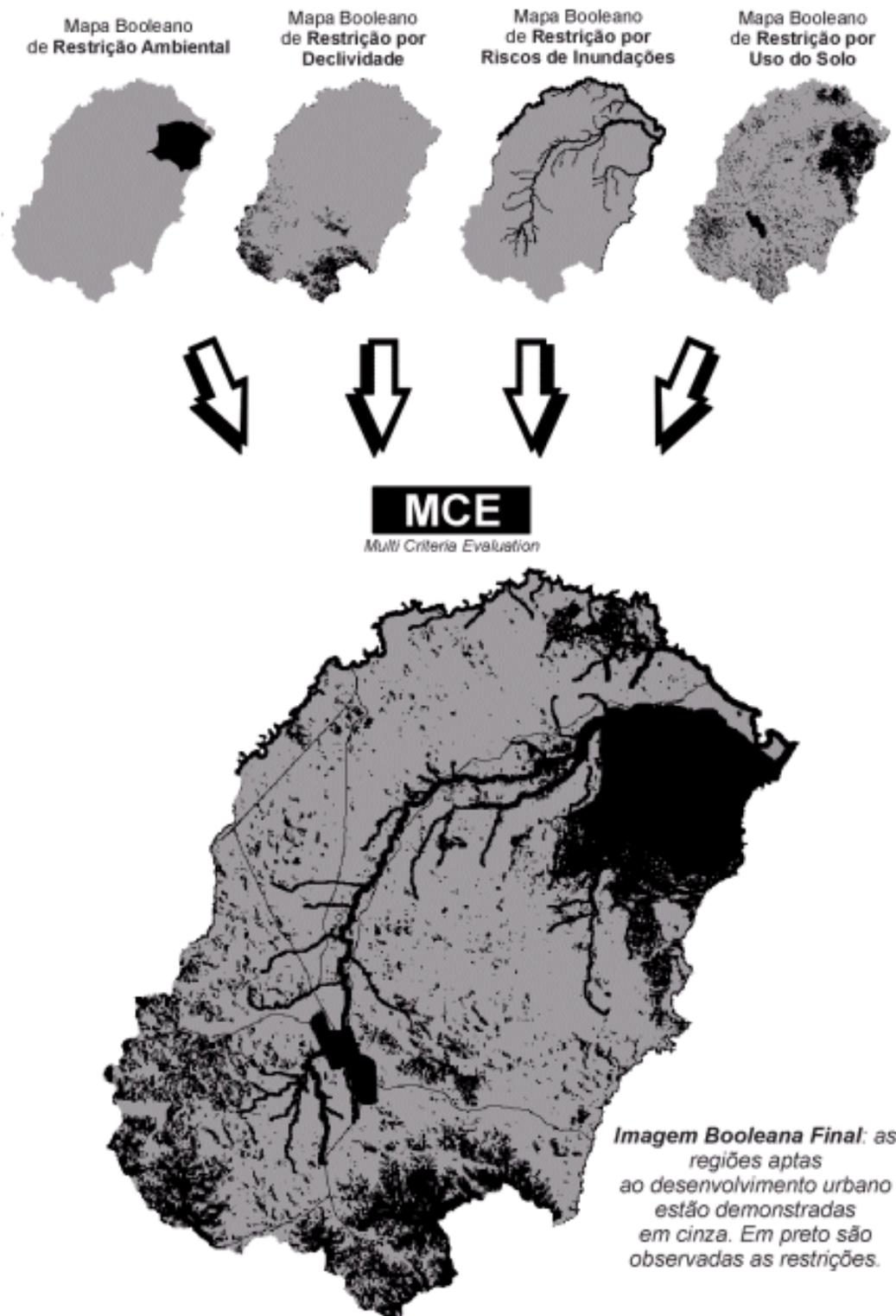


Figura 14 – Mapa booleano de aptidão (1) e inaptidão (0) ao desenvolvimento urbano (Fonte: LIOTTE et al., 2006).

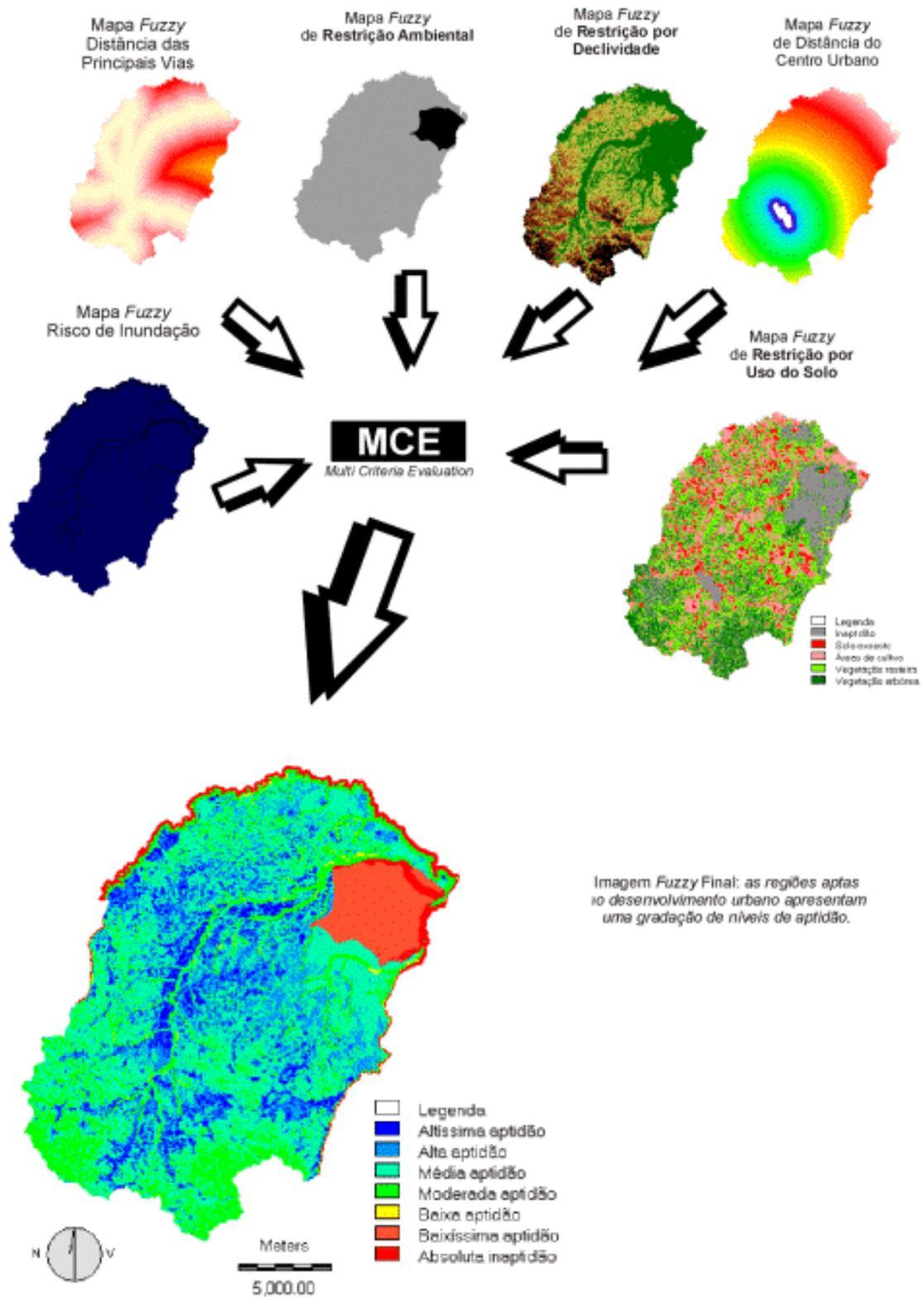


Figura 15 – Mapa fuzzy classificado numa escala contínua que varia de 0 a 1 ao desenvolvimento urbano (Fonte: LIOTTE et al., 2006).

## 2.5.2 Processamento de imagens fuzzy

Existem vários fatores importantes no processamento de imagens fuzzy, tais como:

- As técnicas fuzzy são ferramentas poderosas para representação e processamento do conhecimento.
- As técnicas fuzzy podem gerenciar eficientemente a imprecisão e ambigüidade.
- Em muitas aplicações de processamento de imagem, é necessário usar o conhecimento de especialistas para superar as dificuldades (por exemplo, reconhecimento de objeto).

A representação e processamento dependem da técnica fuzzy escolhida e do problema a ser resolvido. Esse processamento (Figura 16) tem três estágios principais: fuzzyficação da imagem, modificação dos valores das funções de pertinência, e, se necessário, defuzzyficação da imagem (SIVANANDAM et al., 2007).

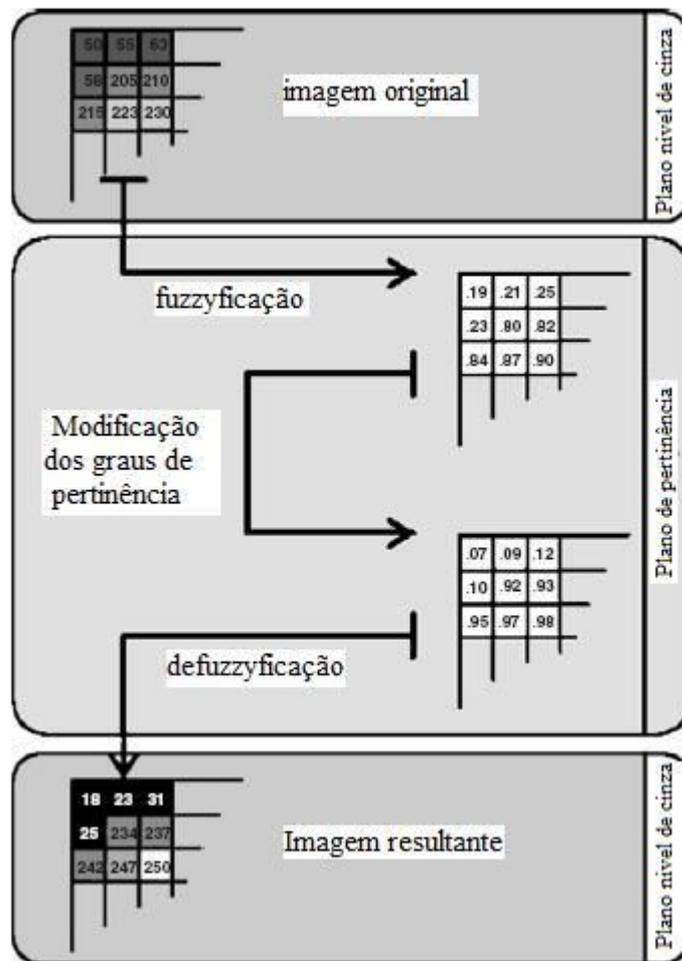


Figura 16 – Passos do processamento de imagem fuzzy (Fonte: SIVANANDAM, 2007)

Na Figura 16, o primeiro estágio os dados são convertidos de planos de nível de cinza para planos de pertinência (fuzzyficação). A fuzzyficação de imagens se dá a partir dos valores de seus pixels que passam de uma faixa de [0, 255] para o intervalo de [0, 1]. No estágio principal e intermediário, que é a modificação dos valores de pertinência, técnicas fuzzy adequadas são utilizadas tais como “clustering” fuzzy e aproximações baseadas em regras fuzzy. A atribuição de valores ou funções de pertinência à variáveis fuzzy é realizada com base no conhecimento de especialistas e na compreensão do desenvolvimento destas funções de pertinência. Para isso, o completo conhecimento do problema e das variáveis lingüísticas é necessário como mencionado anteriormente (KECMAN, 2001).

Existem vários métodos para atribuir valores ou funções de pertinência a variáveis fuzzy. A atribuição pode ser apenas feita por intuição ou por algoritmos ou procedimentos lógicos. No caso da intuição, é baseada no conhecimento do especialista e compreensão para desenvolver funções de pertinência.

O último estágio, a defuzzyficação, é baseado na transformação dos resultados obtidos no estágio intermediário em valores “crisp”, passando os valores dos pixels de [0,1] para [0, 255] lembrando que esse estágio pode existir ou não dependendo da finalidade da aplicação proposta.

A utilização da lógica *fuzzy* na representação dos contornos dos polígonos possibilita a fácil incorporação da informação sobre a natureza dos contatos, bem como da incerteza associada à classificação e ao posicionamento. Burrough e Mcdonnell (1998) propõem duas técnicas distintas para a representação da informação semântica de contatos *fuzzy*, a “abordagem por unidades de mapa” (*map unit approach*) e a “abordagem por contorno individual” (*individual boundary approach*).

Moreira (2001) comenta que a abordagem por unidades de mapa possibilita uma representação única para os contatos das unidades ou polígonos. Ou seja, essa técnica assume que o polígono apresenta um único tipo de contato ao longo do seu perímetro. As informações sobre o tipo de contato podem ser convertidas nos parâmetros necessários para a definição da função de pertinência fuzzy, as quais são aplicadas sobre o plano de informação que contém a grade de distância isotropicamente distribuída ao longo dos contatos do polígono. Os pontos no interior das regiões recebem valores de pertinência entre 1 e 0,5, e aqueles do lado de fora recebem valores de pertinência menores que 0,5, conforme o distanciamento do contato. A Figura 17 mostra o resultado do contorno fuzzy entre as classes A e  $\bar{A} = \neg A$ , onde se observa a região de transição entre as cores amarela e verde ao longo da linha de contato.

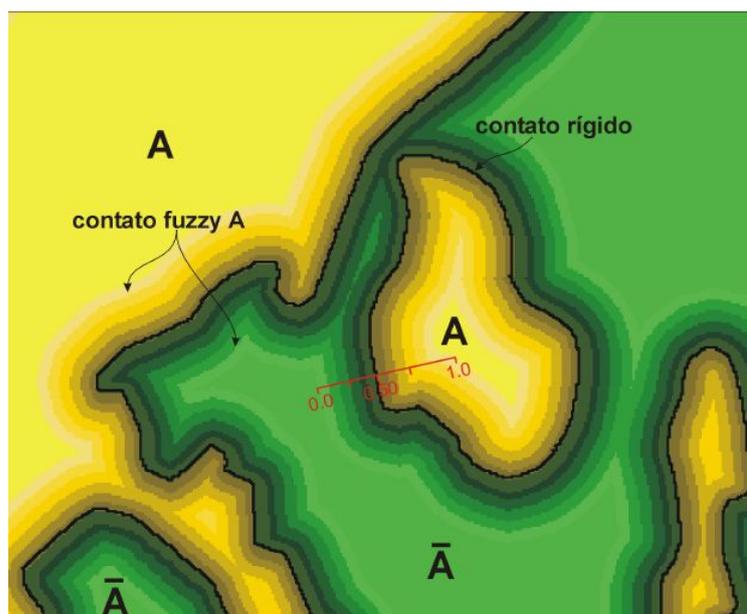


Figura 17 - Ilustração da representação de informação semântica para contatos (Fonte: MOREIRA, 2001).

A fatia amarela representa os membros totalmente contidos na classe A. As fatias menores indicam a graduação dos demais membros até a fatia maior verde que representa os membros fora da classe A ( $\bar{A}$ ), conforme ilustra a escala em vermelho (0.0 - 1.0).

### 2.5.3 Espectro de cores

O olho humano pode distinguir cores e esta capacidade de percepção de cores pode ser explorada para a apresentação de dados de espectrometria da radiação gama em mapas. Simples canais de radioelementos podem ser associadas a uma escala de cores, que possibilita a interpretação e melhor reconhecimento da distribuição regional da concentração de radioelementos. Assim os canais de radioelementos podem ser combinados em uma imagem colorida, comumente mencionada como um mapa de radioelementos ternários (IAEA, 2003).

Um espectro de cores é um modelo que facilita a especificação e visualização das cores. Os modelos de espectros de cores têm sido projetados para aplicações específicas tal como dispositivos de impressão e de exibição, ou realçar uma compreensão intuitiva das cores. Uma forma para representar a faixa de cores exibível no computador é o espectro de cores do sistema RGB. Estas cores estão contidas no cubo RGB como mostrado na Figura 18 e as cores existentes nos vértices deste cubo podem ser observadas na Tabela 8 (GONZALEZ et al., 2004).

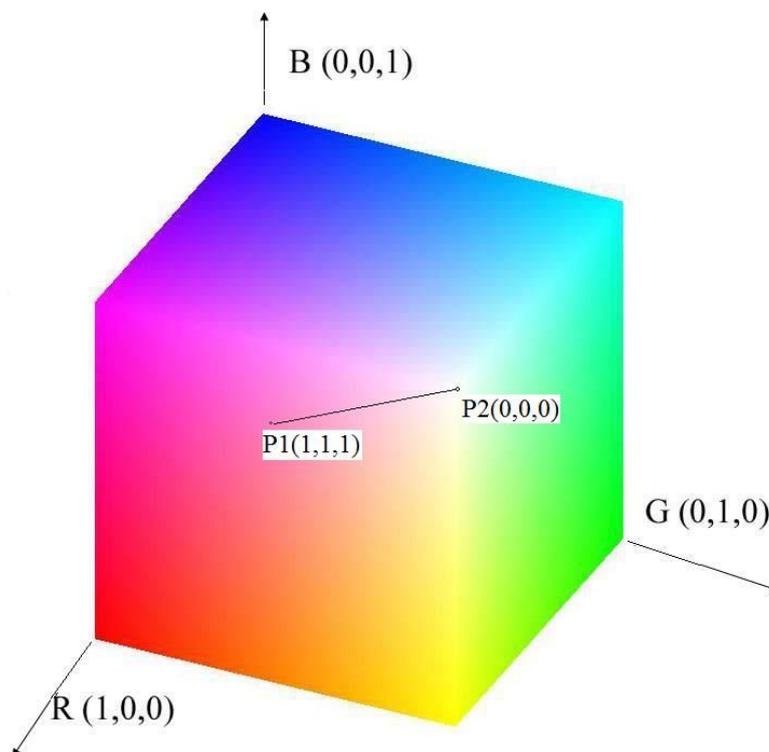


Figura 18 – Cubo de cores RGB.

Na figura 18, pode ser observado os pontos R, G e B, que são o vermelho, verde e azul, respectivamente, sendo o eixo de intensidade de cinzas representado entre os pontos P1 (preto) e P2 (branco). As cores representativas dos vértices deste cubo podem ser vistos na Tabela 8.

Tabela 8 – Cores dos vértices do cubo de cores

R	G	B	Cor
0	0	0	Preto
0	0	1	Azul
0	1	0	Verde
0	1	1	Ciano
1	0	0	Vermelho
1	0	1	Magenta
1	1	0	Amarelo
1	1	1	Branco

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Seleção da Área de Estudo

Uma área de estudo foi selecionada e delimitada devido à grande extensão das jazidas de fosfato na região do nordeste do Brasil, cuja associação com o elemento radioativo urânio é amplamente conhecida. Os critérios adotados para a seleção da área de estudo foi a presença de uma região com considerável densidade demográfica (693 hab/km<sup>2</sup>), existência de vilas, sítios e indústrias, ocorrência de recursos hídricos e de dados confiáveis e disponíveis da região. Após a análise de diversos locais, foi escolhida e delimitada uma área de aproximadamente 40 km<sup>2</sup>, cobrindo parte da cidade de Paulista, Igarassú e do município de Abreu e Lima no Estado de Pernambuco (Figura 19).

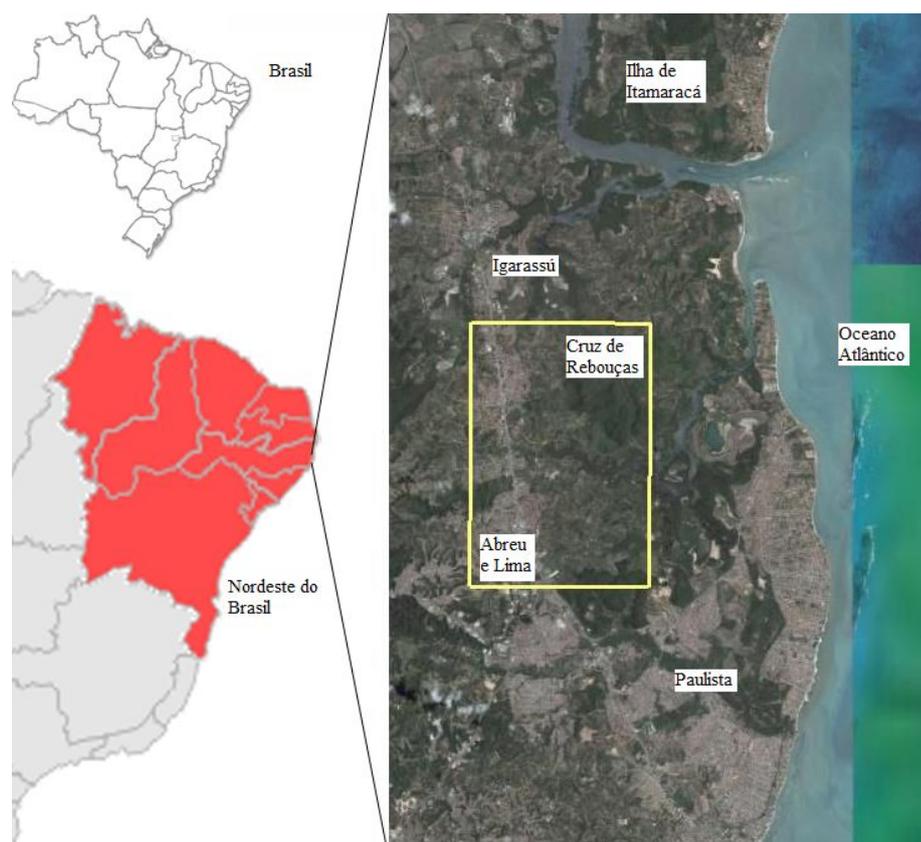


Figura 19 - Área selecionada para o estudo

Nesta área de estudo encontram-se algumas cidades, vilarejos e indústrias, que além de serem localizados sobre jazidas, seus habitantes utilizam água do subsolo para diferentes fins

e consomem os alimentos originados da região. Esta é muito rica em recursos hídricos superficiais e subterrâneos, sendo cruzados pelos rios Timbó, Queimados e Desterro, além de vários córregos. Em locais mais afastados dos centros urbanos são encontrados vários sítios e fazendas que utilizam sistemas próprios para captação de água. Muitos dos moradores praticam a cultura de subsistência, consumindo o que plantam. Nesta região reside uma população de vários níveis sociais, mas em sua maioria, de baixa renda (CONDEPE, 2000).

Vários estudos foram realizados a partir dos assuntos abordados na literatura (AMARAL, 1994; LIMA, 1996), principalmente os trabalhos já realizados na área até os mais recentes que abordam regiões semelhantes. Tomando como base este conhecimento adquirido e o conhecimento local da região foi iniciado o planejamento dos experimentos. Este planejamento determinou como seriam realizados os experimentos no campo e o desenvolvimento de ferramentas computacionais visando a avaliação da exposição dos habitantes da região. O diagrama da Figura 20 mostra o procedimento tomado para este fim.

Foi realizado um levantamento de dados em forma de questionários para obter informações dos habitantes das circunvizinhanças que pudessem contribuir na avaliação da exposição, como por exemplo: tempo de permanência em casa e nas redondezas durante o dia, que tipos de alimentos e água são consumidos. O questionário aplicado pode ser visto no APÊNDICE A. Estas informações, exemplos de nebulosidades e incertezas, serão estudadas com o objetivo de entender a influência desse tipo de dado, ou seja, incluir estas nebulosidades na estimativa de exposição à radiação recebida pela população. O tratamento destes dados difusos será realizado utilizando técnicas já bem conhecidas na lógica fuzzy (KECMAN, 2001).

Nesta região foi realizada a determinação da taxa de dose absorvida no ar devido à radiação. Para isso foi utilizado um cintilômetro da marca SAPHYMO SRAT modelo: SPP-2-NF, sem discriminador, que mede a atividade da radiação gama total. Foi tomado um total de 48 pontos de coleta na região de estudo, abrangendo as áreas de maior e menor adensamento populacional durante um período total de 30 dias.

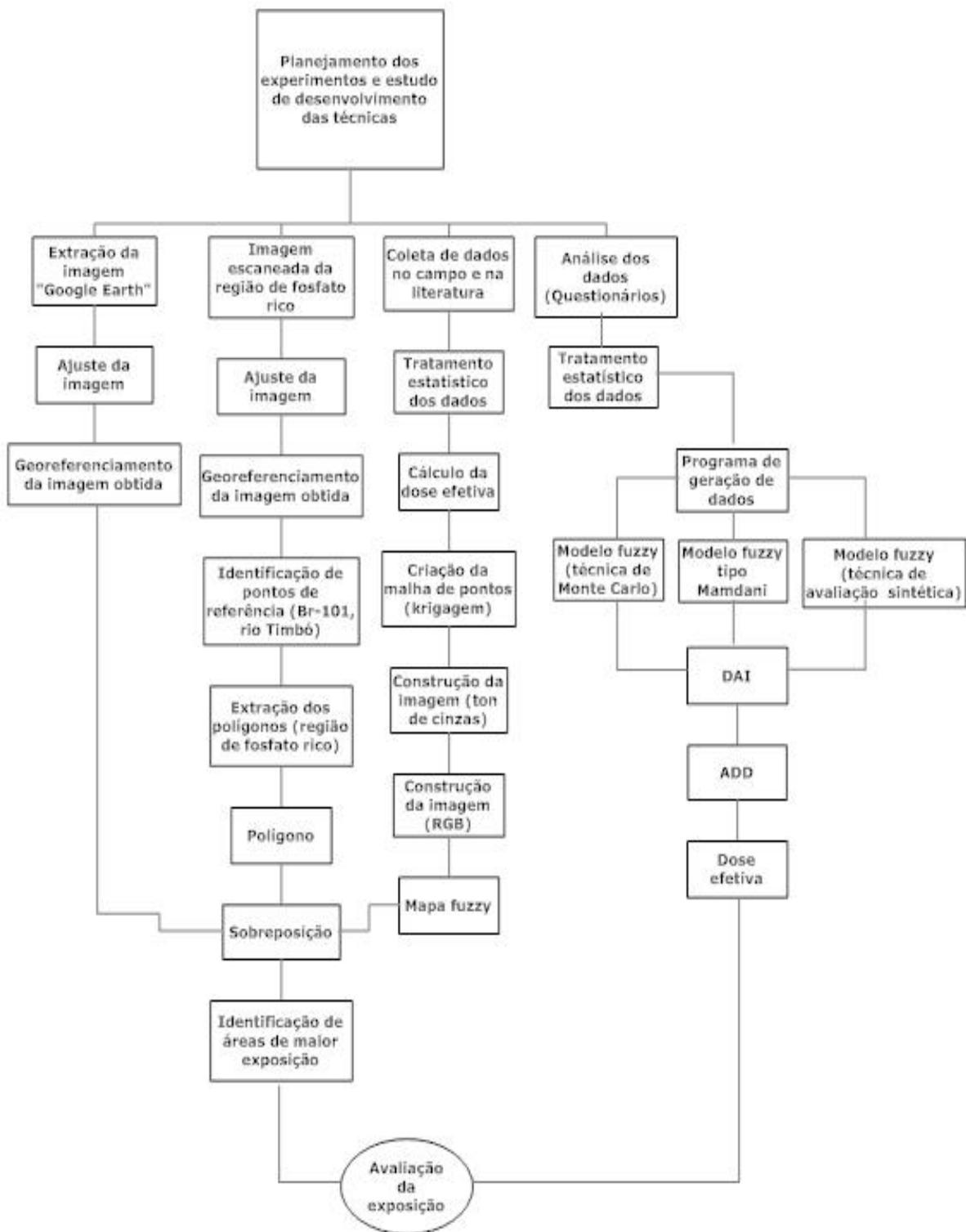


Figura 20 – Procedimento do trabalho realizado.

O número de pontos foi definido baseado em estudos anteriores (AMARAL, 1994; LIMA, 1996; AMARAL, 2005) na região e na facilidade e/ou dificuldade de acesso aos locais de coleta. Toda a aquisição dos dados de localização foi realizada em UTM/WGS84 e na representação final converte-se para UTM/SAD69; assim obteve-se uma representação em unidades de metros. Desta forma, tem-se a área escolhida situada entre os paralelos 9131371,88 mS e 9123844,20 mS e os meridianos 288917,27 mL e 294095,07mL como pode ser visto na figura 21.

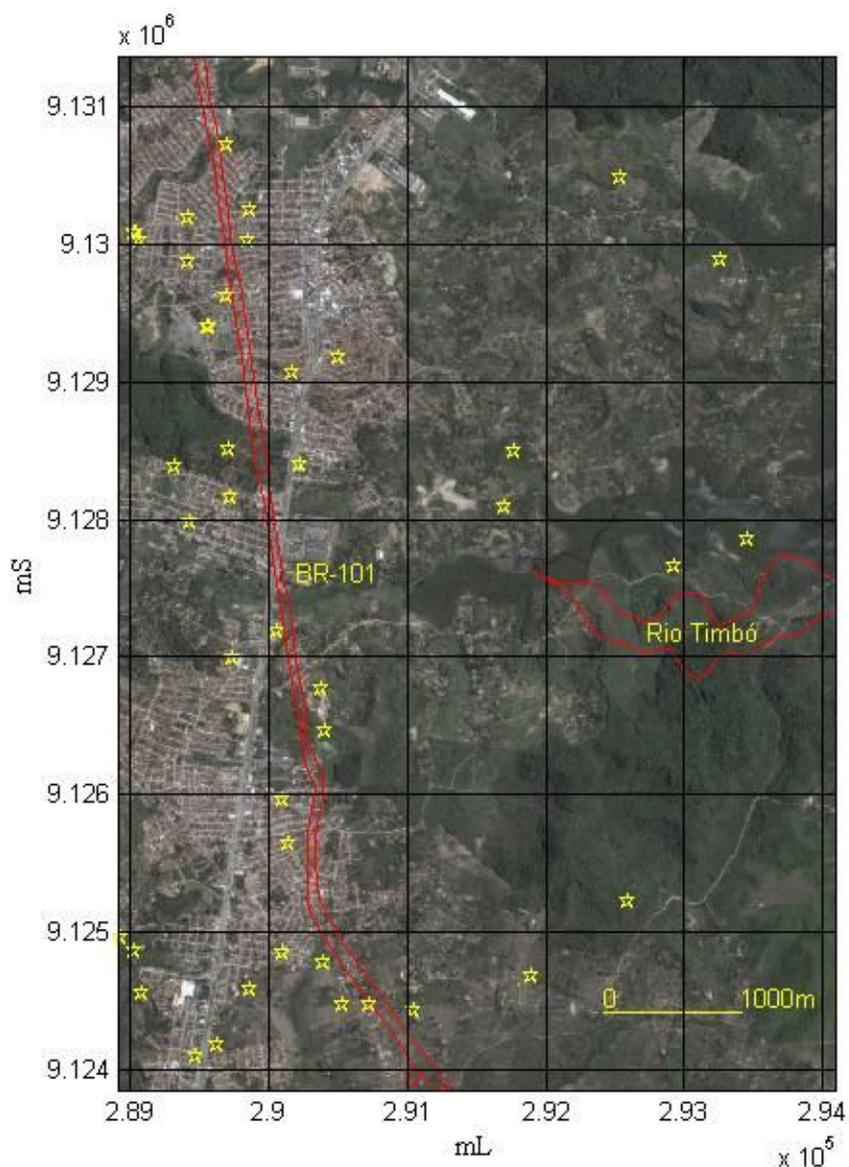


Figura 21 – Distribuição dos pontos de coleta na área de estudo.

Em cada ponto foram realizadas medidas radiométricas com um cintilômetro, medidas de localização geográfica (longitude e latitude) referenciados com um GPS em UTM/WGS84 da marca Garmin e modelo GPS 12 (software versão 4.52) e aplicação de questionários.

Foram realizadas três medidas radiométricas a 1 m do solo em cada ponto, obtendo-se um valor médio de representação, um para a área externa e outro para o interior das residências. A Figura 22 mostra a realização das medidas radiométricas em um dos pontos de coleta investigados.



Figura 22 – Realização das medidas radiométricas nos pontos de coleta.

A facilidade de acesso aos pontos de coleta investigados foi um fator importante para a distribuição espacial dos mesmos. Este fator foi muito influenciado pelos problemas sociais que dificultaram o acesso de pessoas estranhas ao local.

Uma imagem da área de estudo foi obtida através do software Google Earth (GOOGLE, 2009) e o mapa da região de fosfato comercial foi obtida na literatura (AMARAL, 1994). Esta imagem foi digitalizada utilizando um escâner, e depois, junto às demais imagens usadas foi padronizada em relação a algumas características como tamanho, qualidade da imagem e coordenadas geográficas (UTM).

As imagens foram rotacionadas para o ângulo de 90° em relação à horizontal, convertidas numa escala de cinzas (0-255 tons de cinza) e em seguida dimensionadas para 1037x705 pixels. A partir da imagem obtida, o próximo passo foi realizar o tratamento desta imagem. Um filtro não linear da mediana (5x5) foi utilizado por eliminar os ruídos e não

introduzir novos valores de cinza na imagem preservando também as bordas ou limites (GONZALEZ et al., 2004).

As imagens foram georeferenciadas no sistema WGS-84 em graus decimais (latitude/longitude), mas por uma questão de facilitar a interpretação esse sistema foi convertido no sistema UTM em unidade de metros, como foi observado na Figura 21. Os pontos de referência locais utilizados foram a localização do Rio Timbó e a BR-101, que atravessa o mapa de norte a sul. Para isso, foi construído um programa de georeferenciamento utilizando as ferramentas “mapping toolbox” do software Matlab (MATHWORKS, 2008). O Matlab foi usado para facilitar as operações entre matrizes e vetores inerentes ao processamento de imagens.

### 3.2. Construção do mapa fuzzy

Na construção da imagem da região a partir dos pixels foi criada uma malha uniforme de pontos. Devido à dificuldade de acesso a certos locais, a distância entre os pontos selecionados, usados na construção da malha, variaram de alguns metros até quilômetros dentro da região estudada, resultando uma distribuição irregular. Por isso, foi utilizada a krigagem que é uma técnica de interpolação apropriada para se obter uma representação mais próxima à realidade. Os dados obtidos das medidas radiométricas foram interpolados utilizando esta técnica através do software Surfer 8.0 (GOLDEN SOFTWARE, 1995). Desta forma, foi possível obter uma matriz com valores interpolados com a mesma dimensão do mapa da região (1037x705)..

A malha foi criada a partir das maiores medidas radiométricas (externa e interna) obtidas em cada ponto de coleta e representa a distribuição da taxa de dose absorvida no ar. Cada ponto da malha representa um pixel da imagem a ser traduzida em níveis de cinza. Os limites entre regiões foram caracterizados pela suavidade dos níveis de cinza proveniente do alcance da dependência espacial representada pela distância entre os pontos amostrais correlacionados entre si. Os pontos localizados em uma área de raio maior ao alcance são independentes, apresentando uma distribuição espacial aleatória e menos homogênea (TAKEDA, 2000 apud MANZIONE, 2002).

A partir dessa malha de pontos foi gerada a imagem e realizado o seu processamento objetivando a representação por mapa fuzzy.

Para isso, foi criado um programa para importar todas as informações obtidas na krigagem para o ambiente do software Matlab, que possibilita a realização das demais etapas. Este programa pode ser encontrado no APÊNDICE B.

A partir da distribuição da taxa de dose absorvida no ambiente do software Matlab, foi possível transformar a malha de pontos obtida em uma imagem em níveis de cinza (0-255).

As cores no canais R, G e B (red, green e blue) compõem as imagens coloridas digitais são padrões de representação de dados de espectrometria de raios gama para radionuclídeos K, Th e U, respectivamente (IAEA, 2003). O B é usado para exibir o canal de cores que representa o urânio, sendo este o mais propenso a ruídos e menos sensível a variação de intensidade do azul para o olho humano (IAEA, 2003). Desta forma, faz-se necessária a introdução de mais cores como o G e R, sendo raros os trabalhos que utilizam este formato na representação de apenas um radionuclídeo.

A criação do mapa fuzzy foi baseada no processamento da imagem fuzzy encontrado no trabalho de Sivanandam et al. (2007), onde cada pixel da imagem é representado por graus de pertinência. Então, na construção deste tipo de imagem em formato RGB foi necessário criar três matrizes a partir de três funções de pertinência propostas. Então, para cada pixel na imagem obtida, tem-se um valor correspondente em cada função de pertinência proposta, totalizando três graus de pertinência, ou seja, cada pixel é relacionado às variáveis fuzzy de alta, média e baixa exposição, facilitando a correta interpretação do mapa.

Nos estudos de representação de mapas booleanos os polígonos têm um papel importante na representação de informações no plano ao delimitar áreas de interesse. Por outro lado, as cores no mapa fuzzy contribuem como um fator preponderante para a interpretação das informações devido à não existência de áreas delimitadas. Diante disto, um estudo sobre a região de transição entre as cores R, G, B foi realizado. Esta região é de coloração cinza, como pode ser observado na Figura 23.

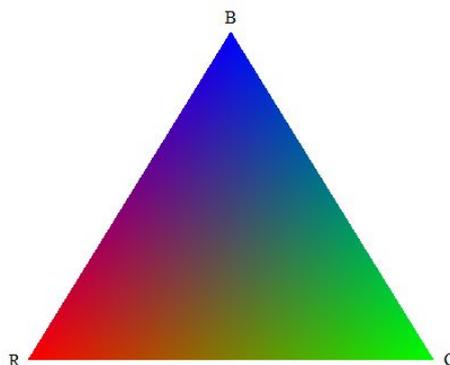


Figura 23 – O triângulo de cores RGB.

Este triângulo mostra um problema de representação que deve ser abordado. Nas regiões onde existe transição de cores existirá sempre uma região de coloração cinza e esta região pode trazer problemas no plano de informações a ser representado. Por exemplo, pode-se imaginar uma região onde se tem uma transição RED e GREEN sendo esta representada pela faixa de cinza mencionada. O analista que utilizar este mapa na sua representação terá dificuldade de analisar visualmente quando essa região estiver próxima a uma coloração azul. Devido a não terem como discernir a transição (faixa de cinza) entre BLUE e GREEN, RED e BLUE, BLUE e RED, ou seja, todas são igualmente representadas pelas faixas de cinzas, criando a possibilidade de erros de interpretação.

No estudo de representação das cores, as funções de pertinência têm grande importância numa imagem fuzzy e suas formas dependerão do tipo de aplicação envolvida (KASABOV, 1998; KECCMAN, 2001).

Algumas formas de funções de pertinência são bem conhecidas como a curva gaussiana, e outras como a “s” e “z” que são funções splines (spline-based function) de  $x$ , conhecidas por terem formas de “s” e “z”, respectivamente. Estas funções podem ser representadas pelas equações 27 e 28.

$$s(x; a, b) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ 2\left(\frac{a-x}{a-b}\right)^2, & a \leq x \leq \frac{a+b}{2} \\ 1-2\left(\frac{x-b}{a-b}\right)^2, & \frac{a+b}{2} \leq x \leq b \\ 1, & x \geq b \end{cases} \quad (27)$$

$$z(x; a, b) = \begin{cases} 1, & x \leq a \\ 1-2\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2, & a \leq x \leq \frac{a+b}{2} \\ 2\left(\frac{b-x}{b-a}\right)^2, & \frac{a+b}{2} \leq x \leq b \\ 0, & x \geq b \end{cases} \quad (28)$$

Os parâmetros  $a$  e  $b$  identificam os extremos da inclinação da curva. A função de pertinência tipo gaussiana é uma função gaussiana simétrica que depende dos parâmetros  $\sigma$  e  $d$  como pode ser observada na equação 29.

$$g(x; \sigma, d) = e^{-\frac{(x-d)^2}{2\sigma^2}} \quad (29)$$

As funções de pertinência no formato de “s”, “z” e a curva gaussiana foram utilizadas neste trabalho. A escolha dessas funções foi baseada na representação de outros trabalhos realizados que utilizaram funções semelhantes em outras aplicações análogas referentes ao processamento de imagens (YEN; LANGARI, 1999; IAEA, 2003). Vale a pena salientar que trabalhos abordando a representação de mapas fuzzy são raros na literatura.

Neste estudo, foram realizados cinco testes variando os parâmetros de cada tipo de função de pertinência da imagem, com o objetivo de minimizar a área de transição entre cores (região cinza) baseando-se em conceitos fuzzy e no fenômeno estudado. Os valores dos parâmetros para os testes iniciais foram baseados no conhecimento de especialistas e na literatura.

No teste 1, o RED (R) foi representado pela função “s” com os parâmetros [0,7 0,8], GREEN(G) foi representado pela função gaussiana com os parâmetros [0,08 0,5] e BLUE(B) pela função “z” com parâmetros [0,2 0,3]. A imagem resultante pode ser vista na Figura 24.

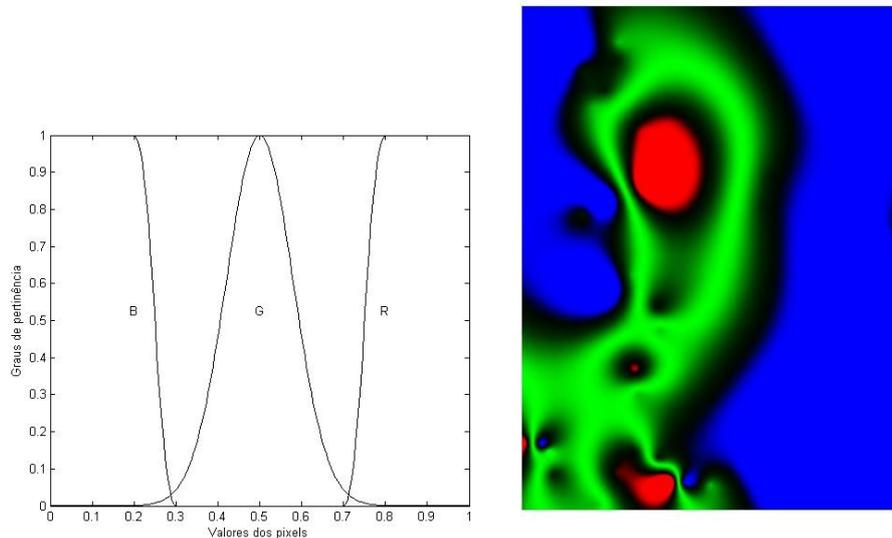


Figura 24 – Imagem resultante do teste 1.

Na Figura 24, pode ser observado que existe uma região de transição significativa entre as três cores.

Na realização do teste 2, o R foi representado pela funções “s” de parâmetros [0,7 0,8], G pela função gaussiana de parâmetros [0,1 0,5] e B pela função “z” de parâmetros [0,2 0,3]. A imagem resultante pode ser observada na Figura 25.

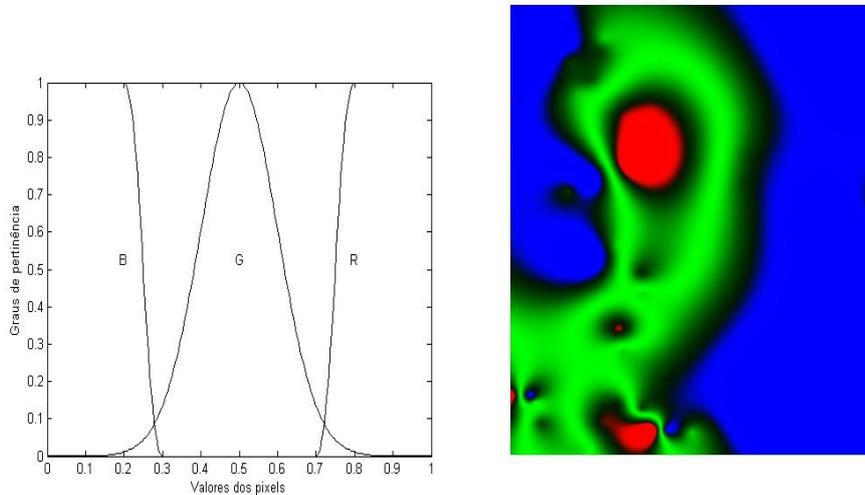


Figura 25 – Imagem resultante do teste 2.

Na Figura 25, pode ser observado uma leve diminuição na região de transição entre as três cores, isso devido ao aumento da região de interseção entre as funções de pertinência.

No teste 3, o R, G e B foi representado pelas mesmas funções de pertinência e os parâmetros foram [0,6 0,8], [0,1 0,5] e [0,2 0,4], respectivamente. A imagem resultante pode ser vista na Figura 26.

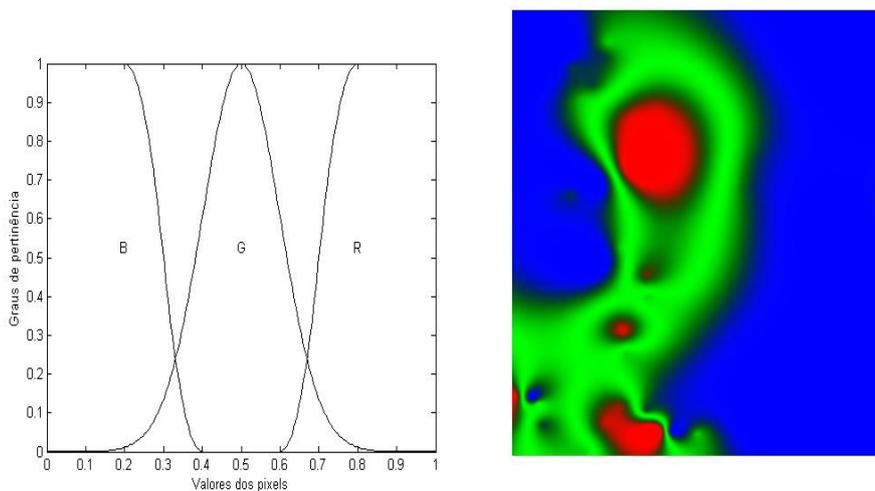


Figura 26 – Imagem resultante do teste 3.

Na Figura 26, a área de transição começa a desaparecer na imagem devido ao distanciamento das funções de pertinência que diminui as áreas de interseção e desta forma, os pixels admitem uma faixa de valores diferentes que resulta na faixa de cinza observada.

Os resultados dos testes 4 e 5, (Figuras 27 e 28) demonstram a mesma tendência observada no teste 3. Esta tendência de comportamento mostra que com a diminuição da distância entre as funções de pertinência existe uma diminuição da faixa de cinza.

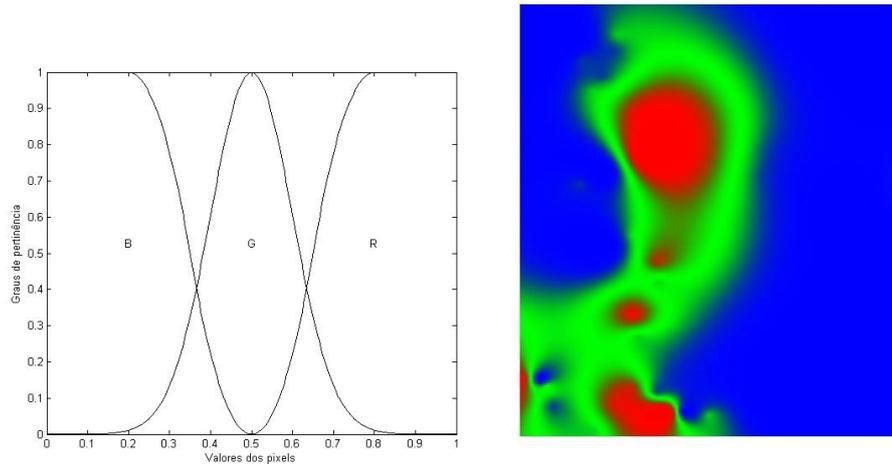


Figura 27 – Imagem resultante do teste 4 utilizando para funções de pertinência “s”, gaussiana, “z” com parâmetros [0,5 0,8], [0,1 0,5] e [0,2 0,5], respectivamente.

Na Figura 27, pode ser observada a crescente diminuição das regiões de transição entre as três cores, praticamente eliminando a faixa de cinza.

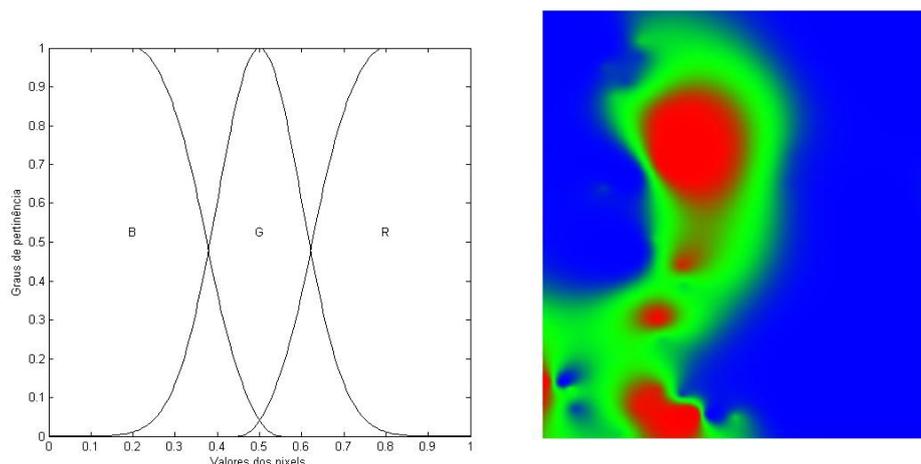


Figura 28 – Imagem resultante do teste 5 utilizando para funções de pertinência “s”, gaussiana, “z” com parâmetros [0,45 0,8], [0,1 0,5] e [0,2 0,55], respectivamente.

As figuras 24, 25 e 26 mostram um comportamento semelhante em relação à faixa de cinza. Ou seja, com a variação dos parâmetros no sentido de aumentar o suporte (valores diferentes de zero) das funções de pertinência R e B observou-se uma diminuição da região de cinzas. Como já mencionado anteriormente, esta forma de transição entre cores não é desejada. Devido a isto, as imagens correspondentes aos testes 4 e 5 tiveram um melhor resultado, predominando apenas as transições suaves entre cores, sem a região de cinza indesejada.

As imagens dos testes 4 e 5 seriam os melhores resultados do ponto de vista de visualização, contudo as funções de pertinência do teste 5 referentes a R e B se cruzam no grau de pertinência 0.5 como pode ser observado na Figura 28. Isso significa que teríamos uma região representada por duas cores (R e B) que representaram variáveis distintas como “alta exposição” e “baixa exposição” que não é o desejável, devido a não existir duas áreas com variáveis tão diferentes. Portanto, pode-se deduzir que as funções de pertinência e os parâmetros que melhor representam a aplicação proposta são os correspondentes ao teste 4.

### 3.3 Modelagem

O peso corporal, a taxa de consumo, a idade e a duração da exposição foram parâmetros considerados importantes para o caso estudado. Portanto, foi necessária a aplicação de um questionário a um grupo selecionado de 104 famílias relativo às informações necessárias aos parâmetros de entrada do modelo. Outros fatores importantes também utilizados foram a concentração de urânio em alimentos e a fração da dieta. Os dados de concentração da atividade de urânio foram obtidos a partir das concentrações de feijão cultivado na região (AMARAL, 1994; AMARAL et al., 2005). A fração de dieta indica a quantidade de contaminante transferida pelo alimento consumido aos seres humanos. Na falta desta fração, valores de Rajkumar e Guesgen (1996) foram adotados neste trabalho. Em uma tentativa de testar a metodologia para dois grupos distintos da população, os habitantes foram divididos em dois grupos de acordo com o sexo. Com isso, procura-se definir a ingestão diária média de cada grupo e calcular suas respectivas doses anuais. Na análise desses resultados, verificar se existe diferença significativa entre a dose recebida pelos homens e mulheres da região em relação aos fatores estudados. Para isso, foram construídos dois modelos fuzzy baseados nos artigos de Rajkumar e Guesgen (1996), Wood et al. (1997) e WHO (2006), objetivando propor uma nova metodologia para a avaliação de exposição devido à ingestão de urânio. Primeiro, um modelo fuzzy tipo Mamdani foi desenvolvido baseado em uma base de

regra e um segundo modelo utilizando a técnica avaliação sintética fuzzy desenvolvida por Sadiq et al.(2004).

Para cada parâmetro de entrada, uma distribuição de frequência foi gerada a partir de dados coletados em questionários e foi proposta uma distribuição de probabilidade que melhor se ajustava a estes dados. Um conjunto de 1000 valores foi gerado para cada parâmetro de entrada simulando os grupos estudados. Estes valores foram baseados em parâmetros estatísticos (média, desvio e faixa dos valores) e expressões lingüísticas obtidas nos questionários de campo e encontradas na literatura.

O teste de hipótese de Kolmogorov-Smirnov com significância de 0,05 foi utilizado para verificar a consistência da distribuição proposta à distribuição dos dados coletados. Portanto, a simulação da distribuição estatística de grupos de habitantes nesta região tornou-se mais próxima à realidade. Os resultados dos testes finais são mostrados na Tabela 9.

Tabela 9 – As variáveis de entrada e as faixas de valores usados na construção do modelo fuzzy.

Parâmetros	Média		Faixa		Dist. de probabilidade
	Homem	Mulher	Homem	Mulher	
Peso corporal (kg)	71	65	52-92	23-120	Uniforme
Taxa de consumo (g/d)	32	32	0,7-508	0,7-508	Lognormal
Duração da exposição (d)	14741	13919	5840-31390	6205-31755	Lognormal
Fração da dieta	0,2	0,2	0,1-0,7	0,1-0,7	Lognormal
Concentração da atividade (mBq/kg)	42	42	4-417	4-417	Lognormal
Idade (a)	62	65	59-65	62-67	Uniforme

Os dados da Tabela 9 são os dados de entrada para os modelos usados neste trabalho, tomando a forma polar da transformação de Box-Muller para a simulação da distribuição probabilística (RUBINSTEIN, 1981). Este método de Monte Carlo é uma generalização de pares de números randômicos distribuídos normalmente, dada uma fonte de números aleatórios uniformemente distribuídos.

Uma análise estatística foi realizada pelo método de Monte Carlo para obter valores de referência para o DAI (ingestão média diária) pela comparação com os modelos fuzzy

propostos neste trabalho. O DAI foi calculado pela equação (30), citada por Wood et al. (1997), e as distribuições de probabilidades da Tabela 9:

$$DAI = \frac{CR \times AC \times ED \times DF}{BW \times LF \times 365} \quad (30)$$

onde:

CR - Taxa de consumo (Kg/dia);

AC - Concentração da atividade de urânio no alimento (mBq/Kg);

ED - Duração da exposição (anos );

DF - Fração da dieta;

BW - Peso corporal (Kg);

LF - Idade média de uma pessoa (anos).

Para isto um programa chamado “Gerador Radômico” foi criado na interface gráfica do “guide” do Matlab que fosse capaz de gerar os dados na faixa da distribuição necessária e com número de habitantes da população desejado, como pode ser observado na Figura 29.

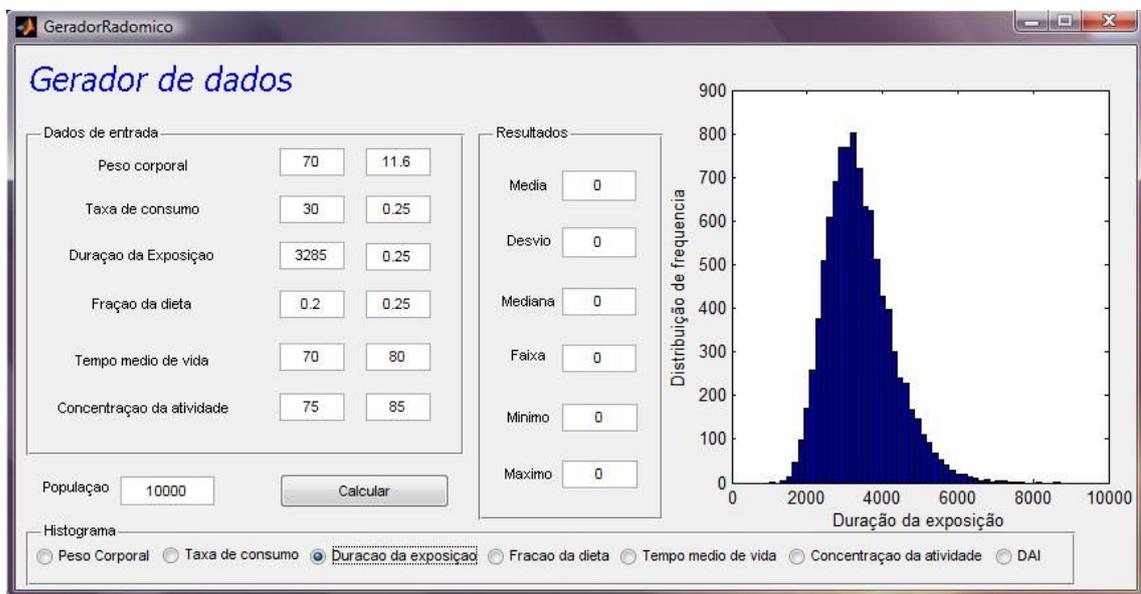


Figura 29 - Gerador de dados utilizado no trabalho.

A criação deste programa no Matlab 7.6 (MATHWORKS, 2008) foi possível por ele ter um compilador que converte os programas em arquivos de extensão .EXE que podem ser

executados sem necessidade de abrir o Matlab em outros computadores que tenham o mesmo instalado. Este procedimento de compilação pode ser observado no APÊNDICE C.

### 3.3.1. Modelos de exposição fuzzy

Inicialmente, os dados de entrada foram fuzzificados em termos de conjuntos lingüísticos (alto, médio e baixo). Para cada variável de saída foram criados três conjuntos fuzzy (alto, médio e baixa exposição). As variáveis de entrada e saída foram representadas por funções de pertinência em forma de “s”, gaussiana e “z”, como anteriormente utilizadas na construção do mapa fuzzy. Um exemplo de funções de pertinência usadas neste trabalho para a modelagem de incertezas não-probabilísticas pode ser visto na Figura 30, que representa os três conjuntos fuzzy: baixo, médio e alto para o parâmetro peso corporal (BW).

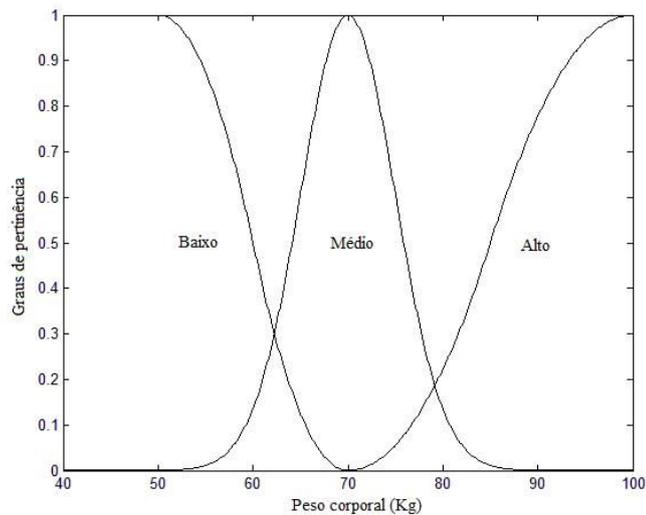


Figura 30 - Funções de pertinência usadas para representar a variável peso corporal.

Os parâmetros e faixa de valores das funções de pertinência usados neste trabalho podem ser observados na Tabela 10.

Tabela 10 - Parâmetros e faixa de valores das funções de pertinência utilizados na construção do modelo fuzzy.

Parâmetros	Faixa	Variáveis lingüísticas	Parâmetros das funções de pertinência	Funções de pertinência
Peso corporal (kg)	0 – 100	Baixo; Médio; Alto.	50; 70 5; 70 70; 100	Z(a; b) g( $\sigma$ ; d) S(a; b)
Taxa de consumo (g/d)	0 – 600	Baixo; Médio; Alto.	100; 320 25; 270 200; 400	Z(a; b) g( $\sigma$ ; d) S(a; b)
Duração da exposição (anos)	0 – 100	Baixo; Médio; Alto.	40; 80 5; 70 65; 100	Z(a; b) g( $\sigma$ ; d) S(a; b)
Fração da dieta	0 – 1	Baixo; Médio; Alto.	0,1; 0,3 0,1; 0,4 0,5; 0,8	Z(a; b) g( $\sigma$ ; d) S(a; b)
Concentração da atividade (mBq/Kg)	0 - 9000	Baixo; Médio; Alto.	700; 6000 800; 6000 6000; 9000	Z(a; b) g( $\sigma$ ; d) S(a; b)
Idade (anos)	0 – 80	Baixo; Médio; Alto.	40; 54 5; 62 60; 80	Z(a; b) g( $\sigma$ ; d) S(a; b)
DAI (mBq/kg.dia)	0 - 0.01	Baixo; Médio; Alto.	0,00223; 0,00601 0,000753; 0,005 0,004908; 0,00999	Z(a; b) g( $\sigma$ ; d) s(a; b)

A base de regra do modelo fuzzy tipo Mamdani foi formulada a partir do conhecimento de especialistas. Os dados de saída, defuzificados pela técnica da centróide, foram normalizados em um intervalo definido de acordo com os valores máximos e mínimos definidos pelo especialista. A base de regra foi composta de dezenove regras e seis parâmetros de entrada, como pode ser visto na Tabela 11.

Tabela 11 - Base de regras.

Regras	SE						ENTÃO
	DF	CR	AC	BW	ED	LF	DAI
1	Alto						
2	Médio						
3	Baixo						
4	Médio	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo
5	Médio	Médio	Médio	Baixo	Baixo	Baixo	Médio
6	Médio	Médio	Médio	Baixo	Médio	Baixo	Médio
7	Médio	Alto	Alto	Alto	Alto	Médio	Alto
8	Baixo	Baixo	Baixo	Médio	Médio	Médio	Baixo
9	Baixo	Baixo	Baixo	Alto	Alto	Alto	Baixo
10	Alto	Alto	Alto	Baixo	Baixo	Baixo	Alto
11	Médio	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Médio	Baixo
12	Médio	Baixo	Médio	Médio	Baixo	Médio	Médio
13	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Médio	Médio	Baixo
14	Médio	Médio	Baixo	Baixo	Baixo	Médio	Baixo
15	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Médio	Baixo
16	Baixo	Baixo	Alto	Baixo	Baixo	Baixo	Médio
17	Médio	Baixo	Baixo	Médio	Baixo	Baixo	Baixo
18	Baixo	Baixo	Médio	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo
19	Alto	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Alto	Baixo

Outro algoritmo foi construído para determinar o DAI pela técnica de avaliação sintética fuzzy que considera pesos de comparação dois-a-dois entre os critérios de entrada fornecidos pelos especialistas. Para ter mais facilidade na modelagem do sistema foram utilizadas três inferências. A estrutura hierárquica fuzzy para a avaliação de DAI é mostrada na Figura 31.

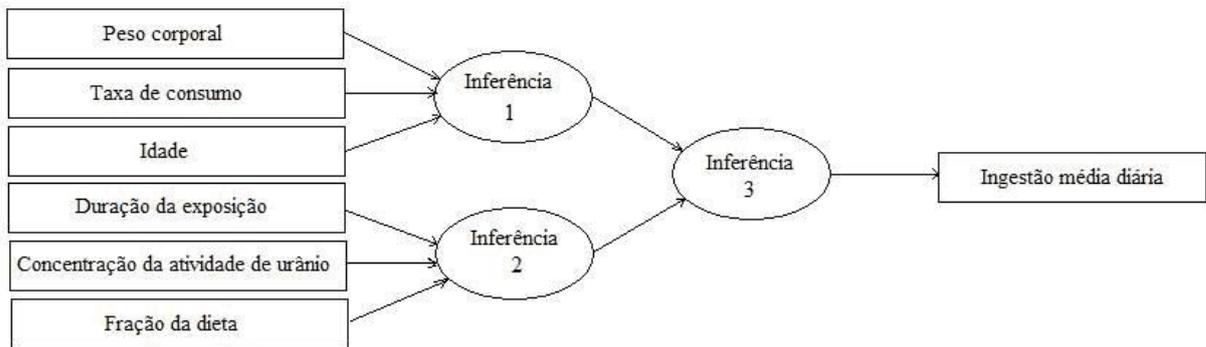


Figura 31 – A estrutura hierárquica fuzzy para a avaliação do DAI.

As matrizes  $J_{n \times m}^m$  foram definidas para as inferências  $m = 1$  e  $2$ , como pode ser observado a seguir:

$$J_{3 \times 3}^{(1)} = \begin{pmatrix} 1,0 & 1,0 & 0,9 \\ 1,0 & 1,0 & 0,9 \\ 1,1 & 1,1 & 1,0 \end{pmatrix} \quad J_{3 \times 3}^{(2)} = \begin{pmatrix} 1,0 & 0,5 & 0,6 \\ 2,0 & 1,0 & 1,1 \\ 1,8 & 0,9 & 1,0 \end{pmatrix}$$

O método de defuzzyficação pela centróide também foi utilizada pela avaliação sintética fuzzy para obter o valor da exposição e a expressão lingüística que qualifica a mesma. O método dos máximos também foi utilizado para qualificar a exposição sendo obtido o mesmo resultado. Segundo Oliveira Júnior (1999) este método é o mais indicado para análises de risco.

A avaliação qualitativa define se a área oferece uma baixa, média e alta exposição a seus habitantes. Os valores obtidos pelos dois métodos fuzzy acima descritos foram comparados com os valores obtidos pelo método de Monte Carlo aplicado a equação (30), cujos resultados serão apresentados no capítulo seguinte.

#### 4. RESULTADOS

Os resultados das medidas radiométricas podem ser encontrados no APÊNDICE D. Os valores obtidos da taxa de dose absorvida no ar na área externa às residências variou de 55,7 a 304,5 nGy/h com uma média de 161,7 nGy/h. Os valores ficaram acima da média ponderada populacional que é de 59 nGy/h, variando de 10 a 200 nGy/h (UNSCEAR, 2000). No interior das residências, os resultados variaram de 93,4 a 356,7 nGy/h com uma média de 170,4 nGy/h, esses valores também ficaram acima da média ponderada populacional que é de 84 nGy/h com variação de 20 a 200 nGy/h (UNSCEAR, 2000).

Os resultados da taxa de dose absorvida no ar ficaram acima dos valores obtidos na Índia por Narayana et al. (2007) nas margens dos principais rios Kali, o Sharavathi e o Netravathi de 44 nGy/h, 35 nGy/h a 57 nGy/h, respectivamente. Estudos realizados por Alatis et al. (2008) ficaram abaixo dos valores obtidos com uma taxa média de dose absorvida no ar de  $33,655 \pm 3,409$  nGy/h que variou de  $2,229 \pm 0,081$  nGy/h a  $61,652 \pm 0,67$  nGy/h. Porém os resultados obtidos na Malásia por Lee et al. (2009) tiveram um valor médio de  $222 \pm 191$  nGy/h e valor máximo de 1039 nGy/h ficando acima de 161,7 nGy/h obtido neste trabalho.

A estimativa da dose efetiva anual foi calculada levando em consideração o coeficiente de conversão da dose absorvida no ar para dose efetiva que é de 0,7 Sv/Gy e o fator de ocupação, fora e dentro das residências, que foi de 0,2 e 0,8, respectivamente (UNSCEAR, 2000). O resultado da estimativa da dose efetiva média anual foi de 1,03 mSv, ficando acima do valor considerado para média mundial que é de 0,48 mSv.

Uma imagem em cores do formato RGB (red, green e blue) foi obtida onde cada componente está relacionada às variáveis fuzzy de baixa exposição, media exposição e alta exposição, respectivamente, facilitando a correta interpretação do mapa. O mapa fuzzy obtido da distribuição da taxa de dose absorvida no ar na região pode ser visto na Figura 32.

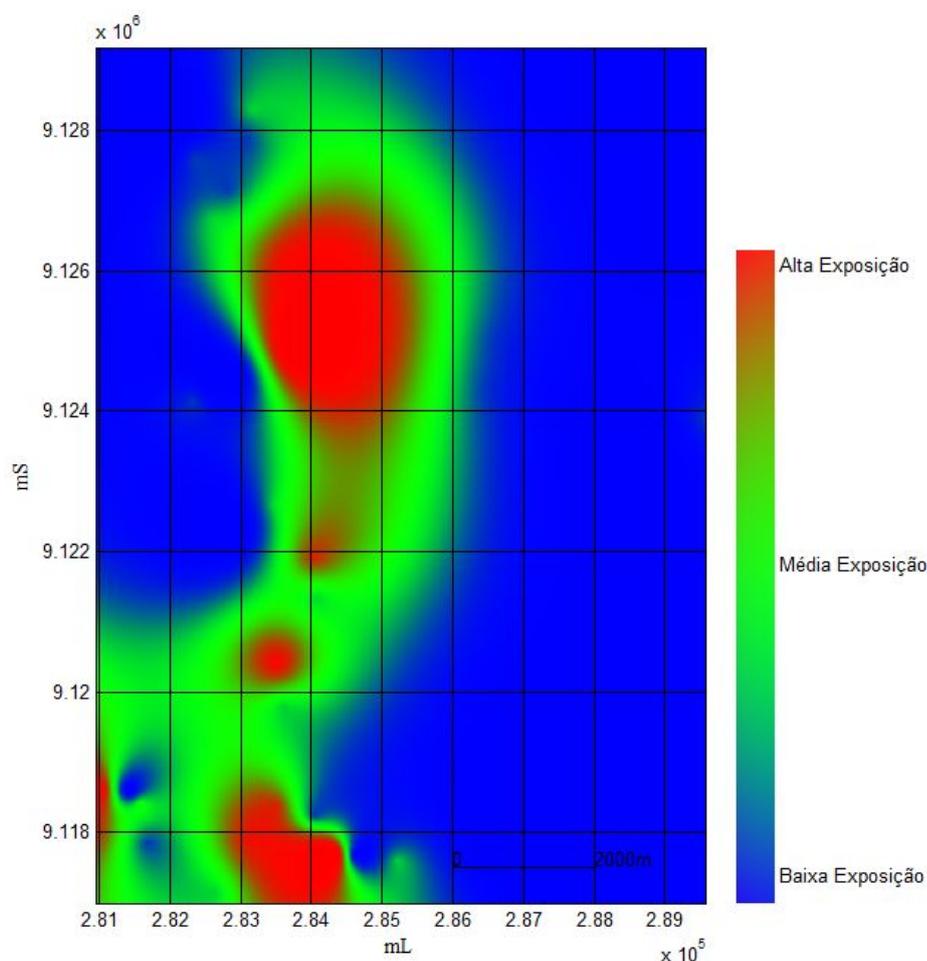


Figura 32 – Mapa fuzzy da distribuição da taxa de dose absorvida no ar na região fosfática.

Uma das características principais de um mapa fuzzy é a sua representação em graus de pertinência, fazendo com que as passagens entre os conjuntos fuzzy, alta exposição, média exposição e baixa exposição sejam suaves. Esses contornos suaves retratam melhor os níveis de radiação natural que são definidos pelas diferentes concentrações dos radionuclídeos na crosta terrestre, sendo estes níveis representados pelos graus de pertinência existentes na teoria dos conjuntos fuzzy.

Foi possível identificar uma região de maior exposição no mapa sendo coerente com os dados na literatura sobre a localização da região fosfática, chamada de região de fosfato rico (teores de fosfato próximos de 10%).

A partir dos dados desta região e da associação química do urânio ao  $P_2O_5$ , presume-se que as áreas de fosfato comercial teriam uma maior concentração de urânio e seus descendentes, consequentemente uma contribuição maior à taxa de dose absorvida no ar. Diante desta afirmação, ao observar a Figura 33 (a) é possível verificar a veracidade dos

resultados obtidos pela sobreposição das imagens do mapa fuzzy de exposição à radiação e da representação por polígonos da região de fosfato comercial. A maioria das áreas de maior exposição à radiação coincidem com essa região, onde também pode ser observada na Figura 33(b) que a área mais urbanizada fica localizada muito próxima à região de maior exposição e em alguns locais chegando a coincidir.

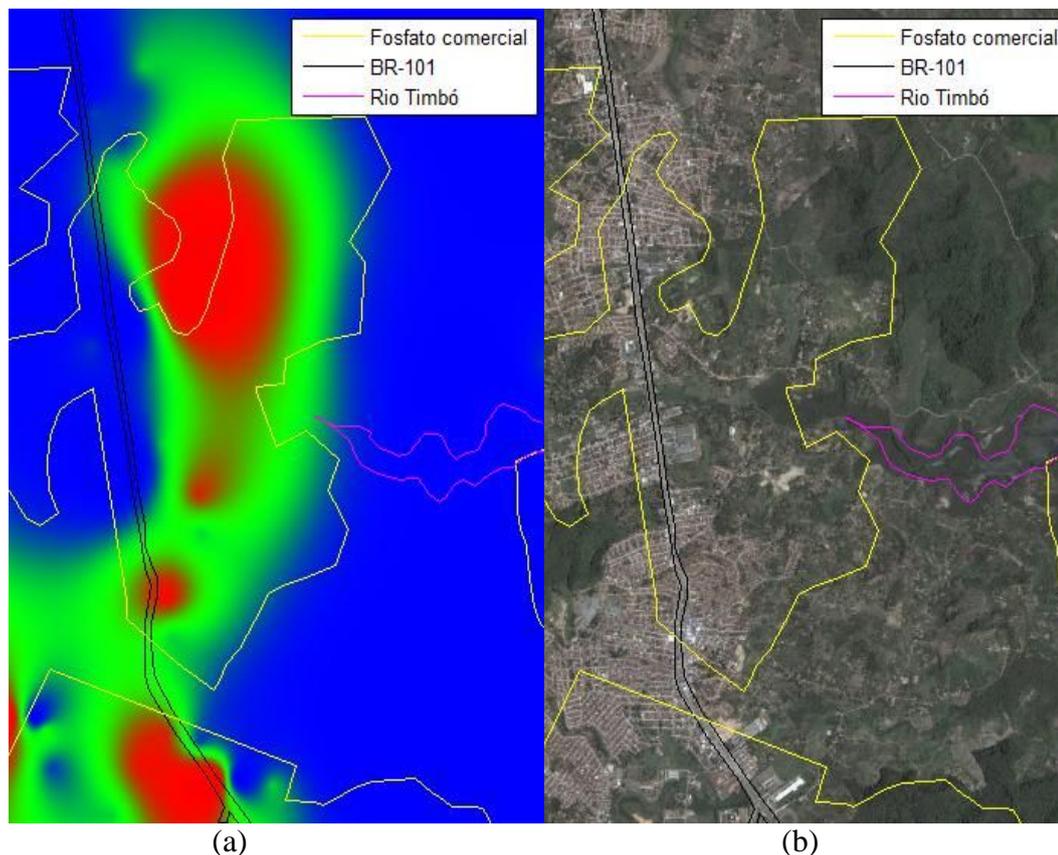


Figura 33 – Os polígonos representam a região de fosfato rico sobreposta em: (a) imagem da distribuição da taxa de dose absorvida no ar na região fosfática; e (b) imagem da região urbanizada.

Na Figura 33 sob o ponto de vista de representação, a sobreposição destas imagens mostra de forma pragmática a diferença entre mapa fuzzy e o mapa booleano através de suas fronteiras, tão ressaltada na revisão de literatura deste trabalho.

Em algumas dessas áreas de fosfato comercial mostradas na Figura 33 (b), na época de mineralização praticamente todo o capeamento inferior a 15 m foi extraído e ao longo dos anos muitos desses locais foram ocupados pelo crescimento desenfreado da população. Conseqüente essas áreas se tornaram locais onde a exposição recebida pela população seria maior.

A Figura 33 (a) mostra as duas áreas sobrepostas, o mapa fuzzy da distribuição da taxa de dose absorvida no ar e o fosfato comercial. Grande parte das áreas anteriormente

classificadas como média e alta exposição condizem com a área do polígono correspondente a região de fosfato comercial. Nas áreas que não foram classificadas dessa forma, a taxa de dose absorvida foi considerada de baixa exposição. Este resultado pode ter sido devido a essas áreas não estarem dentre as áreas que tiveram uma maior mineralização. Outra possível justificativa para isso seria a variação da cobertura do solo que pode chegar a 42 m, ocasionando um efeito de blindagem natural. Outro fator importante pode ser o próprio efeito da urbanização como calçamento de ruas, construção de praças, casas de alvenaria e pequenos prédios que podem ocasionar também o mesmo efeito, conforme observado por Affonseca et al. (2002) na influência do desenvolvimento urbano na radiação natural da cidade do Rio de Janeiro.

Neste trabalho, dois grupos da população (homem e mulher) foram representados, cada um por meio de 1000 valores de acordo com a faixa de distribuição de probabilidade especificada na Tabela 9, e determinada à ingestão diária de urânio para estes grupos. Os resultados dos modelos de exposição e do método de Monte Carlo são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Os resultados da ingestão diária de urânio por consumo de feijão pelo modelo de exposição fuzzy e pelo método de Monte Carlo para 1000 habitantes ( $\mu\text{Bq/kg.dia}$ ).

Sexo	Técnicas		
	Fuzzy		Monte Carlo
	Mamdani	Sintética	
Homem	2,80	2,84	2,84
Mulher	2,83	2,80	2,83

A ingestão média diária para o grupo de homens e mulheres pela base de regras (modelo fuzzy tipo Mamdani) foram 2,80 e 2,83  $\mu\text{Bq/kg.dia}$ , respectivamente. Os erros observados por este modelo foram menores que 1,41%, mostrando uma boa concordância com os valores obtidos pelo método de Monte Carlo.

Os resultados obtidos pela técnica de avaliação sintética fuzzy foram 2,84  $\mu\text{Bq/kg.dia}$  para o homem e 2,80  $\mu\text{Bq/kg.dia}$  para mulher, demonstrando uma boa concordância com os modelos fuzzy tipo Mamdani e o método Monte Carlo. Os erros relativos foram menores do que 1,10%. Estes erros representam uma melhoria significativa no tipo de modelagem quando comparadas com aquelas obtidas em trabalhos anteriores (RAJKUMAR; GUESGEN, 1996; VASCONCELOS et al., 2007).

Na avaliação qualitativa, a variável lingüística “baixa exposição” foi obtida porque apresentou um grau de pertinência mais alto para os modelos tipo Mamdani e técnica de avaliação sintética. Isto significa que os habitantes da área de estudo estão sujeitos a baixa exposição pelo urânio natural considerando o consumo do feijão cultivado na região. Estas análises qualitativas fuzzy têm a vantagem de resolver diferenças entre especialistas sobre a classificação de baixas e altas exposições de radiação natural e facilitar a compreensão de especialistas sobre o assunto.

A dose diária média (ADD) foi calculada pelo DAI usando o coeficiente de conversão para a ingestão de  $^{238}\text{U}$  em adultos (UNSCEAR, 2000). O maior valor obtido com os modelos na simulação por ADD de urânio foi 9,10 pSv por dia correspondente a 3,28 nSv por ano. Este resultado está dentro da faixa de valores obtidos por Arogunjo et al. (2009) para  $^{238}\text{U}$  em alimentos que variou de 0,041- 505 nSv por ano. O valor obtido para este alimento representa uma baixa probabilidade de efeitos biológicos da radiação nos humanos. Isto justifica o resultado da expressão lingüística “baixa exposição” na análise qualitativa, apesar dos resultados representados no mapa fuzzy estarem acima da média mundial. Contudo, a dose recebida deverá aumentar se levada em consideração a contribuição de mais outros alimentos.

Os resultados entre grupos também mostraram que não há diferença significativa entre a ingestão média diária para os homens e mulheres. Sugere-se que os homens possivelmente têm os mesmos hábitos alimentares que as mulheres. Isto pode estar associado a condições sociais, pois na sua maioria estão desempregados ou trabalham próximo de suas residências e as mulheres geralmente são trabalhadoras do lar.

## 5. CONCLUSÕES

Os valores obtidos de taxa de exposição no ar na região fosfática de Pernambuco foram considerados acima da média mundial e utilizando a teoria dos conjuntos fuzzy associada à técnica de krigagem foi possível identificar espacialmente e de forma georeferenciada as áreas de maior exposição no ar. Logo, a associação de ambas as técnicas é eficiente e pode ser utilizada com maior frequência em estudos futuros, já que na literatura ainda são raras as suas aplicações.

O mapa fuzzy representa bem uma região de radiação pela suavidade de seus contornos, que é inerente aos fundamentos da lógica fuzzy e pela utilização de variáveis lingüísticas que pode ser mais uma ferramenta para dar suporte a especialistas e não especialistas pela sua facilidade de interpretação. Permite também trabalhar com incertezas não probabilísticas que muitas vezes podem ter uma representação de caráter mais realístico.

O uso de técnicas fuzzy não substitui as técnicas existentes, mas dá suporte a avaliação de exposição levando em consideração incertezas não probabilísticas. Muitos exemplos podem ser observados sobre isso. Um deles é o processo de subjetividade nas respostas dos questionários aplicados. Esta subjetividade é uma consequência de uma população predominante na região cujo baixo nível de instrução impede uma informação precisa sobre o perfil de seus habitantes.

O tratamento de incertezas nas respostas dos questionários aplicados pode ser analisado com dificuldade por um pesquisador que precisa definir a dose recebida pela população da região sobre investigação e este tratamento pode ser realizado por meio de técnicas fuzzy.

Os resultados mostraram que o modelo de exposição à radiação fornece a possibilidade de trabalhar com as incertezas não-probabilísticas baseadas na teoria dos conjuntos fuzzy que permite a inclusão de variáveis não quantitativas no modelo, refletindo a realidade sociocultural da população.

Na análise qualitativa, as variáveis lingüísticas obtidas deram suporte para a classificação da exposição dos habitantes como “baixa exposição” a radiação. Os resultados obtidos na análise quantitativa mostraram que as exposições estão na mesma faixa de exposição do conjunto fuzzy de “baixa exposição” e corroborou com a opinião de especialistas sobre a ingestão de urânio por este alimento cultivado na região.

Os resultados obtidos pela técnica de avaliação sintética fuzzy e o modelo fuzzy tipo Mamdani sugerem que estes modelos podem ser altamente promissores para ajudar na análise de exposição à radiação.

Sugere-se em trabalhos futuros que um software seja construído de modo a possibilitar a análise fuzzy da exposição à radiação natural e em caso de acidentes radiológicos como no caso de instalações nucleares e radiativas, auxiliar de forma automática, na prevenção e predição da exposição com base em dados radiológicos da região e no comportamento da população numa possível situação de emergência.

Em trabalhos futuros, pretende-se desenvolver um modelo de exposição fuzzy a radiação para o  $^{226}\text{Ra}$ , incluindo a representação da exposição em um mapa fuzzy.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFFONSECA, M. S. **Influência da urbanização na radiação natural em áreas anômalas**. 1993. 129 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Nuclear) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro - RJ.

ALATISE, O. O.; BABALOLA, I. A.; OLOWOFELA, J. A.. Distribution of some natural gamma-emitting radionuclides in the soils of the coastal areas of Nigeria. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 99, p.1746–1749, 2008.

ALTUNKAYNAK, A.; ÖZGER, M; ÇAKMAKCI, M. Fuzzy logic modeling of the dissolved oxygen fluctuations in Golden Horn. **Ecological Modelling**, v.189, p.436-446, 2005.

AMARAL, R. S. **Dose na população da região urano-fosfática Pernambucana, devida à presença de urânio e <sup>226</sup>Ra nos cultivares**. 1994. 143f. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear) - Universidade de São Paulo, São Paulo - SP.

AMARAL R. S., VASCONCELOS W. E., BORGES E., SILVEIRA S. V.; MAZZILLI B. P. Intake of uranium and radium-226 due to food crops consumption in the phosphate region of Pernambuco – Brazil. **Journal of Environmental Radioactivity**, v.82, p.383- 393, 2005.

ARCHELA, R.S.; ARCHELA, E. **Webquest com orientações para a construção de mapas temáticos**. Geografia - v. 15, n. 2, jul./dez. 2006. Disponível em <http://www.uel.br/revistas/geografia>. Acesso em: dez. 2009.

AROGUNJO, A. M.; HÖLLRIEGL, V.; GIUSSANI, A.; LEOPOLD, K.; GERSTMANN, U.; VERONESE, I.; OEH, U. Uranium and thorium in soils, mineral sands, water and food samples in a tin mining area in Nigeria with elevated activity. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 100, p.232–240, 2009.

BANDEMER, H.; NATHER, W. **Fuzzy data Analysis**.1 ed. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1992. 342p.

BURROUGH, P. A. **Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment**. 1 ed. Oxford: Oxford University Press, 1986. 191 p.

BURROUGH, P. A. Development of intelligent geographical information systems. **International Journal of Geographical Information Systems**, v. 6, p.1-11, 1992.

BURROUGH, P. A.; HEUVELINK, G. B. M. The sensitivity of boolean and continuous (Fuzzy) logical modeling to uncertain data. In: EUROPEAN CONFERENCE AND EXHIBITION ON GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEMS MUNICH (EGIS'92). Munich: EGIS'92, 1992. p. 1032-1041.

BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R. A. **Principles of geographical information systems**. 1 ed. Oxford: Oxford University Press, 1998. 333p.

BRESSAN, G. M.; KOENIGKAN, L. V.; OLIVEIRA, V. A.; CRUVINEL, P. E.; KARAM, D. Sistema de classificação fuzzy para o risco de infestação por plantas daninhas considerando a sua variabilidade espacial. **Planta Daninha**, v. 24, p. 229-238, 2006.

CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. Introdução à Ciência da Geoinformação. **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)**. São Paulo, 2001. Disponível em: <<http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2004/04.22.07.43/doc/publicacao.pdf>>. Acesso em: 8 dez. 2006.

CHANG, N.; CHEN, H. W.; NING, S. K. Identification of river water quality using the Fuzzy Synthetic Evaluation approach. **Journal of Environmental Management**, v. 63, p.293–305, 2001.

CONDEPE - Agência Estadual de Planejamento e Pesquisa de Pernambuco. **Prometropole - Banco de dados georeferenciado da pobreza na região metropolitana de Recife**. Pernambuco: Agência Estadual de Planejamento e Pesquisa de Pernambuco, 2000. CD-ROM.

COSTA, M. L. L. **A inteligência artificial no processo de proteção radiológica**. 1993. 118f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Computação) - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro - RJ.

DANTAS, B. M.; MELO, D. R.; DIAS DA CUNHA, K.; JULIÃO, L.; LOURENÇO, M. C.; SANTOS, M. S. **Dosimetria Interna**. Rio de Janeiro: Divisão de Monitoração Interna, Instituto de Radioproteção e Dosimetria, 2004. 184p.

DIXON, B. Applicability of neuro-fuzzy techniques in predicting ground-water vulnerability: a GIS-based sensitivity analysis. **Journal of Hydrology**, v. 309, p.17–38, 2005.

DRAGICEVIC, S.; MARCEAU, D. J. An application of fuzzy logic reasoning for GIS temporal modeling of dynamic processes. **Fuzzy Sets and Systems**, v.113, p. 69-80, 2000.

DUBOIS, G. ; SHIBLI, S. A. R., Monitoring radioactivity in the environment: automatic mapping or expert-dependent systems? Spatial Interpolation Comparison 1997 (SIC97), p. 1-15, 2003.

FELGUEIRAS, C. A. **Modelagem ambiental com tratamento de incertezas em sistemas de informação geográfica: o paradigma geostatístico por indicação**. 1999. 212f. Tese (doutorado em computação aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos – SP.

FIGUEREDO, L. F. G.; VERDINELLI, M. A.; BARCZAK, C. L. Cadastro técnico ambiental, sistemas de informação geográfica e lógica fuzzy: ferramentas conjugadas para a gestão ambiental. In: COBRAC – CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTROS TÉCNICOS MULTI-FINALITÁRIOS. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 1998.

FLEMING, G.; VAN DER MERWE, M.; MCFERREN, G. Fuzzy expert systems and GIS for cholera health risk prediction in southern Africa. **Environmental Modelling & Software**, v. 22, p.442-448, 2007.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO (FJP), Programa das Nações Unidas para o desenvolvimento – PNUD. 2003. **Índice de desenvolvimento Humano dos Municípios Brasileiros–IDH**. Disponível em: <http://www.fjp.gov.br/>. Acesso em: dez. 2009.

GHRIBI, M. Optimal site planning: fuzzy set membership, multi-criteria evaluation and multi-objective land allocation. **International Centre for Science and high technology – United Nations Industrial Development Organization**. Disponível em: <<http://www.ics.triest.it>>. Acesso em: 17 jan. 2006.

GUMPLICHT, T. Application of GIS in Training for Environmental management. **Journal of Environmental Management**, v.46, p.17–30, 1996.

GOOGLE. **Google Earth para Windows Vista, Versão 5.0.11733.9347**: Software de visualização do modelo tridimensional do globo terrestre (software). Arkansas, 2009.

GOLDEN SOFTWARE. **Surfer for Windows, version 8.01**: software de geração de mapas de contorno e superfícies contínuas (software). Colorado, 2002.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E.; EDDINS, S. L. **Digital Image Processing using Matlab**. 1 ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2004. 609 p.

HADZILACOS, T. **On Layer-Based Systems For Undetermined Boundaries**, In: Geographic Objects with Indeterminate Boundaries, Burrough, P., Frank, A., Taylor & Francis, 1996.

HARMON, J. E.; ANDERSON, S. J. **The Design and Implementation of Geographic Information Systems**. 1 ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2003. 273 p.

HONGDA, Z. Intakes of food and internal doses by ingestion in two high background areas of China. In: THE 4TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH LEVELS OF NATURAL RADIATION. China, Beijing, 1997. p.149-154.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION (ICRP). **Compilation of ingestion and Inhalation Coefficients**, ICRP publication 72, Annals of the ICRP 23(2), Pergamon Press, Oxford, 1995.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION (ICRP). **Task Group on reference Man**. ICRP publication 23, Pergamon Press, Oxford, 1975.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). **Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data**. IAEA- TEC-1363, IAEA, Vienna, 2003.

JULIÃO, L. M. Q. C. **Caracterização da Excreção de Tório em uma Região Rica em Monazita, como Subsídio para a Análise da Incorporação em Situações de Exposição Ocupacional e de Público**. 1998. 129 f. Tese (Doutorado em Biociências Nucleares) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ.

KASABOV, N. K. **Foundations of Neural Networks, Fuzzy Systems, and Knowledge Engineering**. 2 ed. Massachusetts: A Bradford Book - The MIT Press, 1998. 581 p.

KECMAN, V. **Learning and Soft Computing – Support Vector Machines Neural Networks, and Fuzzy Logic Models**. 1 ed. Massachusetts: The MIT Press, 2001. 576 p.

KLAWONN, F.; NAUCK, D.; KRUSE, R. Generating Rules from Data by Fuzzy and Neuro-Fuzzy Methods. In: PROC. FUZZY-NEURO-SYSTEM'95. Darmstadt: 1995. p.223–230.

KOSKO, B. **Fuzzy Thinking - The new science of fuzzy logic**. 1 ed. London: Flamingo - An Imprint of Harper Collins Publishers, 1994. 318 p.

KRUSE, R.; GEBHARDT, J.; KLAWONN, F. **Foundations of Fuzzy Systems**. 1 ed. Chichester: Wiley, 1994. 178 p.

LAGACHERIE, P., ANDRIEUX, P., BOUZIGUES, R. **Fuzziness and Uncertainty of Soil Boundaries: From Reality to Coding in GIS**. In: Geographic Objects with Indeterminate Boundaries, Burrough, P., Frank, A., Taylor & Francis, 1996.

LEE, S. K.; WAGIRAN, H.; RAMLI, A. T.; APRIANTORO, N. H.; WOOD, A. K. Radiological monitoring: terrestrial natural radionuclides in Kinta District, Perak, Malaysia. **Journal of Environmental Radioactivity**, v.100, p. 368–374, 2009.

LIA, J; HUANGB G. H.; ZENG C, G.; MAQSOOD, I.; HUANG, Y. An integrated fuzzy-stochastic modeling approach for risk assessment of groundwater contamination. **Journal of Environmental Management**, v. 82, p. 173-188, 2007.

LIMA, R. A. **Avaliação da Dose na População da Região urano-fosfática do nordeste que utiliza os recursos hídricos da região**. 1996. 178f. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear). Universidade de São Paulo, São Paulo - SP.

LIOTTE, S. V.; MACEDO, A. B.; PEDRO, M. F. Utilização de Técnicas de Geoprocessamento para apoio ao planejamento físico-territorial do município de Pariqueira-Açu/SP, 2001. Disponível em: <<http://geolog.igc.usp.br/geoproc/pariqueira/691.htm>>. Acesso em: jul. 2006.

LONGO, S; DINIS DA GAMA, C. Análise dos riscos inerentes às vibrações transmitidas às estruturas, 2003. Disponível em: <<http://cegeo.ist.utl.pt/html/investiga/vibra.pdf>>. Acesso em: dez. 2005.

MACKAY, D. S.; ROBINSON, V. B. A multiple criteria decision support system for testing integrated environmental models. **Fuzzy Sets and Systems**, v.113, p. 53-67, 2000.

MAS, J. F. Mapping land use/cover in a tropical coastal area using satellite sensor data, GIS and artificial neural networks Estuarine. **Coastal and Shelf Science**, v.59, p. 219-230, 2004.

MANZIONE, R. L. **Variabilidade espacial de atributos químicos do solo em Araguari-MG**. 2002. 155 f. Dissertação de mestrado (Mestre em agronomia). Universidade Estadual Paulista, Botucatu – SP.

MATHWORKS. **Matlab for Windows, version 7.6.0324**: Software de linguagem de programação apropriada ao desenvolvimento de aplicativos de natureza técnica (software). Massachusetts, 2008.

MOHAMED, A. M. O.; CÔTÉ, K. Decision analysis of polluted sites - a fuzzy set approach. **Waste Management**, v. 19, p.519-533. 1999.

MOREIRA, F. R. S. **Uso e Avaliação de Técnicas de Integração e Análise Espacial de Dados em Pesquisa Mineral Aplicadas ao Planalto de Poços de Caldas**. 2001. 160 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos - SP.

NAGAMINE, R. K. **Lógica difusa para controle não convencional de uma viga inteligente**. 2001. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo, São Carlos - SP.

NARAYANA, Y.; RAJASHEKARA, K. M.; SIDDAPPA, K. Natural radioactivity in some major rivers of coastal Karnataka on the southwest coast of India. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 95, p.98-106, 2007.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NRC). **Science and judgment in risk assessment**. 1 ed. Washington: National Academy Press, 1994. 651p.

NOVÁK, V.; LEHMKE, S. Logical structure of fuzzy IF-THEN rules. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 157, p. 2003-2029, 2006.

OLIVEIRA JÚNIOR, H. A. O. **Lógica Difusa - Aspectos Práticos e Aplicações**. 1 ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 1999. 192 p.

PAUL, A., PILLAI, P., PILLAI, K. Pathways of internal exposures in a high background area. In: INTERNACIONAL CONFERENCE ON HIGH LEVELS OF NATURAL RADIATION. **Anais...** Ramsar, 1994. p.135-145.

PEREIRA, E. P. A radioatividade atmosférica natural. **Ciência Hoje**, v. 14, p. 43-50, 1992.

PERFILIEVA, I. Logical foundations of rule-based systems. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 157, p.615-621, 2006.

PFEIFFER, W. C.; PENNA FRANCA, E.; COSTA RIBEIRO, C. Measurements of environmental radiation exposure doses rates at selected in Brazil. **Anais da academia de Ciências**, v.53, p. 683-691, 1981.

RAJKUMAR, T. Applications of Hybrid Neural Networks - Fuzzy Logic Modeling to Dose and Risk Analysis, 2006. Disponível em: <[http://www.batse.msfc.nasa.gov/colloquia/abstracts\\_summer06/rthir.html](http://www.batse.msfc.nasa.gov/colloquia/abstracts_summer06/rthir.html)>. Acesso em: 5 nov. 2006.

RAJKUMAR, T.; GUESGEN, H. W. Analysis of Chemical Exposure through Inhalation using Hybrid Neural Network. **IEEE**, p. 311-316, 1997.

RAJKUMAR, T. Fuzzy exposure model. **IEEE SMC**, Beijing, p.1051-1055, 1996.

RUBINSTEIN, R. Y. **Simulation and the Monte Carlo Method**. 1 Ed. New York: John Wiley & Sons Inc, 1981. 278 p.

RUHOFF, A. L.; SOUZA, B. S. P.; GIOTTO, E.; PEREIRA, R. S. Lógica Fuzzy e Zoneamento Ambiental da Bacia de Arroio Grande. In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. **Anais...** Goiânia, 2005. p. 2355-2362.

RUTKOWSKI, L. **Flexible Neuro-Fuzzy Systems Structures, Learning and Performance Evaluation**. 1 ed. Moscow: Kluwer Academic Publishers, 2004. 294 p.

SADIQ R.; HUSAIN T.; VEITCH B.; BOSE N. Risk-based decision-making for drilling waste discharges using a fuzzy synthetic evaluation technique. **Ocean Engineering**, v. 31, p.1929-1953, 2004.

SANDRI, S.; CORREA, C. Lógica Nebulosa. In: V ESCOLA DE REDES NEURAIAS. **Anais...** São José dos Campos, 1999. p. c073-c090.

SARAIVA, G. J. P. Lógica fuzzy. **Ciência e Tecnologia do Exército**, v. 17, p. 43-66, 2000.

SCOTT, E. M. **Modelling radioactivity in the environment**. 1 ed. Netherlands: Elsevier, 2003. 427 p.

SPERANZA, E. A. **Métodos e ferramentas de interpolação para a geração de mapas georeferenciados para a tomada de decisão em irrigação de precisão**. 2008. 117 p. Dissertação de mestrado (Mestre em engenharia elétrica). Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos – SP.

SILER, W.; BUCKLEY, J. J. **Fuzzy Expert Systems and Fuzzy Reasoning**. 1 ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005. 424 p.

SILVA, S. F. **Zoneamento Geoambiental com Auxílio de Lógica Fuzzy e Proposta de um Geoindicador para a Caracterização do Meio Físico da Bacia do Rio do Peixe**. 2005. 441f. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Universidade de São Paulo, São Carlos – SP.

SIVANANDAM, S. N., SUMATHI S., DEEPA, S. N. **Introduction to fuzzy logic using matlab**. 1 ed. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. 439 p.

SUNTA, C. M. A review of the studies of high natural areas of the S-W coast of India. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH LEVELS OF NATURAL RADIATION. **Anais...** Ramsar, 1990. p. 135-145.

TANSCHKEIT, R. Sistemas fuzzy. **DEE-PUC-Rio**, Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.ica.ele.puc-rio.br/cursos/download/LN-Sistemas%20Fuzzy.pdf>>. Acesso em: 12 ago. 2006.

THÉ, M. A. L. **Raciocínio baseado em casos uma abordagem Fuzzy para Diagnóstico Nutricional**. 2001. 182 f. Tese (Doutorado em Inteligência aplicada) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Guidelines for exposure assessment**. United States, Washington, 1992. Disponível em: <<http://www.epa.gov/ncea/pdfs/efh/references/EXPGUIDE.PDF>>. Acesso em: 12 ago. 2006.

UNITED NATION SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECT OF ATOMIC RADIATION (UNSCEAR). **Sources, effects and risks of ionizing radiation**. United Nations, New York, 1988.

UNITED NATION SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECT OF ATOMIC RADIATION (UNSCEAR). **Sources and effects of ionizing radiation**. United Nations, New York, 2000.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ (UFPR). **Apostila de cartografia**. Curso de Engenharia Cartográfica. Disponível em: [www.cartografica.ufpr.br/docs/ctematica/ap\\_cartografia.pdf](http://www.cartografica.ufpr.br/docs/ctematica/ap_cartografia.pdf). Acesso em: dez. 2009.

VASCONCELOS, W. E.; TEIXEIRA, M. G.; LIRA, C. A. B. O.; VIEIRA, J. W.; GARCIA, K. C. Construção de um modelo fuzzy de exposição ao urânio para suporte em critério de tomada de decisões. In: CMNE - CONGRESSO DE MÉTODOS NUMÉRICOS EM ENGENHARIA / XXVIII CILAMCE - CONGRESSO IBERO LATINO-AMERICANO SOBRE MÉTODOS COMPUTACIONAIS EM ENGENHARIA, **Anais eletrônicos...** Porto, 2007. p. 1-10.

WOOD, P.; PHILLIPS, L.; ADENUGA, A.; KOONTZ, M.; RECTOR, H.; WILKES, C.; WILSON, M. **Exposure Factors Handbook**. U.S. Environmental Protection Agency. National Center for Environmental Assessment Office of Research and Development, 1997. 1193p.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Human Exposure Assessment**, Environmental Health Criteria 214. United Nations Environment Programme, International Labour Organization, Geneva, 2000. Disponível em: <http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc214.htm> Acesso em: set. 2006.

YAMAMOTO, J. K. Avaliação e classificação de reservas minerais. Google books, 2001. Disponível em [http://books.google.com.br/books?id=AkmsTIZmblQC&printsec=frontcover&source=gbs\\_v2\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q=&f=false](http://books.google.com.br/books?id=AkmsTIZmblQC&printsec=frontcover&source=gbs_v2_summary_r&cad=0#v=onepage&q=&f=false) Acesso em: jun. 2009. 232 p.

YEN, J.; LANGARI, R. **Fuzzy Logic - intelligence, control and information**. 1 Ed. New Jersey: Prentice Hall, 1999. 548 p.

ZADEH, L. A. Fuzzy Sets. **Information and Control**, v.8, p.338-353, 1965.

## APÊNDICES

### APÊNDICE A - QUESTIONÁRIO APLICADO.

Amostra		
Localização geográfica	Latitude	
	Longitude	

Nome:			
Endereço:			
Bairro:		Telefone:	
Idade:		Sexo:	

a)\_ Quantas pessoas residem na casa?

..... homens .....mulheres .....adolescentes .....crianças

b)\_ Quais as idades das pessoas que residem na casa?

..... homens ..... Mulheres ..... Adolescentes ..... Crianças

c)\_ Quais os pesos das pessoas que residem na casa?

..... homens ..... Mulheres ..... Adolescentes ..... Crianças

d)\_ Quanto tempo reside na região?

..... anos

e)\_ Você trabalha na região? Qual a profissão?

( ) sim ( ) Não Homem:..... Mulher .....

f)\_ Qual a freqüência de trabalho por semana?

**HOMEM**

**MULHER**

( ) raramente

( ) raramente

( ) às vezes

( ) às vezes

( ) freqüentemente

( ) freqüentemente

( ) sempre

( ) sempre

Observações: .....

g)\_ Qual a freqüência que você permanece em casa?

**HOMEM**

**MULHER**

( ) muito pouco

( ) muito pouco

( ) pouco

( ) pouco

( ) mais ou menos

( ) mais ou menos

( ) muito

( ) muito

( ) demasiadamente

( ) demasiadamente

Observações: .....

h)\_No final de semana exerce atividades extras(diversão)?

sim  Não

i)\_Qual a freqüência?

HOMEM

raramente  
 às vezes  
 freqüentemente  
 sempre

MULHER

raramente  
 às vezes  
 freqüentemente  
 sempre

Observações: .....

Criança e Adolescentes

a) Os adolescentes trabalham ou/e estudam?

sim  não

b)\_Qual a freqüência permanece em casa?

CRIANÇA

raramente  
 às vezes  
 freqüentemente  
 sempre

ADOLESCENTE

raramente  
 às vezes  
 freqüentemente  
 sempre

b)\_Qual a freqüência na escola?

CRIANÇA

raramente  
 às vezes  
 freqüentemente  
 sempre

ADOLESCENTE

raramente  
 às vezes  
 freqüentemente  
 sempre

c)\_Qual tempo na escola?

CRIANÇAS

muito pouco  
 pouco  
 mais ou menos  
 quase integral  
 integral

ADOLESCENTE

muito pouco  
 pouco  
 mais ou menos  
 quase integral  
 integral

Observações:

.....  
.....  
.....

*Alimentação*

\_\_\_\_\_

a)\_Você consome MANGA? Este alimento originado da região?  
( ) sim ( ) Não ( ) sim ( ) Não

b)\_Há quanto tempo? .....

c)\_Qual a frequência de consumo por semana?  
( ) raramente  
( ) às vezes  
( ) frequentemente  
( ) sempre

\_\_\_\_\_

a)\_Você consome BANANA? Este alimento originado da região?  
( ) sim ( ) Não ( ) sim ( ) Não

b)\_Há quanto tempo? .....

c)\_Qual a frequência de consumo por semana?  
( ) raramente  
( ) às vezes  
( ) frequentemente  
( ) sempre

\_\_\_\_\_

a)\_Você consome CAJÚ? Este alimento originado da região?  
( ) sim ( ) Não ( ) sim ( ) Não

b)\_Há quanto tempo? .....

c)\_Qual a frequência de consumo por semana?  
( ) raramente  
( ) às vezes  
( ) frequentemente  
( ) sempre

\_\_\_\_\_

a)\_Você consome FEIJÃO ? Este alimento originado da região?  
( ) sim ( ) Não ( ) sim ( ) Não

b)\_Há quanto tempo? .....

c)\_Qual a frequência de consumo por semana?  
( ) raramente  
( ) às vezes  
( ) frequentemente  
( ) sempre

\_\_\_\_\_

a)\_Você consome MILHO? Este alimento originado da região?  
( ) sim ( ) Não ( ) sim ( ) Não

b)\_Há quanto tempo? .....



- sim  Não
- d)\_Se c) sim. Qual o poço?  
 próprio  vizinho  comunitário
- e)\_Há quanto tempo foi ativado? .....  
se desativado, a quanto tempo? .....
- f)\_Qual a frequência de consumo diária?  
 raramente  
 às vezes  
 frequentemente  
 sempre
- g)\_Escolaridade  
 1 grau menor  1 grau maior  2 grau  superior  
 incompleto
- h)\_Qual a renda mensal da família ? .....
- Abaixo de 500 reais
  - Acima de 500 reais
  - Próximo de 1000 reais
  - Acima de 1000 reais
  - Abaixo de 2000 reais
  - Acima de 2000 reais

## APÊNDICE B - ALGORITMO.

Algoritmo em linguagem de programação Matlab utilizado para converter os dados obtidos na krigagem, no software Surfer, para ambiente de trabalho do Matlab:

```
clc
clear
s1 = importdata('out.dat');
s = sortrows(s1,2);
k = find(s(:,2) == s(1,2));
N = length(k);
M = (length(s(:,2)))/N;
N1=N; M1=M;
w = zeros(M,N,3);
n = 1;
y = N;
for i = 1:M
    w(i,:,1) = s([n:N],1);
    w(i,:,2) = s([n:N],2);
    w(i,:,3) = s([n:N],3);
    n = N + 1;
    N = N + y;
end
r = mat2gray(w(:,:,3),[min(min(w(:,:,3))) max(max(w(:,:,3)))]);
save IMAGEM r
save coordenadas w
dx = (w(1,N1,1) - w(1,1,1))/N1;
dy = (w(M1,1,2) - w(1,1,2))/M1;
R = makerefmat(w(1,1,1),w(1,1,2),dx,dy);
figure(1)
[c,h] = contour(w(:,:,3)); clabel(c,h), colorbar
colormap(hot)
figure(2)
h2 = mapshow(r,R);
axis image
```

## APÊNDICE C - CRIAÇÃO E INSTALAÇÃO DO PROGRAMA DE EXTENSÃO .EXE NO MATLAB.

Os passos seguintes são realizados a partir dos programas finais (gerador.m e gerador.fig) realizado do Matlab:

Criação do executável e uma série de arquivos:

- Passo 1 – Executar os seguintes códigos na janela de comando:

```
>> mcc -m gerador.m gerador.fig
```

Instalação do programa em um computador sem matlab:

- Passo 2 – Copiar o instalador do RunTime de um computador com Matlab:  
<matlabroot>\toolbox\compiler\deploy\win32\MCRInstaller.exe
- Passo 3 – Descompacte o instalador no computador sem Matlab, clicando duas vezes MCRInstaller;
- Passo 4 – No computador de destino instalar MCRInstaller em C:\gerador;
- Passo 5 – Depois de instalar o Runtime, garantir que C:\gerador\ v73\runtime\win32 está no path. Para fazer isso, clique sobre o ícone meu computador, selecione Propriedades, Avançado, Variáveis de ambiente, Variáveis do sistema. Em caso de não encontrar o caminho adicionar: C:\gerador\ v73\runtime\win32 ;
- Passo 6 - Copiar gerador.exe e gerador.ctf para o diretório do computador sem Matlab. Abrir o arquivo .EXE.

## APÊNDICE D - MEDIDAS RADIOMÉTRICAS

Quadro I - Pontos de coleta e suas respectivas medidas de taxa de dose absorvida no ar.

Pontos	Meridianos (mL)	Paralelos (mS)	Taxa de dose absorvida no ar (nGy/h)	
			Externa	Interna
P1	289067,31	9130025,18	100,92	100,92
P2	289849,30	9130026,54	261,00	116,58
P3	290096,84	9124847,69	191,40	239,25
P4	290091,78	9125953,79	147,90	295,80
P5	290135,15	9125634,32	147,90	157,91
P6	289074,74	9124556,51	304,50	174,00
P7	288701,19	9124968,48	191,40	326,25
P8	288921,80	9124958,44	304,50	101,36
P9	289016,01	9124857,11	287,10	204,45
P10	289473,90	9124091,56	191,40	162,40
P11	289862,04	9124584,46	191,40	275,79
P12	288676,36	9124613,30	191,40	169,94
P13	289626,83	9124169,69	147,90	191,40
P14	289027,34	9130081,41	100,92	100,92
P15	289029,55	9130081,42	100,92	100,92
P16	289560,96	9129404,69	191,40	191,40
P17	289559,86	9129404,68	191,40	147,90
P18	289558,75	9129404,68	191,40	191,40
P19	289557,65	9129404,67	191,40	191,40
P20	289861,53	9130247,82	191,40	169,65
P21	291700,01	9128087,06	147,90	147,90
P22	289689,49	9130727,09	124,41	136,16
P23	289693,43	9129620,99	124,41	136,16
P24	289697,37	9128514,88	124,41	136,16
P25	289315,25	9128385,93	124,41	124,41
P26	289030,65	9130082,53	100,92	100,92
P27	290047,58	9127180,28	147,90	169,65
P28	289735,19	9126997,45	191,40	100,92

Continuação do Quadro I

Pontos	Meridianos (mL)	Paralelos (mS)	Externa (nGy/h)	Interna (nGy/h)
P29	290533,09	9124466,96	191,40	240,56
P30	290726,11	9124463,42	191,40	101,36
P31	290385,03	9124771,58	191,40	165,30
P32	290221,78	9128402,23	147,90	356,70
P33	291041,67	9124429,46	191,40	146,74
P34	290398,24	9126466,22	191,40	162,40
P35	290372,58	9126773,60	191,40	261,00
P36	290161,36	9129074,48	191,40	261,00
P37	290503,89	9129181,12	191,40	229,10
P38	289716,62	9128164,33	100,92	93,38
P39	291767,67	9128490,00	304,50	147,90
P40	293450,26	9127852,71	124,41	147,90
P41	292930,53	9127666,76	124,41	100,92
P42	289416,15	9130199,33	100,92	124,41
P43	289416,54	9129874,02	100,92	147,90
P44	289425,16	9127987,12	100,92	147,90
P45	292532,91	9130491,08	55,68	
P46	293252,54	9129885,95	55,68	
P47	291897,42	9124681,13	55,68	
P48	292589,73	9125226,26	55,68	

## **ANEXOS**

### **ANEXO A – SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICO (SIG)**

A coleta de informações sobre a distribuição geográfica de recursos minerais, propriedades, animais e plantas sempre foi uma parte importante das atividades das sociedades organizadas. Até recentemente, no entanto, isto era feito apenas em documentos e mapas em papel, impedindo uma análise que combinasse diversos mapas e dados. Com o desenvolvimento, na segunda metade deste século, da tecnologia de Informática, tornou-se possível armazenar e representar tais informações em ambiente computacional, abrindo espaço para o aparecimento do geoprocessamento. Nesse contexto, o termo geoprocessamento denota a área do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica e que vem influenciando de maneira crescente as áreas de Cartografia, Análise de Recursos Naturais, Transportes, Comunicações, Energia e Planejamento Urbano e Regional. As ferramentas computacionais para geoprocessamento, chamadas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), permitem realizar análises complexas, ao integrar dados de diversas fontes e ao criar bancos de dados georeferenciados (CÂMARA et al., 2004).

Num país de dimensão continental como o Brasil, com uma grande carência de informações adequadas para a tomada de decisões sobre os problemas urbanos, rurais e ambientais, o geoprocessamento apresenta um enorme potencial, principalmente se baseado em tecnologias de custo relativamente baixo, em que o conhecimento seja adquirido localmente.

O SIG é qualquer sistema computadorizado de manuseio de informação que permite:

- Coletar, guardar e recuperar informação geograficamente localizada;
- Identificar localizações específicas num ambiente determinado;
- Determinar relações entre conjuntos de informação em um cenário específico;
- Analisar a informação espacialmente relacionada com uma base para tomar decisões com respeito à gestão do cenário em questão;
- Facilitar a geração de informação que possa ser utilizada também em modelos para a avaliação dos impactos dos instrumentos de política sobre a unidade territorial analisada;
- Mostrar, exibir, projetar, gráfica e numericamente, o cenário analisado.

Os tipos de informações a fornecer num SIG podem ser de qualquer natureza, com a única restrição de que a informação tem que ser atribuída conjuntamente com a posição espacial do ponto ao qual se refere. O uso dos SIGs é principalmente destinado à realização e representação de modelos digitais de áreas e volumes. Os tipos de aplicações são vários, tais como: monitoramento e gestão do ambiente e de áreas urbanas; mapas de risco e mapas estatísticos; localização provável de minério e escolha de áreas mais adequadas para armazenar substâncias especiais (LONGO; DINIS DA GAMA, 2005).

O SIG tem diversas características das quais podemos destacar algumas como (FELGUEIRAS, 1999):

- Manipulam representações digitais de dados espaciais. As ferramentas da geoestatística são usadas para entendimento e modelagem da variabilidade espacial de atributos. Os SIG, por sua vez, possibilitam que dados espaciais do mundo real sejam inseridos, consultados, analisados, transformados e apresentados para um conjunto particular de propósitos.
- São multidisciplinares com interesses comuns. As disciplinas de interesse de pelo menos dois sistemas são muitas (por exemplo: ciências de solo, agricultura, epidemiologia, geologia de exploração para engenharia de petróleo e mineração, hidrologia, ciência ambiental etc.) e semelhantes, pois estão relacionadas ao estudo e compreensão dos fenômenos e processos da natureza.

O progresso no SIG desenvolveu várias ferramentas no sentido melhorar os processos de tomada de decisão utilizando aplicações de conceitos de conjuntos fuzzy, de metodologias multicritério e de modelagem dinâmica (GUMPLICHT, 1996; FIGUEREDO et al., 1998; MACKAY; ROBINSON, 2000; SCOTT, 2003; RUHOFF et al., 2005; SILVA, 2005; LIOTTE, 2006; GHRIBI, 2006). Além disso, uma etapa necessária antes que os arranjos espaciais da paisagem possam ser completamente analisados em um ambiente SIG, é o desenvolvimento de ferramentas de aproximação ao raciocínio humano e aumento do nível da inteligência artificial no sistema (HARMON; ANDERSON, 2003; DRAGICEVIC ; MARCEAU, 2000; DIXON, 2005; LIA et al., 2006; FLEMING et al., 2007).

Em um estudo realizado considerando atributo espacial e temporal de dados à integração em uma base de dados do SIG, foi utilizada a teoria da lógica Fuzzy. Neste estudo, a interpolação espaço-temporal baseada nesta teoria foi aplicada a fim de modelar a falta de informação sobre a mudança que aconteceu entre alguns instantes consecutivos do período de estudo. Os resultados confirmam o potencial da aproximação, produzindo simulações realísticas da dinâmica do processo de urbanização (DRAGICEVIC; MARCEAU, 2000).

Dixon (2005) avaliou a sensibilidade dos modelos neuro-fuzzy utilizados para prever a vulnerabilidade das águas subterrâneas no contexto espacial pela integração do SIG e de técnicas neuro-fuzzy. O objetivo específico neste estudo foi avaliar a sensibilidade de modelos neuro-fuzzy no domínio espacial usando SIG em função (i) de conjuntos fuzzy; (ii) do número de conjuntos fuzzy, e (iii) da aprendizagem e validação de parâmetros (incluindo regras ponderadas). A análise de sensibilidade mostrou que os modelos neuro-fuzzy eram sensíveis à forma dos conjuntos fuzzy, ao número de conjuntos e as técnicas de validação usadas durante os processos de aprendizagem.

Na África do sul, na bacia do rio KwaZulu-Natal, devido a epidemia de cólera na região foi necessário um estudo nesta região. O estudo visou identificar áreas onde condições como: fatores sócio-ambientais tais como o comportamento humano e condições sanitárias do abastecimento de água seriam favoráveis ao desenvolvimento dessa doença. Para isso, foi utilizada uma ferramenta baseada em lógica fuzzy e SIG. Foi criado um sistema especialista e um mapa fuzzy como pode ser observado na Figura 34 (FLEMING et al., 2007). O modelo utilizado foi baseado na suposição que focos de cólera podem ocorrer devido a condições naturais, principalmente pelo florescimento de algas que propiciam o crescimento do vibrião colérico. A partir dos resultados obtidos, foi possível identificar que a propagação subsequente de cólera depende principalmente dos fatores socioeconômicos, tais como o comportamento humano e o acesso a fontes de águas tratadas e das condições sanitárias.



Figura 34 – Mapa das bacias do rio KwaZulu-Natal, os principais rios, e locais de casos relatados de cólera e uma superfície preliminar fuzzy para o crescimento de algas no mês de fevereiro (Fonte: FLEMING et al., 2007)

O uso da tecnologia de SIG's na seleção de sítios potenciais envolve a análise de parâmetros que satisfaçam a um conjunto de critérios. No trabalho realizado por Moreira (2001) foram utilizados oito métodos de inferência espacial para a integração dos dados dos quais foram utilizados métodos fuzzy e redes neurais artificiais. Para tal foi adotado um modelo prospectivo visando à definição de áreas potenciais à ocorrência de depósitos minerais radioativos no planalto de Poços de Caldas. A teoria da lógica fuzzy foi a que permitiu o maior refinamento na modelagem dos dados, permitindo a representação da

variação espacial dos atributos em superfícies contínuas. As funções de pertinência fuzzy possibilitaram a incorporação do conhecimento de forma bastante realista, resultando em cenários mais coerentes e menos sujeitos a erros. Um dos resultados deste trabalho pode ser visto na Figura 35.

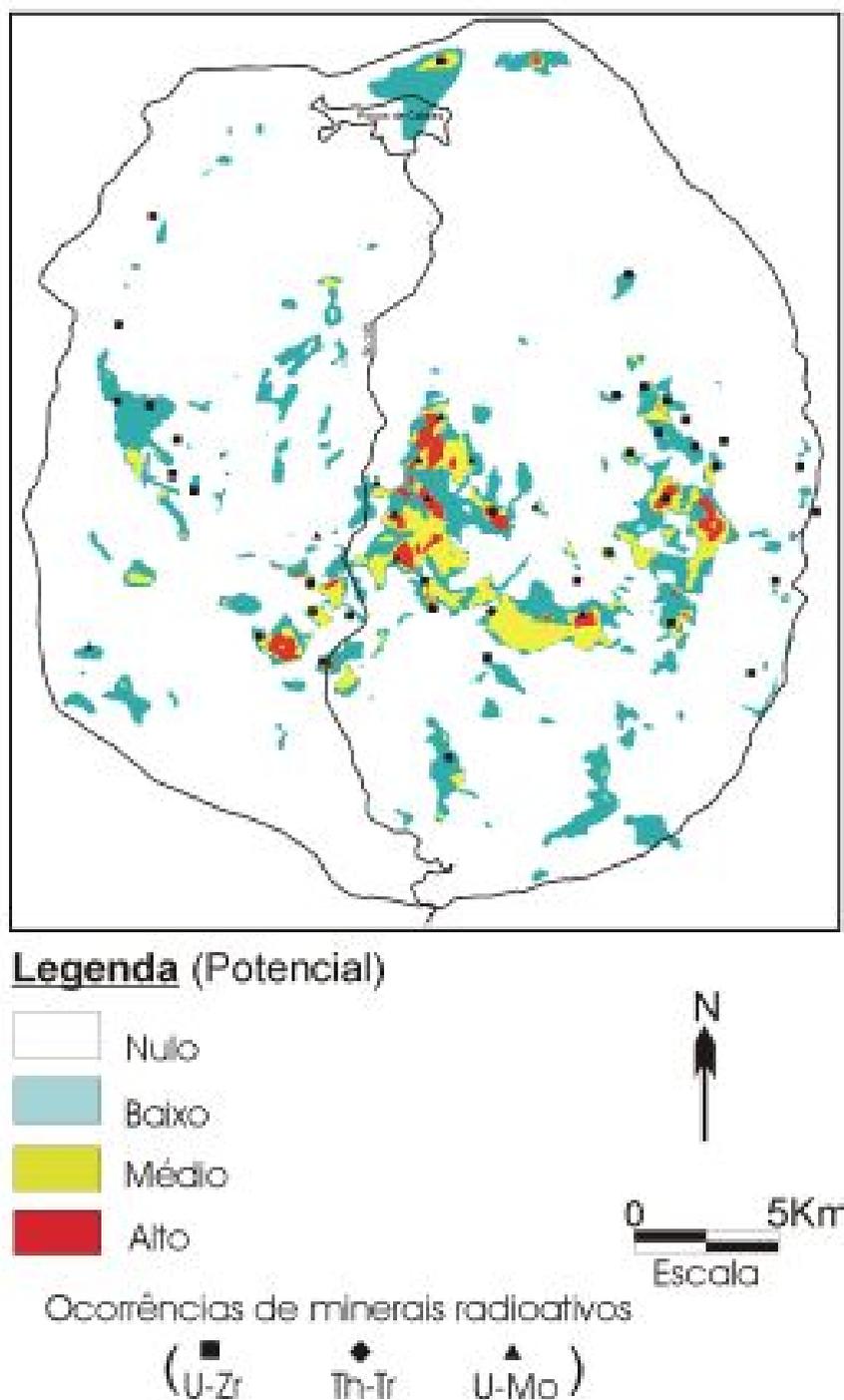


Figura 35 - Representação de favorabilidade à ocorrência de minerais radioativos, obtido segundo inferência por Redes Neurais Artificiais e inferências fuzzy (Fonte: MOREIRA, 2001).