

# Modelagem Fuzzy para a geração do mapa de solos do município de Mucugê – Chapada Diamantina – Brasil

Elane Fiúza Borges - elaneborges@gmail.com  
Ardemário de Barros Silva - abarros@uefs.br

## INTRODUÇÃO

A área de estudo compreende o município de Mucugê localizado na região da Chapada Diamantina, no estado da Bahia, Brasil, como se pode observar na Figura 1.

A existência de duas unidades de conservação de proteção integral, o Parque Nacional da Chapada Diamantina e o Parque Municipal de Mucugê, além das características que condicionam uma grande beleza cênica, constituem-se em grandes objetos de estudos por possuírem expressivas informações. No município de Mucugê têm-se também um banco genético em potencial, tanto do ponto de vista florístico quanto faunístico, com características peculiares sendo muitas das espécies endêmicas e em alguns casos ameaçadas de extinção, em função da prática predadora que se desenvolveu ao longo dos anos na região.

Soma-se a isto a atividade do agronegócio desenvolvida no município estudado na região do Pediplano Cimeiro, sendo que este agrega um conjunto de características físicas que propiciaram a prática da agricultura em larga escala, voltada para a exportação com utilização da técnica de irrigação por pivô-central.

Tanto as características físicas da paisagem quanto as atividades desenvolvidas pelo homem na área de estudo justificam a necessidade e relevância do mapeamento de solos para o município de Mucugê, até mesmo porque este se configura como um dos elementos que mais se altera na paisagem.

Desta maneira o objetivo desta pesquisa foi o de desenvolver uma metodologia de modelagem para mapeamento do solo de parte do município de Mucugê que foi integrada ao mapeamento já existente, utilizando para tanto a lógica fuzzy. Este trabalho está estruturado da seguinte forma: breve referencial teórico sobre os conjuntos nebulosos, ou lógica fuzzy; procedimentos metodológicos utilizados; resultados encontrados e discussão dos mesmos e, finalmente, apresenta-se as considerações acerca da pesquisa realizada.

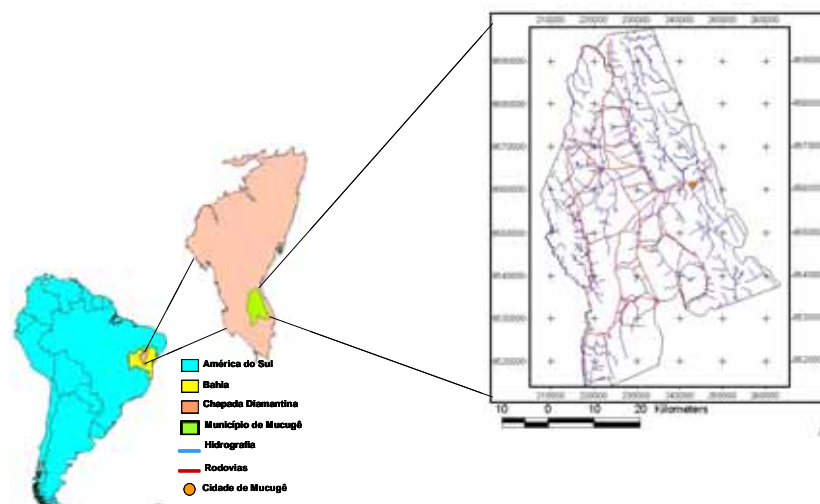


Figura 1: Localização da área de estudo

## LÓGICA FUZZY

Na natureza, os fenômenos e variáveis não ocorrem de forma estanque, não existe um linha que separa exatamente o limite entre uma vegetação do tipo Savana Estépica Florestada de uma Savana Estépica Arbórea, como se pode observar nos mapas de cobertura vegetal. Porém, o homem, como um ser dotado de racionalidade, criou mecanismos para representar o espaço e o faz na medida do possível. Contudo, deve-se considerar que são convenções que facilitam a abstração e, por conseguinte, a compreensão. Esta não é uma característica inerente apenas aos elementos da natureza, mas a tantos outros que se apresentam no universo de ambigüidades e informações vagas.

As técnicas computacionais tradicionalmente usadas, como a lógica booleana, não explicam as questões supracitadas, pois classifica as variáveis apenas como *sim* ou *não*, que equivale ao mesmo que *verdadeira* ou *falsa*, isto porque a análise é feita sob a ótica binária que, por analogia poder-se-ia comparar com um jogo, no qual ou se ganha ou se perde, tudo ou nada.

As primeiras noções da lógica dos conceitos "vagos" ou imprecisos foram desenvolvidas pelo lógico polonês Jan Lukasiewicz (1878-1956). Somente em 1920 foram introduzidos conjuntos com graus de pertinência sendo 0,  $\frac{1}{2}$  e 1 e, posteriormente aplicou-se os números infinitos de valores entre 0 e 1. A primeira publicação sobre lógica "fuzzy" data de 1965, quando recebeu este nome. Seu autor foi Lotfi Asker Zadeh.

Zadeh criou a lógica "fuzzy" combinando os conceitos da lógica clássica e os conjuntos de Lukasiewicz, definindo graus de pertinência. Esta lógica desenvolvida por Zadeh, também denominada de Conjuntos Nebulosos, permite que níveis de incertezas sejam tratados. A lógica Fuzzy estabelece um grau de verdade ou o, também chamado, grau de pertinência, que permite afirmar a premissa como sendo parcialmente falsa ou parcialmente verdadeira. Esta lógica está relacionada com a imprecisão e por isso utiliza conceitos vagos, ambíguos e qualitativamente incompletos, tais como o dia está parcialmente nublado, a economia está estável, os professores são jovens. Estes são conceitos ou situações que tratam diretamente da imprecisão das coisas, nas quais afirmar "sim" ou "não" pode não condizer com a realidade. Sendo assim Escada (1998) afirmou que:

“(...) diferentemente da teoria clássica de conjuntos, onde uma função de pertinência é definida como verdadeira ou falsa, ou seja, 1 ou 0, o grau de pertinência do conjunto fuzzy, é expresso em termos de escala que varia continuamente entre 0 e 1. Indivíduos próximos ao conceito central tem valores da função de pertinência próximos de 1, os que estão distantes recebem valores menores, próximos de 0. (ESCADA, 1998, p.7).

Desta forma, uma premissa pode variar no intervalo entre 0 e 1, o que a leva ser parcialmente verdadeira ou parcialmente falsa, pois a vagueza das informações advindas da linguagem natural pode ser melhor representada.

A lógica fuzzy proporciona certo grau de pertinência às variáveis, uma vez que permite mensurar, por exemplo, a probabilidade de uma classe de solos ser Latossolo, ao contrário de apenas afirmar sim ou não. Isto acontece porque a lógica Fuzzy permite uma maior flexibilidade nas combinações das variáveis que compõem os mapas.

A Figura 2-a representa graficamente a lógica booleana e a Figura 2-b a lógica fuzzy, como se pode observar.

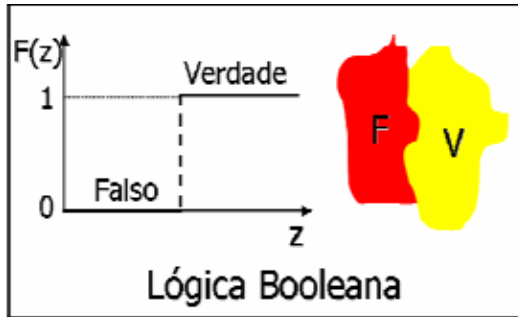


Figura 2-a - Lógica booleana

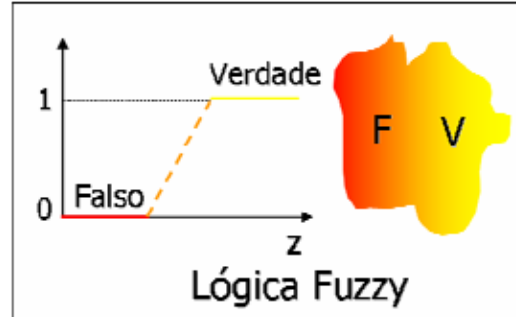


Figura 2-b - Lógica fuzzy

Os valores de cada conjunto fuzzy pode apresentar diferentes comportamentos a depender das propriedades que compõe cada variável. Desta forma a disposição dos membros pode admitir diferentes curvas. As Figuras 3-a e 3-b ilustram graficamente o comportamento das variáveis na lógica fuzzy, sendo que na primeira têm-se a disposição linear dos conjuntos fuzzy e na segunda tem-se a disposição dos conjuntos fuzzy está representada através da função sigmoideal. Conhecer o comportamento da variável é fundamental para a determinação dos pesos fuzzy na realização de qualquer operação que utilize está lógica.

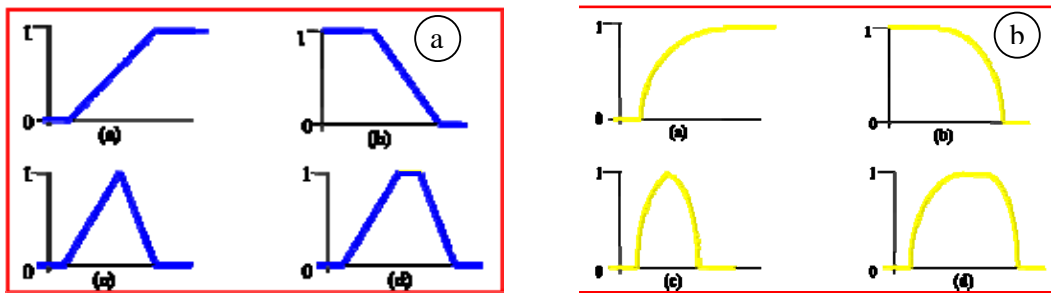


Figura 3-a - Representação de funções lineares de conjuntos fuzzy; Figura 3-b - Representações de funções sigmoideais de conjuntos fuzzy

Fonte: Adaptado de Silva (2003)

## METODOLOGIA

Reconhecendo o solo como uma das variáveis mais importantes para estudos integrados da paisagem, desenvolveu-se uma metodologia para a geração do mapa de solos, pois o mapa existente na base de dados não contemplava toda área de estudo, mas apenas uma área compreendida basicamente pela Serra do Sincorá, parte leste da área de estudo e os Geraes de Mucugê, região central do município, ficando toda a parte ocidental e o extremo norte e sudeste da área de estudo sem informação.

A qualidade do mapa convencional não possibilitou uma digitalização com maior acúrcia, pois o mesmo não possuía as classes identificadas por cor, contendo apenas a sigla da classe de solo no interior do polígono pertencente, o que aumentou os esforços para realização da etapa de digitalização do mapa de solos correspondente à parte da área de estudo e condicionou a vetorização a um processo manual.

Os procedimentos metodológicos para a digitalização do mapa de solos analógico estão sintetizados no fluxograma apresentado na Figura 4.

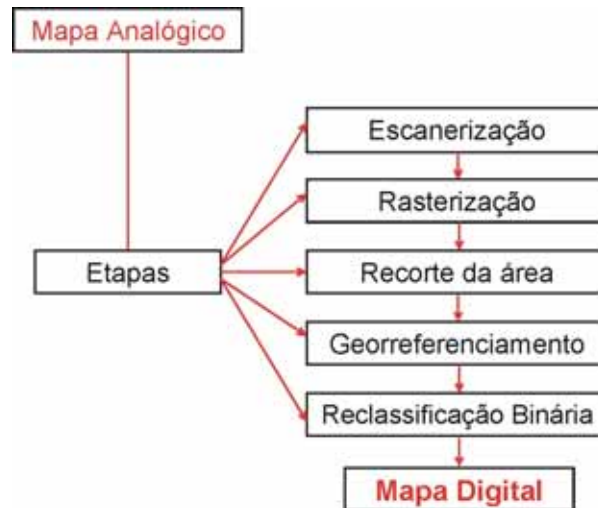


Figura 4 - Fluxograma das etapas de conversão do mapa de solos no formato analógico para o digital.

O mapa analógico foi vetorizado em um *escanner* de rolo, rasterizado e exportado para o formato *tiff*. Em um software de processamento digital de imagem, o mapa foi georreferenciado, utilizando a técnica de georreferenciamento imagem-mapa, na qual os pontos de controle foram coletados no mapa convencional e associados à imagem (mapa no formato digital). No mapa analógico as classes de solos estavam representadas pela classificação antiga, portanto fez-se necessário uma adaptação para a nova classificação (Embrapa, 1999), como se pode observar no Quadro 1.

Quadro 1 - Adaptação da classificação antiga de solos à nova classificação proposta pela EMBRAPA (1999).

Antiga Classificação	Nova Classificação
Latossolos Vermelho Amarelo	Latossolos Vermelho Amarelo
Latossolos Vermelho	Latossolos Vermelho
Solos Hidromórficos Gleizados	Gleissolos
Podzólico	Argissolos
Podzol Acinzentado	Espodossolos
Solos Litólicos	Neossolos Litólicos
Areias Quartzosas	Neossolos Quartzarênicos

Algumas classes existentes no mapa de solos, correspondentes a área conhecida, foram reclassificadas apenas para o primeiro nível, são elas: Espodossolos, Gleissolos, Argissolos e Cambissolos. As exceções estão entre as classes dos Neossolos Litólicos, Neossolos Quartzarênicos, Latossolos Vermelho-Amarelos e Latossolos Vermelhos que foram discriminadas até o segundo nível.

Em função da não existência do mapa de solos que contemplasse todo o município, fez-se necessário desenvolver uma metodologia que pudesse ser aplicada para a geração do mapa de solos da área não mapeada. O mapa de solos disponível no banco de dados intitulado Mapa de Solos do alto curso da Bacia do Paraguaçu

contemplava apenas a parte ocidental da área de estudo. Contudo, este material forneceu os parâmetros necessários à realização de uma modelagem para obtenção do mapa de solos da área não mapeada. A Figura 5 ilustra a área onde se conhecia as informações de solos (área mapeada) e a área onde se desconhecia as informações (área não mapeada).

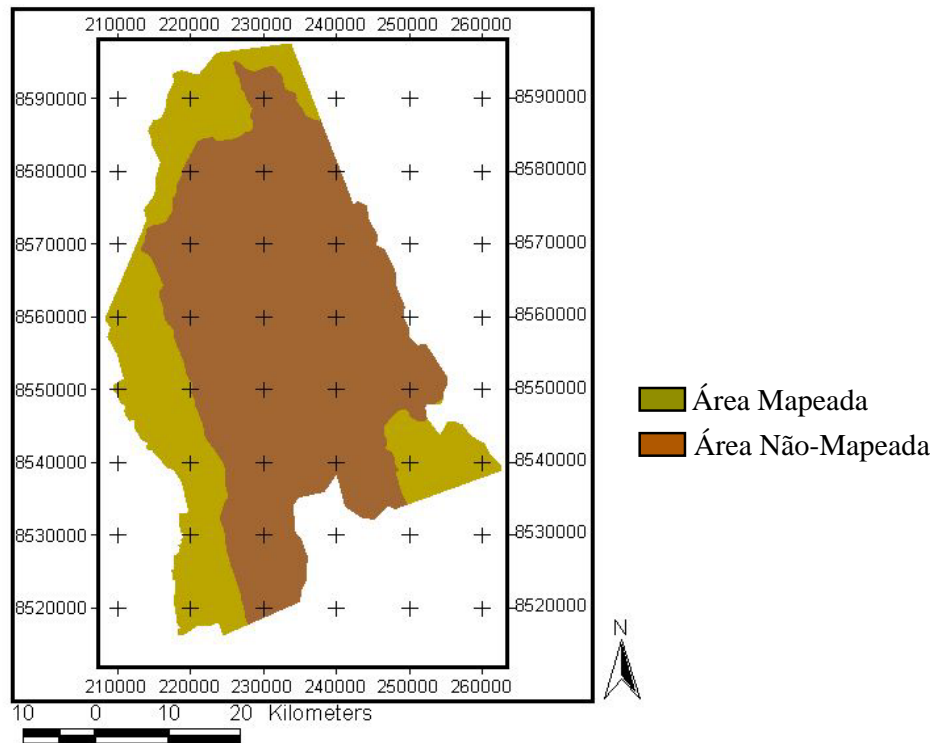


Figura 5 - Mapa que representa as áreas onde o solo estava mapeado (área conhecida) e as áreas não mapeadas (áreas desconhecidas)

Os parâmetros foram estabelecidos através dos relatórios, com os dados estatísticos de cada variável, produzidos por meio da tabulação cruzada com o mapa de solos da área conhecida a partir de cada elemento da paisagem (geologia, vegetação, declividade e altimetria) envolvido na modelagem, correspondentes à mesma área. Na Figura 6, visualiza-se a metodologia aplicada para a elaboração da modelagem do mapa de solos.

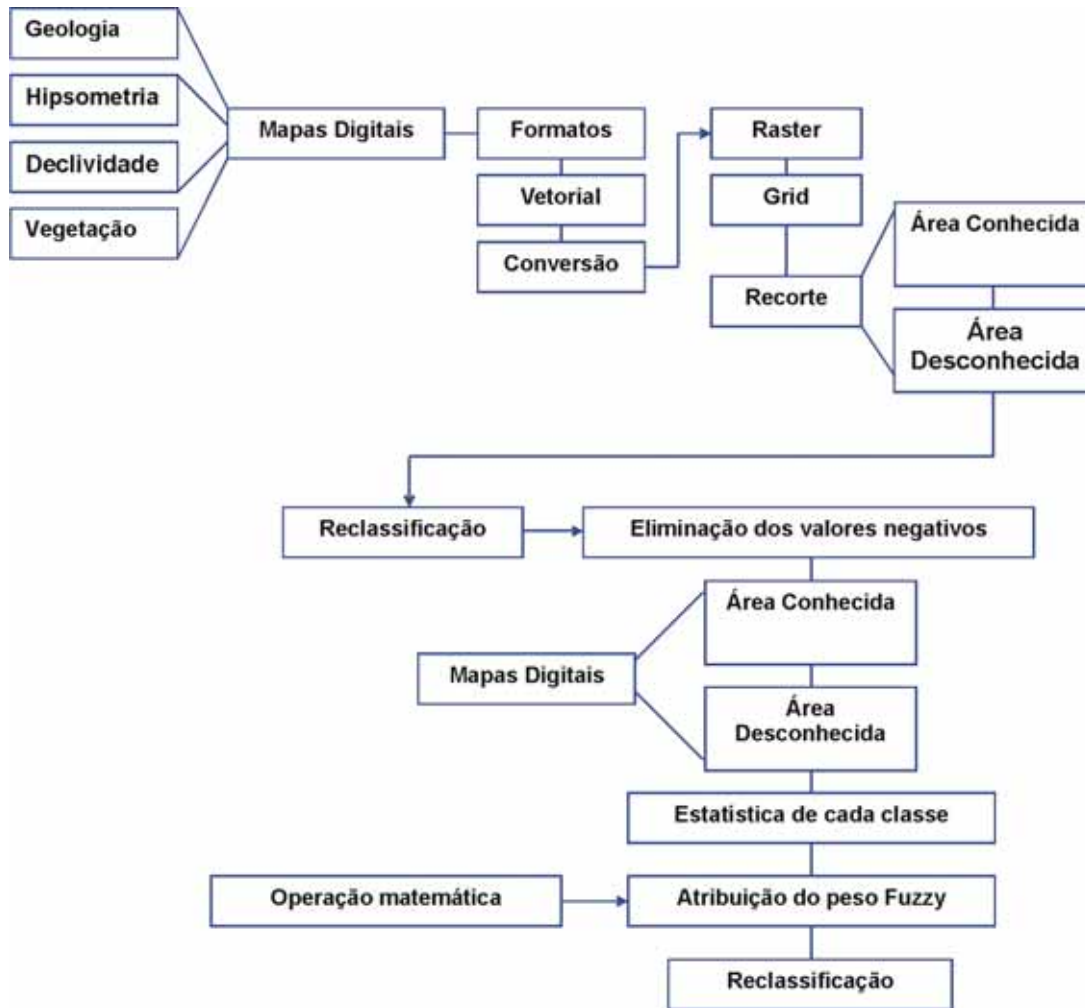


Figura 6 - Fluxograma da modelagem para a geração do mapa de solos

A modelagem realizada foi com base na lógica fuzzy, pois, como discutido teoricamente, os conjuntos fuzzy permitem que zonas de transição sejam criadas, pois indica um determinado grau de incerteza e associa a maior ou menor probabilidade de ocorrência de determinada classe.

Para atribuir os pesos fuzzy para cada classe das variáveis envolvidas na modelagem, como exemplo o peso que a litologia do tipo granito teria para o Neossolos Litólicos, gerou-se uma estatística para cada classe de solos associada especificamente a uma determinada variável física, sendo repetido o processo para as demais variáveis da paisagem. Posteriormente, realizou-se uma operação matemática, objetivando identificar a percentagem de cada classe de solos para os intervalos de cotas altimétricas previamente delimitadas no mapa hipsométrico. Realizou-se o mesmo procedimento para as demais variáveis utilizadas na modelagem, tais como declividade, vegetação e geologia. Os esforços foram na tentativa de encontrar resposta para perguntas do tipo: “Qual a proporção de Latossolos Vermelho-Amarelos na classe de vegetação Savana Arborizada?”. Encontrada a resposta, procedeu-se da mesma maneira para responder às perguntas subsequentes, que obviamente se referiam às outras classes de vegetação e dessa maneira se procedeu com as demais variáveis da paisagem inseridas na modelagem. O fluxograma apresentado na Figura 7 demonstra a etapa de análise dos dados e atribuição dos pesos fuzzy para as variáveis.

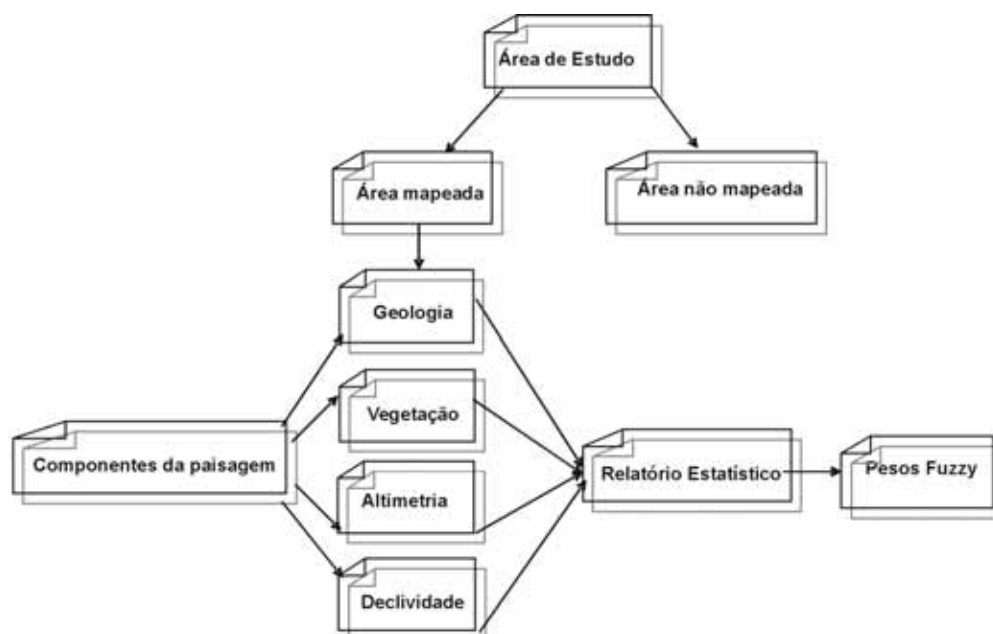


Figura 7 - Fluxograma da etapa metodológica de análise e atribuição dos pesos fuzzy.

Para a geração dos relatórios estatísticos, foi feita a tabulação cruzada entre o mapa de solos da área conhecida e os mapas, isoladamente, de geologia, vegetação, declividade e altimetria referentes à área conhecida. O valor do atributo de uma determinada variável que apresentou maior percentagem, para a classe de solo então analisada, no relatório resultante da tabulação cruzada foi selecionado e considerado como o peso fuzzy, como se pode observar nas Tabelas 1, 2, 3 e 4, cujos valores mais elevados estão realçados.

Tabela 1 - Relatório da Tabulação cruzada do mapa de solos com o mapa de geologia

GEOLOGIA	SOLOS								Total
	RQ	C	G	E	LV	LVA	P	RL	
Arenito Conglomerático, Quartzito Arenito	0	0.01	0	0.18	0	0	0	9.22	9.41
Metarenito, Quartzito, Metaconglomerado	0.05	0	0.39	0	0.03	0.54	0.09	0.3	1.4
Metassiltito, Ardósia, Metarenito	0	0.5	0.06	0.05	0	0.23	0.03	1.44	2.31
Areia, Argila, Cascalho, Laterita	0.31	0.23	0.89	0	0.19	18.4	1.53	0.63	22.17
Areia, Argila	0	0	0.09	0	0	0.02	0.02	0	0.13
Arenito	0	0.08	0	0	0	0	0	0.77	0.86
Conglomerado suportado por Matriz, Conglomerado suportado por Clastos, Conglomerado Polimitico, Arenito Conglomerático	0	0	0	0	0	0	0	0.89	0.89
Metarenito, Metapelito	0	0.01	0	0	0	0.12	0	0	0.13



Tabela 2 - Relatório da Tabulação cruzada do mapa de solos com o mapa de vegetação

VEGETAÇÃO	SOLOS								
	RQ	C	G	E	LV	LVA	P	RL	Total
Savana Arborizada	0.36	0.02	0.34	0	0.21	12.42	0.47	0.51	14.34
Savana Florestada	0	0.12	0.37	0.12	0	5.17	0.58	0.68	7.05
Vegetação com influência Fluvial	0	0.02	0.35	0	0	0.4	0.56	0.11	1.45
Savana Estépica Arborizada	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0.01
Campo Rupestre	0	0.07	0	0.08	0	0	0	5.31	5.47
Vegetação com influência Lacustre	0	0.02	0.24	0	0	0.03	0.02	0	0.31
Savana Gramíneo Lenhosa	0	0.05	0.05	0.03	0	0.12	0.02	6.25	6.51
Floresta Estacional	0.01	0.52	0.08	0	0	1.16	0.01	0.39	2.16

Tabela 3 - Relatório da Tabulação cruzada do mapa de solos com o mapa de altimetria

ALTIMETRIA (m)	SOLOS								
	RQ	C	G	E	LV	LVA	P	RL	Total
514-600	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01
601-700	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.03
701-800	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.09
801-900	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.27	0.34
901-1000	0.00	0.07	0.05	0.18	0.00	0.01	0.00	1.11	1.43
1001-1050	0.00	0.18	0.88	0.04	0.00	1.72	0.39	0.93	4.15
1051-1200	0.24	0.32	0.45	0.01	0.00	15.82	1.25	4.57	22.65
1201-1300	0.12	0.09	0.05	0.00	0.09	1.72	0.01	3.14	5.21
1301-1400	0.00	0.01	0.00	0.00	0.13	0.03	0.00	2.18	2.35
1401-1690	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00

Tabela 4 - Relatório da Tabulação cruzada do mapa de solos com o mapa de declividade

DECLIVIDADE (graus)	SOLOS								
	RQ	C	G	E	LV	LVA	P	RL	Total
0 - 5	0.32	0.18	1.08	0.17	0.2	18.6	1.29	3.89	25.74
5.1 - 10	0.05	0.23	0.32	0.03	0.01	0.65	0.34	3.76	5.39
10.1 - 15	0	0.12	0.01	0.01	0	0.03	0.01	1.92	2.11
15.1 - 25	0	0.17	0	0.01	0	0	0	2.17	2.36
25.1 - 35	0	0.07	0	0.01	0	0	0	0.98	1.06
35.1 - 45	0	0.02	0	0	0	0	0	0.34	0.36
45.1 - 55	0	0.02	0	0	0	0	0	0.11	0.12
55.1 - 65	0	0.01	0	0	0	0	0	0.03	0.03
65.1 - 88	0	0	0.01	0	0	0.02	0.02	0.06	0.12

Desta maneira, obtiveram-se os parâmetros para definição dos pesos fuzzy para cada atributo dos diferentes mapas (classes de vegetação, faixas altimétricas, litologia e intervalos de declividade). Isto é, produziu-se um relatório o qual evidenciou um conjunto de características (condicionantes) referentes aos elementos da paisagem para cada tipo de solo, pois o objetivo foi o de, a partir do conhecimento de solos da área mapeada, obter os parâmetros através da análise estatística para a definição dos pesos fuzzy de cada atributo para as classes de solos e conseqüentemente gerar o mapa de solos da área não contemplada (área desconhecida). Nas Tabelas 5, 6, 7 e 8, têm-se os



pesos fuzzy para cada um dos mapas envolvidos na modelagem para a geração do mapa de solos.

Tabela 5 - Pesos fuzzy para a variável geologia

<b>GEOLOGIA</b>	<b>Maior valor predominante</b>	<b>Porcentagem (%)</b>	<b>Peso Fuzzy</b>	<b>Classes de Solos</b>
Arenito Conglomerático, Quartzito Arenito	9.2	29.9	0.3	RA
Metarenito, Quartzito, Metaconglomerado	0.5	1.6	0.02	LVA
Metassiltito, Ardósia, Metarenito	1.4	4.5	0.05	CA
Areia, Argila, Cascalho, Laterita	18.4	59.9	0.6	LVA
Areia, Argila	0.09	0.3	0.003	HG
Arenito	0.08	0.3	0.003	CA
Conglomerado suportado por Matriz, Conglomerado suportado por Clastos, Conglomerado Polimitico, Arenito Conglomerático	0.9	2.9	0.03	RA
Metarenito, Metapelito	0.12	0.4	0.04	LVA
<b>TOTAL</b>	<b>30.69</b>	<b>100</b>	<b>1</b>	

Tabela 6 - Pesos fuzzy para a variável vegetação

<b>VEGETAÇÃO</b>	<b>Maior valor predominante</b>	<b>Porcentagem</b>	<b>Peso Fuzzy</b>	<b>Classes de Solos</b>
Savana Arborizada	12.4	39.87	0.4	LVA
Savana Florestada	5.2	16.72	0.17	LVA
Vegetação com Influência Fluvial	0.6	1.93	0.02	PC
Campo Rupestre	5.3	17.04	0.17	RA
Vegetação com Influência Lacustre	0.2	0.64	0.01	HG
Savana Gramíneo Lenhosa	6.2	19.94	0.2	RA
Floresta Estacional	1.2	3.86	0.04	LVA
<b>TOTAL</b>	<b>31.1</b>	<b>100</b>	<b>1</b>	

Tabela 7 - Pesos fuzzy para a variável altimetria

ALTIMETRIA	Maior valor predominante	Porcentagem	Peso Fuzzy	Classes de Solos
514-600	0.01	0.04	0	—
601-700	0.02	0.08	0	RA
701-800	0.06	0.24	0	CA
801-900	0.08	0.32	0	CA
901-1000	1.1	4.41	0.04	RA
101-1050	1.7	6.81	0.07	LVA
1051-1200	15.8	63.28	0.63	LVA
1201-1300	3.1	12.41	0.12	RA
1301-1400	2.1	6.81	0.08	RA
1401-1690	1	0.32	0.04	RA
TOTAL	24.97	94.71	1	

Tabela 8 - Pesos Fuzzy para a variável declividade

DECLIVIDADE	Maior valor predominante	Porcentagem	Peso Fuzzy	Classes de Solos
0 - 5	18.6	68.7	0.69	LVA
5.1 - 10	3.8	14	0.14	RA
10.1 - 15	1.9	7	0.07	RA
15.1 - 25	2.2	8.1	0.08	RA
25.1 - 35	0.1	0.4	0	RA
35.1 - 45	0.3	0.4	0.01	RA
45.1 - 55	0.1	0.4	0	RA
55.1 - 65	0.03	0.1	0	RA
65.1 - 88	0.06	0.2	0	RA
Total	27.09	99.3	1	

Os mapas de vegetação, altimetria, declividade e geologia, derivados da lógica Fuzzy foram integrados através da álgebra de mapas utilizando o operador “soma”. Desta forma, obteve-se o mapa de solos da área anteriormente não mapeada (área desconhecida). Integrou-se os mapas de solos da área conhecida e o novo mapa de solos (área desconhecida) resultante da modelagem através do operador “soma” e obteve um mapa de solos que contemplou toda a área de estudo.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

O georreferenciamento do mapa de solos apresentou RMS (Mean Square Error) de 12 m. Este valor está dentro da margem de erro de acordo os cálculos feitos para a escala de estudo que estabelece até 25 m como valor permitido.

Na modelagem para a geração do mapa de solos a partir dos parâmetros pré-existent, o resultado (Figura 9) não apresentou novas classes. As classes de solos mapeadas foram denominadas até o segundo nível, conforme a classificação utilizada na área parcialmente mapeada. A área mapeada através da modelagem correspondeu às classes Neossolos Litólicos e Latossolos Vermelho-Amarelos.

A modelagem para a geração do mapa de solos da área onde não se tinha informações esteve atrelada ao mapa de solos da área mapeada, pois os parâmetros para estabelecer os pesos fuzzy para cada variável inserida na modelagem foram associados

aos dados pré-existentes, isto é, às classes de solo existentes na área conhecida, como demonstraram os relatórios estatísticos (Tabelas 1, 2, 3 e 4) que foram gerados através da tabulação cruzada entre o mapa de solos e as variáveis declividade, altimetria, geologia e vegetação.

A modelagem fuzzy para a geração do mapa de solos não gerou zona de transição. O mapa de solos de toda a área de estudo está representado na Figura 9.

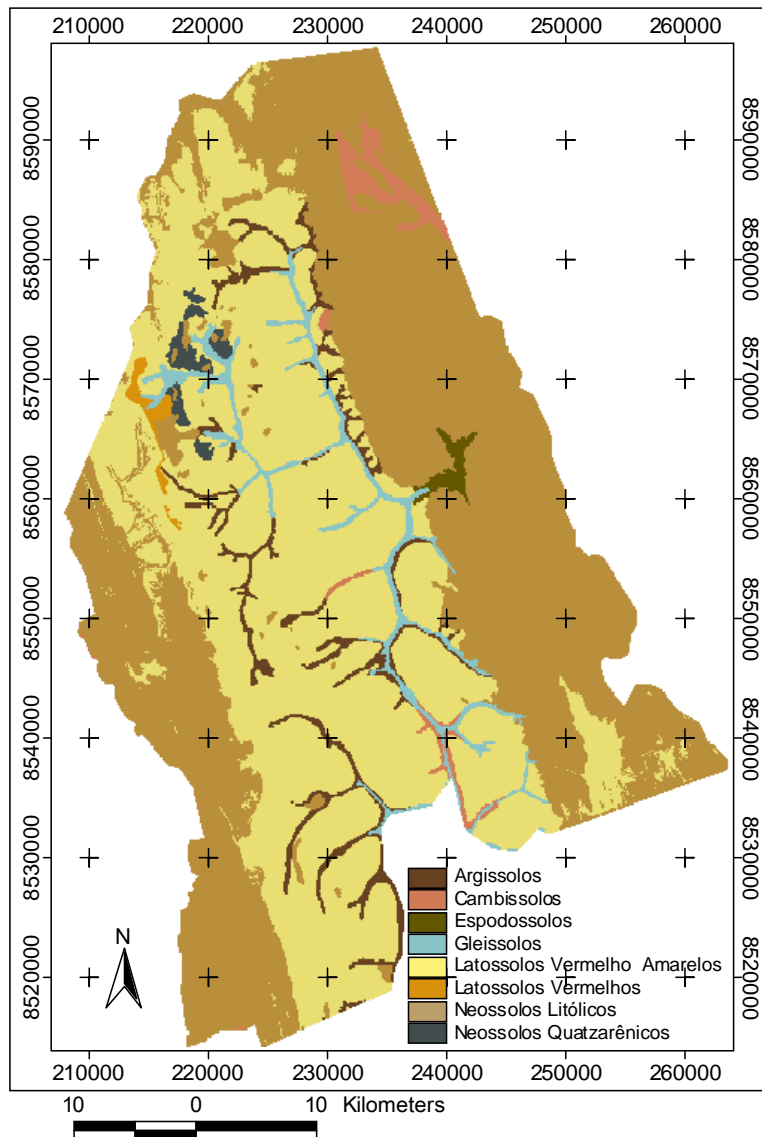


Figura 9 - Mapa de Solos

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso das ferramentas de Geotecnologias foi necessário para o desenvolvimento da modelagem de solos, pois somente por meio do SIG foi possível integrar diversas variáveis da paisagem, compreender e atribuir um peso como indicativo de quanto cada uma delas contribui para a existência de um determinado tipo de solo. Isto se ratifica quando se considera que o solo é um dos elementos da paisagem que sofre alteração

direta a partir da interação existente entre a litologia, o relevo e o seu modelado, o clima, o tempo, os seres vivos e, inclusive, por meio das ações antrópicas. Portanto a metodologia empregada é considerada de grande relevância, por permite uma análise integrada dos elementos da paisagem na realização da modelagem para obtenção do mapa de solos.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de Estatística e Geoestatística**. São Leopoldo: Unisinos, 2005.165p.

CARVALHO, C. C. N. **Mapa de Solos na Região de Mucugê (BA): Uma proposta Metodológica usando Inferência Fuzzy**. 82f. Monografia (Especialização) - UEFS, Feira de Santana, 2006.

DAGHLIAN, J. **Lógica e Algebra de Boole**. São Paulo: Atlas, 1995. 167p

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa, 1999. 412p.

ESCADA, M. I. S. **Aplicação de Técnica Fuzzy em SIG como alternativa para o Zoneamento Ecológico Econômico (ZEE)**. Trabalho de Curso (Mestrado) – INPE, São José dos Campos, 1998.

IBGE. **Diagnóstico dos Recursos Naturais da Bacia do Alto Paraguaçu: mapa de solos. Escala 1:100.000**. IBGE - Bahia: IBGE, 1988 (Relatório interno não publicado).

SFC-SEMARH. **Mapa de Vegetação do Estado da Bahia na escala de 1:100.000**. Folhas Lençóis, Palmeira, Mucugê e Piatã. Salvador, 1998.

SILVA, A. de B. **Sistemas de Informações Geo-referenciadas: conceitos e fundamentos**. São Paulo: Unicamp, 2003, 236 p.

SRH. **SIG Bahia**, 2003. CD-ROM