

A CARTOGRAFIA TEMÁTICA E O PROBLEMA DOS LIMITES ENTRE CLASSES - SOLUÇÕES ATRAVÉS DO GEOPROCESSAMENTO E DA CLASSIFICAÇÃO CONTÍNUA

Margareth G. SIMÕES

Pesquisadora da área de Geoprocessamento do CNPS/EMBRAPA
Rua Jardim Botânico, 1024. Cep 22.460-000, Rio de Janeiro

Resumo

A leitura integrada do ambiente é um instrumento para a realização de uma análise realista dos fenômenos que ocorrem no meio em que se vive. As ferramentas disponíveis no Geoprocessamento, seja através da utilização de Sistemas de Informação Geográfica (SIGs), seja através do uso de técnicas de Sensoriamento Remoto, tenderão cada vez mais a serem utilizadas nos processos de análise da Geoecologia ou Ecologia da Paisagem.

Este trabalho visa contribuir nesta direção, apresentando a interligação da Geoecologia com as técnicas de Geoprocessamento, abordando as limitações existentes nos processos convencionais de representação dos contornos entre classes e apresentando novas técnicas de mapeamento automatizado que poderão servir de ferramenta para as análises ambientais realizadas através da Geoecologia.

Abstract

The integrative approach to the environmental studies is a means to fulfilling a realistic analysis of the phenomena that occur around us. The tools available by the Geographic Information Systems and the Remote Sensing techniques tend to be even more used for the analysis based on the Landscape Ecology theory.

This work aims at contributing in this direction, presenting the interrelation between Landscape Ecology and Geoprocessing techniques, showing the limitations of the conventional processes for representing the boundaries between the classes and presenting new techniques for automated mapping which may be used as tools for environmental analyses through the Landscape Ecology.

1. Introdução

A paisagem pode ser compreendida como uma escala mais ampla resultante da interligação espaço e tempo. A dinâmica temporal deve, portanto, ser destacada nos estudos da paisagem, bem como a padronização espacial. Padrões espacialmente heterogêneos podem ser indicadores importantes de fenômenos naturais e/ou de intervenções humanas e devem ser destacados e estudados em detalhe.

O estudo destes padrões e as influências ou conseqüências advindas ou transferidas às áreas circunvizinhas podem ser um meio de interpretação das relações da dinâmica

espaço-temporal. Os padrões podem ser interpretados como respostas individuais aos gradientes espaciais no ambiente, conforme apresentado por GLEASON (1926).

Segundo TURNER (1989) a ênfase no padrão e no processo é o que diferencia a Ecologia da Paisagem de outras disciplinas ecológicas. Conseqüentemente, os padrões da paisagem e seus efeitos nos processos ecológicos devem ser estudados. Há, entretanto, necessidade de se determinar os limites destes padrões, ou seja, os limites internos da paisagem e suas transições. E é baseado na tentativa de se solucionar este problema que serão apresentadas nos próximos capítulos as limitações atuais do Geoprocessamento e como as técnicas de mapeamento automatizado e Sensoriamento

Remoto poderiam ser aprimoradas para servirem de ferramentas à detecção de padrões heterogêneos e na representatividade das transições entre eles.

Conforme definido por TURNER (*op. cit.*): "A Ecologia da Paisagem dá ênfase às amplas escalas espaciais e aos efeitos ecológicos da produção de padrões espaciais nos ecossistemas. E considera:

- o desenvolvimento e a dinâmica da heterogeneidade espacial;
- interações e intercâmbios ao longo de paisagens heterogêneas;
- influências da heterogeneidade espacial nos processos bióticos e abióticos;
- o manejo da heterogeneidade espacial."

A utilização, portanto, dos conceitos metodológicos advindos da Ecologia da Paisagem podem nortear, de forma mais eficiente, o planejamento e a tomada de decisão em relação ao uso da terra.

Os processos ecológicos da paisagem podem ser estudados em diferentes escalas espaciais e temporais. A paisagem pode relacionar-se à superfície da terra e seus *habitats* associados em diferentes escalas espaciais. O conceito mais simples de paisagem, relaciona-se ao mosaico ambiental, ou seja, é o que a considera como sendo uma área espacialmente heterogênea.

Na Ecologia da Paisagem considerações sobre escala temporal são extremamente importantes e devem ser sempre relevadas. A medida dos padrões espaciais e da heterogeneidade é dependente da escala que está sendo utilizada. É importante atentar que uma paisagem dinâmica pode exibir um mosaico estável numa escala espacial, o que pode não ocorrer numa outra escala mais detalhada. Portanto, a escala na qual os estudos são conduzidos pode influenciar profundamente as conclusões.

A maioria das paisagens tem sido influenciada pelo uso humano da terra. O mosaico de paisagem resultante é uma mistura de fragmentos naturais e antrópicos que variam em tamanho, forma e distribuição.

As mudanças na diversidade da paisagem teriam efeitos na diversidade das espécies, no uso dos *habitats* pela vida selvagem e no conteúdo de nutrientes e produtividade de sistemas aquáticos. Além disto, o tamanho e disposição de fragmentos da paisagem podem refletir fatores do meio, como topografia ou tipo de solo.

Segundo TURNER (*op. cit.*), a quantidade de bordas entre diferentes elementos da paisagem poderá ser importante para o deslocamento de organismos ou transporte de materiais através de barreiras e, a relevância do conhecimento do *habitat* de borda para várias espécies deve ser considerada. Torna-se, portanto, necessário monitorar as bordas, quando se quantificam padrões espaciais. As medidas de padrões de adjacência e a direcionabilidade dos tipos de cobertura podem ser quantificadas, usando-se a *probabilidade de vizinho mais próximo*, que é um algoritmo disponível nos sistemas de processamento de imagens e utilizado na classificação de imagens de satélite. Portanto, as medidas quantitativas poderiam ser facilmente aplicadas a dados resultantes de Sensoriamento Remoto, o que permitiria monitorias de mudanças na paisagem em escalas amplas.

A *probabilidade de vizinho mais próximo*, entretanto, não soluciona o problema dos limites das bordas, como será abordado adiante. Este algoritmo irá considerar a existência de fronteiras rígidas entre os padrões, o que não é desejável. Esta é uma das limitações do Sensoriamento Remoto, que com a abordagem dada pela Geoecologia, apresentando a importância dos estudos e preservação das bordas, motivou a pesquisa de novas alternativas na classificação de imagens.

A coleta de dados sobre a distribuição das propriedades da superfície da Terra tem sido tratada como uma atividade importante da sociedade organizada. Desde as civilizações antigas até os tempos modernos, os dados espaciais têm sido coletados e disponibilizados na forma de mapas. Os avanços na avaliação dos recursos naturais através da geologia, geomorfologia, ciência

dos solos, ecologia e etc. começaram a partir do século XIX e têm continuado até os dias de hoje. A diferença básica em termos metodológicos é que atualmente, com o surgimento do enfoque dado através da Geoecologia, estas ciências não são tratadas de forma estanque. Ao contrário, tem-se privilegiado o estudo da influência de cada uma, na identificação das causas dos problemas que surgem pela ação simultânea dos vários componentes a elas associados. Esta integração possibilita o fornecimento de novas informações a serem mapeadas, através de um processo de classificação.

A classificação é uma operação essencial no processo de redução de dados, onde conjuntos complexos de observações se tornam inteligíveis. Apesar de todo processo de classificação envolver perda de informação, uma boa classificação objetiva reduzir não apenas a perda de informação para um mínimo, como também proporcionar um meio conveniente de transferência de informação através da identificação de grupos naturais que possuam propriedades comuns.

Em geral, os processos de classificação da paisagem identificam o conceito central da classe e em seguida definem os limites destas classes, normalmente em termos de um conjunto de critérios de discriminação. Comumente, as fronteiras que delimitam as classes são definidas por valores rígidos. Neste tipo de modelo de classificação, assume-se implicitamente que todas as mudanças entre classes ocorrem nestas fronteiras e que dentro das classes não ocorrem mudanças significativas.

O modelo convencional de classificação espacial, também conhecido como *classificação booleana*, divide a paisagem em unidades que compõem os mapas. Estes mapas são chamados de mapas temáticos. As informações temáticas são expressas como um mapa de cloropleta, ou seja, áreas de mesmo valor separadas por fronteiras rígidas, tal como ocorre nos mapas de solos, de vegetação, de uso do solo, de geologia etc. As entidades básicas do modelo de dados que representa o fenômeno de interesse são chamadas de unidades de

mapeamento e têm como característica o fato de serem descritas por polígonos representativos de áreas consideradas uniformes.

Em termos práticos, o cientista de campo, com uma visão integrada da natureza, normalmente organiza os dados da paisagem em termos de unidades fenomenológicas, considerando a interligação e influência de todos os aspectos da paisagem de forma integrada.

Estas unidades fenomenológicas são meticulosamente descritas em termos de *atributos não-espaciais*, que são organizados em *classes ou domínios* e em *atributos espaciais* que são representados por *polígonos* em mapas temáticos. Os dados espaciais descrevem a localização e extensão espacial da unidade, enquanto os dados não-espaciais descrevem os atributos ou propriedades da unidade.

O resultado final é uma base de dados na qual as unidades fundamentais são abstrações da realidade. No entanto, estas abstrações, conforme ilustra a Figura 1, são representadas por blocos rígidos indicando uma descontinuidade que, normalmente, não ocorre nos processos naturais.

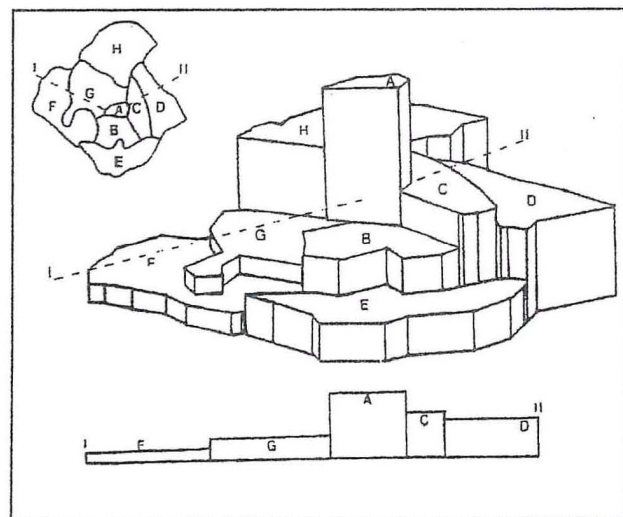


Figura 1 - A paisagem modelada e representada por classes descontínuas, adaptada de Burroughs, 1987

Com este sistema de estrutura conceitual qualquer ponto individual passa a ter um atributo único, ou seja, o valor da classe relativa ao polígono que o contém. Não se

pode representar possíveis sobreposições ou transições de classes.

A utilização de unidades taxonômicas homogêneas e de limites rígidos entre paisagens, portanto, ocasionam uma série de problemas, uma vez que, normalmente os critérios de discriminação utilizados não podem ser medidos de forma precisa. Além disto, os limites internos da paisagem nem sempre são bem definidos e, existe uma variação espacial natural entre as unidades mapeadas.

Uma forma de se minimizar este problema baseia-se numa metodologia que vem sendo utilizada cada vez mais e que se constitui em conceitos matemáticos que servem como ferramenta para solucionar os problemas mencionados anteriormente: rigidez de fronteira, imprecisão nas medições e variação gradual que ocorrem no processo de classificação. Trata-se da utilização da teoria de *conjuntos fuzzy*, baseada na *lógica contínua* ou *lógica fuzzy*, que constituem metodologias de *classificação fuzzy*.

O problema de lidar com classes não ideais ocorre não apenas com fenômenos naturais, tais como classificação de solos, avaliação da terra pelo método analítico-integrativo etc., mas também em várias aplicações concernentes à experiência humana. Até recentemente não havia formas quantitativas de se manipular a imprecisão. Em 1965, ZADEH introduziu a idéia dos *conjuntos fuzzy* para tratar de conceitos inexatos. Desde então, matemáticos têm desenvolvido a teoria das classes que não têm fronteiras definidas ou rígidas, de tal forma que ferramentas práticas têm se tornado disponíveis em diversas disciplinas (ZADEH, 1975; KANDEL, 1986; KAUFFMAN, 1975). A aplicação destas técnicas no tratamento da análise ambiental, no entanto, é muito recente.

A maioria dos Sistemas de Geoprocessamento utiliza a classificação *booleana* incorrendo em erros que se acumulam tornando duvidosa a qualidade da informação final.

2. LIMITAÇÕES DA CLASSIFICAÇÃO BOOLEANA

Atualmente, pode-se dizer que, o uso da lógica *booleana* ainda configura o estado da arte em termos de classificação de informações geográficas, seja esta processada de forma manual ou automatizada. Em outras palavras, a grande maioria dos procedimentos relativos a classificação se baseiam neste procedimento, apesar de todos os problemas de precisão inerentes a este processo.

Nos processos manuais é realizado um cruzamento de domínios ou unidades temáticas através da utilização de um "e", ou seja, "se" isto "e" isto, então classifica-se como *aquilo*. Na classificação *booleana*, portanto, são obtidos resultados binários: 0 ou 1, ou seja, "pertence" à classe ou "não pertence" à classe, "há risco" ou "não há risco" e assim sucessivamente.

Da mesma forma, o sistema de recuperação de dados relacional e os métodos inferenciais, normalmente utilizados pelos Sistemas de Informação Geográfica nos processos de avaliação da terra e dos recursos naturais, baseiam-se na estrutura: **Condição - Implica - Ação**, que é usualmente codificada através da utilização de um: **If ... Then**.

Esta estrutura baseia-se em operações com lógica *booleana*. A Figura 2, abaixo, ilustra de forma esquemática, como dois conjuntos de atributos A e B podem ser combinados através do uso normal da lógica *booleana*:

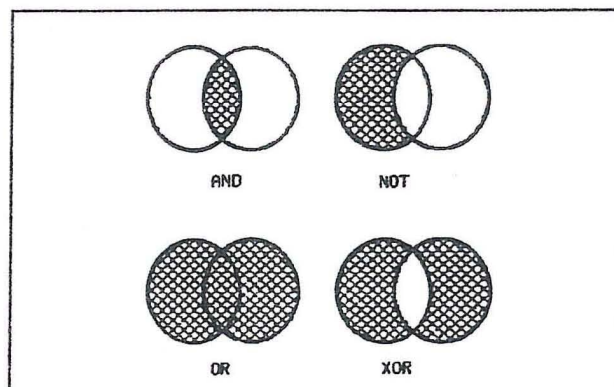


Figura 2 - Combinação convencional de dois PIs através do uso da lógica *booleana*

Para exemplificar a combinação de dois conjuntos utilizando-se esta lógica, considere a aplicação da seguinte regra de classificação: "Se o solo é não alcalino AND declividade = 5% THEN a área é apropriada para irrigação."

Em um SIG, este tipo de operação pode ser aplicada em toda a base de dados para gerar mapas derivados para serem utilizados para tomada de decisões.

Apesar destes métodos convencionais virem sendo utilizados, estudos recentes sobre variação espacial multivariada vêm demonstrando que o simples conceito de unidades discretas, básicas e homogêneas é inadequado para o progresso nos estudos de levantamento de solos, avaliação quantitativa da terra e nas análises da paisagem (WEBSTER, 1985). Não se pode estar absolutamente certo de que todas as afirmações feitas sobre as unidades de dados são "verdadeiras", uma vez que não se pode garantir que estas unidades são exatas nem que suas medições foram precisas.

Sabe-se que é impossível determinar os valores das propriedades de uma área de forma exata ou precisa. Sabe-se também que as fronteiras das unidades dos mapas estão refletindo a existência de mudanças abruptas na paisagem, provocando uma divisão numa superfície contínua ou fazendo com que pequenas diferenças nos valores amostrados, provoquem uma separação de classes, levando áreas com características semelhantes, a serem consideradas em lados diferentes nas fronteiras de classificação.

Um outro fator a ser considerado é a escala de trabalho, pois apesar de uma área poder ser delineada como uma unidade homogênea numa escala de mapeamento, ela pode usualmente se apresentar como unidades menores em escalas maiores (BURROUGH, 1983).

Os métodos de se verificar o ajuste de uma área ao conjunto de requisitos que irá classificá-la é muito simples quando se utiliza a lógica *Booleana*. Características complexas

da terra e suas classes podem ser definidas utilizando-se os operadores AND, OR, NOT, XOR, para especificar que combinações de valores de atributos são necessárias para um dado propósito de classificação. As características que irão definir uma classe são normalmente definidas através da especificação das variações de um certo número de valores de propriedades chaves que um indivíduo deve possuir. Para se classificar como membro de um dado domínio, as características de uma dada área devem se encaixar em todas as especificações, o que se faz, através do uso múltiplo do AND *Booleano*, ou seja, através de uma interseção:

$R = \text{true}$ (pertence a uma dada classe) se A
AND B AND C AND D

onde A, B, C, D ... representam os intervalos especificados das propriedades que norteiam a classificação. Os valores que se obtém aqui são, portanto, binários: *verdadeiro* quando o resultado da interseção é 1 e *falso* quando o resultado é 0. Neste caso, quando se está classificando um determinado fenômeno que depende de diversas variáveis, o resultado desta classificação se baseará no *menor* valor determinado na região a ser classificada, ou seja:

$R = \text{MIN} (Q_1, Q_2, Q_3 \dots)$

onde os Q_i são os valores da classificação de cada parâmetro que influenciam o fenômeno estudado. Esta classificação é chamada de *estrita* ou *exata* (BURROUGH et al., 1992). A base conceitual destas regras lógicas se baseia em dois fundamentos:

- que todas as questões podem ser resolvidas de forma exata;
- que todas as mudanças importantes ocorrem exatamente nas fronteiras compreendidas pela classe.

Estes fundamentos ignoram aspectos importantes, tais como a existência de uma variação gradual e a existência de erros nas medidas dos dados ambientais.

Uma considerável perda de informação pode ocorrer quando os dados que variam continuamente, ou que estão corrompidos por erros de medição, são recuperados ou combinados utilizando-se lógica *booleana* e classes com fronteiras rígidas.

Um exemplo da imprecisão advinda destes fatos é observado quando são analisados dados de solos. Ao se avaliar a precisão destes mapas, para uma determinada escala, observa-se que menos de 50% das classes do mapa estão condizentes com os perfis coletados e que geraram aquele mapa (MARSMAN & de GRUIJTER, 1984). O método *booleano* leva a resultados que diminuem seriamente a qualidade do mapa.

Em alguns casos é possível que um valor baixo para uma das características consideradas na classificação possa ser compensado por uma outra característica que esteja melhor do que o necessário. E é justamente pelo fato do método *Booleano* não considerar estas compensações, que ocorrem os erros.

Uma alternativa para esta restrição do método *booleano* seria a utilização de uma espécie de média com pesos, onde o resultado final depende do número de atributos que se encaixam com a classe definida e sua importância relativa. Diferentemente do uso *booleano* do AND e MIN, que assume que todas as propriedades devem ser consideradas críticas, a utilização de média ponderada permite que *as faltas de algumas propriedades sejam compensadas pelo excesso de outras*. A média ponderada não é uma classificação binária (0 ou 1), mas recai numa escala com números discretos iguais ao número de atributos que estejam sendo considerados. Os erros de classificação dos dados originais terão um efeito menor no final, do que quando o valor de um atributo em uma dada localização qualquer não satisfaz aos requisitos de uma determinada classe.

A classificação por média ponderada utiliza critérios subjetivos na atribuição dos pesos dados aos Planos de Informação (PIs) e nas notas dadas a cada classe, ou seja, os pesos

e notas são fornecidos pelos especialistas que deverão chegar a um acordo sobre que valores serão considerados. Geralmente, para isto, utiliza-se o método de Delphi.

Este tipo de classificação, entretanto, possui como limitação o fato destes pesos serem considerados constantes ao longo de um Plano de Informação, o que muitas vezes não ocorre ao se considerar o ambiente de forma integrada. Muitas vezes a conjunção de parâmetros numa dada localização faz com que um determinado parâmetro, representado no PI, passe a ter menos importância numa dada região e, portanto, seria necessário que houvesse um dispositivo que permitisse flexibilizar os valores dos pesos por região, o que não é possível quando se utiliza a classificação por média ponderada.

3. ALTERNATIVA FUZZY PARA CLASSIFICAÇÃO TEMÁTICA

A construção: IF A (a um grau x) Then B (a um grau y) pode ser aplicada a decisões que envolvam dados fenomenológicos e a situações em que pode haver mais de uma decisão correta. Como está apresentado na Figura 3, a interseção de dois conjuntos *fuzzy* irá levar a resultados muito diferentes, dependendo do fator de certeza a ser escolhido. A resposta a ser obtida a partir da interseção de dois conjuntos não precisa mais ser necessariamente "sim" ou "não", pode também ser "talvez".

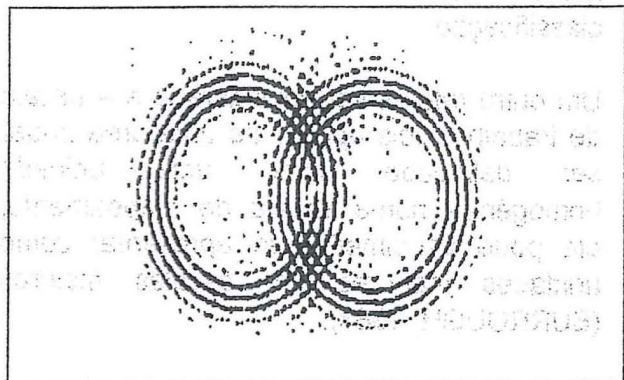


Figura 3 - Interseção dos conjuntos *fuzzy*

Desta forma, contrariamente aos conjuntos tratados na lógica *booleana*, que permitem

apenas o uso de funções de associação binária, identificando valores ou verdadeiros ou falsos, o conjunto *fuzzy* admite a possibilidade de uma associação parcial. Um exemplo simples e de fácil entendimento de um conjunto *fuzzy*, é o conjunto do relacionamento, que pode ser especificado pelo atributo 'amigos'. *Carla*, *Camila* e *Leonardo* relacionam-se todos com *Carlos*, porém cada um apresenta diferentes graus de amizade.

Na ciência do solo a teoria dos conjuntos *fuzzy* vem sendo bastante utilizada. Na estruturação de sistemas de informação de solos, a classificação *fuzzy*, também conhecida como classificação contínua, possibilita o armazenamento de dados imprecisos e a recuperação de informações através de uma linguagem natural. Nos SIGs os trabalhos de mapeamento começam a ser implementados. Os trabalhos de CHANG & BURROUGH, 1987; BURROUGH, 1989; entre outros utilizam a lógica contínua em mapeamentos. A Figura 4 apresenta o resultado de uma classificação *booleana* para estudo de áreas com umidade (OLIVEIRA et al, 1994) e a Figura 5 mostra o resultado da mesma classificação através da utilização da lógica *fuzzy*. Observa-se através deste exemplo que, muitas áreas consideradas com má umidade no mapa gerado pela lógica *booleana* (valor 0) podem ser aproveitadas através da utilização da lógica *fuzzy*, ou seja, áreas com valores entre 0.5 e 1 podem ser consideradas aproveitáveis, em termos de umidade. Neste caso algumas áreas que seriam rejeitadas injustamente, para o uso agrícola, por exemplo, não se perderão através dos critérios de classificação *fuzzy*.

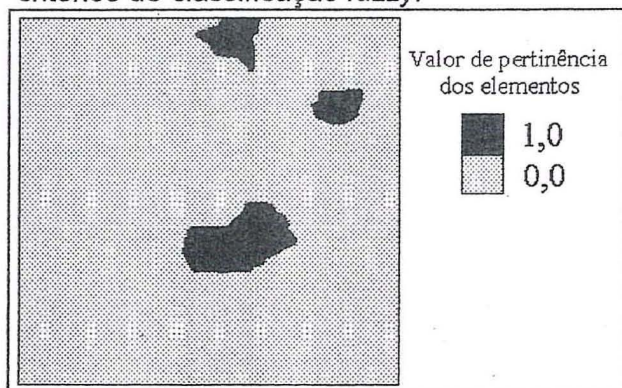


Figura 4 - Mapa de classificação *booleana* para umidade estimada.

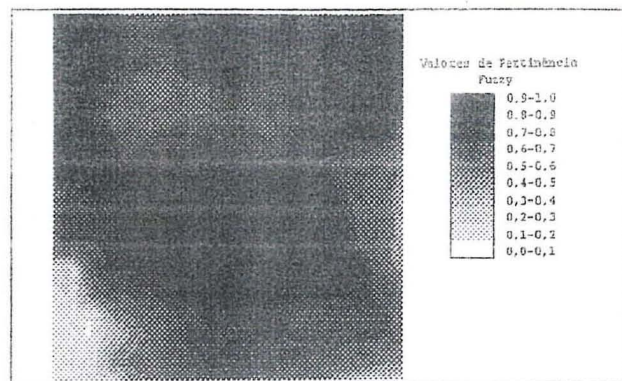


Figura 5 - Mapa de classificação *fuzzy* para umidade estimada, adaptada de OLIVEIRA (1994).

3.1. Variáveis Linguísticas

Nas ciências naturais nem todos os parâmetros utilizados para a análise de um determinado fenômeno são quantitativos, ou seja, muitas vezes são utilizadas expressões qualitativas para descrever uma determinada variável. Uma grande contribuição seria dada ao estudo de fenômenos ambientais, se fosse possível quantificar estas expressões qualitativas. Estas expressões utilizadas pelo cientista de campo são, muitas vezes, até mesmo subjetivas, ou seja, resumem o seu sentimento, baseado na sua bagagem de experiência, em relação ao que está ocorrendo, de forma comparativa, com um determinado parâmetro numa determinada região. Algumas das expressões qualitativas comumente utilizadas são:

- i. quanto ao relevo: suave ondulado, forte ondulado, etc.;
- ii. quanto a erosão: laminar forte, laminar ligeira, laminar ligeira a moderada, laminar moderada, laminar moderada a severa, etc.;
- iii. quanto a deficiência de fertilidade dos solos: nula, ligeira, moderada, forte, muito forte;

A utilização da lógica *fuzzy* é extremamente inovadora neste aspecto: ela pode ser uma ferramenta capaz de expressar numericamente a linguagem de comunicação do especialista, através da utilização de variáveis linguísticas.

Este tipo de classificação, expressa em linguagem natural, pode também ser utilizada na análise da informação através dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG), como será visto a seguir.

3.2. Classificação Contínua em um SIG

Suponha que em determinada área deseje-se classificar o solo segundo suas características de drenagem. As seguintes classes podem ser utilizadas, por exemplo, para descrever a drenagem de um dado local:

- | | |
|-------------------------------|-------|
| I. muito bem drenado | (D1); |
| II. bem drenado | (D2); |
| III. moderadamente drenado | (D3); |
| IV. insuficientemente drenado | (D4); |
| V. mal drenado | (D5). |

Além destas, outras classes descritas de forma intermediária como: "quase bem drenado", "moderadamente a bem drenado", "não mal drenado" podem também existir.

Para se utilizar a classificação *fuzzy* na representação deste fenômeno, os seguintes procedimentos se fazem necessários:

i) determinação de um conjunto fuzzy para os valores de drenagem (D)

Estes valores *fuzzy* são determinados através da utilização de uma função de pertinência $FP_x = \mu_{A(x)}$. Uma explicação mais detalhada será apresentada no exemplo fornecido na seção 3.3.

Desta forma, para um determinado conjunto de valores representando índices de drenagem, a função $FP_x: A \rightarrow D$ associa um número *fuzzy*, onde $D = \mu_{A(x)}$, cujo valor encontra-se no intervalo $[0, 1]$.

ii) determinação das classes de drenagem

As classes de drenagem, descritas acima por linguagem natural, podem ser traduzidas através da utilização de operadores como os

apresentados na Tabela 1 abaixo. Os operadores atuam sobre os valores FP_x encontrados. Além destas, outras classes podem ser definidas, tais como: insuficientemente drenada = quase não drenada = $\{ FP \}^{0.5}$.

Assim sendo, a cada ponto observado, seja de uma unidade de mapeamento ou de uma grade resultante de uma interpolação ou de uma amostra de um perfil de levantamento de solos, seria associado um vetor de valores *fuzzy* correspondente a cada classe, isto é:

$$X_1 = \{ \mu_{D1}(x), \mu_{D2}(x), \mu_{D3}(x), \mu_{D4}(x), \mu_{D5}(x) \}$$

onde:

$\mu_{D1}(x)$ representa o valor *fuzzy* para a drenagem do tipo D1. Este valor *fuzzy* é obtido através da aplicação do operador **muito bem drenado** sobre o valor obtido pela função de pertinência no ponto X_1 . Em termos práticos este número indica quanto "muito bem drenado" está aquele ponto;

$\mu_{D2}(x)$ idem para drenagem tipo D2, ou seja, representa o grau de **bem drenado**;

$\mu_{D3}(x)$ idem para drenagem tipo D3, ou seja, representa o grau de **moderadamente drenado**;

$\mu_{D4}(x)$. idem para drenagem tipo D4, ou seja, representa o grau de **insuficientemente drenado**;

$\mu_{D5}(x)$ idem para drenagem tipo D5, ou seja, representa o grau de **mal drenado**.

A fim de melhor elucidar o exposto, suponha, por exemplo, dois pontos, X_1 e X_2 , representados respectivamente pelo conjunto de vetores: $x_1 = (0.33, 0.35, 0.01, 0.12, 0.07)$ e $x_2 = (0.89, 0.04, 0.3, 0.4, 0.2)$. Neste caso, o primeiro poderia ser classificado como pertencente a uma classe intermediária às classes D_1 e D_2 e o segundo como pertencente à classe D_1 (SIMÕES et al, 1995).

Tabela 1 - Operadores Fuzzy Representando a Linguagem Natural

Operadores	Procedimento	Linguagem do Especialista
muito	$Fp_1 = \{Fp(x)\}^2$	muito drenado
não (!)	$Fp_2 = \{1 - Fp(x)\}$	não drenado
e	$\min\{Fp_1(x), Fp_2\}$	muito drenado e não drenado
quase	$Fp_3 = [Fp(x)]^{0.5}$	quase drenado
ou	$\max\{Fp_1(x), Fp_3(x)\}$	muito ou quase drenado

A partir da composição destes operadores, novas classes podem ser definidas tais como:

- insuficientemente drenada = quase não drenada = $\{fd\}^{0.5}$.
- moderadamente drenado = áreas não muito drenadas e áreas quase drenadas = $\min\{(1-[Fp(x)]^2), [Fp(x)]^{0.5}\}$

Fica, portanto, em aberto a introdução de outras classes que poderão ser agregadas a medida que novas expressões qualitativas venham a surgir. Este procedimento proporciona uma grande mobilidade na representação da classificação, fornecendo subsídios a interpretação e representação das informações fornecidas pelos especialistas. Esta nova técnica ao ser introduzida num SIG proporciona uma gama significativa de possibilidades de manipulação e modelagem da informação ambiental.

3.2.1. Cruzamento de Planos de Informação Fuzzy.

Um mapa resultante do cruzamento de vários Planos de Informação fuzzy, pode ser obtido por dois processos:

- por interseção dos parâmetros;
- por soma convexa

Ambos os métodos são formas distintas de se manipular simultaneamente um conjunto de Planos de Informação contendo valores fuzzy, através de um processo de superposição fuzzy. Estes processos, no entanto, por manipularem dados mais

precisos, tornam-se bem mais eficientes que o método convencional de cruzamento booleano, o qual manipula informações que já trazem por si só os vícios e imprecisões característicos da lógica booleana, que já foram exaustivamente discutidos anteriormente.

A interseção significa uma seqüência de "e" e é obtida através da utilização do operador Min

No método de soma convexa são atribuídos pesos a cada camada de tal forma que o somatório dos pesos seja igual a 1. Este processo assemelha-se ao da média ponderada booleana, apresentada na seção 2, entretanto, as limitações mencionadas naquela ocasião são eliminadas por se trabalhar com uma escala gradual, obtida através das funções de pertinência fuzzy. A soma convexa é geralmente utilizada quando os efeitos dos PIs manipulados não são iguais, ou seja, determinados parâmetros têm uma importância maior que outros.

3.3. Exemplo de Aplicação

A seguir, será apresentado um exemplo de aplicação da lógica contínua na análise da fertilidade de solos. A mesma metodologia poderia, no entanto, ser aplicada a outras análises relativas a diversos fenômenos ambientais.

As informações sobre fertilidade de solos são obtidas a partir da retirada de amostras de campo que são coletadas e analisadas em laboratórios. As informações resultantes podem ser armazenadas num banco de dados de um Sistema de Informação Geográfica, onde novas informações derivadas poderiam ser obtidas através da manipulação e análise de outras informações. Um exemplo disto, seria o estudo de áreas com aptidão agrícola, onde a fertilidade seria apenas um dos fatores a serem considerados juntamente com: drenagem, tipo de solo, declividade, grau de erodibilidade etc.

O estudo da aptidão dos solos baseia-se no conjunto de informações que identificam a "qualidade da terra" e é desejável que estas informações possam ser disponibilizadas ao usuário na forma de mapas. É desejável também, para um produtor, por exemplo, que este mapa indicando as áreas aptas para as práticas agrícolas apresente uma certa precisão ou confiabilidade.

Neste sentido, a metodologia descrita neste trabalho serve como uma ferramenta para a análise destas informações derivadas no sentido de criar um sistema classificatório e procedimentos de mapeamentos adequados a representação das observações descritivas e quantitativas dos dados ambientais, uma vez que os mesmos possuem variabilidade espacial, isto é, suas modificações se processam, em geral, de forma contínua e gradual, apresentando regiões de transição.

3.3.1 Geração de um Mapa de Fertilidade Fuzzy

A avaliação das condições agrícolas das terras é realizada pela análise de cinco fatores básicos: deficiência de fertilidade, deficiência de drenagem, suscetibilidade a erosão e impedimentos à mecanização. Desta forma, o mapa de fertilidade do solo, é um dos componentes relevantes nesta análise. Através da geração de um mapa de fertilidade fuzzy pode-se observar os níveis de gradação de fertilidade de uma determinada região. Representa-se, assim, fronteiras não rígidas entre áreas férteis e não férteis.

Os procedimentos fuzzy servem para, inicialmente, determinar as distribuições de possibilidades dos fatores relevantes ao estudo da fertilidade, considerando-se os critérios estabelecidos pelos especialistas como sendo representativos de regiões centrais das classes e "fuzzificando", ou seja, representando as transições de suas bordas. Posteriormente, através da utilização dos operadores fuzzy um elenco de classes, tais como: áreas muito férteis, áreas moderadamente férteis etc. podem ser determinadas.

O exemplo apresentado é composto de 79 observações obtidas através de um levantamento semi-detalhado realizado pela EMBRAPA na área de Campos. As propriedades químicas consideradas foram:

- saturação de bases (V)
- capacidade troca de cátions (T)
- soma de bases (S)
- alumínio (Al)
- sódio disponível (Na)
- cálcio + magnésio (CaMg)
- fósforo disponível (P)
- potássio disponível (K)

As classes de fertilidade consideradas neste trabalho foram:

- F1 - solo fértil
(necessidade de uso de fertilizante: baixa)
- F2 - solo intermediário
(necessidade de uso de fertilizante: intermediária)
- F3 - solo não fértil
(necessidade de uso de fertilizante: alta)
- F4 - solo muito pouco fértil
(necessidade de uso de fertilizante: muito alta)

A Tabela 2 apresenta os valores de definição dados pelos especialistas:

Tabela 2 - Valores de definição de cada classe de fertilidade

variável	classe F1	classe F2	classe F3	classe F4
T	$T \geq 8$	$6 \leq T < 8$	$4 \leq T < 6$	$T \leq 4$
V	$V \geq 80$	$50 \leq V < 80$	$35 \leq V < 50$	$V < 35$
CaMg	$CaMg \geq 3$	$2 \leq CaMg < 3$	$CaMg < 2$	$CaMg < 2$
S	$S \geq 4$	$3 \leq S < 4$	$S < 3$	$S < 3$
Na	$Na \leq 10$	$10 \leq Na < 20$	$20 \leq Na < 50$	$Na > 50$
K	$K \geq 135$	$45 \leq K < 135$	$K < 45$	$K < 45$
P	$P \geq 30$	$10 \leq P < 30$	$P < 10$	$P < 10$
Al	$Al \leq 0.3$	$0.3 \leq Al < 1.5$	$1.5 \leq Al < 4.0$	$Al > 4.0$

Neste trabalho desejava-se separar as áreas férteis existentes na área em estudo. Para tanto, o grupo 1 (classe F1) foi considerado o valor central da classe (b) fertilidade e, conseqüentemente, com valor fuzzy igual a 1.

O menor valor da classe F2 foi considerado o ponto de *crossover* e, conseqüentemente, com um valor *fuzzy* igual a 0.5. Estes valores aplicados na equação [3.1] abaixo, determinaram os parâmetros da função de pertinência *fuzzy* (Fp(x)). A tabela 3 apresenta os valores da função *fuzzy* e os valores dos seus parâmetros.

Funções fuzzy:

$$\mu(x) = 1 \quad x \geq b$$

$$\mu(x) = 1/(1+d(x-b)^2) \quad x < b \quad [3.1]$$

Tabela 3 - Funções Fuzzy para Fertilidade

Variáveis	Parâmetros da Função	
	b	d
T	8	0.25
V	80	0.001
CaMg	3	1
S	4	1
Na	10	0.01
K	135	0.0001
P	30	0.0025
Al	0.3	0.694

Para se calcular os valores de d, faz-se x igual o ponto de *crossover* e $\mu(x)=0.5$. Com o valor de d definido, pode-se calcular o valor *fuzzy* $\mu(x)$ para qualquer valor de x, ou seja, têm-se a forma da função *fuzzy* de cada variável. A título ilustrativo, está representado na Figura 6 a função de pertinência da variável T (capacidade de troca de cátions).

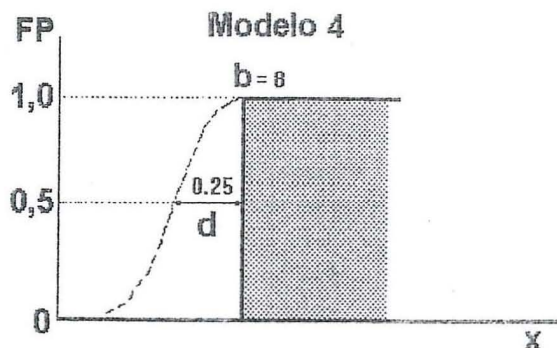


Figura 6 - Função de Pertinência para a variável T

As funções *fuzzy* foram aplicadas, resultando em oito Planos de Informação *fuzzy*, ou seja, um PI para cada variável estudada.

O mapa final de fertilidade foi obtido através da utilização da soma convexa dos oito Planos de Informação obtidos. Foi utilizado soma convexa porque o impacto de cada variável no índice de fertilidade não é igual, ou seja, algumas variáveis têm uma influência maior que outras. Os pesos foram fornecidos por especialistas em fertilidade. A Tabela 4 apresenta estes valores.

Tabela 4 - Pesos dados aos parâmetros

Variáveis	pesos
T	0.20
V	0.20
CaMg	0.20
S	0.14
Na	0.14
K	0.04
P	0.04
Al	0.04

A Figura 7 apresenta o mapa *booleano* representando as áreas em termos de fertilidade, a Figura 8 ilustra as isolinhas de fertilidade obtidas pelo método *fuzzy* e a Figura 9 ilustra o bloco diagrama de fertilidade da área estudada.

Através do uso da lógica *fuzzy* pode-se obter uma superfície contínua representativa das transições graduais entre os graus de fertilidade da região. Isto não seria possível através da utilização da lógica *booleana* que classificaria como não fértil as áreas que estivessem fora do limite da classe F1 (considerada fértil).

Haveria, portanto, uma descontinuidade, conseqüentemente, uma grande perda de informação e até mesmo prejuízos econômicos para quem desejasse comercializar esta área, já que a partir do mapa *booleano* apenas uma região muito pequena seria considerada boa em termos de fertilidade.

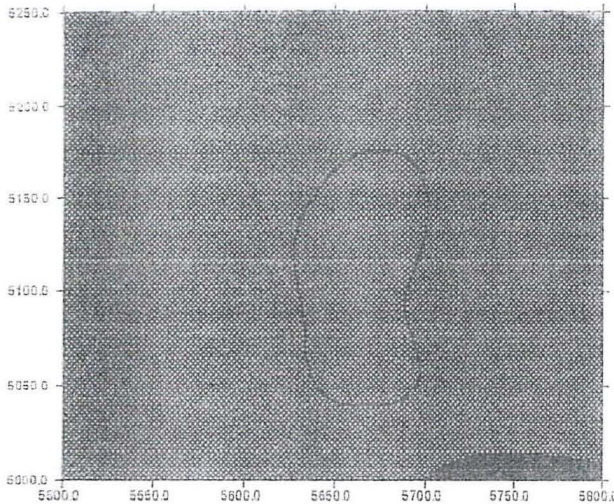


Figura 7 - Mapa de fertilidade com fronteiras rígidas (*booleano*)
 área vermelha = não fértil
 área azul = muito fértil

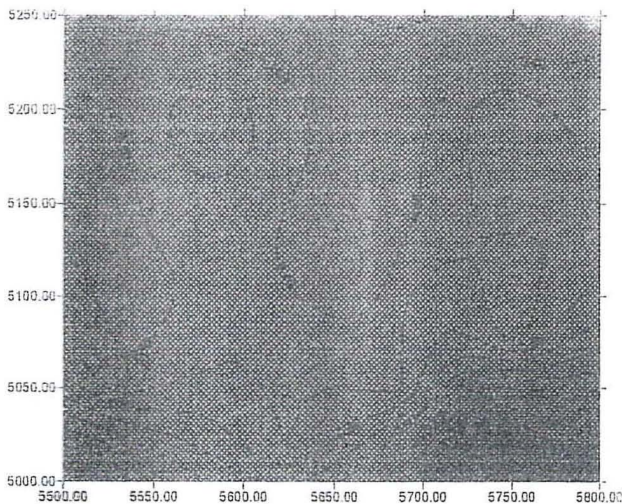


Figura 8 - Mapa de isovalores de fertilidade *fuzzy*

Observa-se na figura 8 a transição entre as classes "não férteis" em tons de vermelho até as classes "muito férteis" em tons de azul. Poder-se-ia aplicar os operadores sobre os valores *fuzzy* e fazer um mapa que apresentasse as áreas "moderadamente férteis" ou "quase férteis" ou "não férteis" etc., conforme visto anteriormente, aumentando ainda mais o poder de análise da região.

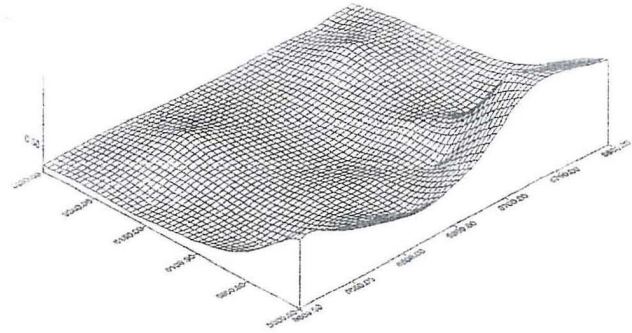


Figura 9 - Bloco diagrama de fertilidade *fuzzy*

4. Conclusões

No método *booleano* as restrições ocorrem em cada parâmetro considerado no fenômeno e se agravam na superposição dos mesmos, na medida que o critério de interseção irá aproveitar apenas as áreas, as quais o conjunto de parâmetros reunidos consideraram satisfatório, restringindo ainda mais o resultado e aumentando cada vez mais o desperdício das áreas próximas ao valor considerado ideal.

No caso do estudo de aptidão agrícola mencionado anteriormente, um mapa de fertilidade inviabilizando áreas que poderiam na prática serem consideradas aceitáveis, ao se juntar com os outros parâmetros: drenagem do solo, erodibilidade etc., também contendo este tipo de imprecisão, acabará por indicar como aptas, na integração destes parâmetros, áreas muito restritas, o que talvez não seja condizente com a realidade.

Deve-se observar, também, que a aplicação de pesos na classificação *fuzzy* não é tão restrita quanto no processo de cruzamento ponderado de mapas ou PIs *booleanos*. Isto se explica pelo fato dos valores baixos de um parâmetro serem compensados pelos valores altos de outros, já que na lógica *fuzzy* está-se

trabalhando com uma escala contínua. Esta compensação de valores leva a geração de um mapa derivado mais realista, o que não ocorre com a classificação *booleana*, a qual considera que se um dos parâmetros estiver fora, a resultante será "não pertence".

É esta abordagem que serve como ferramenta na análise integrada do ambiente, uma vez que ao se estudar a Ecologia das Paisagens por classificação *fuzzy*, está-se considerando o real valor de contribuição de cada variável, que ao ser analisada gerará, na integração, um resultado condizente com a resultante dos fatores, tal como eles atuam e se compensam na natureza.

5. Bibliografia

BURROUGH, P.A. - Multiscale Sources of Spatial Variation in Soil. I. The Application of Fractal Concepts to Nested Levels of Soil Variation. J. Soil Science, 34:577-597, 1983.

BURROUGH, P.A. - Fuzzy Mathematical Methods for Soil Survey and Land Evaluation. Journal of Soil Science, 40:477-492, 1989.

BURROUGH, P.A.; MacMILLAN, R.A. & DEURSEN, W. - Fuzzy Classification Methods for Determining Land Suitability from Soil Profile Observations and Topography. Journal of Soil Science, 43:193-210, 1992.

CHANG, L. & BURROUGH, P.A. - Fuzzy Reasoning: A New Quantitative Aid for Land Evaluation. Soil Survey and Land Evaluation, 7:69-80, 1987.

KANDEL, A. - Fuzzy Mathematical Techniques with Applications. Addison-Wesley, Massachusetts, 1986.

KAUFMAN, F. - A Survey of Fuzzy Sets Theory and Applications to Languages, Automata and Algorithms. Us-Japan Seminar on Fuzzy Sets and their Applications. Berkeley, California, 1975.

GLEASON, H.A. - The Individualist Concept of the Plant Association. Bull Torrey Bot. Club 53:7-26, 1926.

MARSMAN, B. & DE GRUJITER, J.J. - Dutch Soil Survey Goes into Quality Control. in Soil Information Systems Technology (eds P.A. Burroughs & S.W. Bie), pp. 127-134. PUDOC, Wageningen, 1984.

OLIVEIRA, M.T. - Comparação entre os Métodos de Classificação Fuzzy e Booleano para a Determinação do Mapa de Umidade: Estudo de Caso. Instituto Militar de Engenharia, 1994.

SIMÕES, M.G. & FUKS, S.D. - Novas Técnicas de Mapeamento em Sistemas de Informação Geográfica. In: Anais do XVII Congresso Brasileiro de Cartografia, 1995.

TURNER, M.G. - Ecologia da Paisagem: O Efeito dos Padrões nos Processos. Annual Review of Ecology and Systematics, 20:171-197, 1989.

WEBSTER, R. - Quantitative Spatial Analysis of Soil in the Field. Advances in Soil Science Volume 3, Springer-Verlag. New York, 1985.

ZADEH, L.A. - Fuzzy Sets and Systems. Proc. Symp. on System Theory. Inst. of Brooklyn. pp 29-39, 1965.

ZADEH, L.A. - Probability Measures of Fuzzy Events. Journal of Mathematical Analysis and Application. 23:421-427, 1968.

ZADEH, L.A. - Outline of New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes. I.E.E.E. Transaction on Systems, Man, and Cybernetics. 3:28-44, 1973.

ZADEH, L.A., FU, K.S., TANAKA, K. & SHIMURA, M. - Calculus of Fuzzy restrictions. In Fuzzy Sets and Their Applications to Usuality and reasoning With Dispositions. I.E.E.E. Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 15:754-763, 1975.