

DEFINIÇÃO DE ÁREAS DE PROTEÇÃO EM AQUÍFEROS FRATURADOS ATRAVÉS DE MODELAGEM DE MAPAS COM SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS.

Marcos Alexandre de Freitas¹ e Carlos André B. Mendes²

Resumo - Neste artigo são discutidas duas maneiras de se representar as áreas potenciais de recarga de aquíferos fraturados em rochas granitóides através de técnicas de geoprocessamento. Dois modelos, Booleano e Fuzzy, são comparados e testados na região de Porto Alegre-RS. O modelo Booleano incorpora conceitos de teoria de conjuntos bem consagrados. A vantagem do uso do modelo de lógica nebulosa (Fuzzy), é incorporar as incertezas do berço de dados decorrente das incertezas dos processos de análise.

Palavras-chave - aquíferos fraturados, sistema de informações geográficas, fuzzy

INTRODUÇÃO

As características naturais do meio ambiente vem sendo alteradas intensamente com o crescimento desenfreado e não planejado das cidades e das atividades antrópicas em geral. Alguns dos maiores reflexos verificados são a redução na recarga devido à impermeabilização dos solos e a contaminação dos aquíferos por produtos químicos, fossas e dejetos. Assim torna-se necessário adotar políticas de proteção dos aquíferos, principalmente nas áreas mais susceptíveis como as áreas potenciais de recarga. Para definir tais áreas torna-se necessário analisar vários parâmetros naturais e antrópicos.

¹ Geólogo da CPRM – Serviço Geológico do Brasil, Superintendência Regional de Porto Alegre, Rua Banco da Província, 105, Santa Teresa, Porto Alegre – RS, fone/fax (051) 233-7772, e-mail: cprm_pa@portoweb.com.br

² Eng. Hidrólogo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da universidade Federal do Rio Grande do Sul, Caixa Postal 15029, CEP 91501-970, Porto Alegre – RS, e-mail: mendes@if.ufrgs.br

Nesse sentido, os sistemas de informações geográficas (SIGs) contribuem com ferramentas computacionais de manipulação de mapas, imagens digitais e tabelas de dados georeferenciados, permitindo a integração e combinação das diversas fontes de dados. Desta maneira é possível caracterizar um problema e analisá-lo interativamente fazendo previsões com modelos, que fornecem subsídios para tomada de decisões ou planejamento.

O objetivo deste artigo é apresentar e discutir dois modelos de representação de dados e de interações dentro de um ambiente de geoprocessamento a fim de determinar áreas de proteção em aquíferos fraturados.

SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

Um sistema de informações geográficas (SIG) pode ser definido em poucas palavras como um sistema computadorizado para gerenciamento de dados espaciais (Bonham-Carter, 1996).

A palavra *sistema* implica que um SIG é constituído por vários componentes interligados com diferentes funções, como aquisição, manipulação, transformações, visualizações, combinações, análise, modelamento e exportação de dados.

O termo *informação* significa que os dados em um SIG são organizados para alimentar o conhecimento do usuário através de mapas, imagens, tabelas, gráficos estatísticas, etc..

A localização espacial dos dados é conhecida ou pode ser calculada em coordenadas geográficas, fazendo referência à palavra *geográficas*.

Segundo Aranibar (1994), os SIGs apresentam várias vantagens como:

- armazenar dados em forma digital
- possuir um grande número de ferramentas para cálculo de dados, superposições e obtenções de novos mapas, modelagens booleana e escalares com mapas.
- análise interativa no monitoramento de modelos de vulnerabilidade de aquíferos, facilitando a avaliação científica ou o critério de polícia para grandes áreas com baixo custo e rapidez.
- possibilidade de análise multitemporal.
- integração com modelos hidrogeológicos.

Em um sistema de informações geográficas os dados são adquiridos e reunidos em uma imagem digital descrita por uma função $f(x,y)$, onde x, y representam as coordenadas espaciais sobre a imagem e a função f um dado específico (por exemplo: topografia, geologia, solo, etc.). Desta maneira a natureza com sua complexa variabilidade espacial pode ser representada por um conjunto de funções $f(x,y)$ (Mendes, 1996).

Os modelos implementados em um SIG dependem dos critérios adotados, isto é, se o critério é definido através de uma série de regras determinísticas aplica-se o modelo Booleano; caso contrário, quando cada posição pode ser avaliada segundo uma combinação ponderada resultando numa escala de valores, utiliza-se por exemplo a lógica nebulosa (Fuzzy).

As incertezas do processo de análise apresentam-se das seguintes formas: com respeito à definição de classes (ou conjuntos) de dados; propagação destes erros (de representação dos dados) quando da operação de um modelo apresentando falsos resultados; próprio conhecimento humano falho com relação as hipóteses formuladoras do problema; e finalmente, quando aplicamos os itens anteriores (hipóteses formuladoras, modelos e dados) a fim de se “calibrar” os resultados comparamos os dados resultantes da modelagem com dados de campo observados. Nem sempre estes dados utilizados na “calibração” estão corretos, induzindo a falsos resultados.

O modelo Booleano baseia-se na combinação de vários mapas binários, em cada posição x,y para produzir um mapa final, no qual a classe 1 indica áreas que satisfazem determinadas condições pré-estabelecidas e a classe 0 indica todas as áreas restantes, não satisfatórias.

A lógica Fuzzy é uma classificação na qual os limites entre as classes não são evidentes (figura 1) , definindo uma função de pertinência que varia entre 0 e 1, de maneira que o grau de cada entidade possa ser medido dentro de cada classe. Desta maneira o grau de pertinência deve refletir a importância relativa de cada posição x,y pertencer (valores de 0 a 1) a cada classe dentro de um único mapa. Segundo Bonham-Carter (1996) a lógica Fuzzy pode ser combinada com uma série de funções. No presente trabalho os operadores apresentados são equivalentes aos “AND” e “OR” da lógica binária.

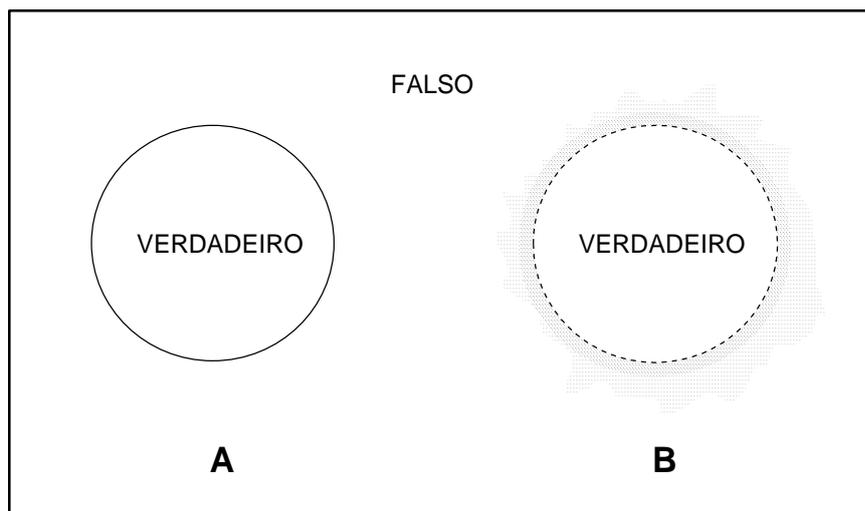


Figura 1. Comparação entre um conjunto Booleano (A) e um conjunto Fuzzy (B). Adaptado de Borrough (1989).

ÁREAS DE PROTEÇÃO SEGUNDO MODELO BOOLEANO

Este modelo é baseado na combinação de vários mapas através de uma série de regras determinísticas com o objetivo de produzir um mapa final, no qual a classe 1 (verdadeiro) indica áreas que satisfazem uma determinada hipótese e a classe 0 (falsa) áreas remanescentes, não satisfatórias.

A grande vantagem da abordagem Booleana é a sua simplicidade e a sua facilidade de ser implementada dentro de um ambiente de geoprocessamento. É análoga ao empilhamento de mapas em uma mesa de luz, método tradicional e largamente utilizado.

As condições estabelecidas para separação de regiões potencialmente favoráveis à recarga do aquífero fraturado deve satisfazer as seguintes condições:

- (M₁) pertencer a áreas de rochas granitoides, e
- (M₂) pertencer a áreas com declividade menor que 18 %, e
- (M₃) pertencer a áreas fraturadas, e
- (M₄) pertencer a áreas com boa cobertura vegetal

O potencial de recarga do aquífero é dado pela seguinte relação :

$$P_B = (M_1) \cdot (M_2) \cdot (M_3) \cdot (M_4) \quad (1)$$

A operação é realizada repetidamente a cada duas classes, para cada pixel da região de interesse até que se obtém um mapa final, de duas classes 0 e 1.

ÁREAS DE PROTEÇÃO PELA LÓGICA NEBULOSA(FUZZY)

Esta lógica analisa a possibilidade de cada posição x,y pertencer a uma função avaliando séries de conjuntos fuzzy de funções de pertinência. Fuzzy é um tipo de imprecisão característica das classes que por muitas razões não podem ou não tem limites bem definidos (Borrough, 1989). O termo fuzzy é normalmente associado com imprecisão e complexidade.

As funções de pertinência fuzzy descrevem o grau de pertinência de dados para cada classe. Geralmente, três tipos de funções de pertinência são consideradas: a sigmoideal (forma de “s”), a forma de “j”, e a função linear.

Ao contrário dos conjuntos convencionais que seguem somente funções de pertinência binária (verdadeiro ou falso), os conjuntos fuzzy admitem a possibilidade de uma pertinência parcial, configurando uma situação, onde os limites das classes não são bem definidas e a transição entre a pertinência ou não-pertinência de uma posição é gradual e varia entre 0 a 1, indicando um aumento contínuo de uma situação de não-pertinência para uma de total pertinência.

Existem duas maneiras de se deduzir as funções de pertinência para os conjuntos Fuzzy (Borrough, 1989): a primeira é análoga às determinadas por análise de agrupamento e taxonomia numérica; e a segunda, mais simples, é baseada no uso de uma função de pertinência a priori. A escolha dos limites dos conjuntos pode ser feita de maneira objetiva ou subjetiva onde as classes são definidas após várias opiniões e discussões de especialistas da área.

ESTUDO DE CASO

A área de estudo situa-se na porção leste do Estado do Rio Grande do Sul, abrangendo o município de Porto Alegre e parte do município de Viamão . Tal área foi escolhida em função da crescimento urbano sobre e em direção das áreas de aquíferos fraturados .

A caracterização hidrogeológica pode ser descrita de maneira simplificada por dois sistemas aquíferos principais: um Sistema Pré-Cambriano Granito-Gnáissico Fraturado e o Sistema Sedimentar Pleistocênico Granular (Freitas e Lisboa, 1996). No primeiro sistema, de interesse neste artigo, a ocorrência da água subterrânea está condicionada à presença de fraturamento decorrente de vários eventos tectônicos que atuaram sobre a região.

Um mapa do índice de fraturamento foi obtido a partir da foto-interpretação na escala 1:60.000, digitalização e análise de 3004 fotolineamentos. O índice de fraturamento calculado para célula de 100 m² leva em consideração a soma de três parâmetros normalizados: densidade, comprimento acumulado e número de intersecções dos lineamentos (figura 2. a). Quanto maior o índice de fraturamento de uma rocha maior a possibilidade de armazenamento e fluxo de água para o aquífero fraturado. Os valores encontrados para este parâmetro variam de 0 a 227, sendo que 91,56% estão entre 0 e 30, considerado como situação de não pertinência, e 5,0% ocorrendo a partir de 50, índice considerado como mais próximo da condição de pertinência.

O modelo digital do terreno (MDT) exhibe uma topografia com altitudes que variam de 1,0 m junto às margens do Lago Guaíba até 311,67 m no topo do Morro Santana, com declividades de 0 a 43,63 % (figura 2.b). A distribuição da frequência das classes indica que 57.36 % das declividades encontram-se até 2% (valor considerado como muito favorável). Declividades acima de 15% foram consideradas como não favorável, pois a água tende a permanecer menos tempo sobre a superfície escoando mais rapidamente.

A classificação maxverossimilhança da imagem LANDSAT TM 5 - bandas 3,4 e 5- de novembro de 1995 gerou 4 classes de uso do solo que podem influir no comportamento dos aquíferos: área urbanizada, mata (floresta de médio porte), gramíneas (campo) e solo exposto (figura 2.d). São consideradas classes ruins para a alimentação dos aquíferos a área urbanizada e solo descoberto, enquanto que a melhor situação é a presença de floresta. As áreas de campo foram consideradas como medianas.

RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados de ambos modelos utilizando os mesmos parâmetros encontram-se representados pela figura 3.

O modelo booleano (figura 3.a) mostra áreas potenciais de alimentação de aquíferos fraturados, que satisfazem as condições pré-determinadas, no entanto sem uma continuidade.

Por outro lado a lógica nebulosa (fuzzy) exhibe regiões de mesma forma geométrica semelhante ao modelo anterior, mas com uma variação entre 0 e 1, refletindo as incertezas envolvidas no processo (figura 3.b), e mostrando um zoneamento dentro destas regiões onde ocorrem áreas com maior potencialidade do que outras.

No mapa de potencialidade de recarga obtido com a lógica nebulosa (fuzzy) é possível observar que as áreas de maior potencial são pequenas, predominando as áreas medianas.

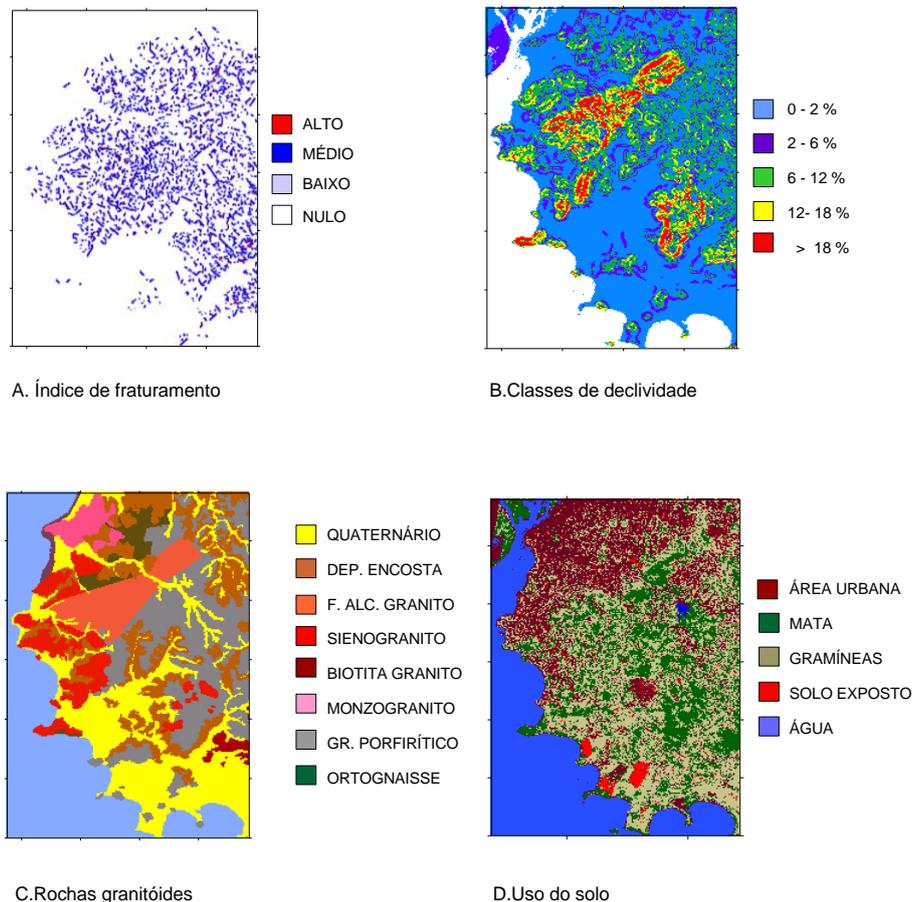


Figura 2 - Mapas utilizados na determinação das áreas de proteção de aquíferos fraturados. A- Índice de fraturamento gerado a partir de fotointerpretação na escala 1: 60.000. B- Classes de declividade a partir do modelo digital do terreno. C- Mapa de rochas graníticas que representam os aquíferos fraturados, depósitos de encosta e depósitos quaternários. D - Mapa de uso do solo baseado na classificação da imagem digital Landsat TM-5 de novembro de 1995.

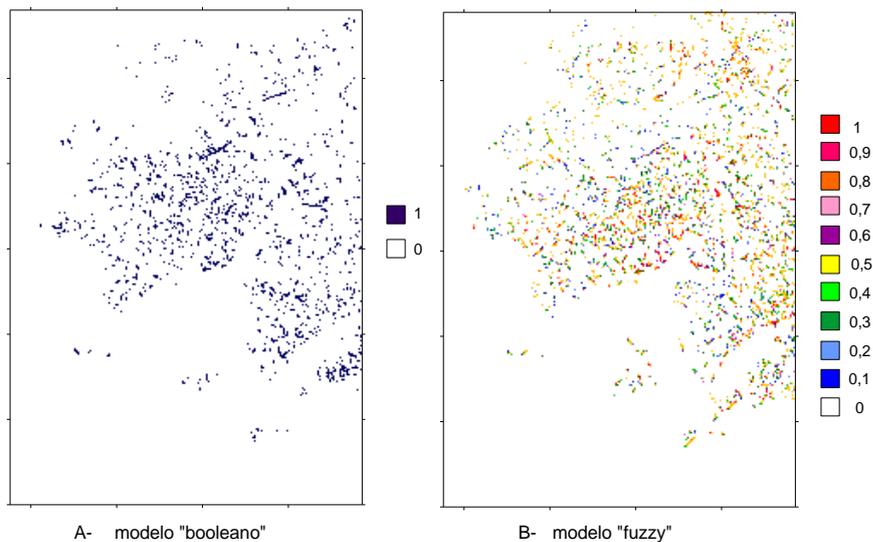


Figura 3. A- mapa de potencial de recarga de aquíferos fraturados conforme modelo booleano. B- mapa de potencial de recarga de aquíferos fraturados segundo lógica nebulosa (fuzzy). Notar a variação entre as áreas, o que não acontece no primeiro modelo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARANIBAR, A.V. GIS Em Hidrogeología. Temas Actuales de la Hidrologia Subterránea. Mar del Plata, 1994, 409p.
- BONHAM-CARTER, G. F. Geographic information systems for geoscientists : modelling with GIS. Ontario: PERGAMON, 1994 . 398 p.
- BURROUGH, P. A. "Fuzzy Mathematical Methods for Soil Survey and Land Evaluation. Journal of Soil Science 40, 477-492, p. 481
- FREITAS, M. A . & LISBOA, N. A. Aspectos de qualidade das águas subterrâneas dos diferentes sistemas de aquíferos da região de Porto Alegre – RS. Anais do IX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Salvador 1996.
- MENDES, C.A.B. Integração de modelos hidrológicos e sistemas de informações geográficas: fundamentos. Separata da Revista Brasileira de Engenharia, (Caderno de Recursos Hídricos), 14 (1), 1996.