

# Integração e Análise Espacial de Dados em Pesquisa Mineral

Fábio Roque da Silva Moreira ([fmoreira@ltid.inpe.br](mailto:fmoreira@ltid.inpe.br))

Gilberto Câmara Neto ([gilberto@dpi.inpe.br](mailto:gilberto@dpi.inpe.br))

Raimundo Almeida Filho ([rai@ltid.inpe.br](mailto:rai@ltid.inpe.br))

INPE - Av. dos Astronautas, 1758 - Jardim da Granja

Cep:12227-010 - São José dos Campos – SP

Tel.: (012) 3456441 Fax.: (102) 3456449

## Resumo

O presente trabalho tem como objetivo a utilização de modelos matemáticos semi-quantitativos para a obtenção de mapas de favorabilidade à ocorrência mineral, num estudo de caso para o maciço alcalino de Poços de Caldas. Os métodos aplicados para a análise multi-critério dos dados foram as técnicas Booleana, Média Ponderada, Fuzzy e Bayesiana.

Técnicas de probabilidade Bayesiana também foram aplicadas para a avaliação dos mapas de potencialidade mineral gerados, de modo a verificar a confiabilidade dos mesmos como produto orientativo à pesquisa mineral. Como resultado, foi desenvolvida uma metodologia de avaliação de diferentes técnicas de integração de dados em SIG's.

## Abstract

This work describes the use of semi-quantitative GIS analysis techniques to obtain potential maps for mineral exploration, in a case study in the Poços de Caldas alkaline complex. The study involved a comparison between different techniques, including Boolean, Weighted Means, Fuzzy and Bayesian methods.

Bayesian probability Techniques were also applied for the evaluate of the resulting favorability maps, and to assess the relative confidence of each result as a product for guidance for mineral exploration. As a result we developed a technique for evaluating different data integration in GIS.

## 1.- Introdução

As atividades de pesquisa mineral nos dias atuais demandam a integração de uma grande quantidade de dados, para a construção de modelos prospectivos em pesquisa mineral. Essa nova estratégia de pesquisa mineral difere da exploração clássica onde o pesquisador se baseava em indícios diretos de ocorrência mineral ou se orientava por algum método prospectivo específico de sua preferência, como, os métodos geofísicos ou geoquímicos.

Os princípios físicos e químicos que governam a formação de depósitos minerais são na maioria dos casos muito complexos para uma previsão direta segundo teorias expressas matematicamente. Sendo assim, a previsão de depósitos minerais deve basear-se principalmente em relações empíricas, com a ajuda descritiva do "modelo do depósito". (Bonham-Carter, 1994).

Essa mudança metodológica decorre de uma maior dificuldade na descoberta de novos depósitos minerais e da melhora nos sistemas computacionais que permitem a manipulação de dados de diversas fontes, de maneira mais rápida através de diversas técnicas matemáticas. As técnicas de geoprocessamento permitem a implementação de modelos matemáticos, heurísticos e probabilísticos como ferramental para a construção de modelos prospectivos.

O presente trabalho tem como objetivo a utilização de modelos matemáticos para a confecção de mapas de potencialidade à ocorrência de mineralizações radioativas, no complexo alcalino de Poços de Caldas. Para isso utilizou-se o Banco de dados construído por Almeida Filho (1995). Os métodos Fuzzy e Bayesiano foram os utilizados para a análise multi-critério dos dados gerados.

Outro objetivo do trabalho foi a análise qualitativa e quantitativa dos produtos gerados. Sendo assim, utilizou-se a metodologia Bayesiana para a avaliação dos mapas de potencialidade. Esta avaliação foi executada também nos mapas de potencialidade criados por Almeida Filho (1995), com o intuito de comparação dos produtos, visto que o autor utilizou técnicas diferentes, métodos Booleanos e de Média Ponderada, na confecção dos mapas de favorabilidade.

## 2. - Geologia

O Platô de Poços de Caldas localiza-se na divisa dos estados de Minas Gerais e São Paulo, a aproximadamente 300Km da cidade de São Paulo (Figura 1). O maciço de formato aproximado circular possui uma área de 750Km<sup>2</sup>, com diâmetro maior de cerca de 35Km de comprimento. A altitude média do platô gira em torno de 1300m, bordejado por diques anelares de 1500 a 1650m de altitude.

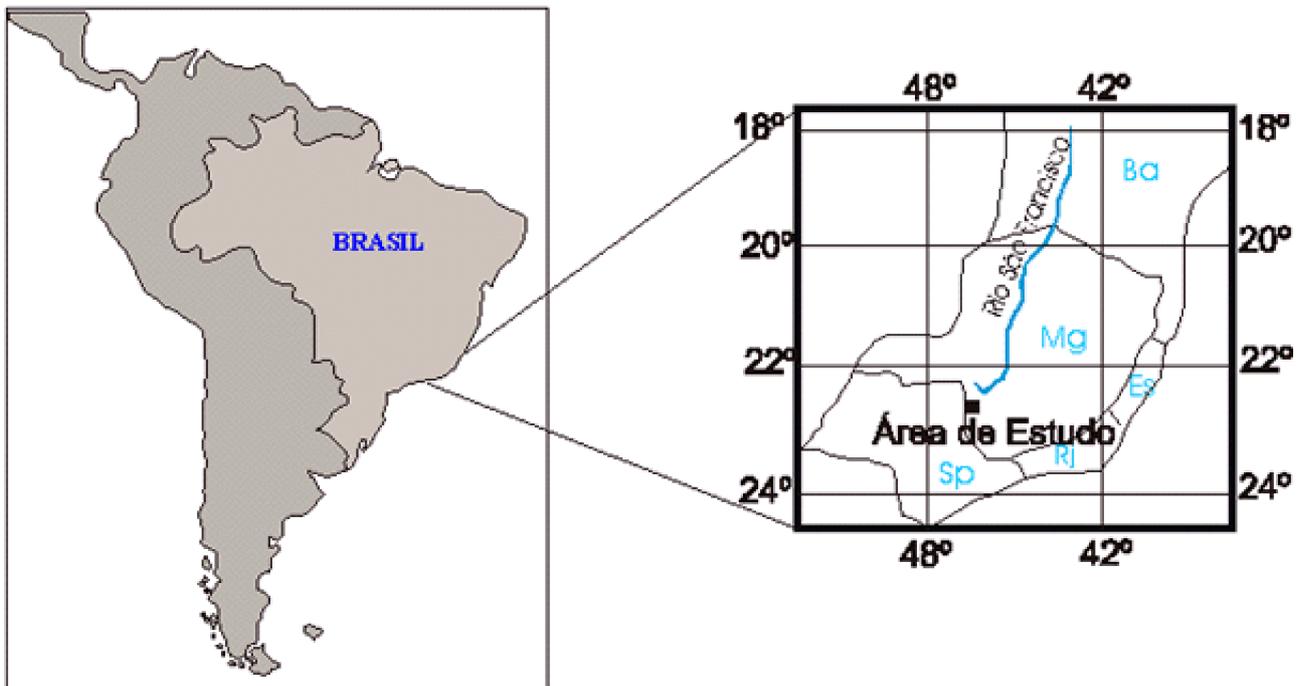


Figura 1 – Localização da área de estudo (Almeida Filho, 1995).

A cidade de Poços de Caldas, com aproximadamente 110.000 habitantes, no limite norte da cratera, é um importante centro hidrotermomineral do Brasil e apresenta também importantes atividades de mineração de bauxita e argila.

As rochas constituintes são de filiação alcalina com idade Mesozóica-Cenozóica. O maciço de natureza intrusiva têm como embasamento cristalino, rochas Arqueanas, constituídas na maioria por gnaisses, migmatitos e granulitos. As rochas mais abundantes são as nefelinas-sienitos (tinguaítos, fonólitos, foiaítos) conforme mapa litológico da figura 2.

Os diversos tipos litológicos de origem alcalina podem ser subdivididos em três grupos principais: - brechas, tufo e aglomerados; - rochas efusivas e hipabissais; e – rochas plutônicas (Fraenkel et al., 1985). As brechas, tufo e aglomerados correspondem ao material vulcânico aflorante na porção noroeste do maciço. As rochas efusivas e hipabissais são representadas por fonólitos e tinguaítos respectivamente. Os tinguaítos são as rochas de maior ocorrência no maciço. As rochas plutônicas ocorrem como encaixantes para as efusivas e hipabissais e são constituídas por foiaítos e por luaritos, ocorrendo também chibinitos em menor proporção.

Outro aspecto importante é a existência de uma "rocha potássica", resultante da alteração por processos hidrotermais e de intemperismo do tinguaíto (Fraenkel et al., 1985), a qual constitui importante controle para as mineralizações uraníferas no maciço.

### Aspectos estruturais

O complexo alcalino apresenta dois grandes sistemas de falhamentos, com direções predominantes em N60W e N40E, estando o primeiro relacionado com a tectônica regional e o segundo com o processo formador

da caldeira (Fraenkel et al., 1985). Almeida Filho e Paradella (1977) através da interpretação de imagens MSS, indicam a existência de 7 estruturas circulares no interior da caldeira de Poços de Caldas, possivelmente associadas a presença de cones vulcânicos (Figura 3). A presença de varias ocorrências minerais radioativas ao longo destas estruturas, levou os autores a considerarem que estas feições constituíram o controle estrutural regional.

## Evolução do maciço

O complexo alcalino de Poços de Caldas trata-se de uma estrutura vulcânica circular que teve as primeiras manifestações no Cretáceo superior (87m.a.) e evoluiu através de fases sucessivas até ano 60m.a.. Estudos realizados por Ellert (1959) reconhecem a existência de 6 fases na formação do complexo alcalino: 1) soerguimento do embasamento; 2) atividades vulcânicas; 3) formação de caldeiras; 4) atividade magmática alcalina; 5) formação dos diques anelares; 6) intrusões de foiaítos, chibinitos e luarjitos.

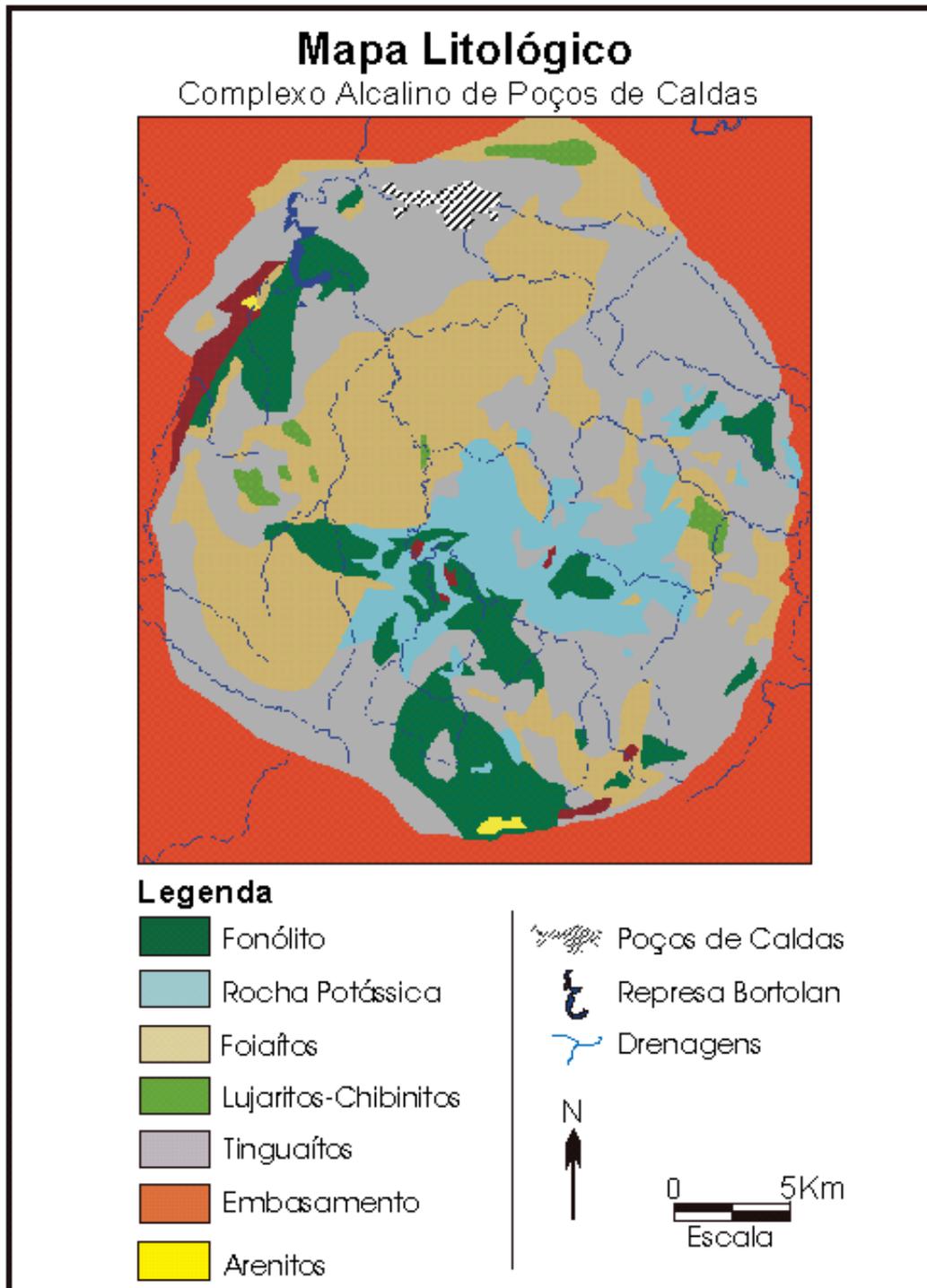
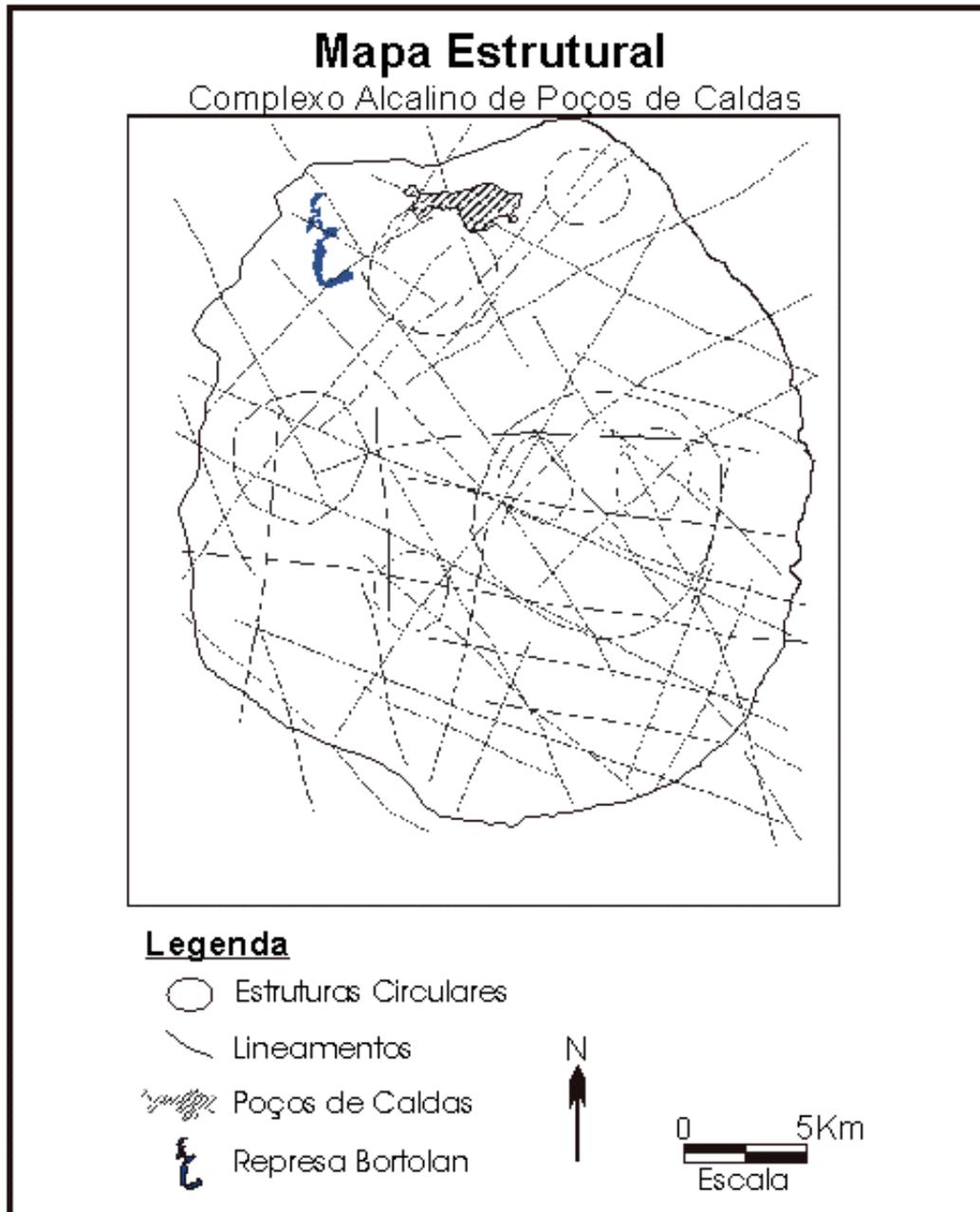


Figura 2 – Mapa litológico (Almeida Filho, 1995).

## Mineralizações

As mineralizações radioativas do maciço alcalino podem ser agrupadas em três associações: urânio-zircônio, tório-terras raras e urânio-molibdênio (Tolbert, 1966; Fraenkel et al., 1985; Almeida Filho, 1995).

As associações urânio-zircônio constituem os depósitos mais comuns, ocorrendo como depósitos aluviais, eluviais e em veios e lentes. As associações tório-terras raras representam o segundo tipo de mineralizações radioativas do maciço sendo o depósito de Morro de Ferro o mais significativo (Tolbert, 1966). As associações urânio-molibdênio estão associadas a superposição de eventos tectônicos, hidrotermais e meteóricos, que formam faixas filoneanas ou corpos lenticulares, sendo as rochas encaixantes foiaítos e tinguaitos hidrotermalizados.



*Figura 3 – Mapa estrutural (Almeida Filho, 1995).*

### 3. - Modelo Prospectivo

A organização do conhecimento geológico em um programa exploratório é fundamental para a definição dos alvos de maior potencial a serem pesquisados. O sucesso do programa depende do conhecimento dos processos químicos e físicos que governam a formação do depósito mineral, sendo este diretamente proporcional ao nível de desenvolvimento do modelo exploratório, onde as evidências ou anomalias são indicativos de uma maior possibilidade da existência de uma jazida. Esta avaliação de potencialidade consiste

na combinação espacial e análise das variáveis (evidências) que são ponderadas em função de sua importância.

Para a representação espacial e análise sobre as informações relevantes sobre o alvo a ser pesquisado Rostirolla (1997) propõe a definição das seguintes atividades: - mapear a área e construir o banco de dados georreferenciado; - estudar os depósitos conhecidos para a elaboração do modelo de ocorrência; - montar o modelo genético e caracterizar as variáveis diagnósticas; - definir os ponderadores para cada variável diagnóstica; - integrar os mapas ponderados; - construir os mapas de favorabilidade; e – analisar os resultados e a eficiência do sistema de avaliação.

A partir das premissas propostas pelo autor acima entendeu-se como etapa inicial, a definição do modelo prospectivo para a ocorrência de minerais radioativos. O poder explicativo do modelo proposto depende diretamente do conhecimento geológico prévio da área de estudo, que permitirá a seleção dos critérios diagnósticos mais importantes para a "alimentação" do modelo. Os critérios diagnósticos (evidências) são características específicas do terreno (litologia, estrutural, anomalias radioativas, etc.) que podem definir isolada ou conjuntamente, sítios potenciais a ocorrência dos minerais de interesse (Almeida Filho, 1995).

O autor Almeida Filho (1995) relata a dificuldade da elaboração de um modelo prospectivo para o maciço de Poços de Caldas, devido a alta complexidade dos fenômenos envolvidos no processo formador do complexo alcalino e das mineralizações associadas. O processo envolve aspectos tectônicos, estruturais, litológicos e intempéricos, que apresentam particularidades de região para região. Entretanto o autor identifica características comuns as ocorrências minerais no maciço alcalino, as quais foram assumidas como critérios diagnósticos a pesquisa de minerais radioativos na área. Estas evidências foram as mesmas utilizadas nos modelos desenvolvidos do presente trabalho:

- ☐ litologias favoráveis: presença de controles litológicos representados por rochas potássicas, material vulcânico, e corpos intrusivos de foiaitos;
- ☐ falhamentos/fraturamentos: presença de intrincados padrões de falhamentos e fraturamentos, condicionando o alojamento de veios e lentes mineralizados;
- ☐ estruturas circulares: presença de cones vulcânicos no interior no interior da cratera, condicionando a ocorrência de mineralizações radioativas em suas bordas;
- ☐ gama-radiometria: presença de valores anômalos de radioatividade total, indicativa da presença de minerais radioativos (Almeida Filho, 1995).

Desse modo, o modelo prospectivo para a definição de áreas potenciais a ocorrências de minerais radioativos baseia-se basicamente em três pontos: dados gama-radioativos, litologia favorável e feições estruturais.

#### 4. - Banco de Dados Geográfico

A primeira etapa do trabalho consistiu na definição dos planos de informação, gerados no trabalho de Almeida Filho (1995), que seriam necessários para a elaboração deste trabalho. Sendo assim, selecionou-se os planos de informação com as unidades litológicas, as ocorrências minerais radioativas, dados gama-radiométricos, dados estruturais, rede de drenagem e localização da cidade de Poços de Caldas.

Com os critérios diagnósticos definidos para o modelo de prospecção, a próxima etapa foi a definição do banco de dados. Normalmente esta fase do trabalho é demora e muito trabalhosa. No presente trabalho não ocorreu esse problema, pois utilizou-se o Banco de Dados gerado por Almeida Filho (1995). Desse Banco foram selecionados os planos de informação relevantes para a elaboração do estudo.

O Banco de Dados geocodificado encontrava-se no formato do sistema SGI (Sistema Georreferenciado de Informação) desenvolvido pelo INPE, sendo assim, foi necessário a migração dos dados para o sistema SPRING onde seriam realizadas as operações matemáticas, segundo métodos Fuzzy e Bayesianos, para a confecção dos mapas de potencialidade à ocorrência mineral.

Os dados selecionados do Banco de Dados do trabalho de Almeida Filho (1995) estão apresentados na tabela 1, onde estão explicitados o formato e respectivos atributos.

Dados	Formatos	Atributos
Cidade, principais drenagens	Vetorial	Infra-estrutura

Mapa Litológico	Vetorial e matricial	Informações litológicas
Contatos litológicos	Vetorial e matricial	Zonas de contatos
Gama-radiometria	Vetorial e matricial	Radioatividade (contagem total)
Feições estruturais	Vetorial	Falhas/fraturas e estr. circulares
Ocorrências minerais	Vetorial	Verdade de campo

*Tabela 1 – Tipos, formatos e atributos dos dados. Modificado de Almeida Filho (1995).*

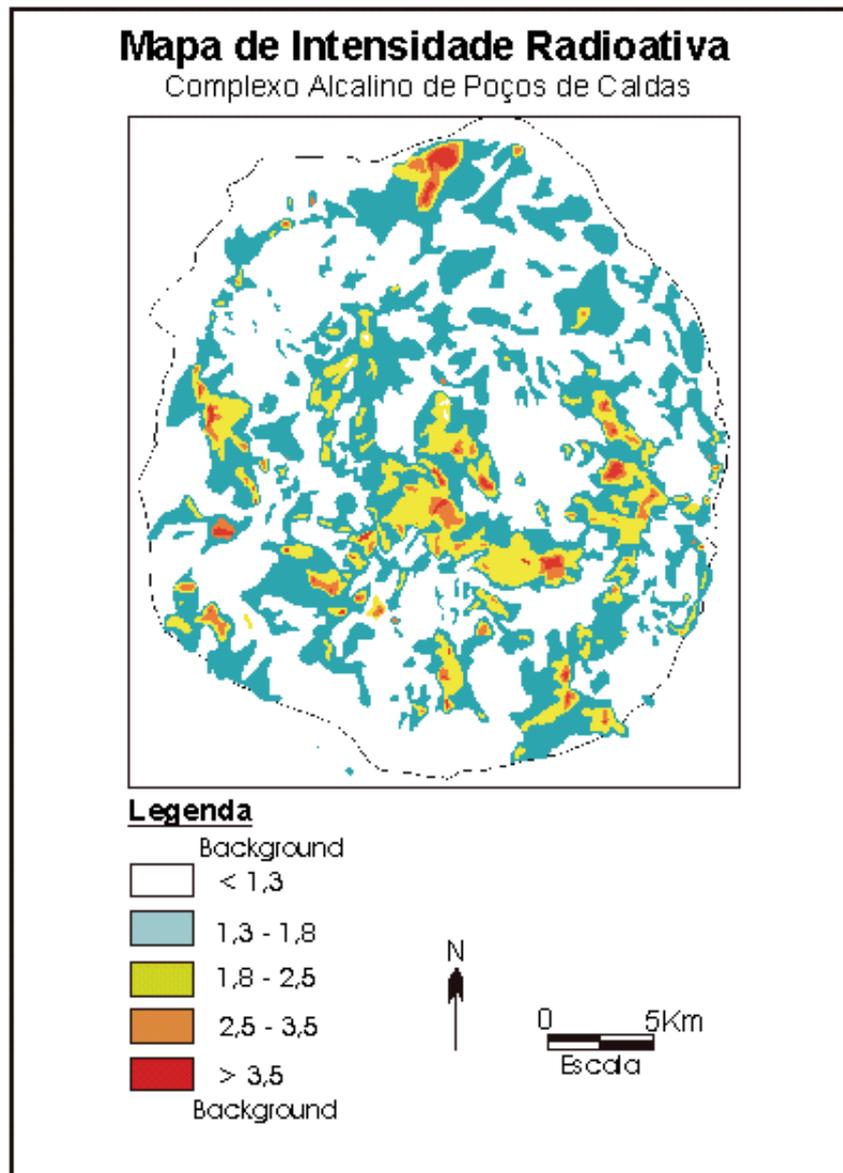
Estes dados encontram-se sob projeção UTM/SAD69, sendo utilizado como referência cartográfica as folhas de Poços de Caldas, Santa Rita de Caldas e Andrada, na escala 1:50.000, produzidas pela fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (Almeida Filho, 1995).

As principais características dos planos de informação gerados por Almeida Filho (1995) são descritas a seguir:

*Dados planimétricos* – indicação da localização da cidade de Poços de Caldas, principais drenagens, que cortam o maciço, e barragens. Essas entidades foram digitalizadas a partir das folhas descritas anteriormente.

*Dados litológicos* – As unidades litológicas foram digitalizadas a partir do mapa geológico do maciço alcalino, onde apenas as litologias consideradas potências a pesquisa de minerais radioativos foram extraídas (figura 1). Um plano de informação com um "buffer" de 100m de largura ao longo dos contatos litológicos também foi gerado. Esse procedimento se deve ao fato dos contatos na sua maioria serem inferidos e não observados em campo, e também porque muito das mineralizações ocorrerem ao longo dos contatos intrusivos do foiaitos (Almeida Filho, 1995).

*Dados gama radiométricos* – os dados radiométricos foram coletados pela Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN, através de aerolevanteamento com helicóptero e levantamento com caminhamento a pé. Nos levantamentos com helicóptero os dados foram coletados em malhas de 250x250m, enquanto os dados coletados pelo caminhamento a pé por malha de 75x250m. Estes dados de radiatividade total encontravam-se integrados no "mapa radiométrico do planalto de Poços de Caldas" (NUCLEBRAS, 1975), subdividido em fatias (1,3-1,8; 1,8-2,5; 2,5-3,5; >3,5). Deve-se destacar que o desejável seria trabalhar com os dados em formato bruto, ou seja, com os dados em formato matricial. Isso porém não foi possível, sendo assim, Almeida Filho (1995) digitalizou diretamente sobre o mapa gerado pela NUCLEBRÁS (figura 4).



*Figura 4 – Mapa de intensidade radioativa total do planalto de Poços de Caldas (fonte: Nuclebrás, 1975)*

**Dados estruturais** – Os dados estruturais foram obtidos através da interpretação de imagens multiespectrais (MSS) realizada por Almeida Filho (1995). Os dados estruturais foram subdivididos pelo autor em feições lineares e feições circulares, estando estas em planos de informação individuais. As estruturas circulares identificadas correspondem a sete feições no maciço alcalino, interpretadas com associadas a edifícios vulcânicos no interior da cratera (Almeida e Paradella, 1977).

## 5. - Metodologia de Modelagem dos Dados

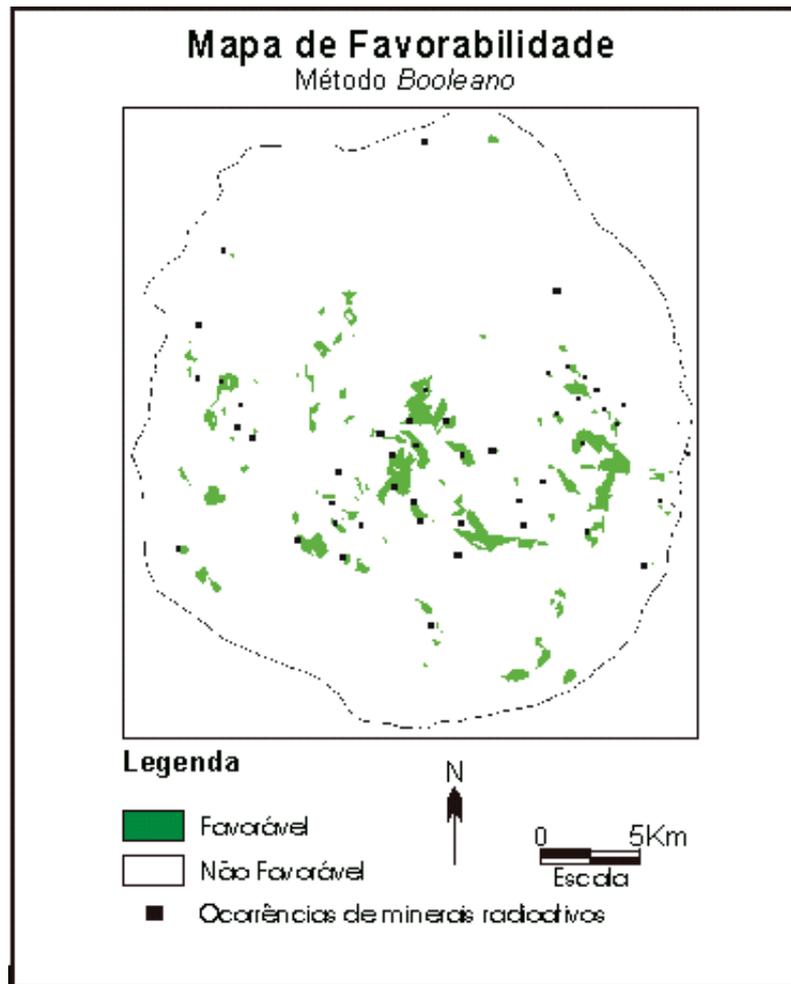
Neste trabalho foram utilizados vários métodos de inferência espacial para a integração dos dados (evidências) relevantes ao modelo prospectivo proposto para o maciço alcalino de Poços Caldas. Eles geraram como resultado diferentes planos de informação em formato Numérico - MNT (campos contínuos em formato matricial) que expressam "pixel" à "pixel", de forma numérica o grau de favorabilidade da ocorrência de mineralizações radioativas na região. Os métodos estão apresentados abaixo.

Os valores numéricos desses planos foram então agrupados em fatias que reproduzissem espacialmente áreas proporcionais as obtidas no mapa de favorabilidade gerado pelo método Média Ponderada.

### Modelo Booleano

O Modelo Booleano envolve combinação lógica de mapas binários através de operadores condicionais. Cada mapa utilizado como uma condição pode ser entendido como um plano de informação (evidência). Os vários planos de informação são combinados para dar suporte a uma hipótese ou preposição. Cada localização é

então testada, para determinar se as evidências nesse ponto satisfazem ou não as regras definidas pela hipótese .



*Figura 5 – Mapa de favorabilidade à ocorrências de minerais radioativos obtido segundo o método Booleano.*

O resultado é expresso de forma binária, "0" (hipótese não satisfeita) e "1" (hipótese satisfeita), não sendo possível a condição talvez. Embora esse método seja prático, normalmente não é o mais adequado, pois o ideal é que as evidências, que apresentam importância relativa diferente, recebam pesos diferentes e não sejam tratadas igualmente como acontece.

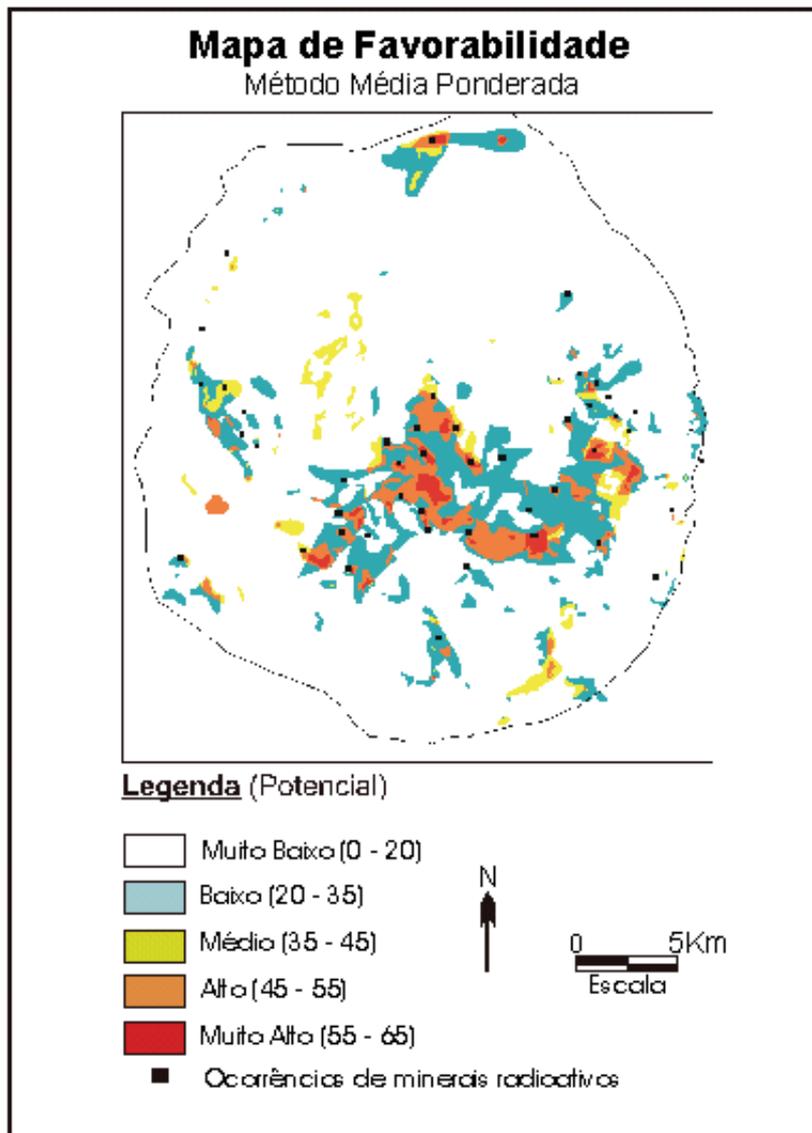


As operações Booleanas adotadas, equívalem totalmente as efetuadas no trabalho de Almeida Filho (1995). Os operadores de lógica Booleana foram "E" (interseção) e "OU" (união). Eles foram combinados de modo seqüencial, com o objetivo inicial de agrupar as evidências em três grupos principais à saber: - litologia/contato litológicos; - estruturas circulares/ lineamentos; e - gama radiométrico. O operador utilizado para este agrupamento inicial foi o "Ou". Com os grupos formados, utilizou-se o operador "E", que definiria áreas favoráveis apenas em pontos onde as três evidências agrupadas estivessem presentes. A formulação está expressa abaixo, e o mapa de favorabilidade apresentado na figura 5.

## Média Ponderada

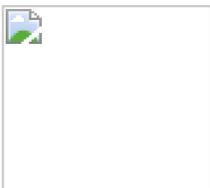
Neste método, cada mapa de entrada será utilizado como uma evidência que receberá um peso diferente dependendo da importância para com a hipótese sobre consideração.

Neste caso cada plano de informação receberá pesos diferentes, bem como as respectivas classes dos planos de informação. O método de Média Ponderada permite uma maior flexibilidade na combinação de mapas do que o método Booleano. O mapa ponderado pode ser ajustado para refletir o julgamento de um especialista, segundo os pesos de importância definidos para cada critério. A maior desvantagem deste método, entretanto, recai provavelmente no caráter linear de adição das evidências.



*Figura 6 - – Mapa de favorabilidade à ocorrências de minerais radioativos obtido segundo o método Média Ponderada.*

Novamente o intuito era apenas reproduzir o mapa gerado por Almeida filho (1995). O primeiro passo foi a ponderação das classes de cada plano de informação segundo os mesmos pesos adotados pelo autor. Os planos de informação ponderados foram então somados através de uma soma ponderada onde cada plano de informação recebeu pesos segundo sua importância relativa. A função matemática é expressa por:



, onde  $w_{ij}$  é o peso da classe "i" do plano de informação "j", e  $y_j$  o peso do plano de informação "j".

Os valores dos pesos foram definidos de modo heurístico, segundo critérios definidos por Almeida Filho (1995) através de sua experiência pessoal na região. Os pesos adotados para os planos de informação gama-radiometria, litologia/contato litológico e estruturas circulares/lineamentos foram:

Gama-radiometria: peso do plano de informação  $y_1 = 80$ ;

peso das classes: background  $w_{11} = 0$ ; 1.3-1.8  $w_{12} = 10$ ; 1.8-2.5  $w_{13} = 60$ ; 2.5-3.5  $w_{14} = 70$ ;  $>3.5$   $w_{15} = 80$ ;

Dados litológicos:  $y_2 = 60$ ;

Peso das classes: rochas potássicas  $w_{21} = 60$ ; lujaritos/chibinitos  $w_{22} = 60$ ; foiaitos  $w_{23} = 30$ ; material

vulcânico  $\triangleright w_{24} = 20$ ; tinguaítos  $\triangleright w_{25} = 15$ ; fonólitos  $\triangleright w_{26} = 10$ ; arenitos  $\triangleright w_{27} = 0$ ; embasamento  $\triangleright w_{28} = 0$ ;

Dados estruturais:  $y_3 = 20$ ;

Peso das classes: "buffer" das estruturas circulares e lineamentos  $\triangleright w_{31} = 20$ .

O plano de informação resultante apresentou valores que variam de [0,65]. Os pontos com valores iguais a "0" indicam áreas de potencial nulo e os pontos com valores iguais a "65" são áreas de máximo potencial. Este plano de informação foi dividido em fatias de favorabilidade (0-20  $\triangleright$  muito baixa; 20-35  $\triangleright$  baixa; 35-45  $\triangleright$  média; 45-55  $\triangleright$  alta; 55-65  $\triangleright$  muito alta) definidas por Almeida Filho (1995). O mapa gerado encontra-se na figura 6.

## Método Fuzzy

Um conjunto Fuzzy é definido matematicamente como segue: se  $Z$  denota um espaço de objetos, então o conjunto Fuzzy  $A$  em  $Z$  é o conjunto expresso pelo par ordenado:  $A = (z, MFA(z))$  para todo  $z \in Z$ , onde a função  $MFA(z)$  é conhecida como uma "gradação" mapeável do membro  $z$  em  $A$ . Normalmente  $MFA(z)$  é um número que varia de "0" a "1", com o "1" representando o membro que se encaixa completamente ao conjunto e o "0" como o membro que não pertence ao conjunto (Burrough & McDonnell, 1998).

A graduação que mapea os membros de um conjunto  $A$  reflete o tipo de ordenação que não são baseadas em probabilidade mas sim numa aceitação de possibilidade. O valor da função  $MFA(z)$  de um objeto  $z$  em  $A$  pode ser interpretado como um grau de compatibilidade de um predicado associado ao conjunto  $A$  e ao objeto  $z$ . Ou seja,  $MFA(z)$  avalia o quanto  $z$  pode ser pertencente ao conjunto  $A$  (Burrough & McDonnell, 1998).

A função Fuzzy deve assegurar que o valor do membro no centro do conjunto é "1", e que este decai de uma maneira lógica através da fronteira Fuzzy para as regiões fora do conjunto onde o valor deve ser "0". O ponto onde o valor do membro é igual a 0,5 é denominado de "ponto de cruzamento". A função deve ser definida de tal modo que esta condição seja respeitada. As funções mais comuns utilizadas para determinar valores de membros Fuzzy são funções lineares e quadráticas (Burrough & McDonnell, 1998).

Para a aplicação da metodologia Fuzzy foi necessário que toda as evidências (planos de informação) estivessem no formato MNT. Sendo assim, os mapas temáticos que serviriam de evidências tiveram que ser ponderados para valores que variam entre 0 e 1. Os mapas de litologia e gama-radiometria foram ponderados por pesos entre "0" e "1" (membros Fuzzy). Estes pesos foram obtidos através de funções lineares aplicadas aos pesos definidos por Almeida Filho (1995) na Média Ponderada. As tabelas 2 e 3 apresentam os pesos do método Média Ponderada atribuídos pelo autor e os valores Fuzzy obtidos a partir das equações lineares.

Gama-radiometria $\triangleright f(x) = 0,0125x$		
Classe	Média Ponderada	Fuzzy
background	0	0
1,3-1,8	10	0,125
1,8-2,5	60	0,750
2,5-3,5	70	0,875
>3,5	80	1

*Tabela 2 – Valores dos membros Fuzzy do plano de informação gama-radiometria.*

Para a ponderação dos mapas de estruturas circulares, lineamentos e contatos geológicos foi necessário primeiramente a criação de uma grade de distância, tendo como ponto inicial os arcos que definem as estruturas e os contatos. Uma função quadrática foi aplicada sobre cada grade de distância para se definir os valores dos membros Fuzzy dos mapas citados acima. A função quadrática tenta modelar a importância das estruturas e dos contatos geológicos a medida que se distância dos mesmos.

A função adotada é expressa por:



, onde o valor de "a" indica o "ponto de cruzamento", no qual a evidência tem 50% de importância. A faixa abrangida pelo ponto inicial até o "ponto de cruzamento" indica a faixa onde a estrutura ou o contato geológico apresentam alta influência, e nos pontos fora desta faixa a importância decai abruptamente segundo a curva quadrática.

<b>Litologia <math>\mu_i(x) = 0,0167x</math></b>		
<b>Classe</b>	<b>Média Ponderada</b>	<b>Fuzzy</b>
Rochas potássicas	60	1
Lujaritos /chibinitos	60	1
Foiaitos	30	0.5
Mat. vulcânico	20	0,333
Tinguaíto	15	0,25
Fonólitos	10	0,1667
Embasamento	0	0
Arenito	0	0

*Tabela 3 - Valores dos membros Fuzzy do plano de informação litologia.*

Os pontos definidos como os "pontos de cruzamento" coincidem com os pontos definidos por Almeida Filho (1995) na construção dos "buffers" ao longo das estruturas:

- contato geológico  $a = 0,0001$   $z = 100m$ ;
- estruturas lineares  $a = 0,000016$   $z = 250m$ ;
- estruturas circulares  $a = 0,00000816$   $z = 350m$ .

Com os planos de informação (campos contínuos com distribuição espacial Fuzzy) criados, estes foram combinados segundo uma análise multi-critério definida através de operadores Fuzzy (Mínimo-Máximo, Média, Ponderado (Técnica AHP) e Gama). Os procedimentos e explicações sobre cada operador estão relatados a seguir:

## Fuzzy Mínimo-Máximo

Nessa análise multi-critério foi utilizado dois operadores, Mínimo e Máximo, combinados numa seqüência esquemática semelhante à adotada no método Booleano. Os operadores estão explicados individualmente a seguir.

### Fuzzy Mínimo

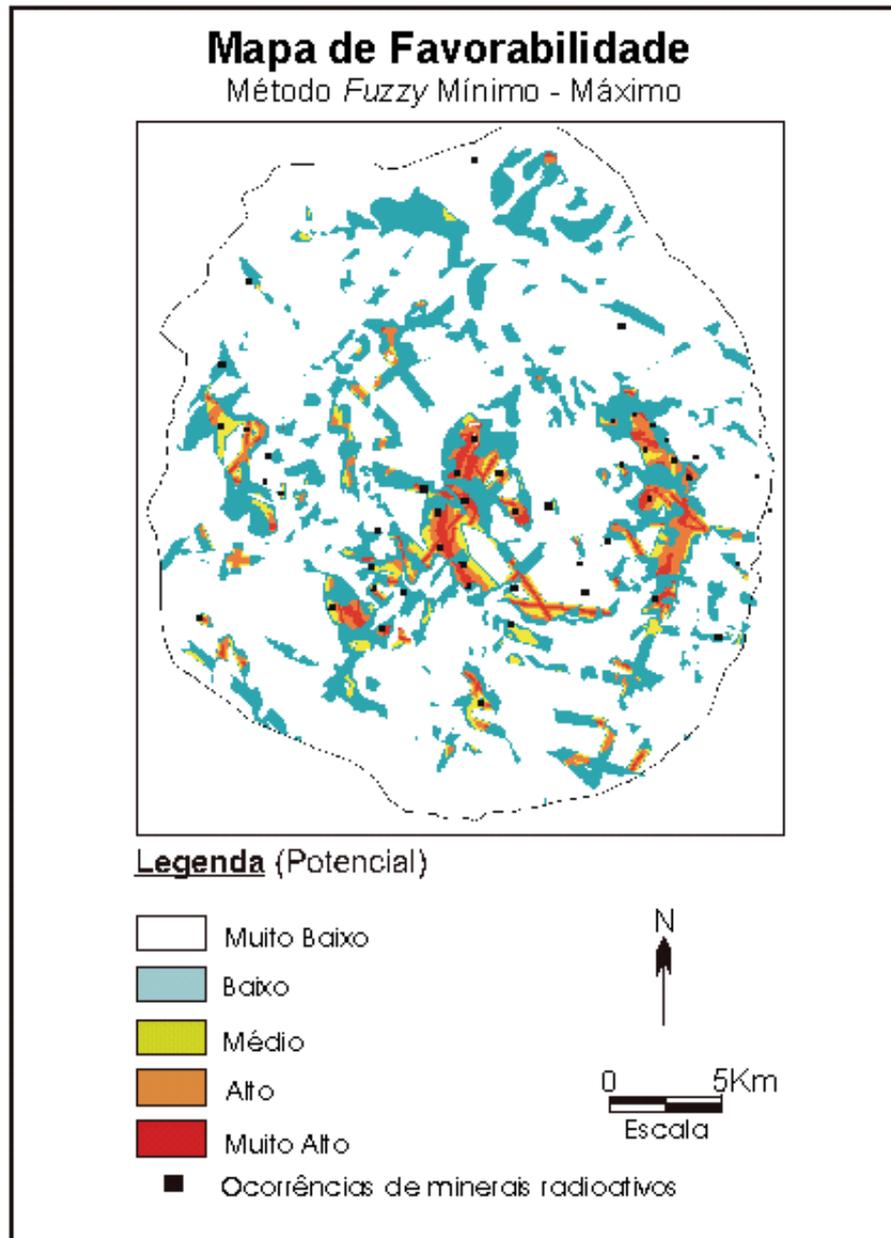
Esse operador assemelha-se a operação Booleana "E" (interseção), e é expresso por:  $m = \text{Min}(m_a, m_b, m_c, \dots)$ , onde  $m_a$  equivale ao valor do membro Fuzzy para um particular ponto ("pixel") do plano de informação A, os valores  $m_b$  e  $m_c$  correspondem respectivamente aos membros dos planos B e C no mesmo ponto.

O que este operador define como resultado, é que um ponto do plano de informação resultante terá como valor de saída o menor valor dos membros Fuzzy de entrada. Se tomarmos como exemplo os valores  $m_a = 0,30$ ;  $m_b = 0,17$ ;  $m_c = 0,98$ , o valor adotado para o "pixel" do plano de informação final será  $m_{\text{final}} = 0,17$ . Fica claro entender que o resultado obtido é o mais conservativo possível para com os valores dos membros Fuzzy, sendo o operador indicado para situações altamente restritivas ("pessimista"), onde duas ou mais evidências são estritamente necessárias para satisfazer uma hipótese.

### Fuzzy Máximo

O operador Máximo assemelha-se a operação Booleana "OU" (união), sendo as evidências combinadas segundo a função  $m = \text{Max}(m_a, m_b, m_c, \dots)$ , onde os valores de  $m_a$ ,  $m_b$  e  $m_c$  correspondem aos valores dos membros Fuzzy das evidências. Nesta operação o valor de saída para um dado ponto, diferentemente do Fuzzy mínimo, será o maior valor de entrada dos planos de informação. No exemplo acima o valor resultante seria  $m_{\text{final}} = 0,98$ . O operador Fuzzy Máximo é o mais otimista dentre operadores Fuzzy sendo indicado para situações onde a existência de apenas uma evidência, é o suficiente para indicar regiões potenciais a exploração mineral.

A formulação da combinação dos operadores Mínimo e Máximo está apresentada abaixo e o mapa de favorabilidade na figura 8.



*Figura 8 - -- Mapa de favorabilidade à ocorrências de minerais radioativos obtido segundo o método Fuzzy Mínimo-Máximo.*

## Fuzzy Média

O Fuzzy Média admite um risco médio com compensação plena entre todos os membros Fuzzy de entrada. O peso de importância é distribuído uniformemente para todas as evidências, o que indica que os membros Fuzzy de entrada não apresentam uma importância hierárquica entre eles. A função matemática que define este operador é expressa por:



O mapa de favorabilidade encontra-se na figuras 9.

## Fuzzy Ponderado

No Fuzzy Ponderado os pesos de cada membro Fuzzy de entrada (evidência) foram definidos segundo a técnica de tomada de decisão AHP (Saaty, 1992). A primeira etapa para a definição dos pesos foi a elaboração de uma relação de importância relativa entre as evidências. Essa relação foi utilizada como dado de entrada em uma matriz de comparação pareada, onde foram calculados os autovalores e autovetores da matriz. Os pesos de cada membro Fuzzy, equivalem então aos autovetores a matriz de comparação pareada.

Os pesos definidos pela técnica AHP foram:

gama-radiometria - 0,514;

litologia - 0,258;

estruturas circulares - 0,1223;

estruturas lineares - 0,0529;

contatos litológicos - 0,0529;

O mapa de favorabilidade encontra-se na figura 10.

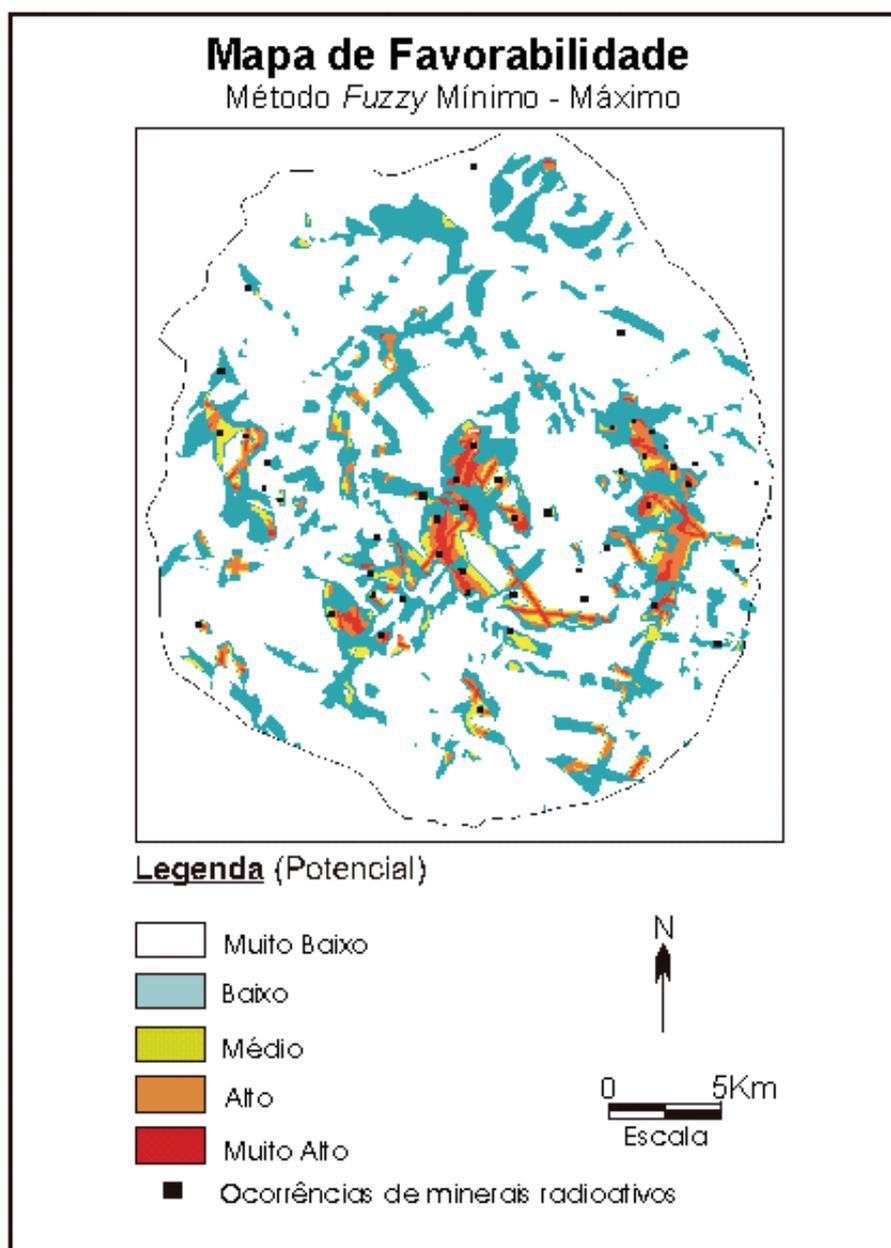


Figura 9 – Mapa de favorabilidade à ocorrência de minerais radioativos obtido segundo o método *Fuzzy* Média.

### *Fuzzy* Gama

Este operador é definido por dois termos, um produto algébrico *Fuzzy* e uma soma algébrica *Fuzzy*. Este operador é expresso pela função:

$$\mu = (\text{soma algébrica } Fuzzy)^{\gamma} \times (\text{produto algébrico } Fuzzy)^{1-\gamma}$$

O produto algébrico *Fuzzy* é expresso pela função,

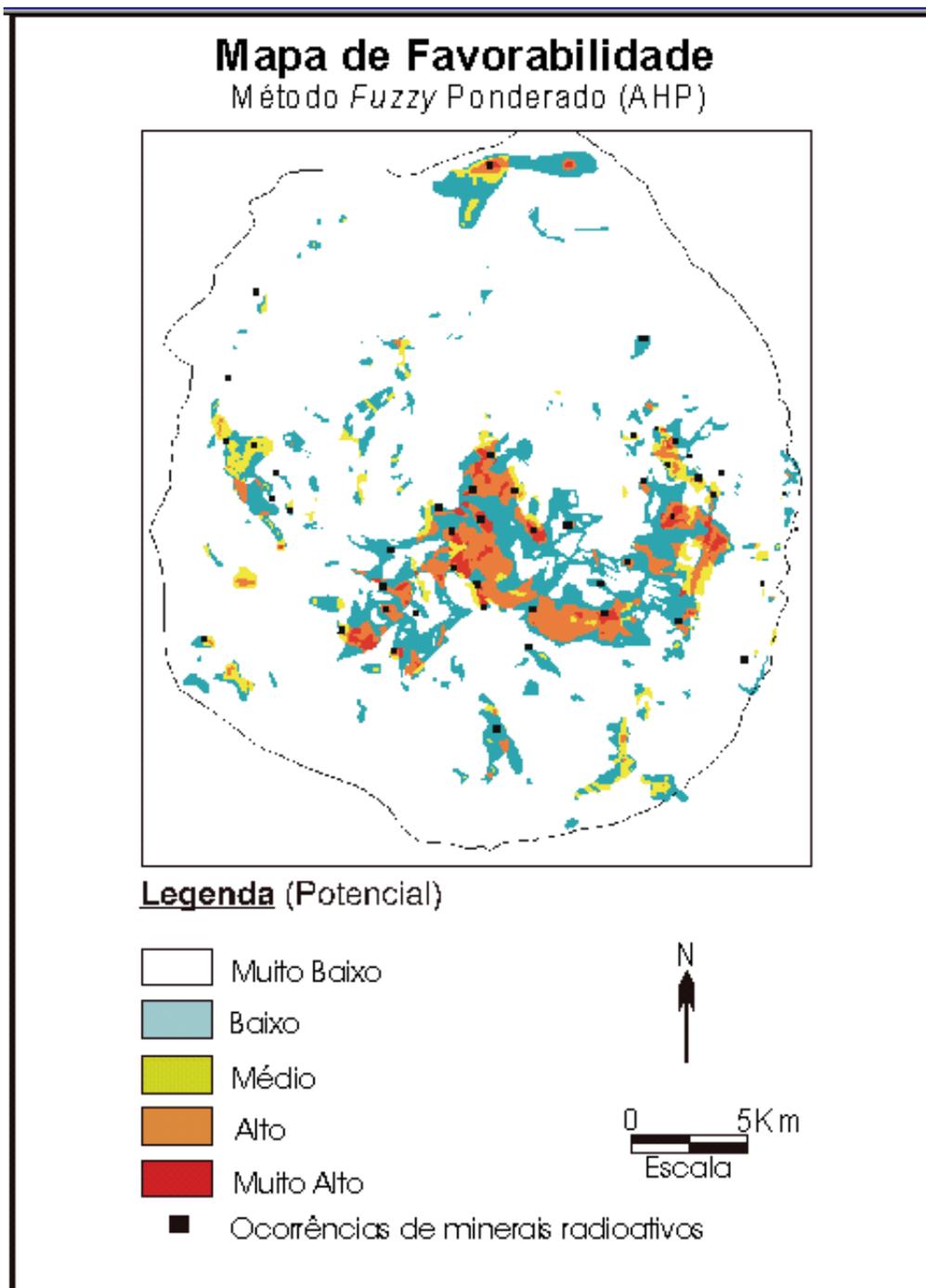
$$\mu = \prod_{i=1}^n \mu_i, \quad \text{onde } \mu_i \text{ representa o valor do membro } Fuzzy \text{ para um plano de informação "i".}$$

O operador executa a multiplicação dos membros dos diferentes planos de informação ( $i=1,2,3,\dots$ ), sendo que o valor de saída de um dado ponto é sempre menor ou igual ao valor do menor membro *Fuzzy*. Isto ocorre devido a multiplicação de valores iguais ou menores que 1.

A soma algébrica *Fuzzy* é definida pela função:

$$\mu = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i), \quad \text{onde o termo } \mu_i \text{ representa o valor dos membros } Fuzzy \text{ para um plano de informação "i". O}$$

operador executa a multiplicação do termo  $(1 - \mu_i)$ . Na soma algébrica o resultado é sempre maior ou igual ao valor de entrada do maior membro *Fuzzy* ( $\mu_i$ ).



*Figura 10 – Mapa de favorabilidade à ocorrência de minerais radioativos obtido segundo o método Fuzzy Ponderado (AHP).*

No operador gama pode-se variar a importância de cada termo (soma algébrica e produto algébrico Fuzzy). A importância de cada termo no operador gama é definida atribuindo-se valores entre (0,1) para o expoente "g". Esta distribuição de importância é melhor entendida através da figura 11.

No gráfico da figura 11 pode-se observar que quando o gama for igual a  $g = 0$ , o resultado dependerá apenas do termo "produto algébrico Fuzzy", e quando  $g = 1$ , o resultado dependerá apenas do termo "soma algébrica Fuzzy". Os valores de gama entre  $0 < g > 0,35$  apresentaram um caráter "diminutivo", ou seja sempre menor ou igual que o menor membro Fuzzy de entrada (m i). Na outra extremidade do gráfico valores gama entre  $0,8 < g > 1,0$  terão um caráter "aumentativo" onde o valor de saída será igual ou maior que o valor do maior membro Fuzzy de entrada (m i). Por fim, para os valores de gama entre  $0,35 < g > 0,8$ , os m i não apresentaram nem um caráter "aumentativo" nem "diminutivo", os valores dos m i de saída, cairão sempre entre o menor e o maior valor dos m i de entrada (Bonham-Carter, 1994).

O valor adotado para o gama foi de  $g = 0,85$ . Este valor encontra-se dentro da faixa de  $0,8 < g > 1,0$ , apresentando assim um caráter "aumentativo", o que indica que o valor do membro Fuzzy de saída será maior do que os valores dos membros Fuzzy de entrada (Bonham-Cater, 1994). O mapa de favorabilidade encontra-se na figura 12.

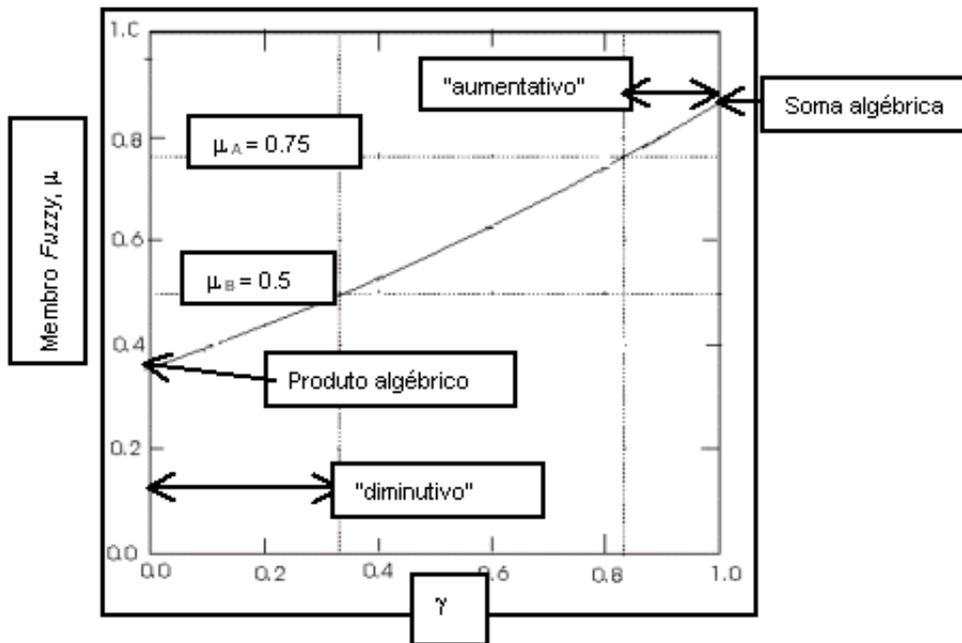


Figura 11 – Gráfico de distribuição da função Fuzzy Gama. Modificado Bonham-Carter (1994).

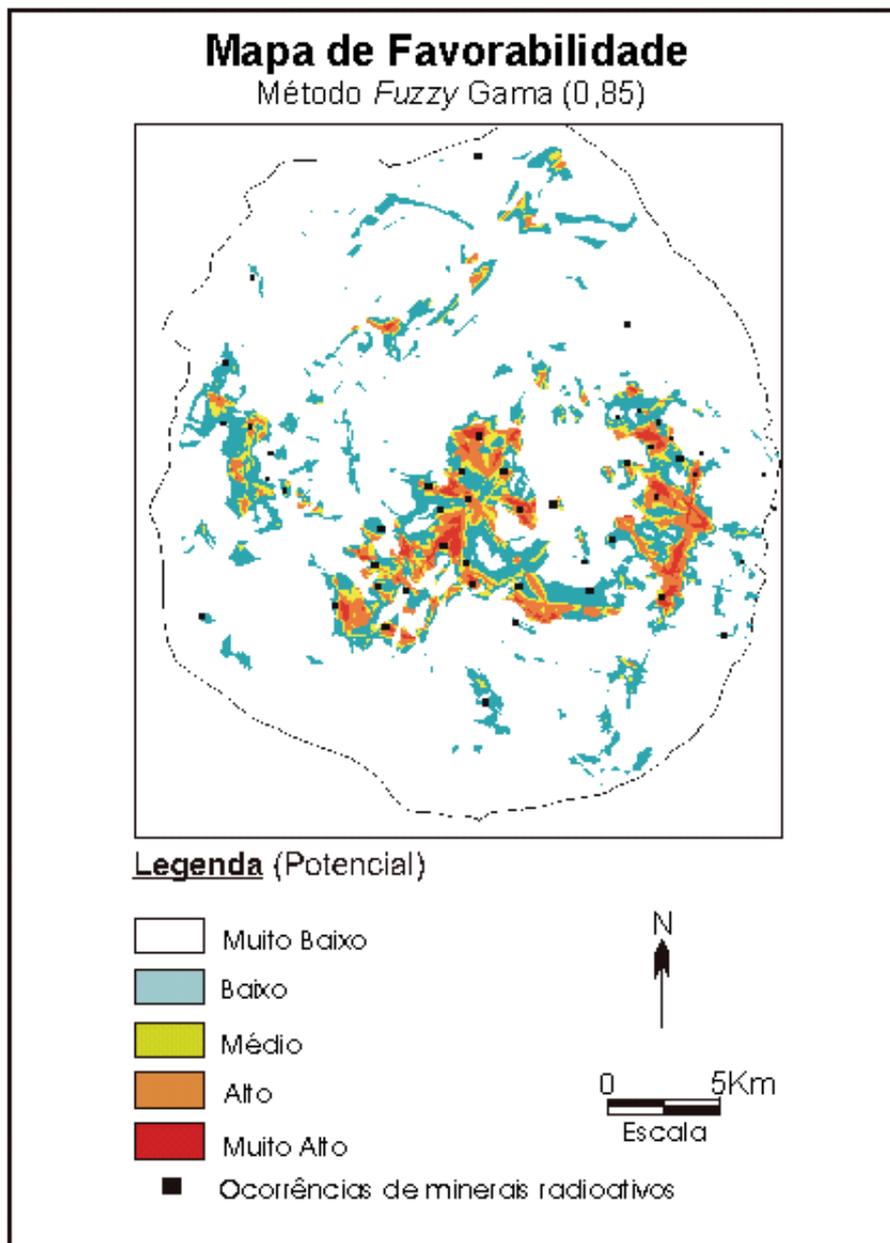


Figura 12 – Mapa de favorabilidade à ocorrências de minerais radioativos obtido segundo o método Fuzzy Gama.

## Método de Bayes

O método Bayesiano apresenta uma abordagem probabilística para o problema, onde o principal conceito do método é a idéia da probabilidade à priori  $p(d)$  e da probabilidade à posteriori  $p(d|e)$  (Bonham-Carter, 1994).



- probabilidade à priori



- probabilidade à posteriori

A probabilidade à priori seria a probabilidade do dado bruto, ou seja a probabilidade da ocorrência mineral para com a área total. A probabilidade à posteriori seria um refinamento do conhecimento (probabilidade à priori), onde através de uma ou mais evidências, na qual se sabe, existe uma relação direta com a mineralização, calcula-se o aumento das chances de sucesso no encontro de um novo depósito mineral. Ou seja, dado que se esta pesquisando sobre uma evidência favorável, quanto esta condição aumenta as chances da descoberta de um novo depósito mineral.

Os dados para o cálculo da probabilidade à posteriori podem ser obtidos através da tabulação cruzada, entre o plano de informação com as ocorrências das mineralizações radioativas e os planos de informação com as evidências. Para isso é necessário que os planos de informação das evidências sejam antes transformados em mapas binários, subdivididos em classes favorável e não favorável.

Os planos de informação das evidências (gama, litologia, lineamentos, estruturas circulares, contato litológico) foram então divididos em mapas binários "0" (não-favorável) e "1" (favorável), segundo os mesmos parâmetros adotados no método Booleano. Com os mapas binários gerados, fez-se a tabulação cruzada das evidências com os depósitos minerais (verdades de campo) obtendo-se assim uma matriz onde cada célula "mij" corresponde a interseção das classes das evidências com as ocorrências minerais. Esses valores foram utilizados para obtenção das probabilidades à posteriori (Figura 13).

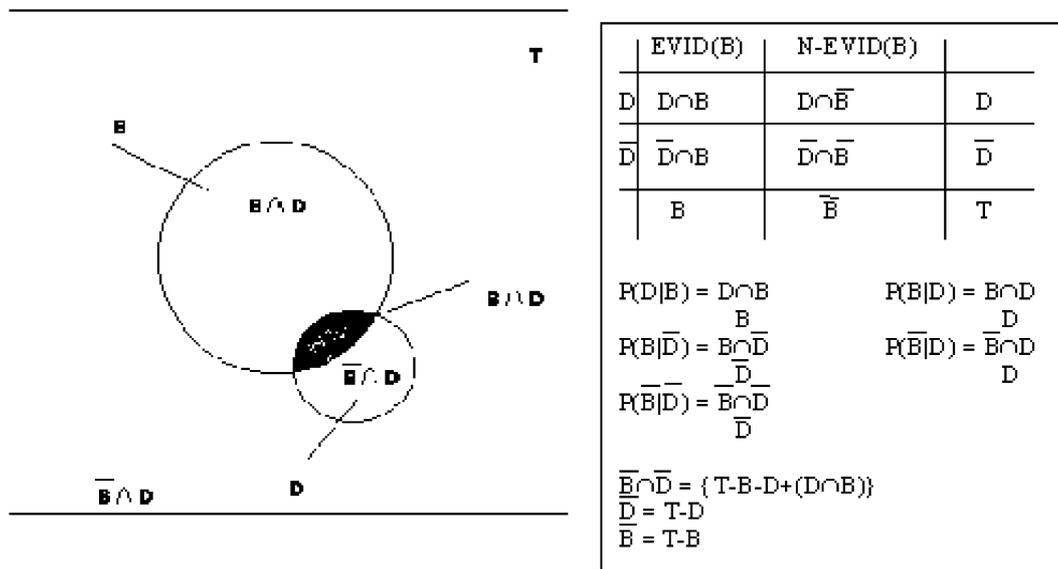


Figura 13 – Tabela de tabulação cruzada e formulações Bayesianas.

Bonham-Carter (1994) propõe ainda outro tipo de formulação, expressa pelo cálculo da chance à priori  $O(d)$  e da chance à posteriori  $O(d|e)$ . Esta formulação permite a integração de diferentes evidências como fatores explicativos para a ocorrência mineral.

A chance à priori é expressa por:



, onde  $p(d)$  é probabilidade a priori.

A chance à posteriori é obtida a partir do desenvolvimento da probabilidade à posteriori. O desenvolvimento esta apresentado abaixo:



Substitui-se  $p(\sim d/e)$  nos dois termos da equação  $p(d/e)$ :



razão de suficiência (LS) (1)

De modo semelhante obtêm-se a chance da ocorrência do minério, dado a ausência da evidência.



razão de necessidade (LN) (2)

Extraindo-se o Logaritmo das equações (1) e (2) acima obtêm-se:



Bonham-Carter (1994) demonstra ainda que para um número maior de evidências, estas seriam integradas através da formulação que computaria a chance à priori, somada à somatória dos logaritmos das razões de suficiência  $e/$  ou necessidade. Sendo necessário porém que as evidências consideradas apresentem, entre si, uma independência condicional .



As razões de suficiência (LS) ou de necessidade (LN) são computadas dependendo da presença ou ausência da evidência para um dado ponto. As razões de suficiência e de necessidade são obtidas através da tabulação cruzada dos planos de informação das evidências com o plano de informação das ocorrências minerais.

Esta soma das razões de suficiência e razão de necessidade foram efetuadas a partir de uma operação matemática condicional, controlada pela presença ou ausência da classe favorável do plano de informação para todos os pontos de interesse. A formulação utilizada é expressa por:



Com o plano de informação, da chance à posteriori gerado, foi então aplicado a expressão matemática abaixo para geração do plano de informação com os valores de probabilidade à posteriori.



O resultado final é uma grade regular com valores de "z" indicando a probabilidade à posteriori da ocorrência mineral. Essa grade foi então, fatiada em faixas variando de muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto grau de probabilidade dos minerais radioativos ocorrerem (figura 14).

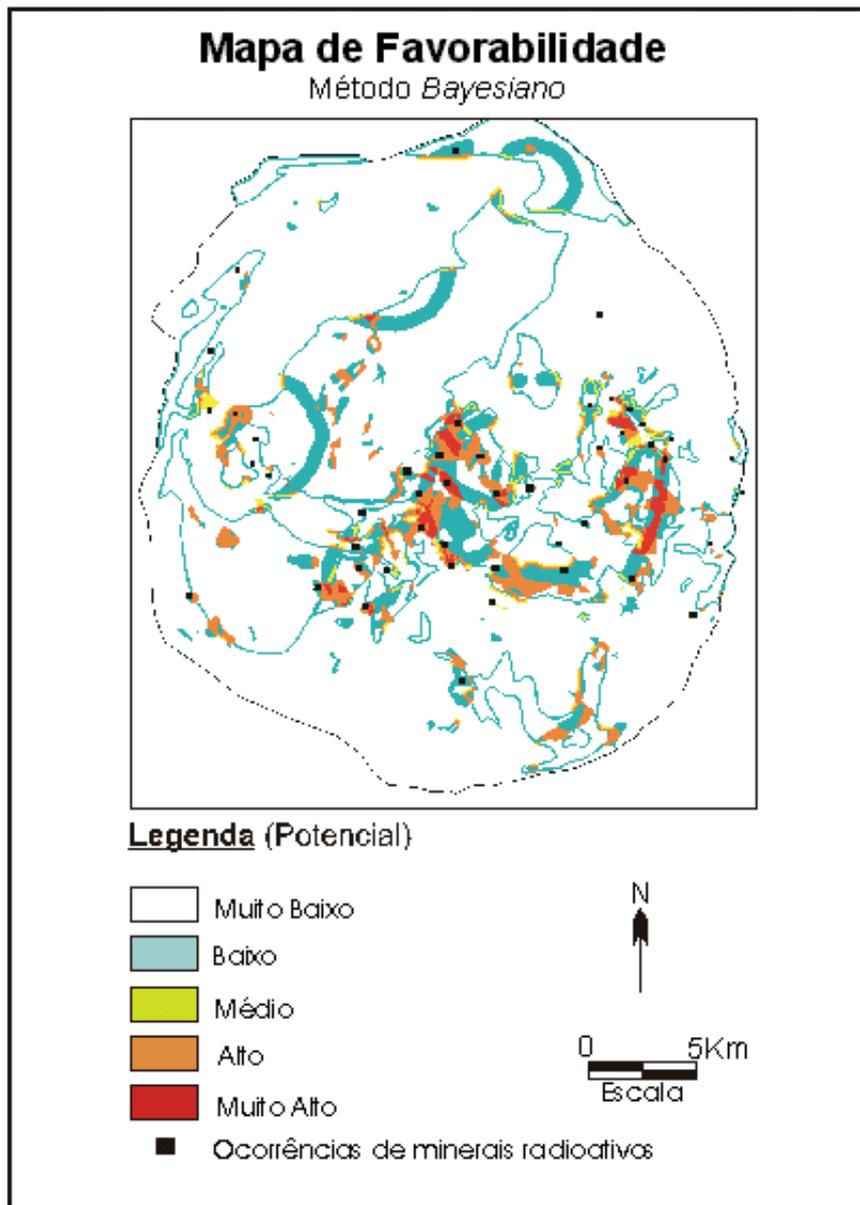
## 6. - Resultados

Para a avaliação dos mapas gerados através dos métodos Booleanos, Média Ponderada, Fuzzy (Mínimo-Máximo, Média, Gama e Ponderado (técnica AHP)) e Bayesiano, utilizou-se a metodologia Bayesiana para avaliação de cada classe (fatia) dos planos de informação gerados.



O objetivo é avaliar o caráter explicativo de cada faixa (muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto) para com as ocorrências minerais. Ou seja, o quanto será aumentado em número de vezes (grau de confiança) o encontro de um novo depósito mineral a partir do momento que se está pesquisando em regiões definidas no mapa de favorabilidade como de alto potencial para a ocorrência desses minérios. O grau de confiança é expresso pela razão da probabilidade à posteriori pela probabilidade à priori.

Os cálculos foram executados para todas as classes (fatias) dos mapas de favorabilidade gerados e os resultados estão apresentados resumidamente na tabela 4 e em tabelas individualizadas por planos de informação. A análise dessas tabelas permitiu, à obtenção de algumas conclusões com relação a qualidade dos mapas de favorabilidade gerados.



*Figura 12 – Mapa de favorabilidade à ocorrências de minerais radioativos obtido segundo o método Fuzzy Gama.*

O mapa de favorabilidade gerado pelo método Booleano foi o que apresentou o pior resultado dentre os mapas gerados (Tabelas 4 e 5). O grau de confiança (6,89) obtido através da teoria Bayesiana para a faixa definida como favorável foi o menor valor obtido. Esse valor passa uma idéia de aumento de probabilidade de encontro do bem mineral. Ou seja, neste caso o fato de se procurar minerais nas áreas definidas como favoráveis aumentariam as chances de descoberta em 6,89 em relação a probabilidade à priori que considera a área toda do platô de Poços de Caldas.

Método	Área (Km <sup>2</sup> )	Grau de confiança (faixa "muito alto")
Booleano*	32,37	6,89
Média Ponderada*	6,47	13,19
Fuzzy Mínimo-Máximo	11,19	9,11
Fuzzy Média	7,00	10,06
Fuzzy Ponderado (AHP)	6,38	16,10
Fuzzy Gama	6,78	7,83
Bayes	7,55	9,34

\* - resultados Almeida Filho (1995)

*Tabela 4 – Resultados de Grau de confiança da faixa "muito alto".*

O método de Média Ponderada obteve um bom resultado, onde as fatias definidas por Almeida Filho (1995) apresentaram uma divisão coerente da área de estudo. A faixa definida como de "muito alto" potencial apresentou um grau de confiança de 13,19 (Tabelas 4 e 6). A faixa de "muito baixo" potencial como o esperado diminui a chance de descoberta em aproximadamente 2,5 vezes (grau de confiança = 0,403). O problema com esse mapa de favorabilidade é que a faixa de "médio" potencial (3,53) apresenta um valor menor do que o da faixa de "baixo" potencial (3,86) quando o esperado era que as faixas apresentassem um aumento crescente dos valores de grau de confiança.

Os mapas obtidos pelos operadores Fuzzy foram os que apresentaram os melhores resultados. O Fuzzy Ponderado foi o que apresentou o melhor resultado dentre todos os métodos de análise multi-critério, o grau de confiança distribui-se de modo crescente com a faixa definida como de "muito alto" o maior valor de grau de confiança, 16,10 (Tabelas 4 e 9). Os outros operadores Fuzzy, também apresentaram bons resultados, com variações muito pequenas entre os resultados.

Os resultados apresentados pelo método Bayesiano não foram muito satisfatórios. O problema provavelmente decorre do corte rígido que é efetuado no início da manipulação dos dados. Esse corte em fatias "favoráveis" e "não favoráveis" elimina a distribuição contínua das evidências, o que como já visto no método Booleano, gera erros durante a integração dos dados. Embora o mapa de favorabilidade, fatiado segundo áreas proporcionais, apresentar valores coerentes de grau de confiança, os valores de amplitude das faixas variam muito, apresentando faixas muito estreitas em amplitude (Tabelas 4 e 11).

Fatias	Área (km <sup>2</sup> )	Porcentagem%	Prob. à posteriori	Grau de confiança
favorável	965,84	96,759	0,1387	6,8954
não-favorável	32,370	3,243	0,0162	0,8053
Total	998,207	100,000	Prob. à priori	0,0201

*Tabela 5 – Técnica Booleana*

Fatias	Área (km <sup>2</sup> )	Porcentagem %	Prob. à posteriori	Grau de confiança
muito baixo (0–20)	864,608	86,618	0,0081	0,4036
baixo (20-35)	79,916	8,006	0,0777	3,8632
médio (35-45)	19,711	1,975	0,0715	3,5295
alto (45-55)	27,497	2,750	0,1356	6,7426
muito alto (55-65)	6,476	0,649	0,2654	13,1950
Total	998,207	100,000	Prob. à priori	0,0201

*Tabela 6 – Técnica Média Ponderada*

Fatias	Área (km <sup>2</sup> )	Porcentagem %	Prob. à posteriori	Grau de confiança
muito baixo (0.00-0.12)	804,955	86,618	0,0089	0,4440
baixo (0.12-0.14)	144,290	8,006	0,0378	1,8812
médio	16,193	1,975	0,1352	6,7202

(0.14-0.30)				
alto (0.30-0.74)	21,579	2,755	0,1483	7,3715
Muito alto (0.74-1.00)	11,193	0,649	0,1832	9,1071
Total	998,207	100,000	Prob. à priori	0,0201

Tabela 7 – Técnica Fuzzy Mínimo-Máximo

Fatias	Área (km)	Porcentagem %	Prob. à posteriori	Grau de confiança
muito alto (0.00-0.32)	799,635	80,109	0,0065	0,3226
baixo (0.32-0.43)	105,64625	10,583	0,0415	2,0611
médio (0.43-0.54)	59,58375	5,969	0,0923	4,5890
alto (0.54-0.67)	26,3325	2,638	0,1363	6,7780
muito alto (0.67-0.95)	7,009375	0,702	0,2026	10,0699
Total	998,207	100,000	Prob. à priori	0,0201

Tabela 8 – Técnica Fuzzy Médio

Fatias	Área (km)	Porcentagem %	Prob. à posteriori	Grau de confiança
muito baixo (0.00-0.32)	868,596	87,017	0,0080	0,4000
baixo (0.32-0.55)	77,233	7,737	0,0662	3,2892
médio (0.55-0.66)	19,208	1,924	0,1286	6,3919
alto (0.66-0.78)	26,786	2,683	0,1288	6,4018
muito alto (0.78-0.97)	6,384	0,639	0,3239	16,1038
Total	998,207	100,000	Prob. à priori	0,0201

Tabela 9 – Técnica Fuzzy Ponderado

Fatias	Área (km)	Porcentagem %	Prob. à posteriori	Grau de confiança
muito baixo (0,00-0,24)	862,222	86,378	0,0080	0,3995
baixo	80,380	8,053	0,0735	3,6551

(0,24-0,39)				
médio	22,195	2,22	0,1118	5,5559
(0,39-0,46)				
alto	26,622	2,667	0,1386	6,8909
(0,46-0,63)				
muito alto	6,788	0,680	0,1576	7,8338
(0,63-0,96)				
Total	998,207	100,000	Prob. à priori	0,0201

Tabela 10 – Técnica Fuzzy Gama

Fatias	Área (km)	Porcentagem %	Prob. à posteriori	Grau de confiança
muito baixo (0,0-0,035)	861,160	86,273	0,0099	0,4930
baixo (0,035-0,11)	87,616	8,777	0,0580	2,8822
médio (0,11-0,24)	10,046	1,006	0,1005	4,9959
alto (0,24-0,57)	31,833	3,189	0,1269	6,3096
muito alto (0,57-0,85)	7,551	0,756	0,1881	9,3497
Total	998,207	100,000	Prob. à priori	0,0201

Tabela 11 – Técnica Bayesiana

## 7. - Conclusões

As técnicas de análise e integração de dados espaciais para a pesquisa mineral são uma ferramenta muito poderosa na predição da áreas potenciais a ocorrência de depósitos minerais, todavia o sucesso da prospecção esta diretamente ligado ao grau de conhecimento da geologia da região, que fornecerá os parâmetros e relações necessárias para definição do modelo prospectivo.

A escolha do modelo prospectivo é a etapa mais difícil do trabalho onde a definição das evidências relevantes e a importância relativa entre elas será de suma importância para a boa eficiência do modelo proposto. A elaboração do modelo depende exclusivamente do conhecimento do especialista para com a geologia da área de estudo, para com os "modelos de depósitos" semelhantes ao da área de estudo e para com as técnicas mais adequadas para a integração dos dados.

Com relação as técnicas empregadas na análise multi-critério dos dados, as metodologias de inferência por classificação contínua, métodos Fuzzy, mostraram ser as mais indicadas para o estudo de fenômenos naturais, pois essas permitem um escalonamento das evidências segundo um grau relativo de importância entre elas, possibilitando assim a criação de classes intermediárias (condição "talvez") às verdades absolutas, diferentemente dos métodos rígidos (Booleanos).

O método Bayesiano apresentou uma abordagem interessante ao problema, todavia os resultados apresentados pelos mapas de probabilidade de ocorrência mineral, não foram satisfatórios. Este baixo resultado pode estar ligado ao fato do "corte" rígido sobre a evidência na etapa inicial do processo, para geração dos mapas de evidência binários (favorável, não favorável).

O método de Bayes, por outro lado, demonstrou ser uma forte ferramenta de avaliação quantitativa dos mapas gerados, sendo a avaliação baseada na probabilidade à posteriori, ou seja no poder explicativo dos mapas de favorabilidade para com as ocorrências minerais (verdades de campo).

## 8. - Bibliografia

Almeida Filho, R. – 1995 – Integração, manipulação e análise espacial de dados na pesquisa mineral através de modelos empíricos de prospecção: Um exemplo no planalto de Poços de Caldas. Revista Brasileira de Geofísica, vol. 13, N02, p.127-142.

Almeida Filho, R. & Paradella, W.R. – 1977 – Estudo do maciço alcalino de Poços de Caldas através da imagens Landsat com ênfase em mineralizações radioativas. Inpe-111-TPT/060. São José dos Campos, 130p.

Bonham-Carter, G. G. – 1994 – Geographic information systems for geoscientists, modelling with GIS. Pergamon.

Burrough, P. A. & McDonnell, R. A. – 1998 – Principles of geographical information systems. Oxford University Press.

Ellert, R. – 1959 – Contribuição á geologia do maciço alcalino de Poços de Caldas. Geologia, 18: 5-63, São Paulo, USP-FFCL.

Fraenkel, M. O., Santos, R. C., Lourenço, F. E. V. L. & Muniz, W. S. – 1985 – jazida de urânio no planalto de Poços de caldas, minas gerais. In: Principais depósitos minerais do Brasil. DNPM, vol.1, cap.5, 89-103.

Rostirolla, S. P. – 1997 – Alguns aspectos da avaliação de favorabilidade em geologia exploratória. Revista Brasileira de Geociências, vol. 27, N04, p.327-338.

Saaty, T. L. –1992 – Multicriteria Decision Making – The Analytical Hierarchy Process, Pittsburg, RWS Publications.

Tolbert, J. – 1966 – The uraniferous zirconium deposits of the Poços de Caldas plateau, Brazil. U.S. Geological Survey Bulletin, 1185 – C;28p.

[| Home](#) | [Página Principal](#) | [Módulo Mix](#) | [Módulo Usuários](#) |