

MODELAMENTO DE DADOS GEOLÓGICOS EM PESQUISA MINERAL SEGUNDO O TEOREMA DE BAYES

FÁBIO ROQUE DA SILVA MOREIRA¹
RAIMUNDO DE ALMEIDA FILHO¹
GILBERTO CÂMARA¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
C. P. 515, São José dos Campos – SP, Brasil

fmoreira@ltid.inpe.br, rai@ltid.inpe.br, gilberto@dpi.inpe.br

Abstract. Bayesian theory was evaluated on the spatial analysis of geological data, to address potential areas for radioactive mineral occurrences in the Poços de Caldas Plateau ($\cong 750 \text{ Km}^2$). Spatial inference techniques were applied controlled by a prospecting model based on diagnostic criteria, represented by favorable lithology, structures features and gamma-ray intensity. In the analysis the 48 mineral occurrences were used to calculate statistical parameters, that served for weighting the evidences of the model. Firstly, *Contrast* studies were conducted to measure the spatial correlation between the evidences and the mineral deposits. This study allowed to determine the threshold of the binary evidences, where the binary patterns present the best spatial correlation with the mineral occurrences. Before the final integration, Qui-square (χ^2) tests were conduct comparing the binary evidences on pairs. The goal was to measure the conditional independence between the classes of the binary evidences. Verified the independence of the binary evidences, it was calculated the Sufficiency (LS) and Necessity (LN) ratio. The natural logarithm of LS and LN, W^+ and W^- respectively, were added to the prior *odds* of the mineral occurrences, controlled by the presence or absence of the potential classes of the binary evidences. This procedure yielded the posterior *odds* values, from where it was obtained the posterior probabilities considering the whole evidences. The resulting product was arbitrary sliced in four potential categories (null, low, medium and high). The bayesian scenario was qualitatively and quantitatively compared with previous results obtained by Boolean and Weighted Means based models. The comparison of both procedures showed that the bayesian scenario accomplished a medium performance. A target area of 27,54 Km^2 (3,78% of the alkaline complex) included 27 mineral occurrences, whereas each previous model encompassed only 24 in an approximately similar area. We also assessed the correlation of mineral occurrences in relation to the potential classes for the different scenarios. The high and medium potential classes of the bayesian scenario showed posterior probabilities 6.69 and 8,39 higher than the prior probabilities. These values were, respectively, 12.6 and 4.97 for the same classes defined by the Weighted Means based model. For the potential class of the Boolean model this value was 5.78. The Bayesian method showed an interesting approach for the spatial analysis. Perhaps being the major advantage, the possibility of applying statistical parameters to calculate the weights of the model's evidences.

Keywords: Bayesian method, spatial analysis, GIS, Poços de Caldas Plateau

1. Introdução

Modelos de análise de dados espaciais em sistemas de informação geográficas (SIG's) são normalmente representações simplificadas de fenômenos naturais. A origem dessa simplificação, muitas vezes, esta relacionada ao entendimento limitado dos fenômenos envolvidos no processo natural; à complexidade dos processos naturais; e/ou a limitação das técnicas matemáticas empregadas na representação destes fenômenos. Essa simplificação normalmente implica em redução nas variáveis (evidências) envolvidas no modelamento, a qual pode gerar imprecisões que levam a conclusões erradas.

A formação de depósitos minerais é um bom exemplo de situações onde a alta complexidade física e química dos processos pode levar a um entendimento incompleto da formação do minério. Na verdade, Bonham-Carter (1994) menciona que esses processos são normalmente muito complexos para uma previsão direta através equações matemáticas, sendo necessário que o processo prospectivo para mapear áreas favoráveis seja baseado principalmente em relações empíricas definidas pelo "modelo de depósito". Esses modelos consistem em um número grande de depósitos conhecidos, considerados semelhantes o

suficiente em termos de suas características, funcionando como guias (modelo descritivo) na pesquisa mineral de novos depósitos do mesmo tipo. Desse modo, em estudos desenvolvidos em SIG's, os "modelos de depósitos" representam um importante papel na seleção e derivação dos dados que serão considerados como evidências (Bonham-Carter, 1994).

Por outro lado, embora aplicativos de SIG's sejam eficientes ferramentas é necessário que o modelo prospectivo seja executado através de apropriada análise estatística e adequado modelo matemático (Turner e Sjoekri, 1999). Seguindo esses princípios vários autores (Harris, 1989; Bonham-Carter, 1990; Burrough e Heuvelink, 1992, Eastman et al., 1995; Almeida-Filho, 1995) interessados em modelos mais precisos e coerentes, têm pesquisado técnicas matemáticas que permitam melhor representação dos processos envolvidos nos fenômenos naturais.

Outro aspecto a ser considerado durante as análises espaciais desenvolvidas em SIG's para a geração de mapas de potencialidade é a qualidade dos produtos gerados. Burrough e McDonnell (1998) relatam que a qualidade dos mapas gerados em SIG's é avaliada, na maioria dos casos, apenas pelo aspecto visual do produto final. Entretanto, controles de qualidades baseados apenas em aspectos visuais são insuficientes se a informação presente está errada ou foi violada por erros durante o processamento. Incertezas e erros são intrínsecos aos dados espaciais e necessitam ser identificados de modo apropriado e não ignorados ou mascarados por efeitos de visualização gráfica.

Seguindo essas premissas o presente trabalho emprega a técnica *Bayesiana* segundo um modelo prospectivo empírico definido por Almeida-Filho (1995), para a definição de áreas potenciais a ocorrência de minerais radioativos no maciço alcalino de Poços de Caldas. Unidades litológicas consideradas como hospedeiras potenciais dessas mineralizações foram combinadas com outras evidências (anomalia gama-radiométrica e dados estruturais) em um processo de inferência espacial definido pela teorema de Bayes. O cenário de potencialidade mineral foi avaliado qualitativamente e quantitativamente, sendo os resultados comparados àqueles obtidos por Almeida-Filho (1995) que utilizou técnicas mais simples de álgebra *booleanas* e cruzamento ponderado dos diferentes critérios.

2. Área de estudo

A área de estudo engloba o platô de Poços de Caldas, localizado na divisa dos estados de Minas Gerais e São Paulo, a aproximadamente 300 Km da capital paulista (**Figura 1a**). O maciço, de formato grosseiramente circular, possui área de cerca de 750Km², com diâmetro de aproximadamente 35 Km.

Rochas de filiação alcalina, com predominância de nefelinas-sienitos (tinguaítos, fonólitos, foiaítos) predominam no complexo de Poços de Caldas, um corpo intrusivo de idade Mesozóica-Cenozóica (**Figura 1b**). Os diversos tipos litológicos de origem alcalina podem ser reunidos em três grupos principais: material vulcânico; rochas efusivas e hipabissais; e rochas plutônicas (Fraenkel et al., 1985). Material vulcânico, representado por brechas, tufos e aglomerados, aflora na porção noroeste do maciço. Rochas efusivas e hipabissais são representadas por fonólitos e tinguaítos, respectivamente, com ampla distribuição por todo o maciço. Rochas plutônicas, constituídas por foiaítos, lujaritos e em menor proporção chibinitos, ocorrem encaixadas nas fácies efusivas e hipabissais. Outra litologia importante no maciço é resultante da alteração hidrotermal e intempérica dos tinguaítos, denominada de "rocha potássica", um dos mais importantes controles litológicos das mineralizações radioativas.

Dados geocronológicos K-Ar (Bushee, 1970), permitem estimar a duração da evolução magmática do complexo alcalino de Poços de Caldas em cerca de 30 m.a., tendo as primeiras manifestações ocorrido no Cretáceo superior (87m.a.). Estudos realizados por Ellert (1959)

reconhecem a existência de 6 fases na formação do complexo alcalino: (a) soerguimento do embasamento; (b) atividades vulcânicas; (c) formação da caldeira; (d) atividade magmática alcalina; (e) formação dos diques anelares; (f) intrusões de foiaítos, chibinitos e lujaritos.

Dois grandes sistemas de falhas com direções predominantes N60W e N40E encontram-se presentes no complexo alcalino. O primeiro está 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 do multispectral scanner (MSS) do satélite Landsat-1, indicam a existência de 7 estruturas circulares no interior da caldeira de Poços de Caldas, possivelmente associadas à presença de cones vulcânicos (**Figura 1c**). A presença de várias ocorrências minerais radioativas ao longo das bordas destas estruturas, levou aqueles autores a considerarem que estas feições constituíram um controle estrutural regional das mineralizações.

São conhecidas 48 ocorrências de mineralizações radioativas (**Figura 1c**), que podem ser agrupadas em três associações: urânio-zircônio, tório-terras raras e urânio-molibdênio (Tolbert, 1966; Oliveira, 1974, Fraenkel et al., 1985). A associação urânio-zircônio é a mais comum, ocorrendo como depósitos aluviais, eluviais e na forma de veios e lentes. A associação tório-terras raras representa o segundo tipo, sendo o depósito de Morro de Ferro o melhor representante dessa associação. A associação urânio-molibdênio é a mais importante, ocorrendo predominantemente em faixas filoneanas ou como corpos lenticulares.

3. Modelo Prospectivo

Modelos de integração e inferência espacial desenvolvidos em SIG, baseiam-se principalmente em relações empíricas definidas com a ajuda descritiva do “modelo de depósito”. O poder explicativo desses modelos depende fundamentalmente do conhecimento geológico prévio sobre a área de estudo, que permitirá a seleção dos critérios diagnósticos mais apropriadas para a “alimentação” do modelo.

A complexidade dos fenômenos envolvidos no processo formador do complexo alcalino e de suas mineralizações, torna muito difícil a concepção de um modelo prospectivo empírico que contemple todas as nuances envolvidas no processo mineralizador. Este envolve aspectos tectônicos, estruturais, litológicos e intempéricos, que apresentam particularidades de uma área para outra. Apesar dessas dificuldades, Almeida-Filho (1995), identificou certas características comuns às ocorrências minerais no maciço alcalino, as quais foram assumidas como parâmetros controladores dessas ocorrências, constituindo critérios diagnósticos à pesquisa de minerais radioativos na área:

litologias favoráveis: presença de controles litológicos, representados por rochas potássicas, material vulcânico e corpos intrusivos de foiaítos;

falhas/fraturas: presença de falhas/fraturas, condicionando o alojamento de veios e lentes mineralizados;

estruturas circulares: presença de cones vulcânicos no interior da cratera, condicionando a ocorrência de mineralizações radioativas em suas bordas;

gama-radiometria: ocorrência de valores anômalos de radioatividade total, indicativos da presença de minerais radioativos (**Figura 1d**).

4. Banco de Dados Georreferenciado

Para a realização do estudo foi montado um banco de dados espacial no SPRING (Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas), desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Câmara et al., 1996). Esses dados foram convertidos para a projeção UTM/SAD69, utilizando 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.

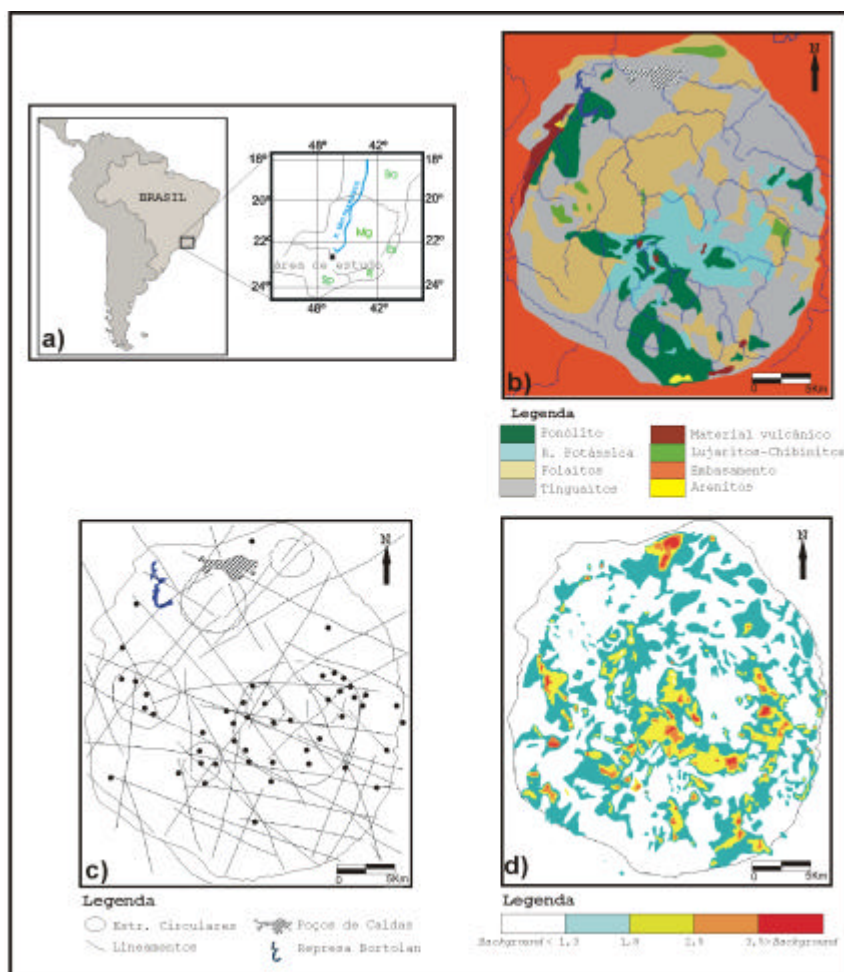


Figura 1 – Localização da área de estudo (a); mapa litológico do maciço alcalino (Fonte: NUCLEBRÁS, 1975a) (b); mapa de lineamentos estruturais (Modificado: Almeida-Filho, 1995) (c); e mapa de anomalias intensidade gama-radiometria (Fonte: NUCLEBRÁS, 1975b) (d).

5. Metodologia

A metodologia *bayesiana* consiste em determinar a probabilidade de ocorrer um evento, dado uma certa condição. Em termos prospectivos pode-se pensar na definição da probabilidade de um depósito ocorrer, condicionada pela ocorrência de uma certa evidência (exemplo: litologia favorável). O método *bayesiano* apresenta uma abordagem probabilística para o problema, onde o principal conceito do método é a idéia da probabilidade *a priori* $P(D)$ e da probabilidade *a posteriori* $P(D|B)$ (Bonham-Carter, 1994).

$$P(D) - \text{probabilidade a priori} \quad (1)$$

$$P(D|B) = P(D) * \frac{P(B|D)}{P(B)} - \text{probabilidade a posteriori} \quad (2)$$

Em pesquisa mineral a probabilidade *a priori* seria a probabilidade da ocorrência mineral considerando-se a área total investigada. A probabilidade *a posteriori* seria um refinamento do conhecimento (probabilidade *a priori*), onde através de uma ou mais evidências, que possuem uma relação direta com a mineralização, calcula-se o aumento do sucesso no encontro de novos depósitos minerais. Ou seja, dado que se está pesquisando sobre uma

evidência favorável, determina-se o quanto esta condição aumenta as chances da descoberta de um depósito mineral.

Nessa inferência as 48 ocorrências minerais foram utilizadas no cálculo de parâmetros estatísticos que serviram de ponderadores das evidências consideradas no modelamento. Para a correta execução do modelamento foi necessário o cálculo de parâmetros estatísticos e a edição das evidências para um padrão que garantisse matematicamente o modelo.

No modelo *bayesiano* as evidências devem estar em padrão binário, antes de serem calculados os ponderadores. Esta exigência decorre do fato que classes de mapas multi-classes não apresentam independência, uma das premissas da teoria *bayesiana*. O processo de conversão de mapas multi-classes para uma forma binária pode ser tanto efetuado subjetivamente, usando-se o julgamento geológico, como pode ser realizado estatisticamente, determinando-se a distribuição binária das evidências, onde a associação espacial em relação as verdades de campo (ocorrências minerais) é maximizada. Como ferramenta estatística para a definição do limiar de corte que maximiza a correlação espacial Bonham-Carter (1994) propõe como um dos parâmetros, o Contraste (C_w).

No caso da litologia e intensidade gama-radiometria, foi adotada a mesma reclassificação definida por Almeida Filho (1995). Ela considerou as unidades litológicas, rocha potássica, lujarito/chibinito, material vulcânico e corpos intrusivos de foiaíto, e as classes radiométricas com anomalia acima de 1,8 vez o *background* como favoráveis.

O cálculo do contraste das estruturas circulares, lineamentos e contatos dos corpos intrusivos de foiaíto foi idêntico. O objetivo foi definir a faixa (*buffer*) ao longo das feições que apresentasse a melhor associação espacial com as verdades de campo. Assim foram construídos três planos de informação (PI's) com fatias (*buffers*) de 25m cada ao longo das feições espaciais. Esses PI's foram cruzados com as ocorrências minerais, para a geração das matrizes de confusão que foram posteriormente reagrupadas, sendo cada fatia comparada com as demais ($\bar{A} = T - A$). As matrizes de confusão binárias forneceram os parâmetros para o cálculo dos contrastes, conforme as equações abaixo.

$$LS = \frac{P(B|D)}{P(B|\bar{D})} \quad (3) \quad LN = \frac{P(\bar{B}|D)}{P(\bar{B}|\bar{D})} \quad (4)$$

$$C = Ln(LS) - Ln(LN) \quad (5)$$

Para a definição do limiar de corte, os valores de contraste foram plotados em um gráfico cumulativo. Pela análise dos gráficos de contraste acumulado foram escolhidos os pontos de máximo valor acumulado como limiares de corte. Os valores de corte obtidos para os lineamentos, estruturas circulares e contatos dos corpos intrusivos foiaítos foram 250m, 625m e 500m respectivamente.

Antes da integração final das evidências binárias foi realizado um estudo de independência condicional através do teste Qui-quadrado (χ^2) e do Coeficiente de Contingência. O objetivo foi garantir que as evidências não violavam num grau elevado a independência entre elas.

A tabulação cruzada entre os pares de evidências binárias, forneceu a matriz de confusão donde foram extraídos os parâmetros necessários para o cálculo do χ^2 . Os valores em preto, na **Tabela 1**, indicam as interseções, em Km², entre as classes dos PI's binários, intensidade gama-radiométrica e litologia (valor observado). Os números em vermelho são os valores esperados para as interseções, caso os PI's binários gama-radiometria e litologia fossem independentes (valor esperado - $T_{i,j}^*$). Os valores foram obtidos pelo produto dos totais das margens divididos pelo total absoluto, conforme na formula abaixo:

$$T_{i,j}^* = \frac{T_i \cdot T_{.j}}{T_{..}} \quad (6)$$

TABELA 1 – Tabela de contingência entre a intensidade gama-radiometria e litologia. Os valores em vermelho indicam valores esperados de interseção ($T_{i,j}^*$) no caso de independência condicional entre as evidências.

		Litologia		
		favorável	não-favorável	totais
Gama	favorável	52.27 (33.66)	26.91 (45.52)	79.18
	não-favorável	256.96 (275.56)	391.19 (372.58)	648.15
	totais	309.23	418.1	727.33

Os valores da interseção entre as classes (gama x litologia), mais o resultado das operações acima foram utilizados na estatística χ^2 e no cálculo do coeficiente de contingência (Equações 7 e 8)

$$c^2 = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \frac{(T_{i,j} - T_{i,j}^*)^2}{T_{i,j}^*} \quad (7)$$

$$C = \sqrt{\frac{c^2}{T_{..} + c^2}} \quad (8)$$

Essas operações foram repetidas para as demais evidências, num total de 10 comparações, considerando-se as 5 evidências binárias. Os resultados dos coeficientes de contingência demonstraram que as evidências violaram o princípio da independência condicional em grau aceitável (valores próximos à 0), não sendo necessário nenhum ajuste das evidências.

Testada a independência entre as evidências binárias calculou-se as LS e LN das classes das evidências para a integração que foi realizada através da formulação da chance a *priore* $O(D)$ e da chance a *posteriore* $O(D|B)$ (Bonham-Carter, 1994). Esta formulação permite a integração de diferentes evidências como fatores explicativos para as ocorrências minerais através de uma soma condicional dos parâmetros LS e LN.

A chance *a priore* é expressa por:

$$O(D) = \frac{P(D)}{(1 - P(D))} \quad (9)$$

, onde $P(D)$ é probabilidade *a priore*.

Para o cálculo das razões de Suficiência (LS) e Necessidade (LN) também foi realizado uma tabulação cruzada, porém desta vez, o cruzamento envolveu as 5 evidências binárias e as ocorrências minerais. As matrizes de confusão forneceram os valores para o cálculo das LS e LN, dos quais foram extraídos os logaritmos naturais, W^+ e W^- respectivamente.

Os W^+ e W^- foram somados ao *logit* da chance a *priore* conforme a presença ou ausência das 5 evidências binárias (Equação 10). O resultado da soma é o expoente da constante “e”, sendo o resultado dessa operação o valor de probabilidade a *posteriore* para ocorrência de minerais radioativos considerando todas as evidências (Equação 11). A imagem resultante foi fatiada em intervalos arbitrários de potencialidade (nula, baixa, média e alta), de modo a identificar as áreas de maior potencial.

$$\log it = (D | B_1 \cap B_{21} \cap \dots B_5) = \log it(D) + \sum_{i=1}^5 W^{\pm} \quad (10)$$

$$P(D | B_1 \cap B_1 \cap \dots B_5) = e^{\log it} \quad (11)$$

6. Resultados e Discussões

O cenário resultante do modelamento *bayesiano* foi avaliado qualitativamente e quantitativamente, comparando-se os resultados com aqueles obtidos por Almeida-Filho

(1995). Na análise qualitativa observou-se como as 48 ocorrências minerais distribuíam-se em relação as diferentes classes de favorabilidade. A classe “alto potencial” encerrou 9 ocorrências minerais. Esse número salta para 27 (56% das ocorrências) quando se agrega a ela a classe “médio potencial” (área conjunta = 27,54 Km² ou 3,78% do maciço alcalino). Em contrapartida, os métodos empregados por Almeida-Filho (1995) mapearam 24 ocorrências na classe favorável indicada pelo método *booleano* (área = 32,4 km²), enquanto o método “soma ponderada” mapeou 24 ocorrências minerais, considerando-se as classes “alto potencial” e “médio potencial” (área = 30,64 Km²).

Na análise quantitativa foi utilizada a probabilidade condicional, para avaliar o caráter explicativo do cenário gerado em relação às verdades de campo (ocorrências minerais). Nessa análise, o parâmetro “grau de confiança” (Equação 12) mede a correlação entre as áreas potenciais e as ocorrências minerais. Se o modelo prospectivo adotado mostrar-se coerente, espera-se alta correlação das ocorrências minerais com as áreas de favorabilidade mais alta. Valores (grau de confiança) expressarão a possibilidade de ocorrências minerais em determinada faixa de potencialidade.

$$\text{Grau de confiança} = \frac{p(\text{depósito} | \text{fatia})}{p(d)} \quad (12)$$

A distribuição relativa dos graus de confiança do modelo *bayesiano* não foi coerente, o valor obtido para a classe “alto potencial” (6,69) foi menor que o da classe “médio” potencial (8,39), quando o esperado seria o contrário. Por outro lado, os valores do modelo Soma Ponderada foram mais coerentes, as classes “alto potencial” e “médio potencial” obtiveram 12,9 e 5,7 respectivamente. A classe favorável do método *booleano* obteve 5,78 de grau de confiança. A **Tabela 3** sumaria os resultados obtidos.

Tabela 3 – Sumário dos resultados obtidos pelos cenários de favorabilidade, através da análise qualitativa e quantitativa.

		Booleano*	Soma Ponderada	Bayes
Classe Alto Potencial	Área (Km ²)	32,37	6,48	5,98
	Grau de confiança	5,78	12,6	6,69
	Depósitos	24	12	9
Classe Médio Potencial	Área (Km ²)	-	24,16	21,56
	Grau de confiança	-	4,97	8,39
	Depósitos	-	12	18
Alto + Médio potencial	Área (Km ²)	32,37	30,64	27,54
	Depósitos	24	24	27

* - resultados referentes à classe favorável.

7. Conclusões

O método Bayesiano constituiu uma abordagem muito interessante ao processo de inferência espacial. A possibilidade do emprego de parâmetros estatísticos, na definição dos ponderadores, é altamente indicada para situações onde torna-se difícil hierarquizar as evidências. Nesses casos o modelo pode servir de guia na definição dos pesos. O estudo do Contraste, para definição do limiar de corte das evidências, também foi bastante interessante pois possibilitou correlacionar mais precisamente as evidências com as verdades de campo. As classes “alto potencial” e “médio potencial” encerraram 27 ocorrências minerais, três incidências a mais do que as obtidas pelos modelos *Booleano* e Soma Ponderada.

Apesar dessas características, o cenário gerado pelo método *Bayesiano* apresentou desempenho geral mediano. Isso pode estar ligado ao “corte” rígido das evidências na etapa

inicial do processo de inferência. Os cortes significaram simplificação dos dados e conseqüentemente redução de informação.

Referências

- Almeida-Filho, R. 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*, v.13, n.2, p.127-142, 1995.
- Almeida-Filho, R., Paradella, W. R.. *Estudo do maciço alcalino de Poços de Caldas através da imagens Landsat com ênfase em mineralizações radioativas*. São José dos Campos: Inpe-111-TPT/060, 1977, 130p.
- Bonham-Carter, G. F.. Mapping mineral potential with a geographic information system. In: Workshop of Computer Treatment of Exploration and Mining Data, Ottawa, 1990. *Proceedings*. Toronto: Computer Application in Mining Exploration, 1990. p.121-130p.
- Bonham-Carter, G. F.. *Geographic information systems for geoscientists, modeling with GIS*. Ontario: Pergamon. 1994. 398p.
- Burrough, P. A., Heuvelink, G. B. M.. The sensitivity of Boolean and continuous (Fuzzy) logical modeling to uncertain data. In EGIS 92, 1992. Munich, Germany. *Proceeding*. Munich: EGIS 92, 1992. vol.1, p.1032-1041.
- Burrough, P. A. & McDonnell, R. A.. *Principles of geographical information systems*. Oxford: University Press. 1998. 333p.
- Bushee, J.. A geochronological study of the alkalinemassif of Poços de Caldas, Brazil. *Laboratório de Geocronologia da Universidade de São Paulo*. Relatório não publicado, 1970, 25p.
- Câmara, G., Souza, R. C. M., Freitas, U. M., Garrido, J. C. P. SPRING: Integrating Remote Sensing and GIS with Object-Oriented Data Modelling. *Computers and Graphics*, v.15, p.13-22, 1996.
- Eastman, J. R., Jin, W., Kyem, P.A.K., Toledano, J.. Raster procedures for multi-criteria/multi-objective decisions. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v.61, n.5, p.539-547. 1995.
- Ellert, R.. Contribuição á geologia do maciço alcalino de Poços de Caldas. São Paulo: Geologia, USP-FFCL, v.18, 1959, p.5-63.
- Fraenkel, M. O., Santos, R. C., Lourenço, F. E. V. L., Muniz, W. S.. Jazida de urânio no planalto de Poços de Caldas, Minas Gerais. In: *Principais Depósitos Mineraiis do Brasil*. DNPM, vol.1, 1985. Cap.5, p.89-103.
- Harris, J.. Data integration for gold exploration in eastern Nova Scotia using a GIS. In: Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology, 7., Calgary, Canada, 1989. *Proceedings*. Canada: ERIM. 1989, p.233-248.
- Nuclebrás – Empresas Nucleares Brasileiras.. Mapa Geológico do Planalto de Poços de Caldas. Inédito. 1975^a.
- Nuclebrás – Empresas Nucleares Brasileiras.. Mapa Radiométrico do Planalto de Poços de Caldas. Inédito. 1975b.
- Oliveira, A. G.. Mineralização de urânio e molibdênio no Planalto de Poços de Caldas. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 28, 1974. Minas Gerais. *Anais*. Porto Alegre: SBG, v.1, 1974. p.207-221.
- Tolbert, J.. The uraniferous zirconium deposits of the Poços de Caldas plateau, Brazil. *U.S. Geological Survey Bulletin*, 28p. (1185 – C). 1966.
- Turner, A. K., Sjoekri, A.. An integrated exploration methodology based on GIS and statistical analyses. In: International Conference on Applied Geologic Remote Sensing, 13., Vancouver, CA, 1999. *Proceedings*. Canada: British Columbia, v.1, 1999. p.247-254.