

## ESTUDO GEOESTATÍSTICO DE UMA PORÇÃO DA JAZIDA DE CARVÃO DO LEÃO, RIO GRANDE DO SUL

*José Leonardo Silva Andriotti – CPRM (Porto Alegre)*

### ABSTRACT

This paper aims to evaluate global coal resources at Minas do Leão, RS, using Geostatistics and comparing the results to the values obtained by traditional methods. Variograms of all variables studied are presented and discussed.

Kriging results are presented and discussed, and results of errors are also presented and interpreted.

The study was based on the results of 124 drillholes in which total coal seam and coal thicknesses were measured.

The results presented here were obtained by using the equipment and programs of the Paris School of Mines.

### INTRODUÇÃO

O objetivo do presente trabalho é o de estimar as reservas totais de carvão de uma área situada na Bacia Carbonífera Leão-Butiá (RS), área esta constituída pela união de vários alvarás detidos pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, utilizando a Geoestatística como ferramenta. Adicionalmente, por já ter sido a mesma área anteriormente estimada pelo método de curvas de isovalores, é feita uma comparação entre os resultados obtidos através de ambos os métodos.

Com respeito ao tratamento dos dados, foram utilizados os programas e o equipamento disponível na Escola Nacional Superior de Minas de Paris, sendo o presente trabalho uma parte do desenvolvido pelo autor junto à referida Escola.

### LOCALIZAÇÃO

A área estudada está situada no Estado do Rio Grande do Sul, entre as coordenadas UTM 388.500 e 400.500m (E-W) e entre 6.674.000m e 6.684.500m (N-S), ao norte da localidade de Minas do Leão, e faz parte da Bacia Carbonífera Leão-Butiá. A superfície estudada é de aproximadamente cento e cinquenta quilômetros quadrados. A localização da área objeto do presente estudo pode ser visualizada na figura 1.

### AMOSTRAGEM

Os dados que compõem o presente trabalho são retirados de testemunhos oriundos de campanhas de sondagem desenvolvidas pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais entre 1975 e 1982. Como ocorreu com vários outros jazimentos de carvão no Sul do Brasil, a pesquisa foi iniciada com uma malha pioneira de 4 km x 4 km, tendo sido feita, após interpretação, nova campanha de furos, desta vez em malha 2 km x 2 km, tendo-se cerrado a malha de informação nas áreas consideradas prioritárias até 1 km x 1 km, 1 km x 1 km centrada e, em pequena parte da área estudada, até 0,5 km x 0,5 km.

Todas as sondagens são verticais, executadas em diâmetro NW, tendo as camadas de carvão sido integralmente testemunhadas e executados perfis geofísicos (resistência, resistividade, gama e SP). A descrição das camadas de carvão foi feita em escala 1:20; para cada camada foram feitas amostras únicas de todo o material coletado visando à determinação de parâmetros como teores de cinzas e de enxofre.

O presente estudo abrange 124 sondagens, nem todas contendo informações sobre todas as camadas, pois em algumas delas certas camadas de carvão não ocorriam. A malha de amostragem pode ser visualizada na figura 2.

Assim, as variáveis  $S_3CT$ ,  $S_3CC$ ,  $ICT$  e  $ICC$  foram estudadas através de 123 furos e as variáveis  $I_3CT$  e  $I_3CC$  tiveram seus resultados interpretados a partir dos resultados de 118 sondagens. Para cada camada utilizou-se dois valores (CT e CC), totalizando, assim, seis variáveis para comporem o presente estudo.

Os furos utilizados pertencem a três gerações diferentes: uma primeira, composta de cinco furos, sobre malha 4 km x 4 km; uma segunda, em malha 2 km x 2 km, composta de 10 furos, e as demais a uma última geração, que inclui todas as malhas mais detalhadas citadas anteriormente.

Sobre os dados de espessura de camada (CT e CC) foi feita, na área, avaliação de recursos através do método de curva de isópacas, classificando as reservas de acordo com a metodologia adotada por USGS/USBM (1976). De acordo com este método, as reservas são classificadas em medidas, indicadas e inferidas de acordo com o raio máximo de influência de 400m, 1200m e 4800m respectivamente.

## GEOLOGIA

A área estudada faz parte do jazimento de carvão conhecido pelo nome de Jazida do Leão, que faz parte da Bacia Carbonífera Leão-Butiá.

A Jazida do Leão está encaixada em rochas do Sistema Gondwana, de idade Permo-Carbonífera. Em superfície afloram rochas de idade Triássica, representadas por arenitos avermelhados com grãos médios a finos, havendo também coberturas de idade Quaternária. A formação que contém as camadas de carvão estudadas é a Formação Rio Bonito, composta predominantemente por siltitos, siltitos carbonosos e argilitos cinza claro aos quais se intercalam camadas e leitos de carvão. A Formação Rio Bonito também está representada, na área, por arenitos finos a grossos, predominantemente quartzosos, e por rochas conglomeráticas na base. Ocorrem, ainda, e também ocasionalmente, intrusões de diabásio. A espessura total desta Formação se situa entre 50 e 120 metros na região.

As rochas da região mergulham para norte entre  $1^\circ$  e  $2^\circ$ , e os falhamentos mais importantes têm direção aproximada N  $35^\circ$ - $50^\circ$  E. Uma grande falha, de direção N  $30^\circ$ - $40^\circ$  E, corta a área dividindo-a em duas porções; na porção leste estão situadas minas de carvão a céu aberto, e na parte oeste (em que se situa a área estudada) está situada a Mina do Leão I, em atividade, e a Mina do Leão II, ainda em fase de implantação, ambas subterrâneas.

A profundidade das camadas de carvão objeto do presente estudo varia entre 150 e 300 metros, e estas camadas são denominadas, a partir do topo, de  $S_3$  (Superior 3), I (Inferior) e  $I_3$  (Inferior 3). Há, ainda, outras camadas de carvão na área ( $S_1$ ,  $S_2$ ,  $I_2$ ,  $I_4$ ,  $I_5$ ), mas, por razões de qualidade inferior, pequena espessura, grande profundidade ou descontinuidade na região, entre outros fatores, têm menor importância e não fizeram parte do presente estudo. A Camada I é a única explotada, atualmente, nas minas em operação na Bacia Carbonífera Leão-Butiá.

Como as camadas de carvão da área apresentam intercalações de material estéril, fez-se duas medidas de espessura de camada: a espessura total da camada, incluindo o carvão e as intercalações estéreis, aqui denominada de CT (Camada Total), e a espessura que corresponde à soma das bandas carbonosas presentes entre o topo e a base da camada, descontadas as intercalações estéreis, aqui referida como CC (Carvão na Camada).

## ESTATÍSTICA

O estudo estatístico dos dados mostrou terem as seis variáveis estudadas distribuições normais unimodais, sem a presença de *outliers*.

As correlações entre medições feitas na mesma camada (CT e CC) são similares, valendo 0,86 para a camada S<sub>3</sub>, 0,83 para a camada I e 0,83 para a camada I<sub>3</sub>.

As razões médias CC/CT variam entre 51% (para a camada I) e 59% (para a camada I<sub>3</sub>).

A variância dos dados mais elevada se verifica na camada I<sub>3</sub>, tanto para CT como para CC, sendo os valores mais baixos registrados na camada I.

O conjunto de dados da área do Leão mostrou grandes similaridades com os dados tratados por Buxton (1982), estudando um jazimento de carvão da Pennsylvania; a área estudada por Buxton tem cerca de 150 km<sup>2</sup> também, e, tratando dados de 208 sondagens encontrou, para a camada principal, valores muito próximos aos encontrados para a camada I, como espessura média da camada total (2,29m na Pennsylvania e 2,30m no Leão), valores similares de variância e coeficientes de correlação; seus dados também pertencem a diferentes gerações, ou seja, diferentes etapas de pesquisa. Os estudos geoestatísticos também mostraram similaridades.

Os principais valores obtidos no estudo estatístico dos dados estão apresentados na tabela I.

| VARIÁVEL          | média( $\bar{X}$ ) | Variância | Desv.Padrão | Assimetria | Curtose |
|-------------------|--------------------|-----------|-------------|------------|---------|
| S <sub>3</sub> CT | 1,94               | 0,54      | 0,74        | 0,06       | 2,79    |
| S <sub>3</sub> CC | 1,09               | 0,16      | 0,41        | 0,03       | 2,49    |
| ICT               | 2,30               | 0,45      | 0,67        | -0,81      | 3,61    |
| ICC               | 1,18               | 0,15      | 0,39        | -0,19      | 3,11    |
| I <sub>3</sub> CT | 2,10               | 0,67      | 0,82        | -0,42      | 2,67    |
| I <sub>3</sub> CC | 1,25               | 0,27      | 0,52        | -0,26      | 2,45    |

TABELA I

## VARIOGRAMAS

Foram executados, para todas as variáveis, em duas dimensões, variogramas experimentais em quatro direções: N-S, E-W, N 45° E e N135°W. Tendo-se verificado, para todas as variáveis, isotropia, através da execução de rosas de alcance, executou-se também variogramas médios ou totais. Utilizou-se, para a sua execução, passos de 500 metros com tolerância linear igual a 100 metros. A visualização dos variogramas médios (figuras 3 a 8) mostra a inexistência de deriva em todas as variáveis na área estudada.

Em todas as variáveis ajustou-se os variogramas através de duas estruturas imbricadas, ambas esféricas, tendo a primeira estrutura um alcance sempre inferior à menor distância entre amostras, que é de 500 metros (o alcance da primeira estrutura está em torno de 300 metros), sem efeito pepita.

O menor alcance foi encontrado na camada I, tanto para CT como para CC (ambos em torno de 2500 metros); esta camada é a que tem, como visto no item Estatística, os valores mais elevados de variância dos dados.

O ajuste dos variogramas, executado de acordo com o recomendado pela bibliografia especializada (Journel e Huijbregts, 1978, Michel David, 1977, e outros), apresentou, para as seis variáveis estudadas, os seguintes resultados:

| VARIÁVEL          | MODELOS  |
|-------------------|--|
| S <sub>3</sub> CT | Esf(C=0,27 ; a = 300) + Esf(C=0,30 ; a = 4300) |
| S <sub>3</sub> CC | Esf(C=0,09 ; a = 300) + Esf(C=0,08 ; a = 3000) |
| ICT               | Esf(C=0,23 ; a = 300) + Esf(C=0,21 ; a = 3000) |
| ICC               | Esf(C=0,05 ; a = 300) + Esf(C=0,09 ; a = 3000) |
| I <sub>3</sub> CT | Esf(C=0,39 ; a = 300) + Esf(C=0,29 ; a = 2500) |
| I <sub>3</sub> CC | Esf(C=0,11 ; a = 300) + Esf(C=0,19 ; a = 2500) |

KRIGAGEM

Procedeu-se à Krigagem Ordinária (média desconhecida) dos dados dividindo-se a área em 86 blocos de 1 km x 1 km, sendo o número de amostras por bloco variável, em média, entre 3 e 9. Executou-se estimação local e estimação global, tendo apenas a última seus resultados apresentados aqui, pois visa-se apresentar somente os valores das reservas globais.

Os valores krigados para cada variável, bem como os respectivos valores de variância de estimação de Krigagem, são apresentados na tabela II.

| VARIÁVEL          | VALOR KRIGADO | VAR. ESTIM. KRIGAGEM |
|-------------------|---------------|----------------------|
| S <sub>3</sub> CT | 1,81          | 0,23                 |
| S <sub>3</sub> CC | 1,05          | 0,05                 |
| ICT               | 2,34          | 0,10                 |
| ICC               | 1,23          | 0,04                 |
| I <sub>3</sub> CT | 2,05          | 0,13                 |
| I <sub>3</sub> CC | 1,20          | 0,07                 |

TABELA II

A variância relativa de estimação da superfície foi calculada utilizando-se a fórmula (Matheron, 1970)

$$\frac{\sigma_s^2}{s^2} = \frac{1}{n^2} \left( \frac{1}{6} N_2 + 0,06 \frac{(N_1)^2}{N_2} \right)$$

onde 2N<sub>1</sub> e 2N<sub>2</sub> são os números de elementos paralelos aos dois lados da malha que constituem o perímetro das zonas positivas (N<sub>1</sub> ≥ N<sub>2</sub>), e n a quantidade de blocos krigados.

Considerando-se que N<sub>1</sub> = 11, N<sub>2</sub> = 10 e n = 86, se obtém um valor para a variância relativa de estimação da superfície ao redor de 0,00032 e um desvio padrão relativo da ordem de 0,017, isto é, de 1,7%.

A variância relativa da espessura, consideradas duas estruturas, pode ser dada por

$$\frac{\sigma_p^2}{p^2} = \frac{1}{n} \left[ F \left( \frac{l}{a_1}, \frac{l}{a_1} \right) \times C_1 + F \left( \frac{l}{a_2}, \frac{l}{a_2} \right) \times C_2 \right]$$

Os valores obtidos para  $\frac{\sigma_p}{p}$ , desvio padrão relativo da espessura, vale, para as seis variáveis, aproximadamente:

- S<sub>3</sub>CT - 6,0%
- S<sub>3</sub>CC - 3,4%
- ICT - 5,5%
- ICC - 2,8%
- I<sub>3</sub>CT - 7,2%
- I<sub>3</sub>CC - 4,3%

Os valores respectivos de desvio padrão relativo volumétrico valem

- S<sub>3</sub>CT - 6,2%
- S<sub>3</sub>CC - 3,9%
- ICT - 5,8%
- ICC - 3,3%
- I<sub>3</sub>CT - 7,5%
- I<sub>3</sub>CC - 4,6%

ESTIMAÇÃO DE RESERVAS TOTAIS

Para os cálculos de reservas totais foram utilizados, como valores de densidade (t/m<sup>3</sup>), os seguintes:

- S<sub>3</sub>CT, ICT e I<sub>3</sub>CT = 1,85
- S<sub>3</sub>CC e ICC = 1,60
- I<sub>3</sub>CC = 1,75

Os valores de reservas totais obtidos através de krigagem e os correspondentes valores obtidos pelo método das curvas de isovalores estão listados na tabela III, em 10<sup>6</sup> toneladas.

| VARIÁVEL          | KRIGAGEM<br>(x10 <sup>6</sup> ) | ISÓPACAS<br>(x10 <sup>6</sup> ) |
|-------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| S <sub>3</sub> CT | 287,97                          | 342,99                          |
| S <sub>3</sub> CC | 144,48                          | 172,03                          |
| ICT               | 372,29                          | 430,02                          |
| ICC               | 169,24                          | 189,74                          |
| I <sub>3</sub> CT | 326,15                          | 318,46                          |
| I <sub>3</sub> CC | 180,60                          | 168,90                          |

TABELA III

Pela tabela III observamos que os valores krigados para a camada S<sub>3</sub> sofrem uma diminuição de cerca de 16% em relação aos correspondentes obtidos pelo método de isópacas, e na camada I estes valores são em torno de respectivamente 13% e 10% menores para CT e CC. A camada I<sub>3</sub>, que tem uma variância mais elevada, apresentou uma aproximação dos resultados, havendo mesmo valores mais elevados para a krigagem, em torno de 2,5% para CT e cerca de 7% para CC.

Para os resultados obtidos através da krigagem se pode, conforme visto no item Krigagem, se obter valores de desvio padrão relativo volumétrico, o que não é possível obter pelo outro método, que não permite uma avaliação do erro que se comete na avaliação.

#### CONCLUSÕES

- Os variogramas de todas as variáveis mostram a presença de duas estruturas esféricas (estruturas imbricadas), a primeira com um alcance inferior à malha mínima existente na área e a segunda variando, de acordo com a variável, entre 2500 e 4300 metros; para malhas com espaçamento semelhante ao da área estudada há inúmeros outros trabalhos que mostram conclusões similares, mostrando, a primeira estrutura presente, que o espaçamento da malha não permite um bom conhecimento do comportamento à origem do variograma;

- A estimação de reservas através da utilização da krigagem apresenta um ganho de precisão em relação ao método das curvas de isovalores por, entre outras razões, utilizar, para a estimativa, as informações disponíveis de forma plena, considerando pontos interiores e exteriores a cada bloco krigado; além disso, o método de krigagem permite a obtenção de medidas como, por exemplo, a variância de estimação de krigagem; também pela utilização de Geoestatística se pode estimar os desvios padrão relativos de superfície, de espessura e de volume de uma determinada área em estudo.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRIOTTI, J.L.S. - 1987 - Étude géostatistique du gisement de charbon de Minas do Leão (Brésil), ENSMP. 25p. (Bol. S-216/87/G).
- BUXTON, B.E. - 1982 - Coal reserve assessment: a geostatistical case study. Master of Science Degree. 84p.
- DAVID, M. - 1977 - Geostatistical ore reserve estimation. 1ª ed. Amsterdam, Elsevier Scientific Publishing Company, 364p.
- JOURNEL, A.G. e HUIJBREGTS, Ch.J. - 1978 - Mining geostatistics. 3ª ed. New York, Academic Press Inc., 600p.
- MATHERON, G. - 1970 - La théorie des variables régionalisées, et ses applications. 1ª ed. Fontainebleau, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 212p.
- USGS/USBM - 1976 - Principles of the mineral resource classification system of the U.S. Bureau of Mines and U.S. Geological Survey, USGS/USBM. 9p. (Bol. 1450-A).
- USGS/USBM - 1976 - Coal resource classification system of the U.S. Bureau of Mines and U.S. Geological Survey, USGS/USBM. 11p. (Bol. 1450-B).



FIGURA 1 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO

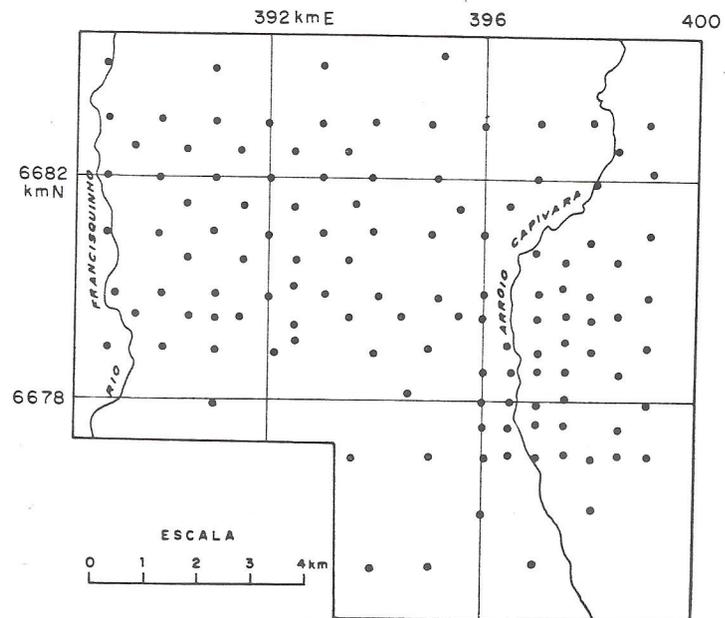


FIGURA 2 - MALHA DE AMOSTRAGEM

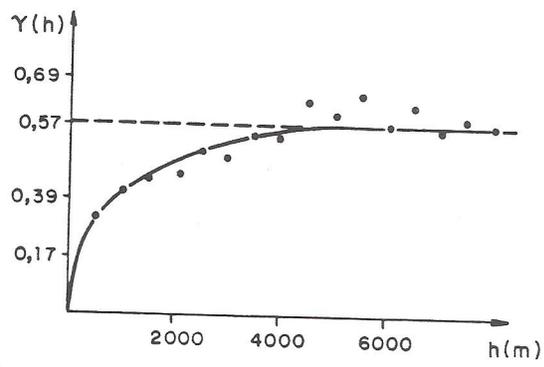


FIGURA 3 - SEMI-VARIOGRAMA - S3CT

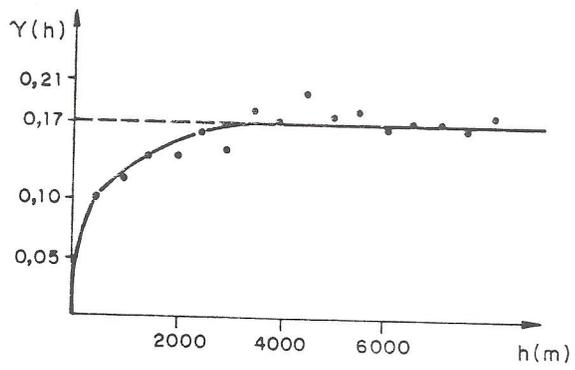


FIGURA 4 - SEMI-VARIOGRAMA - S3CC

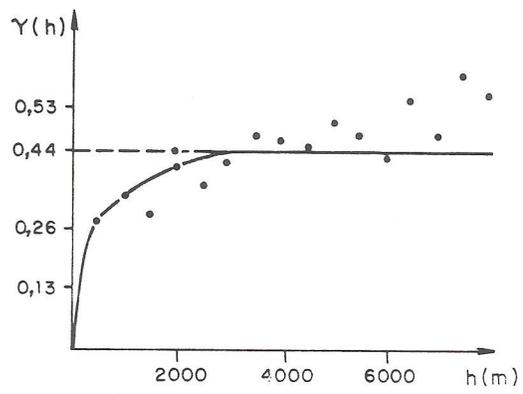


FIGURA 5 - SEMI-VARIOGRAMA - ICT

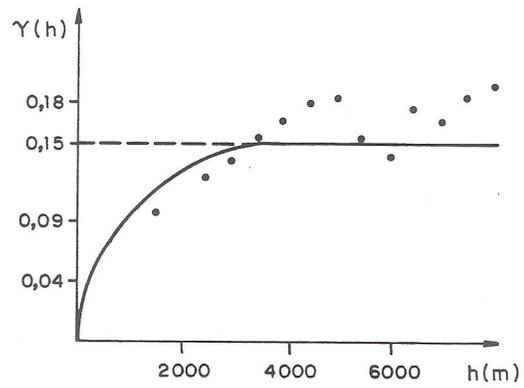


FIGURA 6 - SEMI-VARIOGRAMA - ICC

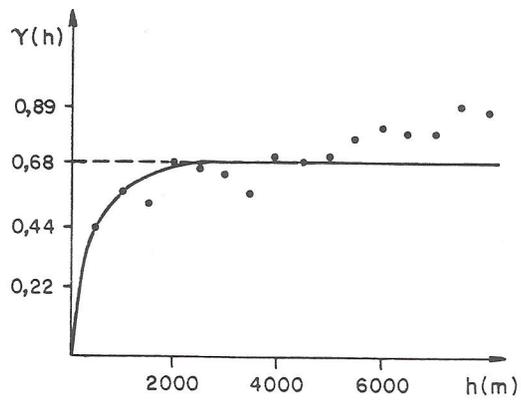


FIGURA 7 - SEMI-VARIOGRAMA - I3CT

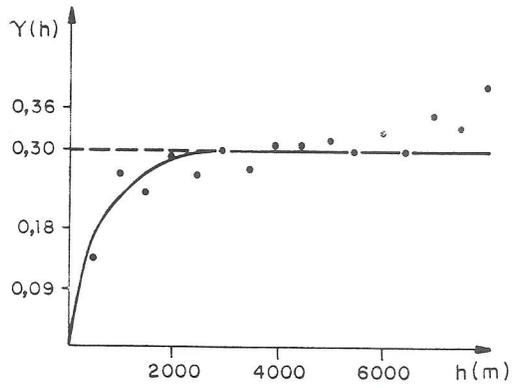


FIGURA 8 - SEMI-VARIOGRAMA - I3CC