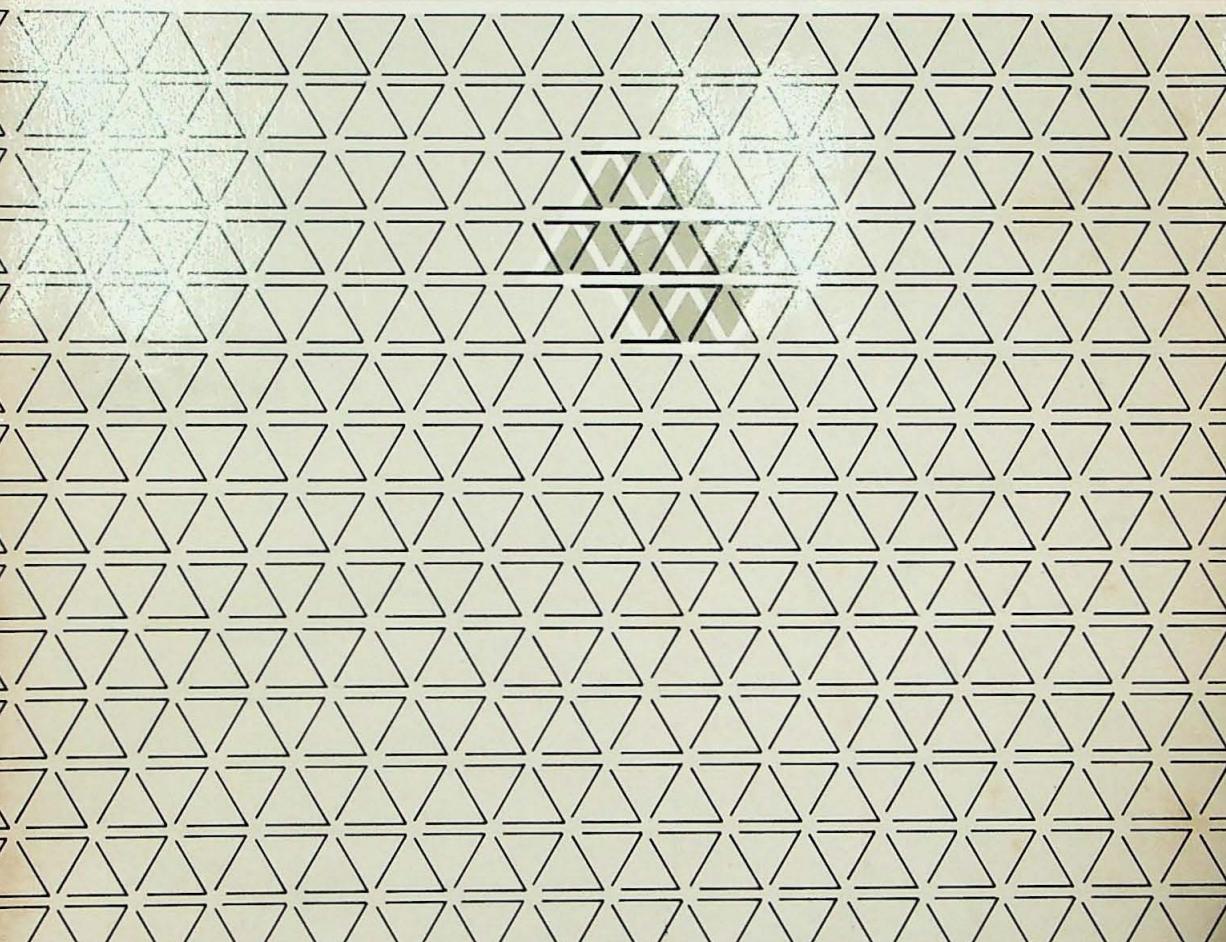


GEOCIÊNCIAS

Universidade Estadual Paulista / UNESP



ESTUDO TECTÔNICO DA PORÇÃO CENTRAL DA BACIA DE TAUBATÉ (SP) POR GEOESTATÍSTICA

Harmi TAKIYA*
Claudio RICCOMINI**
Paulo Milton Barbosa LANDIM***

RESUMO: Técnicas de análise geoestatística, compreendendo a elaboração de semi-varíogramas e krigagem pontual, foram aplicadas a um conjunto de 35 dados de sondagens, irregularmente distribuídos, para pesquisa de folhetos pirobetuminosos, efetuadas pelo então Conselho Nacional de Petróleo na porção central da Bacia de Taubaté, região de Taubaté, Tremembé e Pindamonhangaba, Estado de São Paulo. Os resultados obtidos permitiram a elaboração de um mapa de contorno estrutural a partir de uma rede regular estimada com intervalo de 500 x 500 metros, de uma camada-guia de folheto papiráceo, a qual indicou um padrão de dobramentos não cilíndricos, aproximadamente cônicos, bem como a presença de abatimento de blocos com rejeito expressivo, da ordem de dezenas de metros. Estas feições são correlacionáveis a estruturas observadas em superfície, relacionadas possivelmente à atividade tectônica transcorrente pós-sedimentar.

UNITERMOS: Geoestatística; krigagem pontual; Bacia de Taubaté; análise estrutural; tectonismo pós-sedimentar.

1. INTRODUÇÃO

Os métodos geoestatísticos foram desenvolvidos visando a resolução de problemas ligados à prospecção mineral (MATHERON⁴), que continua sendo a sua principal área de aplicação até hoje. Estes métodos, entretanto, podem ser aplicados em diversas outras situações, sempre que ocorram variáveis regionalizadas.

O presente estudo é um exemplo de aplicação não usual dos métodos geoestatísticos, uma vez que a variável regionalizada é a cota de ocorrência de uma camada se-

* Depto. Paleontologia e Estratigrafia – Instituto de Geociências – USP – 01498 – São Paulo – SP. (Mestranda)

** Depto. Paleontologia e Estratigrafia – Instituto de Geociências – USP – 01498 – São Paulo – SP. Bolsista – CNPq.

*** Depto. de Geologia Sedimentar – Instituto de Geociências e Ciências Exatas – UNESP – 13500 – Rio Claro – SP.

dimentar presente na porção central da Bacia de Taubaté, sendo o objetivo deste trabalho a elaboração de um mapa de contorno estrutural a partir de valores estimados por krigagem.

A Bacia do Taubaté, (Fig. 1) integrante do Sistema de Rifts Continentais da Serra do Mar (ALMEIDA¹; MELO *et alii*⁵), apresenta evolução tectônica bipartite, caracterizada por um estágio distensivo sin-sedimentar NW-SE de idade paleocênica, e um estágio transcorrente compreensivo (transpressional) pós-sedimentar, orientado segundo E-W, de idade pós-oligocênica (RICCOMINI⁶).

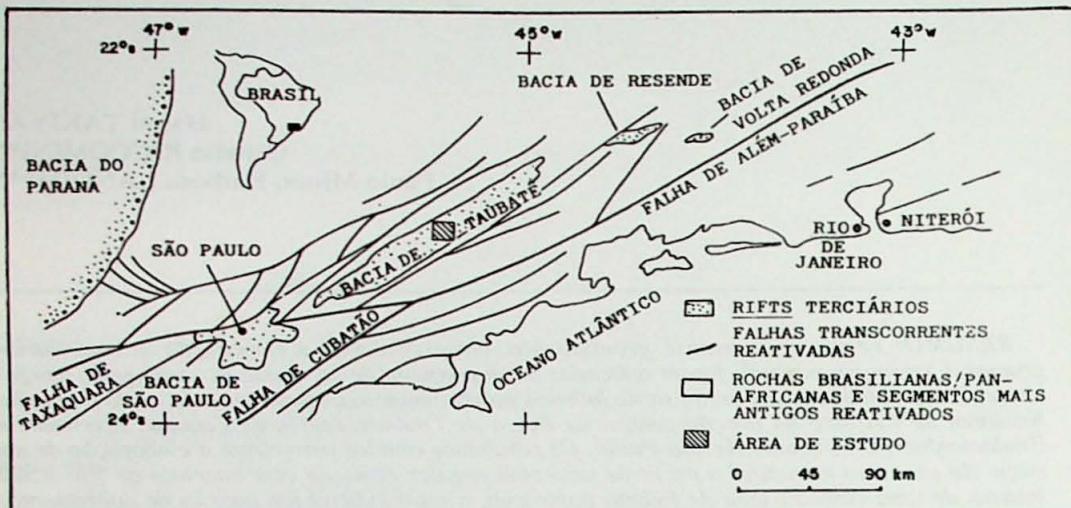


FIG. 1 – O sistema de "Rifts" da Serra do Mar e localização da área estudada, modificado de RICCOMINI *et alii*⁷.

Durante o estágio distensivo, a bacia, um hemi-graben com abatimento para NW, foi preenchida inicialmente por depósitos fanglomeráticos marginais e basais, posteriormente por sedimentos peltíco-carbonáticos lacustres e, finalmente, por depósitos fluviais essencialmente meandrantes, (RICCOMINI *et alii*⁷). Reativações tectônicas sin-sedimentares são responsáveis pelas intercalações de depósitos rudáceos entre os sedimentos lacustres e fluviais.

A sedimentação lacustre está bem representada na porção central da bacia, notadamente entre Quiririm e Pindamonhangaba, onde atinge espessura superior a 150 metros.

A julgar pelo cimento para NW, contra a borda de falha da bacia, de uma superfície de aplainamento anterior à sedimentação – Superfície do Japi (ALMEIDA¹) – esta porção central pode ter recebido até 700-800 metros de sedimentos, embora os dados atualmente disponíveis referiram-se a espessuras no máximo pouco superiores a 500 metros (HASUI & PONÇANO³).

2. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Recentes estudos da porção central da bacia (região de Caçapava-Pindamonhangaba, SP) evidenciaram a existência de falhamentos orientados segundo NNE, liga-

dos à atividade tectônica transcorrente, afetando sedimentos da fácie fluvial, ao que RICCOMINI *et alii*⁸, atribuiram a denominação de Zona Transtensional de Taubaté (Fig. 2). Estas falhas manifestam-se em superfície ora sob a forma de abatimentos de caráter normal, ora pelo cavalgamento de blocos. Localmente definem estruturas-em-flor positivas e negativas, no sentido de HARDING². Dobras não cilíndricas, aproximadamente cônicas, de amplitude decimétrica e com eixos orientados segundo NNW também foram observadas (RICCOMINI⁶). A região é caracterizada pela carência de boas exposições, devido à morfologia relativamente plana associada à presença de extensa cobertura coluvial e aluvial quaternária. As observações podem ser efetuadas apenas em cortes de estrada e nas poucas cavas para extração de argila lá existentes, sendo portanto pontuais.

Não se pode, dessa forma, ter certeza de que as observações das estruturas em superfície, sobretudo no tocante aos seus arranjos espaciais – forma, direção e mergulho – sejam válidas em subsuperfície. Por exemplo, a atitude média obtida em aflo-

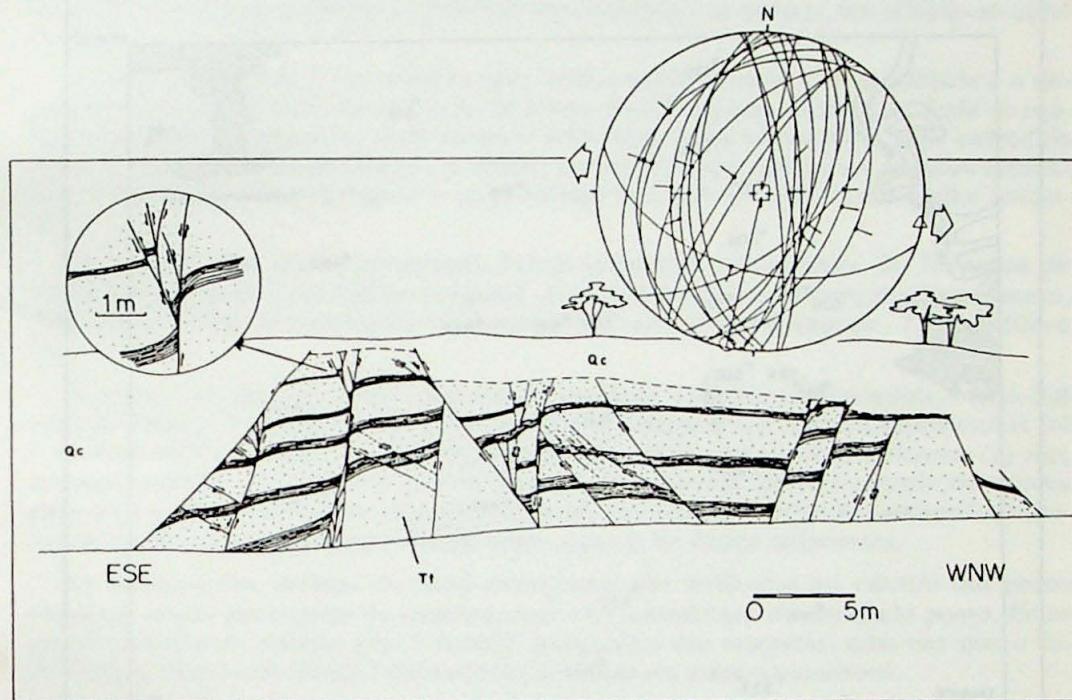
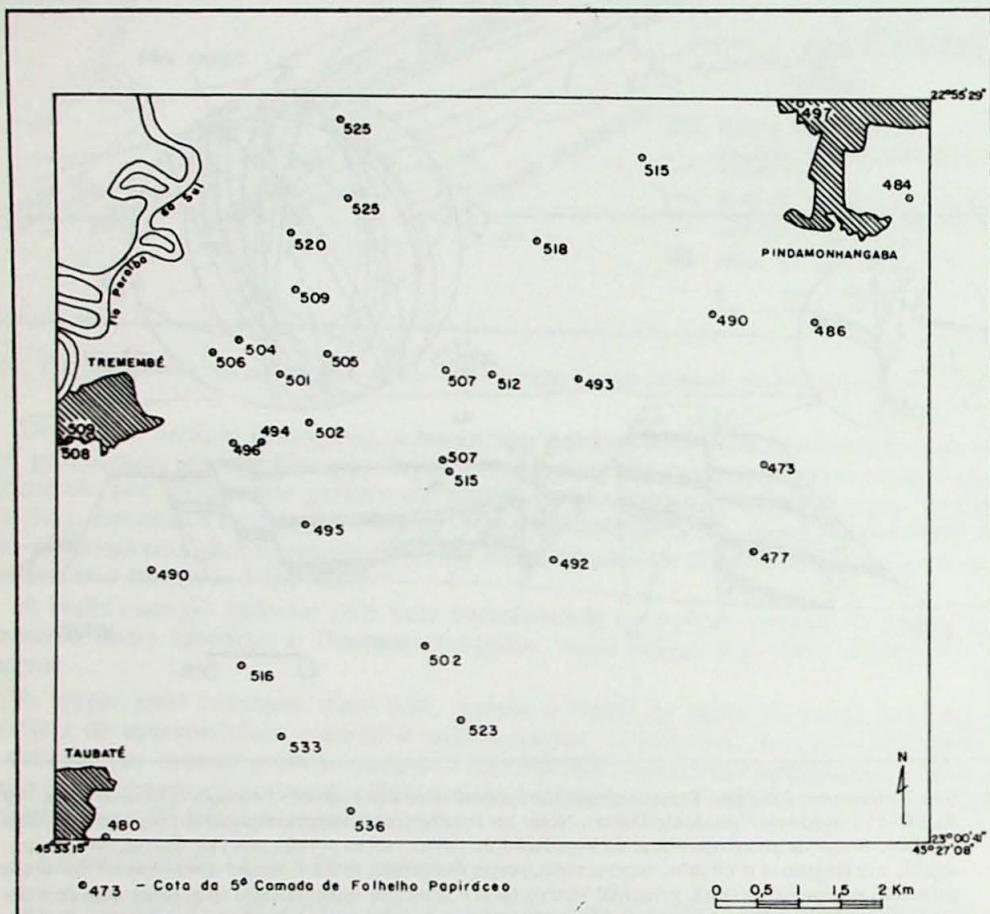


FIG. 2 – Secção transversal à Zona Transtensional de Taubaté. Estrada Taubaté-Taboão a 2,3 km da saída 109 da BR-116 (Rodovia Presidente Dutra). Notar no detalhe (canto superior esquerdo) o padrão de falha em flor. A análise microestrutural da população de falhas está na porção superior direita, onde o quadrado, o triângulo e o círculo, representam, respectivamente, as localizações aproximadas dos eixos principal compressivo (α_1), principal trativo (α_3) e principal intermediário (α_2) (diagrama de Schmidt, hemisfério inferior; círculos máximos – planos de falhas, pontos-estrias) modificado de RICCOMINI *et alii*⁷.

ramento de uma população de falhas associadas a uma estrutura maior em flor pode representar apenas atitudes de famílias de falhas conjugadas e, não necessariamente, a direção principal de movimentação. Da mesma forma, os eixos de dobrar podem igualmente representar conjugados *en-echelon* de uma transcorrência maior. A falta de informações da superfície é, portanto, um obstáculo ao melhor entendimento do arcabouço estrutural da bacia nesta área. Dessa forma, partiu-se para um estudo de subsuperfície valendo-se dos dados de sondagens existentes nessa área.

3. DADOS EMPREGADOS E PROCEDIMENTOS

No período compreendido entre 1949 e 1951, o então Conselho Nacional do Petróleo executou 81 sondagens, algumas até 200 m de profundidade, para pesquisa de folhelho pirobetuminoso na região, das quais 35 estão localizadas aproximadamente no interior do triângulo balizado pelas cidades de Taubaté, Tremembé e Pindamonhangaba (Fig 3).



A observação dos perfis mostrou a presença de até cinco níveis de folhelhos papiráceos. Da correlação estratigráfica lateral entre os poços verificou-se que o nível inferior, de espessura bastante regular, em média de 55 centímetros, apresentava continuidade em toda a porção analisada. Dessa forma o quinto nível de folhelhos papiráceos foi escolhido com *datum* para verificação de seu comportamento espacial bem como a continuidade de feições estruturais observadas na superfície e em subsuperfície, através da elaboração do mapa de contorno estrutural desta camada.

Na elaboração do referido mapa, utilizaram-se dois métodos geoestatísticos: o semi-variograma e a krigagem pontual.

A geoestatística é empregada no estudo de variáveis regionalizadas, ou seja, aquelas que se caracterizam por não serem totalmente determinísticas ou completamente casuais. A variável regionalizada apresenta aparente continuidade espacial manifestada pela tendência que a variável tem de apresentar valores semelhantes em dois pontos situados próximos e cada vez mais diferentes à medida que estes pontos ficam mais distantes.

Como já dito, a variável regionalizada estudada foi a cota de ocorrência da quinta camada de folhelho papiráceo, que está representada em metros, em relação ao nível do mar.

O semi-variograma é um método que, basicamente, mostra a variabilidade e a dependência espacial entre as amostras ao longo de um suporte específico. Pode-se realizar a análise estrutural de uma variável através do semi-variograma, aqui entendida como a verificação da presença ou não de anisotropia nas diferentes direções estudadas. Neste caso, foi empregado o semi-variograma bidimensional para malha irregular.

No cálculo dos semi-variogramas foram utilizadas informações de 35 poços de sondagens dispostos em malha irregular. A distância básica empregada (incremento, "h"), sua tolerância e o ângulo de tolerância foram, respectivamente, 750m, 150m e 10°.

Os semi-variogramas foram calculados em duas direções preferenciais, Norte-Sul e Leste-Oeste. O modelo teórico que melhor se adaptou aos dados experimentais foi o modelo esférico, cujos valores do patamar (C), efeito pepita (Co) e alcance (a) são, respectivamente, 227 m², 0 e 3,5 km (Fig. 4). Em seguida fez-se o cálculo de valores para uma malha regular por krigagem pontual, um processo onde são estimados valores de variáveis espacialmente distribuídas a partir de dados adjacentes.

As informações obtidas no semi-variograma são utilizadas no cálculo dos pesos ótimos a serem associados às amostras que vão estimar um determinado ponto. Estes pesos variarão de acordo com o arranjo geográfico das amostras, uma vez que o semi-variograma é uma função dependente da distância entre as amostras.

A krigagem fornece também o erro associado a cada ponto estimado e esta informação é de grande importância na caracterização da confiabilidade da estimação, sendo esta a maior vantagem do método geoestatístico sobre os métodos convencionais.

A krigagem pontual foi utilizada no cálculo dos valores estimados em uma malha regular de 500 x 500m. Com os valores obtidos, elaborou-se o mapa de contorno estrutural da camada de folhelho (Fig. 5), e o mapa de isovalores dos erros associados aos valores estimados (Fig. 6).

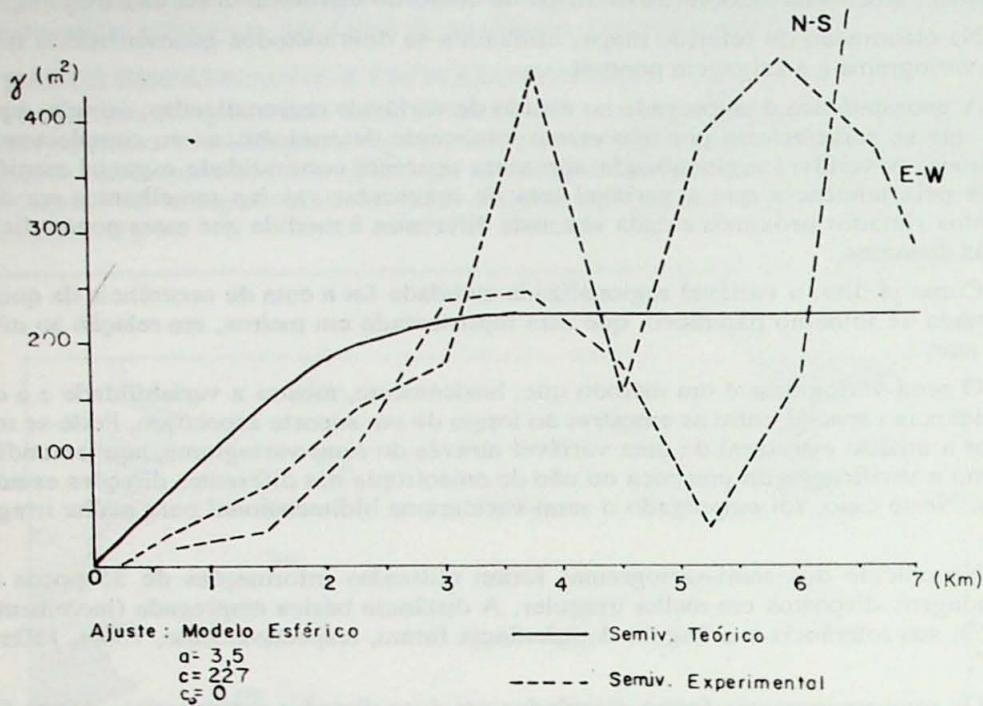


FIG. 4 – Semi-variogramas experimentais da cota de ocorrência da 5^a. camada de folhelho papiráceo.

4. RESULTADOS OBTIDOS

Como produto final foi obtido um mapa de contorno estrutural com curvas de 5 em 5 metros dessa camada de folhelho pariráceo, estimado por valores krigados (Fig. 5).

A camada em análise configura uma sela com altos nos extremos norte e sul e baixos a leste e oeste da área analisada. O alto situado ao norte apresenta comportamento aproximadamente cônico, com geratriz na porção central da área, e orientada inicialmente segundo N-S com inflexão para NW, na porção norte da área. O alto situado ao sul parece configurar feição semelhante, agora com geratriz na porção central do baixo situado a oeste e orientada segundo NW. Existe também um acentuado desnível entre os blocos NW e SE, da ordem de 45 metros (Fig. 7), delimitado por uma reta orientada segundo N20-30E, passando pelo centro *geométrico* da área. Destaque-se a semelhança deste mapa com aquele contruído por SUGUIO⁹, com dados referentes ao nível superior de folhelhos pariráceos.

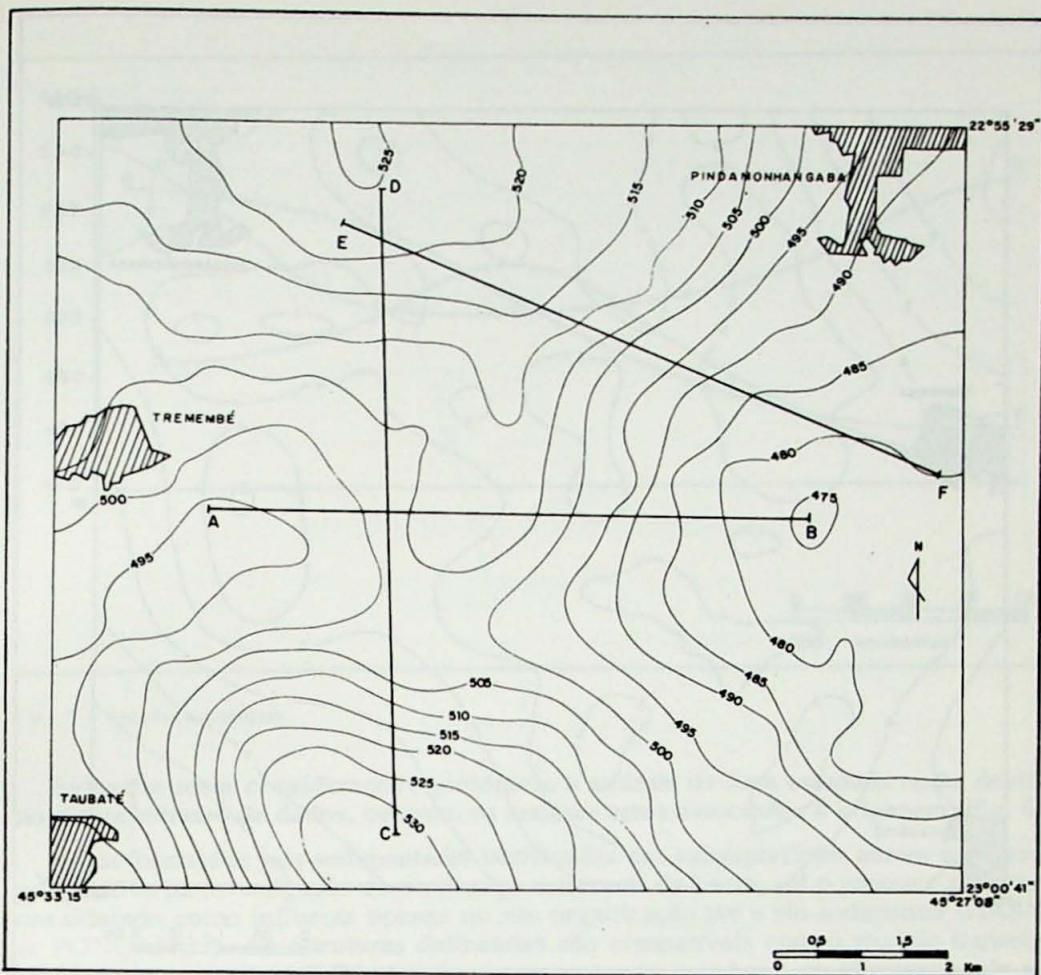


FIG. 5 – Mapa de contorno estrutural da 5^a camada de folhelho papiráceo. As curvas estão representadas em metros (m) em relação ao nível do mar. Este mapa foi elaborado a partir de valores krigados.

Salienta-se ainda que ao analisar o mapa de erros (Fig. 6), nota-se que os maiores valores encontram-se nos extremos SE e NW da área. No entanto, os menores valores encontram-se justamente nas áreas onde foram descritas as estruturas acima, corroborando, desta forma, com as interpretações levantadas.

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

As feições aproximadamente cônicas apresentam boa correlação com dados de eixos de dobras mesoscópicas de estilo semelhante, medidas a oeste da área estudada. Especificamente ao longo do alto situado ao norte quando este orienta-se segundo NNW, é frequente também o desenvolvimento de clivagem de fratura nessa direção.

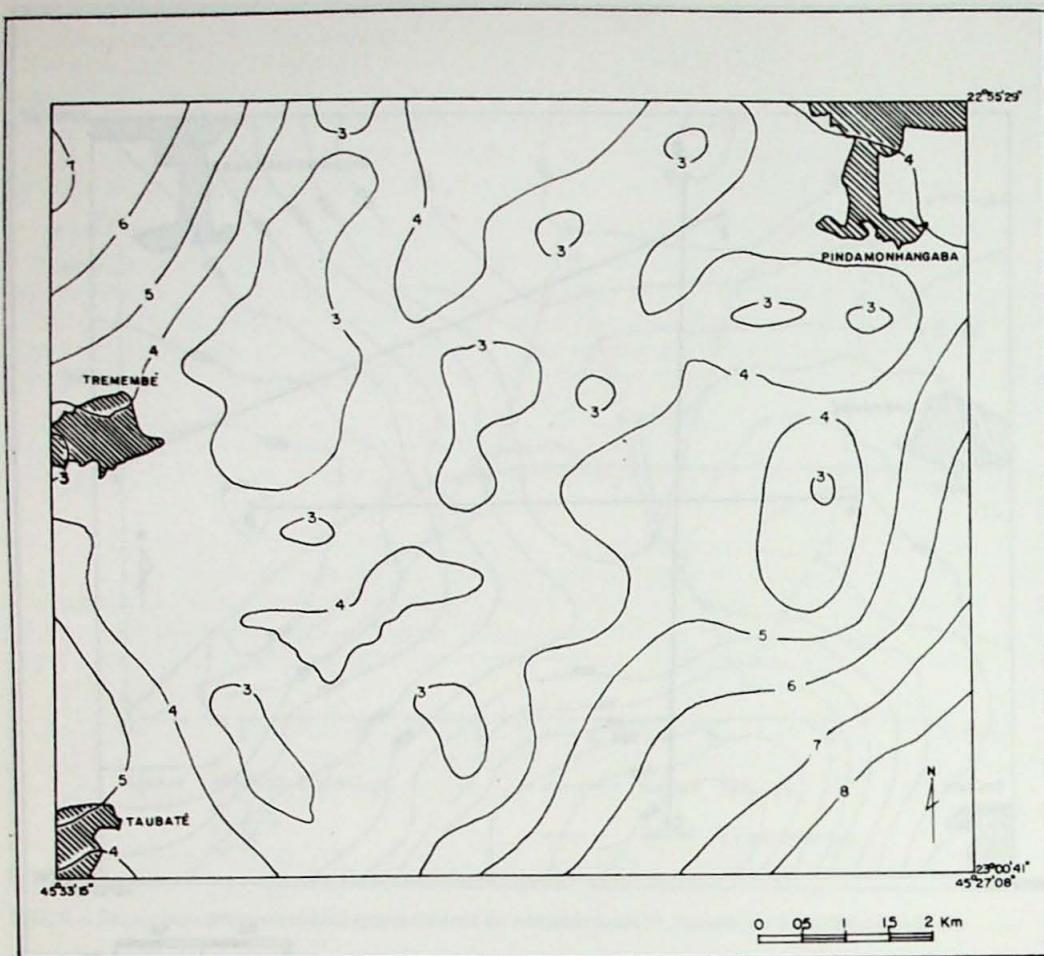


FIG. 6 – Mapa de erros associados à krigagem. O erro está apresentado em porcentagem, em relação ao valor krigado.

O desnivelamento dos blocos NW/SE corresponde à denominada Zona Transtensional de Taubaté, à qual associa-se expressiva sedimentação aluvial ao longo do Rio Una. Na Figura 8 está um sumário da interpretação estrutural da área.

6. CONCLUSÕES

Considerou-se válido o emprego dos métodos geoestatísticos no presente estudo, mesmo levando-se em conta o pequeno número de dados disponíveis (35 poços). Esta conclusão advém da constatação de notável correlação entre o mapa obtido pela krigagem e os dados até então existentes, ou seja, coletados em superfície e a partir do mapa de contorno estrutural do nível superior do folhelho papiráceo.

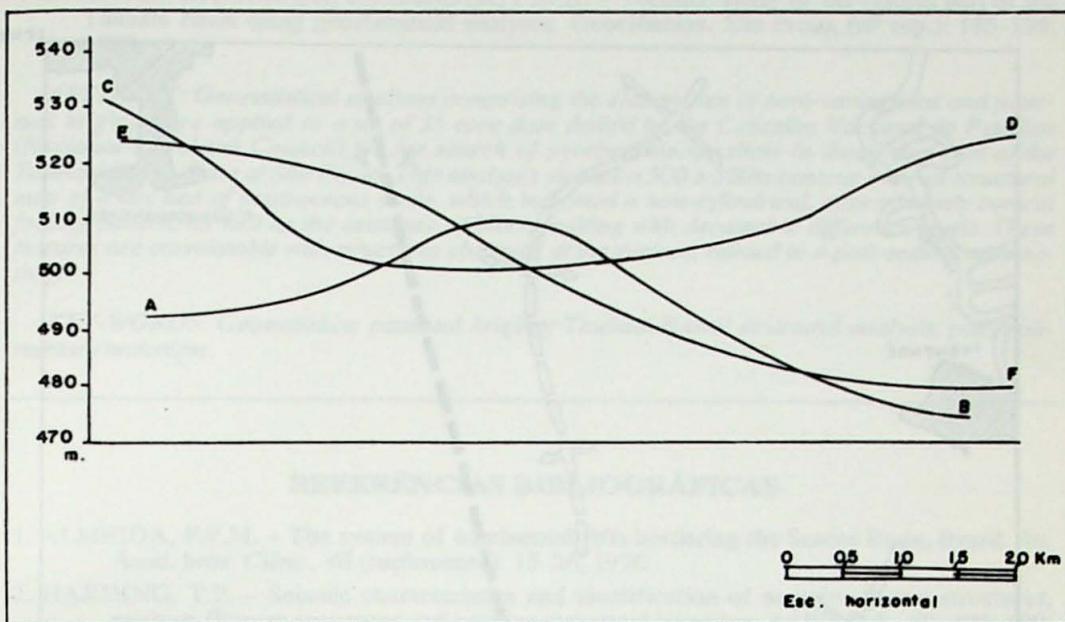


FIG. 7 – Secções estruturais.

Evitou-se tecer considerações geológicas a sudeste da área estudada onde, devido ao menor número de dados, ocorrem os maiores erros associados à krigagem (Fig. 6).

As deformações pós-sedimentares verificadas em subsuperfícies abrem uma nova perspectiva na investigação do arcabouço estrutural da bacia, até o presente momento considerado como influente apenas na sua organização pré e sin-sedimentar (HASUI & PONÇANO³). As estruturas delineadas são compatíveis com o modelo transcorrente dextral, segundo E-W, anteriormente proposto com base em observação de superfície (RICCOMINI⁶), e constituem-se também em importante elemento de orientação na prospecção e aproveitamento de recursos minerais da área, como os folhelhos pirobetuminosos, as argilas, e as raras intercalações de calcários.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos são devidos ao prof. JORGE KAZUO YAMAMOTO, pelo auxílio na elaboração de parte dos mapas em computador.

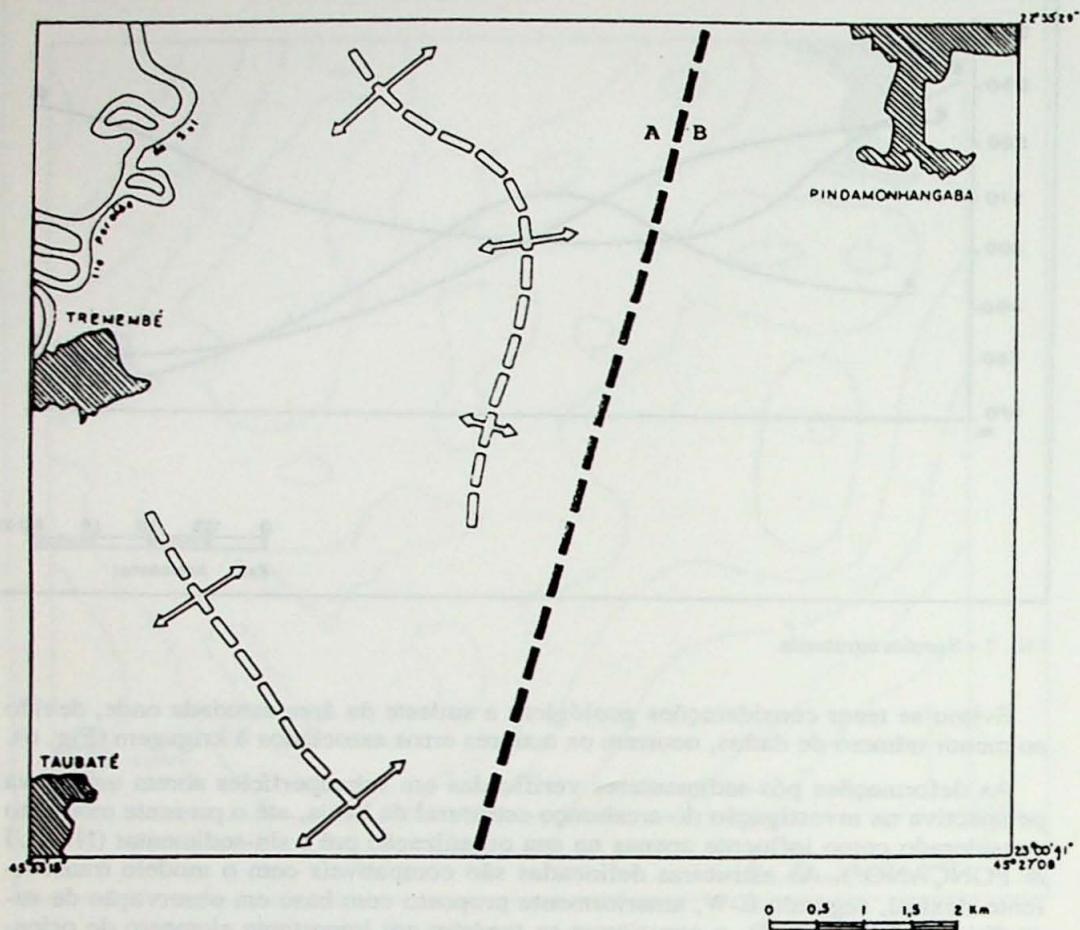


FIG. 8 – Interpretação estrutural da área após o estudo geoestatístico.

TAKIYA, H., RICCOMINI, C., LANDIM, P.M.B. – Tectonic study of the central part of the Taubaté basin using geostatistical analyses. *Geociências*, São Paulo, (nº esp.): 185-196, 1990.

ABSTRACT: Geostatistical analyses comprising the elaboration of semi-variograms and punctual kriging were applied to a set of 35 core data drilled by the Conselho Nacional do Petróleo (National Petroleum Council) for the search of pyrobituminous shale in the central part of the Taubaté Basin, State of São Paulo. This analyses yielded a 500 x 500m contour interval structural map of a key bed of papiraceous shale, which indicated a non-cylindrical, approximately conical folding pattern, as well as the existence of block-faulting with decametric difference levels. These features are correlatable with structures observed at the surface, related to a post-sedimentary activity.

KEY-WORDS: Geostatistics; punctual kriging; Taubaté Basin; structural analysis; post-sedimentary tectonism.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALMEIDA, F.F.M. – The system of continental rifts bordering the Santos Basin, Brazil. *An. Acad. bras. Ciênc.*, 48 (suplemento): 15-26, 1976
2. HARDING, T.P. – Seismic characteristics and identification of negative flower structures, positive flowers structures and positive structural inversion. *AAPG Bull.*, 69: 582-600, 1985
3. HASUI, Y. & PONÇANO, W.L. – Organização estrutural e evolução da Bacia de Taubaté. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30º, Recife, 1978. *Anais*, Recife Sociedade Brasileira de Geologia, 1978 v.1., p. 368-381.
4. MATHERON, G. – *Traité de geostatistique appliquée*. Paris Tchrip, 1962.
5. MELO, M.S. *et alii* – Geologia e evolução do sistema de bacias tafrogênicas continentais do sudeste do Brasil. *Rev. Bras. Geoc.* 15: 193-201, 1985.
6. RICCOMINI, C. – Tansgressão tectônica cenozóica um importante elemento no estudo da evolução estrutural do Cinturão de Dobramentos Ribeira. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 6º, Rio Claro, 1987. *Resumos*. Rio Claro, Sociedade Brasileira de Geologia, Núcleo São Paulo, 1987. p. 15-16
7. RICCOMINI, C. *et alii* – Tectônica e sedimentação no Sistema de Rifts Continentais da Serra do Mar (bacias de Volta Redonda, Resende, Taubaté e São Paulo). In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA RJ-ES, 1º, Rio de Janeiro, 1987. *Anais*. Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira de Geologia, Núcleo Rio de Janeiro, 1987, p. 253-298.
8. RICCOMINI, C. *et alii* – Neotectonic activity in the Serra do Mar Rift System (Southeastern Brasil). *J. South Am. Earth Sci.*, no prelo.
9. SUGUIO, K. – *Contribuição à geologia da bacia de Taubaté-Vale do Paraíba – Estado de São Paulo*. São Paulo, Faculdade de Filosofia Ciências e Letras da Universidade de São Paulo, 1969. (Tese-Doutoramento).