

DESENVOLVIMENTO DE MODELO ESTATÍSTICO DE INTERPRETAÇÃO DE DADOS GEOLÓGICOS MORFO-ESTRUTURAIS APLICADOS À HIDROGEOLOGIA DE ROCHAS FRATURADAS

ADELBANI BRAZ DA SILVA *

RESUMO

Visando estabelecer metodologia científica de prospecção regional de aquíferos fraturados foi escolhida uma área teste para aplicação de análise geo-estrutural e de técnicas geo-matemáticas em dados morfo-estruturais e hidrogeológicos. Procedeu-se um estudo sistemático da evolução tectônica da área com vistas a correlacionar as descontinuidades geológicas com a circulação das águas subterrâneas na área e posteriormente utilizar os procedimentos matemáticos. Com os resultados obtidos foi possível definir um roteiro metodológico de estudos aplicável a áreas de aquíferos fraturados.

INTRODUÇÃO

Este trabalho é um produto do projeto realizado pela Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC, com recursos financeiros do Programa de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico - PADCT, da Financiadora de Estudos e Projetos - FINEP, através do contrato no. 42.86.0524.00.

Os trabalhos desenvolvidos visaram principalmente estabelecer metodologia científica de prospecção de água subterrânea em rochas fraturadas, utilizando-se análise geo-estrutural e técnicas estatísticas de dados regionais. Procurou-se definir estratégias para a caracterização regional do sistema hidráulico de um aquífero fraturado através destas técnicas tendo em vista que, na maioria das vezes, é difícil fazê-lo através de métodos usuais de hidrogeologia e que a infiltração, circulação e armazenamento das águas subterrâneas em meio fissurado são condicionadas aos eventos tectônicos e ao fraturamento das rochas.

A área de estudo está compreendida entre os paralelos de 19°55' e 20°10' de latitude sul e os meridianos 40°15' e 40°30' de longitude oeste. Situa-se na porção centro-sul do Estado de Minas Gerais, distante aproximadamente 50km a oeste de Belo Horizonte, na bacia hidrográfica do alto rio São Francisco, abrangendo parte dos municípios de Mateus Leme, Igarapé e Itaúna, totalizando uma superfície de aproximadamente 500km².

Tendo em vista os objetivos propostos, a abordagem metodológica efetuou-se em três etapas. Na primeira etapa, enfocaram-se aspectos geológicos, estruturais, hidroclimáticos, hidroclimáticos, hidrogeológicos e hidroquímicos. Após a conclusão destes trabalhos, iniciou-se a segunda etapa, onde foi realizada

*Geólogo PhD do IGC/UFMG. Rua Panema 338, BEZ-MG, Cep 31.130-620.

análise de fraturamento dos diferentes tipos de rochas, baseando-se em informações obtidas em foto-interpretção e levantamento detalhado de campo. Posteriormente, foram empregadas técnicas geomatemáticas de análises estatísticas tri-dimensionais de tendência e análises multivariantes, visando estabelecer os procedimentos mais adequados à resolução do esquema de funcionamento do aquífero, bem como definir as suas relações com o sistema de deformação das rochas da área em estudo. Através das análises de tendência, procederam-se os estudos da distribuição espacial das feições morfo-estruturais (diáclases e foto-lineamentos) e da orientação dos foto-lineamentos. Estes estudos visaram a delimitação de zonas com diferentes padrões estruturais e com características próprias do ponto de vista tectônico e geológico. A terceira etapa constou da integração dos resultados e interpretação dos dados obtidos com as técnicas convencionais e as geomatemáticas. Inicialmente, esta integração foi realizada através de correlação dos polinômios das superfícies de tendência. Em seguida, foi complementada com as comparações visuais dos diversos mapas de valores observados e de tendência das feições morfo-estruturais. Após esta interpretação dos modelos estatísticos, foi efetuada uma comprovação, no campo, visando testar sua aplicabilidade na pesquisa hidrogeológica.

CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS

A área alvo do estudo está situada na região do Quadrilátero Ferrífero e possui razoável complexidade no que diz respeito à natureza das rochas e estruturas estratigráficas. Pode-se definir quatro grandes unidades lito-estratigráficas que ocorrem na área. São o complexo policristalino do embasamento, supergrupo rio das Velhas, supergrupo Minas e grupo Itacolomi.

O padrão estrutural da região é complexo, caracterizado por um embasamento cristalino deformado policiclicamente, um dobramento de grande amplitude (porção oeste do sinclinal da Piedade), diversos estilos de falhamento ocorrendo nas estruturas arqueanas e proterozóicas, e ainda as feições devidas ao diapirismo granítico.

HIDROGEOLOGIA

A água subterrânea na área ocorre nos aquíferos granulares, constituídos das aluviais e do manto de decomposição das rochas, e no aquífero fissural das rochas proterozóicas. O aquífero fissural pode ser subdividido em sistemas distintos, considerando-se a composição litológica, grau de fraturamento, posição topográfica e características hidrogeológicas das rochas da área.

O Supergrupo Minas, que forma a serra Azul e a serra da Samambaia, é uma das principais zonas de recarga regional do aquífero fissural. São quartizitos, itabiritos, filitos impuros a carbonáticos e dolomitos dispostos em elevada posição topográfica e intensamente fraturados.

As rochas do Grupo Nova Lima podem ser subdivididas de acordo com suas características geológicas, estruturais e topográficas, em vários sistemas hidrográficos bem definidos. O de maior expressão areal na área é o dos xistos associados às coberturas detríticas sobrepostas. Este sistema aquífero, quando localmente apresenta intercalação de rochas quartzíticas, tem, excepcionalmente, bom potencial hídrico subterrâneo, como se observa na região das cidades de Mateus Leme e de Joatuba. O outro sistema aquífero do Grupo Nova Lima é o formado pela sequência de rochas básicas, ultrabásicas, quartzíticas e formação ferríferas, situadas ao norte de Mateus Leme, e na serra de Santo Antônio. Esta faixa de rochas teve um pronunciado tectonismo, o que resultou em rochas intensamente fraturadas, que estão associadas, atualmente, a um acidentado relevo.

O sistema hidrogeológico das rochas do complexo basal indiferenciado tem considerável distribuição em toda a área estudada. Predominam gnaisses graníticos de granulação fina a média, pouco fraturados, observados nos maciços formadores da serra dos Caboclos e parte da serra do Caxambu. Do ponto de vista hidrogeológico, as rochas do complexo basal são de baixo potencial.

As vazões específicas na área, normalmente baixas, variam de 0,413 l/s/m a 0,06 l/s/m, com a moda de 0,05 l/s/m. Não são disponíveis dados sobre transmissividade e armazenamento dos aquíferos da região. Os níveis estáticos dos poços variam de 15,0 a 1,0m, com valores modais de 2,0m. A profundidade dos poços, apesar de não ser um parâmetro confiável, pode dar uma ordem de grandeza do nível de fraturamento dos aquíferos da região. O poço mais profundo encontrado foi de 163m, sendo que normalmente os poços foram perfurados de 80 a 100m.

ANÁLISE GEO-ESTRUTURAL

A origem das diáclases, diferentemente das falhas, ainda é obscura. Diáclases assistemáticas, de distribuição caótica podem ocorrer por fraturamento hidráulico, contração de material, alívio de carga, variação volumétrica durante o intemperismo ou variações diurnas de temperatura. Aquelas de ocorrência sistemática que desenvolvem padrões regionalmente consistentes devem ter se formado sob estados de tensão tectônico, que mostram constância tanto na orientação quanto em magnitude. Dessa forma, a maioria dos geólogos considera as diáclases como produto das últimas fases de atividade orogénica durante períodos de soergimento ou pela liberação de energia de deformação elástica armazenada, talvez milhões de anos após o tectonismo principal. Sistemas regulares de diáclases podem ser formados na cobertura de regiões cratônicas onde não ocorrem atividades orogénicas, talvez induzidas pela estrutura do embasamento ou então por suaves movimentos de soergimento ou subsistência.

Analisando-se individualmente os diagramas obtidos para cada afloramento, foi construído um diagrama sinóptico, onde foram

lançados os máximos observados, definindo-se cinco conjuntos relativos às diáclases de alto ângulo (J1 a J5) de importância regional e quatro de baixo ângulo (J6 a J9), de ocorrência restrita. As orientações aqui determinadas e representadas no diagrama de distribuição e dispersão da direção nos máximos para as fraturas de alto ângulo mostram boa coincidência com a rosácea de fotolineamentos, obtida para toda a área, o que confirma o seu caráter regional (figura 1).

Com base nos dados obtidos nesse levantamento e no atual estado de conhecimento sobre a evolução geológico-estrutural do Quadrilátero, pode-se constatar um intenso fraturamento segundo cinco direções principais constantes em toda a região. As fraturas possuem forte condicionamento simétrico às estruturas regionais, mas são em sua grande maioria bastante tardias em relação às estruturas dúcteis associadas ao soerguimento pós-orogênico e extensão durante a separação continental, fenômenos que produzem tipicamente fraturamento de caráter supra-regional, cortando litossomas de diferentes idades como os encontrados na região.

TRATAMENTO ESTATÍSTICO DE TENDÊNCIA DE DADOS ESTRUTURAIS MÉTRICOS

O Estudo das diáclases, fraturas e falhas foi realizado com a aplicação da técnica de análise de tendência aplicada à avaliação de sua distribuição espacial, tomando como parâmetros os comprimentos das estruturas, seu número e seus ângulos. Foram utilizados dois programas distintos para se poder realizar a avaliação desejada: em um deles pode-se tratar parâmetros métricos e no outro, parâmetros angulares.

O tipo de interpretação aqui discutida não é a convencional própria à geologia estrutural, mas agrega a esta algumas considerações que permitem aumentar a segurança de decisões na área de hidrogeologia, particularmente aquela que diz respeito à escolha de áreas mais propícias a se atingir um reservatório de água subterrânea, situação esta que é tanto mais sensível a erros quando se trata de uma região de aquíferos fraturados.

O programa de computador TRENDSUP (Landim et alii, 1978-B), modificado por Silva, A.B. (1984), usado nos processamentos estatísticos dos dados morfo-estruturais, aplica-se os métodos polinomiais não ortogonais para o cálculo das superfícies de tendências. Ficou bem demarcado que as tendências e as fraturas por litossoma parecem de fato corresponder a três respostas distintas aos mesmos esforços de deformação. Os mapas regionais de resíduos tomados pelos dados de comprimento e de número de fraturas oferecem muitas coincidências das isolinhas zero, encontrando-se igualmente boa correspondência entre as áreas negativas e positivas.

As estruturas lineares determinadas em análise aerofotogramétrica foram aqui tratadas com o intuito de se determinar suas tendências direcionais expressas pelos azimutes. Foram realizadas

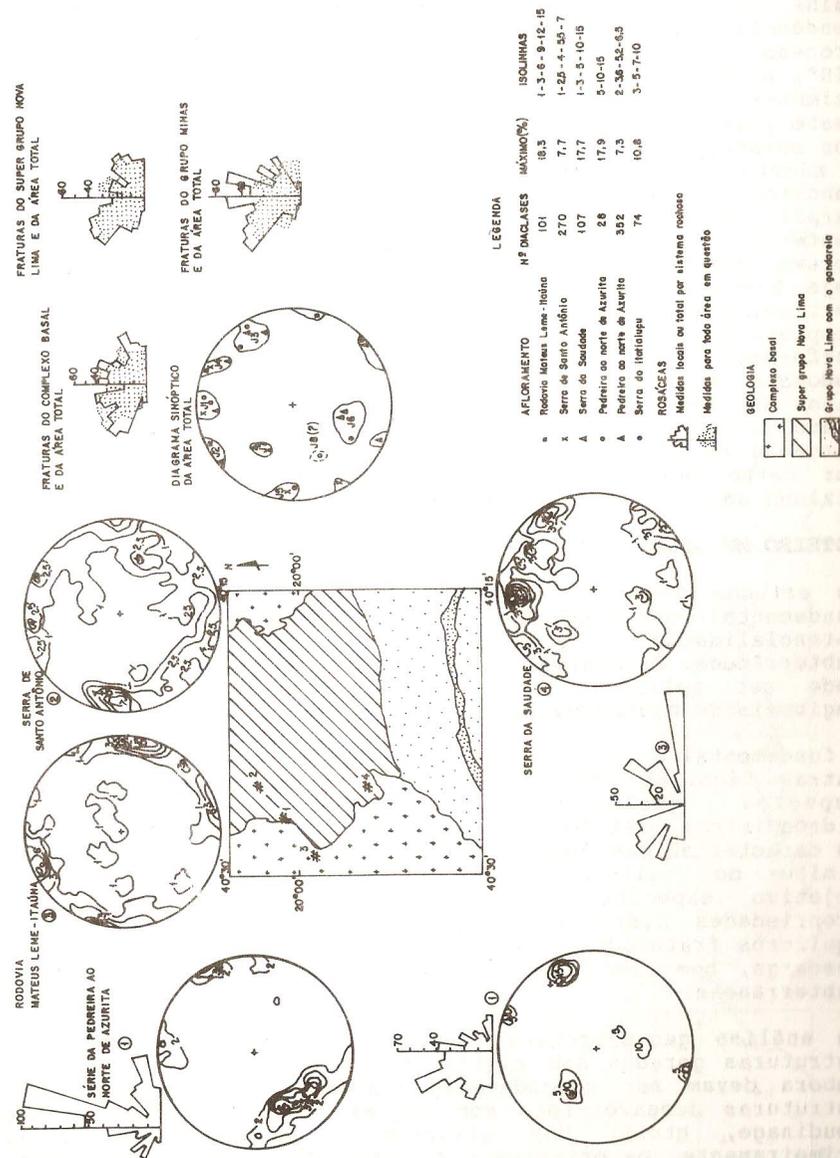


FIGURA 1 - SINOPSE ESTRUTURAL DE FRATURAS NA ÁREA DE MATEUS LEME

duas avaliações, uma com a geração de rosáceas por unidade de malha, e outra com a aplicação do programa de análise de tendência vetorial. O programa de computador utilizado no processamento estatístico dos azimutes foi o "VECTOR TREND ANALYSIS", elaborado por FOX (1967). O mapa de tendência das direções azimutes das fraturas mostra uma distribuição determinante de oeste para leste, o que vem de encontro às análises de tendência dos parâmetros métricos das fraturas, a saber, seus comprimentos e número por unidade de malha. Desde o ponto de vista desta tendência azimutal a área é monótona (figura 2). Todavia, algumas características devem ser apreciadas: a) a direção predominante oeste-este faz um ângulo médio de 45º com a direção média do relevo, sobretudo no Supergrupo Nova Lima, ainda que este relevo seja bastante associado a um número notório de fraturas; b) particularmente as tendências manifestas sobre as rochas do complexo basal têm direções NW-SE e SW-NE, refletindo a relação morfo-estrutural com a presença das duas serras a noroeste e sudoeste da área; c) em contrapartida, a serra Azul do Grupo Minas não demonstra localmente um controle radial às tendências, sendo estas mesmas paralelas ao flanco norte da serra; d) a nordeste da área, ligeira inflexão da tendência para NE indica por certo uma nova relação morfo-estrutural, já que se está vizinha ao leito do rio Paraopeba (figura 3).

ROTEIRO METODOLÓGICO

Os estudos desenvolvidos serviram para ressaltar os aspectos fundamentais das condições hidrogeológicas da área e delinear as potencialidades regionais dos seus recursos hídricos subterrâneos. É possível agora sugerir um roteiro de pesquisa que pode ser aplicado ou adaptado aos estudos hidrogeológicos regionais de aquíferos fraturados.

É fundamental o conhecimento básico do aquífero para aplicação de outras técnicas não usuais. Neste conhecimento incluem-se os aspectos geológicos, hidroclimáticos, hidrológicos, hidroquímicos, litológicos e outros. Deve-se dar ênfase especial às características dimensionais, visando definir a geometria e os limites do aquífero e as características hidrodinâmicas, com objetivo específico de identificar zonas com diferentes propriedades hidráulicas. É importante também no estudo dos aquíferos fraturados a definição precisa das áreas de recarga e descarga, bem como a direção e o sentido dos fluxos das águas subterrâneas.

Na análise geo-estrutural devem ser enfocados os estudos das estruturas geradas sob regime rúptil (falhas e fraturas), muito embora devam ser consideradas também as informações sobre as estruturas desenvolvidas sob regime dúctil (dobras, foliações, boudinage, etc.). Nos afloramentos deve-se individualizar, primeiramente, os principais sistemas de juntas existentes e de sua distribuição, bem como de outras particularidades de interesse, como, por exemplo, zonas de cisalhamento. Deve-se medir a xistosidade local, para se ter um valor padrão para cada

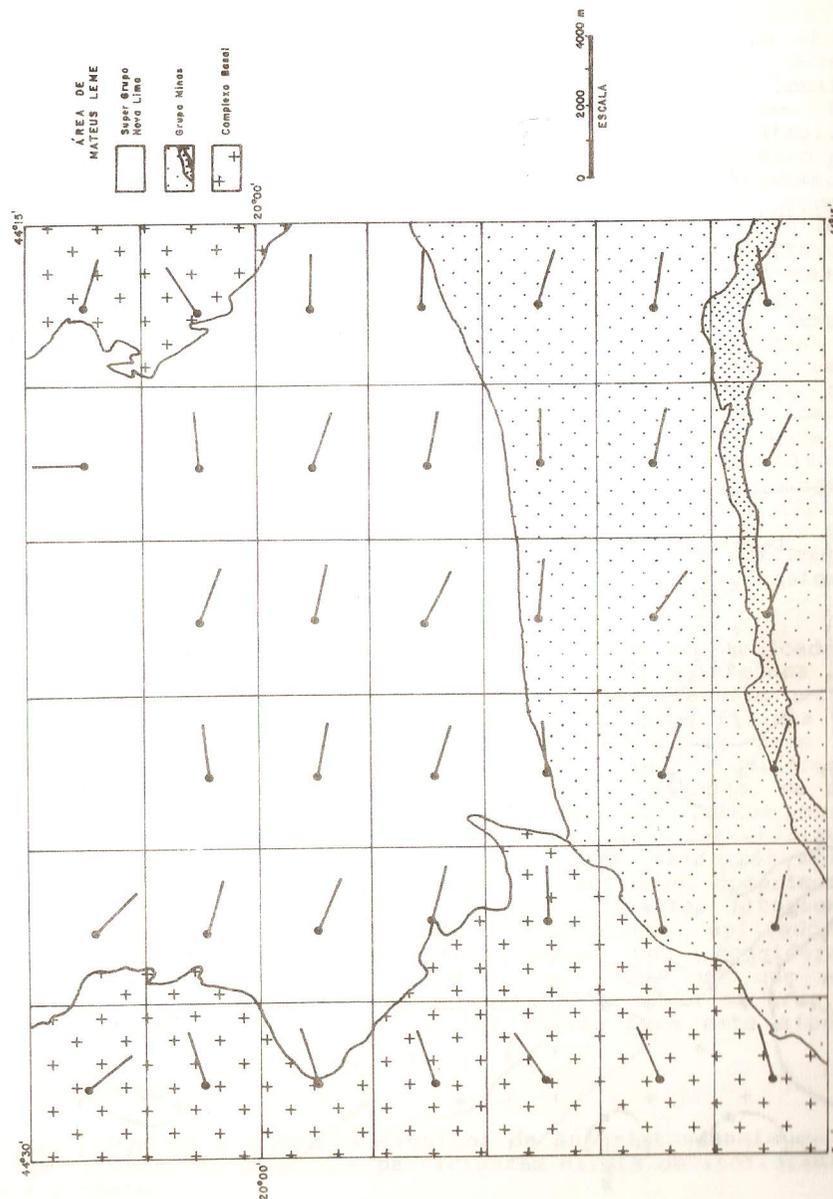


FIGURA 2 - MAPA DAS MÉDIAS DAS FRATURAS POR UNIDADE DE MALHA

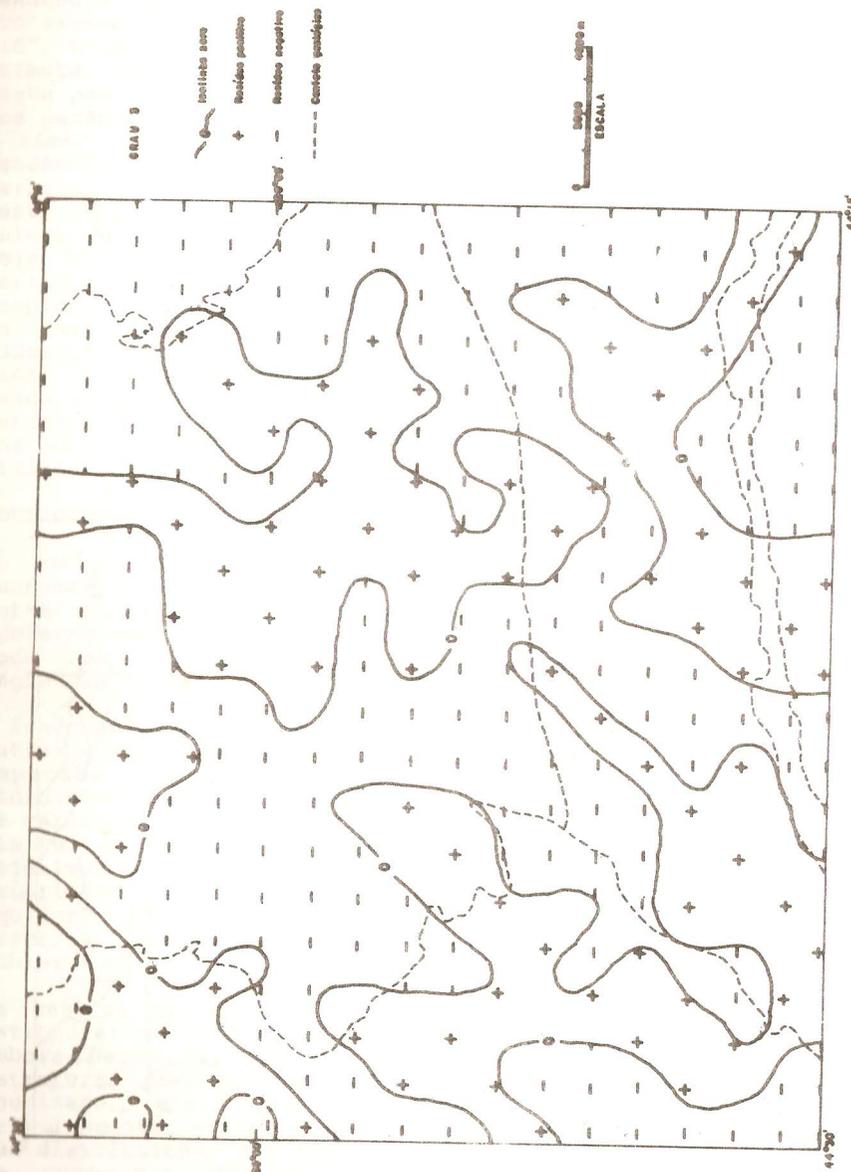


FIGURA 3 - MAPA DE RESÍDUOS À TENDÊNCIA DOS VALORES CALCULADOS PARA O SOMATÓRIO DOS NÚMEROS DE FRATURAS POR UNIDADE DE MALHAS

afloramento e identificar os sistemas de clivagem de fratura, anotando-se o espaçamento e a direção dos mesmos. Além das atitudes geológicas das fraturas, devem ser observados o seu comprimento e espaçamento de abertura e a existência ou não de preenchimento por material singenético ou pós-genético. Deve-se procurar separar as influências dos esforços regionais e locais e identificar as reações dos litossomas a estes esforços. Além disso, deve-se observar as relações temporais entre as estruturas dúcteis e rúpteis, principalmente os efeitos de soerguimento pós-orogênicos sobre as estruturas dúcteis pré-existentes. É importante a identificação de fenômenos regionais que produzem tipicamente fraturamento de caráter supra-regional, cortando litossomas de diferentes idades geológicas e afetando estruturas pré-existentes. Deve-se pesquisar também as estruturas e tectoglifos que indiquem fraturas de cisalhamento provocadas por eventos compressivos de caráter rúptil. Nos trabalhos de campo e nas análises interpretativas devem ser observados os condicionamentos das dimensões das fraturas com os litossomas, porque na maioria das vezes um mesmo evento tectônico pode provocar diferentes fraturamentos nos diversos litossomas de uma área. Em muitos casos, serão necessários estudos para se estabelecer parâmetros indicativos de intensidade relativa de fraturamento, através de levantamento sistemático de densidade de fraturas (espaçamento por metro de afloramento). Este tipo de levantamento requer a existência de muitos afloramentos na área de estudo. Nas áreas onde ocorreram várias fases de deformações dúcteis, é muito importante ainda a identificação dos esforços que provocaram estas deformações.

As análises estatísticas tri-dimensionais podem ser aplicadas a dados morfo-estruturais, parâmetros hidrodinâmicos e hidroquímicos, direção de lineações, foto-interpretadas e outras. É importante o conhecimento das características físicas dos parâmetros utilizados nas técnicas geo-matemáticas para não manipular dados incoerentes. Vale ressaltar que os diferentes litossomas podem influenciar fortemente nos resultados, de modo que deve-se analisar previamente a relação dos dados morfo-estruturais com os litossomas. Os dados que podem ser utilizados na análise da distribuição espacial das características morfo-estruturais do aquífero são as fraturas (quantidade, comprimento, densidade, etc.) e os seus ângulos para diferentes litossomas. Convém lembrar que nos estudos estatísticos aplicados à hidrogeologia de meio fraturado devem ser considerados prioritariamente os valores modais, em vista de que eles representam ou se aproximam da grandeza mais comum na área. Os valores médios têm pouco significado físico para este tipo de aquífero.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece a todos os técnicos da Superintendência de Recursos Naturais do CETEC que participaram direta ou indiretamente deste projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

01. FOX, W. (1967): Fortran IV program for vector trend analysis of directional data. Computer Contribution 11. U.S.G.S. The University of Kansas, Lawrence, 11:1-35.
02. LANDIM, P.B.M.; BOGAERT, M.O.; SILVA, A.P. e SZULMAN, S. (1978): Análise da superfície de tendência. Secretaria de Obras e Meio Ambiente do Estado de SP. Departamento de Águas e Energia Elétrica, São Paulo, 52p (inédito).
03. SILVA, A.B. (1984). Análise Morfoestrutural Hidrogeológica e Hidroquímica no Estudo do Aquífero Kárstico da Jaíba, Norte de Minas Gerais. USP. Tese de Doutorado. S.Paulo (inédita).